

Speed Sensorless Control Method Using Improving MRAS Technique for Three-phase Induction Motor Drive

Dao Trong Tran¹, Hoang Bach Dinh^{2*}, Dinh Cuong Tran³

Ton Duc Thang University, Vietnam

*Corresponding author. Email: dinhhoangbach@tdtu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 21/03/2024
Revised: 15/04/2024
Accepted: 05/09/2024
Published: 28/10/2024

KEYWORDS

Field-oriented control;
Induction motor;
Current model;
Stator resistance;
MRAS.

ABSTRACT

In this paper, a Speed Sensorless control method based on an improved reference model response system (RF_MRAS) is applied to estimate the rotor speed and parameters. control in the flux-oriented control (FOC) technique of three-phase induction motors (IM). This estimation speed is improved by enhancing the stator resistance (Rs) estimation step in the RF_MRAS model to improve the performance of the control method when Rs changes during operation. The proposed control method helps the system operate at precise speed, low overshoot, can quickly switch speed status at will, low starting current and relatively small starting torque. Together with the combination of estimating the stator resistance, the system can operate stably even when the parameters in the motor change. Experimental results on the operating model in MATLAB/SIMULINK environment have demonstrated the effectiveness of the proposed method in different operating conditions of three-phase induction motors with very good estimated speed tracking. relative to the applied speed, even when the applied speed changes rapidly.

Phương Pháp Điều Khiển Tốc Độ Không Sử Dụng Cảm Biến Sử Dụng Kỹ Thuật MRAS Cải Tiến cho Động Cơ Cảm Ứng Ba Pha

Trần Trọng Đạo¹, Đinh Hoàng Bách^{2*}, Trần Đình Cường³

Trường Đại học Tôn Đức Thắng, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: dinhhoangbach@tdtu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 21/03/2024
Ngày hoàn thiện: 15/04/2024
Ngày chấp nhận đăng: 05/09/2024
Ngày đăng: 28/10/2024

TỪ KHÓA

Điều khiển định hướng từ thông;
Động cơ cảm ứng;
Mô hình dòng điện;
Điện trở sta-to;
MRAS.

TÓM TẮT

Trong bài báo này, một phương pháp điều khiển không sử dụng cảm biến tốc độ (Speed Sensorless) dựa trên hệ thống đáp ứng mô hình tham chiếu cải tiến (RF_MRAS) được áp dụng để ước tính tốc độ rô-to và tham số điều khiển trong kỹ thuật điều khiển định hướng từ thông (FOC) của động cơ cảm ứng ba pha (IM). Tốc độ ước tính này được cải tiến bằng cách tăng cường thêm khâu ước tính điện trở sta-to (Rs) trong mô hình RF_MRAS để nâng cao hiệu suất của phương pháp điều khiển khi Rs thay đổi trong quá trình vận hành. Phương pháp điều khiển đề xuất giúp hệ thống hoạt động với tốc độ chính xác, độ vọt lố thấp, có thể nhanh chóng chuyển đổi trạng thái tốc độ theo ý muốn, dòng điện khởi động thấp và mô-men mở máy khá nhỏ. Cùng với sự kết hợp khâu ước tính điện trở stato giúp cho hệ thống có thể hoạt động ổn định kể cả khi thông số trong động cơ bị thay đổi. Các kết quả thử nghiệm trên mô hình hoạt động trong môi trường MATLAB/SIMULINK đã chứng minh tính hiệu quả của phương pháp đề xuất trong các điều kiện hoạt động khác nhau của động cơ cảm ứng ba pha với tốc độ ước tính bám rất tốt so với tốc độ đặt, kể cả khi tốc độ đặt vào thay đổi nhanh chóng.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2024.1560>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Động cơ cảm ứng, một loại máy điện hoạt động theo nguyên lý của cảm ứng điện từ, được sử dụng trong nhiều lĩnh vực công nghiệp và dân dụng như công nghiệp ô tô, robot công nghiệp, điện tử dân dụng và nhiều lĩnh vực khác. Với tính linh hoạt, hiệu suất cao và ứng dụng đa dạng của động cơ này không chỉ đại diện cho sự tiến bộ trong công nghiệp và công nghệ, mà còn mang lại nhiều lợi ích quan trọng trong cuộc sống ngày nay [1]-[3]. Cùng với sự phát triển đó, các thuật toán điều khiển hiện đại ngày càng được áp dụng nhiều trong việc điều khiển tốc độ của động cơ cảm ứng. Các thuật toán điều khiển dựa trên cấu hình phần cứng phù hợp được sử dụng cho các yêu cầu điều khiển khác nhau. Trong đó, điều khiển định hướng từ thông (FOC), một phương pháp điều khiển điển hình của nhóm điều khiển véc-tơ (VC), được ưa dùng trong các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao, trong khi điều khiển vô hướng (SC), một nhóm còn lại của điều khiển VC chỉ được sử dụng cho các điều khiển tốc độ với độ trung bình [3], [4], [5]. Mục tiêu của nghiên cứu này là tập trung vào việc cải thiện hiệu suất của phương pháp FOC trong việc điều khiển tốc độ chính xác [6], [7].

Các tín hiệu của bộ điều khiển FOC đòi hỏi cần phải có hệ thống cảm biến đo lường như cảm biến dòng điện, cảm biến điện áp hay cảm biến tốc độ để đạt được hiệu suất cao trong điều khiển hệ thống IM [8], [9], [10]. Tuy nhiên, trong quá trình đo lường thường gặp nhiều vấn đề như độ bền của cảm biến, chi phí đầu tư, đặc biệt là môi trường vận hành hệ thống có thể không cho phép sử dụng cảm biến [11]. Để giảm mức đầu tư và quy mô của hệ thống điều khiển và tăng độ tin cậy của hệ thống IM, việc áp dụng điều khiển không dùng cảm biến (SL) là điều cần thiết [12]-[14]. Kỹ thuật điều khiển hệ thống mô hình tham chiếu (MRAS) là một trong các kỹ thuật điều khiển dựa trên các mô hình toán học của động cơ khác nhau để ước lượng trạng thái và tham số của hệ thống. MRAS được sử dụng để ước tính tốc độ và các thông số khác của IM, như dòng từ và điện áp, dựa trên các mô hình toán học và các phản hồi từ hệ thống thực tế. Phương pháp này có cấu trúc đơn giản và được sử dụng trong nhiều lĩnh vực, bao gồm điều khiển động cơ điện, hệ thống tự động hoá, ứng dụng công nghiệp, hệ thống điều khiển robot và năng lượng tái tạo [15]-[17]. Trong thời đại hiện nay, phương pháp FOC và phương pháp điều khiển mô-men xoắn trực tiếp (DTC) đã trở thành tiêu chuẩn điều khiển chính xác trong công nghiệp [18]. Phương pháp DTC đòi hỏi cấu hình phần cứng ở cấp độ trung bình, tốc độ điều khiển đạt được có tồn tại sự dao động, phương pháp này phù hợp với các ứng dụng không đòi hỏi độ chính xác quá cao. Ngược lại phương pháp FOC đòi hỏi cấu hình phần cứng mạnh, tuy nhiên tốc độ điều khiển đạt được độ chính xác cao phù hợp với các ứng dụng điều khiển chính xác.

