

Torque Control of an In-Wheel Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor (AFPMSM) Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for Electrical Vehicles Applications

Duy Hoang Dao¹, Trong Minh Tran¹, Thanh Ha Vo^{2*} 

¹Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

²University of Transport and Communications, Vietnam

*Corresponding author. Email: vothanha.ktd@utc.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 28/07/2023
Revised: 21/09/2023
Accepted: 25/09/2023
Published: 28/08/2024

KEYWORDS

AFPMSM;
Electrical Vehicle;
In-Wheel;
ANFIS;
Fuzzy.

ABSTRACT

This paper presents the design of a torque controller for an in-wheel axial flux permanent magnet synchronous motor based on the adaptive neuro-fuzzy inference system algorithm. This neural network algorithm consists of 5 layers trained based on the Takagi–Sugeno fuzzy logic method. The input layer consists of the error vector and the error derivative of the stator current. The second layer is the fuzzy layer that determines the function of the input vectors. The third layer performs system computations according to fuzzy rules with 5x5 matrices. The fourth layer is the defuzzification layer. The last layer will have the required stator voltage response to the voltage source inverter. Sustainability control evaluation for the AFPMSM using the ANFIS algorithm will be compared with the PI controller if the AFPMSM is unaffected by noise and the AFPMSM parameters change. Simulation MATLAB/SIMULINK performs the results of the evaluation and analysis.

Điều Khiển Mô Men Động Cơ Từ Trường Dọc Trục Nam Châm Vĩnh Cửu (AFPMSM) Tích Hợp Bánh Xe Bằng Thuật Toán Thích Nghi Mờ-Nơ Ron (ANFIS) Ứng Dụng Cho Xe Ô Tô Điện

Đào Duy Hoàng¹, Trần Trọng Minh¹, Võ Thanh Hà^{2*} 

¹Trường Đại Học Bách Khoa Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại Học Giao Thông Vận Tải, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: vothanha.ktd@utc.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 28/07/2023
Ngày hoàn thiện: 21/09/2023
Ngày chấp nhận đăng: 25/09/2023
Ngày đăng: 28/08/2024

TỪ KHÓA

AFPMSM;
Electrical Vehicle;
In-Wheel;
ANFIS;
Fuzzy.

TÓM TẮT

Bài báo này sẽ trình bày thiết kế của bộ điều khiển mô-men cho động cơ từ trường dọc trục đồng bộ nam châm vĩnh cửu (AFPMSM) tích hợp bánh xe dựa trên thuật toán thích nghi mờ-nơ ron (ANFIS). Đây là thuật toán mạng nơ ron gồm 5 lớp được huấn luyện dựa trên phương pháp mờ Takagi–Sugeno. Lớp thứ nhất (lớp vào) bao gồm các vector sai số và đạo hàm vector sai số của dòng điện stator. Lớp thứ hai là lớp mờ hoá có nhiệm vụ xác định chức năng của các vector đầu vào. Lớp thứ ba thực hiện tính toán hệ thống theo luật mờ với ma trận 5x5. Lớp thứ tư thực hiện giải mờ. Lớp cuối cùng sẽ đưa ra đáp ứng điện áp stator theo yêu cầu đến bộ nghịch lưu nguồn áp. Bộ điều khiển này có ưu điểm là thực hiện thiết kế đơn giản vì bộ điều khiển không phụ thuộc vào mô hình toán học động cơ. Bên cạnh đó, ANFIS thích nghi với nhiều do thông số động cơ AFPMSM thay đổi, vì vậy ANFIS đã cải thiện được các đáp ứng dòng điện, mô-men, và nâng cao tính bền vững hệ truyền động xe ô tô điện so với bộ điều khiển PI truyền thống. Hiệu quả của giải pháp đề xuất được đánh giá, phân tích thông qua mô phỏng MATLAB/SIMULINK.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2024.1438>

