

**SISTEM KONTROL PI-GA UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI  
3 FASA****Ilham Ubaidillah<sup>1</sup>, Rifqi Firmansyah<sup>2</sup>, Subuh Isnur Haryudo<sup>3</sup>, Endryansyah<sup>4</sup>**Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang  
60231, IndonesiaEmail: [ilham.21022@mhs.unesa.ac.id](mailto:ilham.21022@mhs.unesa.ac.id), [Rifqifirmansyah@unesa.ac.id](mailto:Rifqifirmansyah@unesa.ac.id),  
[subuhisnur@unesa.ac.id](mailto:subuhisnur@unesa.ac.id), [endryansyah@unesa.ac.id](mailto:endryansyah@unesa.ac.id)**Abstract (English)**

Three-phase induction motors are one of the most widely used types of electric motors in industry due to their reliability, efficiency, and ease of maintenance. However, speed regulation of this motor is still a challenge due to its non-linear characteristics and dependence on the load. This study aims to design and analyze the performance of a three-phase induction motor speed control system based on a Proportional-Integral (PI) controller optimized using the Genetic Algorithm (GA) method. The methodology used includes induction motor modeling, PI control system design, and optimization of  $K_p$  and  $K_i$  parameters using GA with ITAE objective function to minimize steady-state error and response time. Simulations were conducted using MATLAB/Simulink with various scenarios, namely fixed speed reference, changing reference, and load variation. The results show that the PI-GA control system is able to improve the performance of the induction motor compared to the conventional PI, indicated by faster stabilization time, smaller overshoot, and better adaptive ability to changing load conditions. Thus, the PI-GA method proves effective for improving the efficiency and stability of three-phase induction motor speed control systems.

**Article History**

Submitted: 26 Juni 2025

Accepted: 29 Juni 2025

Published: 30 Juni 2025

**Key Words**

Three Phase Induction Motor, PI Controller, Genetic Algorithm, Speed Control, ITAE

**Abstrak (Indonesia)**

Motor induksi tiga fasa adalah jenis motor listrik yang paling banyak dimanfaatkan di dunia industri karena kehandalan, efisiensi serta perawatannya yang relatif mudah. Meskipun demikian, tetap ada tantangan untuk mengatur kecepatan motor ini berhubungan dengan sifatnya yang non-linear dan juga ketergantungan pada beban. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis kinerja sistem kontrol pada pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa berbasis pengendali Proporsional-Integral (PI) yang dioptimasi dengan metode *Genetic Algorithm* (GA). Metodologi yang digunakan mencakup pemodelan motor induksi menggunakan transformasi dq, desain sistem kontrol PI, serta optimasi parameter  $K_p$  dan  $K_i$  menggunakan GA dengan fungsi objektif ITAE untuk meminimalkan kesalahan steady-state dan waktu respon. Pengujian dilakukan secara simulatif menggunakan MATLAB/Simulink dengan skenario referensi kecepatan konstan, berubah, dan variasi beban. Hasil penelitian membuktikan bahwa kendali PI-GA dapat memperbaiki performa motor induksi secara signifikan dibandingkan dengan kontrol PI konvensional yang dalam hal waktu stabilisasi lebih cepat, overshoot lebih kecil, dan adaptif terhadap perubahan beban yang lebih baik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pengendalian PI-GA terbukti efektif untuk meningkatkan efisiensi serta stabilitas sistem pada kontrol kecepatan motor induksi tiga fasa.

**Sejarah Artikel**

Submitted: 26 Juni 2025

Accepted: 29 Juni 2025

Published: 30 Juni 2025

**Kata Kunci**Motor Induksi Tiga Fasa, PI Controller, *Genetic Algorithm*, Pengendalian Kecepatan, ITAE.**PENDAHULUAN**

Perindustrian di Indonesia sudah mengalami kemajuan yang meningkat. Dalam sektor ini, sebagian besar peralatan industri menggunakan tenaga listrik sebagai penggerak utama, salah satunya adalah motor induksi. Motor Induksi Tiga Fasa merupakan perangkat listrik yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik melalui proses induksi elektromagnetik. Motor banyak dipakai dalam berbagai bidang industri, seperti sistem transportasi, pabrik manufaktur, pompa, dan kompresor. Kunggulan utama motor induksi tiga fasa adalah konstruksinya yang sederhana serta perawatan yang rendah biaya serta daya tahan

tinggi terhadap berbagai kondisi lingkungan. Di samping itu, motor ini juga sangat efisien dalam memanfaatkan energi listrik untuk diubah menjadi energi mekanik. Karena keunggulan tersebut motor induksi tiga fasa sangat banyak diterima penggunaannya di sektor industri (Hasyim Rosma et al., 2023).

◆ Meskipun memudahkan pengoperasi dan memiliki banyak manfaat, motor induksi tiga fasa mengalami tantangan dalam kontrol kecepatan. Hal ini karena sistem sangat tergantung pada frekuensi sumber daya, kompleksitas dinamika sistem, serta perubahan beban dan gangguan eksternal. Interaksi antara torsi dan fluks magnetik yang saling memengaruhi tersebut menjadikan pengendalian kecepatan lebih kompleks (Samudera et al., 2020). Beberapa perubahan beban atau gangguan eksternal pada sisi tertentu dapat berpeluang besar menyebabkan ketidakstabilan kecepatan dan menurunkan efisiensi operasional sehingga performa sistem akan sangat terdampak.