Trong mô hình MRAS, các thông số đầu vào như dòng điện và điện áp stator là quan trọng, được đưa vào để ước tính tốc độ của rô-to. Ngoài ra, điện trở sta-to (R_s) là một trong những thông số quan trọng khác của mô hình này, ảnh hưởng của R_s đến ước lượng tốc độ là rất đáng kể. Khi R_s thay đổi, ước lượng tốc độ có thể bị ảnh hưởng về mặt độ chính xác; tuy nhiên, khả năng thích ứng tham số hội tụ chấp nhận được ở cả dải tốc độ cao và tốc độ thấp [19]. Đặc biệt, trong các ứng dụng thực tế, R_s có thể thay đổi theo thời gian do nhiều yếu tố như nhiệt độ, tuổi thọ của cuộn dây, hoặc sự biến đổi của điện áp cung cấp. Sự biến đổi này có thể gây ra các vấn đề không mong muốn trong hoạt động của hệ thống điều khiển nếu không được ước lượng và điều chỉnh một cách chính xác. Các tác giả trong [20], [21] đã sử dụng một Bộ Lọc Kalman được sử dụng trong FOC để quan sát tốc độ, các kết quả cho thấy độ tin cậy trên phạm vi rộng của tốc độ. Tuy nhiên, bộ quan sát này nhạy cảm với sự biến đổi của điện trở stator, đặc biệt là ở tốc độ thấp.

Bài báo này đề xuất một khung mô hình tham chiếu dựa trên hệ thống thích ứng mô hình tham chiếu (RF-MRAS) trong phương pháp FOC để ước tính tốc độ rô-to và có tích hợp bộ ước tính điện trở sta-to khi thông số R_s cấp vào động cơ thay đổi. Bộ điều khiển PI truyền thông được sử dụng để ước tính tốc độ rô-to và R_s . Nội dung của phương pháp được mô tả trong phần 3. Trong phần 4, các hoạt động của truyền động IM dựa trên phương pháp FOC được mô phỏng trong Matlab/Simulink. Kết quả và bàn luận về nghiên cứu tương lai được trình bày trong phần kết thúc.

2. Mô hình động cơ cảm ứng trên hệ trục tọa độ $[\alpha, \beta]$ dựa trên kỹ thuật điều khiển định hướng từ thông

2.1. Phương trình mô hình động cơ cảm ứng

Mô hình toán học của động cơ cảm ứng (IM) được giới thiệu ở đây. Mối quan hệ giữa các thông số điện của động cơ cảm ứng liên quan đến các đại lượng phi tuyến khác nhau và các phương trình sau biểu diễn mô hình toán học của động cơ trong hệ tọa độ $[\alpha, \beta]$ như sau:

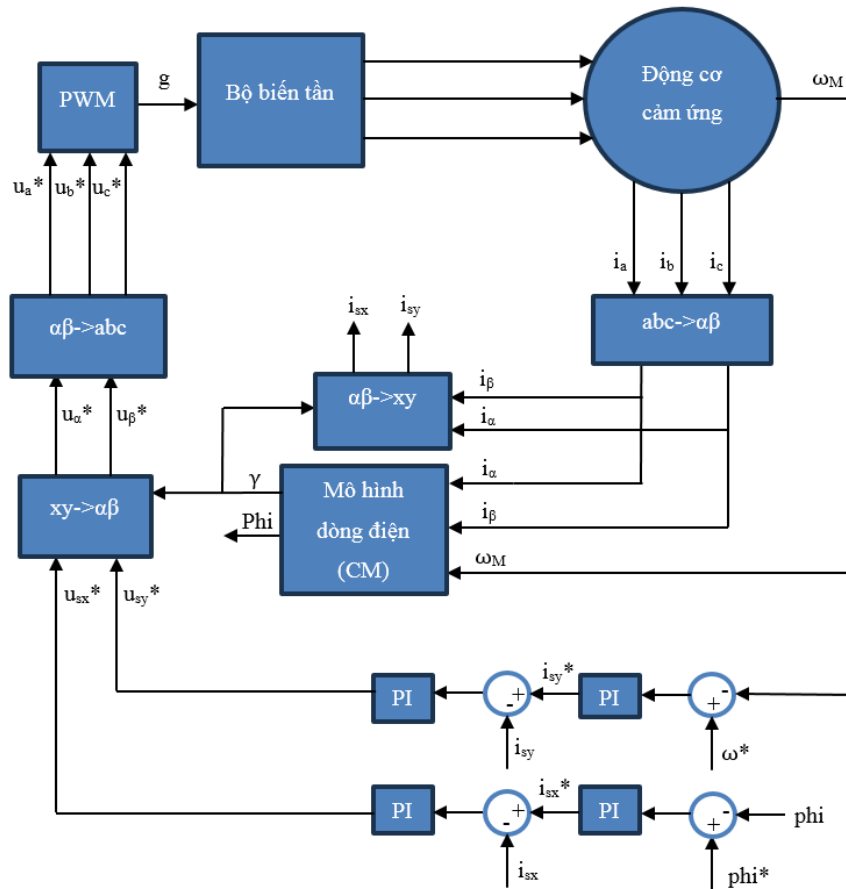
$$\begin{cases} R_S \vec{i}_S + \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} = \vec{u}_S; & R_R \vec{i}_R + \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} - j\omega_R \vec{\Psi}_R = 0 \\ \frac{1}{L_S} \vec{\Psi}_S - \frac{L_m}{L_S} \vec{i}_R = \vec{i}_S; & \frac{1}{L_R} \vec{\Psi}_R - \frac{L_m}{L_R} \vec{i}_S = \vec{i}_R \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, \vec{u}_S là véc-tơ điện áp sta-to; \vec{i}_S, \vec{i}_R là véc-tơ dòng điện sta-to và rô-to; $\vec{\Psi}_S, \vec{\Psi}_R$ là véc-tơ từ thông sta-to và rô-to; R_S, R_R là điện trở sta-to và rô-to; L_S, L_R là điện cảm sta-to và rô-to; L_m là điện cảm từ hoá; ω_R là tốc độ rô-to.