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

1. Giới thiệu

Ngày nay ô tô điện có ưu thế so với ô tô động cơ đốt trong khi loại bỏ được hộp số phức tạp, loại bỏ khí thải và thân thiện với môi trường [1]. Cấu trúc hệ truyền động của xe ô tô điện xu hướng sử dụng hệ truyền động động cơ tích hợp bánh xe. Cấu trúc truyền động này, đảm bảo lực kéo ở phía trước hoặc phía sau của xe tại hai hoặc bốn bánh. Hệ truyền động kéo này cải thiện hiệu suất lái của xe điện thông qua sự khác biệt giữa các bánh lái, tận dụng tối đa năng lượng xe, cải thiện hiệu quả truyền động, tăng quãng đường đi được, dễ dàng phanh, có tác dụng tản nhiệt tốt, và thuận tiện hơn cho cài đặt và bảo trì [2]. Tuy nhiên, xe ô tô điện sử dụng công nghệ hệ truyền động động cơ tích hợp bánh xe cần phải đảm bảo động cơ kích thước nhỏ, trọng lượng nhẹ, mô-men xoắn nhỏ, hiệu suất cao, khả năng quá tải lớn và dải tốc độ rộng [3]. Dựa trên những đặc điểm quan trọng này, động cơ từ trường dọc trục nam châm vĩnh cửu (AFPMSM) được sử dụng nhiều cho hệ truyền động động cơ tích hợp bánh xe [4]. AFPMSM do được gắn nam châm vĩnh cửu ở rotor vì vậy tổn thất ở mạch kích từ được loại bỏ, giảm đáng kể tổn thất ở rotor. Vì vậy hiệu suất của AFPMSM được cải thiện rất nhiều và mật độ công suất lớn [5]. Bên cạnh đó, AFPMSM với cấu trúc nhiều cực từ, từ thông dọc trục có rất ít vật liệu lõi cho nên đạt được tỷ số mô men/ trọng lượng cao [6]. Bên cạnh đó, AFPMSM có các nam châm mỏng, do đó kích thước của chúng cũng nhỏ hơn so với các động cơ từ trường xuyên tâm (RFPMSM) [7]. Thêm vào đó, AFPMSM tạo ra tiếng ồn và độ rung ít hơn so với các động cơ điện xoay chiều, một chiều thông thường. Hơn nữa AFPMSM được thiết kế, chế tạo với các khe hở không khí phẳng và dễ dàng điều chỉnh [8]. Những lợi ích này tạo AFPMSM nhiều ưu thế so với các động cơ thông dụng trong nhiều ứng dụng khác nhau. Điều này rất hấp dẫn để các nhà khoa học và công ty sản xuất động cơ điện quan tâm nghiên cứu các giải pháp điều khiển cho mô men, tốc độ, vị trí, lực kéo hay cải thiện nâng cao hiệu suất động cơ... Trong đó điều khiển mô-men, tốc độ AFPMSM tích hợp bánh ô tô điện đảm bảo các đáp ứng mô-men, tốc độ theo yêu cầu là được tập trung nghiên cứu và đầu tư để nâng cao chất lượng truyền động điện nói chung và truyền động kéo cho xe ô tô điện nói riêng.

AFPMSM được thiết kế điều khiển mô men, tốc độ dựa trên phương pháp điều khiển trực tiếp mô men (DTC), tựa từ thông rotor (FOC) và kết hợp các thuật toán điều khiển như tuyến tính (PI, LQR, Dead beat...), hay phi tuyến (điều khiển trượt, tựa phẳng, logic mờ...) [9]. Các kết quả nghiên cứu chỉ dừng lại đánh giá hiệu quả phát huy của từng giải pháp cho bộ điều khiển mô-men, tốc độ trong trường hợp AFPMSM hoạt động với mô-men tải không thay đổi, hay tham số động cơ thay đổi... sao cho đáp ứng mô-men có độ đập mạch nhỏ và đáp ứng tốc độ thực bám nhanh và chính xác với tốc độ yêu cầu [10]-[12]. Qua đó nhận thấy rằng, nghiên cứu giải pháp điều khiển thông minh để nâng cao mô-men AFPMSM tích hợp bánh xe ô tô điện, kết hợp với xây dựng thành phần mô-men yêu cầu đúng với tính chất vật lý hoạt động của xe ô tô điện, như chân phanh, chân ga, tác động của độ nghiêng của đường và cản trở của gió ... để cải thiện hiệu suất của xe ô tô điện và điều khiển bền vững hệ truyền động xe ô tô điện là còn ít công trình công bố.