Salah satu cara yang paling umum digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa adalah dengan menggunakan PI Controller. Komponen PI controller terdiri dari komponen Proporsional (P) yang menyesuaikan respon sistem terhadap variabel kesalahan kecepatan, dan Integral (I), yang mempercepat respon sistem dengan mengurangi kesalahan *steady-state* (Hasyim Rosma et al., 2023). Kelebihan utama PI controller adalah efisiensi dalam perancangan dan implementasinya, dimana hal itu sangat bermanfaat pada sistem yang memiliki kompleksitas rendah serta menengah. Pengendalian ini banyak dipakai karena efektif untuk mempertahankan kecepatan motor pada set point yang telah ditentukan (Mirdas et al., 2022).

Sistem kontrol PI memang terbukti efektif, namun di dalam penerapannya masih terdapat beberapa kekurangan seperti kurangnya adaptif terhadap perubahan beban, *steady-state error* yang signifikan, *overshoot* yang terlalu besar, dan respon waktu yang lambat (Mirdas et al., 2022). Untuk mengatasi berbagai masalah tersebut, telah dikembangkan suatu sistem yang lebih adaptif dengan menambahkan kontrol PI berbasis *Genetic Algorithm* (GA). GA adalah metode optimasi yang menggunakan prinsip seleksi alam dan bisa digunakan untuk meningkatkan kinerja sistem kontrol PI agar performa hasil kontrolnya semakin baik (Demir & Vural, 2018).

Kombinasi PI dan GA telah menunjukkan peningkatan kinerja yang masih dalam batas yang dapat ditoleransi untuk mengontrol motor induksi tiga fasa karena peningkatan akurasi kontrol kecepatan dengan mengoptimalkan parameter PI yang terkait dengan kesalahan keadaan tetap (Aziz et al., 2023). Tujuannya adalah untuk mengurangi waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan stabil setelah perubahan percepatan atau perlambatan dalam kecepatan atau beban, serta meningkatkan respons yang adaptif terhadap perubahan beban. Selain itu, penggunaan PI-GA membantu dalam menstabilkan sistem dinamis dengan mengurangi perilaku osilasi dari torsi dan kecepatan selama operasi sehingga menghasilkan output sistem yang stabil dan efisien.

## TINJUAN PUSTAKA

### Motor Induksi 3 Fasa

Motor Induksi 3 fasa merupakan salah satu jenis motor listrik yang beroperasi dengan arus bolak-balik (AC) dan paling umum dipakai pada sistem industri modern. Motor ini beroperasi menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Apabila arus tiga fasa disuplai pada stator, maka akan terjadi medan magnet berputar yang memotong bagian rotor sehingga terjadi gaya gerak listrik induksi. Gaya tersebut menginduksikan arus dalam rotor, yang kemudian menghasilkan torsi elektromagnetik untuk memutar poros motor (Qiu et al., 2019).

Jenis motor induksi yang paling umum digunakan di industri adalah rotor *squirrel cage* (sangkar tupai), yang lebih disukai karena keandalannya, kesederhanaan konstruksinya, dan pemeliharaan yang rendah. Selain itu, ada juga motor lain dengan *wound rotor* (rotor litan)

yang biasanya digunakan untuk aplikasi dengan beban berat atau yang memerlukan kontrol torsi yang lebih fleksibel.

Ketika stator diberi tegangan tiga fasa, akan terbentuk medan magnet berputar dengan kecepatan sinkron ( $N_s$ ) yang ditentukan oleh (Boldea & Nasar, 2010).

$$N_s = \frac{60 \times f}{p} \quad (1)$$

Dimana  $N_s$  adalah kecepatan sinkron (rpm),  $f$  adalah frekuensi stator pada motor induksi (Hz), serta  $p$  jumlah pasang kutub/ poles. Medan magnet ini menginduksi tegangan pada rotor, sehingga arus mulai mengalir dan menghasilkan gaya Lorentz. Akibatnya, rotor terdorong untuk berputar searah dengan medan magnet, sehingga terjadi konversi energi listrik menjadi energi mekanik. Tegangan induksi akan muncul ketika ada perbedaan antara kecepatan sudut medan putar stator ( $N_s$ ) dan kecepatan putar rotor ( $N_r$ ). Selisih antara  $N_s$  dan  $N_r$  ini dikenal dengan istilah slip ( $S$ ), yang dapat dinyatakan dengan rumus dibawah ini:

$$S = \frac{\Delta N}{N_s} = \frac{\Delta \omega}{\omega_s} = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2)$$

Di mana  $\omega_s$  adalah kecepatan angular stator (rad/s),  $N_r$  adalah kecepatan rotor (rpm), serta  $\omega_r$  merupakan kecepatan elektris rotor (rad/s).

Slip inilah yang memungkinkan terjadinya gaya elektromagnetik yang mendorong rotor untuk berputar. Besarnya torsi elektromagnetik yang dihasilkan  $T_{em}$  dapat dihitung menggunakan persamaan (Krause et al., 2013).

$$T_{em} = \frac{3P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (3)$$

di mana  $P$  adalah jumlah kutub,  $\lambda$  adalah fluks magnetik, dan  $i$  adalah arus pada masing-masing sumbu  $d$  dan  $q$ .

