

AN APPLICATION OF ION MOTION OPTIMIZATION ALGORITHM TO THE PROBLEM OF FINDING FUZZY CONTROLLER PARAMETERS

Duong Thi Mai Thuong*, Nguyen Thi Tuyen, Dao Thi Thu

TNU – University of Information and Communication Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 14/06/2021</p> <p>Revised: 16/02/2022</p> <p>Published: 23/02/2022</p>	<p>In practice, we often use PI controller to stabilize DC motor speed with acceptable control quality. When we need to further improve the control quality and respond to different set speeds, the fuzzy controller is a suitable choice. However, the design of fuzzy controller is often difficult because determining the parameters of this controller depends a lot on the experience of the designer. In this paper, the authors present how to apply the Ions Motion Optimization algorithm to find the optimal parameter of the fuzzy controller for DC motor speed control. The results obtained through simulation and experiment show that the fuzzy controller with parameters determined by the IMO algorithm has very good performance quality with fast setting time (1.42378 s), low overshoot (0.51%) and adapt quickly when the motor set speed changes continuously.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>DC motor Fuzzy Controller Optimal search IMO Algorithm PI Controller</p>	

ỨNG DỤNG GIẢI THUẬT TÌM KIẾM TỐI ƯU DỰA THEO CHUYỂN ĐỘNG ION CHO BÀI TOÁN TÌM KIẾM THAM SỐ TỐI ƯU CỦA BỘ ĐIỀU KHIỂN MỜ

Dương Thị Mai Thương*, Nguyễn Thị Tuyền, Đào Thị Thu

Trường Đại học Công nghệ thông tin và Truyền thông – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 14/06/2021</p> <p>Ngày hoàn thiện: 16/02/2022</p> <p>Ngày đăng: 23/02/2022</p>	<p>Trong thực tế, chúng ta thường sử dụng bộ điều khiển PI để ổn định tốc độ động cơ điện một chiều với chất lượng điều khiển ở mức chấp nhận được. Khi cần nâng cao hơn nữa chất lượng điều khiển và đáp ứng với các tốc độ đặt khác nhau, bộ điều khiển mờ là một sự lựa chọn phù hợp. Tuy nhiên, việc thiết kế bộ điều khiển mờ thường gặp khó khăn do việc xác định các tham số của bộ điều khiển này phụ thuộc rất nhiều vào kinh nghiệm của người thiết kế. Trong bài báo này, các tác giả trình bày cách thức áp dụng giải thuật tìm kiếm tối ưu dựa trên chuyển động ion để tự động tìm kiếm tham số tối ưu của bộ điều khiển mờ cho bài toán ổn định tốc độ động cơ điện một chiều. Các kết quả đạt được thông qua mô phỏng và thực nghiệm cho thấy, bộ điều khiển mờ với các tham số được xác định bởi giải thuật IMO có chất lượng hoạt động rất tốt với thời gian xác lập nhanh (1.42378 s), độ quá điều chỉnh thấp (0.51%) và thích ứng nhanh khi các tốc độ đặt của động cơ thay đổi liên tục.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>Động cơ một chiều Bộ điều khiển mờ Tìm kiếm tối ưu Giải thuật IMO Bộ điều khiển PI</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4643>

* Corresponding author. Email: duongmaithuongcntt@gmail.com

1. Đặt vấn đề

Trong công nghiệp, để điều khiển động cơ một chiều, với yêu cầu chất lượng điều khiển không cao, bộ điều khiển thường được sử dụng là PI do chi phí thấp. Bản chất của phương pháp này là giảm thiểu lỗi giữa tốc độ thực của động cơ và tốc độ đặt mong muốn. Khi sử dụng PI, trong giới hạn thời gian nhất định, động cơ đạt tốc độ mong muốn một cách trơn tru và hoạt động ổn định tại tốc độ đó trong suốt thời gian hoạt động 0.

