

Estimator Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Metode *Luenberger* Berbasis PLC

Cahya Dwi Pradika^{1*}, Imanuel Dindin², Erzi Agson Ghani³, Mochammad Aripin⁴, Ardan Nagra Coutsar⁵

^{1,2,3,5} Program Studi Teknologi Daya Gerak, Fakultas Teknik Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan, Bogor

⁴ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Adhi Tama, Surabaya

*Penulis Korespondensi, email: cahya.pradika@tp.idu.ac.id

Received: 29/10/2025

Revised: 12/11/2025

accepted: 13/11/2025

Abstract. This study conducted an analysis of implementation of a three-phase induction motor speed estimator using the Luenberger Observer method based on a Programmable Logic Controller to replace the use of physical sensors that cannot be applied to certain conditions and environments. Estimation is carried out by utilizing the Voltage and current from the Variable Frequency Drive reference signal processed based on the Clarke and Park transformation as input to the Luenberger Observer method. Implementation is carried out on a PLC NX1P2 with Modbus RTU communication. Testing is carried out at reference frequencies (12 Hz, 35 Hz, 50 Hz) without interference, with interference, and dynamic conditions. The results show that the parameters Gain $K_p = 200$, Gain $K_i = 1000$, Gain Observer $K_{obs} = 1.5$, Frequency 50 Hz produces the best performance with RMSE = 222.30 rpm, MSE = 49421.03 rpm, MAE = 89.78 rpm and MAPE = 5.98%. The system achieved an 88% success rate with a Transient response delay of 259 ms, a rise time of 2001 ms, an overshoot of 9.29%, and a settling time of 2001 ms. The PLC-based Luenberger Observer can provide reliable induction motor speed estimation even without physical sensors, its advantages are its integration with industrial systems and a shift from a simulated research approach.

Keywords: Estimator, Motor velocity, Luenberger Observer, Programmable Logic Controller, RMSE

Abstrak. Penelitian ini melakukan analisis terhadap implementasi estimator kecepatan motor induksi 3-phase menggunakan metode *Luenberger Observer* berbasis *Programmable Logic Controller* untuk menggantikan penggunaan sensor fisik yang tidak dapat diaplikasikan pada kondisi dan lingkungan tertentu. Estimasi dilakukan dengan memanfaatkan tegangan dan arus dari sinyal referensi *Variable Frequency Drive* yang diolah berdasarkan transformasi *clarke* dan *park* sebagai masukan dari metode *Luenberger Observer*. Implementasi dilakukan pada PLC NX1P2 dengan komunikasi Modbus RTU. Pengujian dilakukan pada frekuensi referensi (12 Hz, 35 Hz, 50 Hz) tanpa gangguan, dengan gangguan, serta kondisi dinamis. Hasil menunjukkan pada parameter Gain $K_p = 200$, Gain $K_i = 1000$, Gain observer $K_{obs} = 1.5$, frekuensi 50 Hz menghasilkan performa terbaik dengan RMSE = 222,30 rpm, MSE = 49421,03 rpm, MAE = 89,78 rpm dan MAPE = 5,98%. Sistem mampu mencapai tingkat keberhasilan 88% dengan respon transien waktu tunda 259ms, waktu naik 2001ms, overshoot 9,29% dan settling-time 2001ms. *Luenberger Observer* berbasis PLC dapat memberikan estimasi kecepatan motor induksi yang handal meskipun tanpa sensor fisik, keunggulannya berupa dapat diintegrasikan dengan sistem diindustri serta merupakan keberlanjutan dari penelitian pendekatan simulatif.

Kata Kunci: Estimator, Kecepatan motor, *Luenberger Observer*, *Programmable Logic Controller*, RMSE

I. PENDAHULUAN

Motor induksi merupakan salah satu komponen penggerak utama di berbagai sektor, termasuk industri proses, manufaktur, serta sistem propulsi berbasis motor listrik. Pada aplikasi industri, performa motor induksi sangat bergantung pada kemampuan sistem kendali dalam mengatur kecepatan dan torsi secara presisi, terutama ketika beroperasi dalam kondisi beban bervariasi maupun

lingkungan dengan potensi gangguan. Pada sistem propulsi kapal, kecepatan motor berubah akibat beban tiba-tiba bertambah atau berkurang karena kondisi lingkungan yang dinamis, akan memerlukan waktu untuk menuju kembali ke kecepatan yang ditentukan [1]. Pemantauan kecepatan motor induksi umumnya dilakukan dengan sensor fisik seperti *rotary-encoder* atau *tachometer*. Namun, penggunaan sensor ini

menambah biaya, kompleksitas instalasi, dan berpotensi mengalami kegagalan mekanis, sehingga keuntungan dari sistem *sensorless* mengurangi biaya, meningkatkan keandalan, dan sebagai upaya untuk meningkatkan efisiensi perawatan dan perbaikan [2]. Oleh karena itu, pendekatan *sensorless speed estimation* menjadi alternatif yang diperlukan untuk memberikan estimasi pada kecepatan rendah maupun tinggi, mampu beroperasi pada kondisi beban atau gangguan bervariasi dan tidak membebani PLC dengan pemrosesan data yang kompleks [3]. Kekurangan dari *drive* atau sistem pengatur kecepatan tanpa sensor kecepatan memiliki kinerja yang buruk ketika motor induksi berjalan pada rentang kecepatan rendah [4].

