

DOI:10.22144/ctujos.2026.146

GIẢI PHÁP CHẨN ĐOÁN LỖI CẢM BIẾN DÒNG ĐIỆN ÁP DỤNG CHỈ SỐ SAI SỐ BÌNH PHƯƠNG TRUNG BÌNH CẢI TIẾN TRONG HỆ TRUYỀN ĐỘNG ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ

Nguyễn Xuân Tiên^{1*} và Trần Đình Cường²

¹Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn, Việt Nam

²Khoa Điện và Điện tử, Trường Đại học Tôn Đức Thắng, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): tien.nx@sgu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 02/02/2026

Sửa bài (Revised): 27/02/2026

Duyệt đăng (Accepted): 27/07/2026

Title: A current sensor fault-tolerance control solution based on an improved mean squared error index for induction motor drive systems

Author(s): Nguyen Xuan Tien^{1*} and Tran Dinh Cuong²

Affiliation(s): ¹Faculty of Engineering and Technology, Saigon University, Viet Nam; ²Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ton Duc Thang University, Viet Nam

TÓM TẮT

Điều khiển chịu lỗi (Fault-tolerant control - FTC) đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo an toàn cho hệ thống truyền động động cơ không đồng bộ, đặc biệt trước các sự cố cảm biến dòng điện trong sơ đồ điều khiển định hướng từ thông (field-oriented control - FOC). Chiến lược FTC kết hợp chỉ số sai số bình phương trung bình (mean squared error - MSE) cải tiến và bộ quan sát Luenberger (Luenberger observer - LO) được đề xuất. Trong đó, chỉ số MSE dựa trên tín hiệu dư để phát hiện nhanh các lỗi mềm và cứng, khắc phục hạn chế về độ trễ tích lũy của các chỉ số truyền thống như ITSE và ITAE. Song song đó, LO thực hiện tái tạo tín hiệu dòng điện ước tính. Kết quả mô phỏng chứng minh thuật toán phát hiện lỗi chính xác ngay cả trong trạng thái quá độ, giúp khôi phục dòng điện hiệu quả và duy trì sự ổn định của hệ thống.

Từ khóa: Bộ quan sát Luenberger, chẩn đoán lỗi cảm biến dòng, điều khiển chịu lỗi, hệ truyền động động cơ không đồng bộ, sai số bình phương trung bình

ABSTRACT

Fault-tolerant control (FTC) plays a crucial role in maintaining the safety and reliability of induction motor drive systems, particularly in the presence of current sensor failures in field-oriented control (FOC) schemes. This paper proposes an FTC strategy that integrates an enhanced mean square error (MSE) index with a Luenberger observer (LO). The residual-based MSE index enables rapid identification of both soft and hard faults, effectively overcoming the cumulative delay inherent in conventional performance indices such as ITSE and ITAE. In parallel, the LO is employed to reconstruct the estimated stator current signals. Simulation results confirm that the proposed fault detection algorithm remains accurate even under transient operating conditions, allowing effective current recovery and preserving overall system stability.

Keywords: Luenberger observer, current sensor fault diagnosis, induction motor drives, fault-tolerant control, mean squared error

1. GIỚI THIỆU

Động cơ không đồng bộ ba pha (KĐB) được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống tự động hóa công nghiệp và hệ thống truyền động xe điện do cấu tạo đơn giản, độ tin cậy vận hành cao và chi phí tương đối thấp (Yelamarthi & Sandepudi, 2019; El-Shahat, 2023). Kỹ thuật điều khiển định hướng từ thông (Field-Oriented Control - FOC) đại diện cho một phương pháp điều khiển hiện đại, mang lại hiệu quả cao, đồng thời nâng cao độ chính xác của hệ thống truyền động và cải thiện đáp ứng động (Aktas et al., 2020; Dinh & Tran, 2024).

Hiệu suất của điều khiển FOC phụ thuộc rất lớn vào các phép đo phản hồi chính xác, đặc biệt là dòng điện stato. Sai số trong cảm biến dòng điện có thể làm sai lệch đáng kể mô-men xoắn và từ thông ước tính, dẫn đến chất lượng điều khiển bị suy giảm hoặc thậm chí gây mất ổn định hệ thống truyền động. Do đó, các phương pháp điều khiển chịu lỗi (fault-tolerant control - FTC) cảm biến dòng điện đã được nghiên cứu rộng rãi nhằm duy trì hoạt động an toàn và đáng tin cậy khi xảy ra lỗi cảm biến. Các phương pháp điển hình bao gồm điều khiển không cảm biến (Chen et al., 2021), các phương pháp dựa trên bộ quan sát (Manohar & Das, 2017; Azzoug et al., 2021) và các chiến lược dựa trên vector dòng điện (Tran et al., 2024).

Mặc dù các phương pháp này có thể đạt hiệu quả nhất định, chúng thường đòi hỏi nỗ lực tính toán đáng kể và có xu hướng suy giảm độ chính xác trong điều kiện nhiễu (Li & Gong, 2023). Các phương pháp phát hiện lỗi dựa trên bộ đếm, trong đó lỗi được xác định khi sai lệch dòng điện hoặc tốc độ vượt quá ngưỡng lặp lại trong nhiều chu kỳ lấy mẫu, có ưu điểm là dễ triển khai nhưng lại tồn tại độ trễ phát hiện dài (20-35 chu kỳ, tương đương khoảng 2-3,5 ms ở tần số lấy mẫu 10 kHz) và có thể không phát hiện được các lỗi ngắn bị che khuất bởi nhiễu (Diallo et al., 2004; Tran et al., 2021). Các phương pháp dựa trên độ lệch vector không gian cho phép phát hiện nhanh các lỗi cứng; tuy nhiên, chúng phụ thuộc vào các ngưỡng cố định và phép đo tức thời, khiến chúng nhạy với nhiễu, kém tin cậy trong các chế độ chuyển tiếp và không hiệu quả đối với các lỗi mềm (Tran et al., 2020). Một chiến lược FTC toàn diện sử dụng bộ quan sát trượt kết hợp với phân tích phổ có khả năng xử lý nhiều loại lỗi cảm biến khác nhau; tuy nhiên, việc sử dụng đồng thời nhiều bộ quan sát và các ngưỡng có thể điều chỉnh làm gia tăng cả độ nhạy với nhiễu và gánh nặng tính toán (Gouichiche et al., 2020).

