

Điều Khiển Động Cơ 5 Pha Bằng Phương Pháp Mô Hình Dự Báo Điện Áp Điều Khiển Trực Tiếp

Nguyễn Cường Phi^{1a}, Phạm Hồng Sơn^{1b}, Võ Ngọc Vinh^{2c}, Nguyễn Vũ Quỳnh^{1d*}

¹ Khoa Cơ điện – Điện tử, Trường Đại học Lạc Hồng, Biên Hòa, Đồng Nai, Việt Nam

² Trung tâm Nghiên cứu Khoa học và Ứng dụng, Trường Đại học Lạc Hồng, Biên Hòa, Đồng Nai, Việt Nam

^aNguyencuongphi@lhu.edu.vn, ^bHongson@lhu.edu.vn, ^cngocvinh2710@gmail.com, ^dvuquynh@lhu.edu.vn

Received: 18 February 2021; Accepted: 11 March 2021

TÓM TẮT. Bài báo này trình bày giải thuật điều khiển động cơ cảm ứng năm pha bằng phương pháp mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp. Giải thuật dựa trên việc tối thiểu hóa hàm mục tiêu tính toán sai số giữa giá trị tham chiếu và giá trị thực của các thành phần trực tiếp và thành phần trên trục d-q của điện áp stator. Các giá trị tham chiếu của thành phần điện áp stator trên trục d-q đạt được thông qua việc kết hợp điều khiển deadbeat của mô hình dự báo. Thuật toán điều khiển trực tiếp điện áp của stator giúp việc điều khiển đơn giản, tiết kiệm thời gian tính toán và giảm tổn thất.

TỪ KHOÁ: Động cơ cảm ứng 5 pha, Thuật toán điều khiển, Mô hình dự báo, Điều khiển điện áp

ABSTRACT. This paper presents model predictive voltage control algorithm for a five-phase induction motor. The algorithm based on minimization of the cost function calculates the error between the reference value and the actual value of the stator voltage's direct and quadrature axes components. The stator voltage component's reference values on the d-q axis are achieved through the deadbeat control combination of the predictive model. The proposed algorithm makes control simple, saves computation time, and reduces losses.

KEYWORDS: Five phase induction motor, Control algorithms, Model predictive, Voltage control

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, các loại động cơ nhiều pha đã được tập trung nghiên cứu bởi vì chúng có nhiều ưu điểm nổi trội hơn so với các loại động cơ xoay chiều 3 pha thông thường [1]. Những ưu điểm của động cơ nhiều pha có thể liệt kê như hiệu suất cao, moment mượt, giảm độ dao động của tín hiệu điều khiển, giảm dòng điện trong các pha của stator và giảm tỉ lệ lỗi trong quá trình hoạt động [2]. Tất cả những ưu điểm này đã thúc đẩy cộng đồng các doanh nghiệp sử dụng động cơ nhiều pha trong các ứng dụng đòi hỏi công suất động cơ lớn như trong hàng không, các thiết bị hải quân [3].

Trong các loại động cơ nhiều pha quen thuộc nhất đó là động cơ cảm ứng 5 pha [4]. Nhiều giải thuật điều khiển động cơ cảm ứng 5 pha đã được nghiên cứu nhằm mục đích đạt được hiệu quả tối ưu như giảm độ dao động, hiệu suất cao và dễ thực hiện. Phương pháp điều khiển moment xoắn trực tiếp và điều khiển tựa từ thông được sử dụng hầu hết trong các bộ điều khiển động cơ [5].

Cả hai kỹ thuật này đều góp phần làm tăng hiệu suất hoạt động của động cơ cảm ứng 5 pha nhưng bên cạnh đó cũng phát sinh một số vấn đề. Ví dụ đối với phương pháp điều khiển tựa từ thông, độ phức tạp của hệ thống tùy thuộc vào mức độ xác định chính xác các hệ số k_i, k_p của các bộ điều khiển PI. Việc sử dụng bộ điều khiển PI còn làm giảm khả năng đáp ứng nhanh của hệ thống. Mặt khác, phương pháp điều khiển moment xoắn trực tiếp cũng giảm được độ phức tạp của hệ thống và giúp cho hệ thống tác động nhanh với những thay đổi. Tuy nhiên giải pháp này vẫn tạo ra các dao động trong các biến điều khiển [6].

Để khắc phục các vấn đề nêu trên, chúng tôi đề xuất một mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp cho động cơ 5 pha cảm ứng không sử dụng cảm biến. Giải thuật đề xuất dựa trên việc sử dụng một hàm mục tiêu, bao gồm hai thành phần là giá trị chênh lệch giữa giá trị tham chiếu của điện áp stator trên trục d-q và giá trị thực tế tương ứng. Thông qua kiểm tra hàm mục tiêu, các biến số của hàm mục tiêu là các điện áp cung cấp cho động cơ có thể truy cập trực tiếp mà không

cần phải ước lượng. Giải thuật này giúp giảm thời gian tính toán của hàm mục tiêu, giảm thời gian chuyển mạch cũng như tổn thất công suất chuyển mạch. Hơn nữa bộ điều khiển làm việc trực tiếp với điện áp stator, điều này giúp cho đáp ứng của hệ thống nhanh hơn.

