



Ứng dụng mô hình điện áp điều khiển không cảm biến động cơ không đồng bộ ba pha

Using voltage model for sensorless control of a three-phase induction motor

Nguyễn Duy Phương*

Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Sài Gòn

Từ khóa:

Điều khiển định hướng từ thông
Điều khiển tốc độ
Điện trở stator
Mô hình điện áp
MRAS

TÓM TẮT

Nghiên cứu này giới thiệu một chiến lược cải tiến để điều khiển tốc độ không cảm biến của động cơ không đồng bộ ba pha bằng cách sử dụng mô hình điện áp để ước tính từ thông rotor trong kỹ thuật điều khiển định hướng từ thông (FOC). Tốc độ ảo được tính toán bằng hệ thống thích ứng tham chiếu mô hình (MRAS) gồm mô hình điện áp kết hợp với mô hình dòng điện để cải thiện độ chính xác của phương pháp ước tính dựa trên FOC. Tại mô hình điện áp này, điện trở stator ảnh hưởng đáng kể đến từ thông rotor, trong khi điện trở thực tế của động cơ có thể thay đổi trong quá trình vận hành. Phương pháp được đề xuất đã thành công trong việc ước tính chính xác các giá trị điện trở stator theo sự thay đổi thực tế của điện trở stator động cơ. Các mô phỏng đã được tiến hành trong môi trường MATLAB/Simulink để xác thực hiệu quả của phương pháp này.

Keywords:

Field-oriented control
Speed control
Stator resistance
Voltage model
MRAS

ABSTRACT

This study introduces an innovative strategy for sensorless speed control of three-phase induction motor by utilizing a voltage model to estimate rotor flux within a field-oriented control (FOC) technique. The virtual speed is computed using a Model Reference Adaptive System (MRAS), which integrates a voltage model with a current model to improve the accuracy of the FOC-based sensorless control method. In this approach, the stator resistance significantly influences the rotor flux in the voltage model, while the actual resistance of the motor can vary during operation. The proposed method has been successful in accurately estimating the stator resistance values. Simulations were conducted in a MATLAB/Simulink environment to validate the effectiveness of this method.

1. Giới thiệu

Động cơ không đồng bộ ba pha (KĐBPP) được sử dụng nhiều trong lĩnh vực công nghiệp

do có cấu tạo đơn giản, độ tin cậy cao và giá cả phải chăng [1], [2], [3], [4]. Tuy nhiên, các thuật toán điều khiển tốc độ thông thường như điều khiển định hướng từ thông (FOC) thường phụ

* Nguyễn Duy Phương. Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Sài Gòn
Email: phuong.nd@sgu.edu.vn

[https://www.doi.org/10.55228/JTST.14\(1\).40-48](https://www.doi.org/10.55228/JTST.14(1).40-48)

Ngày nhận bài: 04/11/2024; Ngày nhận bài sửa: 17/12/2024; Ngày chấp nhận đăng: 11/01/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/01/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

thuộc vào các cảm biến như cảm biến tốc độ, cảm biến dòng điện, có khả năng làm tăng độ phức tạp và chi phí của hệ thống [5], [6]. Để giảm thiểu những chi phí này và đơn giản hóa hệ thống điều khiển, các phương pháp điều khiển không cảm biến được ứng dụng, cho phép ước tính các thông số của động cơ và không cần đến các cảm biến vật lý.

Ước tính từ thông rotor là một khía cạnh quan trọng của điều khiển không cảm biến, cần thiết cho việc quản lý moment xoắn và tốc độ hiệu quả [7]. Nhiều giải pháp đã đưa ra để tăng cường độ chính xác và độ tin cậy của ước tính từ thông rotor. Các tác giả trong [8] đã chỉ ra hiệu quả của những bộ ước tính từ thông rotor, sử dụng các vector điện áp và dòng điện stator, cùng với các bộ ước tính dòng điện sử dụng dòng điện stator và tốc độ rotor. Những mô hình này có lợi thế cho các truyền động hiệu suất cao, trong đó, các hệ thống phản hồi bên trong có thể tăng cường tính chính xác của bộ ước tính. Tuy nhiên, hiệu suất của giải pháp này chỉ hoạt động ở vùng tốc độ thấp. Ngoài ra, bộ lọc Kalman mở rộng và bộ quan sát chế độ trượt là một trong những phương pháp điều khiển tiên tiến được dùng để tinh chỉnh từ thông rotor [9], [10], [11], [12]. Nghiên cứu trong [13] cho thấy, một kỹ thuật điều khiển dự đoán từ thông được giới thiệu để tăng cường ước tính từ thông rotor thông qua các bộ quan sát, trong khi nghiên cứu [14] trình bày chi tiết một bộ quan sát đáp ứng từ thông rotor có tính đến các biến thể điện trở rotor và các thay đổi tốc độ. Các kỹ thuật này cho thấy triển vọng đạt hiệu suất điều khiển cao trong động cơ không đồng bộ ba pha. Một kỹ thuật nổi bật là hệ thống thích ứng mô hình tham chiếu (MRAS), được đánh giá có khả năng nâng cao hiệu suất truyền động không cảm biến động cơ không đồng bộ ba pha bằng cách cung cấp ước tính từ thông rotor trong nhiều điều kiện khác nhau [15], [16], [17], [18]. Tuy nhiên, trong lĩnh vực

điều khiển động cơ, các tham số điện trở stator (R_s) rất quan trọng đối với hiệu suất của ước tính từ thông rotor và điều khiển động cơ [19]. Những thay đổi trong tham số điện trở stator này có thể gây ra sai số lớn giữa từ thông rotor ước tính và thực tế, do đó, ảnh hưởng đến moment xoắn và khả năng điều khiển tốc độ [20], [21], [22].