Trong nghiên cứu của (Dybkowski & Klimkowski, 2019), một bộ dò dựa trên mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) đã được huấn luyện để nhận dạng lỗi cảm biến dòng điện trong hệ thống truyền động điều khiển vector. Kết quả cho thấy ANN đạt thời gian phát hiện tối ưu $\Delta t = 0,22$ ms và cho giá trị nhỏ nhất của chỉ số tích phân bình phương sai số có trọng số theo thời gian (ITSE) và tích phân giá trị tuyệt đối sai số có trọng số theo thời gian (ITAE) so với các mô hình được đánh giá. Tuy nhiên, khi thời gian phát hiện tăng, các chỉ số ITSE và ITAE tăng đáng kể do sai lệch điều khiển tích lũy trước khi cơ chế bù được kích hoạt. Ở vùng tốc độ thấp, bộ dò ANN thể hiện độ trễ lên đến 8,0 ms đối với lỗi cảm biến dòng điện pha, phản ánh sự suy giảm độ nhạy do tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu giảm. Ngoài các chiến lược dựa trên điều khiển FTC, nhiều phương pháp xử lý tín hiệu đã được nghiên cứu nhằm cải thiện khả năng chẩn đoán trong các hệ thống truyền động động cơ không đồng bộ. Phân tích phổ dựa trên biến đổi Fourier vẫn được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng triển khai đơn giản; tuy nhiên, phương pháp này bị hạn chế khi xử lý các tín hiệu không dừng và thể hiện độ nhạy cao đối với nhiễu (El Bouchikhi et al., 2014). Để khắc phục những hạn chế này, các kỹ thuật wavelet và phân tích thời gian-tần số đã được áp dụng trong chẩn đoán lỗi rô-to (Amanuel et al., 2021). Bên cạnh đó, các phương pháp lai kết hợp đồng thời các phép đo cơ học và điện cũng đã được đề xuất (Chang et al., 2019), trong khi biến đổi wavelet rời rạc (DWT) kết hợp với mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) đã chứng minh khả năng phát hiện lỗi sớm với độ chính xác cao (Chikkam & Singh, 2023). Tuy nhiên, các phương pháp hiện có vẫn gặp khó khăn khi triển khai trong môi trường công nghiệp thực tế, qua đó nhấn mạnh nhu cầu về một kỹ thuật chẩn đoán nhỏ gọn, không cần cảm biến bổ sung, dễ triển khai và có khả năng phát hiện lỗi nhanh, chính xác và chống nhiễu tốt.

Trong nghiên cứu này, chỉ số sai số bình phương trung bình (mean squared error - MSE) được sử dụng để phát hiện lỗi cảm biến dòng điện dựa trên độ lệch giữa dòng điện đo được và dòng điện ước tính (Hodson et al., 2021; Narzary & Veluvolu, 2022; Nguyen et al., 2025). Một bộ quan sát Luenberger (Luenberger observer - LO) được sử dụng để ước tính dòng điện stato và tạo ra tín hiệu dòng điện ảo thay thế khi xảy ra lỗi cảm biến (Azzoug et al., 2019). Chỉ số MSE này được xây dựng theo cơ chế cửa sổ trượt ngắn kết hợp với ngưỡng thống kê hiệu chuẩn. Cấu trúc này cho phép đánh giá sai lệch cục bộ theo thời gian thực, hạn chế ảnh hưởng của tích lũy sai số dài hạn và giảm đáng

kể độ trễ phát hiện trong các chế độ quá độ. Cách tiếp cận này cho phép phát hiện lỗi nhanh, giảm tỷ lệ báo động giả và duy trì tính ổn định của hệ thống điều khiển FOC. Ngoài ra, hiệu quả của phương pháp còn được đánh giá định lượng thông qua việc so sánh trực tiếp với các chỉ tiêu ITSE và ITAE về thời gian phát hiện lỗi, qua đó làm nổi bật ưu thế của phương pháp đề xuất trong bài toán chẩn đoán lỗi nhanh. Các thí nghiệm mô phỏng lỗi đã chứng minh tính hiệu quả của phương án đề xuất và cải thiện đáng kể độ bền vững vận hành của hệ thống truyền động động cơ không đồng bộ.

Đóng góp chính của nghiên cứu được tóm tắt như sau. Thứ nhất, phương pháp phát hiện lỗi dựa trên tín hiệu dư sử dụng chỉ số MSE tính theo cửa sổ trượt kết hợp với ngưỡng thông kê thích nghi được đề xuất, cho phép phát hiện nhanh cả lỗi mềm và lỗi cứng của cảm biến dòng điện mà không cần tích lũy sai số trong thời gian dài. Thứ hai, một bộ quan sát LO duy nhất được sử dụng đồng thời cho cả việc tạo tín hiệu dư và tái cấu trúc dòng điện, qua đó giảm đáng kể độ phức tạp tính toán. Thứ ba, cơ chế FTC được tích hợp vào cấu trúc FOC truyền thống bảo toàn kiến trúc điều khiển ban đầu trong khi vẫn đảm bảo quá trình thay thế dòng điện diễn ra liên tục và ổn định. Cuối cùng, phương pháp đề xuất đạt được thời gian phát hiện lỗi rất ngắn ngay cả trong điều kiện quá độ, thể hiện khả năng đáp ứng nhanh và độ bền vững vượt trội so với các phương pháp dựa trên ITSE và ITAE truyền thống.

2. CẤU TRÚC ĐIỀU KHIỂN CỦA HỆ TRUYỀN ĐỘNG ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ BA PHA

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

Trong hệ tọa độ đứng yên $[\alpha, \beta]$, KĐB được mô tả dựa trên quan hệ giữa điện áp stato, dòng stato và các liên kết từ thông stato và rôto. Các phương trình điện áp và từ thông tổng quát của KĐB được biểu diễn trong các phương trình (1) - (4).

Phương trình điện áp stato:

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + d\vec{\psi}_s / dt \quad (1)$$

$$0 = R_r \vec{i}_r + d\vec{\psi}_r / dt - j\omega_r \vec{\psi}_r \quad (2)$$

Phương trình liên kết từ thông stato và rôto:

$$\vec{\psi}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \quad (3)$$

$$\vec{\psi}_r = L_m \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r \quad (4)$$

Từ việc kết hợp các phương trình (1) - (4), mô-men điện từ của động cơ được xác định theo biểu thức (5).

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{r\alpha} i_{s\alpha} - \psi_{r\beta} i_{s\beta}) \quad (5)$$

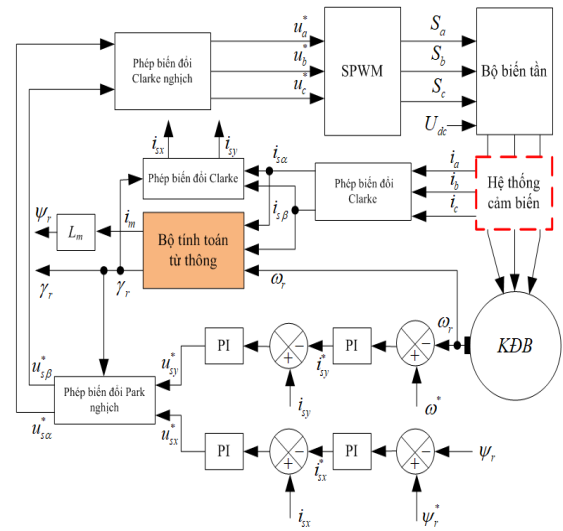
trong đó: $\vec{i}_s, \vec{i}_r$ là các vector dòng điện stato và rôto; $\vec{\psi}_s, \vec{\psi}_r$ là các vector liên kết từ thông stato và rôto; R_s, R_r lần lượt là điện trở stato và rôto; L_s, L_r, L_m là các điện cảm stato, rôto và điện cảm từ hóa; ω_m là tốc độ cơ của rôto; p là số đôi cực; và $\omega_r = p\omega_m$ là tốc độ điện.

