

ANT COLONY BASED PID TUNED PARAMETERS FOR CONTROLLING SYNCHRONOUS MOTOR

Muhammad Ruswandi Djalal¹, Faisal²

^{1,2}Teknik Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang

Jl. Perintis Kemerdekaan km.10, Makassar, Indonesia 90245

Email : wandi@poliupg.ac.id, faisall@poliupg.ac.id

ABSTRACT

Speed regulation in synchronous motors is a problem in synchronous motor operation. One method of regulating motor speed is by adding a PID controller. The PID parameter must be tuned properly to get the optimum speed. One method of tuning using an intelligent method based on ant colonies. The Ant Colony algorithm in principle searches for food sources based on traces of feromone which then in groups will follow the footsteps that have the largest feromone. With this principle the algorithm will look for the most optimal parameters to be filled in the PID parameters, so that optimal control is obtained at synchronous motor speeds. The results of the ant colony optimization obtained the fitness function value of $1.8833e + 04$, with 50 iterations converging on the 10th iteration, and the optimal PID value parameter where, the P (Proportional) parameter of 0.7431, I (Integral) of 0.3510, and D (Derivative) of 0.1385. With several cases of speed on a synchronous motor, with the PID Ant Colony control, optimal system performance is achieved with minimum overshoot and fast settling.

Keywords: *PID, Ant Colony Optimization, Overshoot, Settling time, Synchronous Motor*

I. INTRODUCTION

Penggunaan motor listrik AC sudah banyak digunakan dari pada motor DC karena arus AC dapat dibangkitkan dan didistribusikan dengan biaya yang lebih murah dari pada arus DC. Selain itu, motor listrik AC memiliki keunggulan dalam hal biaya, ukuran, berat, dan membutuhkan lebih sedikit perawatan dibanding motor DC. Salah satu jenis motor listrik AC adalah motor sinkron. Penggunaan motor sinkron sudah banyak di industry dan sebagai alat pengontrolnya digunakan controller Proportional Integral Derivative (PID). Penggunaan peralatan PID juga memiliki permasalahan tersendiri, yaitu nilai gain yang masih di tuning secara manual. Kontrol (PID) memiliki kinerja yang baik sehingga banyak digunakan dalam dunia industri. Namun memiliki kelemahan yaitu membutuhkan perhitungan matematis yang rumit untuk mengisi masing-masing nilai gain dari PID.

Beberapa metode optimasi berbasis metode konvensional maupun metode cerdas telah banyak digunakan untuk mengoptimasi parameter PID pada motor listrik, diantaranya Artificial Bee Colony [1], Evolutionary Algorithm [2], Particle Swarm Optimization [3, 4], Bio-Inspired Algorithm [5], Bacterial Foraging [6, 7], Genetic Algorithm [8] Fuzzy Logic [9], dan Cuckoo Search [10]. Untuk mengatasi permasalahan di atas, pada penelitian ini diusulkan sebuah metode Algoritma ant colony untuk mengontrol kecepatan motor sinkron.

Ant-Colony Optimization termasuk dalam kelompok Swarm Intelligence, yang merupakan salah satu jenis pengembangan paradigma yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi dimana inspirasi yang digunakan untuk memecahkan masalah tersebut berasal dari perilaku kumpulan atau kawanan (swarm) serangga [11]. Setiap semut dalam

kawanan yang berjalan akan meninggalkan pheromone (semacam zat kimia) pada jalur yang dilaluinya. Pheromone ini menjadi semacam sinyal bagi sesama semut. Jalur yang pendek akan menyisakan sinyal yang lebih kuat. Semut berikutnya, pada saat memutuskan jalur mana yang harus dipilih, biasanya akan cenderung memilih untuk mengikuti jalur dengan sinyal yang paling kuat, sehingga jalur terpendek akan ditemui karena lebih banyak semut yang akan melewati jalur tersebut. Semakin banyak semut yang lewat suatu jalur, semakin kuat sinyal di jalur itu. Penggunaan metode ACO juga digunakan pada penelitian ini sebagai metode untuk menala parameter PID.

Beberapa metode optimasi berbasis metode konvensional maupun metode cerdas telah banyak digunakan untuk mengoptimasi parameter PID Motor listrik, diantaranya Artificial Bee Colony [12], Particle Swarm Optimization [13], Cuckoo Search, Particle Swarm, Neural Network, Firefly dan Flower Pollination, diantaranya [10, 14-20].

