



DOI:10.22144/ctujos.2026.108

ỨNG DỤNG ĐIỀU KHIỂN VÔ HƯỚNG VÒNG KÍN NÂNG CAO CHO ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ BA PHA SỬ DỤNG CÁC TỐC ĐỘ ƯỚC TÍNH

Trần Đình Cường* và Phan Trần Đăng Khoa

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Tôn Đức Thắng, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): trandinhcuong@tdtu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 14/11/2025

Sửa bài (Revised): 01/12/2025

Duyệt đăng (Accepted): 20/05/2026

Title: Enhanced closed-loop scalar control of a three phase induction motor using estimated speeds

Author(s): Tran Dinh Cuong* and Phan Tran Dang Khoa

Affiliation(s): Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ton Duc Thang University, Viet Nam

TÓM TẮT

Trong bài báo này, một phương pháp điều khiển vô hướng vòng kín cho động cơ không đồng bộ ba pha sử dụng bộ ước lượng RF-MRAS đã được trình bày. Từ tốc độ rôto ước tính và dòng điện trong hệ tọa độ α - β , góc từ thông rôto được xác định để tính tốc độ đồng bộ. Sai lệch giữa tốc độ đồng bộ và tốc độ rôto ước tính được đưa qua một hàm truyền nhằm lọc nhiễu, từ đó tạo ra tốc độ bù trượt để động cơ có thể vận hành đúng với tốc độ tham chiếu mà không cần hiệu chỉnh qua khâu PI. Hàm truyền này đóng vai trò như một bộ lọc nhiễu, giúp loại bỏ các thành phần tần số cao trong sai số giữa tốc độ đồng bộ và tốc độ rôto ước tính. Cấu trúc điều khiển được xây dựng và mô phỏng trên phần mềm MATLAB/Simulink. Kết quả cho thấy phương pháp đề xuất có khả năng bám tốc độ tham chiếu, đảm bảo hệ thống vận hành ổn định cũng như thời gian đáp ứng so với phương pháp truyền thống.

Từ khóa: Bù trượt, động cơ không đồng bộ, điều khiển vô hướng, không cảm biến, quá độ, xác lập

ABSTRACT

This paper presents a scalar control method for a three-phase induction motor with closed-loop speed estimation using the RF-MRAS scheme. Based on the estimated rotor speed and stator currents in the α - β reference frame, the rotor flux angle is determined to calculate the synchronous speed. The deviation between the synchronous speed and the estimated rotor speed is processed through a transfer function to filter out noise, thereby generating a slip-compensation speed that allows the motor to operate accurately at the reference speed without requiring a PI controller. This transfer function acts as a noise filter, effectively eliminating high-frequency components in the deviation between the synchronous and estimated rotor speeds. The control structure is developed and simulated in the MATLAB/Simulink environment. Simulation results showed that the proposed method enables accurate speed tracking, improved system stability, and faster dynamic response compared with the typical V/f control approach.

Keywords: Induction motor, sensorless, scalar control, steady state, slip compensation, transient state

1. GIỚI THIỆU

Động cơ không đồng bộ ba pha hiện nay là loại máy điện được sử dụng rộng rãi nhất trong công nghiệp (chiếm khoảng 85% thị phần về động cơ điện) (Saravanan et al., 2012) nhờ độ tin cậy cao, chi phí thấp và khả năng làm việc trong nhiều điều kiện tải khác nhau (Habbi et al., 2016; Melnykov, 2021). Trong số các phương pháp điều khiển, điều khiển vô hướng (Scalar Control) dựa trên tỉ số điện áp và tần số (V/f) được xem là giải pháp đơn giản, dễ triển khai và thích hợp cho các ứng dụng không yêu cầu độ chính xác mômen quá cao (Costa et al., 2020; Sterjova & Sarac, 2022). Tuy nhiên, nhược điểm chính của phương pháp này là khả năng bám tốc độ còn hạn chế, đặc biệt trong giai đoạn quá độ hoặc khi tải thay đổi nhanh, do ảnh hưởng của độ trượt và sự sai lệch giữa tốc độ đồng bộ và tốc độ thực của rôto (Tiitinen et al., 2022; Vladimir & Dmitry, 2018).

Để cải thiện nhược điểm này, nhiều công trình khi được thực hiện đã tập trung vào việc ước lượng và bù trượt cho hệ thống điều khiển V/f. Trong các nghiên cứu gần đây, Dinh and Tran (2024) đã chỉ ra rằng việc bổ sung khâu bù tốc độ trượt giúp cấu trúc điều khiển vô hướng (V/f hằng số) kiểm soát tốc độ thực bám sát tốc độ tham chiếu. Tương tự, Zhang and Bazzi (2019) đã tập trung nghiên cứu hiện tượng suy giảm mô-men và giảm từ thông stato khi vận hành ở tốc độ thấp. Trong nghiên cứu này, cả ba cơ chế bù từ thông, bù điện áp rơi điện trở stato và bù tần số trượt đã được kết hợp với nhau. Điểm nổi bật của hai nghiên cứu trên là cấu trúc điều khiển vòng kín không sử dụng cảm biến tốc độ, giúp giảm thiểu chi phí đầu tư cảm biến cũng như giảm độ phức tạp về phần cứng khi lắp đặt cảm biến đo tốc độ trên trục động cơ. Về lĩnh vực tối ưu hóa năng lượng, Pugachev and Kosmodamianskiy (2019) tập trung vào giảm tổn hao công suất và tăng hiệu suất năng lượng của hệ truyền động, đặc biệt trong ứng dụng kéo và phụ trợ của phương tiện đường sắt. Một vòng điều khiển phụ được ứng dụng vào cấu trúc điều khiển vô hướng truyền thống để duy trì hệ số công suất ở giá trị tham chiếu. Kết quả cho thấy động cơ giảm được tổn hao công suất từ đó hiệu suất tăng lên khoảng 18% theo kết quả mô phỏng.

Mặt khác, phương pháp điều khiển vô hướng truyền thống thường tạo mô-men khởi động thấp và dòng khởi động cao. Do đó, Travieso-Torres et al. (2021) đã đề xuất một cơ chế điều khiển vô hướng thích nghi khởi động dựa trên điều khiển thụ động thích nghi cải tiến từ Travieso-Torres et al. (2007) giúp cải thiện đáng kể mô-men khởi động mà vẫn

giữ được cấu trúc điều khiển đơn giản. Bên cạnh đó, bộ điều khiển đã được áp dụng trong nghiên cứu. Kết quả cho thấy dòng điện stato khởi động giảm hơn 50% và có thể khởi động với tải định mức.