### Proportional Integral (PI)

Kestabilan sistem dan kepastian respons transien yang cepat dapat dicapai melalui berbagai metode kontrol. Di antara pendekatan tersebut, pengendali Proportional (P), Proportional-Integral (PI), Proportional-Derivative (PD), dan Proportional-Integral-Derivative (PID) merupakan teknik yang paling sering digunakan di bidang teknik kontrol (Huang, 2023). Secara teoritis, fungsi utama kontroler PI adalah mempertahankan variabel proses sedemikian rupa sehingga tidak ada penyimpangan dari nilai referensi yang terjadi dengan meminimalkan perbedaan antara dua entitas yang dibandingkan, yaitu setpoint dan output. Komponen proporsional merespons secara langsung terhadap kesalahan saat ini, sedangkan komponen integral bertugas menghilangkan kesalahan kumulatif selama periode waktu tertentu. Tindakan gabungan dari dua respons ini memungkinkan pengontrol PI mempertahankan kinerja sistem yang optimal dengan akurasi tinggi bahkan dengan gangguan yang cepat dalam perubahan parameter (Chang et al., 2023).

Kontroler PI beroperasi dengan menghasilkan sinyal kontrol  $u(t)$ , yang merupakan kombinasi aksi proporsional pada kesalahan saat ini dan aksi integral pada kesalahan masa lalu kumulatif. Rumus dasar untuk pengontrol PI dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) \cdot dt \quad (4)$$

Dengan  $u(t)$  adalah sinyal kendali,  $e(t)$  adalah error, yaitu selisih antara kecepatan referensi dan kecepatan aktual,  $K_p$  adalah gain proporsional,  $K_i$  adalah gain integral.

Pada penelitian ini, kontrol PI diterapkan pada kontrol sistem motor induksi sangkar tupai tiga fasa dengan simulasi di MATLAB/Simulink. Sistem operasi dikonfigurasi dalam skema loop tertutup dengan perbandingan antara kecepatan aktual dan nilai referensi sebagai patokan. Error dihitung dari selisih antara kecepatan yang terukur dengan kecepatan referensi, yang akan diproses oleh PI Controller untuk menghasilkan sinyal kontrol berupa tegangan keluaran untuk Inverter (PWM-VSI). Dengan menggunakan metode kontrol V/f, motor akan dijaga agar tetap berputar mendekati setpoint dengan pengatur frekuensi dan tegangan input yang diberikan oleh output PI.

Penentuan awal parameter pengendali dilakukan menggunakan pendekatan sistem orde satu berdasarkan fungsi alih berikut (Ogata & Brewer, 1971)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (5)$$

Dimana,  $K$  adalah proses dari gain yang merupakan perbandingan dari antara *steady state* dan *reference*, serta  $\tau$  adalah waktu konstan. Dimana nilai  $\tau$  adalah waktu yang diperoleh dari  $c(\tau)$  saat mencapai 63.2% dari *steady state*.

### Optimalisasi Genetic Algoritim (GA)

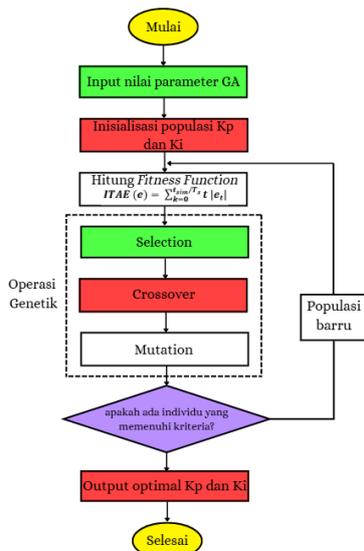
*Genetic algorithm* (GA) ditemukan oleh John Holland pada tahun 1975. GA merupakan metode optimisasi yang didasarkan pendekatan heuristik serta meniru proses-proses alami seperti *selection*, *crossover*, dan *mutation* (Peter Schreiber, 2008). GA diimplementasikan pada berbagai tipe masalah optimalisasi meski tidak ada formulasi matematis eksplisit dari sistem. Salah satu keuntungan terbesar dari pengaplikasian *genetic algorithm* ialah kemampuannya dalam mencapai optimum global serta menghindari perangkap optimum lokal. Untuk alasan itulah GA banyak diterapkan dalam bidang kecerdasan buatan, pemrosesan sinyal, serta pengendalian sistem dinamik. Dalam penerapan sistem kontrol, GA digunakan untuk menyetel parameter pengontrol bagi Proportional-Integral (PI) controller agar respons sistem terhadap gangguan dan perubahan kondisi operasional lebih cepat dan lebih baik (Khater et al., 2009).

Algoritma optimasi ini bertujuan untuk menentukan parameter  $K_p$  dan  $K_i$ , yang dirancang mengurangi berbagai jenis kesalahan termasuk kesalahan yang disebabkan oleh berbagai variasi *input*, *output*, referensi, dan gangguan. Ada empat fungsi objektif yang berbeda yaitu *Integral of Absolute Error* (IAE), *Integral of Square Error* (ISE), *Integral of Time – Weighted Square Error* (ITSE), dan *Integral Time – Weighted Absolute Error* (ITAE) untuk menentukan fungsi biaya yang memberikan kinerja terbaik.