Trong bài báo sẽ trình bày thiết kế bộ điều khiển mô-men AFPMSM một mặt (một stator và một rotor) tích hợp bánh xe ô tô điện theo phương pháp điều khiển thích nghi mờ-nơ ron (ANFIS). Bộ điều khiển kiểu thích nghi này là thuật toán mạng nơ ron gồm 5 lớp được huấn luyện dựa trên phương pháp mờ Takagi-Sugeno. Lớp thứ nhất bao gồm vectơ sai số và đạo hàm sai số của dòng điện stator. Lớp thứ hai là lớp mờ hoá. Lớp thứ ba thực hiện tính toán hệ thống theo luật mờ với ma trận 5×5 . Lớp thứ tư là lớp giải mờ. Lớp cuối cùng sẽ có đáp ứng điện áp stator theo yêu cầu đưa đến bộ nghịch lưu nguồn áp [13]. Hiệu quả của bộ điều khiển ANFIS sẽ so sánh với bộ điều khiển PI bằng mô phỏng MATLAB/SIMULINK.

Bài báo trình bày bao gồm 5 phần chính. Phần thứ nhất trình bày tổng quan AFPMSM và tính cấp thiết nghiên cứu điều khiển mô-men cho hệ truyền động kéo. Tiếp theo, mô hình toán học hệ truyền động kéo ô tô điện được thể hiện qua phần 2. Dựa vào các phương trình toán học tại phần 2 để thiết kế bộ điều khiển mô-men thích nghi mờ-nơ ron tại phần 3. Tính đúng đắn của lý thuyết sẽ được minh chứng bằng kết quả mô phỏng MATLAB về các đáp ứng dòng điện, mô men giữa bộ điều khiển ANFIS với

bộ điều khiển PI tại phần 4. Cuối cùng, bài báo đưa ra kết luận những đóng góp của nghiên cứu và kiến nghị hướng giải quyết trong tương lai, để cải thiện, nâng cao đáp ứng mô-men, độ bền vững hệ truyền động kéo trong lý thuyết cũng như triển khai thực nghiệm.

2. Mô hình toán học động cơ AFPMSM và xe ô tô điện

2.1. Mô hình toán học động cơ AFPMSM 1 mặt

Động cơ AFPMSM một mặt có nghĩa động cơ AFPMSM có một stator và một rotor. Vì vậy động cơ AFPMSM có thể sử dụng mô hình động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) [14]. Tuy nhiên, mô hình toán học động cơ AFPMSM có sự khác biệt về giá trị tham số cuộn dây stator và Back-EMF động cơ được tạo ra bởi một nam châm vĩnh cửu và một cuộn dây kích từ không khác nhau.

Phương trình điện áp stato trong hệ quy chiếu $d-q$ được tính toán theo công thức (1) và (2).

- Phương trình điện áp được viết như sau:

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sq} + \frac{dL_{sq}}{dt} & \omega_m L_{sd} \\ -\omega_m L_{sd} & R_{sd} + \frac{dL_{sd}}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_m \lambda_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

- Phương trình mô-men được xác định như sau:

$$T_m = \frac{3P}{2} (L_{sd} i_{sd} + \lambda_m) i_{sq} - (L_{sq} i_{sq}) \quad (2)$$

Trong đó L_{sd} và L_{sq} là điện cảm đồng bộ trên trục d và q ; λ_m là từ thông; i_{sd} ; i_{sq} là dòng điện stator trên trục d và q ; P là số đôi cực.

