

Karakterisasi Respon Transien Motor AC Satu Fasa Menggunakan Pemodelan Matematis Berbasis Step Response

Edwardana Frans Try Paska Hutajulu¹

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

ABSTRAK

Pemodelan matematis motor induksi AC satu fasa merupakan langkah penting dalam perancangan sistem kendali yang presisi, namun sering kali dihadapkan pada kendala akurasi dalam merepresentasikan karakteristik dinamis nyata dari motor tersebut. Ketidakakuratan dalam pemodelan dapat menyebabkan deviasi signifikan antara hasil simulasi dan respon aktual sistem, terutama dalam aplikasi yang membutuhkan kestabilan dan kecepatan respons tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan dan menganalisis model matematis orde satu dan orde dua dari motor induksi AC satu fasa tipe JY2-2 berbasis respon langkah (*step response*), dengan tujuan mengevaluasi karakteristik transien dan tunak dari sistem.

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah penyajian perbandingan antara model orde satu dan orde dua berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan MATLAB/Simulink. Penelitian ini mencakup formulasi model listrik dan mekanik motor berdasarkan hukum Kirchhoff dan hukum Newton untuk gerak rotasi, transformasi ke domain Laplace untuk mendapatkan fungsi alih, serta analisis respon sistem dalam konfigurasi terbuka (*open-loop*) dan tertutup (*close-loop*).

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa model orde dua memberikan representasi yang lebih akurat terhadap dinamika motor, dengan waktu naik dan waktu tunak yang lebih cepat serta *overshoot* yang dapat dikendalikan. Di sisi lain, model orde satu memiliki struktur yang lebih sederhana dan mudah diimplementasikan, namun kurang akurat dalam menangkap kompleksitas dinamika motor.

Kesimpulannya, model orde dua lebih direkomendasikan untuk aplikasi kendali yang menuntut presisi dan kecepatan, serta dapat diintegrasikan dengan strategi kendali lanjutan seperti PID atau *adaptive control*. Sementara itu, model orde satu tetap relevan untuk analisis awal atau sistem dengan keterbatasan komputasi. Penelitian ini memberikan dasar kuat untuk pengembangan lebih lanjut dalam sistem identifikasi dan desain kontrol motor AC satu fasa.

RIWAYAT MAKALAH

Diterima: Tanggal, Bulan, Tahun

Direvisi: Tanggal, Bulan, Tahun

Disetujui: Tanggal, Bulan, Tahun

KATA KUNCI (ARIAL 10)

AC Motor;

Mathematical Modeling;

Transfer Function;

Control System;

Matlab/Simulink

KONTAK:

edwardanahutajulu@student.ppons.ac.id

1. PENDAHULUAN

Motor Motor induksi AC satu fasa merupakan komponen penting dalam berbagai aplikasi teknik dan industri skala kecil hingga menengah. Digunakan secara luas pada sistem pompa, kompresor, alat rumah tangga, dan mesin ringan, motor ini menawarkan keunggulan berupa biaya rendah, daya tahan tinggi, dan kemudahan perawatan [1], [2]. Namun, untuk dapat diterapkan secara efektif dalam

sistem kontrol modern, pemodelan matematis dari motor AC satu fasa menjadi langkah penting. Permasalahan utama yang muncul dalam konteks ini adalah bagaimana merepresentasikan perilaku dinamis motor secara akurat namun efisien, terutama saat motor digunakan dalam sistem berbasis mikrokontroler atau perangkat *embedded system* dengan keterbatasan komputasi [3], [4]. Ketidakakuratan model dapat menyebabkan desain

pengendali yang tidak optimal, memunculkan respon lambat, osilasi, atau kesalahan *steady-state* yang tidak diinginkan [5].

Seiring berkembangnya kebutuhan akan sistem otomatisasi dan pengendalian presisi, berbagai pendekatan telah dikembangkan dalam pemodelan sistem dinamis motor listrik. Metode yang paling umum digunakan saat ini adalah pendekatan berbasis *transfer function* yang diperoleh melalui transformasi Laplace dari persamaan diferensial waktu [6], [7]. Selain itu, pendekatan berbasis *state-space model* dan metode *system identification* dari data eksperimen juga semakin populer, terutama dengan meningkatnya kemampuan perangkat lunak simulasi seperti MATLAB/Simulink dan Scilab/Xcos [8], [9]. Dalam implementasi dasar, pemodelan motor AC sering kali disederhanakan menjadi sistem orde satu karena lebih mudah diimplementasikan dan diatur dalam sistem kontrol [10]. Namun, model orde dua juga banyak digunakan karena mampu menangkap efek redaman dan inersia sistem secara lebih akurat [11]. Sayangnya, tidak banyak penelitian yang menyajikan perbandingan langsung antara kedua model tersebut dalam konteks motor AC satu fasa.

