

# XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PI DỰA TRÊN MÔ HÌNH MRAC VỚI TẢI THAY ĐỔI CHO ĐỘNG CƠ PMSM

## BUILDING A MRAC-BASED PI CONTROLLER WITH CHANGING LOAD FOR PMSM ENGINE

Huỳnh Đức Chấn<sup>1a\*</sup>

<sup>1</sup> Khoa Cơ điện - Điện tử, Trường Đại học Lạc Hồng, Biên Hòa, Đồng Nai, Việt Nam

<sup>a</sup> huynhducchan@lhu.edu.vn

**TÓM TẮT.** Bài báo này đề xuất một phương pháp mới là xây dựng bộ điều khiển PI dựa trên mô hình mẫu MRAC để phát hiện sự thay đổi của tải và đưa ra tín hiệu điều khiển thích hợp giúp ổn định tốc độ động cơ ở những động cơ có tốc độ cao và các tải thay đổi khác nhau. Đầu tiên, cấu trúc, mô hình toán học của mô hình mẫu sẽ được tìm hiểu. Sau đó, các luật thích nghi sẽ được kết hợp với bộ điều khiển tích phân tỉ lệ PI để tự điều chỉnh các hệ số  $K_P$ ,  $K_I$  khi tải thay đổi. Kết quả điều khiển sẽ được kiểm chứng bằng phương pháp mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink với các chỉ tiêu như tốc độ đáp ứng, độ vọt lố... sẽ được so sánh với phương pháp PI. Bài báo giới thiệu cách điều chỉnh độ lợi của bộ điều khiển PI của mô hình mẫu, từ đó giúp các kỹ sư thiết kế được các bộ điều khiển tốc độ cho động cơ PMSM một cách linh hoạt hơn.

**TỪ KHOÁ:** Điều khiển PI, PMSM, mô phỏng, MRAC.

**ABSTRACT.** This paper presents a robust Model Reference Adaptive Control (MRAC), capable of detecting the load variation and providing appropriate control signals to adequately control the high speed of permanent magnet synchronous motor (PMSM) motors and variable load variations by using a reference model combined with the PI controller. Structure of adaptive law is identified. The structure is then combined with PI controller to adjust the gain when the load changes. Next, analysis results are verified by the using Matlab/Simulink method. Additionally, speed of response and the overshoot... are compared with those of the PI controller. Importantly, the proposed method combines a MRAC with PI controllers, contributing to the efforts of engineers in designing the speed controller for PMSM motors more flexibly.

**KEYWORDS:** PI, PMSM, Simulink.

### 1. GIỚI THIỆU

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM có hiệu suất cao và 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 [1].

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.

Nguyễn Hoàng Huy [1] và Jung [3] cũng có giới thiệu một cách thiết kế khác bằng bộ điều khiển mờ. Chou [2] trình bày bộ điều khiển thích nghi dựa trên mạng neuron và xử lý mờ. Lai [6] trình bày bộ điều khiển véc tơ dòng điện và Alsayed [7] sử dụng bộ điều khiển thời gian thực DSP. 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 ở tốc độ động cơ thay đổi lớn. Hơn nữa, thuật toán Neuron và Fuzzy, DSP... 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 MRAC<sub>PI</sub>. Phương pháp này sử dụng mô hình mẫu 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, thời gian đáp ứng nhanh, cấu trúc của bộ điều khiển PI dựa trên mô hình MRAC khá đơn giản nên có thể thực hiện được trên các chip vi xử lý so với các phương pháp khác. Đầu tiên, cấu trúc của mô hình mẫu sẽ được tìm hiểu. Sau đó, luật thích nghi sẽ được kết hợp với bộ điều khiển PI để tự điều chỉnh độ lợi của bộ điều khiển khi tải thay đổi, ngay cả khi động cơ vẫn đang hoạt động với tốc độ động cơ thay đổi lớn. Kết quả điều khiển sẽ được kiểm chứng bằng phương pháp mô phỏng trên Matlab/Simulink với 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 [3].