Tuy nhiên, bộ điều khiển PI chỉ hoạt động trong một vùng tuyến tính hữu hạn. Vì vậy, khi thay đổi điểm hoạt động có thể làm cho bộ điều khiển PI không còn phát huy được tác dụng điều khiển như mong muốn. Để giải quyết vấn đề này, đồng thời nâng cao hơn nữa chất lượng điều khiển, nhiều nhà nghiên cứu đề xuất sử dụng bộ điều khiển mờ 0, đặc biệt là bộ điều khiển mờ theo mô hình kiểu Sugeno 0. Khó khăn khi thiết kế bộ điều khiển mờ là có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng của bộ điều khiển như lựa chọn dạng của hàm thuộc, các phép toán kết nhập, kéo theo, giải mờ, v.v. Sự lựa chọn này không có một quy tắc cụ thể mà phụ thuộc nhiều vào tri thức mang tính chuyên gia của người thiết kế. Một cách khác, để giải quyết khó khăn này đó là sử dụng các thuật toán tối ưu. Chính vì vậy, gần đây, đã rất nhiều công trình công bố đề xuất áp dụng các giải thuật tối ưu vào việc chỉnh định các tham số của bộ điều khiển mờ như sử dụng giải thuật di truyền 0, sử dụng giải thuật tối ưu bầy đàn 0.

Giải thuật tối ưu Ion (Ions Motion Optimization - IMO) là một thuật toán tối ưu hóa được Javidy công bố năm 2015 0. Đây là một thuật toán lấy cảm hứng từ chuyển động của các Ion trong tự nhiên. Các kết quả của thuật toán được tác giả đánh giá trên 10 hàm benchmark là rất thuyết phục 0. Điều này thu hút một loạt các nghiên cứu áp dụng IMO cho một số bài toán cụ thể như: Điều độ kinh tế hệ thống phân phối điện 0, chuẩn đoán bệnh ung thư 0.

Từ các kết quả trên, nhóm tác giả nhận thấy hoàn toàn có khả năng áp dụng giải thuật IMO vào việc tìm kiếm các tham số của bộ điều khiển mờ nhằm nâng cao chất lượng điều khiển và thích ứng khi tốc độ đặt của động cơ thay đổi. Vì vậy, phần tiếp sau của bài báo sẽ trình bày chi tiết việc thiết kế bộ điều khiển mờ cho động cơ điện một chiều cũng như các bước áp dụng thuật toán IMO để tối ưu hóa tham số của bộ điều khiển mờ.

2. Thiết kế bộ điều khiển mờ cho động cơ điện một chiều

2.1. Giới thiệu mô hình hệ thống



Hình 1. Mô hình thí nghiệm điều khiển động cơ điện một chiều

Để kiểm chứng khả năng áp dụng giải thuật IMO trong việc xác định tham số bộ điều khiển mờ, nhóm tác giả xuất phát từ mô hình minh họa một hệ thống điều khiển tốc độ động cơ một chiều như Hình 1. Hệ thống gồm có 3 phần:

- Động cơ một chiều: Chúng tôi sử dụng động cơ B1T20E của hãng YASKAWA.
- Mạch điều khiển động cơ: Các tác giả sử dụng mạch cầu H với IC L298 để điều khiển tốc độ của động cơ DC bằng cách điều khiển điện áp đầu vào của động cơ theo tín hiệu PWM 0.
- Vi điều khiển: Arduino UNO được sử dụng để cài đặt chương trình điều khiển động cơ. Đây là vi điều khiển thường được sử dụng trong các mô hình minh họa do giá thành rẻ và dễ lắp đặt.

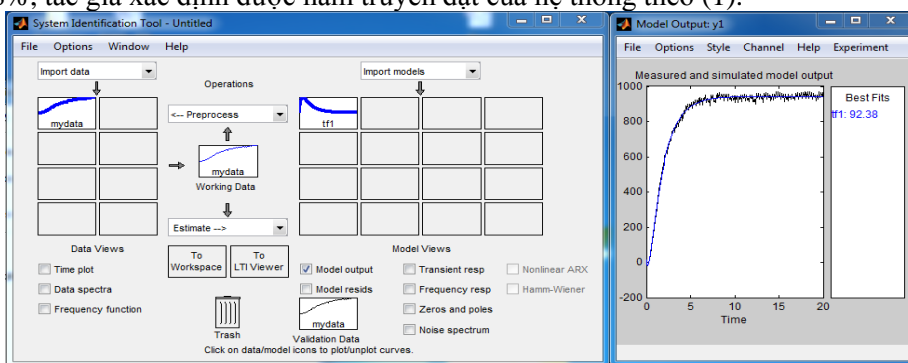
2.2. Nhận dạng mô hình hệ thống

Ưu điểm khi sử dụng bộ điều khiển mờ là nếu dựa vào kiến thức của chuyên gia có thể thiết kế mà không cần nhận dạng mô hình hệ thống. Tuy nhiên, do hiện tại các công cụ hỗ trợ cho việc

nhận dạng hệ thống sẵn có với độ chính xác cao. Điều này cho phép ta có thể kiểm chứng các thiết kế nhanh chóng hơn dựa trên mô phỏng. Chính vì vậy, bước tiếp theo, các tác giả sử dụng phương pháp thực nghiệm để nhận dạng mô hình hệ thống nhằm cho phép xây dựng nên bộ điều khiển PI hay bộ điều khiển mờ phù hợp thông qua mô phỏng. Quá trình này bao gồm:

