

DOI:10.22144/ctu.jvn.2022.220

KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ BỘ ĐIỀU KHIỂN FUZZY PD + I TRÊN ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ BA PHA

Nguyễn Quốc Nghĩa¹, Lâm Quốc Hân² và Nguyễn Chí Ngôn^{3*}

¹Học viên cao học lớp Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa, Khóa 28, Trường Đại học Cần Thơ

²Học viên Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

³Trường Bách Khoa, Trường Đại học Cần Thơ

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Chí Ngôn (email: ncngon@ctu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 23/05/2022

Ngày nhận bài sửa: 25/06/2022

Ngày duyệt đăng: 07/07/2022

Title:

The control model of a three-phase induction motor using the fuzzy proportional derivative plus integral controller

Từ khóa:

Bộ điều khiển PID, bộ điều khiển mờ, động cơ không đồng bộ, fuzzy PD+I, mô phỏng

Keywords:

Induction motor, PID controller, fuzzy controller, fuzzy PD+I, simulation

ABSTRACT

This paper has provided the control model of the three-phase induction motor using the fuzzy proportional derivative plus integral controller. The three-phase asynchronous motor is simulated on MATLAB®/Simulink based on the equation of state on the rotor flux coordinate system (dq coordinate system). Simulation with different loads and disturbances effecting on the system as well as comparison with PI and investigation of the influence of the fuzzy proportional derivative plus integral controller. Simulation results showed that the proposed solution is better suited to the controller than PI controller, set time of reasonable system, destructively overshoot and low output error. In addition, the controller is stable with interference from the system.

TÓM TẮT

Bộ điều khiển vi phân tỷ lệ mờ cộng tích phân điều khiển mô hình động cơ không đồng bộ ba pha được xây dựng trong bài viết. Động cơ không đồng bộ ba pha được mô phỏng trên MATLAB®/Simulink dựa theo phương trình trạng thái trên hệ tọa độ từ thông rotor (hệ tọa độ dq). Mô phỏng với tải khác nhau và có nhiễu tác động vào hệ thống cũng như so sánh với PI và khảo sát ảnh hưởng của các tham số của bộ điều khiển vi phân tỷ lệ mờ cộng tích phân. Kết quả mô phỏng cho thấy giải pháp đề xuất đã đáp ứng tốt hơn so với bộ điều khiển PI thông thường, thời gian xác lập của hệ thống hợp lý, độ vọt lố bị triệt tiêu và sai số ngõ ra thấp. Ngoài ra, bộ điều khiển còn ổn định với nhiễu tác động vào hệ thống.

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, hầu hết các hoạt động sản xuất công nghiệp đều sử dụng hệ truyền động điện, trong đó, động cơ điện là nguồn động năng chủ đạo (Aspalli et al., 2012). Trong đó, với thiết kế đơn giản, chi phí bảo trì thấp và vận hành dễ dàng, động cơ cảm ứng (induction motor) hay động cơ không đồng bộ (KĐB) chiếm hơn 80% nguồn chuyển đổi cơ – điện

trong công nghiệp (Aziri et al., 2017). Thống kê 2011 cho thấy có hơn 16 tỷ động cơ điện đang hoạt động trên thế giới, với tốc độ tăng trưởng khoảng 50% trong 5 năm (Aspalli et al., 2012; Henao, 2014).

Việc kiểm soát tốc độ động cơ KĐB 3 pha luôn là chủ đề được nhiều nhà khoa học và các hãng thiết bị quan tâm (Kanti, 2015; Lepka & Stekl, 2005).

Tuy nhiên, bản chất động cơ KĐB 3 pha là phi tuyến và bị tác động bởi nhiều yếu tố trong quá trình vận hành như sự thay đổi của tải, sự tác động của môi trường công nghiệp... các kiểu điều khiển dù đơn giản, dễ bảo dưỡng nhưng lại không đáp ứng thật sự tốt (Hartono et al., 2019). Ngoài ra, tham số của đối tượng khi bị thay đổi sẽ ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển, đối với các giải pháp thiết kế đòi hỏi mô hình toán của đối tượng như kiểu điều khiển PID (Proportional Integral Derivative controller) truyền thống (Idoko et al., 2017; Hartono et al., 2019). Việc không xác định chính xác mô hình toán của động cơ sẽ dẫn đến bộ điều khiển chỉ được chỉnh định gần đúng, làm cho khả năng vọt lố tốc độ (quá tốc) lên đến 30% (Hartono et al., 2019). Điều này ảnh hưởng đến hệ truyền động và tuổi thọ của động cơ do quá tốc lớn ở giai đoạn khởi động (Basu & Yusuf, 1999).