Mô-men xoắn do động cơ cảm ứng tạo ra được tính như sau:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{L_R} \frac{L_m}{L_S} (\Psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \Psi_{R\beta} i_{S\alpha}) \quad (2)$$

2.2. Phương pháp điều khiển định hướng từ thông



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ truyền động IM bằng kỹ thuật FOC

Bài báo này áp dụng phương pháp điều khiển định hướng từ thông (FOC) với điều khiển từ thông và mô-men độc lập cho hệ thống truyền động IM. Hệ thống bao gồm hai cảm biến dòng điện và một bộ biến tần nguồn điện áp để điều khiển tốc độ. Các tín hiệu phản hồi được gửi đến vòng điều khiển FOC để so sánh với các giá trị cài đặt, từ đó cung cấp tín hiệu điện áp điều khiển cho bộ điều chế xung PWM. Sau đó, bộ điều chế này sẽ cung cấp các xung chuyển đổi sang bộ biến tần để điều khiển động cơ theo tốc độ tham chiếu. Hình 1 là cấu trúc điều khiển bằng phương pháp FOC dựa trên mô hình dòng điện.

Trong khối mô hình dòng điện (CM), các thành phần dòng điện trong tọa độ quay tương ứng với trục rô-to được biến đổi từ dòng trong tọa độ $[\alpha, \beta]$ với $\xi = \int p\omega_m dt$ theo các phương trình dưới đây:

$$\begin{cases} i_{sd} = i_{s\alpha} \cos \xi + i_{s\beta} \sin \xi \\ i_{sq} = -i_{s\alpha} \sin \xi + i_{s\beta} \cos \xi \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_{md} = \frac{1}{T_R s + 1} i_{sd} \\ i_{mq} = \frac{1}{T_R s + 1} i_{sq} \end{cases} \quad (6)$$

Các thành phần dòng điện từ hoá được chuyển đổi trong hệ tọa độ $[\alpha, \beta]$ như công thức (7) để xác định từ thông và góc từ thông rô-to, thể hiện trong công thức (8):

$$\begin{cases} i_{m\alpha} = i_{md} \cos \xi - i_{mq} \sin \xi \\ i_{m\beta} = i_{md} \sin \xi + i_{mq} \cos \xi \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} i_m = \sqrt{i_{m\alpha}^2 + i_{m\beta}^2} \\ \gamma = \arctan(i_{m\beta} / i_{m\alpha}) \end{cases} \quad (8)$$

Tiếp tục, sự khác nhau giữa tốc độ tham chiếu và tốc độ đo được thông qua khâu PI cho ra dòng i_{sy}^* và dòng i_{sy}^* này sẽ được so sánh với i_{sy} đưa qua khâu PI để cho ra u_{sy}^* .

Tương tự như vậy, từ thông rôto tham chiếu và từ thông tính toán phi đưa qua khâu PI cho ra i_{sx}^* . Tiếp tục i_{sx}^* sẽ được so sánh với i_{sx} tiếp tục đưa qua khâu PI để cho ra u_{sx}^* .

Các tín hiệu điện áp trong tọa độ $[x, y]$ được chuyển đổi thành $[\alpha, \beta]$ bằng phương trình (9) và các tín hiệu điện áp trong tọa độ $[\alpha, \beta]$ được chuyển đổi ngược lại thành $[a, b, c]$ bằng phương trình (10):

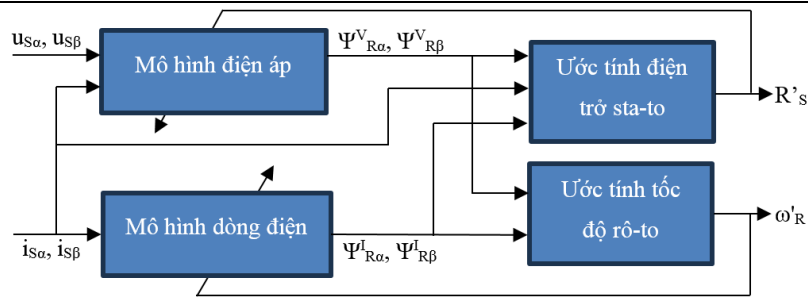
$$\begin{cases} u_{s\alpha} = u_{sx} \cos \gamma - u_{sy} \sin \gamma \\ u_{s\beta} = u_{sx} \sin \gamma + u_{sy} \cos \gamma \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} u_a^* = u_{s\alpha}^* \\ u_b^* = -(1/2)u_{s\alpha}^* + (\sqrt{3}/2)u_{s\beta}^* \\ u_c^* = -(1/2)u_{s\alpha}^* - (\sqrt{3}/2)u_{s\beta}^* \end{cases} \quad (10)$$

Cuối cùng, các tín hiệu điện áp tham chiếu được điều chế bằng kỹ thuật SPWM để tạo ra xung chuyển đổi biến tần cho việc điều khiển tốc độ trong truyền động IM.