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 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 4 [4].

Received: 3, 10, 2021

Accepted: 6, 12, 2021

\*Corresponding Author: Huỳnh Đức Chấn

Email: huynhducchan@lhu.edu.vn

## 1. NỘI DUNG

### 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 [4].

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

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

Moment điện từ [5] được tạo ra trong động cơ bởi sự tác động giữa dòng điện chạy trong cuộn dây stator và thông lượng điện từ của nam châm vĩnh cửu thể hiện trong (3).

$$T = 1.5p[\lambda i_q(L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

Phương trình cân bằng mô men điện từ được thể hiện trong (4).

$$T_e = T_L + F \omega_r + J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

Biến đổi (4) ta được công thức tính toán vận tốc rotor động cơ được thể hiện qua (5).

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m) \quad (5)$$

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;  $\lambda$  là từ thông móc vòng của nam châm vĩnh cửu; p là số cặp cực;  $\omega_r$  là tốc độ quay của rotor; J Quán tính kết tạo bởi rotor và phụ tải; F Ma sát được tạo bởi rotor và tải;  $T_m$  Mô men xoắn cơ.

### 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 ( $i_q$ ) [5].

### 2.3 Sơ đồ khối của bộ điều khiển MRAC\_PI

Sơ đồ khối của bộ điều khiển MRAC\_PI được trình bày trong hình 2. Cơ cấu chỉnh định có chức năng cập nhật thông số bộ điều khiển nhằm đảm bảo đáp ứng của mô hình bám theo mô hình chuẩn khi tham số của đối tượng điều khiển thay đổi [6]. Sai số quan sát:

$$e = \omega_r - \omega_m \quad (6)$$

Trong đó:  $\omega_r$  tốc độ rotor động cơ;  $\omega_m$  ngõ ra mô hình chuẩn.

Hàm giá trị tham chiếu:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (7)$$

Với  $\theta$  là vector hàm thích nghi của bộ điều khiển.

Theo luật thích nghi MIT ta được:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (8)$$

Với  $\frac{\partial e}{\partial \theta}$  là độ nhạy của hệ thống chỉnh định, nó bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi của vector hàm thích nghi  $\theta$ ;  $\gamma$  là hệ số thích nghi.

### 2.4 Mô hình chuẩn

Mô hình chuẩn có dạng:

$$G_m(Z) = \frac{B(Z)}{A(Z)} \quad (9)$$

Bằng việc thay đổi giá trị  $\gamma$  ta có thể thay đổi độ nhạy của cơ cấu chỉnh định cũng ảnh hưởng chất lượng đầu ra toàn mô hình [7].

Ngõ ra bộ điều khiển PI có dạng như sau:

$$u_{PI} = K_P \cdot e_k + K_I \int e_k dt \quad (10)$$

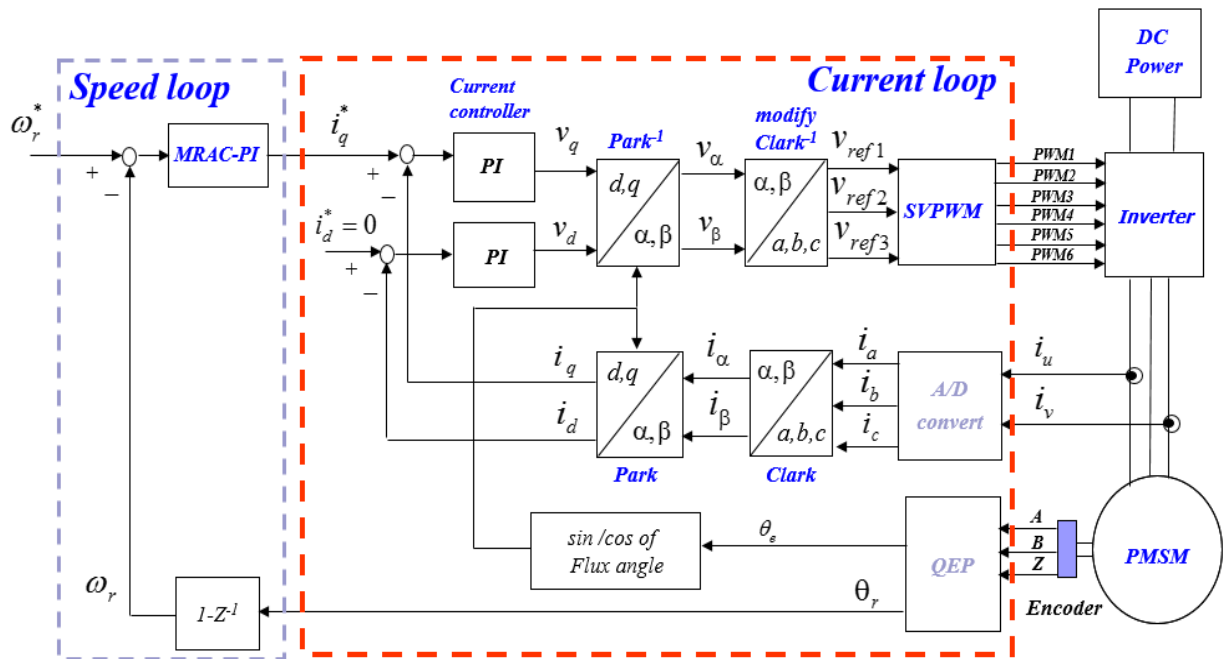
Với sai số mô hình  $e_k$  là:

Hàm thích nghi được xác định:

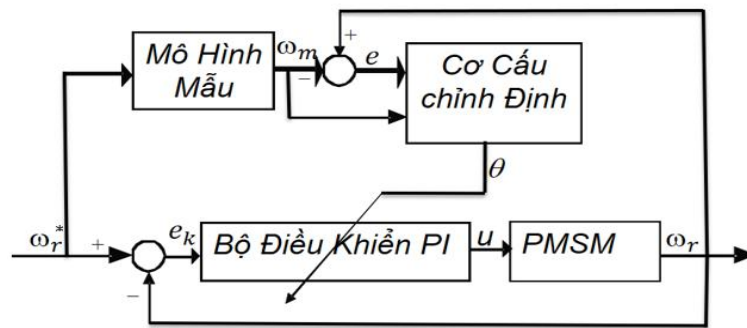
$$\theta = \gamma \omega_m \int e dt \quad (11)$$

Từ (10) và (11) ta có giá trị ngõ ra của bộ điều khiển MRAC\_PI là:

$$u = u_{PI} \theta \quad (12)$$



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển vector



Hình 2. Sơ đồ khối bộ điều khiển MRAC\_PI.

### 3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Sơ đồ khối của bộ điều khiển động cơ PMSM được trình bày trong hình 1 và hình 3 là sơ đồ simulink của nó. Trong đó, khối bộ điều khiển MRAC\_PI có sơ đồ như hình 2. Các thông số của động cơ PMSM được sử dụng để mô phỏng được cho trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số của động cơ PMSM.

Pole pair	Stator phase resistance (Ω)	Stator inductance (mH)	Inertia (kgm <sup>2</sup> )	Friction factor (Nms)
4	1.3	6.3	0.0027	0.000492

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 [8], [9]. Khi J và F lớn tương ứng với tải của động cơ lớn và ngược lại. 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 = 0.0027, F = 0.000492

Trường hợp 2: Tăng gấp hai lần (x2)

J = 0.0027x2, F = 0.000492x2

Trường hợp 3: Tăng gấp ba lần (x3)

J = 0.0027x3, F = 0.000492x3

Trường hợp 4: Tăng gấp bốn lần (x4)

J = 0.0027x4, F = 0.000492x4

Các kết quả mô phỏng được trình bày trong các hình 4 đến hình 7 được thực hiện với bộ điều khiển PI và với bộ điều khiển MRAC\_PI. Các thông số được chọn của bộ điều khiển PI là  $K_p = 0.154574$  và  $K_i = 0.0714$ . Các thông số của bộ điều khiển MRAC\_PI là  $K_p = 0.154574$  và  $K_i = 0.0817$  và  $\gamma = 0.000121$ . Bảng 2 tóm tắt các thông số của các bộ điều khiển.

