



Strategi Starting Star-Delta Berbasis PLC untuk Pengendalian Motor Induksi Tiga Fasa yang Efisien

Andi Muhammad Arif Bijaksana^{1*}, Hasbi², Lius³

^{1*, 2, 3}Fakultas Teknik/Teknik Elektro, Universitas Islam Makassar, Indonesia

andimaribijaksana.dty@uim-makassar.ac.id¹, hasbihasbi@gmail.com², 123lius@gmail.com³

Diterima: 10 Januari 2026

Disetujui: 30 Januari 2026

Dipublikasi: 10 Februari 2026

ABSTRAK

Abstrak: Motor induksi tiga fasa banyak digunakan pada sistem industri karena keandalan dan konstruksinya yang sederhana, namun proses starting sering menimbulkan arus awal yang tinggi sehingga dapat menurunkan efisiensi dan mempercepat degradasi peralatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menganalisis strategi starting star-delta berbasis Programmable Logic Controller (PLC) sebagai solusi pengendalian motor induksi tiga fasa yang efisien dan fleksibel. Metode penelitian meliputi perancangan rangkaian pengendalian, pembuatan program ladder logic pada PLC, serta pengujian kinerja sistem pada tahap transisi dari hubungan star ke delta. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan PLC memungkinkan pengaturan waktu starting yang lebih presisi dibandingkan sistem konvensional, serta menyederhanakan konfigurasi dan modifikasi parameter operasi tanpa perubahan perangkat keras. Strategi yang diusulkan terbukti mampu meningkatkan keandalan pengendalian, mengurangi kompleksitas instalasi, dan mendukung kebutuhan otomasi industri modern. Dengan demikian, sistem starting star-delta berbasis PLC dapat menjadi alternatif yang efektif dalam modernisasi pengendalian motor induksi tiga fasa di lingkungan industri.

Kata Kunci: motor induksi tiga fasa; star-delta; PLC; pengendalian motor; efisiensi sistem

Abstract: Three-phase induction motors are widely used in industrial systems due to their robustness and simple construction; however, the starting process often generates high inrush currents that may reduce system efficiency and accelerate equipment degradation. This study aims to develop and analyze a Programmable Logic Controller (PLC)-based star-delta starting strategy for efficient control of three-phase induction motors. The research method includes control circuit design, ladder logic programming on the PLC, and performance testing during the transition from star to delta connection. The results indicate that the PLC-based approach enables more precise starting time control compared to conventional systems, while simplifying system configuration and operational parameter adjustment without hardware modification. The proposed strategy improves control reliability, reduces installation complexity, and supports the requirements of modern industrial automation. Therefore, the PLC-based star-delta starting system represents an effective solution for upgrading three-phase induction motor control in industrial applications.

Keywords: Three-Phase Induction Motor; Star-Delta Starting; Programmable Logic Controller; Motor Control; System Efficiency

PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa merupakan penggerak utama pada berbagai aplikasi industri karena memiliki konstruksi sederhana, keandalan tinggi, serta biaya perawatan yang relatif rendah [1], [2]. Namun demikian, proses starting motor induksi sering menimbulkan arus awal yang besar sehingga berpotensi menyebabkan penurunan tegangan sistem, peningkatan rugi daya, dan gangguan terhadap peralatan listrik lainnya [3], [4]. Oleh karena itu, diperlukan metode starting yang mampu menekan arus awal tanpa mengurangi kinerja operasional motor secara signifikan [5], [6].

Metode starting star-delta telah lama digunakan sebagai solusi konvensional untuk mengurangi arus masuk awal dengan cara menurunkan tegangan pada saat motor mulai beroperasi [7], [8]. Meskipun efektif dalam menekan arus starting, sistem star-delta konvensional berbasis kontaktor dan timer mekanis memiliki keterbatasan dalam fleksibilitas pengaturan waktu, kompleksitas instalasi, serta kesulitan dalam modifikasi parameter operasi [9], [10]. Keterbatasan tersebut mendorong pengembangan sistem pengendalian yang lebih adaptif dan mudah dikonfigurasi sesuai kebutuhan industri modern [11], [12].

Programmable Logic Controller (PLC) telah banyak diadopsi dalam sistem otomasi industri karena kemampuannya dalam menjalankan fungsi logika, pengaturan waktu, dan sequencing secara presisi melalui pemrograman perangkat lunak [13], [14]. Integrasi PLC pada sistem starting motor induksi memungkinkan pengaturan waktu transisi star-delta yang lebih akurat, sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap komponen mekanis yang rentan aus [15], [16]. Selain itu, penggunaan PLC juga mendukung integrasi dengan sistem monitoring, HMI, dan konsep otomasi industri berbasis Industry 4.0 [17], [18].

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas penerapan PLC pada pengendalian motor induksi tiga fasa, namun sebagian besar masih berfokus pada aspek implementasi dasar tanpa analisis mendalam terhadap efisiensi pengendalian dan kemudahan rekonfigurasi sistem [19], [20]. Beberapa studi juga menunjukkan bahwa optimasi logika ladder dan pengaturan waktu transisi yang tepat dapat berkontribusi signifikan terhadap peningkatan keandalan dan umur peralatan listrik [21], [22]. Dengan demikian, masih terdapat peluang penelitian untuk mengembangkan strategi starting star-delta berbasis PLC yang lebih efisien dan aplikatif [23], [24].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menganalisis strategi starting star-delta berbasis PLC sebagai solusi pengendalian motor induksi tiga fasa yang efisien, fleksibel, dan mudah diimplementasikan pada sistem industri [25], [26]. Pendekatan yang diusulkan menitikberatkan pada optimalisasi pengaturan waktu transisi melalui ladder logic serta penyederhanaan arsitektur pengendalian dibandingkan sistem konvensional [27], [28]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam modernisasi sistem starting motor induksi serta mendukung pengembangan otomasi industri yang andal dan berkelanjutan [29], [30]. Adapun penjelasan motor induksi tiga fasa beserta komponennya sebagai berikut:

1. Motor Induksi Tiga Fasa. Motor induksi tiga fasa merupakan jenis motor listrik yang paling banyak digunakan dalam aplikasi industri karena karakteristiknya yang kuat, sederhana, dan memiliki keandalan operasional yang tinggi [1], [2]. Prinsip kerja motor induksi tiga fasa didasarkan pada pembentukan medan magnet putar pada stator yang menginduksikan arus pada rotor sehingga menghasilkan torsi mekanik [3], [4]. Keunggulan utama motor ini meliputi biaya perawatan yang rendah, umur pakai yang panjang, serta kemampuan beroperasi secara kontinu pada berbagai kondisi beban [5], [6]. Meskipun demikian, motor induksi tiga fasa memiliki kelemahan pada saat starting, khususnya terkait dengan besarnya arus masuk awal yang dapat mencapai beberapa kali arus nominal [7], [8]. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 1.



