Nghiên Cứu Thiết Kế Bộ Điều Khiển Mờ Thích Nghi Với Tải Thay Đổi Cho Động Cơ PMSM

Study and Design of an Adaptive Fuzzy Controller for Changing Load of PMSM

[1]Nguyễn Hoàng Huy, [2]Nguyễn Vũ Quỳnh
Khoa Cơ điện – Điện tử, Trường đại học Lạc Hồng
e-Mail: [1]nguyenhoanghuy@lhu.edu.vn, [2]vuquynh@lhu.edu.vn

Tóm tắt
Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM có hiệu suất cao vì thế được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp như robot, gia công cơ khí. Vì thế bộ điều khiển tốc độ động cơ đóng một vai trò rất quan trọng. Hiện nay rất nhiều phương pháp điều khiển đã được nghiên cứu. Các bộ điều khiển PI thường được dùng để điều khiển tốc độ cho các PMSM. Nhưng các bộ PI không có khả năng thích nghi khi tải động cơ thay đổi. Bài báo này đề xuất một phương pháp mới là Fuzzy_PI, sử dụng bộ xử lý mờ kết hợp với bộ điều khiển PI để phát hiện sự thay đổi của tải và đưa ra tín hiệu điều khiển thích hợp giúp ổn định tốc độ động cơ với các tải khác nhau. Đầu tiên, cấu trúc của bộ xử lý mờ Mamdani sẽ được tìm hiểu. Sau đó, bộ xử lý mờ này sẽ được kết hợp với bộ điều khiển PI để tự điều chỉnh các hệ số Kp, Ki khi tải thay đổi. Kết quả điều khiển sẽ được kiểm chứng bằng phương pháp mô phỏng. Cuối cùng, các chỉ tiêu như tốc độ đáp ứng, độ vọt lố ... sẽ được so sánh với phương pháp PI. Bài báo sẽ giới thiệu cách kết hợp bộ xử lý mờ với bộ điều khiển PI, từ đó giúp các kỹ sư thiết kế được các bộ điều khiển tốc độ cho động cơ PMSM linh hoạt hơn.
Từ khóa: Điều khiển thích nghi, PMSM, mô phỏng.

Abstract:
With the extensive use of permanent magnet synchronous motors (PMSMs) in industry such as in robotics, mechanical processing reflects the importance of engine speed control. Among the many control methods available, despite its ability to control the speed of PMSM, the PI controller lacks the ability to adapt to variations in the engine load. Therefore, this work presents a robust Fuzzy PI-based method, capable of detecting the load variation and providing appropriate control signals to adequately control the speed of PMSM motors by using a fuzzy processor combined with the PI controller. Structure of Mamdani fuzzy processors is identified. The structure is then combined with PI controller to adjust the Kp, Ki coefficients when the load changes. Next, analysis results are verified by the simulation method. Additionally, speed of response and the overshoot are compared with those of the PI controller. Importantly, the proposed method combines a fuzzy processor with PI controllers, contributing to the efforts of engineers in designing the speed controller for PMSM motors more flexibly.
Keywords: Adaptive fuzzy controller, PMSM, Simulink.

Chữ viết tắt
PMSM Permanent Magnet Synchronous Machine

1. Giới thiệu
Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM có hiệu suất cao vì thế được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp như robot, gia công cơ khí. Vì thế bộ điều khiển tốc độ động cơ đóng một vai trò rất quan trọng. Chất lượng của bộ điều khiển quyết định độ chính xác của động cơ, từ đó quyết định chất lượng của cả hệ thống.

Hiện nay rất nhiều phương pháp điều khiển đã được nghiên cứu. Các bộ điều khiển PI thường được dùng để điều khiển tốc độ cho các PMSM. Nhưng các bộ PI không có khả năng thích nghi khi tải động cơ thay đổi. Với các thông số K_p, K_i xác định trước thì khi tải động cơ thay đổi sẽ làm tăng độ vọt lố hay thời gian đáp ứng. Nếu vấn đề này không được nghiên cứu thì kết quả của một phương pháp điều khiển mới sẽ không được kiểm chứng và không thể nâng cao hiệu quả điều khiển tốc độ cho động cơ PMSM. Vì thực tế là tải có thể thay đổi, ngay cả khi động cơ đang hoạt động.