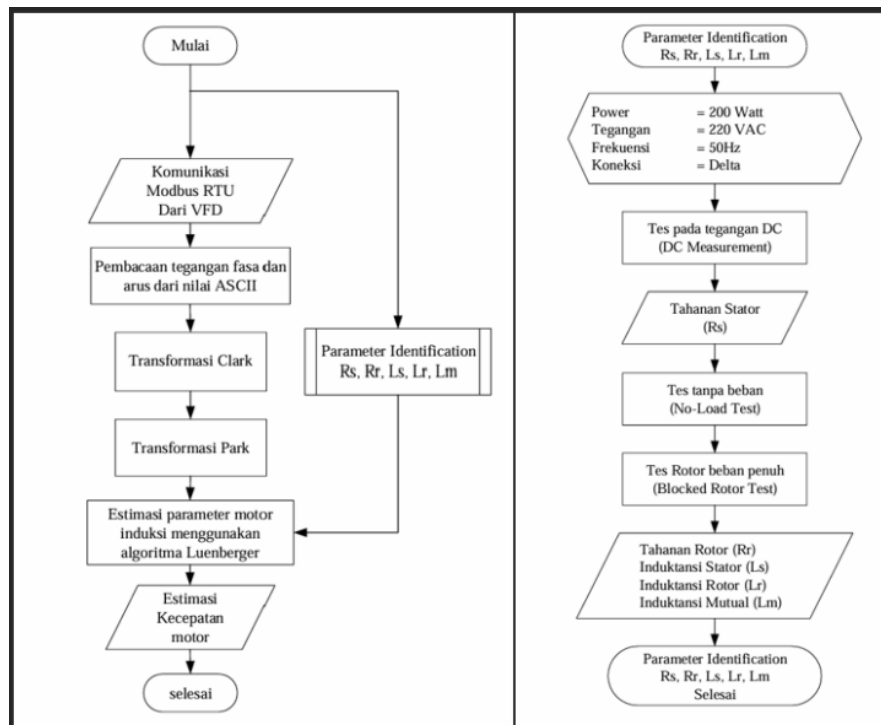
Pengendalian motor induksi dapat dilakukan tanpa sensor berbasis algoritma dari berbagai *observer* yang ditanamkan pada kontroler. Hasil kajian ilmiah sebelumnya, ada beberapa algoritma *observer* seperti *Luenberger Observer* (LO), *Sliding Mode Observer* (SMO) dan *Extended Kalman Filter* (EKF) [5]. Metode *Luenberger Observer* untuk *estimator* pada motor induksi umumnya digunakan untuk memperkirakan variabel yang tidak dapat diukur langsung, seperti kecepatan rotor atau fluks (stator/rotor *flux*), dari variabel yang bisa diukur (*measured signals*) seperti arus stator dan tegangan stator pada *Variable Frequency Drive* [6]. Berdasarkan penelitian, pada kecepatan motor tinggi, setiap *observer* dapat memberikan estimasi hasil kecepatan yang akurat dan juga pada kecepatan dinamis yang didapat melalui variasi torsi gangguan. *Sliding Mode Observer* (SMO) memberikan kinerja keseluruhan yang serupa dengan *Luenberger Observer* (LO) dan ketahanan parameter baik [7]. *Extended Kalman Filter* (EKF)

adalah yang paling rumit untuk diterapkan di DSP (*Digital Signal Processor*) dan kinerja kecepatan rendahnya relatif lebih buruk, terutama di bawah kondisi gangguan. Namun, *Extended Kalman Filter* (EKF) memberikan filter *noise* terbaik [5].

Pada Penelitian Zhang, Zhao, Lu, Yuan, & Zhu [5] membandingkan ketiga *observer* tersebut pada sistem *Indirect Field-Oriented Control* (IFOC) motor tanpa sensor. Dari sisi implementasi, LO dan SMO lebih praktis dibandingkan EKF. LO dan SMO hanya memerlukan 3–5 parameter yang dapat diperoleh melalui simulasi dan mudah diterapkan pada uji eksperimen. Sebaliknya, EKF membutuhkan penentuan nilai awal Q dan R (biasanya tiga parameter untuk Q dan satu untuk R), serta parameter tambahan jika menggunakan *disturbance torque observer* [2]. Menentukan parameter ini sulit karena memerlukan pengetahuan mendalam tentang gangguan sistem, sehingga meskipun disimulasikan, penyesuaian tetap diperlukan dalam implementasi sistem praktis [5]. Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini menggunakan metode estimasi kecepatan *Luenberger Observer* (LO) karena kompleksitasnya lebih sederhana dari metode *Extended Kalman Filter* (EKF) dengan performa kondisi yang lebih stabil dari *Sliding Mode Observer* (SMO) [5]. Penelitian ini juga berbasis *Programmable Logic Controller* yang sudah umum atau menjadi standar industri [8].

II. METODOLOGI

Metode penelitian ini dapat dilihat pada *flowchart* sistem estimasi kecepatan motor berikut seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pada Gambar 1 ditunjukkan diagram aliran sinyal dan blok algoritma estimator.