2.2. Kỹ thuật điều khiển định hướng từ thông

Điều khiển FOC là một phương pháp điều khiển véc-tơ vòng kín được áp dụng rộng rãi trong các hệ truyền động động cơ không đồng bộ nhằm đạt được khả năng điều khiển độc lập giữa từ thông và mô-men điện từ (Tran et al., 2024). Cấu trúc tổng quát của bộ điều khiển FOC cho động cơ không đồng bộ được minh họa trong Hình 1.

Trong cấu trúc này, dòng điện stato trong hệ tọa độ $[a, b, c]$ được chuyển đổi sang hệ tọa độ tĩnh $[\alpha, \beta]$ thông qua phép biến đổi Clarke, như trong (6).

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = i_a \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b \end{cases} \quad (6)$$



Hình 1. Cấu trúc điều khiển FOC cho hệ truyền động KĐB

Tiếp theo, các thành phần dòng stato trong hệ tọa độ $[\alpha, \beta]$ được biến đổi sang hệ tọa độ quay đồng bộ $[x, y]$ thông qua phép biến đổi Park, được xác định trong (7).

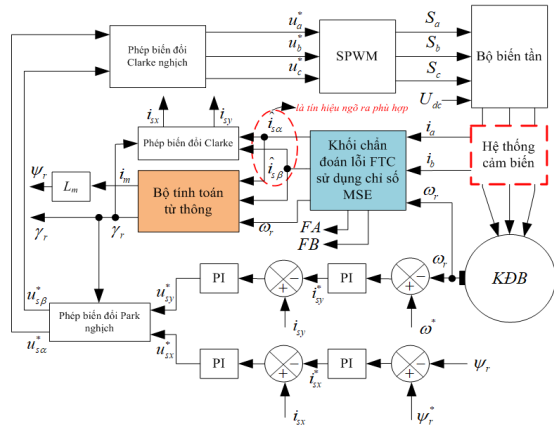
$$\begin{cases} i_{sx} = i_{s\alpha} \cos \gamma_r + i_{s\beta} \sin \gamma_r \\ i_{sy} = -i_{s\alpha} \sin \gamma_r + i_{s\beta} \cos \gamma_r \end{cases} \quad (7)$$

trong đó γ_r là góc từ thông rôto và $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ là dòng điện stato.

3. MÔ HÌNH LỖI CẢM BIẾN DÒNG ĐIỆN

3.1. Tích hợp điều khiển chịu lỗi FTC trong điều khiển FOC

Trong hệ thống này, FOC được sử dụng làm cấu trúc điều khiển cơ sở, trong khi chức năng khối điều khiển FTC được tích hợp nhằm xử lý các sự cố cảm biến. Sơ đồ khối của quá trình FTC được thể hiện trong Hình 2, mô tả các bước phát hiện lỗi, thay thế dòng điện lỗi đến việc đưa dòng tái cấu trúc vào hệ điều khiển FOC bằng cách áp dụng chỉ số MSE vào khối chẩn đoán lỗi.



Hình 2. Sơ đồ khối của hệ truyền động KĐB tích hợp chuẩn đoán chịu lỗi FTC

3.2. Phân loại lỗi cảm biến dòng điện

Các lỗi cảm biến trong quá trình đo dòng điện có thể được phân thành hai nhóm chính: Lỗi mềm bao gồm các dạng như lệch không (offset), trôi tín hiệu (drift), sai lệch hệ số tỷ lệ (scale) và suy giảm độ chính xác (precision degradation). Lỗi cứng bao gồm các trường hợp như tín hiệu không đổi, giá trị không đổi kèm nhiễu và nhiễu bão hòa ở mức thấp (bottom noise).

Những dạng lỗi này có thể làm suy giảm đáng kể hiệu suất và tính ổn định của các hệ truyền động động cơ sử dụng FOC. Để mô hình hóa chính xác các tín hiệu lỗi, các biểu thức toán học tương ứng

cho từng loại lỗi được định nghĩa như trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Mô hình toán học của các dạng lỗi cảm biến dòng điện điển hình

Nhóm lỗi	Giá trị	Đơn vị
Lỗi mềm	Trôi	$i_{do}(t) = i_{thực}(t) + a.t$
	Sai lệch hệ số	$i_{do}(t) = a i_{thực}(t)$
	Lệch không	$i_{do}(t) = i_{thực}(t) + b$
	Suy giảm độ chính xác	$i_{do}(t) = i_{thực}(t) + n(t)$
Lỗi cứng	Giá trị không đổi	$i_{do}(t) = C$
	Giá trị không đổi kèm nhiễu	$i_{do}(t) = C + n(t)$
	Nhiều bão hòa	$i_{do}(t) = n(t)$

Ghi chú: Các hệ số: a - hệ số tỷ lệ; b - độ lệch; $n(t)$ - nhiễu cảm biến; C - giá trị hằng do lỗi cảm biến.

4. MÔ HÌNH CHẨN ĐOÁN LỖI CẢM BIẾN DÒNG ĐIỆN ỨNG DỤNG CHỈ SỐ MSE

4.1. Ước tính dòng điện sử dụng LO

Bộ quan sát LO được xây dựng dựa trên hệ phương trình vi phân mô tả động học của KĐB. Các phương trình (8) - (11) trong tài liệu (Tran et al., 2024) mô tả sự biến thiên của dòng điện stato và từ thông rôto theo thời gian như sau:

$$\begin{aligned} \frac{di_{s\alpha_est}}{dt} = & -\frac{(L_r^2 R_s + L_m^2 R_r)}{L_s L_r^2 \sigma} i_{s\alpha_est} + \frac{L_m R_r}{L_s L_r^2 \sigma} \psi_{r\alpha} \dots \\ & + \frac{L_m \omega_r}{L_s L_r \sigma} \psi_{r\beta} + \frac{u_{s\alpha}}{L_s \sigma} - L_1 i_{s\alpha_est} + L_2 i_{s\beta_est} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{s\beta_est}}{dt} = & -\frac{(L_r^2 R_s + L_m^2 R_r)}{L_s L_r^2 \sigma} i_{s\beta_est} - \frac{L_m p \omega_m}{L_s L_r \sigma} \psi_{r\alpha} \dots \\ & + \frac{L_m R_r}{L_s L_r^2 \sigma} \psi_{r\beta} + \frac{u_{s\beta}}{L_s \sigma} - L_1 i_{s\beta_est} - L_2 i_{s\alpha_est} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = & \frac{L_m R_r}{L_r} i_{s\alpha_est} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} \dots \\ & - \omega_r \psi_{r\beta} - L_3 i_{s\alpha_est} + L_4 i_{s\beta_est} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = & \frac{L_m R_r}{L_r} i_{s\beta_est} + p \omega_m \psi_{r\alpha} \dots \\ & - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} + L_3 i_{s\beta_est} - L_4 i_{s\alpha_est} \end{aligned} \quad (11)$$

trong đó,

$$\begin{aligned} L_1 &= (k-1)\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1}{\sigma T_r}\right); L_2 = -(k-1)\omega_r; \\ L_3 &= (k^2-1)\left[\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1}{\sigma T_r}\right)\frac{\sigma L_s L_m}{L_r} - \frac{L_m}{T_r}\right] \dots \\ &\quad + \frac{\sigma L_s L_m}{L_r}\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1}{\sigma T_r}\right)(k-1); \\ L_4 &= -(k-1)\frac{\sigma L_s L_m}{L_r}\omega_r; T_s = \frac{L_s}{R_s}; T_r = \frac{L_r}{R_r}; \\ k &> 1. \end{aligned}$$