- Bước 1: Thu thập dữ liệu vào/ra thực nghiệm của hệ thống.
- Bước 2: Tiền xử lý dữ liệu nhằm loại bỏ các giá trị đo kém tin cậy.
- Bước 3: Lựa chọn phương pháp nhận dạng (nhận dạng mô hình có tham số hay không có tham số, phân tích đáp ứng quá độ/phương pháp bình phương tối thiểu...)
- Bước 4: Lựa chọn cấu trúc mô hình
- Bước 5: Xác định các tham số mô hình theo phương pháp/thuật toán đã chọn.

Hình 2 minh họa kết quả của việc sử dụng công cụ chuyên dụng Identification Toolbox trong MATLAB để tiến hành nhận dạng hệ thống theo 5 bước nêu trong 0. Lựa chọn mô hình "tf1" có độ fit 92,38%, tác giả xác định được hàm truyền đạt của hệ thống theo (1).

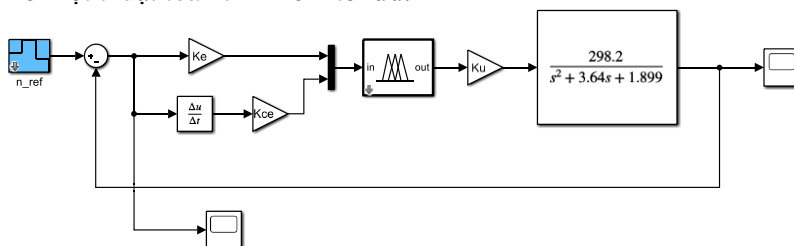


Hình 2. Nhận dạng mô hình hệ thống sử dụng Identification Toolbox

$$G(s) = \frac{298.2}{s^2 + 3.64s + 1.899} \tag{1}$$

2.3. Thiết kế bộ điều khiển mờ Sugeno

Bộ điều khiển FCL-sugeno trong Hình 3 được thiết kế gồm 2 biến đầu vào là sai lệch e giữa tốc độ thực và tốc độ đặt, đạo hàm của sai lệch ce và biến điều khiển đầu ra là u. Miền biến thiên của các đầu vào/ra này đều được xác định trong miền chuẩn đối xứng là [-1, 1]. Khi đưa bộ điều khiển vào hệ thống, miền biến thiên thực sẽ được ánh xạ về miền chuẩn đối xứng bằng các hệ số Ke, Kce và Ku. Giá trị của các hệ số này được xác định thông qua thực nghiệm hoặc được tìm kiếm tự động nhờ một thuật toán tìm kiếm tối ưu.



Hình 3. Sơ đồ mô phỏng điều khiển động cơ một chiều dùng FLC-Sugeno

Các tập mờ được lựa chọn thiết kế như Bảng 1 bao gồm:

- 5 tập mờ cho các biến vào e, ce gồm NB, NS, ZE, PS, PB.
- 7 tập mờ cho biến đầu ra u dạng singleton gồm NB, N, NS, ZE, PS, P, PB.

Hệ luật điều khiển được thiết kế theo Bảng 2.

Bảng 1. Ký hiệu ngôn ngữ mờ cho các tập mờ

NB	N	NS	ZE	PS	P	PB
Negative Big	Negative	Negative Small	Zero	Positive Small	Positive	Positive Big

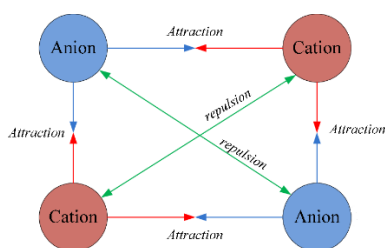
Bảng 2. Hệ luật điều khiển của FLC-sugeno

e	ce	NB	NS	ZE	PS	PB
NB		NB	NS	ZE	PS	PB
NS		NB	NS	ZE	PS	PB
ZE		N	NS	ZE	PS	P
PS		NS	ZE	PS	P	PB
PB		ZE	PS	P	PB	PB

3. Tối ưu hóa tham số của bộ điều khiển mờ dùng giải thuật IMO

3.1. Giải thuật IMO

IMO là một thuật toán tối ưu hóa được Javidy công bố năm 2015 lấy cảm hứng từ hoạt động của các hạt mang điện (anion và cation) trong thực tế. Các ion có điện tích cùng dấu thì đẩy nhau, trái dấu sẽ hút nhau (Hình 4) [6].