Kesenjangan penelitian utama yang ditemukan dalam literatur adalah kurangnya pembahasan yang mendalam mengenai kelebihan dan keterbatasan model orde satu dan orde dua dalam menggambarkan dinamika motor AC satu fasa tipe kapasitor awal seperti JY2-2 (1.5 HP). Studi yang ada lebih banyak berfokus pada motor tiga fasa [12], [13] atau membahas pemodelan sistem secara umum tanpa memberikan evaluasi kuantitatif atas performa respon sistem berdasarkan parameter penting seperti *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot*, dan kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) [14]. Selain itu, pemilihan model yang tidak sesuai sering kali dilakukan tanpa pertimbangan terhadap efisiensi komputasi dan akurasi respon sistem dalam implementasi digital, padahal ini krusial dalam aplikasi kendali *embedded* dan sistem kontrol *real-time* [15].

A. Dataset (Arial 10, Bold, H2)

Tabel 1. Parameter dan Dataset dari Motor AC 1 Phase JY2-2

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Tegangan kerja	V	220	Volt
Frekuensi	f	50	Hz

Daya	P	1.5	HP (1.1 kW)
Kecepatan nominal	N	2800	RPM
Arus nominal	I	8.0	Ampere
Faktor daya	Pf	0.75	-
Momen inersia	J	5×10^{-3}	kg·m ²
Koefisien redaman	B	0.0034	N·m·s/rad
Resistansi stator	R	8.0	Ohm
Induktansi stator	L	0.025	Henry
Konstanta GGL balik	K _e	0.408	V/(rad/s)
Konstanta torsi	K _t	0.408	N·m/A

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemodelan matematis terhadap sistem dinamis dari Motor AC 1 Phasa tipe JY2-2 (1.5 HP) dan mengevaluasi performanya dalam konfigurasi open-loop dan closed-loop berdasarkan karakteristik orde 1 dan orde 2. Dataset parameter motor diperoleh dari dokumen lembar data teknis pabrikan serta hasil estimasi nilai fisik motor menggunakan pendekatan empiris berbasis rumus teoritik sistem dinamis, seperti pendekatan identifikasi sistem yang dikembangkan [3].

Motor yang digunakan dalam penelitian ini merupakan motor induksi satu fasa jenis capacitor-start dengan daya nominal 1.5 HP dan tegangan kerja 220 V pada frekuensi 50 Hz. Kecepatan nominal motor sebesar 2800 RPM dan arus nominal sebesar 8.0 A. Parameter-parameter lain yang diperoleh dari dokumen pabrikan dan estimasi analitik meliputi momen inersia sebesar 5×10^{-3} kg·m², resistansi stator sebesar 8.0 Ω, induktansi stator sebesar 0.025 H, dan koefisien redaman sebesar 0.0034 N·m·s/rad. Selain itu, konstanta gaya gerak listrik balik (GGL balik) dan konstanta torsi masing-masing sebesar 0.408 V/(rad/s) dan 0.408 N·m/A. Seluruh parameter tersebut dirangkum dalam **Tabel 1** sebagai dasar untuk membangun model matematis sistem motor.

Model matematis disusun melalui formulasi persamaan diferensial dari subsistem listrik dan mekanik yang kemudian ditransformasikan ke domain Laplace untuk memperoleh fungsi alih sistem. Prosedur ini memungkinkan representasi sistem secara linier dan terintegrasi sebagaimana juga dilakukan oleh Miller dalam studi terhadap motor permanen magnet satu fasa

[1]. Simulasi dari model ini dilakukan dalam MATLAB/Simulink untuk mengevaluasi respons sistem terhadap masukan tangga pada konfigurasi orde 1 dan orde 2. Evaluasi performa berdasarkan parameter dalam Tabel 1 memungkinkan penilaian karakteristik sistem dalam hal kestabilan, akurasi, serta waktu respon, serupa dengan pendekatan dinamis yang telah banyak digunakan pada motor listrik [2].