Các thành phần dòng điện stato được ước tính i_{sx_est} và i_{sy_est} sau đó được biến đổi ngược trở lại hệ ba pha bằng phép biến đổi Clarke nghịch, như được trình bày trong phương trình (12).

$$\begin{cases} i_{a_est} = i_{sx_est} \\ i_{b_est} = -\frac{1}{2}i_{sx_est} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{sy_est} \end{cases} \quad (12)$$

Các giá trị dòng tải cấu trúc $[i_{a_est}, i_{b_est}]$ được sử dụng cho cả việc chẩn đoán lỗi cảm biến và làm tín hiệu thay thế trong trường hợp cảm biến bị sự cố.

Lưu ý: Độ chính xác của các thành phần dòng điện ước tính bằng bộ quan sát LO bị ảnh hưởng bởi yếu tố tham số động cơ, đặc biệt là điện trở stator và rotor. Trong điều kiện hoạt động thông thường, ngưỡng sai lệch giữa dòng điện đo và dòng điện ước tính thường dưới 10% giá trị hiệu dụng. Để tăng cường độ chính xác của dòng điện ước tính có thể tích hợp thêm các khâu ước tính điện trở vào bộ quan sát LO (Adamczyk & Orłowska-Kowalska, 2021, Adamczyk & Orłowska-Kowalska, 2022). Tuy nhiên độ phức tạp của thuật toán gia tăng, đây là một khía cạnh cần được xem xét trong từng ứng dụng.

4.2. Tính toán chỉ số MSE

Việc phát hiện lỗi cảm biến dựa trên chỉ số MSE giữa sai số dòng điện đo được i_x và dòng điện ước tính i_{x_est} . Trong điều kiện hoạt động bình thường, sai số này chỉ bao gồm nhiễu đo và sai số mô hình nhỏ, do đó giá trị MSE duy trì ở mức thấp và ổn định. Khi cảm biến bị hỏng, tín hiệu đo sai lệch đáng kể và làm MSE tăng đột ngột.

Dòng điện pha $[i_a, i_b, i_c]$ được so sánh liên tục với các dòng ước tính tương ứng, $[i_{a_est}, i_{b_est}, i_{c_est}]$ thu được từ phương trình (12). Chỉ số MSE cho mỗi pha được tính theo cửa sổ trượt có độ dài N, được định nghĩa như trong công thức (13).

$$MSE_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k-(N+1)}^k (i_x(i) - i_{x_est}(i))^2 \quad (13)$$

trong đó;

$x \in \{A, B, C\}$: Các cảm biến dòng điện pha A, B, C;

$i_x(i)$: dòng stato đo được của pha x tại thời điểm thứ i;

$i_{x_est}(i)$: dòng stato pha x được ước tính;

N: độ dài của cửa sổ trượt;

k: chỉ số thời gian hiện tại.

Cửa sổ trượt giúp làm mượt ảnh hưởng của nhiễu cao tần, đồng thời cho phép phát hiện lỗi nhanh nhờ độ dài N thường chọn là 100 mẫu. Khi MSE vượt ngưỡng, cảm biến tương ứng được xác định là hư hỏng.

Tuy nhiên, để hạn chế ảnh hưởng của tham số điện trở đến chỉ số tích lũy MSE, một ngưỡng xác định được đặt ra (thường mức 10% có thể chấp nhận) và chỉ số MSE chỉ được tích lũy khi sai lệch vượt quá ngưỡng này.

Gọi sai số dòng pha $x \in \{A, B, C\}$ tại mẫu i là: $e_x(i) = i_x(i) - i_{x_est}(i)$, khi đó sai số sau ngưỡng được định nghĩa bằng hàm:

$$func(i) = \begin{cases} 0, & \text{if } |e_x(i)| \leq \varepsilon_x \\ e_x(i), & \text{if } |e_x(i)| > \varepsilon_x \end{cases} \quad (14)$$

với ε_x là ngưỡng sai lệch.

Khi đó, MSE có ngưỡng trên cửa sổ trượt độ dài N tại thời điểm k là:

$$MSE_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k-(N+1)}^k (func(i))^2 \quad (15)$$

Không giống như các chỉ tiêu truyền thống như ITSE và ITAE, vốn tích lũy sai số trong toàn bộ khoảng thời gian hoạt động và do đó cần một khoảng tích phân đủ dài để vượt qua ngưỡng phát hiện, chỉ số MSE được tính toán trên một cửa sổ trượt ngắn. Nhờ đó, phương pháp dựa trên MSE làm giảm đáng kể độ trễ phát hiện lỗi, đặc biệt trong các chế độ vận hành quá độ.

4.3. Phát hiện lỗi cảm biến dòng điện dựa trên chỉ số MSE

Một cảm biến dòng điện được xem là hư hỏng khi giá trị MSE vượt quá ngưỡng thống kê δ_x được

xác định trong giai đoạn hiệu chuẩn theo công thức (15).

$$\delta_x = \mu_{\text{MSE},x} + \lambda \sigma_{\text{MSE},x} \quad (16)$$

trong đó, $\mu_{\text{MSE},x}$ và $\sigma_{\text{MSE},x}$ lần lượt là giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của MSE thu được trong giai đoạn hiệu chuẩn, còn λ là hệ số độ tin cậy.

Khi đó, cờ lỗi nhị phân của từng pha được kích hoạt theo quy tắc trong (16).

$$F_x(k) = \begin{cases} 1, & \text{nếu } \text{MSE}_x(k) > \delta_x \\ 0, & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (17)$$

Việc lựa chọn các giá trị ngưỡng δ_x cần đạt được sự cân bằng giữa tính nhạy và tính ổn định. Nếu đặt ngưỡng quá thấp, hệ thống có thể phát cảnh báo sai do nhiễu hoặc sự thay đổi tham số; ngược lại, nếu đặt ngưỡng quá cao, lỗi thực sự có thể không được phát hiện.