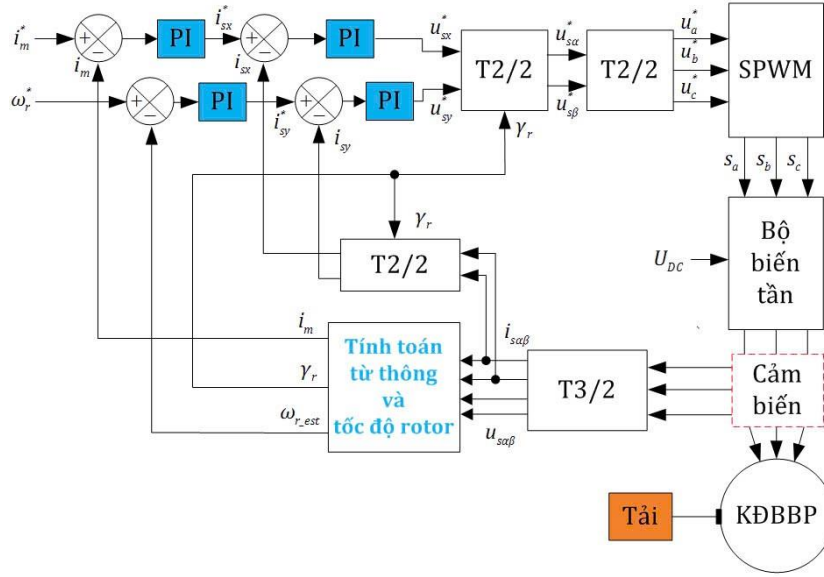
Bài báo này trình bày một phương pháp cải tiến để điều khiển tốc độ không cảm biến của động cơ không đồng bộ ba pha bằng cách sử dụng mô hình điện áp nâng cao để ước tính tốc độ ảo và từ thông trong kỹ thuật điều khiển định hướng từ thông (FOC). Nghiên cứu này đồng thời đánh giá hiệu quả của phương pháp điều khiển mới bằng cách thay đổi điện trở stator của mô hình máy và so sánh với điện trở stator ước tính trong mô hình MRAS cải tiến. Hiệu suất của hệ thống truyền động được đánh giá bằng mô phỏng trong phần mềm MATLAB/Simulink. Các kết quả chứng minh hiệu suất đáng tin cậy của hệ thống truyền động động cơ và làm nổi bật khả năng của mô hình điện áp trong việc xác định từ thông rotor, nhấn mạnh tầm quan trọng của nó trong các ứng dụng điều khiển động cơ KĐBBP.

2. Phương pháp điều khiển không cảm biến tốc độ của động cơ không đồng bộ ba pha dựa trên kỹ thuật điều khiển định hướng từ thông

Tốc độ động cơ không đồng bộ ba pha được điều khiển bằng kỹ thuật FOC không có cảm biến tốc độ [23]. Mô hình động học của động cơ KĐBBP trong hệ tọa độ $[\alpha-\beta]$ được mô tả:

$$\begin{cases} \vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right) L_s \frac{d\vec{i}_s}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\vec{\Phi}_r}{dt} \\ 0 = -\frac{L_m R_r}{L_r} \vec{i}_s + \vec{\Phi}_r \left(\frac{R_r}{L_r} - j\omega_r\right) + \frac{d\vec{\Phi}_r}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

Hệ phương trình biểu diễn trạng thái đầy đủ của KĐBBP được mô tả chi tiết như sau:



Hình 1. Sơ đồ kỹ thuật điều khiển không cảm biến bằng phương pháp FOC cho không đồng bộ ba pha.