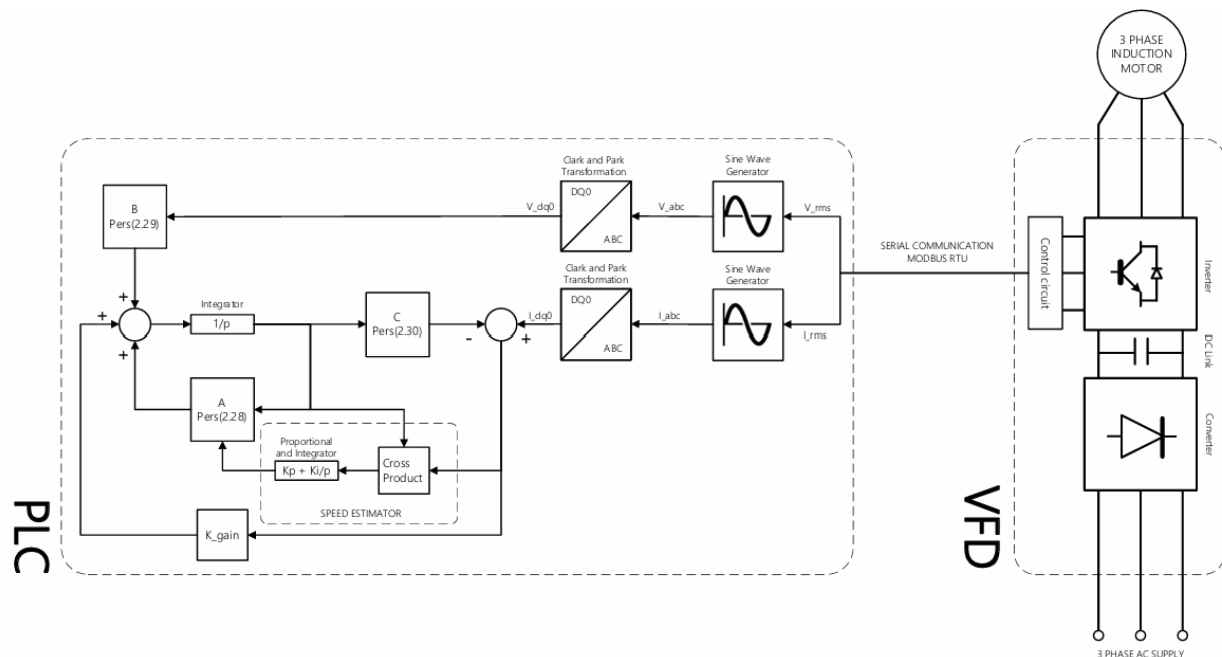
Gambar 1. Flowchart Sistem

Sinyal tegangan dan arus tiga fasa dikirimkan dari *Variable Frequency Drive* (VFD) melalui komunikasi Modbus RTU ke PLC untuk dibaca dalam format ASCII. Data ini kemudian diubah ke domain $\alpha-\beta$ menggunakan *Transformasi Clarke*, dan selanjutnya ke domain d-q menggunakan *Transformasi Park*, sehingga sinyal menjadi representatif terhadap kerangka rotor. Nilai tegangan dan arus d-q tersebut menjadi *input* bagi blok *Luenberger Observer*, yang berfungsi memperkirakan fluks rotor dan kecepatan sudut berdasarkan model matematis motor induksi. Estimasi dilakukan dengan memperhitungkan parameter hasil identifikasi R_s, R_r, L_s, L_r, L_m sebagai konstanta model. Hasil keluaran dari observer berupa estimasi kecepatan motor ($\hat{\omega}$), yang kemudian dibandingkan dengan referensi kecepatan untuk evaluasi performa sistem.

Motor induksi adalah aktuator dari sistem yang diestimasi kecepatan putarannya melalui pembacaan tegangan dan arus referensi. *Variable Frequency Drive* adalah perangkat yang dipakai untuk mengatur kecepatan motor induksi dengan pengaturan frekuensi dan tegangan *input* motor induksi, yang pada penelitian ini digunakan sebagai

pengatur kecepatan motor induksi secara *manual* pada *keypad* perangkat tersebut dan sebagai pembacaan nilai tegangan dan arus yang dikeluarkan ke motor induksi pada *Programmable Logic Controller* (PLC). PLC berfungsi sebagai pengendali utama pada sistem, yang pada penelitian ini bertugas mengolah data *input* tegangan dan arus dari VFD dengan mengelolah data tersebut, dengan algoritma transformasi *clark & park* untuk mengubah dari tegangan 3-phase menuju 2-phase.

Variabel olahan dari transformasi ini digunakan algoritma *Luenberger* menghasilkan variabel data estimasi kecepatan dan estimasi sudut rotor. Semua pengolahan algoritma dihitung pada PLC dengan bahasa *ladder diagram* dan *structure text*. Seterusnya sudut *phase feedback* kembali kedalam rumus transformasi *Park* sebagai bagian dari variable rumusnya. Adapun jalur komunikasi serial Modbus RTU antara kontroler PLC dengan perangkat VFD. Pada prinsip estimator kecepatan adalah *observer* menghitung arus stator estimasi (i_{sd}, i_{sd}) dari model motor. Kemudian, arus stator estimator dibandingkan dengan arus stator terukur. *Error* digunakan untuk memperbaiki estimasi fluks rotor dan kecepatan rotor.



Gambar 2. Instalasi Tenaga PLC & VFD

Inverter/VFD dengan *input* 1-phase dan *output* berupa 3-phase sebagai rancangan dan instalasi tenaga sesuai pada Gambar 2. 1-phase dipilih dengan harapan mempermudah serta berguna sebagai sumber 1-phase agar dapat dipergunakan di sumber instalasi daya rendah. Besaran sumber tegangan yang dipergunakan yakni 220-VAC. Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3 adalah spesifikasi rancang bangun alat yang dibuat.