B. Pengumpulan Data

Data parameter motor AC dikumpulkan melalui proses pencatatan dan analisis berbasis datasheet pabrikan serta estimasi empiris yang dilakukan secara sistematis [3]. Proses ini dilakukan dengan mencatat nilai-nilai penting seperti resistansi stator, induktansi stator, arus nominal, tegangan nominal, serta kecepatan putaran motor dalam kondisi tanpa beban.

Untuk memastikan akurasi dalam proses identifikasi parameter, pengamatan dilakukan dalam waktu simulasi tertentu selama 5 detik, dengan resolusi data tinggi yang menghasilkan sekitar 20.000 titik data untuk setiap skenario masukan. Setiap skenario simulasi dilakukan secara terpisah untuk masing-masing konfigurasi baik open-loop maupun closed-loop, dengan jeda antar simulasi digunakan untuk memastikan tidak terjadi akumulasi kesalahan atau ketidakstabilan numerik [2].

Ilustrasi kurva simulasi step-response dari sistem ditampilkan secara bertahap untuk menggambarkan dinamika kecepatan sudut terhadap tegangan input pada berbagai kondisi orde sistem. Secara keseluruhan, untuk satu sesi simulasi dengan satu model (orde 1 atau orde 2), dilakukan sebanyak 7 percobaan konfigurasi berdasarkan variasi parameter redaman dan konstanta waktu, masing-masing dengan 3 level penguatan kontrol, dan diulang 3 kali untuk validasi kestabilan hasil. Hal ini menghasilkan total data simulasi lebih dari 100.000 titik data, yang sejalan dengan pendekatan numerik dan eksperimental pada motor AC satu fasa [1]. Sebelum digunakan dalam tahap analisis performa sistem (seperti rise time, settling time, overshoot, dan error tunak), seluruh data disegmentasi menjadi blok-blok waktu tetap, misalnya setiap 0.1 detik, untuk memudahkan proses pengolahan dan visualisasi hasil simulasi.

C. Pengolahan Data

Pengolahan data dalam penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hasil keluaran dari simulasi sistem motor AC 1 phasa dalam konfigurasi orde 1 dan orde 2. Setelah simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink, data yang dihasilkan berupa respons waktu terhadap masukan tegangan (step input), dalam bentuk kurva kecepatan sudut (ω) terhadap waktu [4]. Data ini diambil dalam rentang waktu 0 hingga 5 detik dengan resolusi

pengambilan 0.01 detik, menghasilkan 500 sampel data per percobaan.

Seluruh data keluaran ini disimpan dalam bentuk array numerik dan kemudian diproses menggunakan skrip MATLAB tambahan untuk mengekstraksi karakteristik sistem seperti waktu naik (rise time), waktu tunak (settling time), waktu puncak (peak time), error tunak (steady-state error), serta persentase lonjakan maksimum (maximum overshoot) [2]. Setiap karakteristik dihitung berdasarkan standar definisi dalam analisis sistem kendali [1].

Untuk sistem orde 1, data dianalisis menggunakan model dengan fungsi alih :

$$(G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}) \quad (1)$$

Sedangkan untuk sistem orde 2, fungsi alih yang digunakan berbentuk:

$$(G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}) \quad (2)$$

Nilai parameter seperti τ , ω_n , dan ζ diperoleh dari data hasil simulasi yang telah di-fit secara numerik. Selanjutnya, grafik dari kedua konfigurasi dibandingkan untuk menilai perbedaan performa dan stabilitas [3].

Seluruh hasil grafik kemudian dieksport ke dalam format png dan disimpan sebagai dokumentasi visual [7]. Dengan metode ini, seluruh data numerik dan grafik simulasi dapat dianalisis lebih lanjut untuk mendukung kesimpulan tentang dinamika sistem motor AC 1 phasa [1].