Jung [2] cũng có giới thiệu một cách thiết kế khác cho bộ điều khiển mờ. Chou [1] trình bày bộ điều khiển thích nghi dựa trên mạng neuron và xử lý mờ. Mặc dù, phương pháp của các bài báo này cũng đạt được kết quả nhất định khi thay đổi tải nhưng chưa được kiểm tra trong trường hợp tải thay đổi khi động cơ đang hoạt động. Hơn nữa, thuật toán neuron khá phức tạp không thích hợp để thực hiện trên chip.

Trong bài báo này chúng tôi đề xuất một phương pháp mới gọi là Fuzzy_PI. Phương pháp này sử dụng bộ xử lý mờ Mamdani kết hợp với bộ điều khiển PI để phát hiện sự thay đổi của tải và đưa ra tín hiệu điều khiển thích hợp giúp ổn định tốc độ động cơ với các tải khác nhau. Đầu tiên, cấu trúc của bộ xử lý mờ sẽ được tìm hiểu. Sau đó, bộ xử lý mờ này sẽ được kết hợp với bộ điều khiển PI để tự điều chỉnh các hệ số K_p, K_i khi tải thay đổi, ngay cả khi động cơ vẫn đang hoạt động. Kết quả điều khiển sẽ được kiểm chứng bằng phương

pháp mô phỏng trên simulink. Cuối cùng, các chỉ tiêu như tốc độ đáp ứng, độ vọt lố ... sẽ được so sánh với phương pháp PI.

Với phương pháp mà chúng tôi đề nghị, các kỹ sư sẽ thiết kế được các bộ điều khiển động cơ PMSM hiệu quả hơn. Bởi vì, với thuật toán đơn giản của phương pháp, nó có thể thực hiện được trên các chip vi xử lý, làm tăng khả năng ứng dụng trên các bộ điều khiển trong thực tế.

Phần còn lại của bài báo được trình bày như sau. Phần 2 giới thiệu mô hình toán của động cơ PMSM và hệ thống điều khiển vector. Phần 3 mô tả phương pháp điều khiển mà chúng tôi đề nghị. Tiếp theo, phần 4 trình bày các kết quả được mô phỏng trên simulink. Cuối cùng, một số nhận xét và đánh giá về kết quả đạt được sẽ được trình bày trong phần 5.

2. Mô tả hệ thống điều khiển vector

2.1 Mô hình toán của động cơ PMSM

Mô hình toán học của động cơ PMSM được biểu diễn bằng hai phương trình sau [3]

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q} \quad (2)$$

Trong đó: L_q, L_d là các điện cảm trên các trục q và d; R là điện trở của cuộn stator; i_q, i_d là các dòng điện trên các trục q và d; v_q, v_d là các điện áp trên các trục q và d; λ là từ thông móc vòng của nam châm vĩnh cửu; p là số cặp cực; ω_r là tốc độ quay của rotor.

2.2 Hệ thống điều khiển vector

Bộ điều khiển vector được thiết kế theo cách moment và các thành phần từ hóa của từ thông stator được điều khiển độc lập. Dòng điện ba pha stator được biến đổi thành vector dòng điện cung cấp cho bộ điều khiển (H. 1). Một khi các thông số bộ điều khiển được chọn lựa tốt dòng điện điều khiển $i_d \approx 0$, giúp cho việc điều khiển động cơ PMSM tương tự với việc điều khiển động cơ một chiều. Moment của động cơ được điều khiển thông qua dòng điện trên trục q (i_q).

3. Thiết kế bộ điều khiển Fuzzy_PI

3.1 Sơ đồ khối của bộ điều khiển Fuzzy_PI

Sơ đồ khối của bộ điều khiển Fuzzy PI được trình bày trong hình 2. Trong đó e là sai lệch giữa tốc độ hiện tại của động cơ và giá trị đặt mong muốn.

$$e = \omega_r^* - \omega_r \quad (3)$$

Do tốc độ của động cơ đáp ứng theo một đường cong gần giống với hàm:

$$\omega_F(t) = \omega_r^*\left(1 - e^{-at}\right) \quad (4)$$

Nên hàm này được dùng để so sánh với tốc độ động cơ cho ra sai lệch e_F làm ngõ vào của hai bộ xử lý mờ Mamdani Fuzzy processor 1 và 2.

$$e_F = \omega_F - \omega_r \quad (5)$$

Bộ Fuzzy processor 1 có nhiệm vụ giúp động cơ khởi động và nhanh chóng đạt được tốc độ mong muốn với các tải khác nhau, bằng cách tích lũy các sai số vào các hệ số K_p và K_i của bộ điều khiển PI, thông qua hai khối Integrator 1 và 2. Sau khi động cơ đạt khoảng 90% tốc độ đặt ($1 - e^{-at} = 0.9$), các switch SW1 và SW2 sẽ chuyển quyền xử lý cho bộ Fuzzy processor 2. Bộ này có nhiệm vụ phát hiện sự thay đổi của tải nếu có khi động cơ đang hoạt động, giúp động cơ nhanh ổn định trở lại với tải mới, bằng cách thay đổi các hệ số K_p, K_i của bộ PI cho thích hợp hơn.