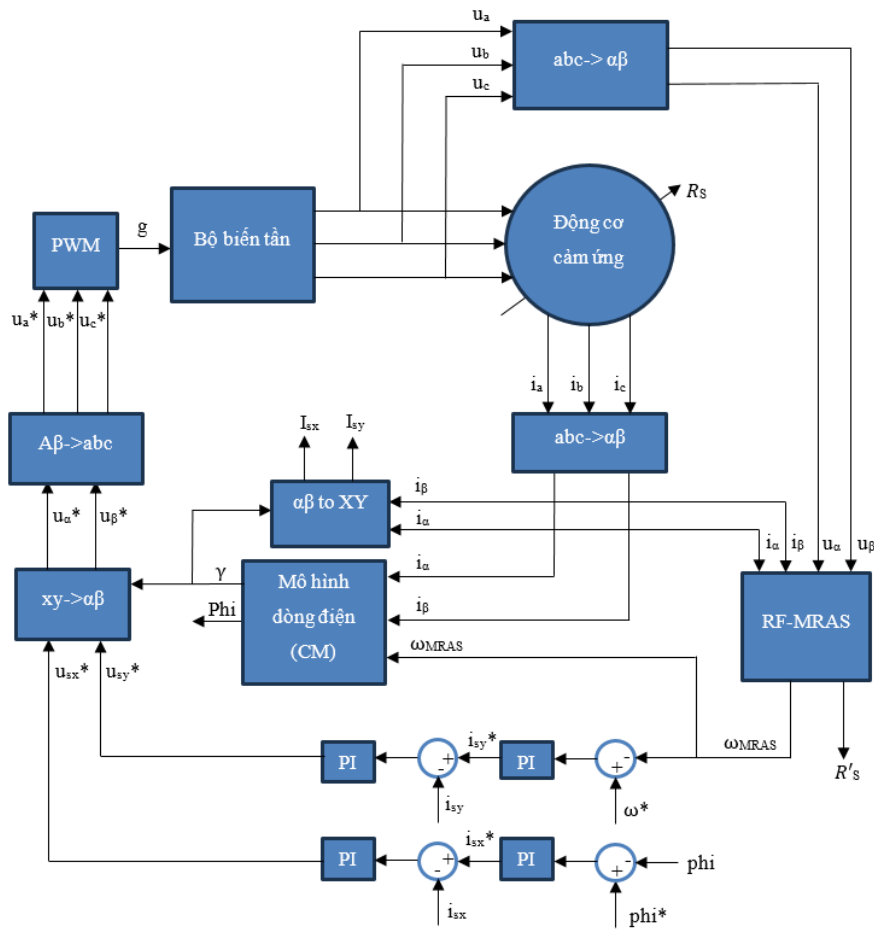
3. Phương pháp đề xuất khung tham chiếu hệ thống mô hình đáp ứng cải tiến (RF_MRAS) kết hợp ước tính điện trở sta-to

Như được thể hiện trong Hình 2, cấu trúc của phương pháp RF_MRAS bao gồm hai mô hình: mô hình tham chiếu (mô hình điện áp) sử dụng điện áp sta-to và dòng điện sta-to để tính toán các thành phần của véc-tơ từ thông rô-to, trong khi mô hình thích ứng (mô hình dòng điện) sử dụng dòng sta-to và tốc độ rô-to ước tính để tính toán các thành phần từ thông rô-to.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc RF-MRAS kết hợp khâu ước tính điện trở stato.

Sơ đồ hệ thống điều khiển tốc độ động cơ cảm ứng không dùng cảm biến dựa trên kỹ thuật RF_MRAS có tích hợp ước tính điện trở stato bằng kỹ thuật FOC được biểu diễn như hình 3:



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc RF_MRAS kết hợp khâu ước tính điện trở stato bằng kỹ thuật FOC

Các biểu thức được sử dụng trong mô hình tham thiếu, mô hình thích ứng và cơ chế thích ứng được cho bởi phương trình sau:

$$\Psi_{R\alpha}^V = \frac{L_r}{L_m} \cdot \left[\int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt - \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} i_{s\alpha} \right] \quad (11)$$

$$\Psi_{R\beta}^V = \frac{L_r}{L_m} \cdot \left[\int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt - \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} i_{s\beta} \right] \quad (12)$$

$$\Psi_{R\alpha}^I = \int \left(\frac{L_m}{T_r} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \cdot \Psi_{R\alpha}^I - \omega_R \cdot \Psi_{R\beta}^I \right) dt \quad (13)$$

$$\Psi_{R\beta}^I = \int \left(\frac{L_m}{T_r} \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{T_r} \cdot \Psi_{R\beta}^I + \omega_R \cdot \Psi_{R\alpha}^I \right) dt \quad (14)$$

Lỗi giữa các thành phần từ thông rotor ước tính giữa hai mô hình này, ký hiệu là e_{ω} , được sử dụng làm tín hiệu đầu vào cho cơ chế PI để theo dõi tốc độ rotor ước tính.

$$\varepsilon_{\omega_{MRAS}} = \Psi_{R\alpha}^I \cdot \Psi_{R\beta}^V - \Psi_{R\beta}^I \cdot \Psi_{R\alpha}^V \quad (15)$$

$$\omega_{MRAS} = K_p \cdot \varepsilon_{\omega_{MRAS}} + K_i \int \varepsilon_{\omega_{MRAS}} dt \quad (16)$$

Từ các đầu ra của mô hình tham chiếu và mô hình thích ứng kết hợp với dòng điện của stato ta sẽ tìm ra được sai số của điện trở sta-to. Sai số này ra được đi qua khâu điều khiển PI để ước tính điện trở sta-to của động cơ thể hiện qua phương trình (7), (8) sau:

$$\varepsilon_{R_s'} = \left(\Psi_{R\alpha}^V - \Psi_{R\alpha}^I \right) \cdot i_{s\alpha} + \left(\Psi_{R\beta}^V - \Psi_{R\beta}^I \right) \cdot i_{s\beta} \quad (17)$$

$$R_s' = K_p \cdot \varepsilon_{R_s'} + K_i \int \varepsilon_{R_s'} dt \quad (18)$$