GA digunakan untuk mengoptimalkan parameter  $K_p$  dan  $K_i$  pada pada algoritma pengontrol PI sehingga sistem kontrol loop tertutup dapat beroperasi dengan efisiensi maksimal. Algoritma optimasi fungsi ITAE menghasilkan waktu penyelesaian yang lebih cepat. Kesalahan keadaan tunak yang lebih kecil, dan *overshoot* yang minimal melalui optimasi parameter berbasis GA (Mousakazemi, 2021).

$$ITAE(e) = \sum_{k=0}^{t_{sim}/T_s} t |e_t| \quad (6)$$

Yang dimana ITAE adalah digunakan sebagai fungsi objektif dalam algoritma GA untuk mencari  $K_p$  dan  $K_i$  terbaik pada pengendali PI. Nilai ITAE yang lebih kecil menandakan bahwa sistem memiliki performa kontrol yang lebih baik, yaitu mampu mencapai referensi yang lebih cepat dengan *error minimum*.



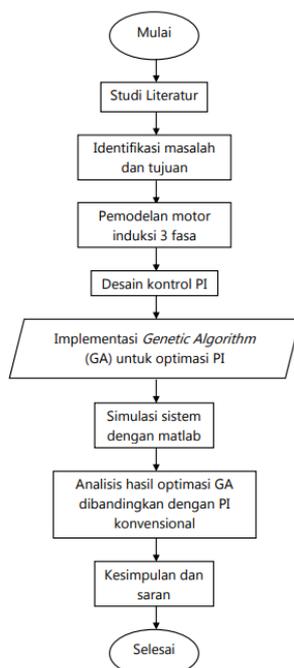
Gambar 1 Alur PI-GA

## METODE

### Pendekatan Penelitian

Pendekatan penelitian yang dipilih berupa pendekatan kuantitatif, yang berfokus pada pengumpulan dan analisis data numerik yang diukur secara objektif. Metode kuantitatif menekankan pentingnya perolehan data melalui pengukuran yang akurat dan sistematis. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk mengembangkan dan menguji desain sistem PI-GA untuk mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa.

### Rancangan Penelitian



Gambar 2 flowchart perancangan penelitian

Gambar 3 menunjukkan diagram alir penelitian yang mengilustrasikan tahapan perancangan sistem kontrol motor induksi untuk mengatur kecepatan dengan kontroler PI konvensional dan kontroler PI yang dioptimasi dengan metode Genetic Algorithm (GA) (PI-

GA). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan performa kontroler PI konvensional dan kontroler PI yang dioptimisasi dengan GA dalam pengaturan kecepatan motor induksi melalui pemodelan, simulasi menggunakan MATLAB/Simulink, dan analisis parameter dinamik sistem.

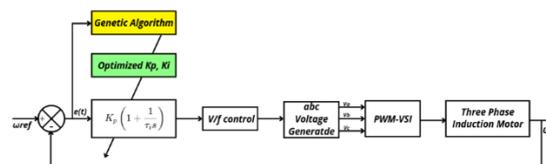
◆ Seperti halnya proyek lainnya, penelitian ini dimulai dengan identifikasi masalah dan pemilihan topik yang berupa desain sistem kontrol optimal yang dapat mempertahankan kontrol kecepatan motor induksi terhadap gangguan beban yang bervariasi dan perubahan topologi sistem. Langkah selanjutnya adalah studi literatur mengenai karakteristik motor induksi, cara kerja kontroler PI, dasar-dasar, aplikasi, dan implementasi dalam sistem kontrol algoritma yang dikenal sebagai Genetic Algorithm (GA).

Setelah tinjauan literatur selesai, model matematis untuk motor induksi berdasarkan kerangka referensi dq dikembangkan bersama dengan persamaan tegangan stator & rotor, hubungan fluks, arus & torsi elektromagnetik. Desain kontroler set-and-forget kemudian disimulasikan menggunakan struktur loop tertutup. Pada tahap ini, nilai parameter  $K_p$  dan  $K_i$  untuk kontroler PI dipilih secara murni dengan estimasi prosedur evaluasi satu langkah pendekatan konvensional.

Inovasi algoritma genetika (GA) pada pengontrol Proportional Integral (PI) berhasil meningkatkan akurasi dan respons sistem dengan memodifikasi parameter  $K_p$  dan  $K_i$ . Algoritma ini mengoptimalkan nilai ITAE atau Integral of Time-weighted Absolute Error, yaitu suatu fungsi yang berkorelasi dengan pengurangan kesalahan kendali seiring berjalannya waktu. Tahapan dalam optimasi mencakup inisialisasi populasi, evaluasi fitness pada parameter yang diusulkan, seleksi, crossover, mutasi, hingga iterasi untuk menemukan solusi optimal.

Tahapan simulasi diawali dengan pembangunan model sistem yang kemudian disimulasikan menggunakan MATLAB/Simulink pada tiga skenario pengujian: (1) kecepatan referensi tetap, (2) perubahan referensi secara bertahap, dan (3) modifikasi beban mekanik secara bertahap. Evaluasi performa dilakukan dengan perbandingan antara kontrol PI konvensional dan PI-GA berdasarkan settling time, overshoot, serta stabilitas kecepatan rotor. Hasil perbandingan ditampilkan dalam bentuk grafik respon sistem dan tabel analisis numerik untuk masing-masing skenario.