Pada penelitian ini akan digunakan metode cerdas (*Artificial Intelligent*) lain untuk menala parameter PID Motor sinkron yaitu dengan metode *Ant Colony Optimization (ACO)* dan akan dianalisa dan dibandingkan respon kecepatan Motor sinkron dengan metode konvensional PID trial-error serta Motor sinkron tanpa kontroler.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan, diantaranya pembuatan algoritma cerdas pada software m-file matlab, pemodelan motor sinkron pada Simulink matlab, pemodelan kontroler PID dan implementasi algoritma cerdas dan motor sinkron. Dijabarkan pada subbab berikut.

2.1. Pemodelan Motor Sinkron [14]

Pemodelan motor sinkron dimodelkan dengan d-q model digambarkan pada persamaan berikut [1].

$$\lambda_{sd} = L_d i_{sd} + \lambda_{PM} \quad (1)$$

$$\lambda_{sq} = L_q i_{sq} \quad (2)$$

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} i_{sd} - \omega_r L_q i_{sq} \quad (3)$$

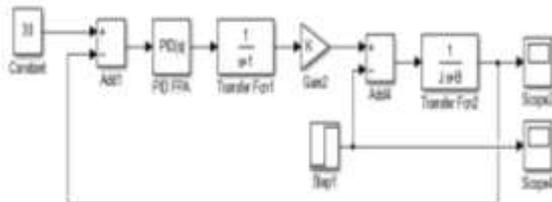
$$v_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_{sq} - \omega_r L_d i_{sd} + \omega_r \lambda_{PM} \quad (4)$$

Di mana λ_{sd} dan λ_{sq} adalah sumbu d-q fluks stator;

i_{sd} dan i_{sq} adalah sumbu d-q arus stator; λ_{PM} adalah fluks medan magnet; R_s adalah resistansi stator; ω_r adalah kecepatan rotor. Torsi T_{EM} dituliskan pada persamaan 5, dengan asumsi L_d dan L_q sama.

$$T_{EM} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_{PM} i_{sq} \quad (5)$$

Pemodelan motor sinkron yang digunakan ditampilkan sebagai berikut.



Gambar 1. Pemodelan Motor sinkron di Simulink

2.2. Pemodelan Kontroler PID

Kontrol PID adalah salah satu kontrol yang sudah banyak digunakan pada aplikasi industri karena strukturnya yang sederhana [10].

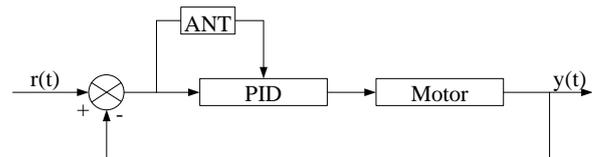
$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de}{dt}] \quad (6)$$

Di mana, $u(t)$ adalah nilai kontrol yang dihitung oleh kontroler PID, K_p adalah koefisien proporsional, T_i adalah integral waktu konstan dan T_d adalah diferensiasi time konstan. Fungsi dari ketiga elemen tersebut adalah :

- Proporsional: menggambarkan sinyal deviasi $e(t)$ dari sistem kontrol proporsional. ketika sinyal $e(t)$ ada, kontroler PID menghasilkan efek kontrol segera untuk mengurangi penyimpangan.
- Integral : digunakan untuk menghilangkan kesalahan statis dan meningkatkan stabilitas sistem.
- Diferensial : mencerminkan perubahan penyimpangan sinyal, memperkenalkan sinyal koreksi sebelum penyimpangan nilai sinyal

menjadi lebih besar dan mempercepat respon sistem untuk mengurangi pengaturan waktu.

Oleh karena itu, merancang kontroler PID terutama berarti menentukan tiga parameter, serta bagaimana mengkonfigurasi ke tiga parameter PID (K_p , K_i , K_d). Dalam penelitian ini, *Ant Colony* diusulkan untuk mencari parameter optimal PID. Blok diagram sistem kontrol ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Sistem Kontroler PID

2.3. Ant Colony Optimization

Penentuan Jarak Antar Kota

Kota yang dimaksud di sini adalah besarnya nilai pembangkitan dari masing-masing pembangkit. Sebelum dilakukan perjalanan, jarak antara nilai dari pembangkit pembangkit yang satu dengan pembangkit yang lainnya dihitung terlebih dahulu (diinisialisasi). Setelah dilakukan inisialisasi, maka semut diletakkan di kota pertama tertentu secara acak. Kemudian semut akan melanjutkan perjalanannya dari satu kota ke kota yang lainnya secara acak sampai ke tujuan akhir, yaitu kota terakhir. Setelah perjalanan selesai, lokasi kota-kota yang telah dilalui oleh semut akan digunakan untuk menghitung solusi yang dihasilkan dari perjalanan tersebut .