Liên quan đến các ứng dụng giải thuật thông minh và thuật toán trong điều khiển tốc độ động cơ, Ustun and Demirtas (2008) đã kết hợp thuật toán di truyền với giải thuật suy luận mờ để tối ưu hóa hệ số K_p , K_i của bộ điều khiển PI theo các điều kiện vận hành thay đổi. Trong một nghiên cứu khác, việc khảo sát 4 bộ điều khiển đã được thực hiện, bao gồm PI, suy luận mờ (Fuzzy Logic), mạng nơ-ron (Neural Network) và hệ thống suy luận mờ thích nghi kết hợp mạng nơ-ron và logic mờ (ANFIS) trong khâu hiệu chỉnh tốc độ động cơ (Menghal & Laxmi, 2014). Đồng thời, việc đánh giá chúng dưới các điều kiện không tải, tải cố định và tải thay đổi cũng được tiến hành. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển sử dụng trí tuệ nhân tạo điều chỉnh khả năng đáp ứng tốc độ và mô men so với bộ điều khiển PI truyền thống.

Các phương pháp điều khiển tiên tiến đòi hỏi độ chính xác cao, chẳng hạn như điều khiển định hướng từ thông (Field-Oriented Control - FOC) (Tran et al., 2020; Zellouma et al., 2023; Tran & Truong, 2024) và điều khiển mô-men trực tiếp (Direct Torque Control - DTC) (Albalawi et al., 2023; El Ouanjli et al., 2022) đã được nghiên cứu mở rộng trong những năm gần đây thông qua việc tích hợp nhiều kỹ thuật cải tiến nhằm nâng cao hiệu năng vận hành và giảm thiểu tổn hao năng lượng. Trong số đó, một hướng tiếp cận đáng chú ý là sử dụng hệ thống mô hình tham chiếu thích nghi (Model Reference Adaptive System - MRAS) để ước tính tốc độ động cơ dựa trên các tín hiệu dòng điện và điện áp phản hồi. Giá trị tốc độ ước lượng này sau đó được khai thác trong quá trình tính toán góc từ thông rôto, vốn giữ vai trò quan trọng trong kỹ thuật điều khiển FOC.

Bên cạnh đó, phần lớn các phương pháp bù trượt gần đây được thực hiện theo hướng dự đoán trước (feedforward), trong đó độ trượt được suy ra từ mô-men ước tính hoặc đặc tính tải, chẳng hạn như bù trượt dựa trên mô-men điện từ ước tính thông qua từ thông stato (Oh et al., 2025), hoặc sử dụng bộ điều khiển PI tốc độ để tạo ra tín hiệu độ trượt bù vào tần số đặt (Zhang & Bazzi, 2019). Một công trình khác có tích hợp MRAS trong cấu trúc điều khiển vô hướng (Diop et al., 2025), nhưng MRAS chủ yếu được dùng để ước lượng tốc độ và đưa vào vòng điều khiển PI, còn độ trượt vẫn được điều chỉnh gián tiếp thông qua bộ điều khiển này. Do vậy, khả năng bù trượt của các phương pháp trên vẫn chịu ảnh

hướng bởi việc chỉnh định thông số PI. Khác với những tiếp cận trên, nghiên cứu này được thực hiện đã khai thác MRAS theo một cách trực tiếp: tốc độ rôto ước tính được kết hợp với tốc độ đồng bộ tính từ mô hình dòng điện để xác định tốc độ trượt tại từng thời điểm vận hành. Sau đó, tín hiệu trượt được làm mượt bằng một hàm truyền bậc nhất nhằm loại bỏ nhiễu tần cao, giúp hệ thống bù trượt liên tục và ổn định trong cả giai đoạn quá độ lẫn xác lập mà không cần sử dụng bộ điều khiển PI tốc độ. Nhờ đó, cấu trúc điều khiển vẫn giữ được sự đơn giản của V/f nhưng mang lại độ bám tốc độ tốt so với các phương pháp bù trượt hiện có.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình toán học động cơ không đồng bộ ba pha

Phương trình động học của động cơ không đồng bộ ba pha được xây dựng trong khung tham chiếu (α, β) được trình bày trong nghiên cứu của Vu et al. (2022). Sau một số quy trình biến đổi, các phương trình động học của hai đại lượng dòng điện stato và dòng điện rôto đã được rút ra:

$$i_{s\alpha} = A \int \left(\frac{u_{s\alpha}}{L_m} - \frac{R_s i_{s\alpha}}{L_m} + \frac{L_m \omega_r i_{s\beta}}{L_r} + \frac{R_r i_{r\alpha}}{L_r} + \omega_r i_{r\beta} \right) dt \tag{0}$$

$$i_{s\beta} = A \int \left(\frac{u_{s\beta}}{L_m} - \frac{L_m \omega_r i_{s\alpha}}{L_r} - \frac{R_s i_{s\beta}}{L_m} - \omega_r i_{r\alpha} + \frac{R_r i_{r\beta}}{L_r} \right) dt \tag{2}$$

$$i_{r\alpha} = B \int \left(\frac{u_{s\alpha}}{L_s} - \frac{R_s i_{s\alpha}}{L_s} + \omega_r i_{s\beta} + \frac{R_r i_{r\alpha}}{L_m} + \frac{L_r \omega_r i_{r\beta}}{L_m} \right) dt \tag{3}$$

$$i_{r\beta} = B \int \left(\frac{u_{s\beta}}{L_s} - \omega_r i_{s\alpha} - \frac{R_s i_{s\beta}}{L_s} - \frac{L_r \omega_r i_{r\alpha}}{L_m} + \frac{R_r i_{r\beta}}{L_m} \right) dt \tag{4}$$

Trong đó: $A = \left(\frac{L_m L_r}{L_s L_r - L_m^2} \right)$, $B = \left(\frac{L_s L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \right)$

Mối quan hệ giữa mô-men điện từ và mô-men tải:

$$T_e = T_L + \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \tag{5}$$

2.2. Ước tính tốc độ sử dụng hệ thống mô hình tham chiếu thích nghi dựa trên từ thông rôto (RF-MRAS)

Mô hình RF-MRAS gồm hai thành phần chính: mô hình tham chiếu và mô hình thích nghi. Mô hình tham chiếu nhận tín hiệu dòng điện và điện áp từ các cảm biến để tính toán từ thông rôto. Phương trình của mô hình tham chiếu được trình bày như sau:

$$\bar{\Psi}_r^{RM} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (\bar{u}_s - R_s \bar{i}_s) dt - \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} \bar{i}_s \right] \tag{6}$$

Mô hình thích nghi được biểu diễn trong phương trình (7), đầu vào của mô hình là tín hiệu dòng điện và tốc độ ước tính. Mô hình này có khả năng tự điều chỉnh biến trạng thái tốc độ để thích nghi với tình trạng vận hành của hệ thống.