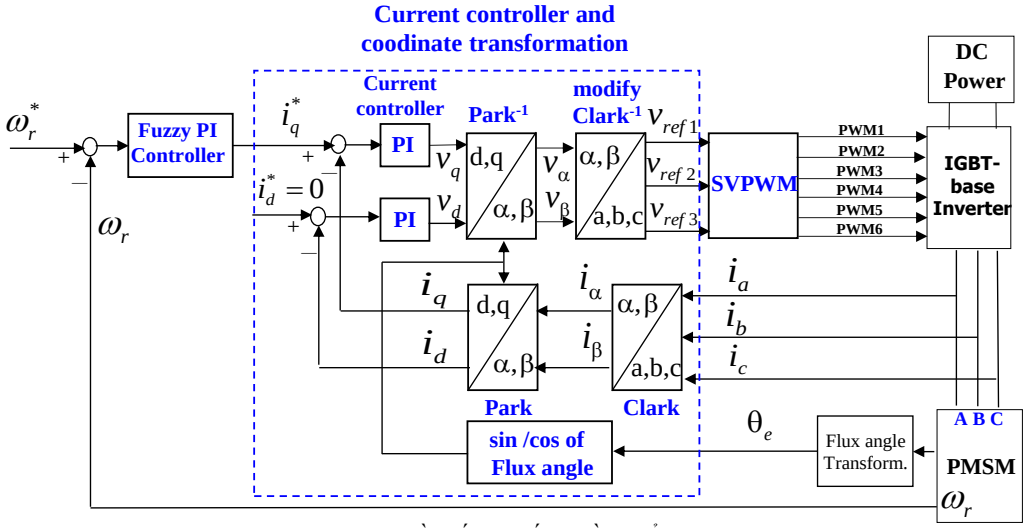
3.2 Fuzzy processor 1

- Có một ngõ vào là sai lệch e_F và một ngõ ra là val1. Ngõ ra val1 sẽ được nhân với các hệ số K_{p1} và K_{i1} rồi lần lượt tích lũy vào các hệ số K_p và K_i nhờ các bộ tích phân.