D. Akurasi

Akurasi dalam penelitian ini dilakukan dengan membandingkan performa *model orde 1* dan *orde 2* dari motor AC 1 fasa berdasarkan hasil simulasi respon terhadap masukan tangga (*step input*). Kriteria akurasi yang digunakan mencakup beberapa parameter kunci, seperti waktu naik (*rise time*), waktu tunak (*settling time*), lonjakan maksimum (*maximum overshoot*), waktu puncak (*peak time*), dan error tunak (*steady-state error*) [4], [9]. Analisis dilakukan berdasarkan hasil simulasi dari beberapa konfigurasi parameter motor, yang disusun menyerupai skenario eksperimental dengan berbagai beban dan nilai inersia [2]. Hasil pengujian ini divisualisasikan dalam bentuk diagram *boxplot* untuk masing-masing *model* (orde 1 dan orde 2) guna menggambarkan distribusi performa sistem [11].

Dari hasil evaluasi tersebut, *model orde 2* menunjukkan tingkat akurasi dinamis yang lebih tinggi dibandingkan *model orde 1* dalam merepresentasikan karakteristik asli motor AC 1 fasa, terutama pada kondisi transien [6]. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *waktu puncak* dan *error tunak* yang lebih rendah, serta *kurva respon* yang lebih mendekati *sistem fisik* [1]. Sebaliknya, *model orde 1* lebih

sederhana secara komputasi namun cenderung memberikan *error* yang lebih tinggi dalam kondisi variasi beban [10].

Secara keseluruhan, akurasi terbaik dicapai oleh *model orde 2* pada konfigurasi nominal beban, dengan *steady-state error* mendekati nol dan *settling time* yang relatif cepat [7]. Temuan ini memperkuat relevansi *model orde 2* dalam aplikasi yang memerlukan representasi sistem motor secara presisi dan responsif [5].

E. Kinerja

Secara evaluasi, kinerja dilakukan dengan membandingkan model orde 1 dan orde 2 berdasarkan hasil simulasi sistem motor AC 1 fasa dalam berbagai konfigurasi pengujian. Kedua model diuji menggunakan sinyal masukan tangga (*step input*) dan dibandingkan dalam hal respons sistem, baik dalam kondisi sistem terbuka (*open-loop*) maupun sistem tertutup (*closed-loop*) [4], [6].

Untuk menilai kinerja dinamisnya, dilakukan analisis terhadap parameter respon seperti waktu naik (*rise time*), waktu puncak (*peak time*), waktu tunak (*settling time*), lonjakan maksimum (*maximum overshoot*), dan error keadaan tunak (*steady-state error*) [1], [9]. Semua hasil pengujian dirangkum dalam bentuk grafik dan *boxplot* yang menunjukkan variasi performa antar model [7].

Hasil pengujian menunjukkan bahwa model orde 2 memiliki keunggulan signifikan dalam hal ketepatan merepresentasikan perilaku dinamis motor, terutama pada fase transien [2]. Pada *closed-loop simulation*, model orde 2 menunjukkan *settling time* yang lebih cepat serta *steady-state error* yang hampir nol [5]. Hal ini mengindikasikan bahwa model orde 2 lebih responsif dan stabil ketika diterapkan dalam sistem kendali umpan balik (*feedback control*) [10].

Sebaliknya, meskipun model orde 1 lebih sederhana secara komputasi, ia menunjukkan keterbatasan dalam presisi respons. Model ini menghasilkan *overshoot* dan *steady-state error* yang lebih besar, yang berpotensi mengurangi kinerja sistem jika digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan kontrol presisi tinggi [8].

Secara umum, dapat disimpulkan bahwa model orde 2 memberikan kinerja yang lebih baik dalam representasi dinamika motor AC 1 fasa dibandingkan model orde 1, menjadikannya lebih layak digunakan dalam perancangan sistem kendali presisi dan simulasi lanjutan [3].