$$\frac{di_{sx}}{dt} = \frac{L_m L_r}{L_s L_r - L_m^2} \begin{pmatrix} \frac{1}{L_m} u_{sx} - \frac{R_s}{L_m} i_{sx} + \frac{L_m}{L_r} \omega_r i_{s\beta} \\ \dots + \omega_r i_{r\beta} + \frac{R_r}{L_r} i_{r\alpha} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{L_m L_r}{L_s L_r - L_m^2} \begin{pmatrix} \frac{1}{L_m} u_{s\beta} - \frac{R_s}{L_m} i_{s\beta} - \omega_r \frac{L_m}{L_r} i_{s\alpha} \\ \dots - \omega_r i_{r\alpha} + \frac{R_r}{L_r} i_{r\beta} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{di_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_s L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \begin{pmatrix} \frac{1}{L_s} u_{s\alpha} - \frac{R_s}{L_s} i_{s\alpha} + \omega_r i_{s\beta} \\ \dots + \frac{R_r}{L_m} i_{r\alpha} + \frac{L_r}{L_m} \omega_r i_{r\beta} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{di_{r\beta}}{dt} = \frac{L_s L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \begin{pmatrix} \frac{1}{L_s} u_{s\beta} - \frac{R_s}{L_s} i_{s\beta} - \omega_r i_{s\alpha} \\ \dots - \frac{L_r}{L_m} \omega_r i_{r\alpha} + \frac{R_r}{L_m} i_{r\beta} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Moment xoắn của động cơ được tính như trong công thức (6):

$$T_e = \frac{3}{2} p (i_{s\beta} i_{r\alpha} + i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (6)$$

Phương trình tốc độ rotor của động cơ được trình bày như sau:

$$\omega = \int \frac{p}{J} (T_e - T_L) dt \quad (7)$$

Sơ đồ Hình 1 biểu diễn hoạt động của kỹ thuật FOC cho hệ truyền động KĐBBP. Trong sơ đồ này là một quy trình của phương pháp FOC không sử dụng cảm biến tốc độ, bao gồm các bước chính như sau:

(i) Trong hệ tọa độ $[a-b-c]$, hệ thống đo điện áp và dòng điện đầu vào ba pha bằng cảm biến điện áp và dòng điện;

(ii) Biến đổi Clarke (T3/2) sang hệ tọa độ $[\alpha-\beta]$: Điện áp và dòng điện ba pha được đo biến đổi thành hệ tọa độ $[\alpha-\beta]$. Biến đổi Clarke là một quy trình toán học để đơn giản hóa việc phân tích và điều khiển các hệ thống đa pha bằng cách chuyển đổi các đại lượng ba pha từ miền ba pha sang mặt phẳng hai chiều;

(iii) Chuyển sang hệ tọa độ $[x-y]$ sử dụng góc từ thông rotor (γ_r): Dòng điện được biến đổi từ $[\alpha-\beta]$ chuyển tiếp sang hệ tọa độ $[x-y]$ bởi góc từ thông rotor γ_r (T2/2). Bước này căn chỉnh các vector dòng điện và điện áp với từ thông rotor, được xem là rất quan trọng để điều khiển động cơ hiệu quả;

(iv) Tạo tín hiệu PWM: Các giá trị được biến đổi trong tọa độ $[x-y]$ đưa vào module điều chế độ rộng xung hình sin (SPWM). Module này tạo ra các xung tín hiệu chuyển mạch cần thiết để điều khiển bộ biến tần, từ đó, điều chỉnh nguồn

điện của động cơ để đạt được hiệu suất và hiệu quả mong muốn.

3. Kỹ thuật điều khiển không cảm biến dựa trên mô hình điện áp

Trong kỹ thuật FOC, từ thông rotor đóng vai trò rất quan trọng vì nó quyết định việc điều khiển moment xoắn và hiệu suất của động cơ. Mô hình điện áp được sử dụng để tính toán từ thông rotor lấy các thông số đầu vào là dòng điện, điện áp stator từ cảm biến.

$$\Phi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{s\alpha} - R_{s_est} i_{s\alpha}) dt \dots - \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} i_{s\alpha} \right] \quad (8)$$

$$\Phi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{s\beta} - R_{s_est} i_{s\beta}) dt \dots - \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} i_{s\beta} \right] \quad (9)$$

$$\gamma_r = \arctg(\Phi_{r\beta} / \Phi_{r\alpha}) \quad (10)$$

Từ mô hình này, thành phần dòng từ hoá i_m được tính như sau:

$$i_m = \left(\frac{1}{L_m} \right) |\Phi_r| \quad (11)$$

Mô hình MRAS gồm hai phần chính là mô hình điện áp thường được sử dụng làm mô hình tham chiếu để tính toán từ thông rotor như công thức (8), (9) và mô hình dòng điện được sử dụng làm mô hình điều chỉnh từ thông rotor được tính toán theo công thức (12), (13):

$$\Phi'_{r\alpha} = \int \left[\frac{L_m}{L_r} R_r i_{s\alpha} - \frac{1}{L_r} R_r \Phi'_{r\alpha} \dots - \omega_{r_est} \Phi'_{r\beta} \right] dt \quad (12)$$

$$\Phi'_{r\beta} = \int \left[\frac{L_m}{L_r} R_r i_{s\beta} - \frac{1}{L_r} R_r \Phi'_{r\beta} \dots + \omega_{r_est} \Phi'_{r\alpha} \right] dt \quad (13)$$