Vì vậy, điều khiển động cơ KĐB 3 pha hiện có hai hướng nghiên cứu được triển khai. Hướng thứ nhất cố gắng mô hình hóa động cơ KĐB 3 pha càng chính xác càng tốt (Lepka & Stekl, 2005; Zeb et al., 2017; Tuấn và ctv., 2018) để hỗ trợ cho khâu mô phỏng và hiệu chỉnh bộ điều khiển, nhất là điều khiển PID (Idoko et al., 2017; Hartono et al., 2019) vốn dễ triển khai ở quy mô công nghiệp. Hướng thứ hai không đặt nặng vấn đề độ chính xác của mô hình toán, mà phát triển các giải thuật điều khiển chỉ dựa trên tín hiệu vào, ra như dùng mạng nơ-ron nhân tạo (Lftisi et al., 2016). Tuy nhiên, các hướng nghiên cứu này vẫn tồn tại một số hạn chế nhất định. Thật vậy, do điều kiện công nghiệp khắc nghiệt, các đặc tính kỹ thuật của động cơ sẽ thay đổi, trong khi đó bộ điều khiển PID cố định hay bộ điều khiển dùng mạng nơ-ron với cơ chế huấn luyện off-line trên điều không thể tự chỉnh định lại, dẫn đến kết quả điều khiển bị ảnh hưởng.

Trong số các kỹ thuật điều khiển thông minh, logic mờ là một phương pháp thể hiện khả năng suy diễn của bộ óc con người và nó đã được ứng dụng thành công trong nhiều lĩnh vực (Meng & Ya, 2001). Cơ chế suy diễn mờ được xem là một phương pháp đơn giản và hữu hiệu để tinh chỉnh các bộ điều khiển kinh điển (Kanagaraj et al., 2008). Điều khiển mờ được biết đến rộng rãi về khả năng kiểm soát hệ thống phi tuyến có cấu trúc phức tạp mà không cần biết mô hình chính xác của đối tượng. Tuy nhiên, kỹ thuật điều khiển mờ lại tồn tại nhược điểm về việc khó triệt tiêu sai số xác lập (Ngôn, 2011; Ngôn & Nghiệm, 2020). Do đó, việc cải thiện bộ điều khiển mờ bằng cách tăng cường một khâu tích phân là một giải pháp khả thi để loại trừ sai số xác lập (Bong &

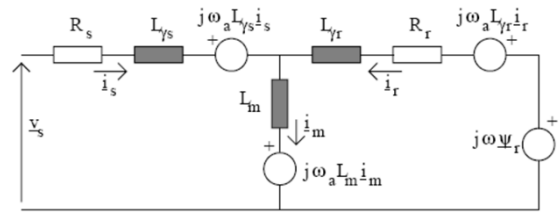
Chung, 2002; Ngôn, 2011; Singh et al., 2020; Ahmed et al., 2022).

Trên cơ sở đó, giải pháp tận dụng ưu thế của điều khiển Fuzzy PD + I để kiểm soát tốc độ động cơ KĐB ba pha, mà ở đó mô hình toán của đối tượng chỉ được sử dụng để mô phỏng kiểm chứng giải thuật, không có vai trò thiết yếu trong khâu thiết kế được đề xuất trong nghiên cứu này.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng điều khiển

Hình 1 mô tả sơ đồ mạch tương đương của động cơ KĐB 3 pha trong hệ tọa độ dq với phương trình trạng thái được biểu diễn như sau (Dương và ctv., 2019):



Hình 1. Sơ đồ mạch điện tương đương

$$\begin{cases} \vec{u}_s^r = R_s \vec{i}_s^r + \frac{d\vec{\psi}_s^r}{dt} + j\omega_s \vec{\psi}_s^r \\ \vec{0} = R_r \vec{i}_r^r + \frac{d\vec{\psi}_r^r}{dt} + j\omega_r \vec{\psi}_r^r \\ \vec{\psi}_s^r = \vec{i}_s^r L_s + \vec{i}_r^r L_m \\ \vec{\psi}_r^r = \vec{i}_s^r L_m + \vec{i}_r^r L_r \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, u_s^r là điện áp của stator; i_s^r là dòng điện của stator; j là mômen quán tính; ω_s là tốc độ góc của từ thông stator so với rotor; ω_r là tốc độ góc của từ thông rotor so với stator; ψ_s^r ψ_r^r lần lượt là từ thông stator và rotor; R_s , R_r lần lượt là điện trở stator và rotor; L_m là hồ cảm giữa rotor và stator; và L_s , L_r lần lượt là điện cảm stator và rotor.