Vì từ thông là một hằng số, nên mômen tỷ lệ thuận với dòng stator trục q . Phương trình mô-men điện từ được cho bởi công thức (3):

$$T_m = T_L + B_1 \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3)$$

Trong đó: T_L là mômen tải, B_1 là hệ số ma sát, J là mômen quán tính, ω_m là tốc độ rotor (rad/s)

2.2. Mô hình toán học cho xe ô tô điện

- *Mô tả bánh xe*

Mô hình bánh xe truyền động như công thức (4):

$$\begin{cases} v_{wh} = \omega_{wh} R_{wh} \\ T_{wh} = T_L = F_t R_{wh} \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó: T_{wh} là mô-men tác động lên bánh xe; ω_{wh} là tốc độ bánh xe; R_{wh} là bán kính bánh xe; F_t là lực cản; T_L là mô men tải.

Khi bánh xe tì lên mặt đường với lực N và được truyền động bởi mô men là T_{wh} thì xe sẽ tác động lên mặt đường một lực F , tương ứng thì mặt đường tác động ngược lại xe một lực có cùng giá trị ngược hướng là F_t . Trong trường hợp này thì F_t là lực ma sát và là thành phần lực có ích tạo ra chuyển động của xe với vận tốc V_x

$$F_t = m_v \cdot g \cdot \mu \quad (5)$$

Áp dụng định luật II newton cho các thành phần ngoại lực tác dụng lên thân xe ta có phương trình:

$$m_v \frac{dv_{ev}}{dt} = F_t - F_{aero} - F_{roll} - m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (6)$$

Trong đó, F_t : là lực kéo của xe; F_{aero} : là lực cản khí động học hay lực cản không khí; F_{roll} : là lực ma sát lăn của bánh xe; m_v : là tổng khối lượng của xe; g : là gia tốc trọng trường; α : là góc nghiêng của đường mà xe đang di chuyển; μ : hệ số bám.

- Lực cản không khí

$$F_{aero} = \frac{\rho C_d A_F}{2} (v_{ev} + v_{wind})^2 \quad (7)$$

Trong một số trường hợp hoặc trong mô phỏng ta có thể coi vận tốc gió $v_{wind} = 0$

Trong đó, ρ : là mật độ khối lượng của không khí; C_d : là hệ số cản khí động học; A_F : là khu vực cản phía trước của xe (diện tích mặt cản gió).

- Lực cản lăn tồn tại trong trường hợp lốp bị non

$$F_{roll} = f_r F_{zY} \quad (8)$$

$$F_{zY} = m_v g \cos(\alpha) \quad (9)$$

Trong đó: F_{zY} là phản lực mặt đường theo phương thẳng đứng, f_r là hệ số cản lăn.

3. Thiết kế bộ điều khiển dòng điện i_{sd} theo thuật toán ANFIS

Cấu trúc của hệ thống mờ-nơon bao gồm năm lớp được phân loại lần lượt là lớp đầu vào, lớp chức năng thành viên đầu vào, lớp quy tắc, lớp chức năng thành viên đầu ra và lớp đầu ra. Cây quyết định giao thoa mờ là phân loại dữ liệu thành một trong các mô hình hồi quy tuyến tính 2^n (hoặc P^n) để giảm thiểu tổng sai số bình phương (SSE):

$$SSE = \sum_i er_i^2 \quad (10)$$

Trong đó, n là số biến đầu vào, P là số phân chia mờ cho mỗi biến đầu vào và er_i^2 là sai số giữa đầu ra mong muốn và thực tế.

Bộ điều khiển ANFIS dòng điện i_{sd} gồm 2 vector đầu vào là sai số (e) giữa i_{sd}^* với i_{sd} và tích phân sai số dòng điện stator (Δe). Tín hiệu vào được mờ hóa thành 5 hàm chức năng hình tam giác như Negative Big (NB), Negative Small (NS), Equal Zero (ZE), Positive Small (PS), Positive Big (PB). Vì vậy ta có $5 \times 5 = 25$ luật mờ hợp thành với đầu ra theo mô hình Sugeno bậc nhất hai đầu vào:

Nếu x_1 là A_1 (NB) và x_2 là B_1 (NB), thì $f_1 = p_1 e + q_1 \Delta e + r_1$

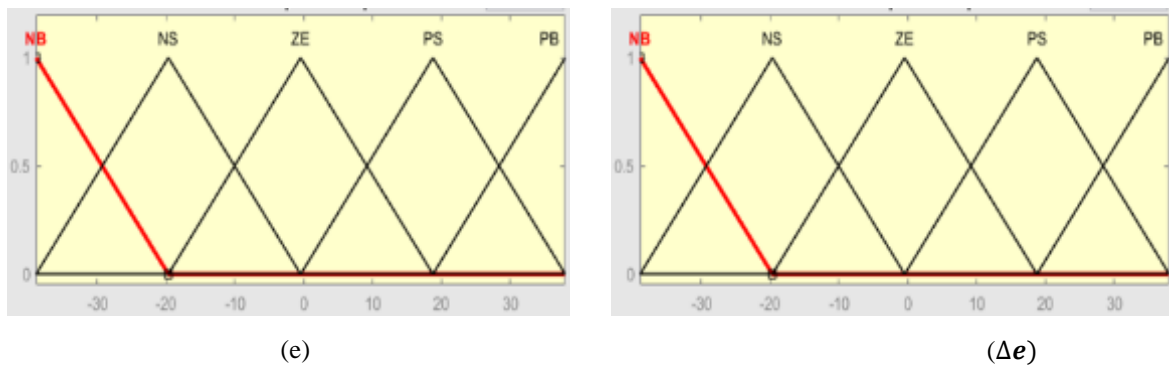
Nếu x_1 là A_1 (NB) và x_2 là B_2 (NS), thì $f_2 = p_2 e + q_2 \Delta e + r_2$

Nếu x_1 là A_1 (NB) và x_2 là B_3 (ZE), thì $f_3 = p_3 e + q_3 \Delta e + r_3$

⋮

Nếu x_1 là A_5 (PB) và x_2 là B_5 (PB), thì $f_{25} = p_{25} e + q_{25} \Delta e + r_{25}$

Trong đó: A_i và B_i là các tập mờ tiền đề và các tham số p_i , q_i và r_i là các tham số thiết kế mờ được tính toán trong quá trình huấn luyện ($i=1, 2, \dots, n$). Cấu trúc mờ-nơon hai đầu vào và một đầu ra được đưa ra như hình 1.



Hình 1. Hai tín hiệu đầu vào của bộ điều khiển ANFIS

Bộ điều khiển mô men ANFIS được thực hiện 5 lớp như sau:

Lớp thứ 1: Quá trình mờ hóa diễn ra tín hiệu vào được mờ hóa thành 5 hàm chức năng dạng hình tam giác. Mỗi giá trị đầu ra của lớp thứ nhất ta có thể dễ dàng tính được một giá trị chức năng kí hiệu là μ .

$$O_i^{layer1} = \mu_{A_i}(e) \quad (i=1,2, \dots, 5) \quad (11)$$

$$O_i^{layer1} = \mu_{B_i}(\Delta e) \quad (i=1,2, \dots, 5) \quad (12)$$

Trong đó: i là cấp thành viên của tập dữ liệu ($A_1, A_2, B_1, B_2, \dots, A_5, B_5$) và O_i^1 là đầu ra của nút thứ i trong lớp 1.

Lớp thứ 2: Là kiểm tra trọng số của mỗi hàm. Tại lớp này nhận các giá trị đầu vào từ lớp đầu tiên và hoạt động như các hàm tối ưu để biểu diễn các tập dữ liệu của các biến đầu vào tương ứng. Đầu ra của nút này được trình bày như sau:

$$O_1^{layer2} = w_1 = \mu_{A_1}(e) \times \mu_{B_1}(\Delta e) \quad (13)$$

$$O_2^{layer2} = w_2 = \mu_{A_1}(e) \times \mu_{B_2}(\Delta e) \quad (14)$$

$$O_3^{layer2} = w_3 = \mu_{A_1}(e) \times \mu_{B_3}(\Delta e) \quad (15)$$

⋮

$$O_{25}^{layer2} = w_{25} = \mu_{A_1}(e) \times \mu_{B_5}(\Delta e) \quad (16)$$