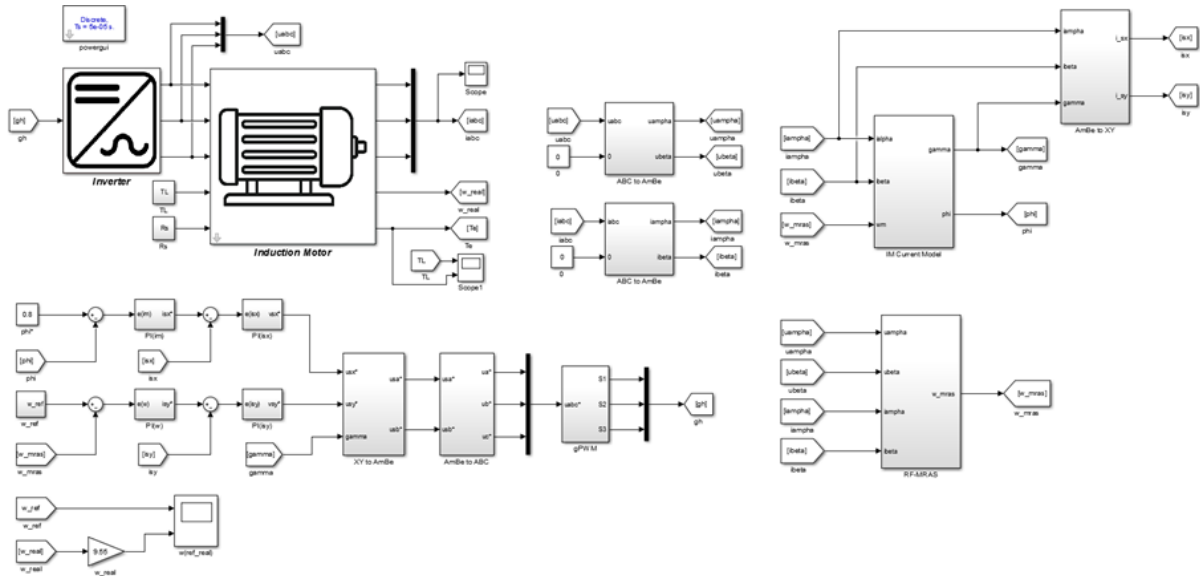
4. Kết quả và bàn luận

Hiệu suất của hệ truyền động IM được mô phỏng tương ứng với ba trường hợp ở các chế độ tốc độ khác nhau. Mô hình động cơ cảm ứng ba pha được xây dựng dựa trên mô hình máy thực tế tương ứng với các thông số cơ bản như bảng 1.

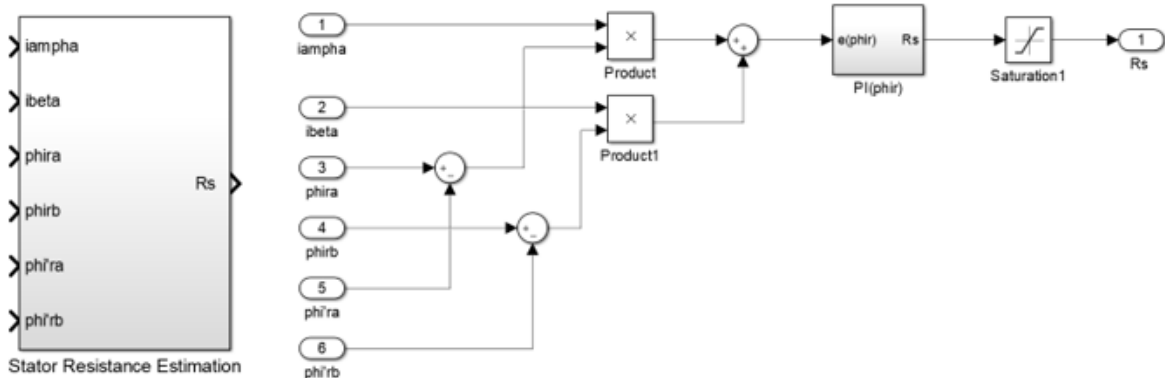
Bảng 1. Thông số động cơ

STT	Đại lượng	Kí hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	Công suất định mức	P	kW	4200
2	Điện áp định mức	U	V	380
3	Tần số định mức	F	Hz	50
4	Điện trở stato/roto	R_s/R_r	Ω	3.358/2.506
5	Điện cảm stato/roto	L_s/L_r	Ω	0.2192/0.2192
6	Hỗ cảm	L_m	H	0.196
7	Mô-men quán tính	J	Kgm^2	0.048
8	Số đôi cực	p	-	2
9	Điện áp một chiều	U_{dc}	V	1000

Hình 4, 5 trình bày cấu trúc điều khiển của phương pháp FOC đề xuất trong môi trường MATLAB/SIMULINK và khối ước tính R_s .



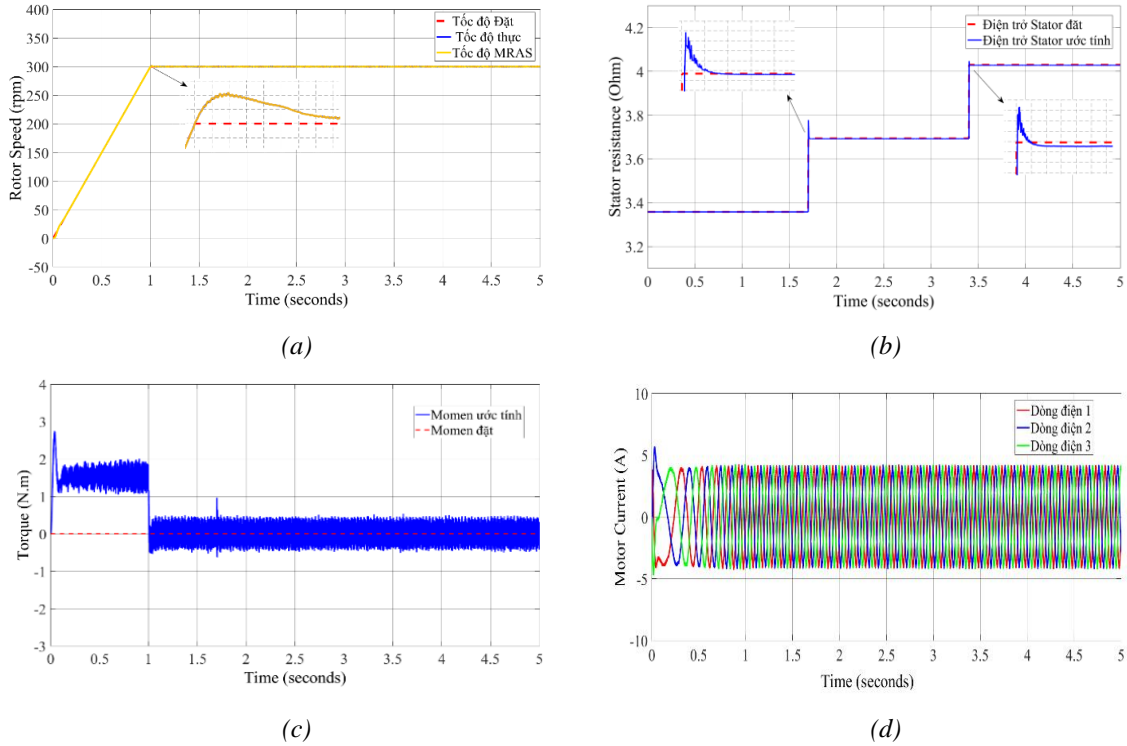
Hình 4. Cấu trúc mô phỏng Simulink của FOC đề xuất