4.4. Lựa chọn tham số

Hiệu suất của thuật toán chẩn đoán phụ thuộc vào việc lựa chọn tối ưu các tham số gồm:

- Độ dài cửa sổ trượt: Giá trị này được lựa chọn để đảm bảo sự cân bằng giữa khả năng làm mượt nhiễu cao tần và tốc độ đáp ứng của hệ thống. Với $N=100$, chỉ số MSE có thể phản ứng nhanh chóng với các thay đổi đột ngột khi lỗi xảy ra mà không gây ra độ trễ lớn như các tiêu chuẩn tích lũy sai số truyền thống.

- Ngưỡng sai lệch (ε_x): Tham số này được đặt ra nhằm hạn chế ảnh hưởng của sự thay đổi tham số điện trở stato đến chỉ số tích lũy MSE. Ngưỡng 10% cho phép hệ thống hấp thụ các sai lệch mô hình nhỏ trong điều kiện vận hành bình thường, giúp giá trị MSE duy trì ở mức thấp và ổn định.

- Hệ số tin cậy ($\lambda = [2 \ 3]$): Hệ số này quyết định ngưỡng chẩn đoán lỗi δ_x dựa trên phân bố thống kê của MSE trong giai đoạn hiệu chuẩn. Việc chọn λ tương ứng với mức độ tin cậy từ 95% đến 99,7%, giúp tối ưu hóa sự cân bằng giữa tính nhạy đối với lỗi thực và tính ổn định trước các cảnh báo sai do nhiễu.

- Độ phức tạp tính toán của thuật toán: Nếu thực hiện tính trực tiếp chỉ số MSE theo cửa sổ trượt với độ dài N , số phép toán tại mỗi chu kỳ lấy mẫu tỷ lệ với N , tương ứng với độ phức tạp $\mathcal{O}(N)$. Tuy nhiên, trong triển khai thực tế, tổng bình phương sai số có thể được cập nhật theo dạng như sau:

$$S_x(k) = S_x(k-1) + \text{func}_x^2(k) - \text{func}_x^2(k-N) \quad (18)$$

trong đó $S_x(k)$ là tổng tích lũy của N mẫu gần nhất. Khi đó chỉ số MSE được xác định bởi:

$$\text{MSE}_x(k) = \frac{S_x(k)}{N} \quad (19)$$

Cách triển khai này giúp giảm độ phức tạp tính toán xuống còn $\mathcal{O}(1)$ cho mỗi pha tại mỗi chu kỳ lấy mẫu. Do mỗi bước chỉ bao gồm một số phép toán số học cơ bản và một phép so sánh ngưỡng, thuật toán đề xuất hầu như không làm gia tăng tải tính toán và không ảnh hưởng đến độ trễ của vòng điều khiển.

4.5. Tái cấu trúc điều khiển chịu lỗi

Trong chiến lược FTC đề xuất, việc tái cấu hình được thực hiện bằng cách thay thế trực tiếp dòng điện đo bị lỗi bằng dòng điện ước tính từ LO, trong khi những pha còn lại vẫn sử dụng tín hiệu đo bình thường.

Khi cảm biến dòng điện của pha x bị phát hiện lỗi ($F_x = 1$), giá trị dòng đo i_x được thay thế bằng dòng ước tính i_{x_est} từ bộ quan sát. Quy tắc tái cấu trúc được định nghĩa như sau:

$$\hat{i}_x = \begin{cases} i_x, & F_x = 0 \\ i_{x_est}, & F_x = 1 \end{cases} \quad (20)$$

với $\hat{i}_x$: dòng điện pha được sử dụng cho điều khiển FOC sau tái cấu trúc từ khối chẩn đoán FTC.

Lưu đồ các bước tiến trình đo dòng điện, ước tính dòng bằng bộ quan sát, tính toán MSE và đưa ra quyết định phát hiện lỗi được trình bày như sau:

Thuật toán: Chẩn đoán lỗi cảm biến dòng điện áp dụng chỉ số MSE

Bắt đầu

- Khởi tạo các tham số hệ thống
- Khởi tạo trạng thái bộ quan sát LO
- Thiết lập ngưỡng MSE: δ_x

* Bước 1: Đo và ước tính

- Đo dòng điện pha i_a, i_b, i_c
- Đo điện áp đầu ra
- Ước tính dòng điện stato $i_{a_est}, i_{b_est}, i_{c_est}$ bằng bộ quan sát Luenberger (LO)

* Bước 2: Đánh giá sai số

- Tính MSE_x

* Bước 3: Phát hiện lỗi và lựa chọn dòng điện

- Nếu $(MSE_x \leq \delta_x)$ thì $F_x = 0$: Cảm biến dòng hoạt động bình thường, chọn dòng điện đo được từ cảm biến.

- Ngược lại, $F = 1$: Phát hiện có lỗi cảm biến dòng, chọn dòng điện ước tính từ LO.

* Bước 4: Phản hồi và biến đổi

- Thực hiện biến đổi Clarke cho dòng điện ngõ ra

- Cập tín hiệu dòng điện đã biến đổi vào bộ điều khiển FOC

* Bước 5: Cập nhật điều khiển

- Cập nhật cho bộ điều khiển tốc độ

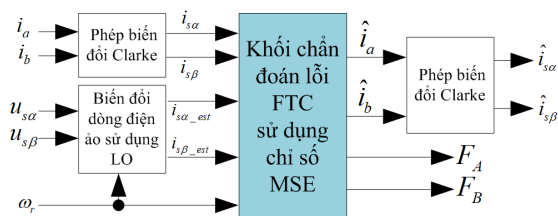
- Phát tín hiệu điện áp tham chiếu

* Bước 6: Điều khiển bộ nghịch lưu

- Cập tín hiệu điều khiển cho bộ nghịch lưu

Kết thúc

Sau khi thay thế, các dòng $(\hat{i}_a, \hat{i}_b)$ được đưa qua phép biến đổi Clarke để tạo thành hai thành phần dòng stato: $(\hat{i}_{s\alpha}, \hat{i}_{s\beta})$. Hai giá trị này được cung cấp trực tiếp cho bộ điều khiển FOC, đảm bảo vòng điều khiển từ thông và mô-men vẫn hoạt động chính xác ngay cả khi một cảm biến dòng bị hỏng. Quy trình đánh giá trạng thái cảm biến, kích hoạt cờ lỗi và lựa chọn tín hiệu dòng điện đưa vào bộ điều khiển FOC như trong Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ đánh giá cảm biến dòng điện

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

5.1. Cài đặt thông số mô phỏng

Để đánh giá hiệu quả và độ tin cậy của phương pháp phát hiện lỗi được đề xuất, các mô phỏng đã được thực hiện trên hệ truyền động KĐB vận hành theo cấu trúc điều khiển FOC trong môi trường MATLAB/Simulink. Các mô phỏng này bao gồm cả các kịch bản lỗi mềm và lỗi cứng của cảm biến dòng điện trong điều kiện có tải. Các thông số định mức của hệ truyền động KĐB điều khiển theo phương pháp FOC được trình bày trong Bảng 2.