Perjalanan Semut

Semut memilih suatu jalur yang akan dilalui mulai dari titik r menuju ke titik s dalam suatu perjalanan dengan probabilitas :

$$p(r,s) = \frac{\gamma(r,s)}{\sum_t \gamma(r,t)} s, l \in N_r^k \quad (7)$$

matrix $\gamma(r,s)$ merepresentasikan jumlah intensitas feromon antara titik r dan s . Kemudian feromon akan diperbaharui melalui persamaan berikut :

$$\gamma(r,s) = \alpha \cdot \gamma(r,s) + \Delta y^k(r,s) \quad (8)$$

dimana α dengan interval $0 < \alpha < 1$ merupakan daya tahan suatu feromon, maka $(1 - \alpha)$ merepresentasikan penguapan yang terjadi pada feromon dan $\Delta y^k(r,s)$ merupakan jumlah feromon yang semut k jatuhkan pada jalur (r,s) .

Perbaharui Feromon Lokal

Jejak feromon (r,s) untuk perjalanan terbaik yang telah dilakukan semut (semut yang menghasilkan parameter optimal PID) akan

diperbaharui dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\gamma(r, s) = \alpha \cdot \gamma(r, s) + \frac{Q}{f_{best}} r, s \in J_{best}^k \quad (9)$$

dengan Q merupakan sebuah konstanta positif yang sangat besar nilainya.

Perbaharui Feromon Global

Untuk menghindari terjadinya stagnan (suatu situasi dimana semut akan mengikuti jalur yang sama, yang mana akan menghasilkan solusi yang sama), maka kekuatan jejak feromon dibatasi pada interval berikut :

$$\gamma(r, s) = \begin{cases} \tau_{min} & \text{if } \gamma(r, s) \leq \tau_{min} \\ \tau_{max} & \text{if } \gamma(r, s) \geq \tau_{max} \end{cases} \quad (10)$$

Batasan atas dan batas bawahnya adalah sebagai berikut :

$$\tau_{max} = \frac{1}{\alpha \cdot f_{best}} \quad (11)$$

$$\tau_{min} = \frac{\tau_{max}}{M^2} \quad (12)$$

dengan M adalah jumlah semut yang melakukan perjalanan.

Plot Perjalanan Semut

Solusi dari perjalanan koloni semut dalam optimasi parameter PID diplot ke dalam sebuah grafik sampai batas maksimum iterasi.

Plot Perjalanan Terbaik

Perjalanan dengan solusi terbaik dari koloni semut (parameter optimal PID) untuk setiap iterasi diplot sampai batas iterasi maksimum.

Flowchart Ant Colony Optimization

Diagram alir (*flowchart*) dari metode *Ant Colony Optimization* yang digunakan untuk mencari parameter optimal PID ditunjukkan pada gambar 4.

Parameter Ant Colony Optimization

Beberapa parameter yang digunakan pada metode *Ant Colony Optimization* pada tesis ini adalah sebagai berikut:

- Jumlah semut = 10
- Iterasi maksimum = 50
- Ketahanan feromon(alpha) = 0.9

Inisialisasi Feromon (Matriks Tau)

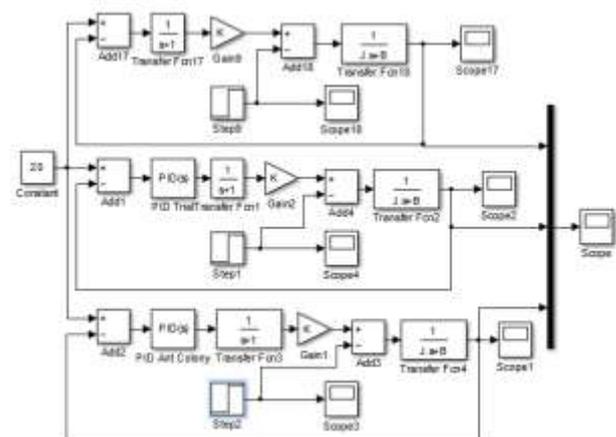
Matriks tau ini memiliki ukuran $n \times m$, dengan n adalah banyaknya kontroler pada sistem, sedangkan m adalah banyaknya parameter PID dengan skala 0 sampai dengan 1 yang memiliki interval 0,01. Nilai dari matriks ini akan diperbaharui setiap dilakukan perjalanan oleh koloni semut.