Hình 5. Cấu trúc mô phỏng khối ước tính R_s

4.1. Trường hợp nghiên cứu 1

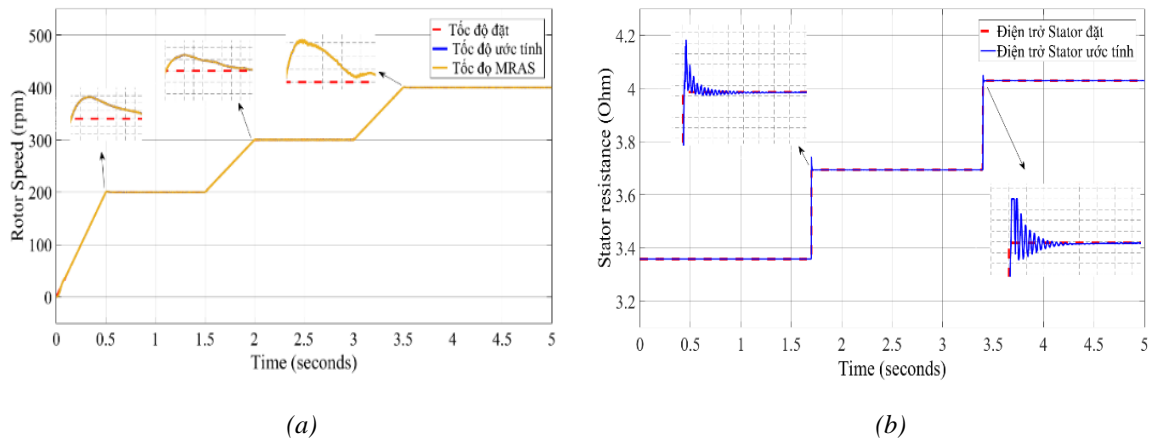
Trong trường hợp này, động cơ cảm ứng ba pha (IM) được vận hành không tải ở tốc độ thấp 300 vòng/phút bắt đầu từ 0 tại thời điểm $t = 0$ giây và dần dần đạt 100% giá trị cài đặt sau 1.0 giây. Điện trở sta-to cấp vào động cơ tăng dần theo hàm bậc thang. Hình 6 mô tả hiệu suất của phương pháp FOC được đề xuất với kỹ thuật ước tính tốc độ rô-to dựa trên mô hình MRAS khi giá trị điện trở sta-to cấp vào động cơ thay đổi. Hình 6(a) cho thấy tốc độ của động cơ bám rất tốt so với tốc độ đặt, độ vọt lố cũng rất thấp. Mặc dù trong quá trình mô phỏng điện trở sta-to của động cơ thay đổi nhưng tốc độ vẫn không bị sai lệch và dao động xung quanh tốc độ thực. Điện trở sta-to ước tính bám sát với sự thay đổi của điện trở stator của động cơ, Hình 6(b). Độ lệch giữa điện trở sta-to cấp vào động cơ và điện trở stator ước tính chênh lệch không đáng kể. Độ vọt lố không quá cao và độ nhiễu cũng rất thấp. Hình 6(c) cho thấy khi động cơ bắt đầu tăng tốc mô-men điện từ vọt lố lên khoảng 2.8 Nm và sau đó giảm xuống 1.5 Nm. Sau khi động cơ đã hoạt động ổn định với tốc độ mong muốn thì mô-men điện từ sẽ bằng mô-men tải. Dòng khởi động của động cơ thấp khoảng 7 A, ở trạng thái động cơ hoạt động ổn định dòng điện khoảng 4 A đến 4.5 A. Độ nhiễu của dòng điện là khá thấp, dòng điện rất ổn định ngay cả khi điện trở sta-to thay đổi, Hình 6(d).

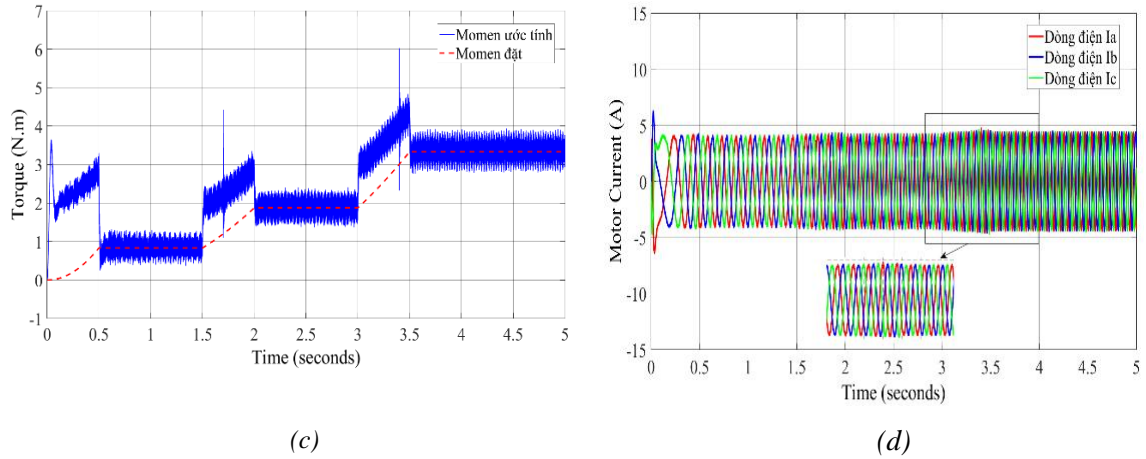


Hình 6. Hiệu suất của động cơ khi tốc độ không đổi và mô-men tải bằng không: (a) Tốc độ rô-to; (b) Điện trở sta-to; (c) Mô-men; (d) Dòng điện sta-to