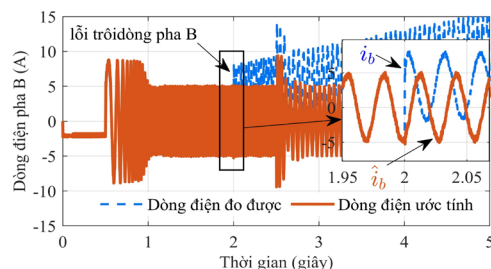
Thời gian lấy mẫu của hệ thống điều khiển được chọn là $T_s = 100 \mu s$, độ dài của sổ trượt được lựa chọn $N=100$ mẫu. Trong các kịch bản mô phỏng chính, động cơ mang tải không đổi ở mức $T_L = 5 \text{ Nm}$ tại thời điểm 0,5 s. Hệ truyền động được vận hành với tốc độ tham chiếu tăng từ 0 đến 1000 rpm tại thời điểm 0,5 s và giảm tuyến tính xuống 500 rpm tại $t = 2,5 \text{ s}$. Hai cảm biến dòng điện được xem xét là A và B, loại lỗi được đưa vào tại thời điểm $t = 2,0 \text{ s}$.

Bảng 2. Thông số động cơ

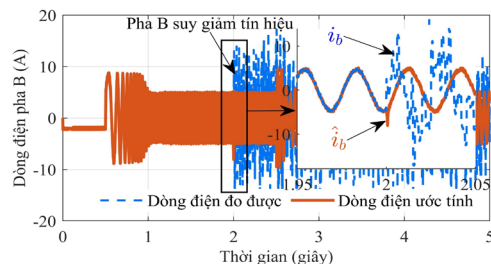
Thông số	Giá trị	Đơn vị
Công suất định mức	3360	W
Điện áp định mức	400	V
Tần số định mức	50	Hz
Điện trở sta-to/rô-to	3,179/2,118	Ω
Điện cảm từ hóa	0,192	H
Điện cảm sta-to/rô-to	0,209/0,209	H

5.2. Hiệu năng phát hiện lỗi đối với các lỗi mềm

Các lỗi mềm được mô phỏng nhằm đánh giá độ bền vững của khung FTC phát hiện và chịu lỗi cảm biến được đề xuất. Bốn dạng lỗi mềm, bao gồm lỗi trôi, suy giảm độ chính xác, lỗi lệch không và lỗi sai lệch hệ số được mô phỏng tương ứng với phép đo dòng điện pha B tại thời điểm 2,0 s.



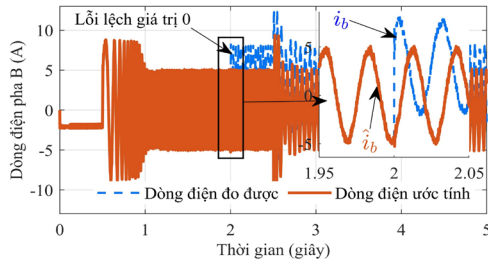
Hình 4. Phát hiện và thay thế lỗi trôi



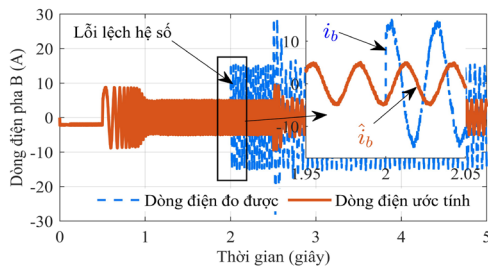
Hình 5. Phát hiện và thay thế lỗi suy giảm tín hiệu

Trong tất cả các trường hợp, chỉ số MSE đã phát hiện hiệu quả các bất thường với thời gian phát hiện nhanh từ 0,1 ms đến 0,6 ms. Đồng thời, dòng điện

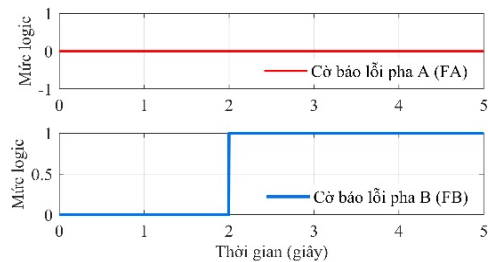
đo bị lỗi được thay thế một cách liên tục bằng dòng điện ước tính từ bộ quan sát LO, qua đó đảm bảo tính liên tục của quá trình điều khiển, như thể hiện từ Hình 4 đến Hình 7.



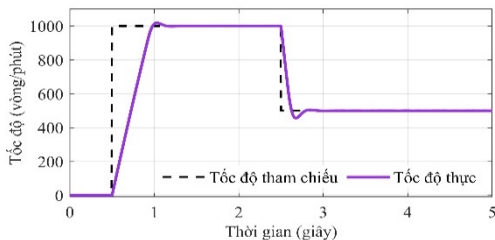
Hình 6. Phát hiện và thay thế lỗi lệch giá trị 0



Hình 7. Phát hiện và thay thế lỗi lệch hệ số



Hình 8. Cờ phát hiện lỗi của pha A và pha B

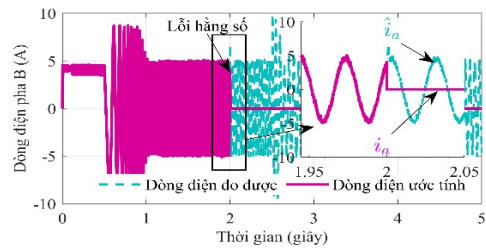


Hình 9. Tốc độ rôto và giá trị tham chiếu

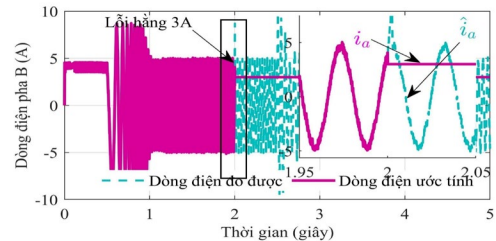
Cờ báo lỗi của pha B được kích hoạt trong mọi trường hợp, cho thấy độ nhạy của phép thử đối với các đặc tính lỗi khác nhau, như minh họa trong Hình 8. Bên cạnh đó, tốc độ rôto duy trì diễn biến trơn tru và bám sát giá trị tham chiếu trong toàn bộ các kịch bản lỗi, chứng tỏ cơ chế FTC đã bảo toàn được tính ổn định và hiệu năng của hệ thống, như thể hiện trong Hình 9.

5.3. Hiệu năng phát hiện lỗi đối với các lỗi cứng

Ba kịch bản lỗi cứng điển hình được mô phỏng bao gồm: lỗi giá trị 0, lỗi hằng số với biên độ 3 A, và lỗi hằng 3 A kèm nhiễu. Mỗi dạng lỗi được mô phỏng tương ứng với phép đo dòng điện pha A tại thời điểm $t = 2,0$ s. Thuật toán đề xuất được áp dụng đã phát hiện hiệu quả tất cả các điều kiện lỗi với thời gian phát hiện nhanh từ 1,0 ms đến 2,2 ms.