Tabel 1. Spesifikasi *Variable Frequency Drive*

Input Voltage	200-240 Volt AC
<i>Phase</i>	1 Phase
<i>Frequency</i>	50 / 60 Hz
<i>Current</i>	1,6 / 2,0 Ampere
<i>Output Voltage</i>	200-240 Volt AC
<i>Phase</i>	3 Phase
<i>Frequency</i>	0,1 – 1000 Hz
<i>Current</i>	1,6 / 2,0 Ampere

Tabel 2. Spesifikasi Motor Induksi

Input Voltage	220 / 380 Volt AC
<i>Connection</i>	Delta/Star
<i>Phase</i>	3 Phase
<i>Frequency</i>	50 / 60 Hz
<i>Current</i>	1,12 Ampere
<i>Power</i>	0,37 kW / 0,5 HP
<i>Pole</i>	4
<i>Speed</i>	1340 r/min

Tabel 3. Spesifikasi *Power Supply Switching*

Input Voltage	100 – 240 Volt AC
<i>Phase</i>	1 Phase
<i>Frequency</i>	50 / 60 Hz
<i>Current</i>	0,88 Ampere
<i>Output Voltage</i>	24 Volt DC
<i>Current</i>	0,63 Ampere

Perancangan dan implementasi estimator kecepatan dengan PLC berbasis *Luenberger Observer*. *Feedback* yang digunakan yaitu *monitoring* data dari VFD yang dikirim melalui komunikasi protokol Modbus RTU RS485 untuk membaca tegangan dan arus keluaran VFD untuk motor induksi dan mengirim data tersebut ke PLC untuk diestimasi parameter dan kecepatannya. Hasil pembacaan estimasi kecepatan motor induksi dengan dibandingkan oleh alat *tachometer* untuk proses validasi. Pengambilan data pada *sensorless system* sebagai estimasi kecepatan motor induksi 3-phase dengan metode *Luenberger observer* ini adalah *logging data* estimasi kecepatan motor induksi dengan membandingkan pengukuran *tachometer* dengan nilai dari PLC.

A. Pemodelan motor induksi

Motor induksi adalah jenis motor listrik arus bolak-balik (AC) yang memperoleh suplai daya langsung pada bagian stator, sedangkan rotor

mendapatkan daya secara tidak langsung melalui induksi elektromagnetik dari stator [9]. Penggunaan inverter pada motor induksi memungkinkan pengaturan suplai daya dengan berbagai variasi frekuensi. Perubahan frekuensi ini secara linier diikuti oleh perubahan tegangan keluaran inverter, sehingga rasio tegangan terhadap frekuensi (Volt/Hz) tetap konstan. Tujuan dari pengaturan tersebut adalah untuk mempertahankan kerapatan fluks magnet pada motor, sehingga karakteristik torsi dan kinerja motor tetap optimal pada berbagai kecepatan operasi.

Desain *observer* terdiri dari pembuatan model matematis sistem yang diamati. Suatu sistem linier dinamis elemen n dengan vektor keadaan x , elemen p dengan vektor input u , elemen q dengan vektor output y dan elemen z dengan vektor d mengandung gangguan yang tidak diketahui [10], dapat dideskripsikan dengan himpunan Rumus 1 matriks bentuk standar:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_2u + B_1d \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

$\dot{x}$ menunjukkan turunan dari waktu ke waktu dari vektor keadaan x , A , B_1 , B_2 dan C adalah matriks *real* dengan dimensi dan nilai yang tepat tergantung pada parameter rangkaian ekuivalen motor. Selain itu, nilai elemen dari matriks A juga bergantung pada kecepatan sudut motor ω , yang diperlakukan sebagai parameter. Rumus matriks diturunkan dari Rumus diferensial yang menggambarkan motor induksi dalam keadaan *transien* dan Rumus aljabar kopling magnet:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{s\alpha} + R_s i_{s\alpha} = u_{s\alpha} \\ \dot{\psi}_{s\beta} + R_s i_{s\beta} = u_{s\beta} \\ \dot{\psi}_{r\alpha} + (\omega - \delta\omega)\psi_{r\beta} + R_r i_{r\alpha} = 0 \\ \dot{\psi}_{r\beta} - (\omega - \delta\omega)\psi_{r\alpha} + R_r i_{r\beta} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \\ \psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \\ \psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha} \\ \psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta} \end{cases}$$

Berdasarkan Rumus 2 $\psi_{s\alpha}$ dan $\psi_{s\beta}$, fluks magnet yang digabungkan dengan belitan stator ditandai pada sumbu dan dari sistem koordinat *cartesian* stasioner masing-masing, $\psi_{r\alpha}$ dan $\psi_{r\beta}$ menunjukkan fluks yang digabungkan dengan belitan rotor. Demikian pula $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $i_{r\alpha}$ dan $i_{r\beta}$ menandai arus belitan stator dan rotor. Tegangan

belitan stator dilambangkan sebagai $u_{s\alpha}$ dan $u_{s\beta}$. Parameter rangkaian sistem konstan dilambangkan dengan R_s , R_r , L_s , L_r dan L_m [10].