2.4. Penalaan Kontrol PID dengan Ant Colony

Gambar 4 menunjukkan diagram alir algoritma metode *Ant Colony* yang digunakan pada penelitian ini untuk menala parameter PID. Fungsi objektif yang digunakan untuk menguji kestabilan sistem adalah dengan *Integral Time Absolute Error* (ITAE).

$$ITAE = \int_0^t |\Delta\omega(t)| dt \quad (13)$$

Parameter PID yang ditala oleh Ant Colony adalah K_p , K_i dan K_d . Adapun untuk diagram alir proses penalaan parameter PID dengan menggunakan metode *Ant Colony* ditunjukkan oleh *flowchart* pada Gambar 4 dan gambar 3 menunjukkan pemodelan Motor sinkron pada Simulink Matlab 2013, tanpa kontrol, dengan PID Trial dan PID Ant Colony.



Gambar 3. Pemodelan Motor sinkron di Simulink

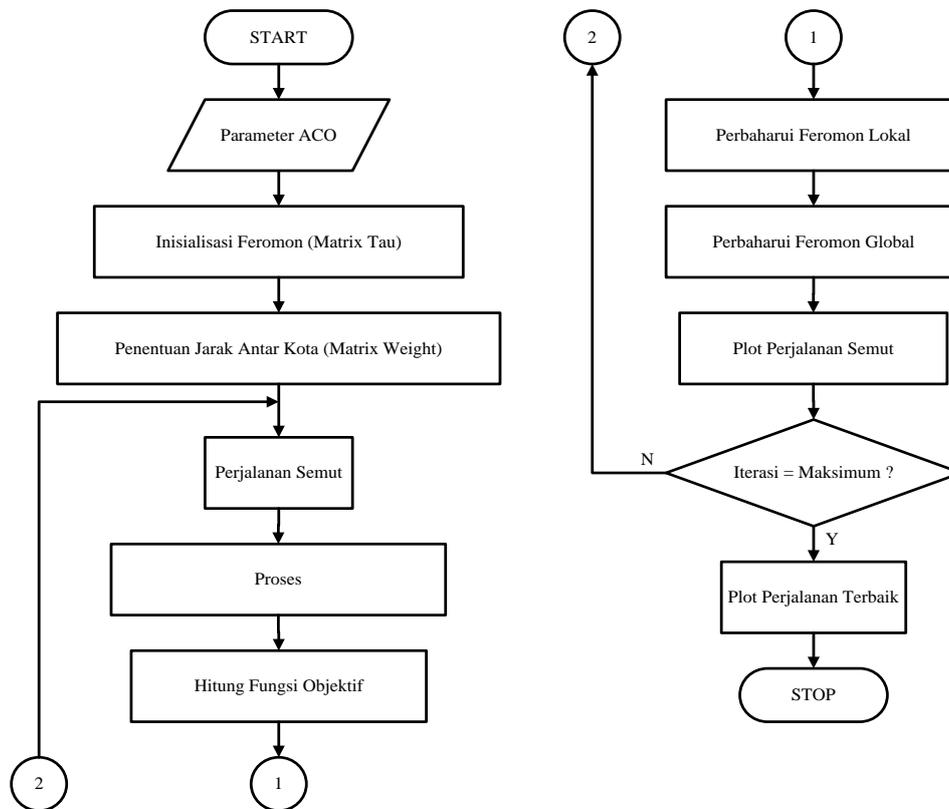
Untuk menjalankan algoritma Ant Colony dibutuhkan beberapa parameter, yang disebutkan pada table berikut ini. Algoritma ant colony dibuat menggunakan software Matlab (m.files) dan pemodelan motor menggunakan Simulink Matlab. Adapun data parameter-parameter ant colony adalah berikut,

Table 1. Parameter ant colony

Parameters	Values
Number of Ants	6
Max Iteration	50
Feromone (Alpha)	0.9
Beta	2

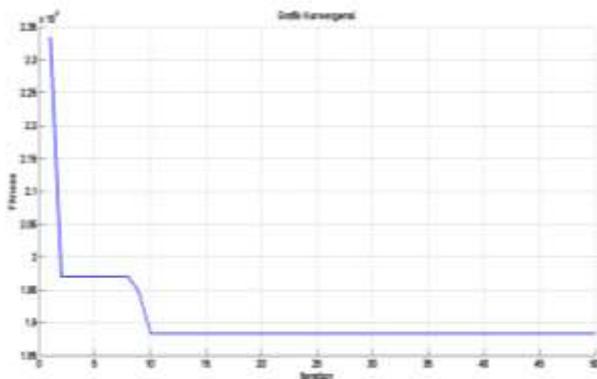
Setelah memasukkan beberapa parameter tersebut di table di atas, maka selanjutnya algoritma ant colony dijalankan untuk optimasi nilai PID dari controller. Nilai yang tepat akan sangat mempengaruhi kinerja respon Motor sinkron yang didesain pada penelitian ini. Algoritma ant colony membutuhkan proses perhitungan sampai menemukan nilai yang optimal. Gambar berikut menunjukkan grafik konvergensi optimasi nilai PID menggunakan algoritma ant colony. Konvergensi