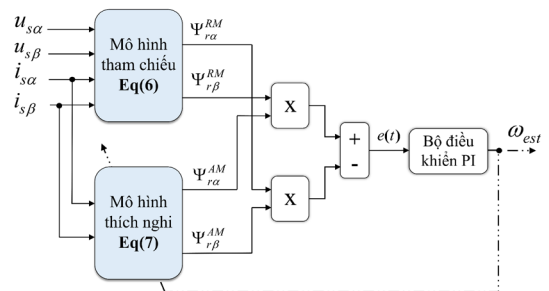
$$\bar{\Psi}_r^{AM} = \int \left[\left(j\omega_{r_est} - \frac{R_r}{L_r} \right) \bar{\Psi}_r^{AM} + \frac{R_r}{L_r} L_m \bar{i}_s \right] dt \tag{7}$$

Sai số từ thông rôto giữa hai mô hình được hiệu chỉnh thông qua bộ điều khiển PI (cơ cấu chấp hành) cung cấp tốc độ ước tính đầu ra thích nghi. Quy trình hiệu chỉnh được trình bày trong công thức (8) - (9).

$$\xi_{\omega} = \psi_{r\alpha}^{AM} \psi_{r\beta}^{RM} - \psi_{r\beta}^{AM} \psi_{r\alpha}^{RM} \tag{8}$$

$$\omega_{r_est} = K_p \times \xi_{\omega} + K_i \times \int \xi_{\omega} dt \tag{9}$$

Hình 1 mô tả đầy đủ khâu ước tính tốc độ động cơ sử dụng khung RF-MRAS:



Hình 1. Hệ thống mô hình tham chiếu thích nghi dựa trên từ thông rôto

Các hệ số K_p, K_i được lựa chọn dựa trên đặc tính động học của động cơ thông qua hằng số thời gian rôto $T_r = L_r/R_r$, cùng với việc mô hình hóa vòng thích nghi như một hệ bậc hai chuẩn có tỉ số giảm chấn $\zeta = 0,8$ và tần số riêng $\omega_f = 1/T_r$. Cách tiếp cận này cho phép đảm bảo sự hội tụ ổn định của tốc độ ước tính, hạn chế dao động trong vùng tốc độ thấp và

nâng cao khả năng chống nhiễu của bộ ước lượng. Các tham số động cơ được trình bày trong Bảng 1.

2.3. Xây dựng hệ thống điều khiển

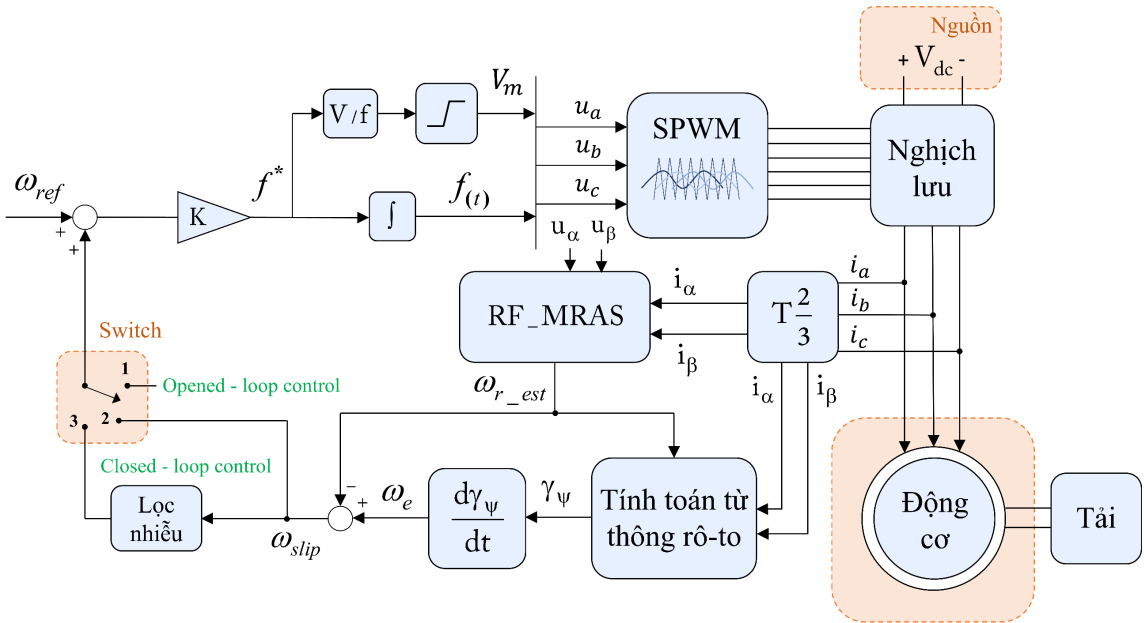
Cảm biến điện áp và dòng điện cung cấp tín hiệu vào khối RF-MRAS. Qua quá trình hiệu chỉnh, hệ thống xuất tín hiệu tốc độ rôto ước tính. Phương trình (10) - (11) trình bày tốc độ đồng bộ được tính toán thông qua đạo hàm góc từ thông rôto:

$$\gamma_\Psi = \arctg\left(\frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{r\alpha}}\right) \quad (10)$$

$$\omega_e = \frac{d\gamma_\Psi}{dt} \quad (11)$$

Sai lệch giữa tốc độ đồng bộ và tốc độ rôto ước tính được sử dụng để xác định tốc độ trượt (12). Tín hiệu trượt này sau đó được đưa qua hàm truyền lọc nhiễu nhằm làm mượt và loại bỏ các thành phần tần số cao, trước khi cộng với tốc độ tham chiếu để hình thành một vòng điều khiển kín cho hệ thống.