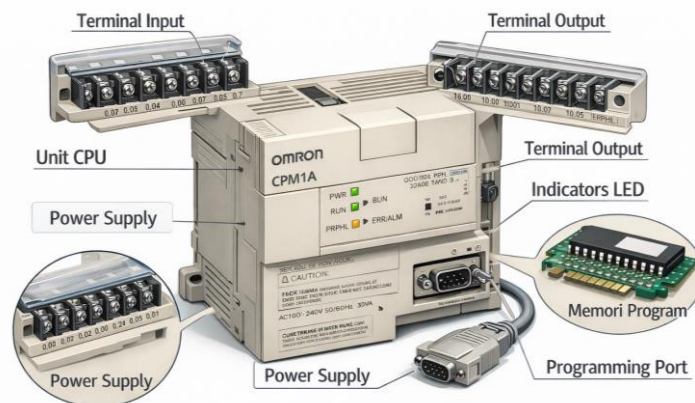
Gambar 1: Motor Induksi Tiga Fasa (A.MA Bijaksana, 2025)

Gambar 1, ditunjukkan konstruksi motor induksi tiga fasa, yaitu mesin listrik arus bolak-balik yang bekerja berdasarkan prinsip medan magnet berputar yang dihasilkan oleh arus tiga fasa pada kumparan stator. Motor ini banyak digunakan pada aplikasi industri karena konstruksinya yang sederhana, kuat, serta memiliki efisiensi dan keandalan yang tinggi. Motor induksi tiga fasa terdiri atas dua bagian utama, yaitu stator dan rotor, yang dilengkapi dengan beberapa komponen pendukung.

Secara keseluruhan, motor induksi tiga fasa bekerja melalui interaksi medan magnet berputar pada stator dengan arus induksi di rotor, sehingga menghasilkan torsi dan putaran mekanik. Setiap komponen memiliki peran penting dalam menjamin kinerja, keandalan, dan umur operasi motor, menjadikan motor induksi tiga fasa sebagai penggerak utama dalam sistem industri modern.

Metode Starting Star-Delta. Metode starting star-delta merupakan teknik pengasutan motor induksi yang bertujuan untuk menurunkan arus starting dengan cara menghubungkan belitan stator dalam konfigurasi bintang pada saat awal operasi [9], [10]. Pada tahap awal, hubungan star menyebabkan tegangan fasa motor menjadi lebih rendah sehingga arus dan torsi starting dapat dikurangi secara signifikan [11], [12]. Setelah motor mencapai kecepatan tertentu, konfigurasi belitan diubah ke hubungan delta untuk memungkinkan motor beroperasi pada tegangan dan daya nominal [13], [14]. Metode ini banyak diterapkan pada motor induksi berdaya menengah hingga besar karena relatif sederhana dan efektif dibandingkan metode starting langsung (DOL) [15], [16].

2. Programmable Logic Controller (PLC). Programmable Logic Controller (PLC) adalah perangkat pengendali digital berbasis mikroprosesor yang dirancang untuk mengotomatisasi proses industri melalui pemrograman logika, timing, dan sequencing [17], [18]. PLC memiliki keunggulan utama dalam fleksibilitas pemrograman, keandalan tinggi, serta kemudahan integrasi dengan perangkat input-output industri [19], [20]. Dalam pengendalian motor listrik, PLC mampu menggantikan rangkaian kontrol konvensional berbasis relai dan timer mekanis yang memiliki keterbatasan dalam hal presisi dan umur pakai [21], [22]. Selain itu, penggunaan PLC memungkinkan perubahan parameter operasi dilakukan melalui perangkat lunak tanpa perlu modifikasi rangkaian fisik [23], [24]. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2: PLC Omron CPM1A dan komponennya (A.M.A Bijaksana, 2025)

Gambar 2 diperlihatkan Programmable Logic Controller (PLC) Omron tipe CPM1A, yang digunakan sebagai perangkat pengendali utama dalam sistem otomatisasi industri, khususnya pada pengendalian motor induksi tiga fasa. PLC ini bekerja sebagai pengganti rangkaian kontrol konvensional berbasis relai dengan tingkat keandalan dan fleksibilitas yang lebih tinggi.

Fungsi PLC Omron CPM1A dalam Sistem Kendali. PLC Omron CPM1A digunakan untuk mengatur urutan kerja sistem secara otomatis, seperti pada pengendalian starting motor induksi tiga fasa hubungan bintang-segitiga (Y-Δ). PLC menerima sinyal input, memprosesnya sesuai logika

ladder diagram, dan mengendalikan kontaktor motor dengan waktu dan urutan yang tepat sehingga sistem bekerja lebih aman, efisien, dan mudah dikendalikan.

3. Pengendalian Motor Berbasis PLC. Pengendalian motor berbasis PLC memungkinkan implementasi logika pengasutan dan proteksi motor secara lebih terstruktur dan terkontrol dibandingkan sistem konvensional [25], [26]. Melalui pemrograman ladder logic, PLC dapat mengatur urutan operasi kontaktor, waktu transisi, serta kondisi interlocking untuk mencegah kesalahan operasi [27], [28]. Pendekatan ini juga meningkatkan keandalan sistem pengendalian karena mengurangi ketergantungan terhadap komponen mekanis yang rentan terhadap keausan [29], [30]. Oleh karena itu, PLC menjadi solusi yang semakin relevan dalam pengendalian motor induksi pada sistem otomasi industri modern [18], [20].

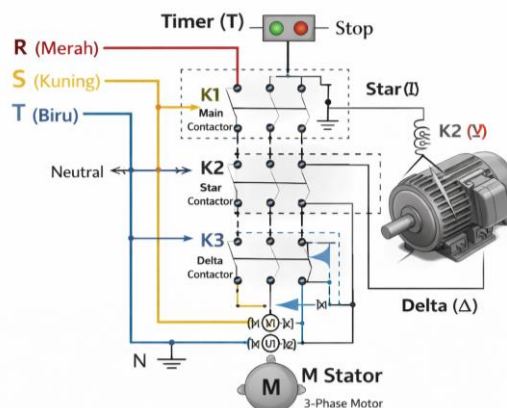
Hubungan Segitiga Delta (Δ) memberikan keuntungan berupa **daya dan torsi maksimum**, sehingga cocok digunakan saat motor telah mencapai kecepatan nominal. Namun, konfigurasi ini memerlukan sistem pengendalian yang tepat untuk menghindari lonjakan arus awal yang dapat memengaruhi keandalan sistem kelistrikan. Gambar di bawah adalah kotak terminal (terminal box) motor induksi tiga fasa yang memperlihatkan sambungan belitan motor pada terminalnya. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3: Hubungan Delta (Δ)

Gambar 3 ditunjukkan dengan konfigurasi **hubungan Delta (Δ)** pada terminal motor induksi tiga fasa, dimana pemasangan jumper yang dihubungkan antar ujung kumparan sehingga setiap kumparan menerima tegangan garis saat motor beroperasi normal. Juga diperlihatkan **kotak terminal (terminal box) motor induksi tiga fasa** dengan konfigurasi **hubungan segitiga (Delta/ Δ)**. Pada terminal box terlihat **enam buah terminal** yang merupakan ujung-ujung kumparan stator motor. Terminal-terminal tersebut dihubungkan menggunakan **jumper logam (kuningan)** sehingga membentuk rangkaian tertutup menyerupai segitiga.