### Diagram Arsitektur



Gambar 3 perancangan diagram arsitektur sistem kontrol PI-GA untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa

Gambar 3 menunjukkan diagram blok kontroler berbasis PI untuk sistem penggerak motor induksi 3 Fasa yang parameter PI nya dioptimalkan menggunakan Genetic Algorithm (GA). Sistem ini dirancang untuk meminimalkan kesalahan antara kecepatan referensi ( $\omega_{ref}$ ) dan kecepatan aktual motor ( $\omega$ ) dengan tuning parameter  $K_p$  dan  $K_i$ . Sinyal kesalahan,  $e(t)$ , diproses oleh kontroler PI yang memberikan aksi kontrol responsif dari respons proporsional dan menghilangkan kesalahan kondisi tunak dari aksi integral. Parameter  $K_p$  dan  $K_i$  diatur secara otomatis dengan GA berdasarkan kriteria optimasi ITAE. Proses seleksi, crossover, dan mutasi dalam GA menghasilkan kombinasi parameter optimal yang meningkatkan kinerja sistem kontrol.

Output dari kontroler PI dikirim ke blok kontrol V/f untuk menghasilkan sinyal tegangan yang mempertahankan rasio V/f untuk tegangan tiga fasa sinyal referensi yang

penting untuk menjaga fluks tetap stabil di motor. Sinyal ini kemudian dikonversi oleh PWM-VSI menjadi sinyal tegangan AC tiga fasa ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ) yang diumpangkan ke motor induksi sebagai input utamanya. Motor bertindak sebagai pembangkit yang menerima tegangan output inverter dan merespons sesuai dengan sinyal kontrol yang diberikan. Kecepatan aktual motor yang diukur diumpangkan kembali ke dalam sistem untuk menutup loop yang menjamin stabilitas sekaligus responsif, overshoot minimum, dan kesalahan kondisi tunak.

### Parameter motor induksi 3 fasa

Tabel 1 Parameter motor induksi 3 fasa

Definisi	Nilai	Satuan
Tegangan sumber motor	400	V AC
Jumlah Pole	4	
Frekuensi stator(F)	50	Hz
Momen inersia Rotor( $J_{eq}$ )	0.031	kg.m <sup>2</sup>
Tahanan stator( $R_s$ )	4.85	Ohm
Tahanan rotor( $R_r$ )	3.805	Ohm
Induktansi stator( $L_s$ )	0.274	mH
Induktansi rotor( $L_r$ )	0.274	mH
Induktansi magnetik( $L_m$ )	0.258	mH
Tenaga motor	1.5	KW

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Penelitian

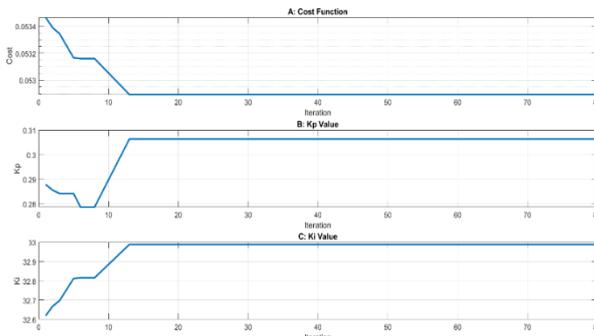
#### Kontrol kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan PI-GA

Optimasi parameter kontroler PI menggunakan GA berfokus pada mendapatkan  $K_p$  dan  $K_i$  yang dapat meningkatkan kinerja sistem. Pada penelitian ini, tuning kontroler PI dilakukan melalui GA. Metode ini dipilih karena keefektifannya dalam mengeksplorasi seluruh ruang solusi tanpa jatuh ke dalam jebakan minimum lokal. Faktor-faktor tertentu seperti ukuran populasi, jumlah iterasi, laju crossover, jumlah generasi keturunan, persentase dan laju mutasi ditetapkan berdasarkan uji pendahuluan dan disesuaikan dengan karakteristik sistem motor induksi tiga fasa yang digunakan. Parameter-parameter yang digunakan dalam optimasi ini disajikan pada Tabel 2

Tabel 2 Parameter GA

Parameter	Nilai
Jumlah Populasi	30
Iterasi	80
Presentase Crossover	0.8
Jumlah Offspring	48
Presentase mutasi	0.3
Jumlah mutasi	18
Laju mutasi	0.2
Parameter seleksi Tournament	3

disajikan pada tabel 2, parameter parameter tersebut disetel guna mendapatkan nilai Kp dan Ki yang optimal serta mendapatkan respon sistem yang diinginkan. Proses iterasi GA menghasilkan grafik konvergensi fitness seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4 Hasil Iterasi GA (A) Hasil Konvergensi GA (B) Nilai Kp (C) Nilai Ki

Gambar 4 (A) adalah grafik hasil konvergensi algoritma GA. Kita dapat melihat bahwa iterasi dilakukan sebanyak 80 kali. Terlihat bahwa nilai fitness menurun secara signifikan Selama 80 kali iterasi. Menandakan proses optimasi berhasil menemukan hasil ITAE terbaik untuk pengendali PI. Nilai best cost sebesar 0.000204 menunjukkan bahwa kesalahan sistem terhadap referensi tidak hanya kecil, tetapi juga dikompensasi lebih cepat seiring waktu. Ini membuktikan bahwa parameter GA mampu memberikan kinerja pengendalian yang optimal (B) Adalah hasil dari optimasi untuk nilai Kp yang mencari nilai antara range 0.275 sampai 0.5 Dan (C) adalah hasil optimasi nilai Ki, dapat dilihat GA mencari nilai Ki pada range 0 sampai 35. Hasil nilai PI yang diperoleh disajikan pada tabel 5.