adalah suatu nilai fitness function yang menjabarkan kriteria optimal dari suatu masalah optimasi.



Gambar 4. Flowchart Ant Colony

Gambar 5 menunjukkan grafik konvergensi optimasi nilai PID menggunakan ant colony, di mana berdasarkan grafik terlihat algoritma ant colony tidak membutuhkan waktu yang lama dalam melakukan proses optimasi, hal tersebut terlihat pada iterasi ke-10 algoritma sudah menemukan nilai PID yang optimal dengan nilai fitness sebesar 1.8833e+04. Untuk hasil selengkapnya dapat dilihat pada table berikut ini.



Gambar 5. Grafik Konvergensi Optimasi Kontrol PID Motor sinkron dengan Ant Colony Optimization (ACO)

Table 2. Hasil Optimasi dengan ACO

Total number of iterations=50
fmin = 1.8833e+04
T_best = 0. 7431 0. 3510 0.1385
kp_ant = 0.7431
ki_ant = 0.3510
kd_ant = 0.1385

Hasil optimasi ant colony didapatkan nilai *fitness function* sebesar 1.8833e+04, dengan 50 kali iterasi yang konvergen pada iterasi ke-10, nilai nbest merupakan ant colony terbaik, yang di mana diketahui sebagai hasil optimasi parameter PID, yaitu Kp, Ki dan Kd. Tabel 3 menunjukkan nilai hasil optimasi parameter PID ditala oleh ant colony. Sebagai pembandingan digunakan kendali PID yang dituning dengan cara trial error atau coba-coba. Algoritma Ant Coloni pada prinsipnya mencari sumber makanan berdasarkan jejak feromone yang kemudian secara berkelompok akan mengikuti jejak yang memiliki feromone yang terbesar. Dengan prinsip ini algoritma akan mencari parameter yang paling optimal untuk diisikan pada parameter PID, sehingga didapatkan kendali optimal pada kecepatan Motor sinkron.

Table 3. Hasil Penalaan Parameter PID

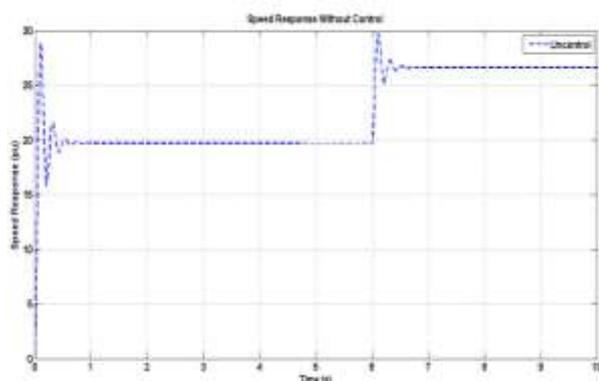
Param.	Trial Error	Ant Colony
--------	-------------	------------

Kp	0.2159	0.7431
Ki	0.1127	0.3510
Kd	0.1531	0.1385

III. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

3.1. Respon Kecepatan Motor Sinkron tanpa Kontrol

Analisa pertama dimulai dengan melihat kinerja Motor sinkron tanpa kontrol. Berikut hasil simulasi dengan menggunakan Matlab. Dengan variasi perubahan kecepatan motor, akan dilihat respon motor dalam mentracking setpoint yang diberikan.



Gambar 6. Respon Kecepatan Motor sinkron tanpa kontrol, untuk t=10s.

Gambar 6 menunjukkan hasil simulasi tanpa kontroler dengan t=10s, didapatkan respon kecepatan Motor sinkron yang sangat lambat, bahkan tidak mencapai setpoint yang sudah ditentukan. Hal ini dikarenakan sistem tidak mempunyai kontroler kecepatan. Hasil simulasi system tanpa kontrol ini dijadikan acuan untuk mendesain kendali motor berbasis PID yang dituning dengan algoritma cerdas menggunakan Ant Colony Optimization, dan sebagai pembandingan digunakan metode PID yang ditune secara trial-error/coba-coba. Berikut hasil simulasi kontrol Motor sinkron tanpa kontrol.