Bảng 2. Các thông số của bộ điều khiển PI và MRAC\_PI.

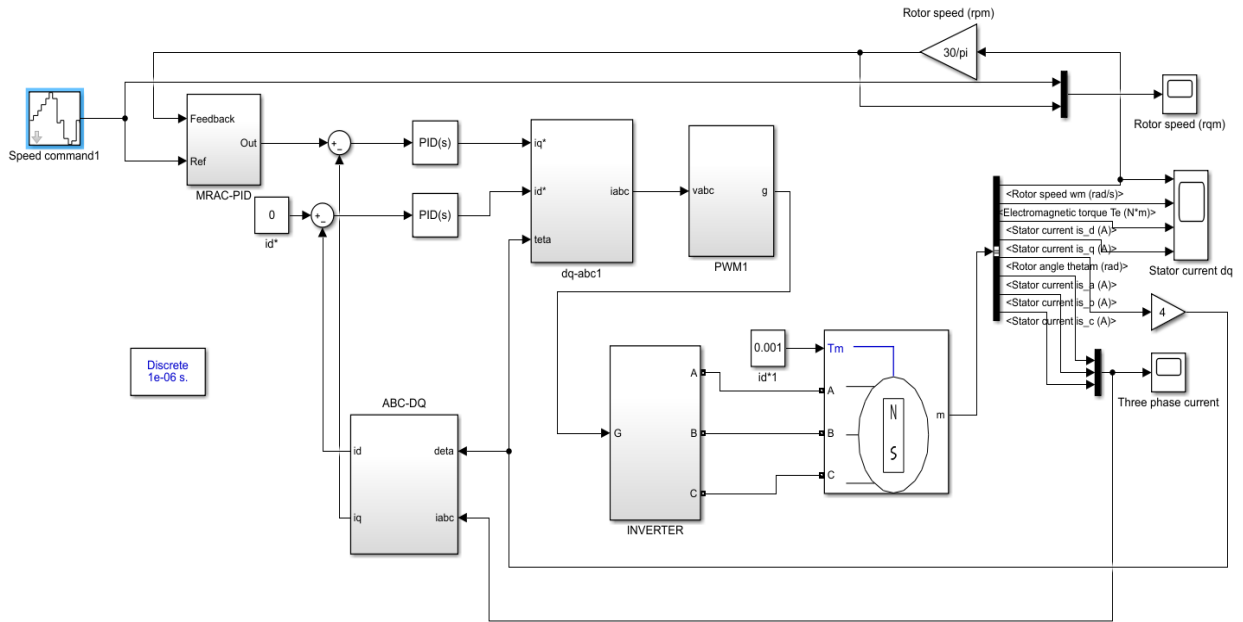
Bộ điều khiển PI		Bộ điều khiển MRAC_PI		
$K_p$	$K_i$	$K_p$	$K_i$	$\gamma$
0.154574	0.0714	0.154574	0.0817	0.000121

Các hình 4 đến hình 7 trình bày kết quả khi tải lần lượt là x1, x2, x3, và x4. Đường màu xanh chỉ giá trị đặt, giá trị này