$$\omega_{slip} = \frac{1}{p} \cdot (\omega_e - \omega_{r_est}) \quad (12)$$



Hình 2. Sơ đồ điều khiển vô hướng cho động cơ không đồng bộ ba pha không sử dụng cảm biến tốc độ

2.4. Thiết kế bộ lọc nhiễu

Hàm truyền được định nghĩa là tỷ số giữa biến Laplace của tín hiệu đầu ra và biến Laplace của tín hiệu đầu vào, được biểu diễn dưới dạng tổng quát:

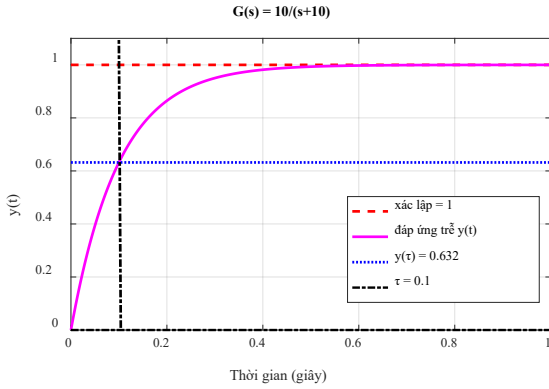
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (13)$$

Phương trình (12) có chứa 2 đại lượng đều được ước tính bằng mô hình mà không phải đo thực tế từ cảm biến. Do đó, các đại lượng này chứa nhiễu tần cao do vi phân, sai số lấy mẫu cũng như sai số trong mô hình dòng điện. Do đó, một hàm truyền bậc nhất đã được đề xuất thêm và được trình bày trong phương trình (14) để lọc nhiễu tốc độ bù trượt.

$$G(s) = \frac{10}{s + 10} \quad (14)$$

Một đáp ứng bậc thang với giá trị tham chiếu y(t) = 1 cho hàm truyền G(s) = 10/(s+10) để thấy được đáp ứng đầu ra của hàm truyền này:

Nhiều trong tín hiệu trượt chủ yếu nằm ở dải tần cao, sai số vi phân khi ước tính tốc độ đồng bộ và nhiễu đo lường. Trong khi đó, tốc độ trượt thực chỉ biến thiên chậm ở dải tần thấp. Vì vậy, bộ lọc thông thấp bậc nhất với tần số cắt khoảng 10 rad/s (tương ứng τ = 0,1s) được chọn để loại bỏ nhiễu nhanh mà vẫn giữ được động học của tín hiệu trượt. Với hằng số thời gian τ = 0,1s của bộ lọc, hàm truyền được lựa chọn đủ để làm mượt tín hiệu nhưng vẫn duy trì khả năng bám tốc độ trong giai đoạn quá độ.



Hình 3. Đáp ứng hàm truyền bậc nhất đề xuất

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Tiến hành mô phỏng hệ thống truyền động sử dụng phương pháp điều khiển vô hướng với các thông số động cơ như sau:

Các kịch bản điều khiển đã được mô tả chi tiết trong Bảng 2, mục đích là để so sánh và đánh giá tính khả thi của phương pháp đề xuất so với phương pháp truyền thống. Đối với phương pháp truyền thống, động cơ được vận hành theo cấu trúc vòng hở trong các giai đoạn quá độ, điều này nghĩa là không có tín hiệu hồi tiếp và không có tốc độ bù trượt được đưa vào. Khi tốc độ động cơ đã vào trạng thái ổn định (giai đoạn xác lập) mới tiến hành bù tốc độ trượt đã được ước tính từ mô hình RF-MRAS. Khóa chuyển mạch của phương pháp này chuyển đóng ở vị trí số 1 trong giai đoạn quá độ và chuyển mạch sang

vị trí số 2 trong giai đoạn xác lập như trình bày ở Hình 2. Đối với phương pháp đề xuất (khóa chuyển mạch vị trí số 3), cấu trúc điều khiển vòng kín toàn thời gian trong cả giai đoạn quá độ và xác lập. Tốc độ bù trượt ước tính được cập nhật liên tục theo thời gian thực trong suốt quá trình hoạt động của động cơ.

Bảng 1. Thông số động cơ

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Công suất định mức	2200	W
Điện áp định mức	400	V
Tần số định mức	50	Hz
Điện trở stato	3,179	Ω
Điện trở rôto	2,118	Ω
Điện cảm từ hóa	0,192	H
Điện cảm stato	0,209	H
Điện cảm rôto	0,209	H

Nghiên cứu được chia thành 3 trường hợp mô phỏng: Trường hợp mô phỏng 1, động cơ được vận hành với tốc độ không đổi, mô-men tải thay đổi. Trường hợp mô phỏng 2, tốc độ tham chiếu thay đổi theo hàm bước và mô-men tải được giữ như hằng số. Tốc độ tham chiếu và mô-men tải trong 2 trường hợp mô phỏng đầu tiên đều được cài đặt dưới dạng hàm bậc thang, mục đích để đánh giá tính hiệu quả của phương pháp đề xuất trong trường hợp biến động lớn và tức thời. Trường hợp mô phỏng 3, động cơ được vận hành với tốc độ biến thiên liên tục theo hàm dốc, mô-men tải thay đổi theo tỷ lệ bình phương của tốc độ.

Bảng 2. Mô tả cách thức điều khiển

Phương pháp điều khiển	Cách thức điều khiển		Vị trí khóa chuyển mạch	
	Giai đoạn quá độ	Giai đoạn xác lập	Giai đoạn quá độ	Giai đoạn xác lập
Truyền thống	Điều khiển vòng hở	Điều khiển vòng kín	1	2
Đề xuất	Điều khiển vòng kín	Điều khiển vòng kín	3	3