Tabel 4. Respon Overshoot Sistem

Case	Case Speed (pu)	Overshoot (pu)
1	Kecepatan 20pu	28
2	Kecepatan 27 pu (6s)	30

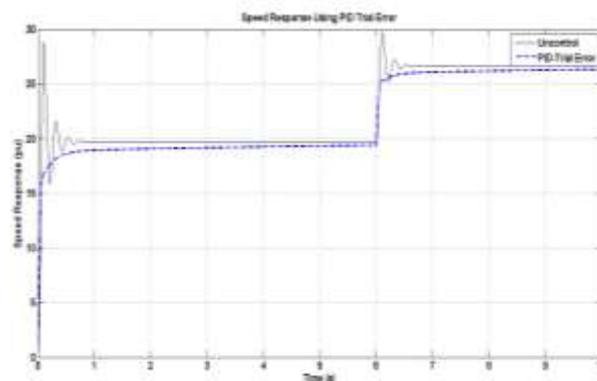
Table 4 menunjukkan respon overshoot kecepatan Motor sinkron tanpa kontrol, di mana digunakan 2 case variasi kecepatan. Case pertama variasi kecepatan sebesar 20pu, respon motor mengalami overshoot maksimum hingga 28pu. Case kedua kecepatan dinaikkan ke 27pu, respon motor mengalami overshoot hingga 30pu. Selain overshoot, kinerja system juga dapat ditinjau dari kriteria settling time, di mana menunjukkan settling time yang lama untuk masing-masing variasi kecepatan,

untuk mencapai kondisi yang sama dengan setpoint yang diberikan. Kinerja system juga dapat dilihat ketika terjadi perubahan kecepatan pada t=6s, system mengalami osilasi overshoot sebelum mencapai kondisi steady yang sama dengan setpoint, hal ini tentu akan mengganggu kinerja dari motor sinkron.

Dari hasil simulasi motor sinkron tanpa kontrol ini dijadikan referensi awal untuk mendesain system dengan kontroler PID berbasis metode cerdas ant colony.

3.2. Respon Kecepatan Motor sinkron dengan Kendali PID Trial Error

Analisa berikutnya, melihat kinerja respon kecepatan Motor sinkron dengan pemasangan kontrol PID, di mana parameter PID di tuning menggunakan cara trial error, berikut hasil simulasinya.



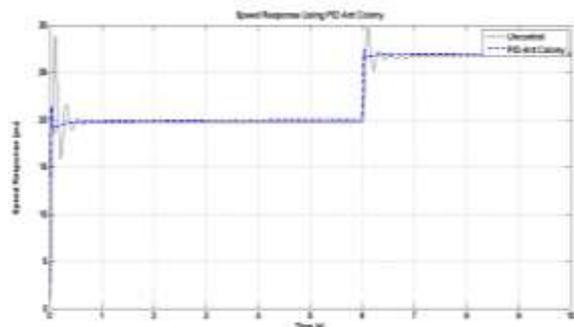
Gambar 7. Respon Kecepatan Motor sinkron dengan PID Trial, t=10s

Gambar 7 menunjukkan hasil simulasi dengan kontroler PID yang ditune dengan trial error, dengan t=10s. Dari desain tersebut didapatkan respon kecepatan Motor sinkron yang membaik dibanding dengan system tanpa kontrol, ditunjukkan dengan overshoot yang berkurang. Dengan menggunakan case yang sama untuk dua variasi kecepatan. Case pertama variasi kecepatan sebesar 20pu, respon motor tidak mengalami overshoot, namun system tidak merespon sesuai dengan setpoint yang diberikan. Respon system yang mendekati setpoint sebesar 19pu. Case kedua kecepatan dinaikkan ke 27pu, respon motor juga tidak mengalami perbaikan, meskipun overshoot sudah dihilangkan, kinerja kontroler tidak mampu membawa kestabilan pada sistem.

Kinerja PID pada system ini masih bisa dioptimalkan dengan penalaan yang tepat. Pada metode ini parameter P (Proportional) sebesar 0.2159, I (Integral) sebesar 0.1127, dan D (Derivative) sebesar 0.1531. Parameter ini pada prinsipnya belum optimal dikarenakan kinerja system masih terdapat error dari set point yang sudah ditentukan.