Tốc độ ảo ω_{r_est} , đạt được bằng cách sử dụng bộ điều khiển PI điều chỉnh tốc độ rotor với mục đích giảm lỗi giữa các mô hình điện áp và

mô hình dòng điện, như được chỉ định bởi các công thức (14), (15):

$$e_\omega = \Phi'_{r\alpha} \Phi_{r\beta} - \Phi_{r\alpha} \Phi'_{r\beta} \quad (14)$$

$$\omega_{r_est} = K_p e_\omega + K_i \int_0^t e_\omega dt \quad (15)$$

Trong quá trình vận hành KĐBBP, giá trị R_s ảnh hưởng quan trọng đến hiệu suất và tăng tổn hao nhiệt, giảm hiệu suất tổng thể. Sự biến đổi này có thể làm sai lệch giá trị điện áp dự đoán so với giá trị thực tế. Trong mô hình điện áp, sự thay đổi của điện trở stator trong công thức (8), (9). Thông qua bộ điều khiển PI, giá trị R_s được tính theo công thức (16), (17):

$$e_{R_s} = (\Phi_{r\alpha} - \Phi'_{r\alpha}) i_{s\alpha} + \dots \dots (\Phi_{r\beta} - \Phi'_{r\beta}) i_{s\beta} \quad (16)$$

$$R_{s_est} = K_p \cdot e_{R_s} + K_i \int_0^t e_{R_s} \cdot dt \quad (17)$$

Dựa trên phương pháp này, việc đánh giá điện trở stator cho phép đánh giá độ chính xác của hệ thống điều khiển tốc độ và moment xoắn trong KĐBBP. Đồng thời, giúp xác định tác động của các biến số như nhiệt độ và tải lên hiệu suất của động cơ.

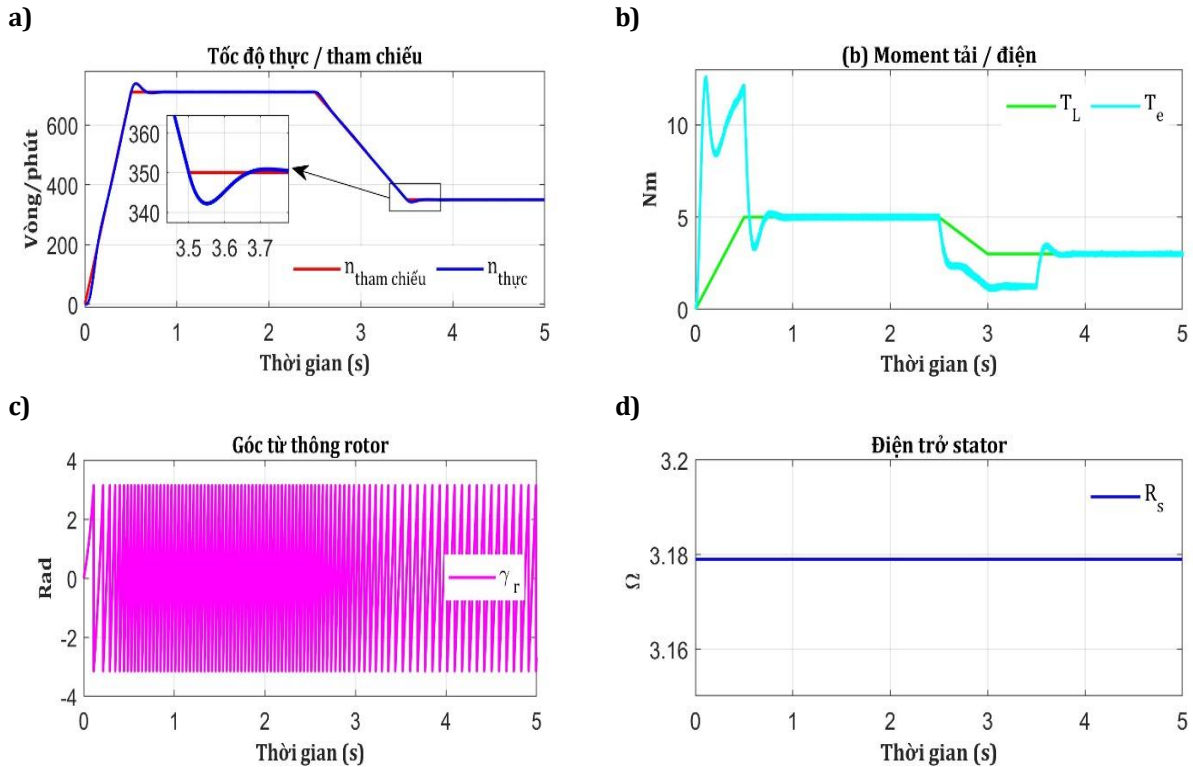
4. Kết quả mô phỏng

Để đánh giá tính khả thi của phương pháp đề xuất, các mô phỏng được thực hiện bằng chương trình MATLAB/Simulink. Mô hình máy của KĐBBP bao gồm các thông số thực tế được cho trong **Bảng 1 (Phụ lục 2)** và giả sử R_s thay đổi theo dạng bậc thang được cho trong **Bảng 2 (Phụ lục 2)**.