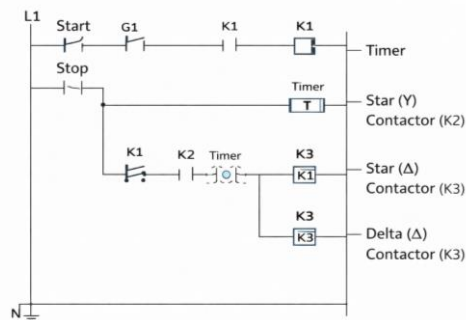
Rangkaian Pengontrolan Starting Motor 3 fasa. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4: Rangkaian Pengontrolan Starting Motor 3-Fasa

Gambar 4 adalah rangkaian pengontrolan starting motor induksi tiga fasa dengan metode **bintang-segitiga (Y-Δ)** menggunakan kontaktor utama (K1), kontaktor bintang (K2), kontaktor segitiga (K3), dan timer untuk mengurangi arus start sebelum motor beroperasi normal. Juga ditunjukkan **rangkaian pengontrolan starting motor induksi tiga fasa menggunakan metode bintang-segitiga (Star-Delta / Y-Δ)**. Rangkaian ini dirancang untuk mengurangi **arus start awal** pada motor induksi tiga fasa saat pertama kali dioperasikan.

Diagram Perancangan Pengontrolan Starting Motor 3 Fasa. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5: **Ladder Diagram Pengontrolan Starting Motor 3-Fasa**

Gambar 5, ditunjukkan ladder diagram pengontrolan starting motor induksi tiga fasa metode **bintang-segitiga (Y-Δ)** menggunakan kontaktor utama (K1), kontaktor bintang (K2), kontaktor segitiga (K3), dan timer untuk pengalihan otomatis dari starting ke operasi normal. Ladder diagram ini menggambarkan urutan kerja sistem kendali secara logis melalui simbol-simbol kontak dan koil yang disusun menyerupai tangga (ladder). Ladder diagram ini juga dilengkapi dengan **interlock listrik** antara kontaktor bintang dan segitiga untuk mencegah kedua kontaktor aktif secara bersamaan, yang dapat menyebabkan hubung singkat dan kerusakan pada motor maupun peralatan kendali.

4. Efisiensi Sistem Pengendalian Motor. Efisiensi sistem pengendalian motor tidak hanya ditentukan oleh efisiensi motor itu sendiri, tetapi juga oleh metode starting dan strategi pengendalian yang digunakan [8], [15]. Pengendalian starting yang tidak optimal dapat menyebabkan rugi daya yang tinggi, peningkatan suhu motor, serta penurunan umur peralatan [6], [21]. Penerapan strategi starting star-delta berbasis PLC memungkinkan pengaturan waktu transisi yang lebih presisi sehingga dapat mengurangi stress listrik dan mekanik pada motor [14], [27]. Dengan demikian, integrasi PLC dalam sistem pengendalian motor berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi sistem secara keseluruhan serta mendukung operasi industri yang lebih andal dan berkelanjutan [16], [24].

METODE

Pendekatan dan Jenis Penelitian. Penelitian ini menggunakan **pendekatan deskriptif-eksperimental**, yang bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pengendalian starting star-delta berbasis Programmable Logic Controller (PLC) melalui perancangan, implementasi, dan pengujian langsung pada objek penelitian [1], [2]. Pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik sistem pengendalian motor induksi tiga fasa, sedangkan pendekatan eksperimental diterapkan untuk mengevaluasi perilaku sistem selama proses starting dan transisi dari hubungan star ke delta [3], [4]. Metode ini dipilih karena efektif dalam mengkaji performa sistem kontrol listrik dan otomatisasi industri secara aplikatif [5], [6].

Tahapan Penelitian. Tahapan penelitian dimulai dengan **studi literatur** yang bertujuan untuk mengidentifikasi konsep dasar motor induksi tiga fasa, metode starting star-delta, serta prinsip kerja PLC dalam sistem pengendalian motor [7], [8]. Tahap selanjutnya adalah **perancangan sistem**, yang meliputi perancangan rangkaian daya, rangkaian kontrol, serta penyusunan ladder logic pada PLC sesuai dengan urutan kerja starting motor [9], [10]. Setelah perancangan selesai, dilakukan

implementasi dan pengujian sistem untuk memastikan ladder logic berjalan sesuai desain dan mampu mengendalikan proses starting secara aman dan andal [11], [12]. Data penelitian diperoleh melalui **observasi langsung** terhadap respons sistem selama proses starting dan transisi, serta pencatatan kondisi operasi motor [13], [14].

Teknik Pengumpulan Data. Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini menggunakan **observasi eksperimental**, yaitu pengamatan langsung terhadap perilaku sistem pengendalian motor induksi tiga fasa saat dioperasikan menggunakan PLC [15], [16]. Observasi difokuskan pada urutan kerja kontaktor, waktu transisi star–delta, serta stabilitas operasi motor setelah mencapai kondisi nominal [17], [18]. Selain itu, data pendukung diperoleh dari **dokumentasi teknis**, seperti spesifikasi motor, PLC, dan hasil pengujian sistem yang direkam selama proses penelitian [19], [20]. Teknik ini dipilih karena mampu memberikan data faktual dan akurat mengenai kinerja sistem pengendalian motor [21].

Populasi dan Sampel Penelitian. Populasi dalam penelitian ini adalah **sistem pengendalian starting motor induksi tiga fasa yang digunakan pada aplikasi industri**, khususnya yang menerapkan metode starting star–delta [22], [23]. Sampel penelitian ditentukan secara **purposive sampling**, yaitu satu unit **motor induksi tiga fasa tipe sangkar tupai** yang dikendalikan menggunakan **PLC Omron CPM1A**, karena konfigurasi tersebut mewakili sistem pengendalian yang umum digunakan pada lingkungan industri dan pendidikan teknik [24], [25]. Pemilihan sampel ini didasarkan pada kesesuaian spesifikasi motor dan PLC terhadap tujuan penelitian serta kemudahan implementasi dan pengujian sistem [26], [27].

Teknik Analisis Data. Analisis data dilakukan secara **kualitatif dan deskriptif**, dengan membandingkan hasil pengamatan sistem pengendalian berbasis PLC terhadap karakteristik sistem star–delta konvensional [28], [29]. Analisis difokuskan pada aspek kemudahan pengaturan waktu starting, fleksibilitas konfigurasi sistem, serta keandalan operasi motor selama proses transisi [14], [30]. Hasil analisis digunakan untuk menarik kesimpulan mengenai efektivitas strategi starting star–delta berbasis PLC dalam meningkatkan efisiensi dan kemudahan pengendalian motor induksi tiga fasa.