2. NỘI DUNG

2.1 Mô hình toán học của động cơ cảm ứng 5 pha

Thông qua việc áp dụng các nguyên tắc điều khiển tựa từ thông rotor, các phương trình mô tả động lực điện của động cơ cảm ứng 5 pha có thể được biểu diễn trong hệ quy chiếu (d-q-x-y) bằng các phương trình sau:

$$\frac{d\psi_{dr,k}^{rf}}{dt} = \frac{d\bar{\psi}_{r,k}^{rf}}{dt} = \frac{L_m}{\tau_r} i_{ds,k}^{rf} - \frac{\psi_{dr,k}^{rf}}{\tau_r} \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_{qr,k}^{rf}}{dt} = \frac{L_m}{\tau_r} i_{qs,k}^{rf} - \omega_{sl,k} \psi_{dr,k}^{rf} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{di_{ds,k}^{rf}}{dt} = \gamma_1 i_{ds,k}^{rf} + \omega_{me,k} i_{qs,k}^{rf} + \gamma_2 \psi_{dr,k}^{rf} + \frac{1}{L_t} u_{ds,k}^{rf} \quad (3)$$

$$\frac{di_{qs,k}^{rf}}{dt} = \gamma_1 i_{qs,k}^{rf} - \omega_{me,k} i_{ds,k}^{rf} + \gamma_2 \psi_{qr,k}^{rf} + \frac{1}{L_t} u_{qs,k}^{rf} \quad (4)$$

$$\frac{di_{xs,k}^{rf}}{dt} = \frac{-R_s}{L_{ls}} i_{xs,k}^{rf} + \frac{1}{L_{ls}} u_{xs,k}^{rf} \quad (5)$$

$$\frac{di_{ys,k}^{rf}}{dt} = \frac{-R_s}{L_{ls}} i_{ys,k}^{rf} + \frac{1}{L_{ls}} u_{ys,k}^{rf} \quad (6)$$

$$\frac{d\omega_{me,k}}{dt} = \gamma_3 \psi_{dr,k}^{rf} i_{qs,k}^{rf} - \frac{p}{J} T_{l,k} \quad (7)$$

trong đó các chỉ số s và r lần lượt là các biến của stator và rotor. $\gamma_1 = \frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{L_t L_r^2}$, $\gamma_2 = \frac{L_m R_r}{L_t L_r}$, $\gamma_3 = \frac{p^2 L_m}{J L_r}$, và $\omega_{sl} = \omega_{\bar{\psi}_r} - \omega_{me}$.

trong đó $\omega_{\bar{\psi}_r}$ là tần số góc của từ thông rotor, ω_{me} là tần số góc cơ học và ω_{sl} là tần số góc trượt. Các tham số R_s và R_r lần lượt là điện trở của stator và rotor. Các biến L_s , L_r ,

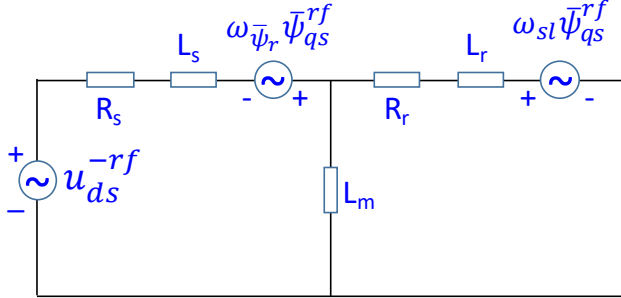
Received: February, 18, 2021

Accepted: March, 11, 2021

*vuquynh@lhu.edu.vn

L_m , L_{ls} lần lượt là điện cảm stator, rotor, độ từ hóa và điện cảm thoát tương ứng. Điện cảm $L_t = \sigma L_s$ là độ tự cảm tức thời của stator, hằng số $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ là tổng hệ số tổn thất. Các tham số p và J lần lượt là các cặp cực và moment quán tính. Cuối cùng, $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ là hằng số thời gian của rotor.

Sơ đồ mạch tương đương của động cơ cảm ứng 5 pha có thể trình bày như trong hình 1.



Hình 1. Mô hình mạch tương đương của động cơ cảm ứng 5 pha được xác định trong hệ quy chiếu đồng bộ.

2.3 Mô hình toán học của bộ quan sát Back-stepping

Thuật toán back-stepping là một giải thuật đệ quy, hoạt động dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Thuật toán này được sử dụng rộng rãi để thiết kế luật điều khiển cho các hệ thống bất ổn định. Phần lớn các phương pháp đã được sử dụng để quan sát trạng thái của động cơ dựa trên nguyên tắc back-stepping và được giới thiệu trong tài liệu chủ yếu được sử dụng để ước lượng thông số điện trở và cảm ứng của động cơ khi có sự hiện diện của cảm biến tốc độ. Tuy nhiên, khó khăn sẽ xuất hiện khi loại bỏ cảm biến tốc độ, lúc này ta không thể biết được tốc độ động cơ, đặc biệt là ở tốc độ rất thấp. Trong bài báo số [7] đề xuất giải pháp cải tiến tính đến việc giải quyết hệ thống phi tuyến động bằng cách đưa các thuật ngữ giảm chấn khác vào mỗi đầu vào điều khiển. Đóng góp thứ hai mà bài báo này trình bày là áp dụng bộ quan sát back-stepping cho các hệ thống có mức độ khớp nối cao giữa các biến điện từ và cơ học. Ở dạng này, các giá trị phi tuyến cung cấp cho mỗi hệ thống con được phép phụ thuộc vào kết quả đầu ra liên kết với hệ thống con và các trạng thái của hệ thống con phía trên, bao gồm cả các trạng thái không được đo lường. Bộ quan sát này áp dụng cho động cơ cảm ứng năm pha. Bộ quan sát chỉ lấy điện áp và dòng điện stator làm đầu vào để ước lượng ra tốc độ, từ thông rotor và dòng điện stator ở đầu ra. Bộ quan sát Back-stepping có nhiệm vụ giảm sự chênh lệch giữa dòng điện ước lượng và dòng đo được của stator. Chứng minh chi tiết đã được mô tả trong bài báo [8-9], nhóm tác giả chỉ tổng hợp lại để áp dụng cho động cơ cảm ứng 5 pha. Giả thiết các thành phần của dòng điện stator là đầu ra của hệ thống và được mô tả bằng phương trình sau:

$$\begin{cases} y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \end{cases} \quad (8)$$