Trong hệ tọa độ dq, $\psi_{rq}=0$ do vuông góc với vectơ $\vec{\psi}_r^r$ nên $|\vec{\psi}_r^r| = \psi_{rd}$. Đối với động cơ KĐB 3 pha, trong hệ tọa độ dq, từ thông và mômen quay được biểu diễn theo các phần tử của vectơ dòng stator :

$$\begin{cases} \psi_r = \psi_{rd} = \frac{L_m}{1 + sT_r} i_{sd} \\ T_e = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} p \psi_{rd} i_{sq} = T_L + \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

trong đó, T_e là mômen điện từ, T_L là mômen tải, ψ_{rd} là từ thông của rotor trên trục d.

Bằng việc mô tả động cơ KĐB 3 pha trên hệ tọa độ từ thông rotor, không còn quan tâm đến từng dòng điện pha riêng lẻ nữa, mà là toàn bộ véctơ không gian dòng stator của động cơ. Khi đó véctơ \vec{i}_s sẽ cung cấp hai thành phần i_{sd} để điều khiển từ thông rotor $|\vec{\psi}_r|$, i_{sq} để điều khiển mômen quay T_e , từ đó có thể điều khiển tốc độ của động cơ.

2.2. Bộ điều khiển tích phân tỷ lệ PI

Bộ điều khiển PI được sử dụng để so sánh kết quả với bộ điều khiển được đề xuất trong nghiên cứu này. Phương trình mô tả bộ điều khiển PI được cho bởi (3) (Åström & Häggglund, 1995):

$$\begin{aligned} Y(t) &= K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \\ e(t) &= X_{ref}(t) - X(t) \end{aligned} \quad (3)$$

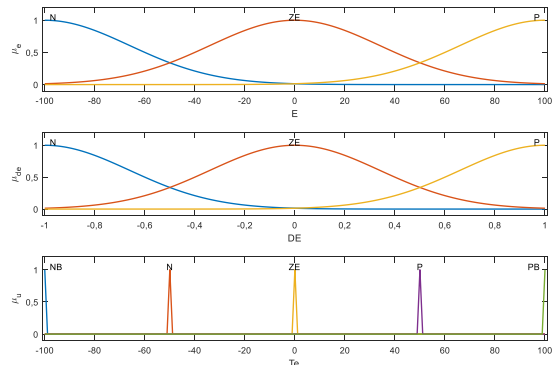
Trong đó, K_p và K_i lần lượt là độ lợi tỉ lệ và độ lợi tích của bộ điều khiển; $y_{ref}(t)$ và $y(t)$ lần lượt là tín hiệu tham khảo và đáp ứng của đối tượng. Nhiệm vụ của người thiết kế bộ điều khiển PI là lựa chọn bộ giá trị $\{K_p, K_i\}$ thỏa mãn các yêu cầu về điều khiển. Các thông số độ lợi K_p và K_i ảnh hưởng đến thời gian tăng (rise time), độ vọt lố (overshoot), thời gian xác lập (settling time) và sai số xác lập (steady-state error) của đáp ứng được cho trong Bảng 1 (Åström & Häggglund, 1995; Kanagaraj et al., 2008). Các thông tin này được xem là cơ sở để xác định luật chỉnh định mờ bộ điều khiển PI. Ngoài ra, bộ điều khiển PI thường được chỉnh định bằng phương pháp gần đúng Ziegler-Nichols (Ziegler & Nichols, 1993; Åström & Häggglund, 1995).

Bảng 1. Ảnh hưởng của việc tăng các thông số độ lợi của bộ điều khiển PI

Độ lợi	Thời gian tăng	Độ vọt lố	Thời gian xác lập	Sai số xác lập
K_p	Giảm	Tăng	Thay đổi ít	Giảm
K_i	Giảm	Tăng	Tăng	Triệt tiêu

2.3. Bộ điều khiển Fuzzy PD + I

Bộ điều khiển mờ cho động cơ KĐB 3 pha được xây dựng là một cấu trúc MISO (multiple input single output) với 2 ngõ vào, 1 ngõ ra và 9 luật điều khiển. Ngõ vào của bộ điều khiển mờ gồm sai biệt e giữa đáp ứng và tín hiệu tham khảo ($e = y_{ref} - y$) và đạo hàm của e theo thời gian, de , được mờ hóa bởi 3 tập mờ $\{N, ZE, P\}$. Ngõ ra của bộ điều khiển là T_e , được mờ hóa bởi 5 tập mờ $\{NB, N, ZE, P, PB\}$. Các tập mờ trên được kí hiệu như sau: N là Negative, ZE là Zero, P là Positive, NB là Negative Big và PB là Positive Big. Miền xác định các biến ngõ vào của bộ điều khiển mờ được xác định dựa trên việc khảo sát đáp ứng vòng hở của đối tượng và xác định gồm: $e \in [-100, 100]$, $de \in [-1, 1]$ và $T_e \in [-100, 100]$. Hàm liên thuộc của các tập mờ ngõ vào được sử dụng là hàm Gauss và hàm liên thuộc của các tập mờ ngõ ra được sử dụng dạng tam giác, được mô tả trên Hình 2. Luật điều khiển mờ được xây dựng trên Bảng 2, dựa theo kinh nghiệm thiết kế.