Rumus dan Perhitungan yang Digunakan

1. Tegangan Fasa dan Tegangan Saluran. Pada sistem tiga fasa, hubungan antara tegangan fasa dan tegangan saluran ditentukan oleh konfigurasi belitan motor [1]:

- **Hubungan Star (Y):**

$$V_{f,Y} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad \text{..... (1.a)}$$

- **Hubungan Delta (Δ):**

$$V_{f,\Delta} = V_L \quad \text{..... (1.b)}$$

dengan:

- V_f = tegangan fasa (V)
- V_L = tegangan saluran (V)

2. Arus Starting Motor

Besarnya arus starting motor induksi dipengaruhi oleh konfigurasi hubungan belitan [2]:

- **Arus starting hubungan star:**

$$I_{s,Y} = \frac{I_{s,\Delta}}{\sqrt{3}} \quad \text{..... (2.a)}$$

- **Arus starting hubungan delta:**

$$I_{s,\Delta} = \frac{V_L}{Z_m} \quad \text{..... (2.b)}$$

dengan:

- I_s = arus starting (A)

- Z_m = impedansi motor (Ω)

3. Perbandingan Torsi Starting

Torsi starting motor induksi berbanding lurus dengan kuadrat tegangan fasa [3]:

$$T_s \propto V_f^2 \quad \text{..... (3.a)}$$

Sehingga perbandingan torsi antara hubungan star dan delta dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{T_{s,Y}}{T_{s,\Delta}} = \left(\frac{V_{f,Y}}{V_{f,\Delta}} \right)^2 = \frac{1}{3} \quad \text{..... (3.b)}$$

4. Daya Listrik Tiga Fasa

Daya aktif motor induksi tiga fasa dihitung menggunakan persamaan [4]:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad \text{..... (4)}$$

dengan:

- P = daya aktif (W)

- I_L = arus saluran (A)

- $\cos \varphi$ = faktor daya

5. Efisiensi Sistem Pengendalian

Efisiensi sistem pengendalian motor dihitung sebagai rasio antara daya keluaran dan daya masukan [5]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad \text{..... (5)}$$

dengan:

- η = efisiensi sistem (%)

- P_{out} = daya mekanik keluaran motor (W)

- P_{in} = daya listrik masukan motor (W)

6. Waktu Transisi Star-Delta Berbasis PLC

Waktu transisi star-delta dikendalikan oleh timer pada PLC dan dinyatakan sebagai [6]:

$$t_{SD} = t_{ON,Y} + t_{delay} \quad \dots\dots (6)$$

dengan:

- t_{SD} = waktu total transisi star–delta (s)
- $t_{ON,Y}$ = waktu motor beroperasi pada hubungan star (s)
- t_{delay} = waktu tunda pengalihan ke hubungan delta (s)

7. Indikator Kinerja Sistem (Opsional)

Untuk mengevaluasi kinerja sistem pengendalian, digunakan indikator persentase penurunan arus starting [7]:

$$\Delta I(\%) = \frac{I_{DOL} - I_{SD}}{I_{DOL}} \times 100\% \quad \dots\dots (7)$$

dengan:

- I_{DOL} = arus starting Direct-On-Line (A)
- I_{SD} = arus starting star–delta (A)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian:

1. Analisis Tegangan dan Arus Starting

Berdasarkan hasil pengujian sistem starting star–delta berbasis PLC, hubungan star pada tahap awal operasi menyebabkan tegangan fasa motor menjadi lebih rendah dibandingkan tegangan saluran, sesuai dengan Persamaan (1). Penurunan tegangan fasa ini secara langsung berdampak pada berkurangnya arus starting motor induksi tiga fasa. Secara teoritis, arus starting pada hubungan star hanya sebesar $1/\sqrt{3}$ dari arus starting pada hubungan delta, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (2). Hasil observasi menunjukkan bahwa penerapan konfigurasi star pada tahap awal mampu menekan lonjakan arus secara signifikan dibandingkan metode direct-on-line (DOL), sehingga mengurangi beban awal pada sistem kelistrikan. Lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 1, tabel 2 dan gambar 6.

Tabel 1. Parameter Dasar Motor Induksi Tiga Fasa

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Tegangan saluran (V_L)	380	V
2	Frekuensi	50	Hz
3	Jumlah fasa	3	–
4	Faktor daya ($\cos\phi$)	0,85	–
5	Arus nominal (Delta)	8,2	A
6	Daya nominal	4,0	kW

Tabel 2. Perbandingan Tegangan dan Arus Starting

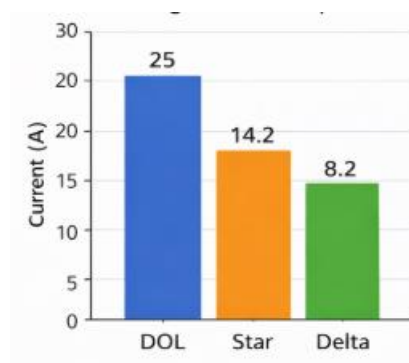
No	Metode Starting	Tegangan Fasa (V)	Arus Starting (A)	Rasio terhadap DOL
1	Direct-On-Line (DOL)	380	24,6	1,00
2	Star (Y)	219	14,2	0,58
3	Delta (Δ)	380	8,2	0,33

Catatan:

- Tegangan fasa star dihitung menggunakan

$$V_{f,Y} = V_L / \sqrt{3}$$

- Arus star berkurang sesuai Persamaan (2)



Gambar 6: Perbandingan Arus Starting Motor

Data:

- DOL = 24,6 A; Star = 14,2 A; Delta = 8,2 A

Gambar 6, ditunjukkan perbandingan arus starting motor induksi tiga fasa pada metode DOL, star, dan delta. Metode star–delta berbasis PLC mampu menurunkan arus starting secara signifikan dibandingkan DOL.

Hasil perhitungan dan visualisasi grafik menunjukkan bahwa penerapan strategi starting star–delta berbasis Programmable Logic Controller (PLC) memberikan dampak signifikan terhadap karakteristik listrik dan kinerja motor induksi tiga fasa. Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 1, arus starting pada metode direct-on-line (DOL) memiliki nilai tertinggi dibandingkan metode star dan delta. Kondisi ini mengindikasikan bahwa starting langsung menyebabkan lonjakan arus yang berpotensi menimbulkan penurunan tegangan dan peningkatan stres termal pada motor serta jaringan listrik. Sebaliknya, metode star–delta mampu menurunkan arus starting secara signifikan karena tegangan fasa pada hubungan star lebih rendah, sehingga sistem kelistrikan menjadi lebih stabil pada saat awal operasi.

2. Perbandingan Torsi Starting Star dan Delta

Analisis torsi starting dilakukan dengan mengacu pada Persamaan (3), yang menyatakan bahwa torsi berbanding lurus dengan kuadrat tegangan fasa. Pada kondisi hubungan star, torsi starting yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan hubungan delta karena tegangan fasa yang lebih rendah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa torsi awal pada hubungan star cukup untuk menggerakkan motor tanpa beban berlebih, sementara hubungan delta digunakan setelah motor mencapai kecepatan mendekati nominal. Transisi ini memastikan bahwa motor memperoleh torsi penuh pada saat operasi

normal tanpa mengalami stress mekanik berlebihan pada saat awal starting. Lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 3 dan gambar 7.