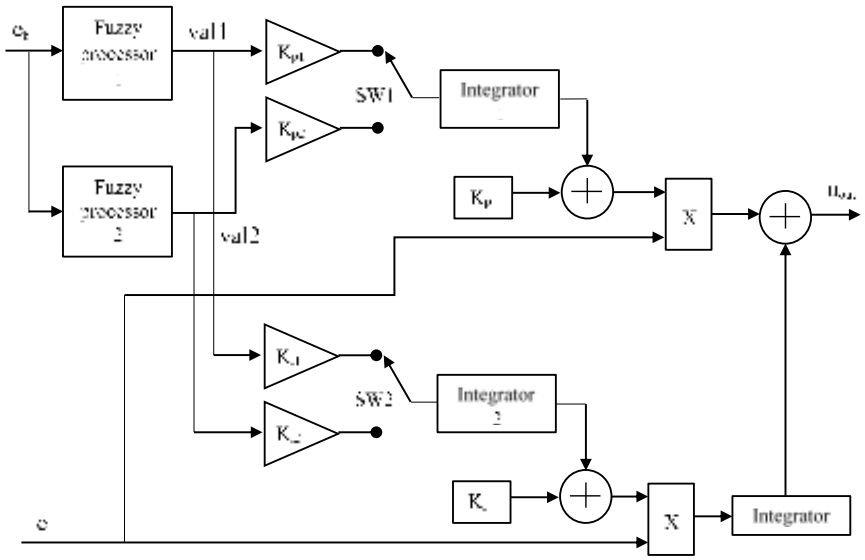
Các biến ngôn ngữ

e_F = {N2, N1, ZE, P1, P2}

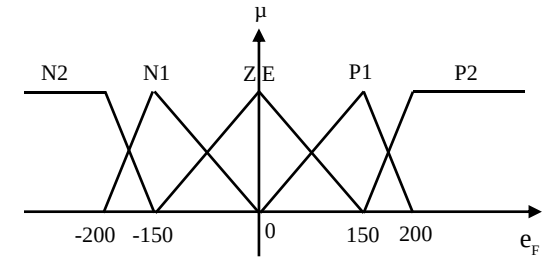
val1 = {DE2, DE1, ZE, IN1, IN2}



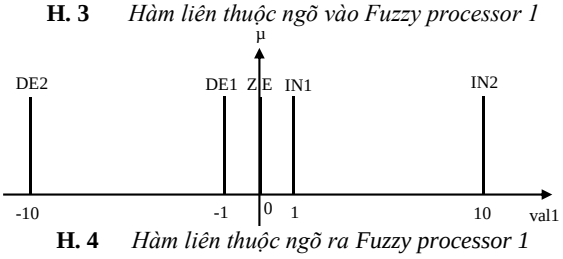
H. 1 *Sơ đồ khối hệ thống điều khiển vector*



H. 2 *Sơ đồ khối bộ điều khiển Fuzzy_PI*



H. 3 *Hàm liên thuộc ngõ vào Fuzzy processor 1*



H. 4 *Hàm liên thuộc ngõ ra Fuzzy processor 1*

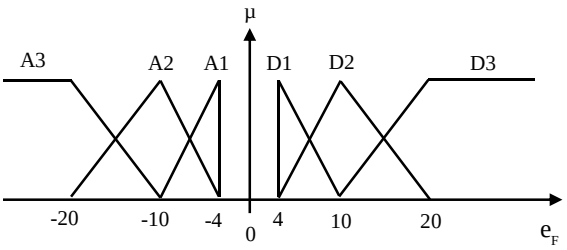
- Luật hợp thành
  IF e_F = P2 THEN val1 = IN2
  IF e_F = P1 THEN val1 = IN1
  IF e_F = N2 THEN val1 = DE2
  IF e_F = N1 THEN val1 = DE1
  IF e_F = ZE THEN val1 = ZE
- Chọn luật và giải mờ
  + Diễn dịch quy luật kết hợp: luật PRO
  + Kết hợp các quy luật: luật MAX
  + Giải mờ: phương pháp trung bình

$$val1 = -10\mu_{N2}(e_F) - \mu_{N1}(e_F) + \mu_{P1}(e_F) + 10\mu_{P2}(e_F) \quad (6)$$

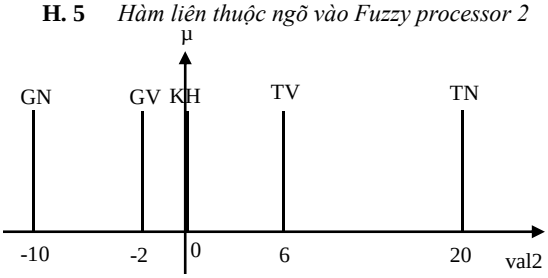
3.3 Fuzzy processor 2

- Có một ngõ vào là sai lệch e_F và một ngõ ra là val2. Ngõ ra val2 sẽ được nhân với các hệ số K_{p2} và K_{i2} rồi lần lượt tích lũy vào các hệ số K_p và K_i nhờ các bộ tích phân.

Các biến ngôn ngữ
e_F = {A3, A2, A1, D1, D2, D3}
val2 = {GN, GV, KH, TV, TN}



H. 5 *Hàm liên thuộc ngõ vào Fuzzy processor 2*



H. 6 *Hàm liên thuộc ngõ ra Fuzzy processor 2*

- Luật hợp thành
  IF e_F = D3 THEN val2 = TN
  IF e_F = D2 THEN val2 = TV
  IF e_F = D1 THEN val2 = KH
  IF e_F = A1 THEN val2 = KH
  IF e_F = A2 THEN val2 = GV
  IF e_F = A3 THEN val2 = GN
- Chọn luật và giải mờ
  + Diễn dịch quy luật kết hợp: luật PRO
  + Kết hợp các quy luật: luật MAX
  + Giải mờ: phương pháp trung bình

$$val2 = -10\mu_{A3}(e_F) - 2\mu_{A2}(e_F) + 6\mu_{D2}(e_F) + 20\mu_{D3}(e_F) \quad (7)$$

Như vậy, các hệ số K_p và K_i sẽ được tích lũy theo công thức:

Nếu $1 - e^{-at} < 0.9$ thì:

$$K_p = K_{p0} + K_{p1}\int val1\,dt \quad (8)$$

$$K_i = K_{i0} + K_{i1}\int val1\,dt \quad (9)$$

Nếu $1 - e^{-at} > 0.9$ thì:

$$K_p = K_{p0} + K_{p2}\int val2dt \quad (10)$$

$$K_i = K_{i0} + K_{i2}\int val2dt \quad (11)$$

Giá trị ngõ ra của bộ điều khiển Fuzzy PI:

$$u_{out} = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt \quad (12)$$

4. Kết quả mô phỏng

Sơ đồ khối của bộ điều khiển động cơ PMSM được trình bày trong H. 1 và H. 7 là sơ đồ simulink của nó. Trong đó, khối Fuzzy_PI có sơ đồ như H. 2. Các thông số của động cơ PMSM được sử dụng để mô phỏng được cho trong bảng 1. Các thông số moment quán tính J và hệ số ma sát F kết hợp của rotor và tải đặc trưng cho khả năng kéo tải của động cơ. Khi J và F lớn tương ứng với tải của động cơ lớn và ngược lại [6].

Để đánh giá hiệu quả của phương pháp điều khiển, các thông số của động cơ sẽ được thay đổi như sau:

Trường hợp 1: x1

J = 0.000108, F = 0.0013

Trường hợp 2: x2

J = 0.000108x2, F = 0.0013x2

Trường hợp 3: x3

J = 0.000108x3, F = 0.0013x3

Trường hợp 4: x4

J = 0.000108x4, F = 0.0013x4

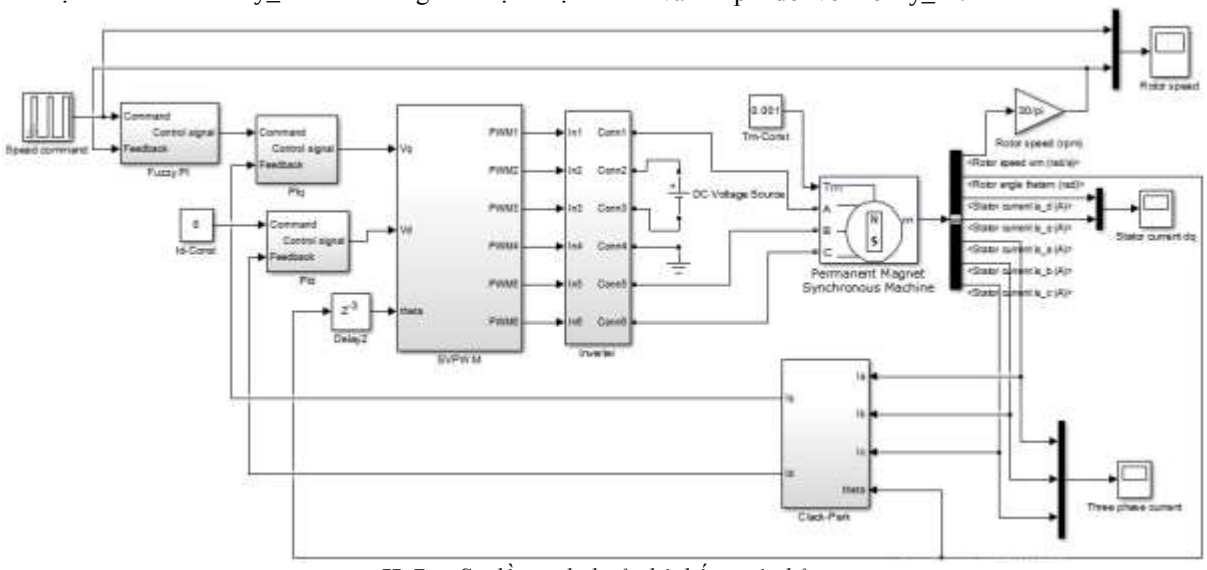
Các kết quả mô phỏng được trình bày trong các hình 8 đến hình 13 được thực hiện với bộ điều khiển PI và với bộ điều khiển Fuzzy_PI. Các thông số được chọn của bộ điều khiển PI là K_p = 2000 và K_i là 1.5. Các thông số của bộ Fuzzy_PI sẽ thay đổi theo tải với giá trị khởi đầu được chọn là K_{p0} = 10 và K_{i0} = 1. Các hệ số tích lũy của bộ điều khiển Fuzzy_PI là K_{p1} = 1, K_{i1} = 0.00003, K_{p2} = 0.6 và K_{i2} = 0.000015. Bảng 2 tóm tắt các thông số của các bộ điều khiển.