Hình 2. Mờ hóa ngõ vào/ra của bộ điều khiển

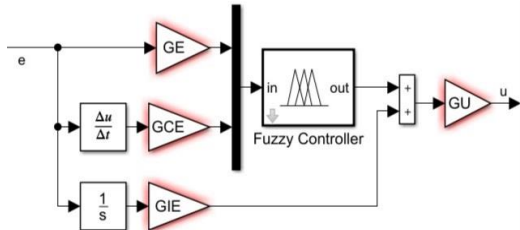
Bảng 2. Luật điều khiển mờ

T_e	de		
	N	ZE	P
N	NB	N	ZE
ZE	N	ZE	P
P	ZE	P	PB

Kỹ thuật điều khiển Fuzzy PD + I, còn gọi là điều khiển vi phân tỷ lệ mờ cộng tích phân (Fuzzy PD plus Integral controller) bổ sung khâu tích phân như Hình 3, nhằm rút ngắn thời gian tăng và triệu tiêu sai số xác lập (Ngôn & Nghiệm, 2020). Việc lựa chọn các khâu khuếch đại GE , GCE , GIE và GI cũng cần thỏa mãn quan hệ (4) (Chhabra et al., 2020; Ahmed et al., 2022), với K_p là độ lợi tỷ lệ và T_i là thời hằng tích phân. Ngoài ra, giá trị khâu khuếch đại GE và GCE cần được chọn lựa sao cho tín hiệu e và de đi qua 2 khâu này phải có biên độ nằm trong

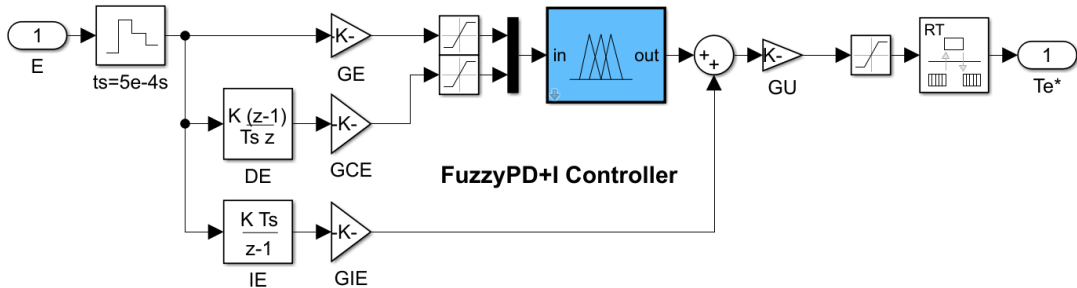
giới hạn hoạt động của 2 ngõ vào của bộ điều khiển mờ.

$$\begin{aligned}
 GE * GU &= K_p \\
 \frac{GCE}{GE} &= T_D \\
 \frac{GIE}{GE} &= \frac{1}{T_I}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