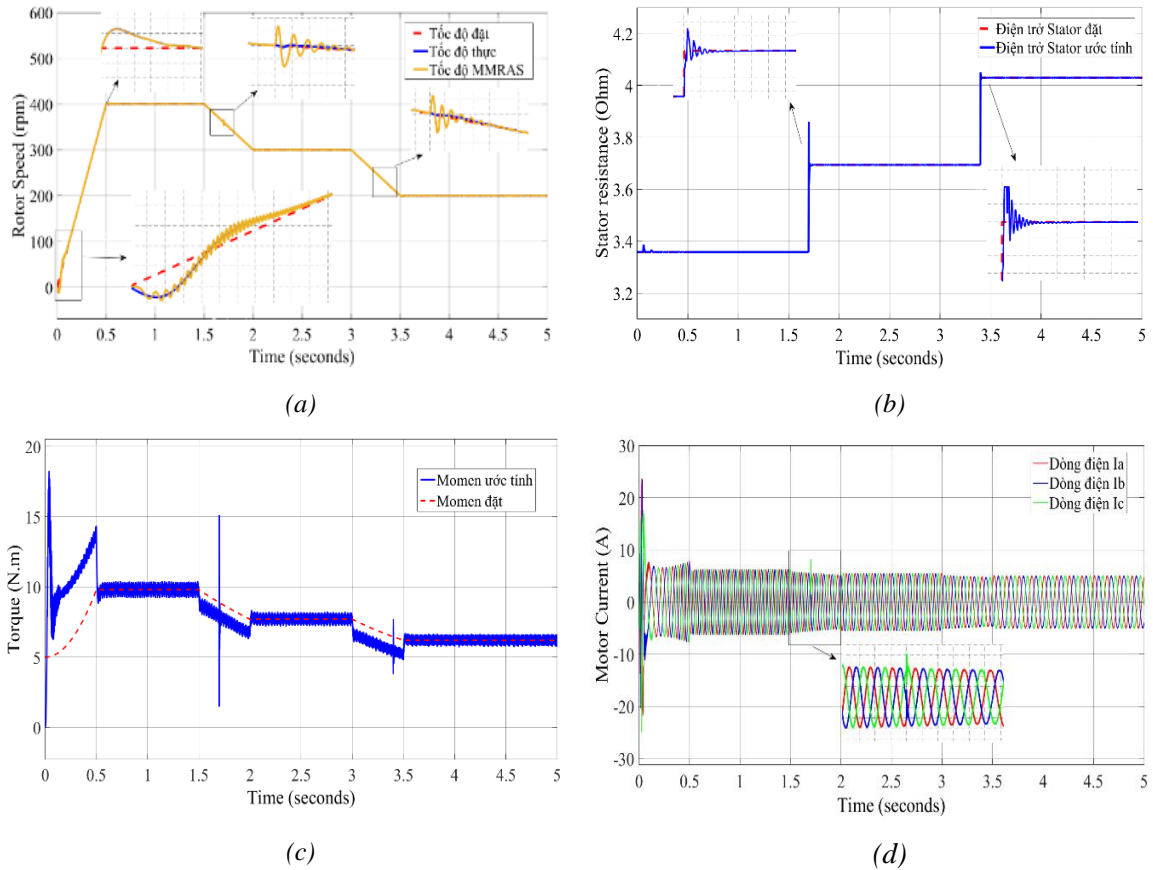
4.2. Trường hợp nghiên cứu 2

Hình 7(a), (b), (c), (d) và 8(a), (b), (c), (d) hiển thị kết quả của hai chế độ riêng biệt khi động cơ mang tải. Hình 7(a) mô tả động cơ hoạt động có tải, tăng tốc từ 0 đến tốc độ 200 vòng/phút sau 0.5 giây, sau đó tăng tốc lên 300 vòng/phút và tiếp tục tăng lên 400 vòng/phút. Hình 8(a) là chế độ giảm tốc, động cơ vận hành ở tốc độ 400 vòng/phút, sau đó động cơ sẽ giảm tốc xuống 300 và tiếp tục giảm tốc xuống 200 vòng/phút. Cả hai chế độ IMD đều chứng tỏ được hiệu suất ổn định và đáng tin cậy nhờ áp dụng phương pháp đề xuất. Từ các kết quả cho thấy mỗi lần điện trở sta-to thay đổi, mô-men động cơ sẽ bị nhiễu nhưng sau đó đã ổn định hơn. Độ nhiễu của mô-men điện từ khá cao. Điện trở stato ước tính bám tốt với điện trở đặt, độ vọt lố và sai số rất thấp. Các kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp FOC đề xuất ước tính tốc độ rô-to và điện trở sta-to có độ ổn định và độ tin cậy trong quá trình điều khiển động cơ.





Hình 7. Hiệu suất của động cơ khi tốc độ và mô-men tải tăng dần:
(a) Tốc độ rô-to; (b) Điện trở sta-to; (c) Mô-men; (d) Dòng điện sta-to



Hình 8. Hiệu suất của động cơ khi tốc độ và mô-men tải giảm dần:
(a) Tốc độ rô-to; (b) Điện trở sta-to; (c) Mô-men; (d) Dòng điện sta-to

5. Kết luận

Phương pháp điều khiển FOC kết hợp với mô hình RF_MRAS giúp hệ thống hoạt động với tốc độ chính xác, độ vọt lố thấp, có thể nhanh chóng chuyển đổi trạng thái tốc độ theo ý muốn, dòng điện khởi động thấp và mô-men mở máy khá nhỏ. Cùng với sự kết hợp khâu ước tính điện trở stato giúp cho hệ

thống có thể hoạt động ổn định kể cả khi thông số trong động cơ bị thay đổi. Phương pháp đề xuất đáp ứng nhu cầu tương ứng với thực tế: khi hoạt động động cơ sẽ bị nóng lên và điện trở lúc này sẽ bị thay đổi. Phương pháp đề xuất giúp tiết kiệm chi phí và giảm không gian lắp đặt vì không phải gắn cảm biến tốc độ ở đầu trục động cơ. Tốc độ ước tính bám rất tốt so với tốc độ đặt, kể cả khi tốc độ đặt vào thay đổi nhanh chóng. Tuy nhiên, phương pháp còn một số hạn chế trong phạm vi điều khiển, khi động cơ hoạt động ở chế độ đảo chiều thì hệ thống mất ổn định. Khối ước tính điện trở sta-to vẫn tồn tại một số hạn chế, khi thay đổi đột ngột quá nhiều lần trong thời gian ngắn thì khối ước tính R_s cũng sẽ bị nhiễu và không còn chính xác. Trong thực tế, sẽ còn rất nhiều số liệu bị thay đổi khi động cơ hoạt động như là R_r , L_s , L_r , L_m cho nên khi đưa hệ thống này hoạt động ở thực tế thì vẫn cần thêm nhiều cải tiến.

Lời cảm ơn

Các tác giả cảm ơn Trường Đại học Tôn Đức Thắng đã hỗ trợ bài viết này.