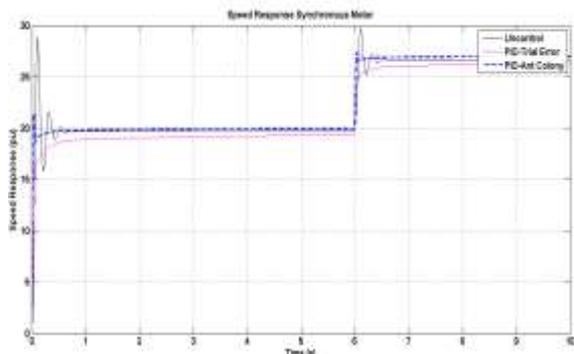
3.3. Respon Kecepatan Motor sinkron dengan PID Ant Colony Optimization

Simulasi berikutnya adalah kontrol Motor sinkron dengan menggunakan PID yang dituning menggunakan algoritma ACO, berikut hasil simulasinya.



Gambar 8. Respon Kecepatan Motor sinkron dengan PID Ant-Colony, $t=10s$

Gambar 8 menunjukkan hasil simulasi dengan kontroler PID yang ditune dengan metode cerdas ant colony, dengan $t=10s$. Dari desain tersebut didapatkan respon kecepatan Motor sinkron yang sempurna dibanding dengan system tanpa kontrol dan kontrol PID trial error, hal ini ditunjukkan dengan respon system yang mengalami perbaikan, di mana kontroler mampu memberikan kestabilan sehingga kecepatan motor sama dengan setpoint yang sudah diberikan. Dengan menggunakan case yang sama untuk dua variasi kecepatan. Case pertama variasi kecepatan sebesar 20pu, dan Case kedua kecepatan dinaikkan ke 27pu. Respon motor menunjukkan kinerja yang optimal dengan setpoint awal yang sudah ditentukan. Selain overshoot, kinerja system juga dapat ditinjau dari kriteria settling time, di mana menunjukkan settling time yang mengalami perbaikan dibanding dengan kondisi system yang tanpa kontrol dan PID trial error. Berikut grafik perbandingan kontrol motor sinkron.



Gambar 9. Perbandingan respon Kecepatan Motor sinkron dengan PID Ant-Colony, $t=10s$

Algoritma Ant Colony pada prinsipnya mencari sumber makanan berdasarkan jejak feromone yang kemudian secara berkelompok akan mengikuti jejak

yang memiliki feromone yang terbesar. Dengan prinsip ini algoritma akan mencari parameter yang paling optimal untuk diisikan pada parameter PID, sehingga didapatkan kendali optimal pada kecepatan Motor sinkron. Pada hasil penalaan metode cerdas, didapatkan parameter PID yang optimal, parameter P (Proportional) sebesar 0.7431, I (Integral) sebesar 0.3510, dan D (Derivative) sebesar 0.1385. Dengan kombinasi parameter yang optimal ini didapatkan kinerja respon kecepatan Motor sinkron yang optimal, ditandai dengan respon settling time kecepatan motor yang cepat dan overshoot yang minimum dibanding dengan metode PID trial dan system tanpa kontrol.

Aplikasi Motor sinkron sangat banyak digunakan dengan kombinasi kendali PID, sehingga dibutuhkan desain kontroler Motor sinkron yang tepat, dalam hal ini sangat diusulkan untuk menggunakan kontroler PID karena sangat simple untuk pengontrolan sistem dengan penalaan parameter menggunakan metode cerdas yang tepat akan didapatkan kinerja yang baik.

IV. KESIMPULAN

Algoritma Ant Colony pada prinsipnya mencari sumber makanan berdasarkan jejak feromone yang kemudian secara berkelompok akan mengikuti jejak yang memiliki feromone yang terbesar. Dengan prinsip ini algoritma akan mencari parameter yang paling optimal untuk diisikan pada parameter PID, sehingga didapatkan kendali optimal pada kecepatan Motor sinkron.

Hasil optimasi ant colony didapatkan nilai *fitness function* sebesar $1.8833e+04$, dengan 50 kali iterasi yang konvergen pada iterasi ke-10, dan parameter nilai PID yang optimal di mana, parameter P (Proportional) sebesar 0.7431, I (Integral) sebesar 0.3510, dan D (Derivative) sebesar 0.1385.

Dengan beberapa case kecepatan pada Motor sinkron, dengan kendali PID Ant Colony didapatkan kinerja system optimal dengan overshoot yang minimum dan settling yang cepat.