Mô hình của bộ quan sát back-stepping mô tả như sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = -\hat{A}\hat{x}_1 + K\hat{A}_r\hat{x}_3 + K\hat{\omega}_{me}\hat{x}_4 + B\cdot u_{as} + V_\alpha \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\hat{A}\hat{x}_2 + K\hat{A}_r\hat{x}_4 - K\hat{\omega}_{me}\hat{x}_3 + B\cdot u_{bs} + V_\beta \\ \dot{\hat{x}}_3 = L_m\hat{A}_r\hat{x}_1 - \hat{A}_r\hat{x}_3 - \hat{\omega}_{me}\hat{x}_4 \\ \dot{\hat{x}}_4 = L_m\hat{A}_r\hat{x}_2 - \hat{A}_r\hat{x}_4 + \hat{\omega}_{me}\hat{x}_3 \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [i_{as} \ i_{bs} \ \psi_{ar} \ \psi_{br}]^T$$

$$\hat{A}_r = A_r + \Delta A_r = \frac{R_r}{L_r} + \frac{\Delta R_r}{L_r}$$

$$\hat{R}_\theta = R_s + L_m \cdot \mu \Delta \hat{A}_r$$

$$\hat{A} = \frac{\hat{R}_\theta}{\sigma L_s} = \frac{R_\theta}{\sigma L_s} + \frac{L_m \cdot \mu \cdot \Delta a_r}{\sigma L_s} = A + \Delta A$$

$$K = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$$

$$\mu = \frac{L_m}{L_r}$$

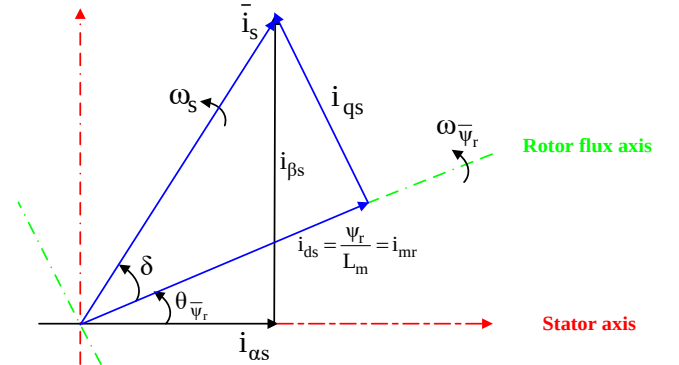
Trong đó $\hat{x}_i$ là giá trị ước lượng của x_i đối với $i \in \{1, 2, 3, 4\}$.

V_α và V_β đại diện cho các thành phần vector được xây dựng bằng thuật toán back-stepping

2.2 Thuật toán điều khiển động cơ cảm ứng 5 pha

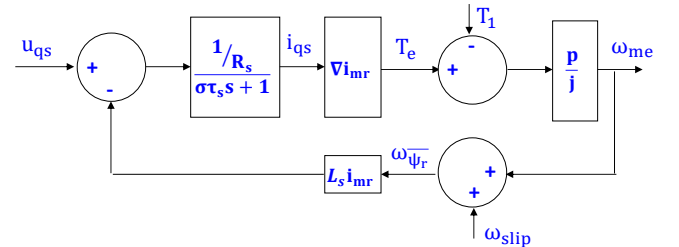
Nguyên tắc của phương pháp là điều khiển trực tiếp từ thông và moment của động cơ dựa trên việc điều khiển trực tiếp điện áp phản ứng của động cơ trên trục $d-q$ ($u_{ds,k}^{rf}$, $u_{qs,k}^{rf}$).

Trong không gian vector, phương pháp điều khiển định hướng từ thông rotor được thể hiện như trong Hình 2. Tổng từ thông của rotor cố định trên trục d của khung quay và quay với tần số góc $\omega_{\bar{\psi}_{r,k}}$. Góc δ_k dùng để chỉ góc tải (góc moment) giữa các vector từ thông rotor và dòng điện stator. Vector dòng điện stator quay với tần số góc là $\frac{d}{dt}(\delta_k + \theta_{\bar{\psi}_{r,k}})$.

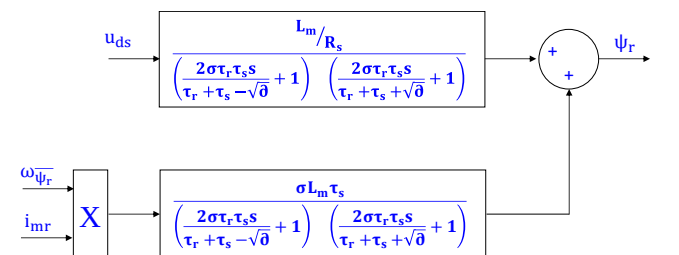


Hình 2. Biểu đồ vector trạng thái hoạt động ổn định của động cơ cảm ứng trong điều khiển định hướng từ thông rotor

Từ thông và moment của động cơ cảm ứng 5 pha có thể điều chỉnh bằng cách sử dụng các điện áp stator trên trục $d-q$. Mô hình toán học của động cơ cảm ứng 5 pha có thể thu được trong Hình 3 và 4.



Hình 3. Điều khiển moment xoắn trên trục động cơ (i_{qs})



Hình 4. Điều khiển từ thông (ψ_r)

Hàm mục tiêu của mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp được mô tả bởi phương trình sau:

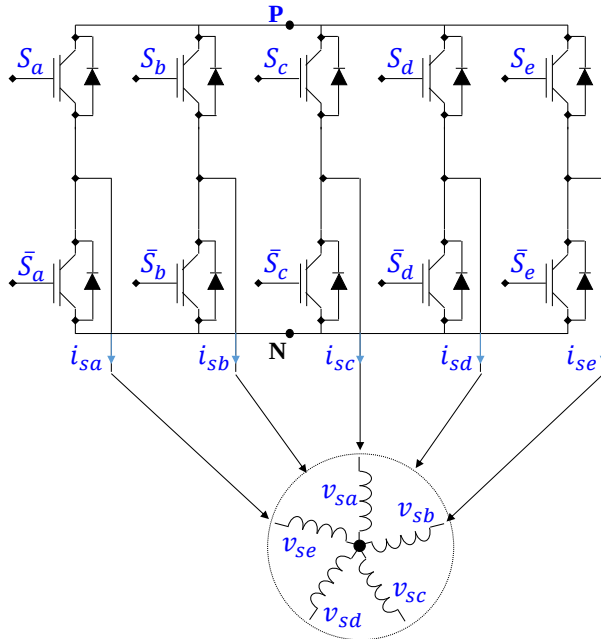
$$C_k^j = |u_{ds,k}^* - u_{ds,k}^{rf}|^j + |u_{qs,k}^* - u_{qs,k}^{rf}|^j + |0 - u_{xs,k}^{rf}|^j + |0 - u_{ys,k}^{rf}|^j \quad (10)$$

trong đó j là chỉ số điện áp.