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

Tuyên bố dữ liệu sẵn có

Dữ liệu hỗ trợ cho các khám phá của nghiên cứu này khi độc giả yêu cầu một cách hợp lý sẽ được tác giả liên hệ cung cấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Alain and J. D. L. Morales, "Sensorless AC Motor Control: Robust Advanced Design Techniques and Applications," 1st ed. Cham: Springer, 2015.
- [2] H. S. Purnama, T. Sutikno, S. Alavandar, and A. C. Subrata, "Intelligent Control Strategies for Tuning PID of Speed Control of DC Motor - A Review," 2019 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), Yogyakarta, Indonesia, 2019, pp. 24-30, doi: 10.1109/CENCON47160.2019.8974782.
- [3] J. Yu, T. Zhang, and J. Qian, "Modern control methods for the induction motor," *Electrical Motor Products: International Energy-Efficiency Standards and Testing Methods*, pp. 147-172, 2011.
- [4] A. Smith, S. Gadoue, M. Armstrong, and J. Finch, "Improved method for the scalar control of induction motor drives," *IET Electric Power Applications*, vol. 7, no. 6, pp. 487-498, 2013.
- [5] L. K. Jisha and A. A. P. Thomas, "A comparative study on scalar and vector control of Induction motor drives," in 2013 International Conference on Circuits, Controls and Communications, Bengaluru, India, 2013, pp. 1-5. doi: 10.1109/CCUBE.2013.6718554.
- [6] S. Gupta, M. M. Lokhande, and B. Obulapathi, "Indirect Vector Control of Induction Motor Drive Without Current Sensors for Electric-Drive Propulsion System," 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES56012.2022.10080345.
- [7] L. K. Jisha and A. P. Thomas, "A comparative study on scalar and vector control of Induction motor drives," in 2013 International Conference on Circuits, Controls and Communications, 2013, pp. 1-5.
- [8] C. D. Tran, P. Brandstetter, S. D. Ho, T. C. Tran, M. C. H. Nguyen, H. X. Phan, and B. H. Dinh, "Improving Fault Tolerant Control to the one current sensor failures for induction motor drives," in AETA 2018-Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences: Theory and Application, 2020, pp. 789-798.
- [9] S. Gupta, M. M. Lokhande, V. P. Dhote, and B. Obulapathi, "Vector Control of Induction Motor Drive in EVs with DESS: Eliminating Current Sensors and Enhancing Battery Life," in 2023 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE), 2023, pp. 1-6.
- [10] C. D. Tran, P. Brandstetter, B. H. Dinh, and C. S. T. Dong, "An Improving Hysteresis Current Control Method Based on FOC Technique for Induction Motor Drive," *Journal of Advanced Engineering and Computation*, vol. 5, no. 2, pp. 83-92, 2021.
- [11] A. Yoo, S. K. Sul, D. C. Lee, and C. S. Jun, "Novel Speed and Rotor Position Estimation Strategy Using a Dual Observer for Low-Resolution Position Sensors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 12, pp. 2897-2906, Dec. 2009. doi: 10.1109/TPEL.2009.2022969.
- [12] P. Combes, F. Malrait, P. Martin, and P. Rouchon, "An analysis of the benefits of signal injection for low-speed sensorless control of induction motors," in IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2016, pp. 721-725.
- [13] Y. Bensalem and M. N. Abdelkrim, "A sensorless neural model reference adaptive control for induction motor drives," in 2009 3rd International Conference on Signals, Circuits and Systems (SCS), 2009, pp. 1-6.
- [14] H. Reddy, R. S. Kaarthik, and P. P. Rajeevan, "Online Inductance Estimation of Speed Sensorless Induction Motor Drives," in 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2020, pp. 1-5.
- [15] A. Dumlu and K. K. Aytan, "Sensorless model reference adaptive system control for mobile robot," in 2017 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), 2017, pp. 1-6.
- [16] P. P. Kumar, D. M. Deshpande, and M. Dubey, "Model Reference Adaptive System (MRAS) Based Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Drive," *International Journal IJRITCC*, pp. 1554-1559, 2014.
- [17] P. BRANDSTETTER, "Sensorless Control of Induction Motor Using Modified MRAS," *International Review of Electrical Engineering*, 2012, vol. 7, iss. 3, pp. 4404-4411, doi: 10.15598/aeec.v11i1.802.
- [18] L. Dube and E. Bayoumi, "Robust DTC Against Parameter Variation for Three Phase Induction Motor Drive Systems," 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCE49384.2020.9179205.

- [19] H. M. Kojabadi, M. Abarzadeh, and S. A. Farouji, "Robust stator resistance identification of an IM drive using model reference adaptive system," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 507-517, 2013.
- [20] L. E. Taaj, Z. Boulghasoul, A. Elkharki, Z. Kandoussi, and A. Elbacha, "Extended Kalman Filter for High performances Sensorless Induction Motor drive," in *2019 4th World Conference on Complex Systems (WCCS)*, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICoCS.2019.8930736.
- [21] P. A. Domínguez, C. A. Silva, and J. I. Yuz, "State and Resistance Estimation in Sensorless FOC Induction Motor Drive Using a Reduced Order Unscented Kalman Filter," *2012 VI Andean Region International Conference*, Cuenca, Ecuador, 2012, pp. 171-174, doi: 10.1109/Andescon.2012.47.



Tran Trong Dao obtained Ph.D. degree in Technical Cybernetics in 2009 at Tomas Bata University in Zlín. Now he is a researcher, University lecturer at the Faculty of Information Technology of Ton Duc Thang University. He has co-authored research papers and articles in international journals, conference proceedings, conference paper presentation, book chapters. He is also a member of MERLIN, and NAVY Research Groups. He is interested in and working at the field of: applied informatics and control; modeling and simulation systems; optimization systems; artificial intelligence and application, evolutionary algorithms. He can be contacted at email: trantrongdao@tdtu.edu.vn.

ORCID:  <https://orcid.org/0000-0001-6510-0027>



Dinh Hoang Bach received a Ph.D. degree in Electrical Engineering from Heriot-Watt University, Edinburgh, the United Kingdom, in 2009. He received the B.E. and the M.E. degrees in Electrical Engineering from Vietnam National University - Ho Chi Minh City in 1995 and 1998, respectively. Bach Dinh is currently the head of the Electrical Engineering Department, Faculty of Electrical-Electronic Engineering at Ton Duc Thang University. His research interests are intelligent and optimal control, computer vision, robotics, power electronics, SCADA, and industrial communication networks. He is a member of the IEEE Industrial Electronics Society. He can be contacted at email: dinhhoangbach@tdtu.edu.vn. ORCID:

 <https://orcid.org/0000-0002-8618-1812>



Tran Dinh Cuong is a lecturer in the Faculty of Electrical-Electronic Engineering at Ton Duc Thang University. He received his BE, and ME degrees from Ho Chi Minh City University Of Technology, Vietnam, and his Ph.D. from the VSB-Technical University of Ostrava, the Czech Republic, in 2005, 2008, and 2020. His research interests include modern control methods and intelligent algorithms in motor drives. He can be contacted at email: trandinhcuong@tdtu.edu.vn.

ORCID:  <https://orcid.org/0000-0002-5268-0779>