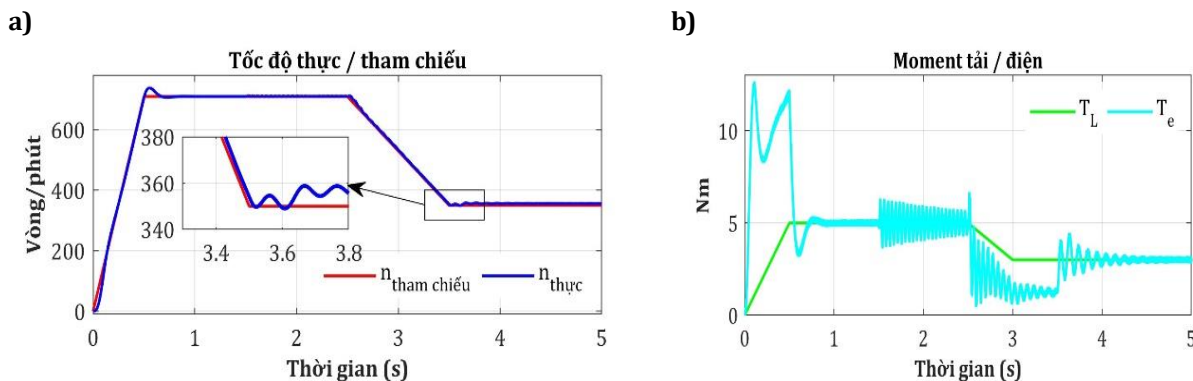
Ban đầu, động cơ hoạt động ở tốc độ tham chiếu là 700 vòng/phút. Sau 2,5 giây, tốc độ giảm xuống 350 vòng/phút, tại đó, tốc độ được giữ không đổi. Moment tải ban đầu là 5 Nm tại thời điểm 2,5 giây, đến thời điểm 3.0 giây, moment tải giảm xuống 3 Nm và duy trì. Ba trường hợp mô phỏng với các giá trị R_s khác

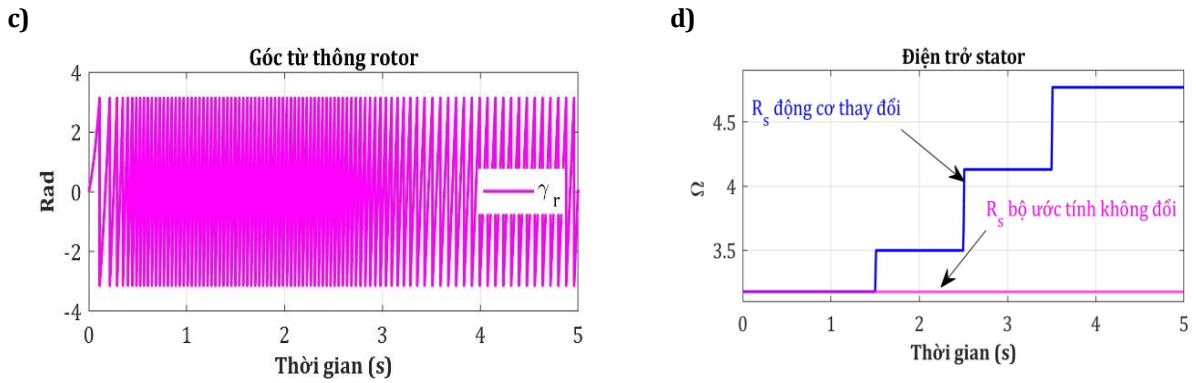
nhau để đánh giá ảnh hưởng của điện trở stator lên hệ thống truyền động KĐBBP: Trường hợp 1 với R_s không thay đổi (Hình 2), trường hợp 2 khi R_s thay đổi nhưng giá trị R_{s_est} của bộ ước tính không được cập nhật (Hình 3), trường hợp 3 khi R_s thay đổi tích hợp thêm ước tính R_{s_est} của bộ ước tính (Hình 4). Hình 2a cho thấy hệ thống điều khiển duy trì tốc độ động cơ bám sát giá trị tham chiếu một cách ổn định với độ vọt lố nhỏ trong quá trình chuyển tiếp tốc độ, đồng thời, nhận thấy sự ổn định của hệ thống điều khiển khi R_s không thay đổi. Moment tải ổn định nhanh chóng sau khi có sự thay đổi tốc độ, tăng một chút khi tốc độ ổn định, cho thấy hệ thống phản ứng nhanh và nhạy, thể hiện tại

Hình 2b. Góc từ thông rotor γ_r dao động trong khoảng $[-\pi, \pi]$ là phù hợp với góc từ thông rotor trong kỹ thuật FOC, thể hiện tại Hình 2c. Hình 2d hiển thị giá trị R_s không thay đổi trong suốt quá trình vận hành. Trường hợp khi R_s thay đổi nhưng giá trị R_s của bộ ước tính không được cập nhật, biểu diễn tại Hình 3d. Hình 3a cho thấy tốc độ sai lệch rõ rệt so với tốc độ tham chiếu. Khi R_s của động cơ thay đổi nhưng không cập nhật trong bộ ước tính của hệ thống, hiệu suất điều khiển tốc độ suy giảm. Hình 3b cho thấy moment dao động nhiều khi R_s tăng lên. Góc từ thông rotor γ_r vẫn dao động trong khoảng $[-\pi, \pi]$, như Hình 3c.