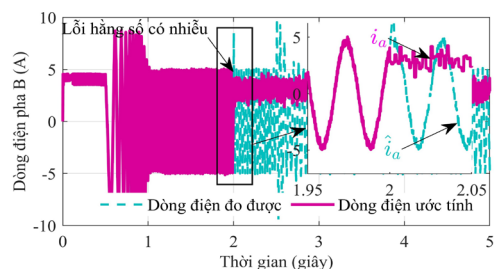
Hình 10. Phát hiện và thay thế lỗi hằng số



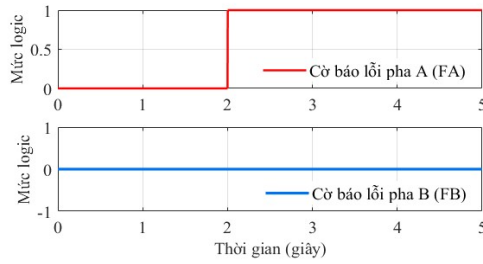
Hình 11. Phát hiện và thay thế lỗi hằng 3A

Mặc dù các lỗi này xảy ra đột ngột và có mức độ nghiêm trọng cao, cờ báo lỗi của pha A luôn được kích hoạt bởi cấu trúc quan sát, như thể hiện trong Hình 13. Bên cạnh đó, tốc độ rôto vẫn duy trì ổn định và bám sát quỹ đạo tham chiếu trong tất cả các kịch bản, qua đó khẳng định hiệu quả và tính bền vững của chiến lược FTC trong điều kiện xảy ra lỗi cứng, như minh họa trong Hình 14.

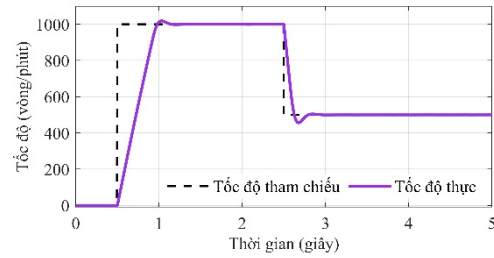
Ngay sau khi lỗi được phát hiện, cơ chế phát hiện lỗi kích hoạt bộ quan sát LO để thay thế tín hiệu dòng điện bị hư hỏng, qua đó đảm bảo tính liên tục và ổn định của quá trình điều khiển. Các kết quả mô phỏng được trình bày từ Hình 10 đến Hình 12.



Hình 12. Phát hiện và thay thế lỗi hằng số 3A có nhiễu



Hình 13. Cờ phát hiện lỗi của pha A và pha B



Hình 14. Tốc độ rôto và giá trị tham chiếu

Bảng 3. Bảng so sánh thời gian phát hiện lỗi

Loại lỗi		Thời gian phát hiện lỗi t_d (ms)		
		ITSE	ITAE	MSE (đề xuất)
Lỗi mềm	Trôi tín hiệu	51,40	49,6	0,2
	Suy giảm độ chính xác	51,00	48,5	0,6
	Lệch giá trị 0	51,40	49,6	0,2
	Lệch hệ số	50,60	48,2	0,1
Lỗi cứng	Hằng số bằng 0	51,90	50,2	1,0
	Hằng số 3A	52,60	51,5	2,4
	Hằng số 3A có nhiễu	52,60	51,6	2,2

5.4. Đánh giá hiệu năng phát hiện lỗi

Để đánh giá hiệu năng phát hiện lỗi của phương pháp đề xuất, chỉ tiêu được sử dụng là thời gian phát hiện lỗi t_d , được xác định từ thời điểm lỗi cảm biến dòng điện đến thời điểm cờ lỗi tương ứng chuyển sang mức logic 1. Thời gian phát hiện lỗi t_d được xác định như trong (21).

$$t_d = t_{\text{cờ nhò}} - t_{\text{lỗi}} \quad (21)$$

Trong đó, $t_{\text{cờ nhò}}$: thời điểm bơm lỗi vào cảm biến; $t_{\text{lỗi}}$: thời điểm cờ lỗi chuyển sang mức logic 1.

Các chỉ tiêu so sánh bao gồm tích phân bình phương sai số (ITSE) và tích phân sai số tuyệt đối theo thời gian (ITAE) theo các định nghĩa trong (Dybkowski & Klimkowski, 2019), như trong (22) và (23):

$$ITSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_{t=0}^{t=5} te^2(t) dt \quad (22)$$

$$ITAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_{t=0}^{t=5} t |e(t)| dt \quad (23)$$

Như được tổng hợp trong Bảng 3, thuật toán áp dụng chỉ số MSE đề xuất thể hiện hiệu năng phát hiện vượt trội so với các chỉ tiêu truyền thống ITSE và ITAE trong cùng điều kiện vận hành. Cụ thể, phương pháp đề xuất đạt khả năng phát hiện lỗi trong khoảng 0,1-2,4 ms, nhanh hơn đáng kể so với các phương pháp truyền thống vốn yêu cầu thời gian từ vài chục đến hàng trăm mili giây.

Việc rút ngắn đáng kể thời gian phát hiện khẳng định độ nhạy cao và đáp ứng nhanh của thuật toán đề xuất khi được áp dụng lên tín hiệu phần dư tuyệt đối sinh ra từ bộ quan sát LO. Hơn nữa, diễn biến tốc độ rôto trơn tru và dạng sóng dòng điện ổn định được quan sát trong các Hình 4 đến Hình 14 cho thấy hệ thống chịu lỗi FTC vẫn duy trì được tính bền vững và khả năng điều chỉnh chính xác ngay cả khi xảy ra các điều kiện lỗi nghiêm trọng.

6. KẾT LUẬN

Một chiến lược điều khiển chịu lỗi cho cảm biến dòng điện trong hệ truyền động động cơ không đồng bộ được trình bày dựa trên sự kết hợp giữa bộ quan sát Luenberger và chỉ số sai số bình phương trung bình. Phương pháp cho phép phát hiện nhanh lỗi cảm biến dòng và tái cấu trúc tín hiệu phản hồi để duy trì hoạt động ổn định của bộ điều khiển FOC mà không cần cảm biến bổ sung và chỉ sử dụng một bộ quan sát duy nhất.

Các kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán đề xuất phát hiện hiệu quả cả lỗi mềm và lỗi cứng, với thời gian phát hiện ngắn từ 0,1 đến 2,4 ms, nhanh hơn đáng kể so với các chỉ tiêu truyền thống như ITSE và ITAE. Sau khi lỗi được phát hiện, dòng điện bị hư hỏng được thay thế liên tục bằng dòng ước tính từ bộ quan sát, giúp giữ ổn định dạng sóng dòng điện, hạn chế dao động tốc độ rôto và đảm bảo khả năng bám tốc độ tốt trong toàn bộ quá trình vận hành. Nhờ cấu trúc gọn nhẹ và chi phí tính toán thấp,

phương pháp đề xuất phù hợp cho các hệ truyền động công nghiệp yêu cầu độ tin cậy cao.