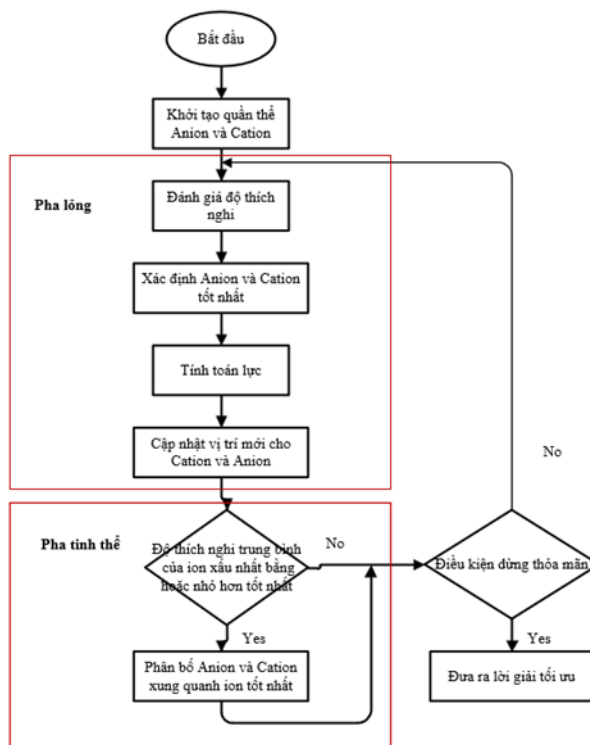


Hình 4. Các mô hình khái niệm và anion, cation, lực hút và lực đẩy 0

Trong thuật toán IMO, mỗi ion sẽ đại diện cho một lời giải của bài toán tối ưu. Các ion lại được chia thành hai nhóm anion (ion âm) và cation (ion dương). Dựa vào sự phân bố của các ion này, lực hút/lực đẩy sẽ di chuyển các ion xung quanh không gian tìm kiếm. Thuật toán IMO sẽ di chuyển các ion tới các ion tốt nhất với các điện tích trái dấu. Anion di chuyển về phía cation tốt nhất, trong khi cation di chuyển về phía anion tốt nhất. Như vậy, sau một thời gian, lời giải sẽ hội tụ về anion hoặc cation tốt nhất. Hình 5 mô tả cụ thể các bước của thuật toán IMO bao gồm:

Bước 1. Khởi tạo quần thể IMO

- Tạo các tham số của giải thuật IMO như số lần lặp M, giá trị ngẫu nhiên;



Hình 5. Các bước chung của thuật toán IMO

- Tạo ngẫu nhiên quần thể ban đầu gồm N/2 anion và N/2 cation. Mỗi cá thể trong quần thể là một lời giải cho bài toán tìm kiếm.

Bước 2. Cập nhật vị trí Ion theo pha lỏng

- Tính toán giá trị thích nghi của mỗi cá thể. Giá trị thích nghi chính là hàm mục tiêu cần đạt được.
- Xác định các anion tốt nhất ($Abest$) và cation tốt nhất ($Cbest$).
- Tính toán khoảng cách của các anion tới cation tốt nhất, khoảng cách của cation tới anion tốt nhất theo (2).

$$\begin{aligned} AD_{i,j} &= d(A_{i,j}, Cbest_j) = |Cbest_j - A_{i,j}| \\ CD_{i,j} &= d(C_{i,j}, Abest_j) = |Abest_j - C_{i,j}| \end{aligned} \quad (2)$$

- Xác định lực hút giữa thành phần j của anion thứ i trong quần thể tới cation tốt nhất, giữa thành phần j của cation thứ i trong quần thể tới anion tốt nhất.

$$AF_{i,j} = \frac{1}{1 + e^{-0.1/AD_{i,j}}}, \quad CF_{i,j} = \frac{1}{1 + e^{-0.1/CD_{i,j}}} \quad (3)$$