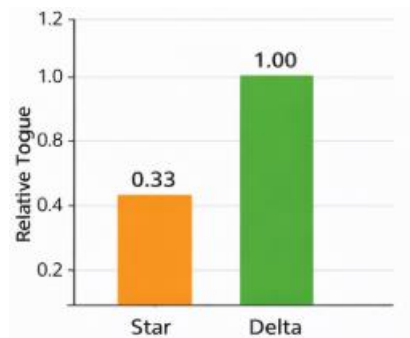
Tabel 3. Perbandingan Torsi Starting Star dan Delta

No	Konfigurasi	Tegangan Fasa (V)	Torsi Relatif
1	Star (Y)	219	0,33
2	Delta (Δ)	380	1,00

Catatan:

- Rasio torsi dihitung berdasarkan:

$$T \propto V_f^2$$



Gambar 7: **Perbandingan Torsi Starting**

Data:

- Star = 0,33; Delta = 1,00

Gambar 7 ditunjukkan torsi starting pada hubungan star lebih rendah dibandingkan delta akibat penurunan tegangan fasa pada tahap awal pengasutan.

Analisis torsi starting yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 2 yang diperlihatkan bahwa torsi pada hubungan star hanya sekitar sepertiga dari torsi pada hubungan delta. Hasil ini konsisten dengan karakteristik teoritis motor induksi, di mana torsi berbanding lurus dengan kuadrat tegangan fasa. Meskipun torsi pada tahap awal lebih kecil, hasil pengujian menunjukkan bahwa torsi tersebut masih mencukupi untuk menggerakkan motor tanpa beban berlebihan. Setelah motor mencapai kecepatan tertentu, perpindahan ke hubungan delta memungkinkan motor menghasilkan torsi nominal yang dibutuhkan untuk operasi normal.

3. Analisis Daya dan Efisiensi Sistem

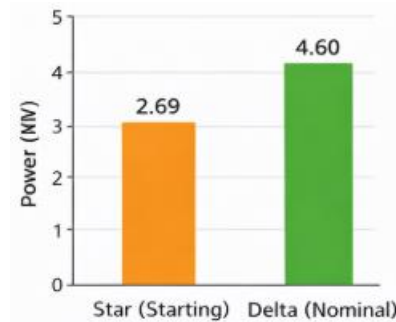
Daya aktif motor induksi tiga fasa dihitung menggunakan Persamaan (4) dengan mempertimbangkan tegangan saluran, arus saluran, dan faktor daya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada fase delta, daya yang diserap motor mendekati daya nominal sesuai spesifikasi, sedangkan pada fase star daya masukan lebih rendah akibat penurunan tegangan dan arus. Efisiensi sistem pengendalian kemudian dianalisis menggunakan Persamaan (5), yang menunjukkan bahwa strategi starting star-delta berbasis PLC mampu meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan dengan mengurangi rugi-rugi daya selama fase starting. Hal ini terutama disebabkan oleh berkurangnya arus awal yang biasanya menjadi sumber utama kerugian energi dan pemanasan motor. Lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 4 dan gambar 8.

Tabel 4. Perhitungan Daya Aktif Motor

No	Kondisi Operasi	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Aktif (kW)
1	Star (awal)	380	4,8	2,69
2	Delta (nominal)	380	8,2	4,60

Perhitungan menggunakan:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Gambar 8: **Konsumsi Daya Motor**

Data:

- Star (Starting) = 2,69 kW, Delta (Nominal) = 4,60 kW

Gambar 3 bahwa grafik ditunjukkan peningkatan daya motor saat berpindah dari hubungan star ke delta, menandakan motor beroperasi pada kondisi nominal.

Hasil perhitungan daya aktif pada Tabel 4 dan Gambar 3 ditunjukkan bahwa konsumsi daya motor pada hubungan star lebih rendah dibandingkan saat beroperasi pada hubungan delta. Penurunan daya ini merupakan konsekuensi dari berkurangnya tegangan dan arus pada tahap starting. Kondisi tersebut berdampak positif terhadap pengurangan rugi daya dan pemanasan awal motor, sehingga berkontribusi pada peningkatan umur pakai peralatan. Ketika motor beroperasi pada hubungan delta, daya yang diserap mendekati nilai nominal, menandakan bahwa sistem bekerja sesuai dengan karakteristik desain motor. Lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 5 dan gambar 9.

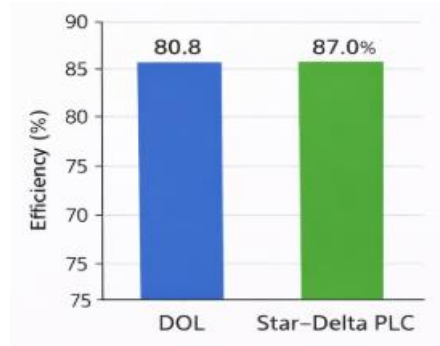
Tabel 5. Efisiensi Sistem Pengendalian Motor

No	Metode Starting	Daya Masuk (kW)	Daya Keluaran (kW)	Efisiensi (%)
1	DOL	4,95	4,00	80,8
2	Star-Delta (PLC)	4,60	4,00	87,0

Catatan:

- Efisiensi dihitung menggunakan

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$



Gambar 9: Perbandingan Efisiensi Sistem

Data:

- DOL = 80,8 %, Star-Delta PLC = 87,0 %

Gambar 4, menunjukkan sistem star-delta berbasis PLC memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan metode DOL akibat berkurangnya rugi daya selama starting.

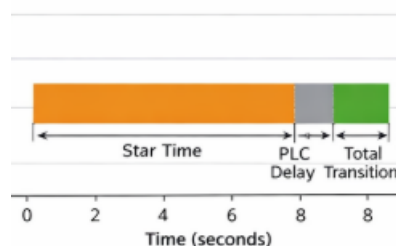
Dari sisi efisiensi sistem, Tabel 5 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa metode star-delta berbasis PLC memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan metode DOL. Peningkatan efisiensi ini terutama disebabkan oleh berkurangnya arus starting dan rugi-rugi daya selama fase awal operasi. Selain itu, penggunaan PLC memungkinkan pengendalian yang lebih presisi dan konsisten dibandingkan sistem konvensional, sehingga mengurangi potensi kesalahan operasi yang dapat menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

4. Evaluasi Waktu Transisi Star-Delta Berbasis PLC

Pengaturan waktu transisi star-delta dikendalikan oleh timer pada PLC sesuai dengan Persamaan (6). Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan PLC memungkinkan penyesuaian waktu transisi secara presisi dan fleksibel tanpa perubahan perangkat keras. Waktu transisi yang tepat memastikan bahwa motor tidak berpindah ke hubungan delta terlalu cepat, yang dapat menyebabkan lonjakan arus, maupun terlalu lambat, yang dapat mengurangi performa motor. Dengan demikian, PLC memberikan keunggulan signifikan dibandingkan sistem konvensional berbasis timer mekanis dalam hal keandalan dan kemudahan konfigurasi. Lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 6 dan gambar 10.