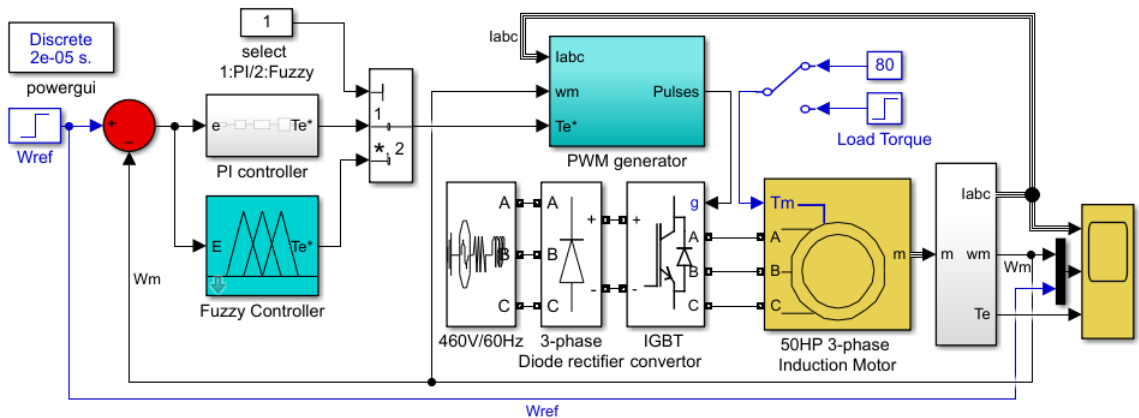


Hình 3. Nguyên tắt điều khiển Fuzzy PD + I

Bộ điều khiển Fuzzy PD + I cho động cơ KĐB 3 pha với $GE=15$, $GCE=0,001$, $GIE=0,8$ và $GU=20$ được xây dựng như Hình 4. Mô hình mô phỏng kỹ thuật điều khiển này trên MATLAB®/Simulink được trình bày trên Hình 5. Trong đó, các khối chức năng chính gồm có: Khối điều khiển PI/Fuzzy PD + I dùng để tạo tín hiệu điều khiển Te ; khối PWM generator dùng để chuyển tín hiệu Te thành tín hiệu xung PWM điều khiển mô-men; khối nguồn và động cơ KĐB ba pha. Trong sơ đồ mô phỏng Hình 5, mô hình động cơ KĐB 3 pha được thực hiện dựa trên thư viện Simulink có sẵn của MATLAB (Blanchette and Dessaint, 2021). Ngoài ra, bộ điều khiển PI cũng được giữ giá trị mặc định của (Blanchette and Dessaint, 2021) để so sánh hiệu quả của hai kiểu điều khiển.



Hình 4. Bộ điều khiển Fuzzy PD + I

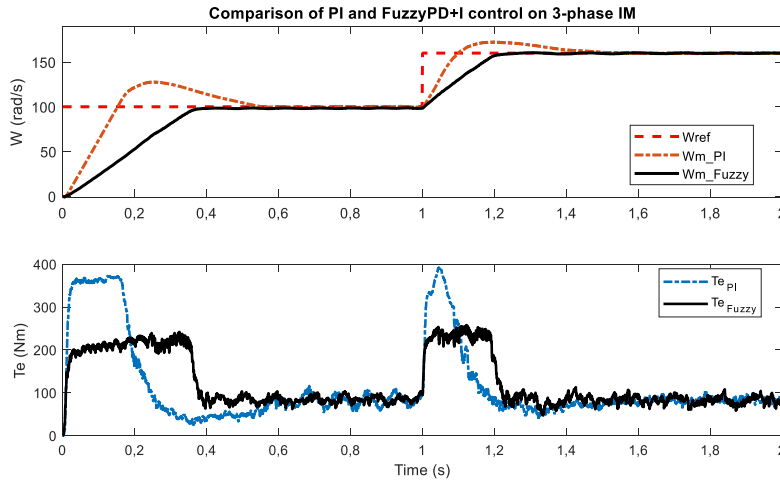


Hình 5. Mô hình mô phỏng điều khiển Fuzzy PD + I động cơ KĐB 3 pha

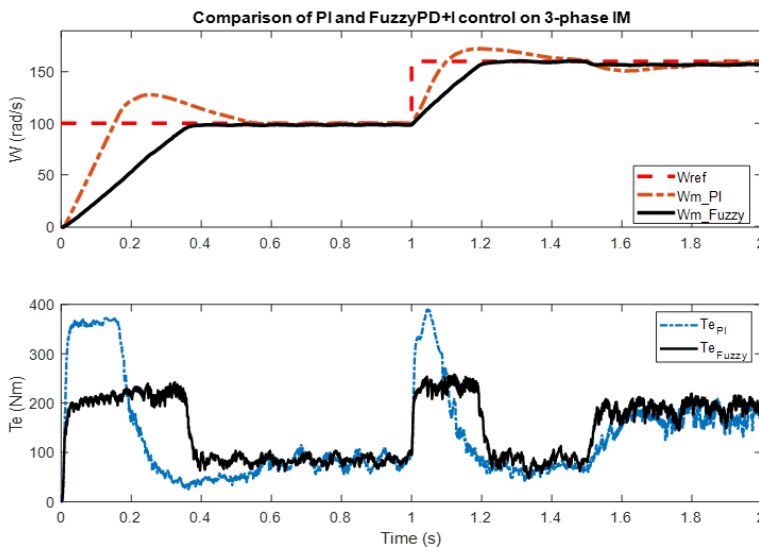
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả điều khiển Fuzzy PD + I động cơ KĐB 3 pha được trình bày trên Hình 6. Ở mô phỏng này,

bộ điều khiển PI của Blanchette & Dessaint (2021) cũng được sử dụng để so sánh hiệu quả điều khiển.



Hình 6. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển PI và Fuzzy PD + I



Hình 7. Kết quả mô phỏng khi thay đổi tải

Từ kết quả Hình 6 ta thấy, bộ điều khiển Fuzzy PD + I cho đáp ứng với thời gian xác lập 0,38 giây, không xuất hiện vọt lố và sai số xác lập không đáng kể. Trong khi đó, bộ điều khiển PI mặc định của MATLAB cho gây ra vọt lố lên đến 28,6%. Các tiêu chuẩn chất lượng của hai kiểu điều khiển được trình bày ở Bảng 3.