Hình 2. Hiệu suất của KĐBBP khi R_s không đổi.

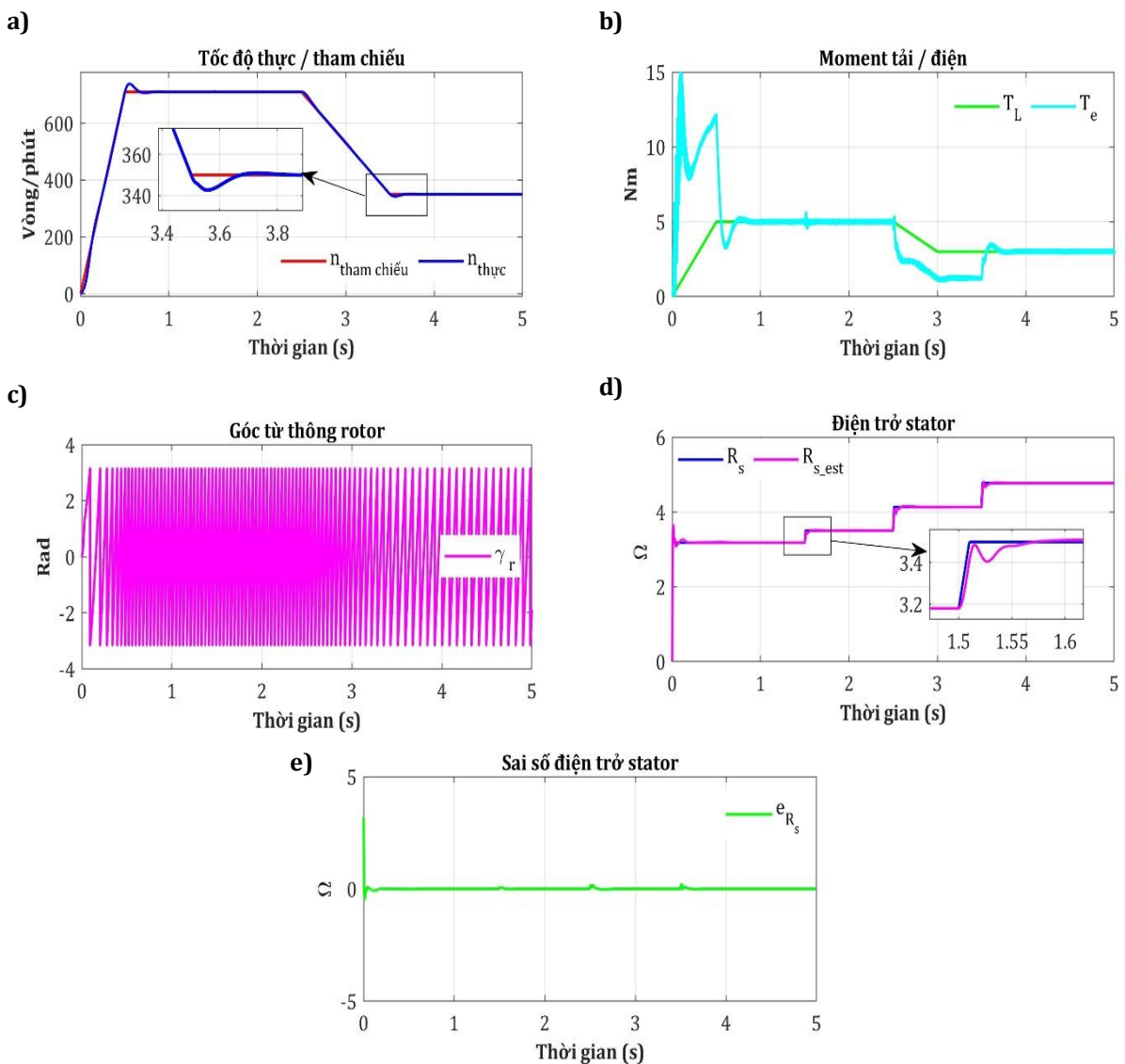




Hình 3. Hiệu suất của KĐBBP khi R_s thay đổi.

Trong trường hợp khi R_s thay đổi và được cập nhật trong bộ ước tính. Từ Hình 4a đến Hình 4c thấy rằng giá trị vẫn đồng nhất về hình dạng và đạt được sự ổn định. Trong khi đó, giá trị R_s của bộ ước tính cần thời gian ban đầu để thích ứng với sự thay đổi, dẫn đến sự sai lệch rõ

rệt hơn giữa điện trở tham chiếu và ước tính, nhưng cơ chế ước lượng cho thấy khả năng điều chỉnh tốt để theo kịp các thay đổi trong giá trị R_s , như Hình 4d. Hình 4e là sai số giữa giá trị ước tính và giá trị thực tế của điện trở.



Hình 4. Hiệu suất của KĐBBP khi có ước tính R_s .