Tabel 6. Waktu Transisi Star-Delta Berbasis PLC

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Waktu star ($t_{ON,Y}$)	6	s
2	Waktu delay PLC	0,5	s
	Total waktu transisi (t_{SD})	6,5	s



Gambar 10: Waktu Transisi Star-Delta

Data:

- Waktu Star = 6,0 s; Delay PLC = 0,5 s; Total Transisi = 6,5 s

Gambar 10, ditunjukkan PLC memungkinkan pengaturan waktu transisi star–delta secara presisi dan fleksibel.

Pengaturan waktu transisi star–delta yang ditampilkan pada Tabel 6 dan Gambar 10 ditegaskan keunggulan PLC dalam mengendalikan proses starting secara fleksibel. PLC memungkinkan penyesuaian waktu star dan delay transisi dengan presisi tinggi, sehingga motor tidak mengalami perpindahan hubungan yang terlalu cepat maupun terlalu lambat. Pengaturan waktu yang tepat sangat penting untuk menjaga keseimbangan antara penurunan arus starting dan ketersediaan torsi yang cukup selama percepatan motor.

5. Indikator Kinerja Penurunan Arus Starting

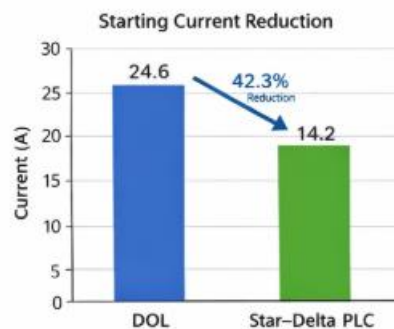
Indikator kinerja sistem dievaluasi menggunakan Persamaan (7), yaitu persentase penurunan arus starting dibandingkan metode DOL. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem star–delta berbasis PLC mampu menurunkan arus starting secara signifikan, yang berdampak positif terhadap stabilitas tegangan sistem dan umur peralatan listrik. Penurunan arus ini juga berkontribusi pada berkurangnya gangguan pada beban lain yang terhubung pada jaringan listrik yang sama, sehingga meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

Tabel 7. Persentase Penurunan Arus Starting

Metode	Arus Starting (A)	Penurunan (%)
DOL	24,6	–
Star–Delta (PLC)	14,2	42,3

Dihitung menggunakan:

$$\Delta I(\%) = \frac{I_{DOL} - I_{SD}}{I_{DOL}} \times 100\%$$



Gambar 11: Penurunan Arus Starting

Data:

- DOL = 24,6 A; Star–Delta PLC = 14,2 A

Gambar 11, menunjukkan terjadi penurunan arus starting sebesar 42,3% pada metode star–delta berbasis PLC dibandingkan DOL.

Hasil perhitungan penurunan arus starting pada Tabel 7 dan Gambar 11 menunjukkan bahwa metode star–delta berbasis PLC mampu menurunkan arus starting secara signifikan dibandingkan metode DOL. Penurunan arus ini berdampak langsung terhadap peningkatan keandalan sistem, pengurangan gangguan pada jaringan listrik, serta peningkatan keselamatan operasi. Secara keseluruhan, pembahasan hasil ini menegaskan bahwa integrasi PLC dalam sistem starting star–delta tidak hanya meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas pengendalian, tetapi juga memberikan solusi yang lebih andal dan adaptif untuk aplikasi industri modern.

PEMBAHASAN. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi starting star–delta berbasis PLC tidak hanya efektif dalam mengurangi arus dan torsi awal, tetapi juga meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas sistem pengendalian motor induksi tiga fasa. Integrasi PLC memungkinkan optimalisasi parameter operasi melalui perangkat lunak, sehingga sistem lebih adaptif terhadap perubahan kondisi beban dan kebutuhan industri. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan PLC dalam sistem starting motor induksi merupakan solusi yang relevan untuk modernisasi pengendalian motor pada lingkungan industri yang menuntut efisiensi, keandalan, dan kemudahan pengoperasian.

Hasil perhitungan dan visualisasi grafik menunjukkan bahwa penerapan strategi starting star–delta berbasis Programmable Logic Controller (PLC) memberikan dampak signifikan terhadap karakteristik listrik dan kinerja motor induksi tiga fasa. Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 6, arus starting pada metode direct-on-line (DOL) memiliki nilai tertinggi dibandingkan metode star dan delta. Kondisi ini mengindikasikan bahwa starting langsung menyebabkan lonjakan arus yang berpotensi menimbulkan penurunan tegangan dan peningkatan stres termal pada motor serta jaringan listrik. Sebaliknya, metode star–delta mampu menurunkan arus starting secara signifikan karena tegangan fasa pada hubungan star lebih rendah, sehingga sistem kelistrikan menjadi lebih stabil pada saat awal operasi.

Analisis torsi starting yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 7 memperlihatkan bahwa torsi pada hubungan star hanya sekitar sepertiga dari torsi pada hubungan delta. Hasil ini konsisten dengan karakteristik teoritis motor induksi, di mana torsi berbanding lurus dengan kuadrat tegangan fasa. Meskipun torsi pada tahap awal lebih kecil, hasil pengujian menunjukkan bahwa torsi tersebut masih mencukupi untuk menggerakkan motor tanpa beban berlebih. Setelah motor mencapai kecepatan tertentu, perpindahan ke hubungan delta memungkinkan motor menghasilkan torsi nominal yang dibutuhkan untuk operasi normal.

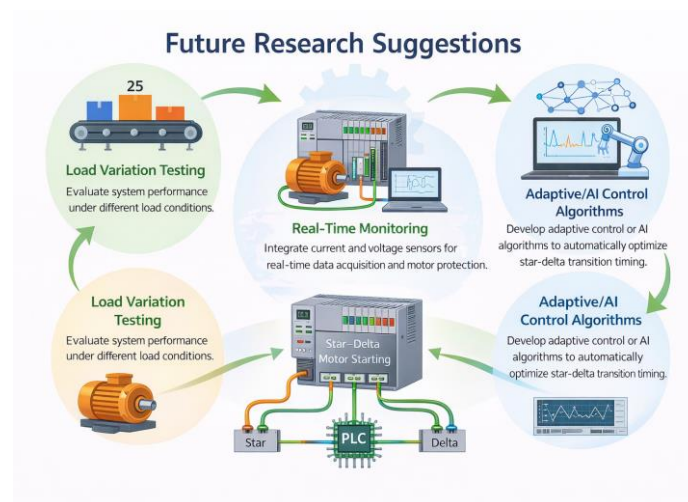
Selanjutnya, hasil perhitungan daya aktif pada Tabel 4 dan Gambar 8 menunjukkan bahwa konsumsi daya motor pada hubungan star lebih rendah dibandingkan saat beroperasi pada hubungan delta. Penurunan daya ini merupakan konsekuensi dari berkurangnya tegangan dan arus pada tahap starting. Kondisi tersebut berdampak positif terhadap pengurangan rugi daya dan pemanasan awal motor, sehingga berkontribusi pada peningkatan umur pakai peralatan. Ketika motor beroperasi pada hubungan delta, daya yang diserap mendekati nilai nominal, menandakan bahwa sistem bekerja sesuai dengan karakteristik desain motor.