- Sau khi tính toán lực, vị trí của anion và cation được cập nhật như sau:

$$A_{i,j} = A_{i,j} + AF_{i,j} \times (Cbest_j - A_{i,j}) \quad (4)$$

$$C_{i,j} = C_{i,j} + CF_{i,j} \times (Abest_j - C_{i,j}) \quad (5)$$

Bước 3. Cập nhật vị trí Ion theo pha tinh thể

if (CbestFit) >= CworstFit / 2 and AbestFit >= AworstFit / 2

if rand() > 0.5

$$A_i = A_i + \phi_1 \times (Cbest - 1)$$

else

$$A_i = A_i + \phi_1 \times Cbest$$

endif

if rand() > 0.5

$$C_i = C_i + \phi_2 \times (Abest - 1) \quad (6)$$

else

$$C_i = C_i + \phi_2 \times Abest$$

endif

if rand() < 0.05

Re-initialized A_i and C_i

endif

endif

Bước 4. Kiểm tra điều kiện lặp và dừng của thuật toán

- Nếu điều kiện kết thúc đáp ứng (ví dụ: số lần lặp tối đa) chấm dứt quá trình và gửi ra kết quả là ion tốt nhất trong số anion và cation.

- Nếu chưa đạt đến điều kiện dừng thì lặp lại từ bước 2.

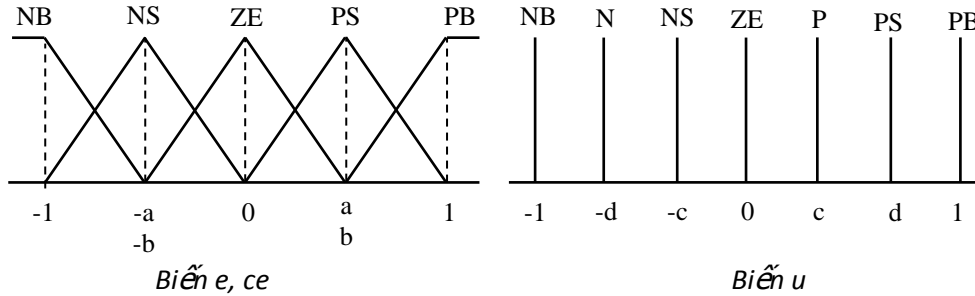
3.2. Ứng dụng giải thuật IMO cho bài toán tìm kiếm tham số bộ điều khiển mờ

Để điều chỉnh hình dạng tập mờ hướng tới tối ưu cho bộ điều khiển, trong nghiên cứu này, một số ràng buộc được đưa vào để hạn chế số biến cần tối ưu như sau:

- Giả thiết các tập mờ được phân hoạch là đối xứng trên miền [-1, 1]. Điều đó có nghĩa là tập mờ ZE có dạng tam giác cân.

- Tập mờ của hàm thuộc NB là đối xứng với tập mờ PB qua giá trị 0. Tương tự ta có các tập mờ đối xứng qua điểm 0 khác là (N, P), (NS, PS). Như vậy, để xây dựng nên các tập mờ có tính đối xứng, ta chỉ cần điều chỉnh giá trị các điểm a (đối với biến e), b (đối với biến ce) và c, d (đối với biến u) như trên Hình 6. Vậy, để tối ưu bộ điều khiển mờ FLC-sugeno, ta cần tối ưu 7 biến

bao gồm 4 biến cho việc điều chỉnh hình dáng tập mờ là a, b, c, d và 3 biến cho việc xác định K_e , K_{ce} và K_u để ánh xạ từ miền biến thiên vật lý về miền [-1 1]. Miền tìm kiếm cho các biến được xác định trong khoảng: a, b ∈ [0,2, 0,75]; c ∈ [0,45, 0,75]; d ∈ [0,25, 0,45], K_e ∈ [0,015, 0,025], K_{ce} ∈ [0,001, 0,01], K_u ∈ [10, 200].