Diasumsikan bahwa sistem keadaan motor $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$ dan $\psi_{r\beta}$ termasuk dalam *state* vektor x , input $u_{s\alpha}$ dan $u_{s\beta}$ membuat vektor input u , output adalah $i_{s\alpha}$ dan $i_{s\beta}$ membentuk vektor output y . Selain itu, gangguan $\delta\omega$ diperkenalkan pada Rumus di atas, yang melambangkan perbedaan antara kecepatan sudut aktual motor dan kecepatan yang diukur atau direkonstruksi dan diteruskan ke *observer* sebagai parameter. Sinyal hanya digunakan selama sistem *observer proporsional* dengan *integrator* tambahan, dalam kasus lain dihilangkan ($\delta\omega = 0$) [10]. Vektor-vektor berurutan dari model matematika Rumus 3 dari sistem yang diamati berbentuk:

$$x = \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$y = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} -\psi_{r\alpha}\delta\omega \\ \psi_{r\beta}\delta\omega \end{bmatrix}$$

Bentuk vektor-vektor diatas berikut bahwa untuk model matematika motor induksi $n = 4$, $p = q = z = 2$. Model matematika 3-phase motor induksi akan ditransformasikan menjadi model matematika 2-phase menggunakan transformasi *Clarke* dan *Park*. Transformasi *Clarke* mengubah nilai 3-phase yang seimbang ($V_{sa, sb, sc}$) menjadi kerangka acuan stasioner 2-phase ($\alpha, \beta, 0$) menggunakan Rumus 4 dan 5:

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & 0.5\sqrt{3} & -0.5\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$V_{s\alpha}$ dan $V_{s\beta}$ adalah tegangan stator pada kerangka acuan α, β . Transformasi *Park* mengubah kerangka acuan stasioner menjadi kerangka acuan berputar ($d, q, 0$) [11]. Dimana θ_e adalah sudut listrik motor, sedangkan V_{sd} dan V_{sq} adalah tegangan stator pada kerangka acuan $d - q$. Model matematika motor induksi pada rangka $d - q$ sistem Rumus 6 dan 7:

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & -\sin\theta_e \\ \sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & 0.5\sqrt{3} \\ -0.5 & -0.5\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Pengubahan kerangka rotor 2-phase (sumbu dq) ke 3-phase (sumbu abc) memakai *invers* transformasi *Park* dan dilanjutkan dengan *invers* transformasi *Clarke* [11]. θ_e adalah sudut vektor tegangan, dan ω_r adalah kecepatan rotor berurutan sesuai Rumus 8, 9 dan 10 [11].

$$\frac{d}{dt}\theta_e = N_p\omega_r + \frac{i_{sq}}{\tau_r i_{mr}} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}\omega_r = \frac{1}{j}(T_e - T_L - B \cdot \omega_r) \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_r = \omega_r \quad (10)$$

B. Deterministic atau Luenberger Observer

State Observer adalah sistem yang memberikan perkiraan keadaan internal sistem nyata yang diberikan, dari pengukuran *input* dan *output* dari sistem nyata [6]. Tujuan dari *observer* adalah untuk mengamati keadaan sistem dalam pemantauan dan deteksi kesalahan atau maksud lain. *State observer* adalah suatu sistem yang memberikan *state observer* internal dengan menggunakan masukan dan keluaran dari suatu sistem nyata. Model umum Rumus 11 dan 12 untuk sistem *invariant* waktu linier [6]:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (11)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t), \quad (12)$$

Berdasarkan keadaan vektor $x(t) \in R^n$, vektor masukan $u(t) \in R^m$, vektor pengukuran $y(t) \in R^r$, dan matriks A, B, C , dan D yang diketahui, dan dengan dimensi yang sesuai, $n \times n$, $n \times m$, $r \times n$, dan $r \times m$. Tugas *state observer* adalah merekonstruksi keadaan sistem $x(t)$ menjadi $\hat{x}(t)$ dengan menggunakan *input* $u(t)$, *output* $y(t)$, dan model sistem (matriks A, B, C, D). *Luenberger Observer* (LO) adalah pengamat linier yang digunakan untuk merekonstruksi status sistem dengan menggunakan *input* dan *output* terukur [12]. Berdasarkan Rumus struktur *Luenberger Observer* (LO) dapat ditulis sebagai Rumus 13 dan 14 berikut:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] + Bu(t) \quad (13)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + Du(t), \quad (14)$$

Dengan *gain observer* L , *observer state* $\hat{x}(t)$, dan keluaran *observer* $\hat{y}(t)$. Jika kesalahan *observer* ($e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$) konvergen ke-nol ketika waktu menuju tidak terhingga, pengamat disebut asimtotik stabil. Dinamika kesalahan *Luenberger Observer* (LO) digambarkan dengan $\dot{e}(t) = (A - LC)e(t)$ dengan nilai awal $e(0) = \hat{x}(0) - x(0)$. Dinamika galat asimtotik stabil hanya jika $Re\{\lambda_i\}$ untuk semua nilai *eigen* λ_i matriks $(A - LC)$ kurang dari nol. Akibatnya, perilaku dinamis pengamat dapat diatur dengan menyesuaikan *gain* pengamat L , jika sistem dapat diamati. *Luenberger Observer* (LO) dapat dibangun ketika kesalahan kompensator ditambahkan ke Rumus motor induksi dalam kerangka referensi stasioner. Kecepatan rotor dianggap sebagai sistem keadaan [11]. Rumus 15 dan 16 dapat didefinisikan:

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + B\bar{u} + G(\bar{r}_s - \bar{r}_s) \quad (15)$$

$$\bar{r}_s = C\hat{x} \quad (16)$$

C. Karakteristik tanggapan transient

Spesifikasi *step response* sistem orde I dan II dapat dinyatakan dalam dua macam spesifikasi antara lain spesifikasi respon *Transient* dan spesifikasi respon *steady-state* yang di ukur melalui posisi pada keadaan tunak (*steady-state*) [13]. Model pendekatan *plant* orde dua dituliskan dengan bentuk *transfer function*. Terdapat beberapa macam ukuran kualitas respon *Transient* yang umum digunakan, antara lain *Time-Constant* (τ), *Rise-Time* (t_r), *Settling-Time* (t_s), *Delay-Time* (t_d) [14].