Các hình 8 đến hình 11 trình bày kết quả khi tải lần lượt là x1, x2, x3, và x4. Đường màu xanh lá chỉ giá trị đặt, giá trị này thay đổi từ 400 → 600 → 800 → 600 → 400. Đường màu đỏ là đáp ứng tốc độ của rotor (rpm). Trong khi bộ điều khiển Fuzzy PI cho kết quả không có vọt lố và thời gian đáp ứng là 0.01s thì bộ PI có độ vọt lố lên tới 15% và thời gian đáp ứng là 0.075s khi tải là x4.

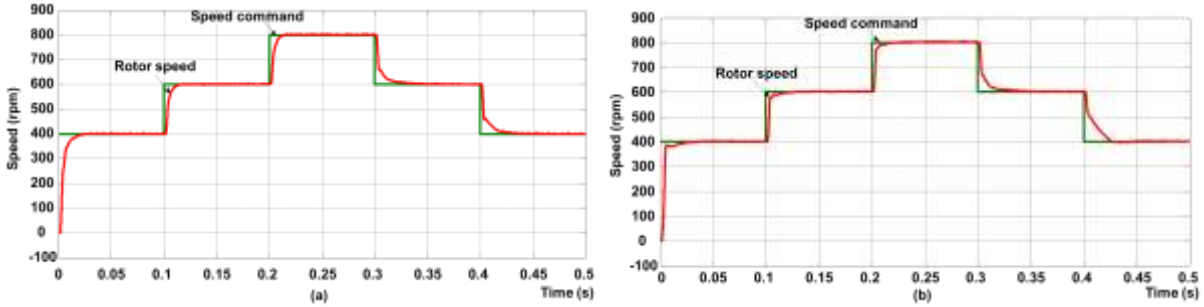
Bảng 1

Pole pair	Stator phase resistance (Ω)	Stator inductance (mH)	Inertia ($kgm^{2)}$	Friction factor (Nms)
4	1.3	6.3	0.000108	0.0013

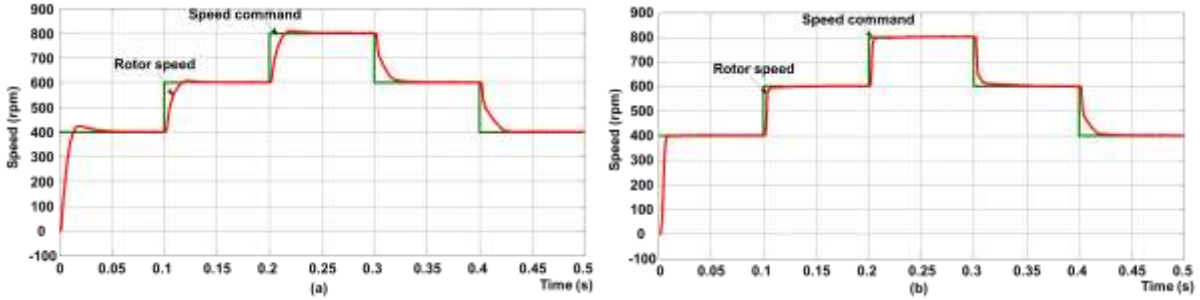
Hình 12 được mô phỏng khi tải là x1 trong 0.3s đầu, sau đó tăng lên x2 từ 0.3s đến 0.6s, cuối cùng giảm về x1 trong khoảng thời gian còn lại. Khi tải tăng đột ngột từ x1 lên x2 tốc độ động cơ sẽ sụt giảm khoảng 10 rpm đối với PI trong khi Fuzzy_PI là 6 rpm và không có vọt lố sau đó. Tương tự, hình 13 có tải x3 trong khoảng thời gian từ 0.3s đến 0.6s. Khi tải tăng từ x1 lên x3 thì tốc độ sẽ giảm xuống 18 rpm đối với PI và 12 rpm đối với Fuzzy_PI.