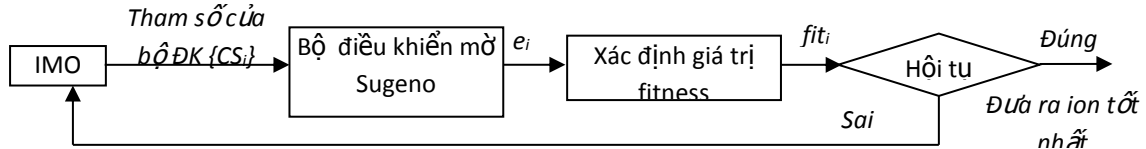


Biến e, ce
Biến u
Hình 6. Sơ đồ tối ưu bộ điều khiển FLC-Sugeno bằng PSO

Hình 7 mô tả việc sử dụng IMO để tìm ra các tham số tối ưu của các bộ điều khiển mờ. Mỗi ion sẽ đại diện cho 7 tham số của một bộ điều khiển mờ {CSi}. Độ thích nghi của từng ion được đánh giá nhờ hàm fitness cho ta các giá trị fit_i. Ion {CSi} được xem là thích nghi nhất nếu có giá trị fit_i nhỏ nhất. Khi điều kiện hội tụ đảm bảo, ta sẽ tìm được ion chứa các tham số phù hợp nhất của bộ điều khiển. Ở đây, hàm thích nghi chính là giá trị tổng sai lệch tuyệt đối (IAE) được tính theo (7).

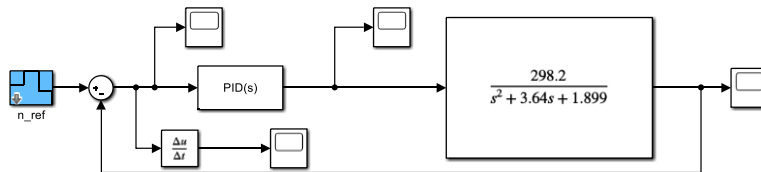
$$fit_i(k) = \sum_{j=1}^M |e_j(k)| \tag{7}$$

Trong đó: $e(k)$ là sai lệch giữa đầu ra lý thuyết và đầu ra thực tế;
M là số lượng mẫu cần khảo sát.



Hình 7. Tối ưu tham số bộ điều khiển mờ dùng IMO

4. Đánh giá kết quả thông qua mô phỏng và thực nghiệm



Hình 8. Sơ đồ mô phỏng điều khiển động cơ điện một chiều dùng bộ điều khiển PI

Bảng 3. Thiết lập giá trị tham chiếu cho mô phỏng

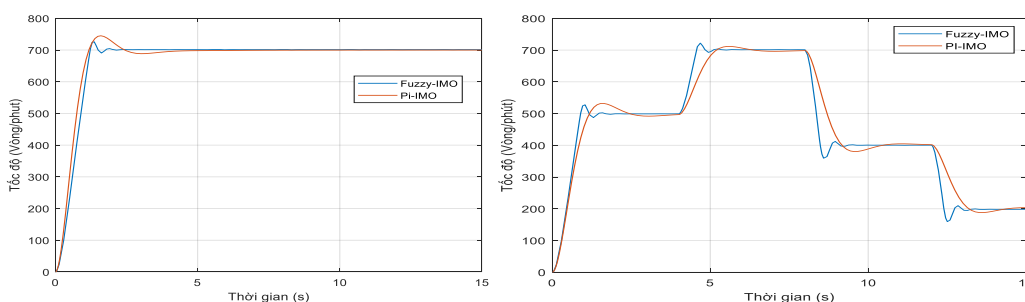
Thời gian [s]	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 15
Vận tốc đặt [vòng/phút]	500	700	400	200

Bảng 4. Các tham số tối ưu tìm được của bộ điều khiển PI_IMO và Fuzzy_IMO

PI_IMO	KP	KI					
	0,0208543	0,555561					
Fuzzy_IMO	a	b	c	d	K_e	K_{ce}	K_u
	0,277744	0,64584	0,47924	0,44989	0,03308	0,001	22,7604

Để kiểm chứng kết quả của phương pháp đề xuất, chúng tôi sử dụng công cụ MATLAB simulink cho mô phỏng đánh giá việc ổn định động cơ một chiều của bộ điều khiển mờ nói trên trong khoảng thời gian 15s ban đầu tại tốc độ 700 vòng/phút và sau đó tại các tốc độ đặt khác nhau như trong Bảng 3. Các kết quả này cũng được so sánh với các kết quả hoạt động của bộ điều khiển PI có tham số K_p , K_i cũng được chỉnh định bởi IMO (Hình 8) trong cùng điều kiện hoạt động. Sau khi chạy tối ưu nhiều lần, ta nhận được các tham số tối ưu của hai bộ điều khiển PI_IMO và Fuzzy_IMO như trên Bảng 4.