Bảng 3. So sánh điều khiển PI và Fuzzy PD + I

Thông số	PI	Fuzzy PD+I
Độ vọt lố (%)	28,6	0
Thời gian xác lập (s)	0,55	0,38
Sai số xác lập (rad/s)	$\pm 0,5$	$\pm 0,3$

Ngoài ra, khi tải thay đổi, bộ điều khiển Fuzzy PD + I cũng tỏ ra hiệu quả hơn với kết quả điều

khiển được minh họa trên Hình 7 và các chỉ tiêu chất lượng được so sánh ở Bảng 4.

Bảng 4. So sánh PI và Fuzzy PD+I khi tải thay đổi

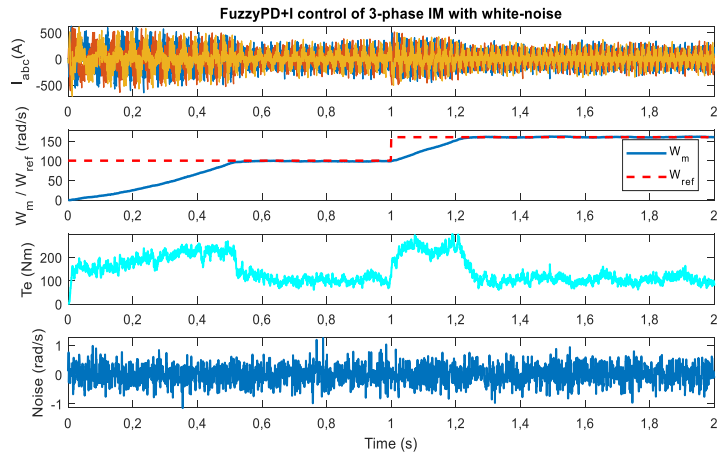
Thông số	PI	FUZZY PD+I
Độ vọt lố (%)	29,2	0
Thời gian xác lập (s)	0,58	0,40
Sai số xác lập (Rad/s)	$\pm 0,6$	$\pm 0,5$

Khi tiến hành mô phỏng với tác động của nhiễu trắng (white noise) giả lập nhiễu cảm biến, bộ điều khiển Fuzzy PD + I cũng cho kết quả kiểm soát tốt động cơ KĐB 3 pha với thời gian xác lập đạt 0,53 giây, sai số xác lập không đáng kể và không xuất hiện vọt lố (Hình 8). Các kết quả cho thấy bộ điều

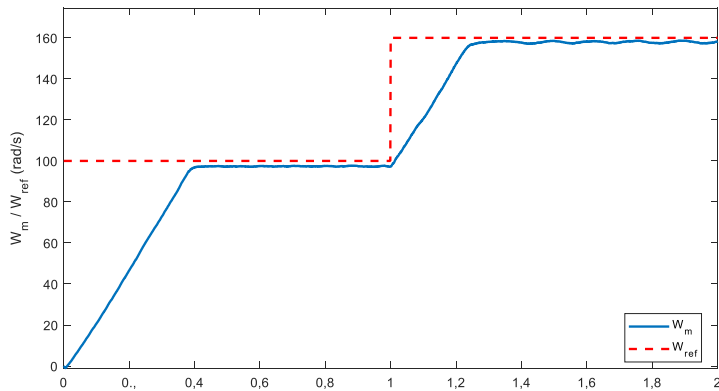
kiểm soát tốt tốc độ động cơ KĐB 3 pha.

Khảo sát ảnh hưởng của các tham số của bộ điều khiển Fuzzy PD + I, do GE và GCE không thể thay đổi nhiều nên nghiên cứu này tập trung khảo sát GIE

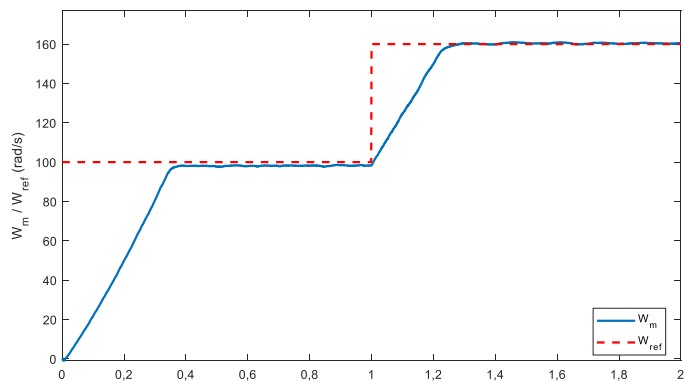
và GU. Kết quả mô phỏng cho thấy các tham số ảnh hưởng nhiều lên chất lượng điều khiển, từ đó cho thấy mức độ hiệu quả của giải thuật được đề xuất. Các giá trị GIE và GU được thể hiện trong các Hình 9, 10, 11, 12 và các chỉ tiêu chất lượng được trình bày ở Bảng 5.