Các giá trị tham chiếu của $u_{xs,k}^*$ và $u_{ys,k}^*$ được đặt thành 0 để giảm thiểu tổn thất công suất. Các phần còn lại của hàm mục tiêu (10) là các giá trị tham chiếu của các điện áp stator $u_{ds,k}^*$, $u_{qs,k}^*$ được suy ra thông qua việc áp dụng nguyên tắc điều khiển deadbeat trong bộ điều khiển dự báo điện áp.

Điều khiển deadbeat có khả năng thực hiện xử lý đơn giản và trực tiếp moment xoắn, từ thông và dòng điện. Nó cho phép tính toán các giá trị tham chiếu và đảm bảo rằng các tín hiệu thực tế sẽ bám theo các tín hiệu tham chiếu trong mỗi chu kỳ điều khiển. Điều khiển deadbeat được sử dụng để tạo ra các giá trị tham chiếu của vector điện áp stator trên trục $d-q$. Hàm mục tiêu sử dụng các giá trị tham chiếu này bên cạnh các vector điện áp stator trên trục $d-q$ thực tế ($u_{ds,k}^*$, $u_{qs,k}^*$).

Từ hàm mục tiêu (10), có thể nhận thấy có các thành phần cùng loại do đó không cần sử dụng đến trọng số, giúp tiết kiệm thời gian tính toán. Hơn nữa, điện áp stator trên các trục $u_{ds,k}^{rf}$, $u_{qs,k}^{rf}$, $u_{xs,k}^{rf}$, $u_{ys,k}^{rf}$ có thể tính trực tiếp thông qua ba cách khác nhau. Cách đầu tiên là đo trực tiếp thông qua bộ lọc, nhưng nhược điểm của cách này là gây ra độ trễ trong hệ thống. Cách thứ hai là thông qua tính toán điện áp với sự trợ giúp của bộ điều chế độ rộng xung bằng cách sử dụng các trạng thái chuyển mạch, nhưng phương pháp này dẫn đến tần số chuyển mạch cao và làm tăng tổn thất chuyển mạch. Cách thứ ba là áp dụng nguyên tắc bộ điều khiển hữu hạn và tính toán điện áp từ các trạng thái chuyển mạch (S_a , S_b , S_c , S_d , S_e) của biến tần. Phương pháp thứ 3 được lựa chọn trong nghiên cứu này do tính đơn giản và cho phép giảm tính toán khi sử dụng các vi điều khiển. Hình 5 trình bày sơ đồ mạch của bộ biến đổi công suất cấp cho động cơ, mạch gồm 10 IGBT và 1 động cơ 5 pha. Các khóa IGBT hoạt động như một công tắc với hai trạng thái đóng và ngắt, điều khiển được hoàn toàn nhằm đưa ra điện áp cung cấp cho động cơ.



Hình 5. Sơ đồ mạch bộ biến đổi công suất cấp cho động cơ

Việc tính toán điện áp sử dụng các trạng thái chuyển mạch được thể hiện bằng các công thức sau

$$u_{as,k} = \frac{U_{dc}(4S_a - S_b - S_c - S_d - S_e)}{5} \quad (11)$$

$$u_{bs,k} = \frac{U_{dc}(4S_b - S_a - S_c - S_d - S_e)}{5} \quad (12)$$

$$u_{cs,k} = \frac{U_{dc}(4S_c - S_a - S_b - S_d - S_e)}{5} \quad (13)$$

$$u_{ds,k} = \frac{U_{dc}(4S_d - S_a - S_b - S_c - S_e)}{5} \quad (14)$$

$$u_{es,k} = \frac{U_{dc}(4S_e - S_a - S_b - S_c - S_d)}{5} \quad (15)$$

trong đó chỉ số s thể hiện các đại lượng được xác định trong khung tính. Điện áp stator trên các trục $d-q-x-y$ được xác định trong hệ quy chiếu đồng bộ rf có thể được tính bằng

$$u_{ds,k}^{rf} = u_{as,k}^s \cos(\theta_{\bar{\psi}_{r,k}}) + u_{bs,k}^s \sin(\theta_{\bar{\psi}_{r,k}}) \quad (16)$$

$$u_{qs,k}^{rf} = -u_{as,k}^s \sin(\theta_{\bar{\psi}_{r,k}}) + u_{bs,k}^s \cos(\theta_{\bar{\psi}_{r,k}}) \quad (17)$$

$$u_{xs,k}^{rf} = u_{xs,k}^s \cos(\theta_{\bar{\psi}_{r,k}}) + u_{ys,k}^s \sin(\theta_{\bar{\psi}_{r,k}}) \quad (18)$$

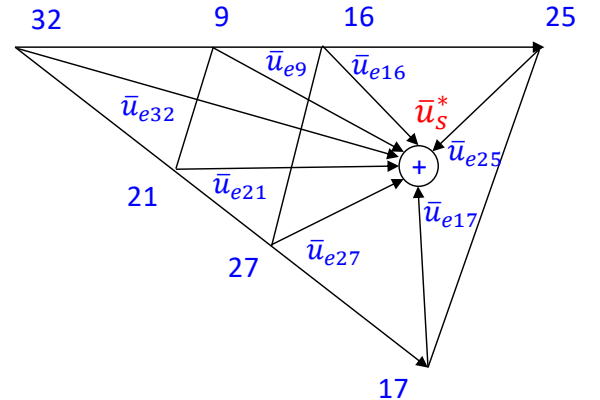
$$u_{ys,k}^{rf} = -u_{xs,k}^s \sin(\theta_{\bar{\psi}_{r,k}}) + u_{ys,k}^s \cos(\theta_{\bar{\psi}_{r,k}}) \quad (19)$$