Tabel 5 Hasil Kp dan Ki PI-GA

Best Cost	Kp	Ki
0.052894	0.306337	32.988499

Pada Tabel 5 disajikan nilai parameter Kp dan Ki yang telah diperoleh melalui proses optimasi menggunakan Genetic Algorithm (GA). Nilai Kp = 0.306337 dan Ki = 32.98849 merupakan hasil terbaik dengan nilai cost terkecil sebesar 0.052894. Nilai gain PI yang relatif besar ini menunjukkan bahwa sistem membutuhkan penguatan yang cukup tinggi agar dapat merespon perubahan kecepatan referensi secara cepat dan akurat, serta meminimalkan kesalahan steady state pada pengendalian kecepatan motor induksi 3 fasa.

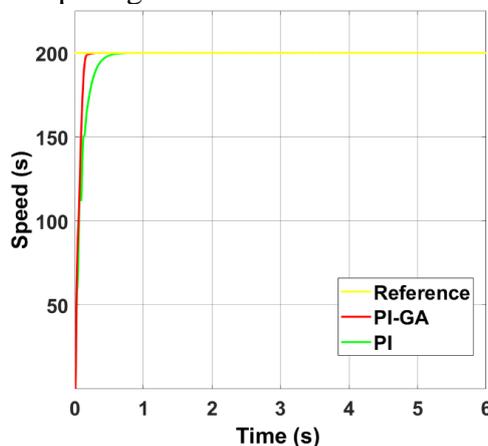
### Perbandingan kontrol kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan PI Konvensional dan PI-GA

Pada bagian ini, fokusnya adalah menganalisis perbandingan kinerja sistem kontrol kecepatan motor induksi tiga fase dalam tiga kondisi berbeda: dengan pengontrol PI konvensional, dan dengan pengontrol PI yang dioptimalkan GA. Tujuannya adalah untuk menilai dampak optimasi GA, jika ada, dalam menanggapi metrik kinerja sistem seperti respon transien, overshoot, waktu pemulihan (recovery time), dan kesalahan tunak (steady state error). Evaluasi dilakukan dalam beberapa skenario yang mencakup referensi kecepatan konstan, referensi variabel, dan perubahan beban mekanis.

#### Reference tetap

Motor induksi 3 fase diuji pada kecepatan referensi konstan 200 rad/s untuk menilai stabilitas dan respon pengendali. Penilaian dilakukan dalam rangka mempertahankan kecepatan motor pada nilai yang ditentukan. Dalam pengujian ini, kontrol kecepatan motor dijaga konstan, sedangkan performa sistem dinilai berdasarkan beberapa parameter utama seperti *rise time*, *overshoot*, dan *settling time*. *Rise time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh kecepatan motor

untuk mencapai nilai steady-state dari posisi awalnya. *Overshoot* merupakan indikator seberapa jauh kecepatan motor melebihi set point sebelum kembali stabil, sedangkan *settling time* adalah durasi saat kecepatan motor sudah cukup mendekati *steady state* dengan batas toleransi kecil. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengendali PI-GA mampu menghasilkan waktu naik dan waktu pemulihan yang lebih cepat dibandingkan PI konvensional, dengan nilai *overshoot* yang lebih kecil, seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 5 Perbandingan kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan PI Konvensional dan PI-GA

Tabel 6 hasil pengujian kecepatan motor induksi 3 fasa dalam kondisi reference tetap

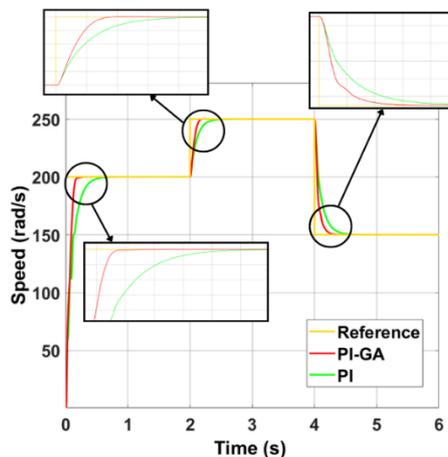
No	Sistem	Overshoot (%)	Rise Time (s)	Settling Time (s)
1	PI Konvensional	0.0298	0.2180	0.4021
2	PI-GA	0.0293	0.1020	0.1485

Pengujian pada kondisi referensi tes tetap dilakukan untuk menilai performa sistem baik dalam mencapai dan mempertahankan kecepatan motor induksi tiga fasa pada setpoint konstan 200 rad/s dengan menggunakan pengendali PI Konvensional dan PI yang dioptimasi dengan Genetic Algorithm (PI-GA). Evaluasi dilakukan berdasarkan tiga parameter utama, yaitu *overshoot*, *rise time*, dan *settling time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa PI-GA memberikan kinerja lebih baik dengan 0,0293% overshoot, rise time 0,1020 detik, serta settling time 0,1485 detik. Sementara PI Konvensional memiliki overshoot 0,0298%, rise time 0,2180 detik dan settling time 0,4021 detik. Perbedaan overshoot sekecil itu meskipun kecil didapat karena respon PI-GA jauh lebih cepat dan stabil dalam menjaga kestabilannya terhadap perubahan menuju steady state. Grafik simulasi juga mengkonfirmasi hasil ini di mana kurva PI-GA lebih dahulu mencapai nilai referensi belakangan kemudian mulai bergerak stabil dikenal sebagai *steady state* dibandingkan PI konvensional sehingga membuktikan optimasi parameter-parameter PI menggunakan algoritma genetika dapat meningkatkan laju respons transien dan kestabilan sistem kontrol motor induksi tiga fasa.