D. Indeks performansi rata-rata kesalahan

Performa dari hasil kesalahan dengan nilai 4 ukuran yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE) melalui Rumus 17, *Mean Square Error* (MSE) melalui Rumus 18, *Mean Absolute Error* (MAE) melalui Rumus 19, dan *Mean Percentage Absolute Error* (MAPE) melalui Rumus 20 [15]. Perhitungan analisa rata-rata kesalahan pada pengujian pembacaan kecepatan referensi 500 rpm dengan jumlah sampling sebanyak 10 data yang menghasilkan nilai aktual kecepatan berurut-urut yaitu 0, 53, 123, 256, 480, 620, 495, 502, 498, 500 rpm, maka kesalahan yang didapatkan adalah -500, -447, -377, -244, -20, 120, -5, 2, -2, 0 rpm.

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{error^2}{n}} \quad (17)$$

$$= \sqrt{\frac{(-500)^2 + (-447)^2 + (-377)^2 + \dots}{10}} = 258,1292$$

$$MSE = \sum \frac{error^2}{n} \quad (18)$$

$$= \frac{(-500)^2 + (-447)^2 + (-377)^2 + \dots}{10} = 66630,7$$

$$MAE = \sum \frac{error^2}{n} \quad (19)$$

$$= \frac{|-500| + |-447| + |-377| + \dots}{10} = 171,7$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|error|}{ref} \times 100 \quad (20)$$

$$= \frac{\left(\frac{|-500|}{500} \times 100\right) + \left(\frac{|-447|}{500} \times 100\right) + \left(\frac{|-377|}{500} \times 100\right) + \dots}{10}$$

$$= 34,34$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Memaparkan hasil pembuatan alat, pembuatan program, tahap pengujian, tahap pengambilan data, dan analisa sistem rancang bangun estimator kecepatan dengan PLC berbasis *Luenberger observer*. Tahap pengujian alat bertujuan untuk mengetahui kesesuaian kinerja rancang bangun. Setelah dilakukan pengujian, selanjutnya akan dilakukan tahap pengambilan data. Setelah data diperoleh, maka tahapan selanjutnya analisa data.

A. Hasil implementasi sistem



Gambar 3. Hasil Implementasi Sistem

Berdasarkan pada Gambar 3. Penggerak motor induksi yang dihubungkan dengan piringan rem roda sebagai pengujian dengan gangguan, yang pengeremannya dapat dilihat melalui indikator

tekanan hidrolik pada meterannya. *Controller* atau PLC merk OMRON dengan type NX1P2-1140DT-D. Transfer program ke PLC digunakan *protocol* komunikasi *EtherNet Port*. Lalu konfigurasi untuk komunikasi antara PLC dengan VFD sebagai pengambilan data (Arus, Tegangan, Frekuensi, dll) yaitu menggunakan modul tambahan pada PLC yaitu *option board* komunikasi serial *Modbus RTU* RS422A/485. VFD yang dipakai berupa OMRON dengan type 3G3MX2 AB004-V1 dengan kapasitas daya 400Watt dan *input* tegangan 220 volt, yang sudah dilengkapi built-in komunikasi *Modbus RTU* RS485 sebagai serial komunikasi data. *Auto-tuning* juga sudah dilengkapi pada tipe ini sehingga peneliti dapat mengambil parameter motor dengan menggunakan fungsi tersebut.

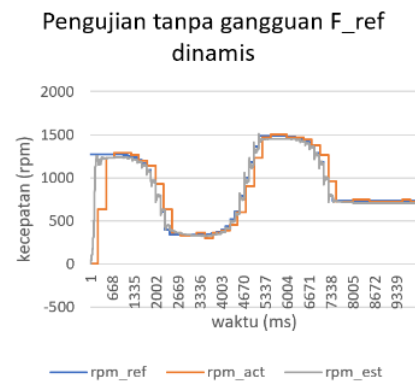
Bahasa pemrograman yang digunakan oleh peneliti adalah sistem *Ladder Diagram* (LD) dan *Structure Text* (ST). Kombinasi 2 bahasa ini dilakukan karena terdapat banyak algoritma / rumus dalam program maka digunakan *Structure Text* (ST) sebagai penghitung rumus. Algoritma *Luenberger* ditulis dengan sistem *Structure Text* (ST) pada *sub-program* yang disebut *Function Block* (FB), sehingga pada program utama hanya memanggil sistem *Function Block* (FB) tersebut.

B. Analisa dan pembahasan

Analisa yang dicari dari hasil pengujian ini meliputi karakteristik tanggapan *Transient* (t_d , t_r , t_p , t_s , M_p , dan osilasi). Kedua adalah indeks performansi rata-rata kesalahan (RMSE, MSE, MAE, MAPE). Analisa pengujian alat dilakukan yaitu bertujuan untuk mengetahui keberhasilan dan kinerja rancang bangun. Berdasarkan kedua perbedaan analisa memiliki indikator hasil yang berbeda. Tanggapan *Transient* memiliki hasil dengan satuan waktu yang menyatakan bahwa sistem algoritma dapat bekerja dengan cepat atau lambat. Lalu rata-rata kesalahan memiliki indikator hasil yaitu *error* atau kesalahan dari nilai sebenarnya dengan nilai referensi.