Các giá trị tham chiếu của $u_{xs,k}^*$ và $u_{ys,k}^*$ được đặt bằng 0 để giảm thiểu tổn thất công suất. Các phần còn lại của hàm mục tiêu (10) là các giá trị tham chiếu của các điện áp stator $u_{ds,k}^*$, $u_{qs,k}^*$ được suy ra thông qua việc áp dụng nguyên tắc điều khiển deadbeat trong bộ điều khiển dự báo điện áp.

Hàm mục tiêu (10) sử dụng các thành phần tham chiếu của điện áp stator trên trục $d-q$ để xác định vector điện áp tối ưu cung cấp vào stator của động cơ cảm ứng 5 pha. Các tín hiệu điện áp phản hồi ($u_{ds,k}$, $u_{qs,k}$, $u_{xs,k}$, $u_{ys,k}$) trong hàm mục tiêu (10) được tính toán bằng cách sử dụng các trạng thái chuyển mạch của biến tần.

Các giá trị ước lượng được của dòng điện stator, tốc độ rotor thông qua bộ quan sát Back-stepping và giá trị đo của điện áp stator được sử dụng để tính toán dòng điện stator và từ thông rotor tại thời điểm $(k+1)T_s$. Sau đó, các giá trị dự báo của $\bar{i}_{qs,k+1}$ và $\bar{\psi}_{dr,k+1}$ cùng với các giá trị tham chiếu $i_{qs,k}^*$ và $|\psi_r|^*$ được sử dụng để tính toán các thành phần tham chiếu của điện áp stator trên trục $d-q$ ($u_{ds,k}^*$ và $u_{qs,k}^*$).

Cơ chế lựa chọn vector điện áp tối ưu bằng cách sử dụng hàm mục tiêu ở phương trình (10), hoạt động dựa trên việc giảm tối đa độ chênh lệch giữa vector điện áp thực tế và vector điện áp tham chiếu. Dịch chuyển của vector điện áp và trạng thái chuyển mạch của chúng đã được trình bày chi tiết trong bài báo [9]. Hệ thống có xây dựng có tổng cộng 32 vector tạo thành 10 khu vực. Hình 6 minh họa vector điện áp $\bar{u}_s^*$ nằm trong khu vực 10, sẽ có bảy vector điện áp có thể đạt được mục tiêu điều khiển (vector 9, vector 16, vector 17, vector 21, vector 25, vector 27 và vector 32). Các vector này tạo ra độ chênh lệch tương ứng là $\bar{u}_{e9}$, $\bar{u}_{e16}$, $\bar{u}_{e17}$, $\bar{u}_{e21}$, $\bar{u}_{e25}$, $\bar{u}_{e27}$ và $\bar{u}_{e32}$. Giá trị tối ưu là vector đạt được độ chênh lệch tối thiểu (khoảng cách giữa vector thực và vector $\bar{u}_s^*$). Quá trình này được thực hiện mà không sử dụng bất kỳ đại lượng ước lượng nào (so với cách tiếp cận mô hình dự báo điều khiển trực tiếp moment), giúp tiết kiệm thời gian tính toán và giảm tổn thất chuyển mạch của biến tần.