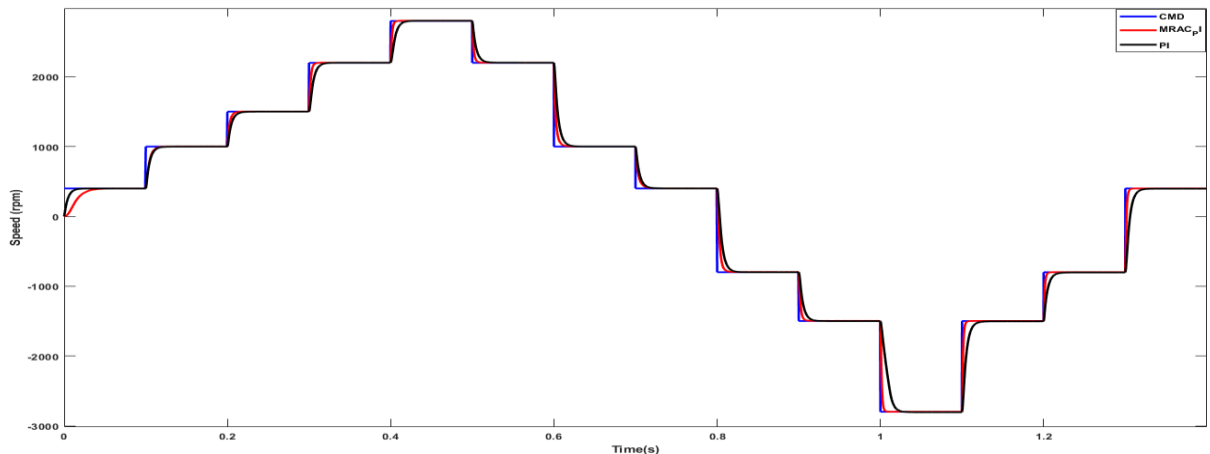
thay đổi từ 400 → 1000 → 1500 → 2200 → 2800 → 2200 → 1000 → 400 → -800 → -1500 → -2800 → -800 → 400. Đường màu đỏ là đáp ứng tốc độ của rotor (rpm) tương ứng bộ điều khiển MRAC\_PI và đường màu đen tương ứng bộ điều khiển PI. Trong khi bộ điều khiển MRAC\_PI cho kết quả không có vọt lố và thời gian đáp ứng khoảng 0.02s, ở các cấp tốc trên 2000rpm đáp ứng của động cơ khá tốt 0.005s, còn bộ PI thời gian đáp ứng là 0.067s khi tải là x4. Ở các cấp tốc trên 2000rpm thì đáp ứng của động cơ do bộ điều khiển PI khá chậm 0.07s ở tải x4 và ở cấp tốc độ -2800 là 0.09s.

Hình 8 được mô phỏng khi tải là x1 trong 0.5s đầu, sau đó tăng lên x3 từ 0.5s đến 1s, cuối cùng giảm về x1 trong khoảng thời gian còn lại. Khi tải tăng đột ngột từ x1 lên x3 tốc độ động cơ vọt lố khoảng 27 rpm đối với PI, trong khi MRAC\_PI là 6 rpm và thời gian đáp ứng của động cơ đối với phương pháp PI khá chậm khoảng 0.07s, MRAC\_PI là khoảng 0.018s.

Các kết quả thu được từ hình 4 đến hình 8 cho thấy khả năng thích nghi với tải thay đổi của phương pháp MRAC\_PI có đột vọt thấp và thời gian đáp ứng tốt hơn phương pháp PI.