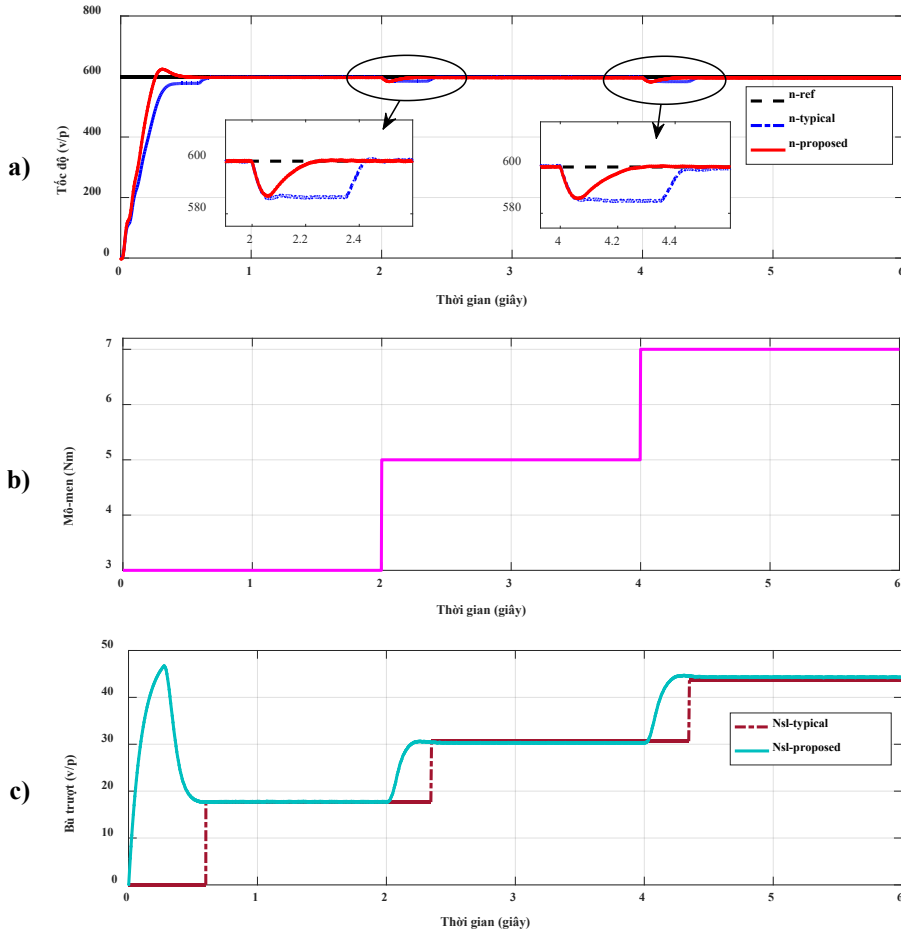
3.1. Kết quả mô phỏng của trường hợp 1

Kết quả mô phỏng vận hành của hệ truyền động động cơ với trường hợp tốc độ tham chiếu không đổi và mô-men tải thay đổi được trình bày trong Hình 4.

Ở trường hợp mô phỏng 1, tốc độ tham chiếu được giữ cố định với giá trị đặt là 600 vòng/phút, mục đích là để đánh giá sự ảnh hưởng và tác động của tải biến thiên. Tại thời điểm 2 giây, mô-men tải tăng đột ngột theo hàm bậc thang từ 3 Nm lên đến 5 Nm. Tiếp đó, mô-men tải tiếp tục tăng từ 5 Nm lên 7 Nm tại giây thứ 4.

Hình 4a so sánh đáp ứng tốc độ đầu ra giữa phương pháp truyền thống và phương pháp đề xuất. Với trường hợp mô phỏng với phương pháp điều

khiển truyền thống, động cơ khởi động và tăng tốc từ 0 lên đến 600 vòng/phút, khóa chuyển mạch ở vị trí số 1 và hệ thống điều khiển ở chế độ vòng hở không có tín hiệu hồi tiếp. Do đó, có thể thấy tốc độ động cơ khi đạt trạng thái ổn định bị trượt một khoảng tốc độ so với tốc độ tham chiếu. Việc đóng khóa chuyển mạch sang vị trí số 2 đã được tiến hành, một lượng tốc độ bù trượt được cung cấp cho hệ thống. Từ đó, tốc độ động cơ tăng và bám theo tốc độ tham chiếu. Tại thời điểm giây thứ 2 và giây thứ 4, mô-men tải tăng đột ngột theo hàm bậc thang được biểu diễn trong Hình 4b. Tốc độ động cơ không còn khả năng bám theo tốc độ tham chiếu do độ trượt tăng. Sau khoảng thời gian trễ, hệ thống điều khiển tự động nhận biết độ lệch tốc độ và lập tức phát tín hiệu để tăng tốc độ bù trượt (Hình 4c).



Hình 4. Kết quả mô phỏng của trường hợp 1 sử dụng phương pháp điều khiển truyền thống và phương pháp đề xuất

Ghi chú: a) đáp ứng tốc độ, b) mô-men tải, c) tốc độ bù trượt.