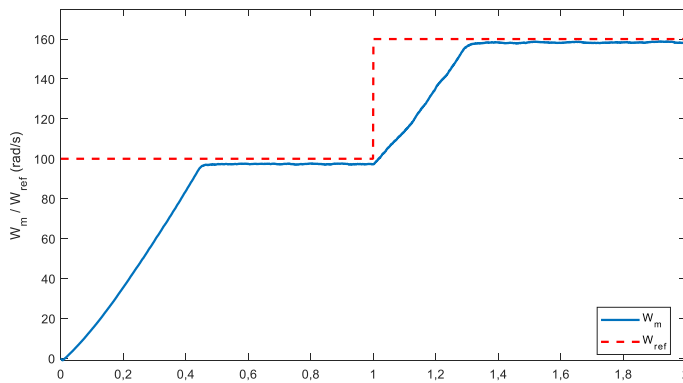
Hình 8. Kết quả mô phỏng với nhiễu



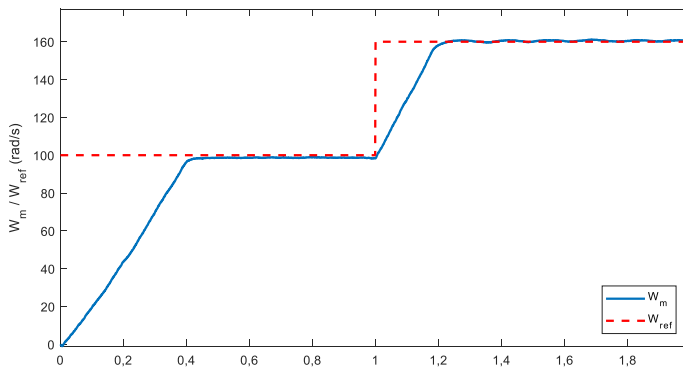
Hình 9. Kết quả mô phỏng khi giảm GIE



Hình 10. Kết quả mô phỏng khi tăng GIE



Hình 11. Kết quả mô phỏng khi giảm GU



Hình 12. Kết quả mô phỏng khi tăng GU

Bảng 5. Ảnh hưởng của các tham số của bộ điều khiển FUZZY PD + I

Thông số (GU/GIE)	Giảm GIE	Tăng GIE	Giảm GU	Tăng GU
Độ vọt lố (%)	0	0	0	0
Thời gian xác lập (s)	0.39	0.34	0.46	0.35
Sai số xác lập (rad/s)	±2.0	±1.8	±1.4	±1.2

Trong các khảo sát trên, các giá trị GIE và GU chỉ được hiệu chỉnh tăng hoặc giảm 25%. Vì các giá trị này được tìm theo công thức (4) nên việc khảo sát ảnh hưởng của các tham số này chỉ hiệu chỉnh nhỏ xung quanh giá trị đã tính toán để tìm kiếm các giá trị tham số cho chất lượng điều khiển tốt nhất.

4. KẾT LUẬN VÀ ĐỀ NGHỊ

Phương pháp cải tiến bộ điều khiển Fuzzy PD + I áp dụng cho động cơ KĐB 3 pha được trình bày trong bài viết. Việc tập trung vào kỹ thuật đơn giản này cho phép hiệu chỉnh với tầm hoạt động thay đổi