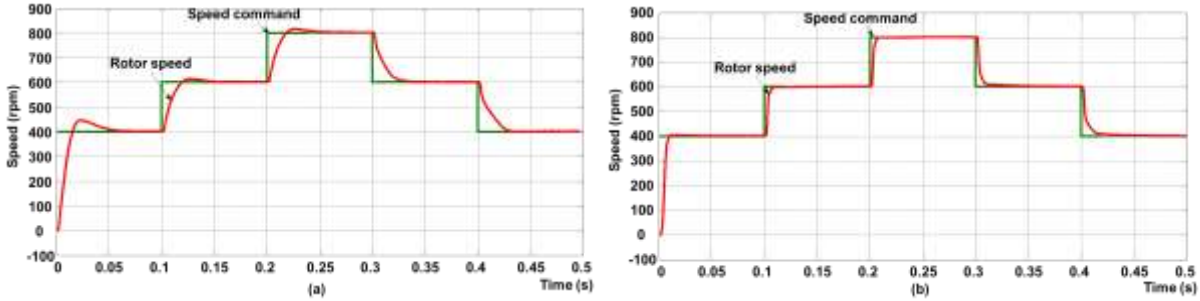
H. 7 *Sơ đồ simulink của hệ thống mô phỏng*



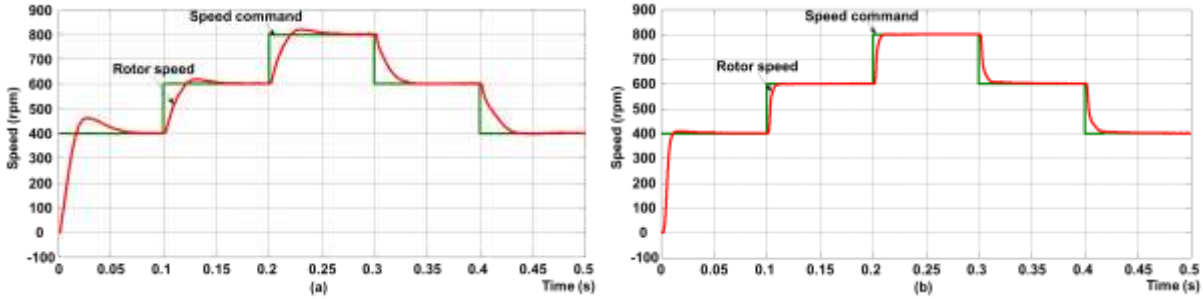
H. 8 *Kết quả mô phỏng với trường hợp tải là x1: (a) Phương pháp PI (b) Phương pháp Fuzzy_PI*



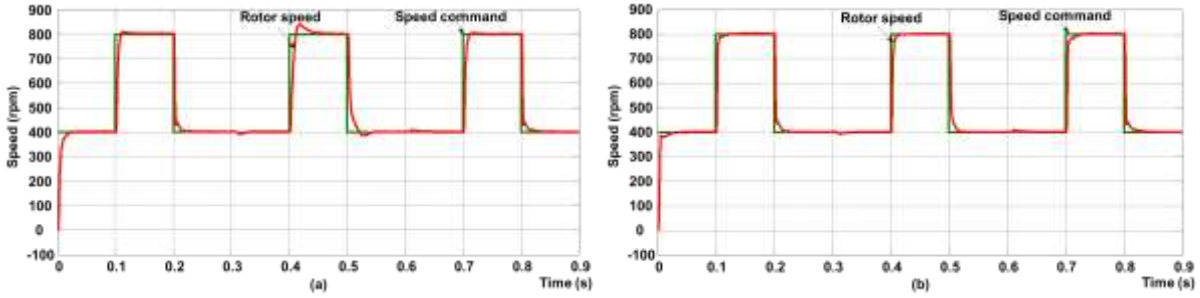
H. 9 *Kết quả mô phỏng với trường hợp tải là x2: (a) Phương pháp PI (b) Phương pháp Fuzzy_PI*



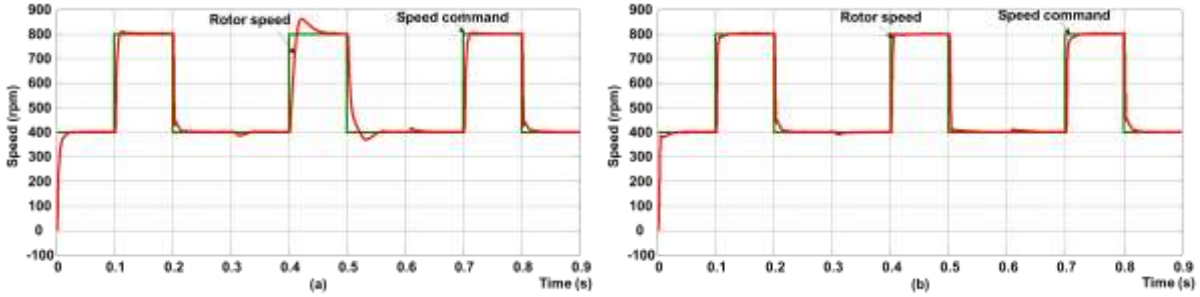
H. 10 *Kết quả mô phỏng với trường hợp tải là x3: (a) Phương pháp PI (b) Phương pháp Fuzzy_PI*