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã trình bày một chiến lược cải tiến để điều khiển tốc độ không cảm biến của KĐBBP bằng cách sử dụng mô hình điện áp để ước tính từ thông rotor trong kỹ thuật điều khiển định hướng từ thông (FOC). Phương pháp đề xuất đã thành công ước tính chính xác giá trị R_s khi giá trị này thay đổi đáng kể trong quá trình vận hành thực tế của động cơ, từ đó, đảm bảo hiệu suất và độ tin cậy cao hơn cho hệ truyền động. Trong tương lai, nghiên cứu sẽ được mở rộng như thử nghiệm trên các hệ thống động cơ thực tế để đánh giá hiệu quả trong điều kiện thực. Phương pháp này cũng có tiềm năng áp dụng cho các hệ thống động cơ khác, chẳng hạn như PMSM, và có thể sử dụng các kỹ thuật tối ưu hóa như trí tuệ nhân tạo (AI) hoặc thuật toán tiến hóa để cải thiện độ chính xác và tốc độ hội tụ của bộ ước tính. Với những kết quả đạt được, nghiên cứu này góp phần quan trọng vào việc nâng cao hiệu suất và độ tin cậy của các hệ thống KĐBBP.

Phụ lục

1. Phụ lục 1 - Giải thích các kí hiệu

\vec{u}_s : Vector điện áp stator;

\vec{i}_s, \vec{i}_r : Véc-tơ dòng điện stator và rotor;

$\vec{\Phi}_s, \vec{\Phi}_r$: Vector từ thông stator và rotor trong mô hình điện áp;

Φ_s, Φ_r : Từ thông stator và rotor trong mô hình điện áp;

Φ'_s, Φ'_r : Từ thông stator và rotor trong mô hình dòng điện;

R_s, R_r : Điện trở stator và rotor;

L_s, L_r, L_m : Các độ tự cảm stator, rotor và từ hóa;

ω_r : Tốc độ rotor;

T_e : Moment xoắn;

T_L : Moment tải;

2. Phụ lục 2 - Bảng thông số

Bảng 1. Thông số cơ bản KĐBBP.

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Điện trở stator	3,179	Ω
Điện trở rotor	2,118	Ω
Độ tự cảm stator	0,209	H
Độ tự cảm rotor	0,209	H
Độ từ hoá	0,192	H

Bảng 2. Thông số thay đổi R_s .

Thời gian (s)	Giá trị	Đơn vị
0 - 1,5	3,179	Ω
1,5 - 2,5	3,5	Ω
2,5 - 3,5	4,13	Ω
3,5 - 5	4,769	Ω

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Tác giả tuyên bố không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

Lời cảm ơn

Bài báo này là sản phẩm của đề tài nghiên cứu mã số CSB2023-37 được tài trợ bởi Trường Đại học Sài Gòn.

Phuong Duy Nguyen. *Faculty of Electronics and Telecommunication, Saigon University.*

*Corresponding author: phuong.nd@sgu.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] S. H. Asgari, M. Jannati, T. Sutikno, and N. R. N. Idris, "Vector control of three-phase induction motor with