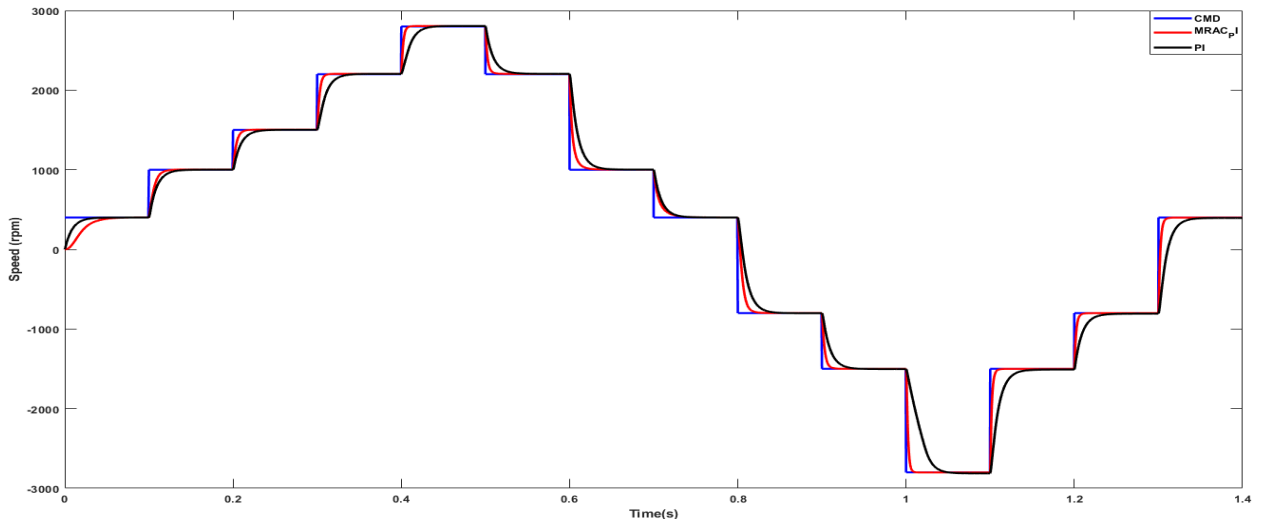


Hình 3. Sơ đồ simulink của hệ thống mô phỏng

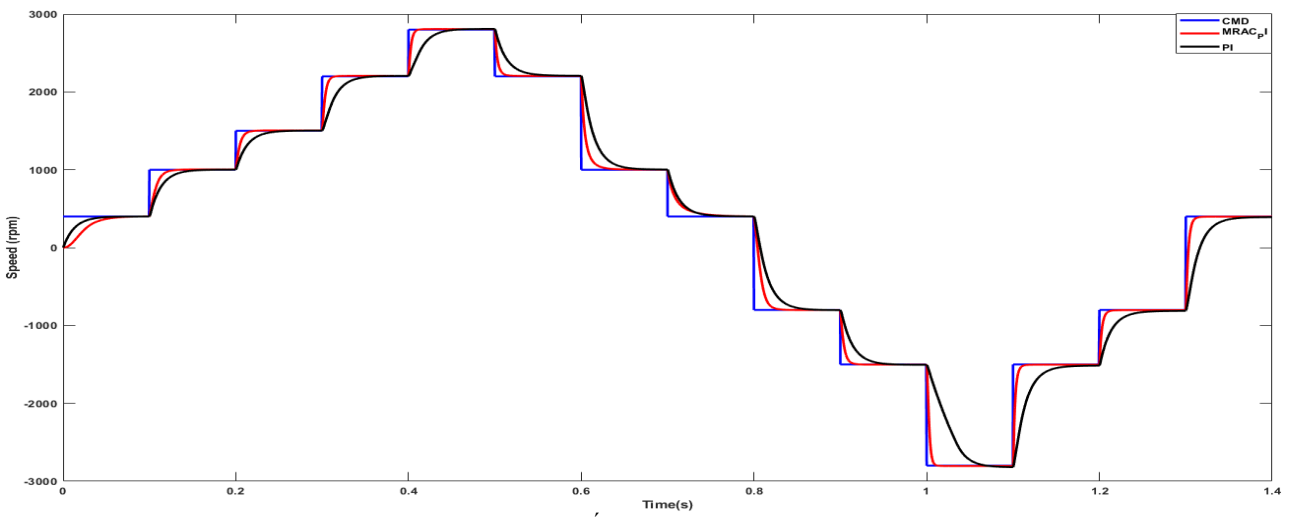


Hình 4. Kết quả mô phỏng với tải là x1.