Pada pengujian tanpa gangguan dengan frekuensi referensi dinamis didapatkan pada Gambar 4. dengan kecepatan referensi (rpm_{ref}), kecepatan aktual (rpm_{act}) dan kecepatan estimasi

(rpm_est). Hasil respon karakteristik algoritma *Luenberger*, osilasi gelombang rata-rata terjadi selama 7 kali setiap perubahan referensi kecepatan pada pengujian ini. Indeks performansi rata-rata kesalahan yang dihasilkan pada pengujian ini adalah RMSE = 182.39 rpm, MSE = 33266.12 rpm, MAE = 89.55 rpm, MAPE = 9.91%. (rpm_ref) adalah referensi kecepatan dari hasil perubahan frekuensi, (rpm_act) adalah kecepatan sebenarnya sesuai hasil pengukuran menggunakan *Tachometer* dan (rpm_est) adalah kecepatan estimasi yang dihasilkan oleh sistem.



Gambar 4. Pengujian Tanpa Gangguan pada Frekuensi Dinamis

Tabel 4. Karakteristik Tanggapan *Transient*

Pengujian	Referensi Kecepatan (RPM)	Estimasi Kecepatan (RPM)	Maksimal Kecepatan (RPM)	Waktu Tunda (ms)	Waktu Naik (ms)	Waktu Puncak (ms)	Waktu Settling (ms)	Overshoot (%)	Osilasi
12 Hz tanpa gangguan	360	340.2	340.3	98	3120	3129	3257	0.058	0
35 Hz tanpa gangguan	1050	1025.8	1030.1	134	326	326	1519	0.419	4
50 Hz tanpa gangguan	1500	1475.2	1501.8	373	515	557	200	1.68	5
12 Hz dengan gangguan	360	340.3	372.3	187	380	4001	3275	12.8	3
35 Hz dengan gangguan	1050	1025.6	1068.6	204	404	1001	1000	9.04	6
50 Hz dengan gangguan	1500	1474.1	1518.1	259	427	2001	2000	9.29	7

Data tabel hasil pengujian disimpulkan bahwa semakin cepat kecepatan putar motor maka *observer* akan menghasilkan estimasi kecepatan yang cepat untuk mencapai nilai *steady-state*. Pengaruh parameter kendali K_p , K_i , dan K_{obs} terhadap performa estimasi dianalisis untuk memahami sensitivitas sistem terhadap perubahan *Gain*. Parameter K_p berfungsi sebagai penguat proporsional pada pengendali kecepatan referensi yang menentukan seberapa cepat sistem merespons perbedaan antara kecepatan estimasi dan kecepatan referensi. Nilai K_p yang terlalu kecil menyebabkan sistem lambat dalam merespons perubahan, sedangkan nilai yang terlalu besar dapat

menimbulkan *osilasi* dan *overshoot* pada hasil estimasi. Parameter K_i memberikan aksi *integral* yang berperan dalam menghilangkan *error steady-state* antara estimasi dan kecepatan aktual. Peningkatan K_i dapat memperbaiki kesalahan jangka panjang, namun jika terlalu tinggi dapat memperburuk stabilitas sistem. Sedangkan K_{obs} merupakan *gain* utama pada *Luenberger Observer* yang mengatur tingkat *konvergensi* estimasi terhadap nilai sebenarnya. Semakin besar K_{obs} , maka sistem akan mempercepat proses koreksi kesalahan estimasi fluks dan kecepatan, namun berisiko menimbulkan *noise* tinggi pada sinyal

estimasi. Sebaliknya, nilai K_{obs} yang terlalu kecil menyebabkan respon *observer* menjadi lambat.

Dilihat pada Tabel 4. dengan $Gain K_p = 200$, $Gain K_i = 1000$, $Gain observer K_{obs} = 1.5$, tanggapan *Transient* pada waktu naik akan semakin cepat jika kecepatan semakin tinggi tetapi *osilasi* yang terjadi juga akan semakin besar dan *overshoot* juga bertambah. Uji gangguan pun sama

jika kecepatan semakin tinggi maka *overshoot* dan *osilasi* semakin besar. Pada dua pengujian ini pengujian yang menghasilkan *osilasi* dan *overshoot* paling besar adalah pengujian frekuensi referensi 50Hz dengan nilai waktu tunda(t_d) = 259 ms, waktu naik(t_r) = 2001ms, waktu puncak(t_p) = 427ms, *overshoot maksimum*(M_p) = 9.29% dan nilai waktu *steady-state* = 2001ms. *Osilasi* gelombang terjadi sebanyak 7 kali.

Tabel 5. Indeks Performansi Kesalahan

Pengujian	Referensi Kecepatan (RPM)	Estimasi Kecepatan (RPM)	Maksimal Kecepatan (RPM)	Kesalahan (RPM)	RMSE (RPM)	MSE (RPM)	MAE (RPM)	MPAE (%)
12 Hz tanpa gangguan	360	340.2	340.3	98	3120	3129	3257	0.058
35 Hz tanpa gangguan	1050	1025.8	1030.1	134	326	326	1519	0.419
50 Hz tanpa gangguan	1500	1475.2	1501.8	373	515	557	200	1.68
12 Hz dengan gangguan	360	340.3	372.3	187	380	4001	3275	12.8
35 Hz dengan gangguan	1050	1025.6	1068.6	204	404	1001	1000	9.04
50 Hz dengan gangguan	1500	1474.1	1518.1	259	427	2001	2000	9.29