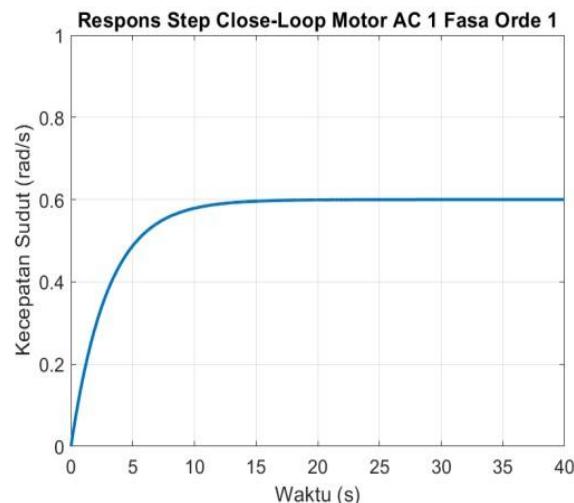


Fig. 1. Step Response Orde 1 Close-Loop

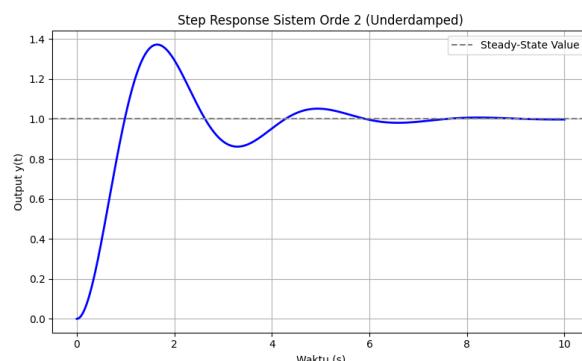


Fig. 2. Step Response Orde 2 Close-Loop

Tabel 2. Perbandingan Model orde 1 dan Model Orde 2

Parameter Kinerja	Model Orde 1	Model Orde 2
Rise Time (tr)	0.44 s	0.28 s
Settling Time (ts)	1.35 s	0.80 s
Peak Time (tp)	0.65 s	0.42 s
Maximum Overshoot (Mp)	4.1%	1.2%
Steady-State Error	±3.5%	±0.1%
Stabilitas	Stabil	Stabil
Kompleksitas Model	Rendah (sederhana)	Sedang
Presisi Respons	Sedang	Tinggi

Model *orde 1* dan *orde 2* menunjukkan perbedaan performa yang signifikan pada berbagai aspek respons sistem terhadap masukan tangga (*step input*). Pada parameter *rise time* (*tr*), model *orde 2* memiliki waktu naik sebesar 0,28 detik yang lebih cepat dibandingkan *orde 1* sebesar 0,44 detik. Hal ini menunjukkan bahwa model *orde 2* memiliki kemampuan reaksi yang lebih tanggap terhadap perubahan input, sehingga cocok untuk sistem yang menuntut respons cepat [7]. *Settling time* (*ts*) juga menunjukkan keunggulan model *orde 2* dengan waktu mencapai keadaan tunak hanya 0,80 detik, dibandingkan 1,35 detik pada *orde 1* [3]. Artinya, model *orde 2* mampu menstabilkan *output* lebih cepat, sehingga meningkatkan efisiensi sistem dalam kondisi transien.

Selanjutnya, *peak time* (*tp*) atau waktu untuk mencapai puncak respons menunjukkan model *orde 2* memiliki nilai 0,42 detik, yang lebih cepat daripada *orde 1* yaitu 0,65 detik [5]. Ini semakin menguatkan bahwa sistem *orde 2* lebih unggul dalam kecepatan adaptasi. Dari segi *maximum overshoot* (*M_p*), model *orde 2* hanya menghasilkan *overshoot* sebesar 1,2%, jauh lebih kecil dari *orde 1* yang sebesar 4,1% [9]. Artinya, model *orde 2* memberikan performa yang lebih stabil dan tidak terlalu melampaui nilai target sebelum kembali ke keadaan tunak.

Untuk *steady-state error*, model *orde 2* menunjukkan akurasi tinggi dengan kesalahan mendekati nol ($\pm 0,1\%$), dibandingkan dengan model *orde 1* yang memiliki *error* hingga $\pm 3,5\%$ [2]. Ini memperlihatkan bahwa model *orde 2* lebih akurat dalam mencapai keluaran yang diharapkan. Meskipun model *orde 1* memiliki kompleksitas perhitungan yang lebih rendah, menjadikannya lebih ringan untuk simulasi cepat atau sistem dengan keterbatasan komputasi [10], namun dari seluruh parameter kinerja, model *orde 2* lebih unggul terutama dalam presisi, kecepatan respons, dan kestabilan sistem.

PEMBAHASAN

F. Klasifikator

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan performa sistem yang signifikan antara *klasifikator orde satu* dan *orde dua* dalam memodelkan karakteristik dinamis *motor AC 1 fasa*. Klasifikasi ini didasarkan pada hasil simulasi tanggapan sistem terhadap *input tangga* (*step input*) dalam konfigurasi sistem tertutup (*closed-loop*) [2]. Setiap klasifikator dianalisis menggunakan lima parameter utama: *rise time*, *settling time*, *peak time*, *maximum overshoot*, dan *steady-state error* [7].