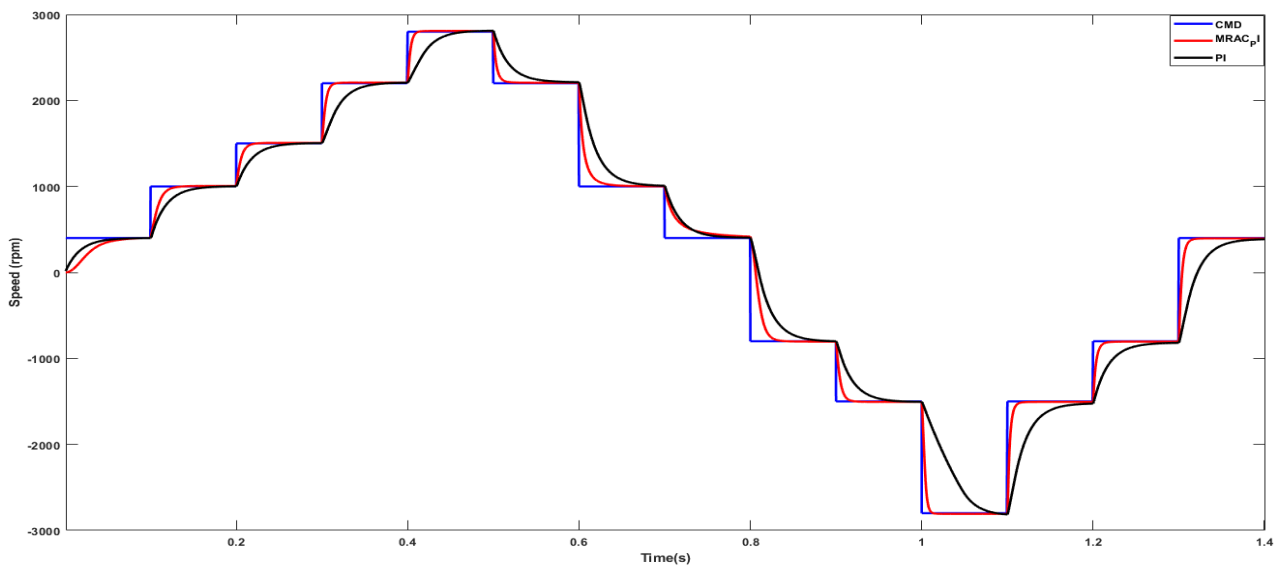
Kết quả mô phỏng ở hình 4 với tải x1 cho thấy đường màu xanh chỉ giá trị đặt, giá trị này thay đổi từ 400 → 1000 → 1500 → 2200 → 2800 → 2200 → 1000 → 400 → -800 → -1500 → -2800 → -800 → 400. Đường màu đỏ là đáp ứng tốc độ của rotor (rpm) tương ứng bộ điều khiển MRAC\_PI và đường màu đen tương ứng bộ điều khiển PI. Trong khi bộ điều khiển MRAC\_PI cho kết quả không có vọt lố và thời gian đáp ứng khoảng 0.02s, ở các cấp tốc trên 2000rpm đáp ứng của động cơ khá tốt 0.005s.