Tuy nhiên, hiệu năng của phương pháp vẫn phụ thuộc vào độ chính xác của mô hình và tham số động cơ, do đó có thể suy giảm khi tham số thay đổi hoặc xảy ra bão hòa từ thông. Ngoài ra, chỉ số MSE sử dụng của số trượt cố định có thể nhảy với nhiễu cao tần và biến thiên tải nhanh. Trong các nghiên cứu

tiếp theo, phương pháp sẽ được mở rộng theo hướng kết hợp nhiều chỉ số chẩn đoán, đồng thời được triển khai và kiểm chứng trên hệ thống phần cứng thực để đánh giá khả năng ứng dụng trong thực tế.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo này là sản phẩm của đề tài nghiên cứu mã số [CSB.2025.085], được tài trợ bởi Trường Đại học Sài Gòn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Aktas, M., Awaili, K., Ehsani, M., & Arisoy, A. (2020). Direct torque control versus indirect field-oriented control of induction motors for electric vehicle applications. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23, 1134-1143. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.04.002>
- Amanuel, T., Ghirmay, A., Ghebremeskel, H., Ghebrehwet, R., & Bahlibi, W. (2021). Comparative analysis of signal processing techniques for fault detection in three phase induction motor. *Journal of Electronics and Informatics*, 3(1), 61-76. <https://doi.org/10.36548/jei.2021.1.006>
- Azzoug, Y., Sahraoui, M., Pusca, R., Romary, R., & Marques Cardoso, A. J. (2019). A single observer for currents estimation in sensor's fault-tolerant control of induction motor drives. In *Proceedings of the International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID)* (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1109/ICAAID.2019.8934969>
- Adamczyk, M., & Orlowska-Kowalska, T. (2021). Self-correcting virtual current sensor based on the modified Luenberger observer for fault-tolerant induction motor drive. *Energies*, 14(20), 6767. <https://doi.org/10.3390/en14206767>
- Adamczyk, M., & Orlowska-Kowalska, T. (2022). Influence of parameter uncertainty to stator current reconstruction using modified Luenberger observer for current sensor fault-tolerant induction motor drive. *Sensors*, 22(24), 9813. <https://doi.org/10.3390/s22249813>
- Azzoug, Y., Pusca, R., Sahraoui, M., Ammar, A., Ameid, T., & Romary, R. (2021). An active fault-tolerant control strategy for current sensors failure for induction motor drives using a single observer for currents estimation and axes transformation. *European Journal of Electrical Engineering*, 23(5), 467-474. <https://doi.org/10.18280/ejee.230606>
- Chang, H.-C., Jheng, Y.-M., Kuo, C.-C., & Hsueh, Y.-M. (2019). Induction motors condition monitoring system with fault diagnosis using a hybrid approach. *Energies*, 12(8), 1471. <https://doi.org/10.3390/en12081471>
- Chikkam, S., & Singh, S. (2023). Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using DWT and ANN. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48, 6237-6252. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07294-3>
- Chen, Y., Xie, D., Zuo, Y., Chang, Y., & Ge, X. (2021). Current sensor fault-tolerant control for induction motor with speed-sensorless based on SMO and SEPLL. In *Proceedings of the 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 1988-1992). <https://doi.org/10.23919/ICEMS52562.2021.9634408>
- Dinh, B. H., & Tran, C. D. (2024). An improved voltage model based on stator resistance estimation for FOC technique in the induction motor drive. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 22(2), 107-114. <https://doi.org/10.15598/aece.v22i2.5745>
- Diallo, D., Benbouzid, M. E. H., & Makouf, A. (2004). A fault-tolerant control architecture for induction motor drives in automotive applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 53(6), 1847-1855. <https://doi.org/10.1109/TVT.2004.833610>
- Dybkowski, M., & Klimkowski, K. (2019). Artificial neural network application for current sensors fault detection in the vector controlled induction motor drive. *Sensors*, 19(3), 571. <https://doi.org/10.3390/s19030571>
- El Bouchikhi, E. H., Choqueuse, V., & Benbouzid, M. (2014). Induction machine faults detection using stator current parametric spectral estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(3), 1118-1127. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.06.015>
- El-Shahat, A. (Ed.). (2023). *Induction motors: Recent advances, new perspectives and applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104031>
- Gouichiche, A., Safa, A., Chibani, A., & Tadjine, M. (2020). Global fault-tolerant control approach for vector control of an induction motor. *International Transactions on Electrical Energy*

- Systems*, 30(8), e12440.
<https://doi.org/10.1002/2050-7038.12440>
- Hodson, T. O., Over, T. M., & Foks, S. S. (2021). Mean squared error, deconstructed. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(12), e2021MS002681.
<https://doi.org/10.1029/2021MS002681>
- Li, Y., & Gong, P. (2023). Fault-tolerant control of induction motor with current sensors based on dual-torque model. *Energies*, 16(8), 3442.
<https://doi.org/10.3390/en16083442>
- Manohar, M., & Das, S. (2017). Current sensor fault-tolerant control for direct torque control of induction motor drive using flux-linkage observer. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(6), 2824-2833.
<https://doi.org/10.1109/TII.2017.2714675>
- Narzary, D., & Veluvolu, K. C. (2022). Multiple sensor fault detection using index-based method. *Sensors*, 22(20), 7988.
<https://doi.org/10.3390/s22207988>
- Nguyen, Q. T., Tran, C. D., Phan, T. T., Nguyen, P. D., Diep, Q. T., & Do, D. T. (2025). Applying the MSE index to detect total speed sensor failure in induction motor drives. In *Proceedings of the International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)* (pp. 185-189).
<https://doi.org/10.1109/ISEE68370.2025.11223427>
- Tran, C. D., Brandstetter, P., Nguyen, M. C. H., Ho, S. D., Pham, P. N., & Dinh, B. H. (2020). An enhanced fault tolerant control against current sensor failures in induction motor drive by applying space vector. *Journal of Advanced Engineering and Computation*, 4(1), 51-63.
<https://doi.org/10.25073/jaec.202041.269>
- Tran, C. D., Kuchar, M., Sotola, V., & Nguyen, P. D. (2024). Fault-tolerant control based on current space vectors against total sensor failures. *Sensors*, 24(11), 3558.
<https://doi.org/10.3390/s24113558>
- Tran, C. D., Palacky, P., Kuchar, M., Brandstetter, P., & Dinh, B. H. (2021). Current and speed sensor fault diagnosis method applied to induction motor drive. *IEEE Access*, 9, 38660-38672.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3064016>
- Yelamarthi, B. S. S. G., & Sandepudi, S. R. (2019). An improved fault tolerant converter topology for field oriented controlled induction motor drive. In *Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA)* (pp. 1-5).
<https://doi.org/10.1109/ICPECA47973.2019.8975694>