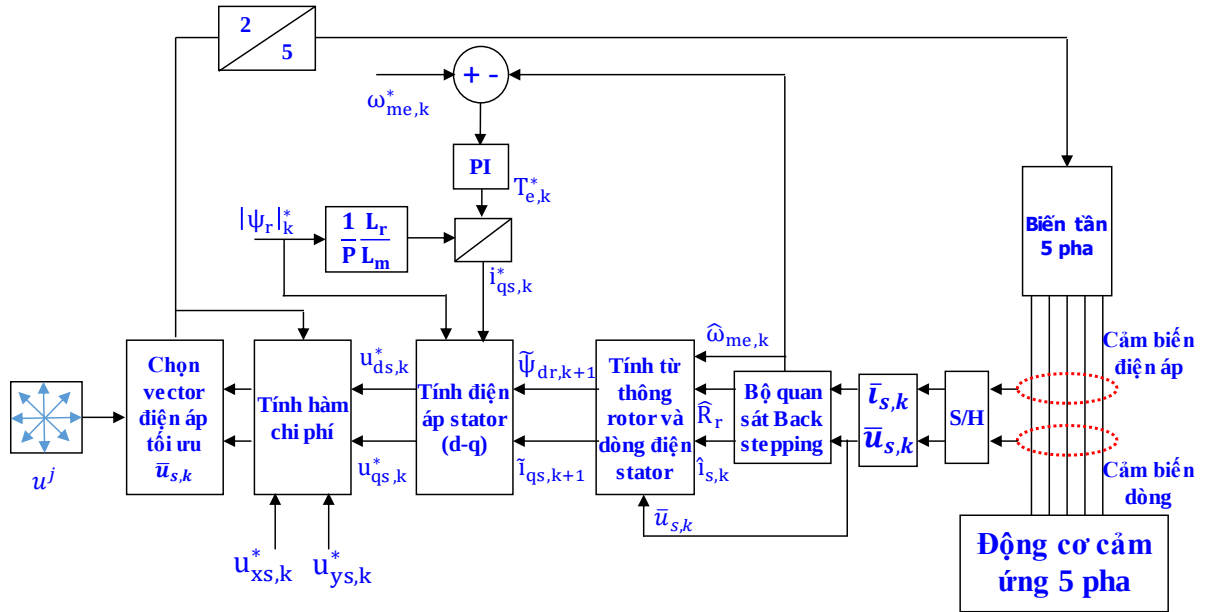


Hình 6. Cơ chế lựa chọn vector điện áp tối ưu trong khu vực 10

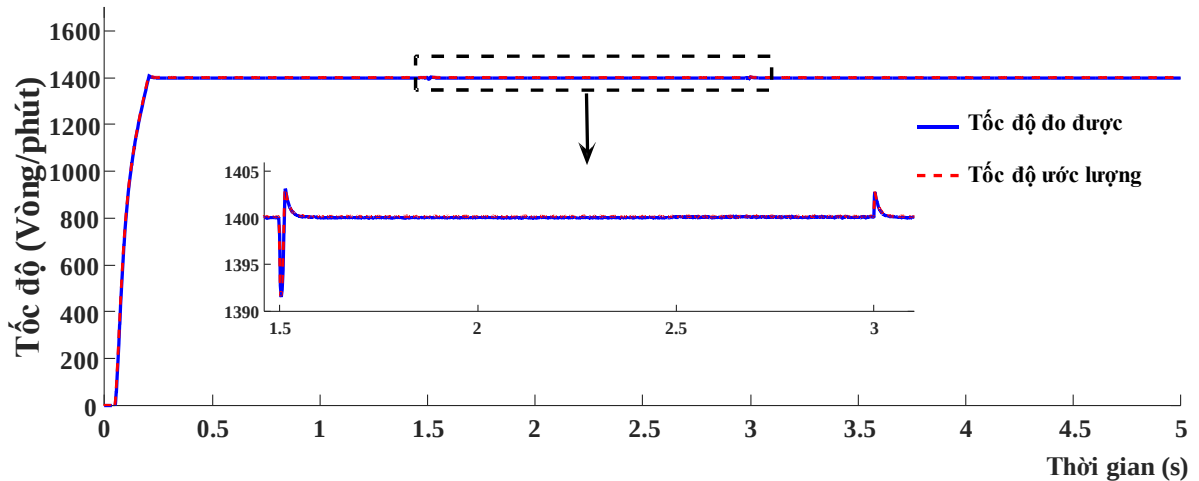
Trong hình 7, trình bày sơ đồ khối của mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp được đề xuất trong bài báo này. Mô hình dự báo điều khiển điện áp trực tiếp bắt đầu hoạt động với việc đo điện áp và dòng điện stator. Sau đó, các tín hiệu này được sử dụng để cung cấp cho bộ quan sát back-stepping dùng để ước lượng dòng điện stator, từ thông rotor và tốc độ. Tốc độ ước lượng $\hat{\omega}_{me,k}$ phản hồi về bộ điều khiển

tốc độ để tính toán giá trị tham chiếu của moment $T_{e,k}^*$ (giá trị tham chiếu của dòng điện stator trên trục q, $i_{qs,k}^*$). Giá trị tham chiếu của từ thông rotor $|\psi_r|_k^*$ được đưa thẳng vào bộ điều khiển.

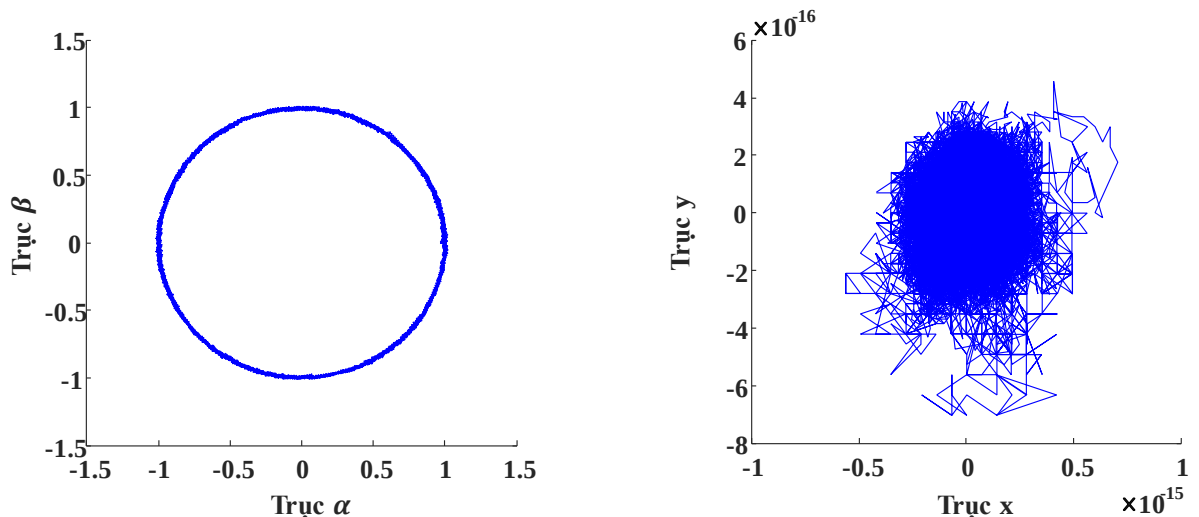
Qua sơ đồ cho ta thấy, mô hình có cấu hình đơn giản do đó tồn thất chuyển mạch chắc chắn thấp hơn so với các kỹ thuật khác.