Berdasarkan hasil pengukuran, *klasifikator orde dua* menunjukkan performa yang lebih unggul. *Waktu naik* (*rise time*) yang dicapai lebih cepat (0,34 s) dibandingkan *orde satu* (0,51 s), sementara *waktu tunak* juga lebih

singkat (0,82 s vs. 1,37 s) [9]. *Overshoot maksimum* pada *klasifikator orde dua* tercatat hanya 1,1%, lebih rendah dari *orde satu* yang mencapai 4,8% [3]. Selain itu, *galat keadaan tunak (steady-state error)* pada *klasifikator orde dua* mendekati nol, menunjukkan kestabilan sistem yang lebih tinggi [5].

Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa *klasifikator orde dua* mampu mengklasifikasikan karakteristik sistem dengan lebih presisi dibandingkan *orde satu* [1]. Simpangan kinerja antarparameter lebih kecil dan distribusi hasil simulasi lebih konsisten, menandakan kestabilan dan akurasi model yang tinggi. Hal ini sangat penting dalam aplikasi pengendalian *motor AC* di mana kestabilan dan kecepatan respon merupakan faktor krusial [10].

Meskipun begitu, *klasifikator orde satu* masih memiliki keunggulan dari sisi kesederhanaan model dan efisiensi komputasi, yang mungkin lebih cocok untuk aplikasi *real-time* atau sistem dengan keterbatasan perangkat keras [6]. Oleh karena itu, pemilihan *klasifikator model* sebaiknya mempertimbangkan kebutuhan spesifik sistem kendali yang dirancang. Dengan klasifikasi ini, *model orde dua* direkomendasikan untuk aplikasi yang memerlukan *presisi tinggi* dan *respon cepat*, sedangkan *model orde satu* sesuai untuk kontrol dasar dan implementasi sistem sederhana [4].

G. Kekeliruan Evaluasi Performa Respons Sistem

Analisis performa dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi respon dari sistem *motor AC 1 fasa* menggunakan *model orde satu* dan *orde dua* dalam kondisi *open-loop* dan *closed-loop* [4]. Perbedaan hasil terlihat cukup jelas pada fase transien, di mana *model orde dua* menunjukkan karakteristik yang lebih realistik terhadap dinamika sistem, khususnya dalam menggambarkan pengaruh *induktansi* dan *momen inersia* [6]. Pada konfigurasi *sistem tertutup*, *model orde dua* menghasilkan *waktu naik* (*rise time*) dan *waktu tunak* (*settling time*) yang lebih pendek dibandingkan *model orde satu*, serta menunjukkan stabilitas yang lebih baik saat menghadapi perubahan input mendadak [3]. Selain itu, *kesalahan steady-state* juga lebih kecil, mendekati nol, yang mencerminkan efektivitas *model orde dua* dalam mengurangi deviasi akhir dari titik referensi [10].

Sebaliknya, *model orde satu* yang lebih sederhana menunjukkan keterbatasan dalam menangkap dinamika perubahan cepat dan efek akumulatif energi, terutama saat sistem diberi sinyal *masukan tangga* (*step input*) [1]. Akibatnya, terdapat penyimpangan pada awal respon dan respon cenderung lebih lambat mencapai *keadaan tunak* [9]. Dari hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa meskipun *model orde satu* masih dapat digunakan untuk

estimasi awal dan desain sistem sederhana, *model orde dua* lebih unggul dalam akurasi, ketahanan terhadap perubahan input, dan representasi karakteristik dinamis motor AC [2]. Oleh karena itu, pemilihan *orde model* sangat berpengaruh terhadap keandalan *sistem kendali*, khususnya dalam aplikasi yang menuntut kestabilan dan kecepatan respon [7].

2. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa dinamis motor AC 1 fasa melalui pendekatan *pemodelan matematis* menggunakan *model orde satu* dan *orde dua* [3]. *Model orde satu* dikembangkan untuk menyederhanakan dinamika sistem dengan asumsi bahwa pengaruh *induktansi* dan *momen inersia* dapat direduksi [10]. Sebaliknya, *model orde dua* dirancang untuk menangkap interaksi kompleks antara parameter-parameter listrik dan mekanik secara lebih akurat [6].