### Reference Berubah

Pengujian dengan kondisi referensi yang berubah-ubah dilakukan untuk menilai respons dinamis sistem terhadap perubahan kecepatan motor induksi tiga fasa, dengan referensi awal 200 rad/s meningkat menjadi 250 rad/s pada  $t = 2$  s dan berkurang menjadi 150 rad/s pada  $t = 4$  s. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk menganalisis kemampuan respons dalam waktu singkat dan stabil dengan cepat dan tegas di sekitar titik setelmen, dengan fokus pada waktu

pemulihan sebagai parameter utama. Sehubungan dengan tujuan ini, dua jenis kontroler diimplementasikan: kontroler PI konvensional dan PI-GA (PI yang dioptimalkan dengan Algoritma Genetika) sehingga keduanya dapat dinilai keefektifannya terhadap perubahan referensi. Hasil simulasi yang dibuktikan melalui grafik dan tabel yang disajikan menunjukkan kinerja kontrol terkait dinamika sistem.



Gambar 6 Perbandingan Reference berubah kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan PI Konvensional dan PI-GA

Tabel 7 hasil pengujian kecepatan motor induksi 3 fasa dalam kondisi *Reference* berubah

Waktu (t)	Reference (rad/s)	PI Konvensional $t_{rec}(s)$	PI-GA $t_{rec}(s)$
0	200	0	0
2	250	0.69	0.18
4	150	0.79	0.25

Dari Tabel 7 dan grafik simulasi, pengujian perubahan referensi kecepatan motor induksi tiga fasa menegaskan bahwa kontrol PI yang dioptimalkan menggunakan Algoritma Genetika (PI-GA) mengungguli kontroler PI konvensional. Ketika referensi diatur untuk meningkat dari 200 rad/s ke 250 rad/s, PI-GA mencatat waktu pemulihan 0,18 detik sementara PI membutuhkan 0,69 detik, yang secara signifikan lebih lambat. Sekali lagi, ketika referensi diatur untuk mengurangi pada 150 rad/s, PI-GA menunjukkan kinerja yang lebih baik dengan waktu pemulihan 0,25 detik sementara PI konvensional mencapai 0,79 detik. Grafik simulasi juga membuktikan hasil ini, menunjukkan bahwa kurva PI-GA mencapai kondisi tunak lebih cepat tanpa osilasi yang berlebihan dibandingkan dengan pengontrol PI konvensional. Hasil ini menekankan penggunaan optimasi GA pada parameter kontroler dari kontroler PI, secara signifikan meningkatkan jeda respons sistem dan stabilitas untuk perubahan setpoint referensi yang diberikan, menjadikan dua atau lebih cara sebagai solusi yang efektif dan adaptif untuk mengatur perubahan kontroler kecepatan motor induksi tiga fasa.

### Pembahasan

Performa kontroler PI yang dioptimalkan dengan Algoritma Genetika (PI-GA) lebih baik daripada PI konvensional karena penyetelan dilakukan secara otomatis menggunakan metrik performa sistem. Tidak seperti metode tuning manual yang mengandalkan trial-and-error atau estimasi kasar berdasarkan dinamika sistem, algoritma GA mencari nilai optimal dari  $K_p$  dan  $K_i$  menggunakan proses berbasis evolusi yang melibatkan seleksi, crossover, dan mutasi. Dalam penelitian ini, fungsi objektif yang digunakan adalah ITAE, yang memberikan

hukuman lebih berat pada kesalahan yang bertahan dari waktu ke waktu, mendorong konvergensi yang lebih cepat dengan presisi tinggi.

Sehubungan dengan respon dinamis, PI-GA menyesuaikan penguatan proporsional dan integral secara optimal, beradaptasi dengan kondisi aktual motor induksi, membuatnya lebih kuat terhadap perubahan input referensi serta variasi beban. Hal ini telah dibuktikan melalui hasil simulasi yang menunjukkan bahwa overshoot, waktu pemulihan, dan stabilitas sistem yang lebih baik, semuanya meningkat dibandingkan dengan PI konvensional. Dengan kemampuan ini, PI-GA menawarkan efisiensi, daya tanggap, dan keandalan yang lebih baik untuk kontrol kecepatan motor induksi tiga fase di berbagai kondisi operasi.

## PENUTUP

### Simpulan

Berdasarkan hasil rancangan dan simulasi, pengendali PI-GA telah diterapkan pada pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa, dalam hal ini kontrol PI konvensional dioptimalkan. Motor induksi di modelkan bersama dengan driver PI controller yang dirancang dan selanjutnya diseimbangkan parameter proporsional  $K_p$  dan integral  $K_i$  menggunakan Genetic Algorithm (GA) berfungsi ITAE. V/f control serta PWM-VSI juga digunakan untuk memperluas kombinasi sistem dalam loop tertutup agar mampu mempertahankan kecepatan motor oscillatory dengan nilai referensi tertentu. Hasil simulasinya menunjukkan bahwa sistem PI-GA dapat memelihara motor, memberikan sinyal kendali secara efektif untuk mempertahankan kestabilan, dan merespons perubahan secara cepat.