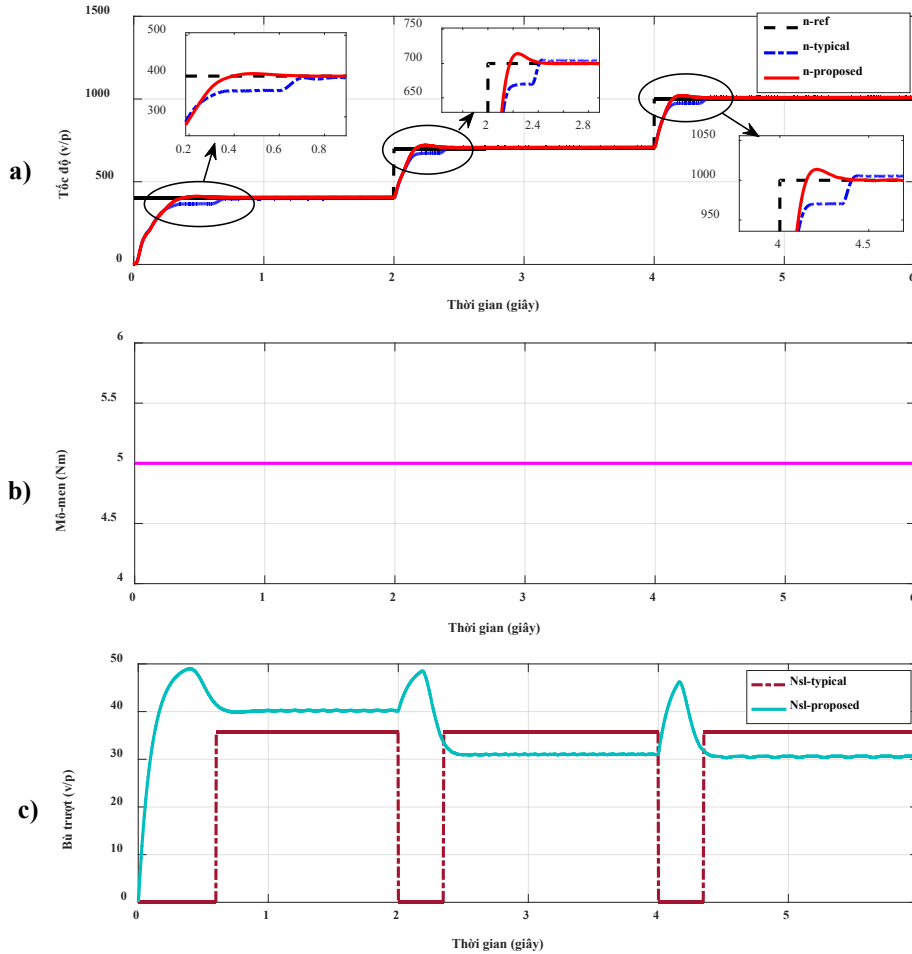
Việc so sánh với trường hợp mô phỏng sử dụng phương pháp điều khiển đề xuất cho thấy điểm mạnh của phương pháp này chính là có khả năng bù tốc độ trượt liên tục theo thời gian thực. Điều này giúp giảm các bước tính toán, lệnh cài đặt cũng như tối giản sơ đồ điều khiển so với phương pháp điều khiển truyền thống. Điểm khác biệt của phương pháp đề xuất so với phương pháp truyền thống được thể hiện rõ tại thời điểm động cơ tăng tốc và các thời điểm mô-men tải biến động. Hình 4a trình bày tốc độ động cơ tăng tốc nhanh hơn và đạt được tốc độ 600 vòng/phút nhanh hơn so với phương pháp truyền thống. Khi mô-men tải tăng tại thời điểm 2 giây và 4 giây, động cơ sụt tốc độ. Tuy nhiên, nhanh chóng phục hồi và bám sát tốc độ tham chiếu nhờ cơ

cấu bù trượt liên tục theo thời gian thực (Hình 4c) kết hợp hàm truyền lọc nhiễu tín hiệu.

3.2. Kết quả mô phỏng của trường hợp 2

Kết quả mô phỏng vận hành của hệ truyền động động cơ với trường hợp tốc độ tham chiếu thay đổi và mô-men tải không đổi được trình bày trong Hình 5.

Đối với trường hợp mô phỏng 2, mô-men tải được giữ cố định ở giá trị hằng số 5Nm (Hình 5b). Tuy nhiên, tốc độ tham chiếu được thiết lập gia tăng với hàm bậc thang theo tuần tự 400, 700 và 1.000 vòng/phút tại thời điểm 0,2 và 4 giây.



Hình 5. Kết quả mô phỏng của trường hợp 2 sử dụng phương pháp điều khiển truyền thống và phương pháp đề xuất

Ghi chú: a) đáp ứng tốc độ, b) mô-men tải, c) tốc độ bù trượt.

Hình 5a so sánh đáp ứng tốc độ đầu ra giữa phương pháp truyền thống và phương pháp đề xuất. Với phương pháp điều khiển truyền thống vòng hở kết hợp vòng kín chuyển mạch tuần tự theo giai đoạn quá độ và xác lập. Ở giai đoạn động cơ khởi động và tăng tốc từ 0 lên đến 400 vòng/phút, khóa chuyển mạch ở vị trí số 1, đồng nghĩa động cơ khởi động ở chế độ vòng hở không bù trượt. Khi tốc độ động cơ gần bám sát tốc độ tham chiếu, việc đổi khóa chuyển mạch sang vị trí số 2 được tiến hành, tốc độ động cơ được bù một lượng tốc độ không đổi (Hình 5c). Tại thời điểm giây thứ 2 và giây thứ 4, tốc độ tham chiếu tăng đột ngột. Tương tự, hệ thống điều khiển tự động chuyển sang chế độ vòng hở trong giai đoạn tăng tốc và sau đó chuyển về lại chế độ vòng kín sau 0,3 giây quá độ. Qua đó, thấy rằng với phương pháp truyền thống, tốc độ đáp ứng không được ổn định do ảnh

hưởng của giai đoạn chuyển mạch và thiếu bù trong thời điểm quá độ.

Với trường hợp sử dụng phương pháp điều khiển đề xuất, động cơ khởi động và tăng tốc đạt đến tốc độ tham chiếu tăng từ 400 lên đến 700 vòng/phút theo hàm bước. Tương tự, tốc độ tham chiếu tiếp tục tăng từ 700 đến 1.000 vòng/phút để đánh giá đặc tính đáp ứng của hệ thống với dải tốc độ rộng. Tốc độ thực tế có dao động nhỏ rồi nhanh chóng ổn định, chứng minh cấu trúc điều khiển đề xuất hoạt động đúng chức năng chống sai lệch, bù trượt và giảm dao động khi ổn định.