Referensi

- [1] W. Liao, Y. Hu, and H. Wang, "Optimization of PID control for DC motor based on artificial bee colony algorithm," in *Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 23-27.
- [2] L. Ting, G. Xie, and Z. Jing, "The PID parameters tuning based on immune mind evolutionary algorithm," in *Control Conference, 2008. CCC 2008. 27th Chinese*, 2008, pp. 51-55.
- [3] X. Fan, J. Cao, H. Yang, X. Dong, C. Liu, Z. Gong, *et al.*, "Optimization of PID parameters based on improved particle-swarm-optimization," in *Information Science*

- and Cloud Computing Companion (ISCC-C), 2013 International Conference on, 2013, pp. 393-397.
- [4] S. BAZI, "Contribution à la Commande Robuste d'une Machine Asynchrone par la Technique PSO «Particle Swarm Optimization," Université de Batna 2, 2009.
- [5] N. Katal and S. K. Singh, "Optimal Tuning of PID Controller for DC Motor using Bio-Inspired Algorithms," *International Journal of Computer Applications*, vol. 56, 2012.
- [6] R.-E. Precup, R.-C. David, E. M. Petriu, S. Preitl, and M.-B. Rădac, "Fuzzy logic-based adaptive gravitational search algorithm for optimal tuning of fuzzy-controlled servo systems," *IET Control Theory & Applications*, vol. 7, pp. 99-107, 2013.
- [7] B. Bhushan and M. Singh, "Adaptive control of nonlinear systems using bacterial foraging algorithm," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 3, p. 335, 2011.
- [8] Y. Chen, Y.-j. Ma, and W.-x. Yun, "Application of improved genetic algorithm in PID controller parameters optimization," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 11, pp. 1524-1530, 2013.
- [9] U. K. Bansal and R. Narvey, "Speed control of DC motor using Fuzzy PID controller."
- [10] M. R. Djalal, D. Ajiatmo, A. Imran, and I. Robandi, "Desain Optimal Kontroler PID Motor DC Menggunakan Cuckoo Search Algorithm," *SENTIA 2015*, vol. 7, 2015.
- [11] Q. Aliklas, N. Satyahadewi, and H. Perdana, "PENERAPAN ALGORITMA MAX-MIN ANT SYSTEM DALAM PENYUSUNAN JADWAL MATA KULIAH DI JURUSAN MATEMATIKA FMIPA UNTAN," *BIMASTER*, vol. 8.
- [12] M. E. El-Telbany, "Tuning PID controller for DC motor: An artificial bees optimization approach," *International Journal of Computer Applications*, vol. 77, 2013.
- [13] M. I. Solihin, L. F. Tack, and M. L. Kean, "Tuning of PID controller using particle swarm optimization (PSO)," *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, vol. 1, pp. 458-461, 2011.
- [14] M. R. Djalal, M. Y. Yunus, A. Imran, and H. Setiadi, "FLOWER POLLINATION ALGORITHM UNTUK OPTIMASI PENGENDALI PID PADA PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI," *JETri Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, pp. 81-100, 2017.
- [15] L. Dwi, R. D. Muhammad, W. Widodo, and R. Imam, "Optimization of PID Controller Design for DC Motor Based on Flower Pollination Algorithm," 2016.
- [16] M. R. Djalal, H. Nurohmah, A. Imran, and M. Y. Yunus, "Aplikasi Metode Cerdas untuk Optimasi Controller PID Motor DC Berbasis Firefly Algorithm," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 6, pp. 76-83, 2017.
- [17] M. R. Djalal and R. Rahmat, "OPTIMISASI KONTROL PID UNTUK MOTOR DC MAGNET PERMANEN MENGGUNAKAN PARTICLE SWARM OPTIMIZATION," *Jurnal TAM (Technology Acceptance Model)*, vol. 8, pp. 117-122, 2017.
- [18] A. Asri, M. R. Djalal, and R. Rahmat, "DESAIN OPTIMAL KONTROLER PROPORSIONAL INTEGRAL MOTOR DC MENGGUNAKAN ALGORITME PARTICLE SWARM OPTIMIZATION," *JETri Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 15, pp. 155-170, 2018.
- [19] M. R. Djalal, A. Pangkung, M. Marhatang, and S. Sonong, "FIELD-ORIENTED CONTROL PERMANENT MAGNET MOTOR SINKRON MENGGUNAKAN ALGORITMA KUNANG-KUNANG," *Jurnal Teknologi*, vol. 10, pp. 153-160, 2018.
- [20] M. R. Djalal, "Modifikasi Desain PID Controller Pada Permanent Magnet Synchronous Motor Dengan Flower Pollination Algorithm."