- two stator phases open-circuit," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 282-292, Jun. 2015, doi: [10.11591/ijpeds.v6.i2.pp282-292](https://doi.org/10.11591/ijpeds.v6.i2.pp282-292).
- [2] T. F. Chan and K. Shi, *Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011, doi: [10.1002/9780470825587](https://doi.org/10.1002/9780470825587).
- [3] J. Uralde, O. Barambones, E. Artetxe, I. Calvo, and A. del Rio, "Model predictive control design and hardware in the loop validation for an electric vehicle powertrain based on induction motors," *Electron.*, vol. 12, no. 21, 2023, Art. no. 4516, doi: [10.3390/electronics12214516](https://doi.org/10.3390/electronics12214516).
- [4] M. I. Mosaad, "Application of energy-saving for an inverter feeds three-phase induction motor," *Yanbu J. Eng. Sci.*, vol. 18, no. 1, pp. 55-62, 2021, doi: [10.53370/001c.29146](https://doi.org/10.53370/001c.29146).
- [5] B. Wangsilabatra, S. Tunyasirirut, and W. Permpoonsinsup, "Three phase induction motor drive using hybrid fuzzy PI controller based on field oriented control," *Int. J. Image, Graph. Signal Process.*, vol. 10, no. 1, pp. 1-10, Jan. 2018, doi: [10.5815/ijigsp.2018.01.01](https://doi.org/10.5815/ijigsp.2018.01.01).
- [6] C. D. Tran, T. X. Nguyen, and P. D. Nguyen, "A field-oriented control method using the virtual currents for the induction motor drive," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 12, no. 4, pp. 2095-2102, Dec. 2021, doi: [10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2095-2102](https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2095-2102).
- [7] Y. B. Zbede, S. M. Gadoue, and D. J. Atkinson, "Model predictive MRAS estimator for sensorless induction motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 6, pp. 3511-3521, Jun. 2016, doi: [10.1109/TIE.2016.2521721](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2521721).
- [8] R. Kumar, S. Das, and A. K. Chattopadhyay, "Comparative assessment of two different model reference adaptive system schemes for speed-sensorless control of induction motor drives," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 10, no. 2, pp. 141-154, 2016, doi: [10.1049/iet-epa.2015.0121](https://doi.org/10.1049/iet-epa.2015.0121).
- [9] O. Asseu et al., "Nonlinear control of an induction motor using a reduced-order extended sliding mode observer for rotor flux and speed sensorless estimation," *Engineering*, vol. 2, no. 10, pp. 813-819, Oct. 2010, doi: [10.4236/engineering.2010.210104](https://doi.org/10.4236/engineering.2010.210104).
- [10] M. L. Jayaramu et al., "Real-time implementation of extended Kalman filter observer with improved speed estimation for sensorless control," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 50452-50465, 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3069676](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069676).
- [11] M. Jannati, T. Sutikno, N. R. Nik Idris, and M. J. A. Aziz, "High performance vector control of 3-Phase IM drives under open-phase fault based on EKF for rotor flux estimation," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 458-467, Apr. 2016, doi: [10.11591/ijece.v6i2.pp458-467](https://doi.org/10.11591/ijece.v6i2.pp458-467).
- [12] Q. Yuan, Y. Yang, H. Wu, and H. Wu, "Low speed sensorless control based on an improved sliding mode observation and the inverter nonlinearity compensation for SPMSM," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 61299-61310, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.2983181](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983181).
- [13] G. Utrata, J. Rolek, and A. Kaplon, "The novel rotor flux estimation scheme based on the induction motor mathematical model including rotor deep-bar effect," *Energies*, vol. 12, no. 14, 2019, Art. no. 2676, doi: [10.3390/en12142676](https://doi.org/10.3390/en12142676).
- [14] M. A. Mossa, A. S. Al-Sumaiti, T. D. Do, and A. A. Z. Diab, "Cost-effective predictive flux control for a sensorless doubly fed induction generator," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 172606-172627, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2951361](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951361).
- [15] M. Kuchar, P. Brandstetter, and M. Kaduch, "Sensorless induction motor drive with neural network," in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conf.*, vol. 5, Aachen, Germany, pp. 3301-3305, doi: [10.1109/PESC.2004.1355058](https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355058).
- [16] S. M. Gadoue, D. Giaouris, and J. W. Finch, "Stator current model reference adaptive systems speed estimator for regenerating-mode low-speed operation of sensorless induction motor drives," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 7, no. 7, pp. 597-606, Aug. 2013, doi: [10.1049/iet-epa.2013.0091](https://doi.org/10.1049/iet-epa.2013.0091).
- [17] M. C. H. Nguyen and C. D. Tran, "An extended sensor fault tolerant control method applied to three-phase induction motor drives," *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 13, no. 1, pp. 125-133, Feb. 2024, doi: [10.11591/eei.v13i1.5992](https://doi.org/10.11591/eei.v13i1.5992).
- [18] C. D. Tran, M. Kuchar, M. Sobek, V. Sotola, and B. H. Dinh, "Sensor fault diagnosis method based on rotor slip applied to induction motor drive," *Sensors*, vol. 22, no. 22, 2022, Art. no. 8636, doi: [10.3390/s22228636](https://doi.org/10.3390/s22228636).
- [19] C. J. Chiang, Y. K. Wang, and W. Te Cheng, "EKF-based rotor and stator resistance estimation in speed sensorless control of induction motors," in *2012 American Control Conf. (ACC)*, Montreal, QC, Canada, pp. 1174-1179, doi: [10.1109/acc.2012.6315440](https://doi.org/10.1109/acc.2012.6315440).

- [20] D. Kouchih, M. Tadjine, and M. S. Boucherit, "Improved direct torque control of induction motors using adaptive observer and sliding mode control," *Arch. Control Sci.*, vol. 23 (LIX), no. 3, pp. 361-376, 2013, doi: [10.2478/acsc-2013-0022](https://doi.org/10.2478/acsc-2013-0022).
- [21] D. Chatterjee, "Impact of core losses on parameter identification of three-phase induction machines," *IET Power Electron.*, vol. 7, no. 12, pp. 3126-3136, Dec. 2014, doi: [10.1049/iet-pel.2014.0121](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2014.0121).
- [22] T. P. Van et al., "Online rotor and stator resistance estimation based on artificial neural network applied in sensorless induction motor drive," *Energies*, vol. 13, no. 18, 2020, Art. no. 4946, doi: [10.3390/en13184946](https://doi.org/10.3390/en13184946).
- [23] C. D. Tran, P. Brandstetter, B. H. Dinh, S. D. Ho, and M. H. C. Nguyen, "Current-sensorless method for speed control of induction motor based on hysteresis pulse width modulation technique," *J. Adv. Eng. Comput.*, vol. 2, no. 4, pp. 271-280, 2018, doi: [10.25073/jaec.201824.213](https://doi.org/10.25073/jaec.201824.213)