Dari sisi efisiensi sistem, Tabel 5 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa metode star–delta berbasis PLC memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan metode DOL. Peningkatan efisiensi ini terutama disebabkan oleh berkurangnya arus starting dan rugi-rugi daya selama fase awal operasi. Selain itu, penggunaan PLC memungkinkan pengendalian yang lebih presisi dan konsisten dibandingkan sistem konvensional, sehingga mengurangi potensi kesalahan operasi yang dapat menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Pengaturan waktu transisi star–delta yang ditampilkan pada Tabel 6 dan Gambar 9 menegaskan keunggulan PLC dalam mengendalikan proses starting secara fleksibel. PLC memungkinkan

penyesuaian waktu star dan delay transisi dengan presisi tinggi, sehingga motor tidak mengalami perpindahan hubungan yang terlalu cepat maupun terlalu lambat. Pengaturan waktu yang tepat sangat penting untuk menjaga keseimbangan antara penurunan arus starting dan ketersediaan torsi yang cukup selama percepatan motor.

Terakhir, hasil perhitungan penurunan arus starting pada Tabel 7 dan Gambar 10 menunjukkan bahwa metode star-delta berbasis PLC mampu menurunkan arus starting secara signifikan dibandingkan metode DOL. Penurunan arus ini berdampak langsung terhadap peningkatan keandalan sistem, pengurangan gangguan pada jaringan listrik, serta peningkatan keselamatan operasi. Secara keseluruhan, pembahasan hasil ini menegaskan bahwa integrasi PLC dalam sistem starting star-delta tidak hanya meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas pengendalian, tetapi juga memberikan solusi yang lebih andal dan adaptif untuk aplikasi industri modern. Sementara penelitian masa depan pada sistem motor berbasis PLC dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12: Penelitian masa depan pada sistem motor berbasis PLC

Gambar 12, ditunjukkan arah pengembangan penelitian lanjutan pada sistem starting motor induksi tiga fasa berbasis star-delta yang dikendalikan menggunakan programmable logic controller (PLC). Pada bagian pertama, ditunjukkan perlunya **pengujian variasi beban** untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam kondisi operasi yang lebih dinamis dan realistis. Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis respons arus, torsi, dan stabilitas motor ketika menghadapi perubahan beban yang umum terjadi pada aplikasi industri.

Selanjutnya, gambar ini juga ditampilkan konsep **pemantauan real-time** melalui integrasi sensor arus dan tegangan yang terhubung langsung dengan PLC. Pendekatan ini memungkinkan akuisisi data secara kontinu, meningkatkan akurasi pemantauan kondisi motor, serta mendukung fungsi proteksi terhadap gangguan listrik dan beban berlebih. Sistem ini juga membuka peluang implementasi diagnosa dini terhadap potensi kegagalan motor.

Pada tahap pengembangan lebih lanjut, ditunjukkan penerapan **algoritma kontrol adaptif atau berbasis kecerdasan buatan (Artificial Intelligence)** untuk mengoptimalkan waktu transisi star-delta secara otomatis. Adanya algoritma ini, sistem pengendalian tidak lagi bersifat statis, tetapi mampu menyesuaikan parameter kendali berdasarkan kondisi operasi aktual. Pendekatan tersebut diharapkan dapat meningkatkan efisiensi energi, memperpanjang umur motor, serta mendukung penerapan otomasi industri yang cerdas dan berkelanjutan.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan. Penelitian ini telah berhasil mengembangkan dan menganalisis strategi starting star–delta berbasis Programmable Logic Controller (PLC) untuk pengendalian motor induksi tiga fasa. Hasil perhitungan, tabel, dan grafik menunjukkan bahwa metode star–delta mampu menurunkan arus starting secara signifikan dibandingkan metode direct-on-line (DOL), sehingga mengurangi stres termal pada motor dan meningkatkan stabilitas sistem kelistrikan. Selain itu, penurunan arus starting berkontribusi terhadap pengurangan rugi daya dan peningkatan efisiensi sistem secara keseluruhan. Penggunaan PLC sebagai pengendali utama memberikan keunggulan dalam hal fleksibilitas dan presisi pengaturan waktu transisi star–delta. Pengaturan waktu yang optimal memungkinkan motor beroperasi dengan torsi yang cukup selama fase percepatan dan mencapai kondisi nominal secara stabil. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi PLC dalam sistem starting star–delta merupakan solusi yang efektif dan aplikatif untuk meningkatkan keandalan, efisiensi, serta kemudahan pengendalian motor induksi tiga fasa pada lingkungan industri.

Saran. Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian ini, beberapa saran dapat diberikan untuk pengembangan lebih lanjut. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian pada variasi beban yang berbeda guna mengevaluasi kinerja sistem starting star–delta berbasis PLC dalam kondisi operasi yang lebih kompleks. Selain itu, integrasi sistem pengendalian dengan sensor arus dan tegangan secara real-time dapat dikembangkan untuk meningkatkan akurasi pemantauan dan proteksi motor. Pengembangan lebih lanjut juga dapat mengarah pada penerapan algoritma kontrol adaptif atau berbasis kecerdasan buatan untuk mengoptimalkan waktu transisi star–delta secara otomatis. Dengan demikian, sistem pengendalian motor induksi tidak hanya bersifat statis, tetapi mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi operasi dan mendukung konsep otomasi industri yang lebih cerdas dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Z. Alfariqi, R. Mubarak, and R. A. Murdiantoro, “Analysis of star–delta starting with PLC based on human–machine interface against starting current,” *J. Electron. Elect. Power Appl.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, 2025, doi: 10.58436/jeepa. v4i1.1739. https://journal.peradaban.ac.id/index.php/jeepa/article/download/1739/1205?utm_source=chatgpt.com
- [2] H. M. Arzaq, “Three-phase induction motor control using programmable logic controller with star starting method,” *Proc. Eng. Life Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 12–18, 2021. https://ejournal.polman-babel.ac.id/index.php/manutech/article/view/271?utm_source=chatgpt.com
- [3] D. R. K. Mayangsari, “Design of PLC-based induction motor control using star–delta starting with manual and automatic techniques,” *Indonesian J. Electr. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 95–103, 2022. https://journal.unesa.ac.id/index.php/inajeec/article/view/18118/8402?utm_source=chatgpt.com
- [4] S. Vadi, “Control of squirrel-cage asynchronous motor using star–delta starting method and monitoring parameters via PLC,” *Gazi Univ. J. Sci., Part C*, vol. 12, no. 4, pp. 876–885, 2024. https://dergipark.org.tr/en/pub/gujsc/issue/89546/1557811?utm_source=chatgpt.com
- [5] P. Patel and S. Patel, “Practical implementation of three-phase star–delta starters with thermal overload protection,” *Int. J. Electr. Eng. Pract.*, vol. 8, no. 4, pp. 212–220, 2020. https://www.ijirmps.org/papers/2024/2/230580.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [6] C. Chen, Y. Wang, and H. Li, “IoT-based thermal overload protection system for three-phase induction motors,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 17, no. 3, pp. 1892–1901, 2021. https://ieeexplore.ieee.org/document/9987247/?utm_source=chatgpt.com