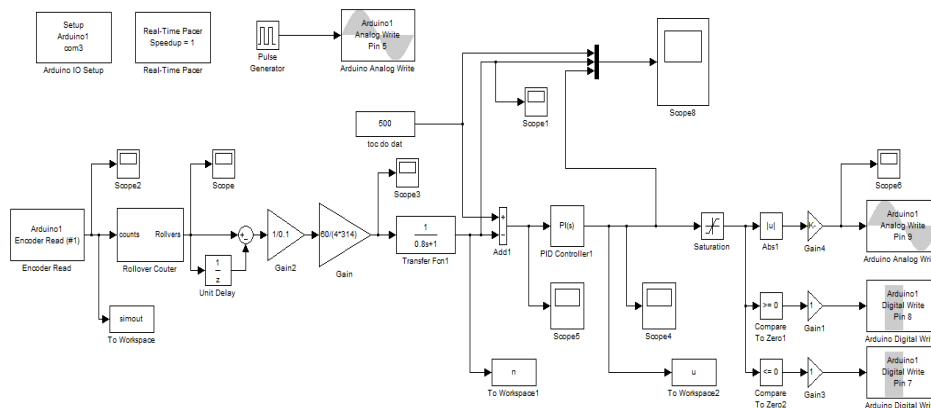
Đường đặc tính của các bộ điều khiển được mô tả trong Hình 9. Các tham số cụ thể về chất lượng hoạt động của các bộ điều khiển được mô tả trong Bảng 5. Các kết quả này cho thấy so với PI_IMO, bộ điều khiển Fuzzy_IMO có thời gian xác lập nhanh hơn (1.42378 s so với 2,1787 s), độ quá điều chỉnh thấp hơn (0,51% so với 0,92%), tổng sai lệch tuyệt đối (IAE), tổng bình phương sai lệch (ISE), trung bình bình phương sai lệch (MSE) đều nhỏ hơn. Đặc biệt, khi tốc độ đặt thay đổi liên tục, bộ điều khiển Fuzzy_IMO cho thấy sự ổn định hơn nhiều.



Hình 9. Đặc tính của bộ điều khiển PI_ IMO và Fuzzy IMO khi tốc độ đặt 700 vòng/phút và khi tốc độ đặt thay đổi theo Bảng 3

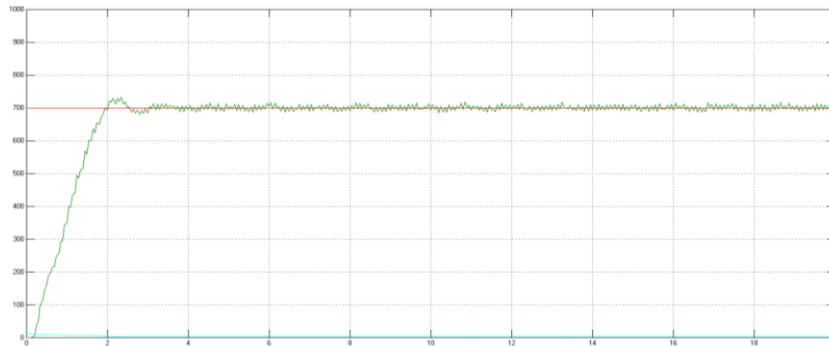
Bảng 5. Một số tham số mô phỏng chất lượng điều khiển khi tốc độ đặt là 700 vòng/phút

Bộ điều khiển	Thời gian lên (s)	Thời gian xác lập (s)	Độ quá điều chỉnh (%)	IAE	ISE	MSE
PI_ IMO	0,7762	2,1787	0,9179	1,2992e+04	7,8802e+06	9,6101e+04
Fuzzy_ IMO	0,876528	1,42378	0,5102	7,2371e+03	4,5595e+06	5,0104e+04



Hình 10. Sơ đồ minh họa việc xây dựng bộ điều khiển PI thực tế

Từ các kết quả đạt được theo mô phỏng, chúng tôi tiến hành thực nghiệm theo sơ đồ kết nối mô tả trong Hình 10 để kiểm chứng hoạt động của bộ điều khiển Fuzzy_IMO trên thiết bị thực. Kết quả hoạt động của bộ điều khiển Fuzzy_IMO thực tế với tốc độ đặt 700v/p trong Hình 11 cho thấy, bộ điều khiển làm việc khá hiệu quả, tốc độ đo được luôn bám sát với tốc độ đặt, thời gian đáp ứng tốc độ trong giới hạn cho phép. Độ quá điều chỉnh thấp, đường đặc tính dao động rất nhỏ (bởi nhiễu) xung quanh vị trí tốc độ đặt.