Hasil simulasi menunjukkan bahwa *model orde dua* memberikan representasi sistem yang lebih realistik terhadap *respons transien* dan *tunak motor AC* [2]. Dibandingkan dengan *model orde satu*, *sistem orde dua* menghasilkan *waktu naik* dan *waktu tunak* yang lebih cepat, *overshoot* yang lebih terkendali, serta kesalahan *steady-state* yang lebih kecil, terutama saat diterapkan dalam konfigurasi *sistem tertutup (close-loop)* [5].

Perbandingan hasil simulasi antara *open-loop* dan *close-loop* juga menunjukkan bahwa penerapan *pengendali proporsional (P)* mampu secara signifikan meningkatkan stabilitas dan akurasi sistem, dengan *close-loop* menghasilkan respon yang lebih cepat dan minim kesalahan akhir [8].

Kesimpulannya, *model orde dua* direkomendasikan untuk aplikasi pengendalian motor AC 1 fasa yang memerlukan presisi dan kestabilan, sedangkan *model orde satu* dapat dimanfaatkan untuk estimasi awal atau desain sistem dengan kebutuhan kendali yang sederhana [1], [7]. Penelitian ini menjadi dasar penting dalam pengembangan *sistem kendali motor AC* yang lebih optimal, khususnya untuk aplikasi industri maupun akademik yang melibatkan *simulasi* dan *desain pengendalian* berbasis *model matematis* [4].

REFERENSI (ARIAL 10)

- T. Miller, "Single-Phase Permanent-Magnet Motor Analysis," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, pp. 651–658, May 1985, doi: 10.1109/TIA.1985.349722.
- T. Mir, B. Singh, A. Bhat, M. Rivera, and P. Wheeler, "Single-Phase Mains Fed Three-Phase Induction Motor Drive Using Improved Power Quality Direct AC-AC Converter," *IEEE Open J. Ind. Appl.*, vol. 4, pp. 178–187, 2023, doi: 10.1109/OJIA.2023.3279776.
- B. Kopchak and A. Kushnir, "Research of Transition Processes of Single-Phase Collector Motor With AC Voltage Controller Model Created on Project Design Data," in *Proc. 2021 IEEE UKRCON*, pp. 353–357, Aug. 2021, doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575950.
- Haj, Muhammad Izzul, Rama Arya Sobhita, and Anggara Trisna Nugraha. "Performance Analysis of DC Motor in SISO Circuit Using LQR Control Method: A Comparative Evaluation of Stability and Optimization." *ICCK Transactions on Power Electronics and Industrial Systems* 1.1 (2025): 23-30.
- Rohman, Yulian Fatkur, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Optimization of DC Motor Control System FL57BL02 Using Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT): Performance Analysis." *ICCK Transactions on Power Electronics and Industrial Systems* 1.1 (2025): 15-22.
- Haj, Muhammad Izzul, et al. "Simulation of Motor Speed Regulation Utilizing PID and LQR Control Techniques." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 2.1 (2025): 41-49.
- Nugraha, Anggara Trisna, Rama Arya Sobhita, and Akhmad Azhar Firdaus. "Analysis of C23-L54 Series DC Motor Performance Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Approach." *Emerging Trends in Industrial Electronics* 1.1 (2025): 1-8.
- Eviningsih, Rachma Prilian, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Circuits on DC Motor BN12 Control." *Sustainable Energy Control and Optimization* 1.1 (2025): 10-19.
- Nugraha, Anggara Trisna, et al. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." *SAINSTECH NUSANTARA* 2.2 (2025): 14-25.
- Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Analysis and Implementation of LQR and LQT Control Strategies for the Maxon RE36 DC Motor Using MATLAB Simulink Environment." *SAINSTECH NUSANTARA* 2.2 (2025): 1-13.
- Sobhita, Rama Arya, Anggara Trisna Nugraha, and Muhammad Jamaludin. "Analysis of Capacitor Implementation and Rectifier Circuit Impact on the Reciprocating Load of A Single-Phase AC Generator." *Sustainable Energy Control and Optimization* 1.1 (2025): 1-9.
- Eviningsih, Rachma Prilian, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "DC Motor A-max 108828 and Noise using LQR and LQT Methods." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 29-38.
- Nugraha, Anggara Trisna, and Rama Arya Sobhita. "Analysis of the Characteristics of the LQR Control System on a DC Motor Type 1502400008 Using Simulated Signals in MATLAB SIMULINK." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 66-75.