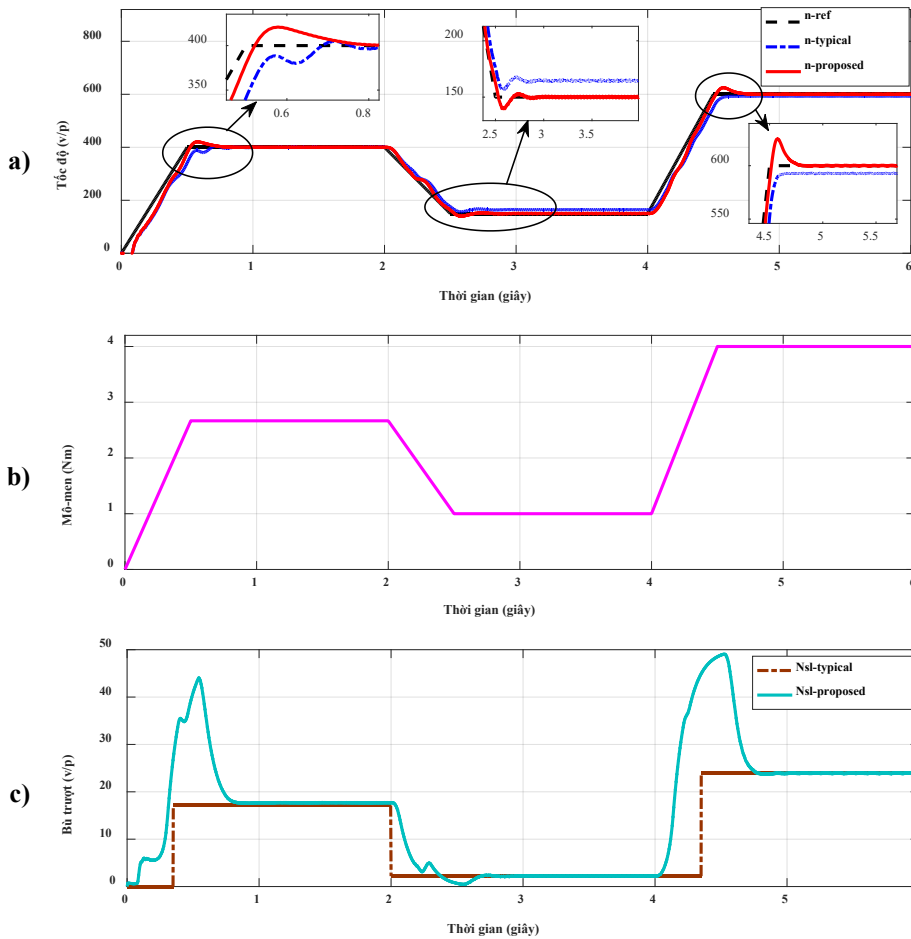
3.3. Kết quả mô phỏng của trường hợp 3

Kết quả mô phỏng vận hành của hệ truyền động động cơ với trường hợp mô-men tải thay đổi theo

biên phương của tốc độ được trình bày trong Hình 6.

Trường hợp 3 mô phỏng động cơ chạy với mô-men có đường đặc tính của tải quạt gió tỷ lệ với biên phương tốc độ. Đây là một đường đặc tính tải trong thực tế. Do đó, mục tiêu của trường hợp 3 là mô phỏng hệ truyền động động cơ với đường đặc tính tải này để khảo sát đặc tính vận hành của phương pháp đề xuất. Ở giai đoạn đầu, động cơ được tăng tốc tuyến tính từ 0 đến 400 vòng/phút như thể hiện trong Hình 6a. Kết quả cho thấy phương pháp đề

xuất tiếp tục duy trì khả năng bám tốc độ tốt trong suốt quá trình tăng tốc. Tại thời điểm 2 giây, tốc độ tham chiếu được giảm xuống còn 150 vòng/phút (xấp xỉ 10% tốc độ định mức). Ở điều kiện tốc độ thấp này, phương pháp điều khiển V/f truyền thống bộc lộ rõ hạn chế: tốc độ động cơ dao động mạnh và không thể bám theo giá trị đặt. Ngược lại, phương pháp đề xuất duy trì được độ ổn định và giữ tốc độ vận hành quanh giá trị tham chiếu, chứng minh hiệu quả của cơ chế bù trượt liên tục trong cả giai đoạn quá độ và xác lập.



Hình 6. Kết quả mô phỏng của trường hợp 3 sử dụng phương pháp điều khiển truyền thống và phương pháp đề xuất

Ghi chú: a) đáp ứng tốc độ, b) mô-men tải, c) tốc độ bù trượt.

3.4. So sánh định lượng giữa hai phương pháp điều khiển

Để làm rõ sự khác biệt về hiệu quả điều khiển giữa phương pháp truyền thống và phương pháp đề xuất, Bảng 3 được xây dựng nhằm cung cấp các kết quả so sánh định lượng.

Thông qua ba kịch bản mô phỏng, các kết quả đánh giá định lượng cho thấy phương pháp điều khiển đề xuất đạt giá trị ITAE và sai số xác lập thấp hơn so với phương pháp điều khiển truyền thống, qua đó khẳng định độ ổn định tốt hơn của hệ thống. Đồng thời, thời gian xác lập của phương pháp đề xuất tính từ giai đoạn quá độ đến khi hệ thống ổn

định cũng ngắn hơn, phản ánh khả năng đáp ứng nhanh. Mặc dù độ vọt lố của phương pháp đề xuất cao hơn, đặc điểm này là hợp lý về mặt động lực học và phù hợp với đặc tính tăng tốc của động cơ trong

điều kiện thực tế. Ngược lại, phương pháp điều khiển truyền thống có độ vọt lố thấp hơn do không xét đến cơ chế bù trượt trong giai đoạn quá độ.

Bảng 3. Kết quả so sánh định lượng giữa hai phương pháp điều khiển

Trường hợp mô phỏng	Phương pháp điều khiển	Độ vọt lố	Sai số xác lập	Thời gian xác lập	Chỉ số ITAE
TH1: tốc độ không đổi (600 rpm), tải bước	Truyền thống	0,1845	0,5479	0,6055	55,64
	Đề xuất	4,500	0,156	0,2497	20,08
TH2: tốc độ bước (400-700-1000 rpm), tải không đổi	Truyền thống	0,7582	5,238	0,6504	254,5
	Đề xuất	2,074	0,0273	0,3148	137,7
TH3: tốc độ dốc, tải tỷ lệ bình phương tốc độ	Truyền thống	4,81	7,467	0,5428	252,9
	Đề xuất	10,46	0,0337	0,5004	108,4

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu đã trình bày một phương pháp điều khiển vô hướng vòng kín tốc độ cho động cơ không đồng bộ ba pha. Trong đó, tốc độ trượt được xử lý qua một hàm truyền nhằm lọc nhiễu và ổn định quá trình bù trượt. Nhờ có bộ ước lượng tốc độ RF-MRAS, hệ thống có khả năng xác định tốc độ đồng bộ và thực hiện bù trượt liên tục mà không cần sử dụng bộ điều khiển PI. Các kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất nâng cao đáng kể khả năng bám tốc độ tham chiếu, cải thiện độ linh hoạt và duy trì đáp ứng tốt trong cả giai đoạn quá độ lẫn xác lập so với phương pháp V/f truyền thống. Cấu trúc điều khiển đề xuất vẫn giữ được sự đơn giản của phương pháp điều khiển vô hướng, đồng thời cho thấy hiệu quả điều khiển tốt và mức độ phù hợp với