H. 11 *Kết quả mô phỏng với trường hợp tải là x4: (a) Phương pháp PI (b) Phương pháp Fuzzy_PI*



H. 12 *Kết quả mô phỏng với trường hợp tải là x1→x2→x1: (a) Phương pháp PI (b) Phương pháp Fuzzy_PI*



H. 13 *Kết quả mô phỏng với trường hợp tải là x1→x3→x1: (a) Phương pháp PI (b) Phương pháp Fuzzy_PI*

5. Kết luận

Kết quả nghiên cứu được mô phỏng bằng simulink đã chứng minh khả năng thích nghi với tải thay đổi của phương pháp đề nghị. Thời gian đáp ứng nhanh lên và độ vọt lố giảm xuống. Cấu trúc của bộ điều khiển mờ tuy phức tạp, nhưng các phép toán khá đơn giản nên có thể thực hiện được trên các chip vi xử lý. Kết quả

nghiên cứu sẽ giúp việc thiết kế các bộ điều khiển tốc độ cho động cơ PMSM linh hoạt hơn.

Bảng 2

K_p	K_i	K_{p0}	K_{i0}
2000	1.5	10	1
K_{p1}	K_{i1}	K_{p2}	K_{i2}
1	0.00003	0.6	0.000015

Tài liệu tham khảo

[1] Hsin-Hung Chou, Ying-Shieh Kung, Nguyen Vu Quynh, Stone Cheng, *Optimized FPGA design, verification and implementation of a neuro-fuzzy controller for PMSM drives*, Mathematics and Computers in Simulation, Volume 90, April 2013, Pages 28-44, ISSN 0378-4754, http://dx.doi.org/10.1016/j.matcom.2012.07.012

[2] J.W. Jung, Y.S. Choi, V.Q. Leu, H.H. Choi, *Fuzzy PI-type current controllers for permanent magnet synchronous motors*, IET Electric Power Applications 5 (1) (2011) 143–152.

[3] Y.S. Kung, N. Vu Quynh, C.C. Huang, L.C. Huang, *Simulink/ModelSim co-simulation of sensorless PMSM speed controller*, in: Proceedings of the 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2011), 2011, pp. 24–29.

[4] Y.S. Kung, M.H. Tsai, *FPGA-based speed control IC for PMSM drive with adaptive fuzzy control*, IEEE Transactions on Power Electronics 22 (6) (2007) 2476–2486.

[5] I. Guney, Y. Oguz, and F. Serteller, *Dynamic behaviour model of permanent magnet synchronous motor fed by PWM inverter and fuzzy logic controller for stator phase current, flux and torque control of PMSM*, in Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International, 2001, pp. 479-485.

[6] Grenier, D., L.-A. Dessaint, O. Akhrif, Y. Bonnassieux, and B. LePioufle. *Experimental Nonlinear Torque Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Using Saliency*, IEEE® Transactions on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 5, October 1997, pp. 680-687.

Nguyễn Hoàng Huy, năm sinh 1978. Anh nhận bằng Kỹ sư và Thạc sĩ tại trường đại học Bách Khoa thành phố Hồ Chí Minh năm 2001 và 2008. Hiện anh đang là giảng viên khoa Cơ Điện - Điện Tử trường Đại học Lạc Hồng. Lĩnh vực nghiên cứu: Điều khiển thông minh, xử lý tín hiệu số …

Nguyễn Vũ Quỳnh, năm sinh 1979, Anh tốt nghiệp Đại học và Thạc sĩ tại trường đại học Sư Phạm Kỹ Thuật thành phố Hồ Chí Minh năm 2003 và 2005. Tốt nghiệp Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điện tại trường Đại học Khoa học Công nghệ Nam Đài - Đài Loan. Hiện anh đang là trưởng khoa Cơ Điện - Điện Tử, trưởng phòng Nghiên cứu khoa học trường Đại học Lạc Hồng. Lĩnh vực nghiên cứu: FPGA, PLC, kỹ thuật điều khiển thông minh, tự động hóa quy trình sản xuất, hệ thống nhúng …