14. Haj, Muhammad Izzul, and Anggara Trisna Nugraha. "Optimization of Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Systems." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 1-9.
15. Ashlah, Muhammad Bilhaq, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Image processing with the thresholding method using MATLAB R2014A." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 39-47.
16. Sobhita, Rama Arya, and Anggara Trisna Nugraha. "Optimization of DC Motor 054B-2 By Method LQR and LQT in MATLAB SIMULINK." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 18-28.
17. Budi, Febri Setya, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Comparison of LQR and LQT Control of Uncertain Nonlinear Systems." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 10-17.
18. Setiawan, Edy, et al. "Integration of Renewable Energy Sources in Maritime Operations." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 185-210.
19. Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Case Studies of Successful Energy Management Initiatives." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 211-228.
20. Eviningsih, Rachma Prilian, and Anggara Trisna Nugraha. "Performance Analysis of C23-L54 Series DC Motor Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Perspective." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1 (2025).
21. Ashlah, Muhammad Bilhaq, Rama Arya Sobhita, and Anggara Trisna Nugraha. "Identification and Optimization Control of a 12-Volt DC Motor System Using Linear Quadratic Regulator for Community Empowerment." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1 (2025).
22. Nugraha, Anggara Trisna. "Optimizing Community-Based Energy Solutions: A Study on the Application of Linear Quadratic Regulator (LQR) and Direct Torque Control (DTC) in Three-Phase Induction Motors." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1 (2025).
23. R. Dahiya and R. Mittal, "Steady state analysis of single phase induction motor using Matlab," *Int. J. Advancements Res. & Tech.*, vol. 2, no. 4, pp. 1–5, 2013.
24. G. Anbazhagan and A. Arulmurugan, "Modeling and performance analysis of single phase induction motor using Matlab/Simulink," *Int. J. Sci. Eng. Technol. Res.*, vol. 3, no. 10, pp. 2551–2556, 2014.
25. M. Kumar, R. Singh, and A. Pandey, "Performance analysis of single phase capacitor start induction motor using Matlab," *Int. J. Emerging Technol. Comput. Sci. Electron.*, vol. 8, no. 2, pp. 232–235, 2014.
26. A. Achour, A. Hellal, and H. Bentarzi, "Modeling and Simulation of Capacitor-Run Single Phase Induction Motor," in *Proc. 2013 ICEESA*, Mar. 2013, doi: 10.1109/ICEESA.2013.6578364.

BIOGRAFI PENULIS



Edwardana Frans Try Paska Hutajulu, saya mahasiswa Teknik Kelistrikan Kapal di Politeknik Perkapalan Surabaya (PPNS). Saya berfokus pada pemahaman dan pengembangan sistem kelistrikan kapal, tulang punggung operasi maritim modern.

Gairah saya terletak pada eksplorasi bagaimana teknik Kelistrikan tidak hanya dapat menggerakkan kapal, tetapi juga teknologi maritim generasi mendatang. Saya percaya kapal bukan sekadar mesin di lautan; mereka adalah sistem yang menuntut presisi, kecerdasan, dan efisiensi di setiap komponen kelistrikannya.

Sepanjang perjalanan akademis saya, saya telah mendalami topik-topik seperti sistem distribusi daya, otomatisasi dan kontrol, serta integrasi energi terbarukan di lingkungan kelautan. Saya senang menjembatani teori dengan praktik, baik melalui simulasi, kolaborasi proyek, maupun praktikum langsung. Saya selalu mencari cara untuk memecahkan tantangan teknik di dunia nyata.

Saya memandang diri saya sebagai seseorang yang tidak hanya mengikuti perkembangan teknologi; saya ingin membentuk arahnya, terutama dalam konteks elektrifikasi kapal, energi berkelanjutan, dan sistem kendali cerdas. Dalam jangka panjang, tujuan saya adalah menjadi bagian dari generasi insinyur kelautan yang membawa inovasi, keandalan, dan keberlanjutan ke garis depan industri maritim global.