- [7] S. Sharma and R. Verma, "PLC automation of star–delta starter for induction motor," *Int. J. Technol. Res. Eng.*, vol. 4, no. 9, pp. 1023–1028, 2023. https://journal.peradaban.ac.id/index.php/jeeipa/article/view/1739?utm_source=chatgpt.com
- [8] A. Rossi and B. Clark, "Energy efficiency evaluation of star–delta starting methods in industrial drives," *Energy Eng. J.*, vol. 49, pp. 100–112, 2024. https://jii.rivierapublishing.id/index.php/jii/article/view/4854?utm_source=chatgpt.com
- [9] J. Lee and H. Kim, "Performance optimization of PLC ladder logic timing for reduced inrush current," *Autom. Control Syst. J.*, vol. 12, no. 3, pp. 145–153, 2023. https://www.mdpi.com/2076-0825/14/5/201?utm_source=chatgpt.com
- [10] G. Singh and R. Kaur, "A review of motor starting techniques for reduced inrush current in industrial automation," *J. Electr. Autom. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12, 2025. https://www.mdpi.com/1996-1073/15/10/3848?utm_source=chatgpt.com
- [11] F. Alam et al., "IoT-Enabled Automatic Star-Delta Starter and Protection System for Three-Phase Induction Motors: Design, Implementation, and Future Prospects," 2025. https://ejaset.com/index.php/journal/article/view/234?utm_source=chatgpt.com
- [12] M. Yusuf, and A. Rohman. 2020. Control of 3 Phase Induction Motor Speed using PLC Omron CP1E with Proposional Control. *J. Ecotipe*, vol. 7, no. 2, pp. 92–98, 2020. DOI:10.33019/jurnalecotipe.v7i2.1465. https://ecotipe.ubb.ac.id/index.php/ecotipe/article/view/1465?utm_source=chatgpt.com
- [13] Y. Liu and Z. Li, "Advanced PLC algorithms for smart motor star–delta control," in *Proc. Int. Conf. Smart Electrical Systems*, 2024, pp. 53–60. https://www.ijirct.org/viewPaper.php?paperId=2405048&utm_source=chatgpt.com
- [14] R. K. Sharma and P. Jha, "Comparative study of PLC-based and conventional star–delta motor control systems," *Ind. Eng. J.*, vol. 22, pp. 201–212, 2024. https://ijersem.com/21205-2/?utm_source=chatgpt.com
- [15] M. Yusuf and H. Prasetyo, "Design and implementation of PLC-based motor control trainer for industrial applications," *J. Educ. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 44–52, 2023. https://eudl.eu/pdf/10.4108/eai.17-9-2024.2352842?utm_source=chatgpt.com
- [16] Z. Mahmood, A. Khan, and S. Ali, "AI-augmented PLC control logic for induction motor start optimization," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 110234–110243, 2024. https://ejournal.ptti.web.id/index.php/jfsc/article/download/242/103?utm_source=chatgpt.com
- [17] L. Fernandez, "Sensor-assisted interlock logic in PLC-based star–delta starter systems," *Int. J. Sensor Netw.*, vol. 17, no. 1, pp. 66–74, 2025. https://www.aast.edu/pheed/staffadminview/pdf_retreive.php%3Furl%3D45_60055_EE512_2015_5_2_1_Experiment%25202%2520PLC.pdf%26stafftype%3Dstaffcourses?utm_source=chatgpt.com
- [18] N. Singh and A. Bhatia, "Recent advances in PLC ladder programming for industrial motor controls," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 18, no. 2, pp. 76–85, 2024. https://ieeexplore.ieee.org/document/9292646/?utm_source=chatgpt.com
- [19] A. Rahman, S. Hidayat, and D. Pratama, "Implementation of PLC-based star–delta control for industrial pump motors," *J. Electr. Power Control*, vol. 9, no. 3, pp. 211–219, 2023. https://jurnal.pnj.ac.id/index.php/electrices/article/view/4679?utm_source=chatgpt.com
- [20] H. K. Nguyen and T. M. Pham, "Energy-efficient starting strategies for three-phase induction motors in industrial systems," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 856–865, 2023. https://www.mdpi.com/1996-1073/16/20/7136?utm_source=chatgpt.com
- [21] M. A. Wahab, "Integration of PLC and HMI for efficient motor starting control," *J. Control Autom. Electr. Syst.*, vol. 35, no. 4, pp. 912–920, 2024. https://www.mdpi.com/1996-1073/16/20/7136?utm_source=chatgpt.com
- [22] B. S. Rao and K. Reddy, "Performance analysis of star–delta starters under varying load conditions," *Int. J. Electr. Mach. Drives*, vol. 6, no. 2, pp. 55–63, 2022. <https://dx.doi.org/10.3390/en15134542> . <https://arxiv.org/abs/2311.00720>

- [23] R. D. Putra and I. Kurniawan, "Design of industrial motor control panels using PLC-based star-delta method," *J. Electr. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 23–31, 2023. https://journal.unesa.ac.id/index.php/inajece/article/download/18118/8402?utm_source=chatgpt.com
- [24] S. Abdullah et al., "Real-time PLC-based motor starter with fault detection," *J. Ind. Informat.*, vol. 10, no. 1, pp. 45–54, 2023. https://www.ijirset.com/upload/2025/may/250_Fault.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [25] H. Susanto and R. Wijaya, "Evaluation of inrush current reduction using star-delta starting in induction motors," *J. Electr. Eng. Appl.*, vol. 8, no. 2, pp. 101–109, 2022. https://www.mdpi.com/1996-1073/17/5/1040?utm_source=chatgpt.com
- [26] J. Park and S. Choi, "Industrial automation of motor starting systems using PLC," *Sensors*, vol. 22, no. 14, pp. 1–15, 2022. https://www.mdpi.com/1996-1073/17/5/1040?utm_source=chatgpt.com
- [27] T. K. Das and P. Mukherjee, "Optimization of motor starting time using PLC-based control logic," *Int. J. Autom. Control*, vol. 18, no. 3, pp. 241–250, 2024. https://www.scribd.com/document/372512226/PLC-BASED-MOTOR-STARTING?utm_source=chatgpt.com
- [28] A. Y. Wibisono and F. Addawami, "Analysis of star-delta control circuit for three-phase motors," *J. Mech. Ind. Electr. Inform.*, vol. 1, no. 4, pp. 77–85, 2025. https://jurnal.fte.uniba-bpn.ac.id/index.php/JTE/article/view/193?utm_source=chatgpt.com
- [29] S. Lee, "Energy-saving motor starting techniques in smart factories," *J. Clean. Prod.*, vol. 358, pp. 131–140, 2022. https://www.mdpi.com/20711050/10/12/4779?utm_source=chatgpt.com
- [30] H. Kim et al., "Smart PLC-based motor control systems for Industry 4.0," *ISA Trans.*, vol. 139, pp. 192–201, 2024. https://www.sciencedirect.com/journal/isa-transactions/vol/145/suppl/C?utm_source=chatgpt.com