Evaluasi kinerja sistem dilakukan di bawah tiga skenario yang berbeda: referensi konstan, perubahan referensi, dan perubahan beban. Menurut hasil yang diperoleh, pengendali berbasis GA menunjukkan waktu pemulihan yang jauh lebih singkat, waktu naik yang lebih cepat, persentase overshoot yang lebih sedikit, serta kesalahan kondisi tunak yang lebih rendah dibandingkan dengan yang dialami oleh pengendali PI konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa optimasi parameter kontrol menggunakan GA meningkatkan secara signifikan kemampuan beradaptasi dan stabilitas sistem sehingga lebih dapat diandalkan dalam aplikasi industri yang membutuhkan respon yang tinggi terhadap perubahan kondisi operasional.

### Saran

Hasil penelitian dan simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa implementasi sistem kontrol PI-GA pada motor induksi tiga fasa perlu dilanjutkan dengan implementasi perangkat keras yang sebenarnya untuk menguji keandalannya pada kondisi nyata. Selain itu, metode optimasi lain seperti *Particle Swarm Optimisation* (PSO), *Ant Colony Optimisation* (ACO), *Grey Wolf Optimizer* (GWO) atau algoritma hibrida dapat menjadi alternatif untuk dibandingkan dengan GA dalam upaya untuk mencapai kinerja kontrol yang lebih efisien. Penelitian selanjutnya juga dapat mempertimbangkan penerapan sistem kontrol berbasis kecerdasan buatan atau sistem kontrol adaptif untuk meningkatkan fleksibilitas sistem dalam merespons perubahan beban yang tidak linier dan gangguan eksternal yang lebih kompleks.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aziz, H. E., Shanshal, A. K., & Ali, A. J. (2023). Optimization of Induction Motor Rotor Bar Geometry Based on Genetic Algorithm. *International Conference on Engineering, Science and Advanced Technology, ICESAT 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICESAT58213.2023.10347297>
- Boldea, I., & Nasar, S. A. (2010). The induction machine handbook. In *The Induction Machine Handbook*. <https://doi.org/10.1201/9781420042658>
- Chang, E. C., Wu, T. T., Tsai, C. Y., Chang, Y. W., & Wu, R. C. (2023). Grey prediction-based proportional-integral controller applied to solar energy systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 2631(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2631/1/012002>

- Demir, G., & Vural, R. A. (2018). Speed control method using genetic algorithm for permanent magnet synchronous motors. *2018 6th International Conference on Control Engineering and Information Technology, CEIT 2018*. <https://doi.org/10.1109/CEIT.2018.8751896>
- Hasyim Rosma, I., Hamzah, A., Kasan, A. L. N., Abdulkarim, A., & Abdelkader, S. (2023). Speed Control of Three Phase Induction Motor using PI Controller with Space Vector Width Modulation (SVPWM) Technique. *Journal of Applied Materials and Technology*, 4(1), 34–41. <https://doi.org/10.31258/jamt.4.1.34-41>
- Huang, H. (2023). PI Control Technology Principal Analysis and Simulation. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 71. <https://doi.org/10.54097/hset.v71i.12676>
- Khater, F., Shaltout, A., Hendawi, E., & El-sebah, M. A. (2009). PI controller based on genetic algorithm for PMSM drive system. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2009.5217925>
- Krause, P., Wasynczuk, O., Sudhoff, S., & Pekarek, S. (2013). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. In *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. <https://doi.org/10.1002/9781118524336>
- Mirdas, Q. H., Yasin, N. M., & Alshamaa, N. K. (2022). PSO Algorithm for Three Phase Induction Motor with V/F Speed Control. *ICOASE 2022 - 4th International Conference on Advanced Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1109/ICOASE56293.2022.10075610>
- Mousakazemi, S. M. H. (2021). Comparison of the error-integral performance indexes in a GA-tuned PID controlling system of a PWR-type nuclear reactor point-kinetics model. *Progress in Nuclear Energy*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103604>
- Ogata, K., & Brewer, J. W. (1971). Modern Control Engineering. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 93(1). <https://doi.org/10.1115/1.3426465>
- Peter Schreiber. (2008). *Applications of Genetic Algorithms*.
- Qiu, H., Zhang, Y., Yang, C., & Yi, R. (2019). The Influence of Stator–Rotor Slot Combination on Performance of High-Voltage Asynchronous Motor. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30(6). <https://doi.org/10.1007/s40313-019-00502-w>
- Samudera, S. H., Rifadil, M. M. H., Ferdiansyah, I., Nugraha, S. D., Qudsi, O. A., & Purwanto, E. (2020). Three Phase Induction Motor Dynamic Speed Regulation Using IP Controller. *2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems, ISRITI 2020*. <https://doi.org/10.1109/ISRITI51436.2020.9315340>
- Muktiadji, R. F., Ramli, M. A., Seedahmed, M. M., & Uswarman, R. (2022, September). Power Sharing Control and Voltage Restoration in DC Microgrid Using PI Fuzzy. In *2022 Fifth International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)* (pp. 130-135). IEEE.
- Firmansyah, R., Seedahmed, M. M., Mahmoud, A., Nugroho, Y. S., & Saputra, P. P. S. (2022, December). IoT-Based Flow Control System Using Node MCU with PI Controller CHR Tuning Method. In *International Joint Conference on Science and Engineering 2022 (IJCSE 2022)* (pp. 186-195). Atlantis Press.
- Muktiadji, R. F., Ramli, M. A., & Milyani, A. H. (2024). Twin-Delayed Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm to Control a Boost Converter in a DC Microgrid. *Electronics*, 13(2), 433.