Hình 11. Kết quả hoạt động của bộ điều khiển Fuzzy_IMO thực tế với tốc độ đặt 700v/p

4. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả trình bày các bước chi tiết cho việc sử dụng giải thuật IMO để tìm kiếm các tham số của bộ điều khiển PI hay Fuzzy Sugeno nhằm ổn định tốc độ động cơ một chiều. Từ một mô hình phân cứng minh họa bài toán ổn định tốc độ động cơ một chiều, tác giả tiến hành nhận dạng mô hình đối tượng thực thông qua Identification Toolbox của MATLAB. Tiếp đó, dựa trên hàm truyền đạt thu được của đối tượng nhận dạng, tác giả xây dựng bộ điều khiển kinh điển PI và Fuzzy. Cuối cùng, thuật toán IMO được sử dụng để tìm kiếm các tham số tối ưu cho bộ điều khiển PI và Fuzzy. Các kết quả kiểm chứng trên mô phỏng và thực tiễn cho thấy, bộ điều khiển sử dụng giải thuật IMO có chất lượng điều khiển tốt. Đặc biệt, kết quả mô phỏng cũng cho thấy, so với bộ điều khiển PI, bộ điều khiển Fuzzy cho chất lượng điều khiển tốt hơn, nhất là khi tốc độ đặt thay đổi liên tục. Điều này chứng tỏ rằng, hoàn toàn có khả năng áp dụng giải thuật IMO cho việc tìm kiếm các tham số để nâng cao chất lượng hoạt động của các bộ điều khiển trong thực tế.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi quỹ hỗ trợ nghiên cứu khoa học của Trường Đại học Công nghệ thông tin và Truyền thông (thuộc đề tài cấp trường mã số T2020-07-15). Chúng tôi rất cảm ơn Nhà trường cùng các đồng nghiệp đã hỗ trợ và đóng góp nhiều ý kiến quý báu cho việc thực hiện nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] R. P. Borase, D. K. Maghade, and S. Y. Sondkar, "A review of PID control, tuning methods and applications," *Int. J. Dynam. Control*, vol. 9, pp. 818-827, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00665-4>.
- [2] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*. An Imprint of Addison-Wesley Longman, Inc, 1998.
- [3] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116-132, Jan.-Feb. 1985, doi: 10.1109/TSMC.1985.6313399.
- [4] M. D. Islam, A. Sutradhar, S. Miah, Shahin, and S. M. Karim, "Fuzzy Logic and PID Controllers for DC Motor Using Genetic Algorithm," *International Journal of Control Science and Engineering*, vol. 10, pp. 37-41, 2020, doi: 10.5923/j.control.20201002.03.
- [5] N. Basil and O. Bayat, "Improve DC Motor System using Fuzzy Logic Control by Particle Swarm Optimization in Use Scale Factors," *International Journal of Computer Science and Mobile Computing – IJCSMC*, vol. 8, no. 3, pp. 152-160, 2019.
- [6] B. Javidy, A. Hatamlou, and S. Mirjalili, "Ions motion algorithm for solving optimization problems," *Applied Soft Computing*, vol. 32, no. 3, pp. 72-79, 2015.
- [7] T. T. Nguyen, M. J. Wang, J. S. Pan, T. Dao, and T. G. Ngo, "A Load Economic Dispatch Based on Ion Motion Optimization Algorithm," in J. S. Pan, J. Li, P. W. Tsai, L. Jain (eds) *Advances in Intelligent*

-
- Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Smart Innovation, Systems and Technologies*, Springer, Singapore, vol. 157, 2020.
- [8] C.-H. Yang and K.-C. Wu, "Breast Cancer Risk Prediction Using Ions Motion Optimization Algorithm," *Journal of Life Sciences and Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 49-55, December 2016.
- [9] K. Gogi, C. M. Maheshan, and H. Kumar, "Automatic Solar Tracker with Dust Wiper Using PID Controller," *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, vol. 2, pp. 1422-1427, 2017, doi: 10.31142/ijtsrd7197.
- [10] L. Ljung, *System Identification Toolbox™ User's Guide*, The MathWorks, Inc, 2014.