Dilihat pada Tabel 5. dengan $Gain K_p = 200$, $Gain K_i = 1000$, $Gain observer K_{obs} = 1.5$, kesalahan yang dihasilkan oleh algoritma *Luenberger* pada saat tidak ada gangguan dan ada gangguan disimpulkan bahwa semakin cepat kecepatan motor maka akan semakin besar juga kesalahan (*error*) yang dihasilkan. Estimasi kecepatan yang dihasilkan pada saat ada gangguan menghasilkan nilai yang berkurang $\pm 10\%$ dari kecepatan referensinya seperti pada pengujian dengan frekuensi referensi 50Hz, pada kecepatan referensi 1500 *rotary per minute* (rpm), estimasi kecepatan yang dihasilkan algoritma *Luenberger* adalah 1370 (rpm) yang jika dibandingkan dengan kondisi sebenarnya pada saat gangguan yaitu 0 (rpm). Rata-rata kesalahan yang paling kecil dihasilkan pada pengujian frekuensi 50Hz dengan indeks performansi rata-rata kesalahan yang dihasilkan RMSE = 222.30 rpm, MSE = 49421.03 rpm, MAE = 89.78 rpm, MAPE = 5.98%.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil implementasi dan analisis, dapat disimpulkan bahwa perancangan dan implementasi estimator kecepatan motor induksi 3-phase berbasis PLC menggunakan metode *Luenberger Observer* berhasil diimplementasikan pada PLC NX1P2-1140DT-D melalui *software sysmac Studio* dengan siklus eksekusi program 2 *milisecond*. Hasil menunjukkan pada frekuensi 50 Hz, estimasi kecepatan menghasilkan performa terbaik dengan RMSE = 222,30 rpm, MSE = 49421,03 rpm, MAE = 89,78 rpm, dan MAPE = 5,98%. Sistem mampu mengestimasi kecepatan motor tanpa menggunakan sensor mekanis dengan tingkat akurasi sebesar 88%. Pengujian menunjukkan bahwa pada frekuensi tinggi (50 Hz) estimasi memiliki *error* paling kecil, sedangkan pada kondisi kecepatan rendah dan adanya gangguan, sistem tetap memberikan estimasi yang stabil. Hal ini membuktikan bahwa metode *Luenberger Observer* efektif digunakan untuk aplikasi *sensorless drive* di industri karena

keunggulannya berupa dapat diintegrasikan dengan sistem diindustri serta merupakan keberlanjutan dari penelitian pendekatan simulatif. Saran untuk peluang pengembangan selanjutnya yang dapat dilakukan adalah Integrasi metode adaptif seperti *Adaptive Luenberger Observer*, *Adaptive Kalman Filter* dan lain sebagainya untuk meningkatkan akurasi estimasi pada kondisi beban dan kecepatan yang dinamis serta pengujian pada motor dengan kapasitas dan tegangan lebih tinggi dan perangkat PLC guna menilai skalabilitas algoritma terhadap sistem di industri nyata.

REFERENSI

- [1] X. Y. a. J. K. Tongzhen Liu, "Enhanced Model Predictive Control for Induction Motor Drives in Marine Electric Power Propulsion System," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 3, 2024.
- [2] F. P. W. C. M. Katherin Indriawati, "Implementation of Disturbance Observer for Sensorless Speed Estimation in Induction Motor," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 13 No. 2, pp. 724-732, 2022.
- [3] R. & R. J. Gregor, "Speed sensorless control of dual three-phase induction machine based on a luenberger observer for rotor current estimation," *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3653-3658, 2012.
- [4] W. Sun, Y. Yu, G. Wang and B. L. a. D. Xu, "Design Method of Adaptive Full Order Observer with or without Estimated *Flux* Error in Speed Estimation Algorithm," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 3, p. 2609–2626, 2016.
- [5] Y. Zhang, Z. Zhao, T. Lu, L. Yuan and W. X. a. J. Zhu, "A Comparative Study of Luenberger Observer, Sliding Mode Observer and Extended Kalman Filter for Sensorless Vector Control of Induction Motor Drives," *IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE*, p. 2466–2473, 2009.
- [6] D. Luenberger, *An Introduction to Observers*, Stanford University, 1972.
- [7] N. A. W. B. S. Rizqy Abdurrahman, "Estimasi Kecepatan Motor Brushless DC dengan Menggunakan Metode Sliding Mode Observer," *BRILIANT: Jurnal Riset dan Konseptual*, vol. Volume 6 Nomor 3, 2021.
- [8] I. Setiawan, *PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER dan TEKNIK PERANCANGAN SISTEM KONTROL*, Yogyakarta: Andi Yogyakarta, 2006.
- [9] S. Suhariningsih, S. Soebagio and M. H. Purnomo, "Pengaturan Motor Induksi Menggunakan Observer Self Constructing Fuzzy Neural Network Dengan Metode Algoritma Pelatihan Levenberg Marquardt," *Jurnal Teknik Elektro Universitas Kristen Petra*, 2008.
- [10] T. Białoń, A. Lewicki and M. P. a. R. Niestró, "Non-Proportional Full-Order Luenberger Observers of Induction Motors," *Arch. Electr. Eng.*, vol. 67, no. 4, pp. 925-937, 2018.
- [11] B. W. Harini, "The Effect of Motor Parameters on the Induction Motor Speed Sensorless Control System using Luenberger Observer," *International Journal of Applied Sciences and Smart Technologies* 4(1):59-74, pp. 59-71, 2022.
- [12] L. Yousfi, S. Aoun and M. Sedraoui, "International Journal of Dynamics and Control (2022) 10:1876–1888httpSpeed Sensorless Vector Control of Doubly Fed Induction Machine Using Fuzzy Logic Control Equipped with Luenberger Observer," *International Journal of Dynamics and Control*, p. 1876–1888, 2022.
- [13] G. F. Franklin, J. Powell and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, Pearson, 2010.
- [14] N. Nise, *Control Systems Engineering*, Wiley, 2004.
- [15] R. Burns, *Advanced Control Engineering*, Butterworth-Heinemann, 2001.