tương đối hẹp. Ưu điểm cơ bản của giải pháp là giữ nguyên bộ điều khiển mờ cơ bản đã thiết kế và chỉ tăng cường các thành phần cần thiết bên ngoài bộ điều khiển. Kết quả mô phỏng với tải khác nhau và có nhiễu tác động vào hệ thống cũng như so sánh với bộ điều khiển PI truyền thống và khảo sát ảnh hưởng của các tham số của bộ điều khiển Fuzzy PD + I cho thấy bộ điều khiển Fuzzy PD + I áp dụng trên động cơ KĐB 3 pha hoạt động tốt với thời gian tăng nhanh, vọt lố bị triệt tiêu và sai số xác lập rất thấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ahmed, H. H. A., Mashor, M. Y., & Mahdi, M. C. (2019). Intelligent Fuzzy PD+I Controller with Stabilizer for Nano Satellite Attitude Control System. *J. of Physics: Conf. Series*, 1372, 2022.
- Aspalli, M. S., Asha, R., & Hunagund, P. V. (2012). Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method. *Inter. J. of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Eng.*, 1(5), 463-469.
- Aziri, H., Patakor, F. A., Sulaiman, M., & Salleh, Z. (2017). Simulation of three-phase induction motor drives using indirect field oriented control in PSIM environment. *AIP Conf. Proc.*, 1883(1), 020045.
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. Research Triangle Park, North Carolina: ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society 1995.
- Basu, K. P., & Yusuf, S. (1999). A Novel Method of Starting a 3-Phase Induction Motor with One Phase Out from the Source of Supply. *The Inter. J. of Electrical Eng. & Education*, 36(1), 25-30. <http://doi.org/10.7227/IJEEE.36.1.3>
- Blanchette, H., & Dessaint, L.-A. (2021). *AC4 - DTC Induction 200 HP Motor Drive*.
- Bong, J. K., & Chung, C. C. (2002). Design of fuzzy PD + I controller for tracking control. *Proc. of the 2002 American Control Conf. (IEEE Cat. No. CH37301)*, pp. 2124-2129.
- Chhabra, H., Mohan, V., Rani, A., & Singh, V. (2020). Robust nonlinear fractional order fuzzy PD plus fuzzy I controller applied to robotic manipulator. *Neural Computing and Applications*, 32(7), 2055-2079.
- Dương, N. Đ., Hà, V. T., & Sơn, T. N. (2019). *Điều khiển truyền động điện*. Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật công nghiệp.
- Hartono, H., Sudjoko, R. I., & Iswahyudi, P. (2019). Speed Control of Three Phase Induction Motor Using Universal Bridge and PID Controller. *J. of Physics: Conf. Series*, 1381, 012053.
- Henao, H., Capolino, G.-A., Manes, F.-C., Filippetti, F., Bruzese, C., Strangas, E., Pusca, R., Estima, F., Martin, R.-G., & Shahin, H.-K. (2014). Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques. *IEEE Indus. Electronics Magazine*, 8(2), 31-42.
- Idoko, A., Thuku, I., Musa, S., & C. Amos. (2017). Design of Tuning Mechanism of PID Controller for Application in three Phase Induction Motor Speed Control. *Inter. Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 4(11), 138-147, <http://doi.org/10.22161/ijaers.4.11.21>
- Kanagaraj, N., Sivashanmugam, P., & Paramasivam, S. (2008). Fuzzy Coordinated PI Controller: Application to the Real-Time Pressure Control Process. *Advances in Fuzzy Systems*, 2008, 691808.
- Kanti, R. (2015). Speed Control of Three-Phase Induction Motor using FPGA. *International Journal for Scientific Research and Development*, 2, 207-209.
- Lftisi, F., George, G. H., Aktaibi, A., Butt, C. B., & Rahman, M. A. (2016). Artificial neural network based speed controller for induction motors. *IECON 2016 - 42nd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*, (pp. 2708-2713).
- Lepka, J., & Stekl, P. (2005). 3-Phase AC Induction Motor Vector Control Using a 56F80x, 56F8100 or 56F8300 Device - Design of Motor Control Application. Freescale Semiconductor.
- Meng, J. E., & Ya, L. S. (2001). Hybrid fuzzy proportional-integral plus conventional derivative control of linear and nonlinear systems. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 48(6), 1109-1117.
- Ngôn, N. C. (2011). Bộ điều khiển PI mờ: Từ thiết kế đến ứng dụng, *Tạp chí khoa học Đại học Cần Thơ*, 18a(2011), 82-92.
- Ngôn, N. C., & Nghiê, N. C. (2020). *Giáo trình Điều khiển mờ*: NXB Đại học Cần Thơ.
- Singh, P., Kumar, V., & Rana, K. P. S. (2020). Speed Control of a Nonlinear DC Motor using Fuzzy PD + I Controller. In *2020 IEEE Inter. Conf. on Computing, Power and Commu. Technologies (GUCON)*, 201-206.
- Tuân, P. V., Thuấn, N. Q., Long, N. T., Thụ, N. M., & Tuấn, N. A. (2018). Mô hình hóa động cơ không đồng bộ ba pha có xét đến sự thay đổi của các tham số động cơ. *Tạp chí KH & Công nghệ, ĐH Công nghiệp Hà Nội*, 48, 21-25.
- Zeb, K., Ali, Z., Saleem, K., Uddin, W., Javed, M. A., & Christofides, N. (2017). Indirect field-oriented control of induction motor drive based on adaptive fuzzy logic controller. *Electrical Engineering*, 99(3), 803-815.
- Ziegler, J. G., and Nichols, N. B. (1993). Optimum Settings for Automatic Controllers. *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 115(2B), 220-222.