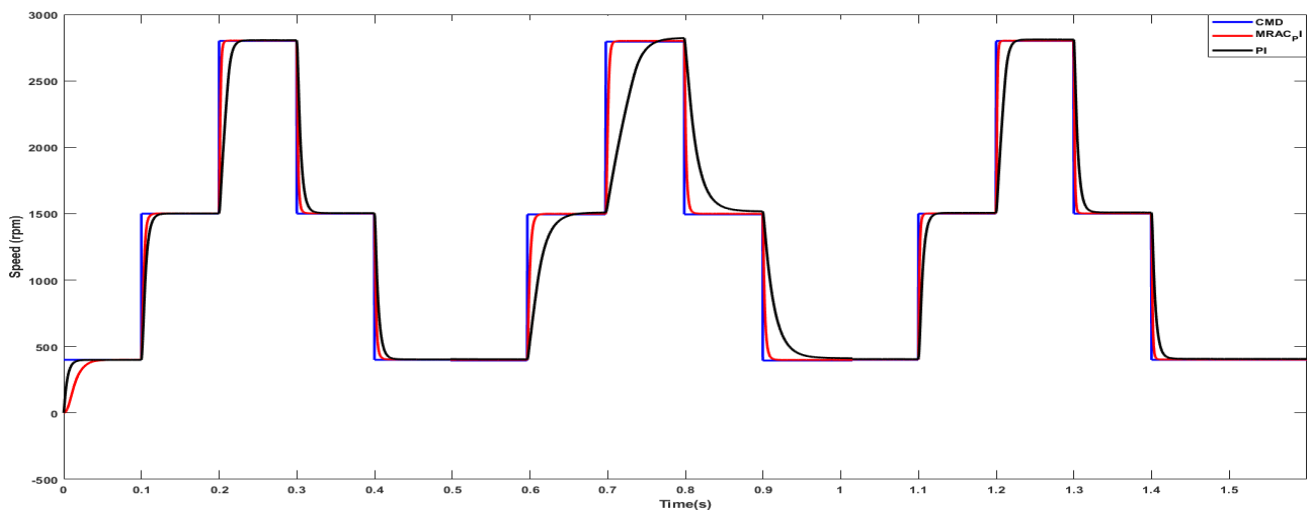
Hình 5. Kết quả mô phỏng với tải x2.



Hình 6. Kết quả mô phỏng với tải x3



Hình 7. Kết quả mô phỏng với tải x4



Hình 8. Kết quả mô phỏng với tải là  $x1 \rightarrow x3 \rightarrow x1$

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày phương pháp điều khiển PI dựa trên mô hình MRAC với tải thay đổi cho động cơ PMSM được mô phỏng bằng simulink. Các kết quả thu được đã chứng minh khả năng thích nghi với tải thay đổi của phương pháp đề nghị, thời gian đáp ứng nhanh. Dựa trên phân tích được trình bày trong bài báo này, chúng ta nhận thấy rằng phương pháp điều khiển PI dựa trên mô hình MRAC có thể được sử dụng như một giải pháp thay thế tốt hơn cho phương pháp PI, fuzzy,... Cấu trúc của bộ điều khiển PI dựa trên mô hình MRAC khá đơn giản nên có thể thực hiện được trên các chip vi xử lý, việc kiểm chứng bằng thực nghiệm trên chip vi xử lý để đánh giá hiệu quả của phương pháp mô phỏng là điều hết sức cần thiết. Kết quả nghiên cứu sẽ giúp việc thiết kế các bộ điều khiển tốc độ cho động cơ PMSM linh hoạt hơn.

#### 5. CẢM ƠN

Cảm ơn Trường Đại học Lạc Hồng đã tài trợ kinh phí cho nghiên cứu này.

#### 6. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyen Hoang Huy, Nguyen Vu Quynh, Nghiên Cứu Thiết Kế Bộ Điều Khiển Mở Thích Nghi Với Tải Thay Đổi Cho Động Cơ PMSM, *VCCA-2015*, pp. 122-128.
- [2] 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>
- [3] 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), pp. 143–152.
- [4] 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.
- [5] 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), pp. 2476–2486.
- [6] 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
- [7] C.K. Lai, Y.T. Tsao và C.-C. Tsai, “Mô hình hóa, phân tích và hiện thực hóa điều khiển véc tơ dòng điện động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu bằng MATLAB / Simulink và FPGA,” *Machines*, vol. 5, pp 14, 2017.
- [8] YM Alsayed, A. Maamoun và A. Shaltout, “Kiểm soát hiệu suất cao việc triển khai hệ thống truyền động PMSM dựa trên bộ điều khiển thời gian thực DSP,” *Kỷ yếu của Hội nghị quốc tế 2019 về các xu hướng đổi mới trong kỹ thuật máy tính (ITCE)*, trang 225 –230, Aswan, Ai Cập, Lễ hội năm 2019.
- [9] Nguyen Vu Quynh, The Fuzzy PI Controller for PMSM’s Speed to Track the Standard Model, *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2020, Article ID 1698213, 20 pages, 2020.