các ứng dụng công nghiệp. Tuy nhiên, việc đánh giá ảnh hưởng của sự biến thiên tham số động cơ theo nhiệt độ đến chất lượng ước tính tốc độ chưa được thực hiện trong nghiên cứu hiện tại, đây là một vấn đề thực tiễn quan trọng cần được xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo. Bên cạnh đó, một hướng cải thiện tiềm năng cho nghiên cứu tương lai là tích hợp các bộ lọc nhiễu như bộ lọc Kalman hoặc các bộ lọc thích nghi cho các tín hiệu dòng điện và điện áp đo được nhằm nâng cao độ chính xác và độ tin cậy của bộ ước lượng tốc độ RF-MRAS, đặc biệt trong môi trường làm việc có mức nhiễu cao.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Tôn Đức Thắng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Albalawi, H., Zaid, S. A., El-Shimy, M. E., & Kassem, A. M. (2023). Ant colony optimized controller for fast direct torque control of induction motor. *Sustainability*, 15(4), 3740. <https://doi.org/10.3390/su15043740>

Costa, C. A., Nied, A., Nogueira, F. G., de Azambuja Turqueti, M., Rossa, A. J., Dezuo, T. J. M., & Barra, W. (2020). Robust linear parameter varying scalar control applied in high performance induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(11), 10558-10568. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3031519>

Dinh, B. H., & Tran, C. D. (2024). Improved scalar control based on slip compensation from virtual speeds in three-phase induction motor drives. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 15(3), 1410-1416. <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i3.pp1410-1416>

Diop, M., Kebe, A., & Gueye, I. (2025). Evaluation of sensorless VF-MRAS and FOC-MRAS of IM electrical drive system. *International Journal of Applied*, 14(3), 513-521. <http://doi.org/10.11591/ijape.v14.i3.pp513-521>

El Ouanjli, N., Mahfoud, S., Bhaskar, M. S., El Daoudi, S., Derouich, A., & El Mahfoud, M. (2022). A new intelligent adaptation mechanism of MRAS based on a genetic algorithm applied to speed sensorless direct torque control for induction motor. *International Journal of Dynamics and Control*, 10(6), 2095-2110. <https://doi.org/10.1007/s40435-022-00947-z>

Habbi, H. M. D., Ajeel, H. J., & Ali, I. I. (2016). Speed control of induction motor using PI and V/F scalar vector controllers. *International Journal of Computer Applications*, 151(7), 36-43. <https://doi.org/10.5120/ijca2016911831>

Melnikov, V. (2021, September). The correction of the operation modes for frequency-controlled induction motor with scalar control under stator windings damage appearance. In *2021 IEEE International*

- Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) (pp. 1-6). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598710>
- Menghal, P. M., & Laxmi, A. J. (2014, October). Scalar control of an induction motor using artificial intelligent controller. In *2014 International Conference on Power, Automation and Communication (INPAC)* (pp. 60-65). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/INPAC.2014.6981136>
- Oh, G.-U., Hong, C.-W., & Ko, J.-S. (2025). Sensorless Speed Control in Induction Motor Using Deadbeat Discrete Flux Observer Under V/f Control. *Energies*, *18*(18), 4934.
<https://doi.org/10.3390/en18184934>
- Pugachev, A., & Kosmodamianskiy, A. (2019, March). Induction motor scalar control system with power losses minimization. In *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* (pp. 1-5). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8742951>
- Saravanan, C., Sathiswar, J., & Raja, S. (2012). Performance of three phase induction motor using modified stator winding. *International Journal of Computer Applications*, *46*(1), 1-4.
[10.5120/6869-8952](https://doi.org/10.5120/6869-8952)
- Sterjova, M., & Sarac, V. (2022). Review of scalar control strategy of induction motor: constant v/f method for speed control. *Balkan Journal of Applied Mathematics and Informatics*, *5*(1), 57-68. <https://doi.org/10.46763/bjami>
- Tiitinen, L., Hinkkanen, M., & Harnfors, L. (2022, October). Stable and passive observer-based V/Hz control for induction motors. In *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 1-8). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ECCE50734.2022.9948057>
- Tran, C., Brandstetter, P., Kuchar, M., & Ho, S. (2020). A novel speed and current sensor fault-tolerant control based on estimated stator currents in induction motor drives. *International Review of Electrical Engineering*, *15*(5), 344-351. <https://doi.org/10.15866/iree.v15i5.17937>
- Tran, C. D., & Truong, M. N. (2024). Sensorless Control for Induction Motor Drive Applying CB-MRAS Integrating Stator Resistance Estimation. *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, *17*(4), 215-221.
<https://doi.org/10.15866/iremos.v17i4.24107>
- Travieso-Torres, J. C., Duarte-Mermoud, M. A., & Sepuleveda, D. I. (2007). Passivity-based control for stabilization, regulation and tracking purposes of a class of nonlinear systems. *International Journal of adaptive control and signal processing*, *21*(7), 582-602.
<https://doi.org/10.1002/acs.946>
- Travieso-Torres, J. C., Contreras-Jara, C., Diaz, M., Aguila-Camacho, N., & Duarte-Mermoud, M. A. (2021). New adaptive starting scalar control scheme for induction motor variable speed drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *37*(1), 729-736.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3108664>
- Ustun, S. V., & Demirtas, M. (2008). Optimal tuning of PI coefficients by using fuzzy-genetic for V/f controlled induction motor. *Expert Systems with Applications*, *34*(4), 2714-2720.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.05.029>
- Vladimir, P., & Dmitry, S. (2018, March). To issue of designing scalar closed-loop controllers for frequency controlled induction motor drives. In *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)* (pp. 1-4). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ACED.2018.8341708>
- Vu, Q. S., Tran, C. D., Dinh, B. H., Dong, C. S. T., Huynh, H. T., & Phan, H. X. (2022). A current sensor fault diagnosis method based on phase angle shift technique applying to induction motor drive. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, *13*(3), 1315-1325.
<http://doi.org/10.11591/ijped.v13.i3.pp1315-1325>
- Zellouma, D., Bekakra, Y., & Benbouhenni, H. (2023). Field-oriented control based on parallel proportional-integral controllers of induction motor drive. *Energy Reports*, *9*, 4846-4860.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.008>
- Zhang, Z., & Bazzi, A. M. (2019, May). Robust sensorless scalar control of induction motor drives with torque capability enhancement at low speeds. In *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)* (pp. 1706-1710). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785159>