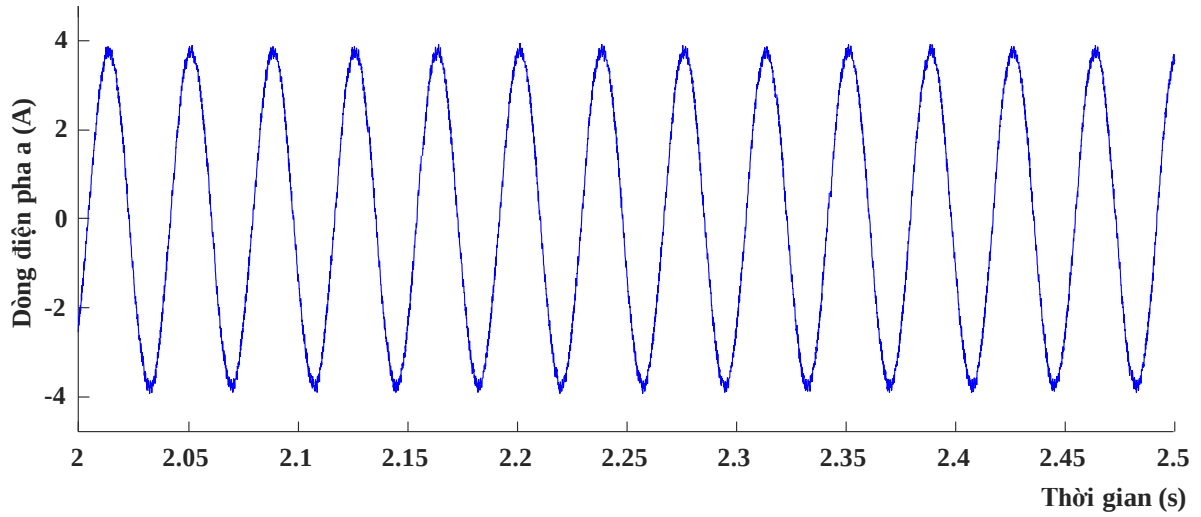
Hình 7. Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển bằng phương pháp mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp cho động cơ cảm ứng 5 pha



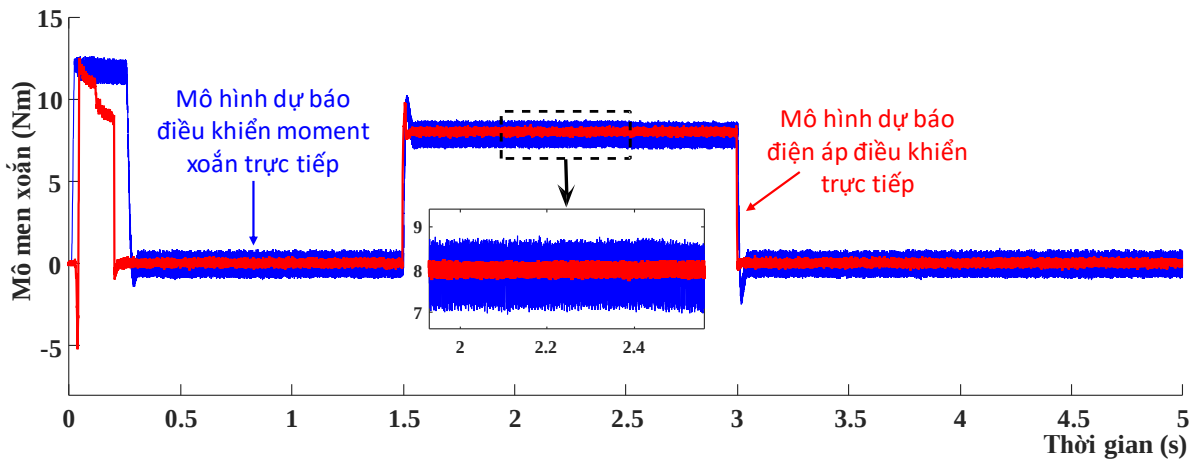
Hình 8. Tốc độ của rotor thông qua thuật toán mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp (vòng/phút)



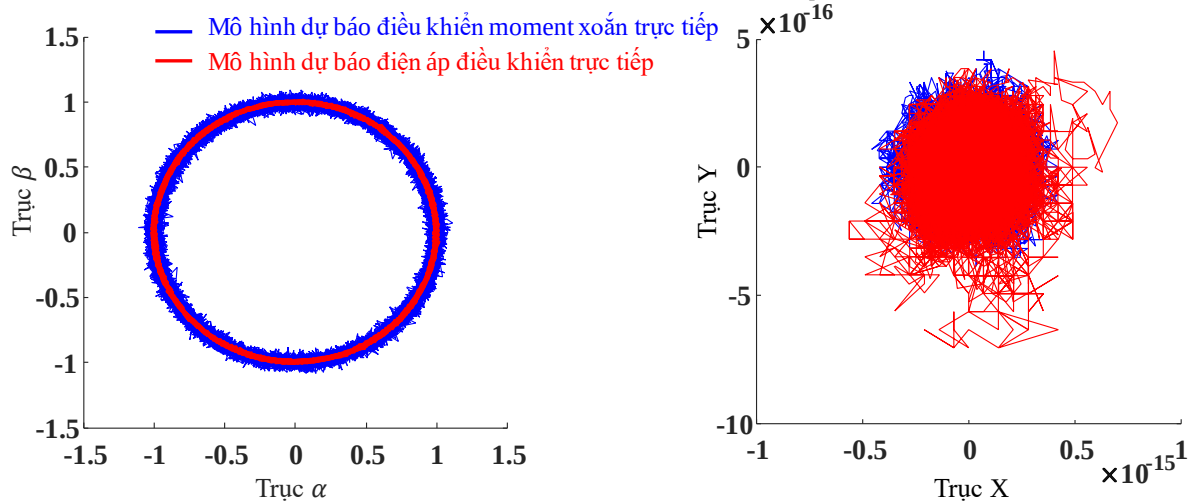
Hình 9. Quỹ tích từ thông Stator khi sử dụng thuật toán mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp



Hình 10. Dòng điện Stator của pha a khi sử dụng thuật toán mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp



Hình 11. Moment trên trục động cơ khi so sánh giữa hai thuật toán điều khiển (mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp và mô hình dự báo điều khiển moment xoắn trực tiếp)



Hình 12: Quỹ tích của từ thông stator khi so sánh giữa hai thuật toán điều khiển (mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp và mô hình dự báo điều khiển moment xoắn trực tiếp)

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để kiểm tra tính chính xác của thuật toán mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp không cảm biến cho động cơ cảm ứng 5 pha, các thử nghiệm được thực hiện trong dải tốc độ 1400 RPM. Các thông số của động cơ cảm ứng 5 pha trình bày trong bảng 1. Moment tải được thêm vào tại thời điểm $t = 1,5s$ và loại bỏ tại thời điểm $t = 3s$. Giá trị tham chiếu từ thông của rotor được đặt ở chế độ định mức.

Tốc độ ước lượng được tính toán thông qua bộ quan sát Back-stepping và tốc độ đo được thông qua mô hình toán học

của động cơ thể hiện trên Hình 8 (tốc độ đo được chỉ dùng để so sánh kiểm chứng mô hình giải thuật đề xuất). So sánh giữa giá trị đo được và giá trị ước lượng của tốc độ ta thấy, tốc độ ước lượng bám theo các giá trị thực của chúng với độ lệch rất nhỏ.

Hình 9 hiển thị quỹ tích của từ thông stator trong mặt phẳng $(\alpha-\beta)$ và $(x-y)$. Ưu điểm nổi bật của thuật toán đề xuất trong việc hạn chế các dao động của tín hiệu điều khiển hiển thị qua dòng điện pha a ở Hình 10.

Hình 11 và Hình 12 so sánh giữa moment xoắn và quỹ tích từ thông stator trong trường hợp sử dụng mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp và mô hình dự báo điều khiển moment xoắn trực tiếp, kết quả cho thấy giải pháp mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp dao động thấp hơn trong cả 2 trường hợp.

Kết quả thu được cho thấy tính năng vượt trội của thuật toán. Bộ quan sát back-stepping vẫn đạt được độ chính xác cao trong việc ước lượng tốc độ rotor, dòng điện stator và từ thông rotor.

Bảng 1. Thông số động cơ cảm ứng 5 pha

Thông số	Giá trị
Moment	8 Nm
R_s	10 Ω
R_r	6.3 Ω
L_s	460 mH
L_r	460 mH
p (Số cặp cực)	2
L_m	420 mH
Ψ_{rn} (Từ thông rotor)	0.86 Vs
U_{dc}	400 v
J_m	0.03 Kg.m ²
B_m	0.008 Nm.rad.s ⁻¹
T_s (Chu kỳ lấy mẫu)	100 μ s

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày phương pháp mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp cho động cơ cảm ứng năm pha không cảm biến. Một bộ quan sát back-stepping được sử dụng để ước lượng tốc độ rotor, dòng điện stator, từ thông rotor. Hiệu suất của động cơ cảm ứng 5 pha được kiểm tra thông qua việc thay đổi moment tải ở khoảng thời gian $t=1.5s$ và loại bỏ tại thời điểm $t=3s$. Các kết quả thu được xác nhận ưu điểm nổi bật của phương pháp mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp trong việc hạn chế dao động trong tín hiệu điều khiển giúp nâng cao hiệu suất hoạt động của biến tần. Dựa trên phân tích được trình bày trong bài báo này, chúng ta nhận thấy rằng phương pháp mô hình dự báo điện áp điều khiển trực tiếp có thể được sử dụng như một giải pháp thay thế tốt hơn cho phương pháp mô hình điều khiển moment xoắn trực tiếp.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Webster, J.G., Duran, M.J., Levi, E. and Barrero, F. "Multiphase Electric Drives: Introduction". In *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, J.G. Webster (Ed.). **2017**. Doi: 10.1002/047134608X.W8364

- [2] Rangari, S.C.; Suryawanshi, H.M.; Renge, M. "New Fault-Tolerant Control Strategy of Five-Phase Induction Motor with Four-Phase and Three-Phase Modes of Operation". *Electronics* **2018**, *7*, 159. Doi: 10.3390/electronics7090159
- [3] S. A. Gaikwad and S. M. Shinde, "Review on Five-phase Induction Motor fed by Five-phase Voltage Source Inverter with different Conduction Mode," *2020 International Conference on Industry 4.0 Technology (I4Tech)*, Pune, India, **2020**, pp. 199-202, Doi: 10.1109/I4Tech48345.2020.9102695.
- [4] A. Baltatanu and M. Florea, "Multiphase machines used in electric vehicles propulsion," *Proceedings of the International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence - ECAI-2013*, Pitesti, Romania, **2013**, pp. 1-6, Doi: 10.1109/ECAI.2013.6636204.
- [5] Wang, F.; Zhang, Z.; Mei, X.; Rodríguez, J.; Kennel, R. "Advanced Control Strategies of Induction Machine: Field Oriented Control, Direct Torque Control and Model Predictive Control". *Energies* **2018**, *11*, 120. Doi: 10.3390/en11010120
- [6] Y. Zhang, J. Zhu, Z. Zhao, W. Xu and D. G. Dorrell, "An Improved Direct Torque Control for Three-Level Inverter-Fed Induction Motor Sensorless Drive," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 3, pp. 1502-1513, **March 2012**, Doi: 10.1109/TPEL.2010.2043543.
- [7] D. P. Marcetic and S. N. Vukosavic, "Speed-Sensorless AC Drives With the Rotor Time Constant Parameter Update," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 5, pp. 2618-2625, Oct. **2007**, doi: 10.1109/TIE.2007.899880.
- [8] Ramzi Trabelsi, Adel Khedher, Mouhamed Faouzi Mimouni, Faouzi M'sahli, "Backstepping control for an induction motor using an adaptive sliding rotor-flux observer," *Electric Power Systems Research*, Volume 93, **2012**, Pages 1-15, Doi: 10.1016/j.epsr.2012.06.004.
- [9] Mahmoud A. Mossa, Nguyen Vu Quynh, Hamdi Echeikh, Ton Duc Do, "Deadbeat Based Model Predictive Voltage Control for a Sensorless Five Phase Induction Motor Drive" *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2020, Article ID 4164526, 30 pages, **2020**. Doi: 10.1155/2020/4164526.

6. CẢM ƠN

Cảm ơn Trường Đại học Lạc Hồng đã tài trợ kinh phí cho nghiên cứu này. Mã số đề tài LHU-RF-TE-19-04-03.