Lớp 3: Là lớp quy tắc và nhận đầu vào từ lớp trước. Mỗi nút (mỗi nơ-ron) trong lớp này thực hiện việc so khớp với điều kiện của các quy tắc. Lớp này tính toán mức độ kích hoạt của mỗi quy tắc và số lớp tương đương với số quy tắc mờ. Mỗi nút của lớp này tính toán trọng số sẽ chuẩn hóa. Các nút của lớp 3 tính toán tỷ lệ giữa cường độ kích hoạt của quy tắc so với tổng của tất cả các quy tắc đang kích hoạt:

$$O_i^{layer3} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2 + \dots + w_{25}} \quad (i=1,2, \dots, 25) \quad (17)$$

Lớp 4: Giải mờ cung cấp các giá trị đầu ra do suy luận các quy tắc. Đầu ra nút được tính bằng cách nhân giá trị đầu ra lớp 3 và quy tắc f tương ứng:

$$O_i^{layer4} = \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i(p_i e + q_i \Delta e + r_i) \quad (i=1,2, \dots, 25) \quad (18)$$

Lớp 5: Được gọi là lớp đầu ra tổng hợp tất cả các đầu vào đến từ lớp 4 và chuyển đổi kết quả phân loại mờ thành giá trị theo yêu cầu.

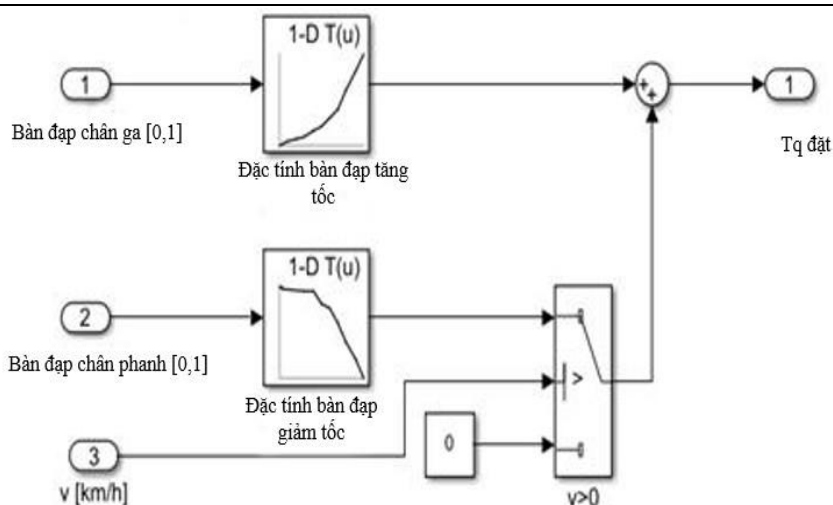
$$O_i^{layer5} = \bar{w}_i f_i(p_i e + q_i \Delta e + r_i) \quad (19)$$

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Xây dựng quỹ đạo chân ga, phanh và chế độ vận hành của xe ô tô điện

Quỹ đạo đặt chân ga và chân phanh của xe điện được xây dựng theo hàm $y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Quỹ đạo chân ga, phanh của xe ô tô điện được xây dựng như hình 2.

Trong đó: F là hàm có thể lấy qua thực nghiệm. Có nghĩa là: Giá trị đầu ra được tính bằng cách tra cứu hoặc nội suy bằng giá trị mà bạn xác định bằng các tham số khối theo phương pháp như tuyến tính (độ dốc tuyến tính), Lagrange (Lagrange tuyến tính), điểm gần nhất, khối spline, và các phương pháp nội suy spline Akima. Hàm Fcos thể có kích thước từ 1 – 30 giá trị. Bên cạnh đó đầu vào thứ nhất xác định điểm ngắt thứ nguyên (hàng), đầu vào thứ hai xác định các điểm ngắt thứ nguyên (cột).



Hình 2. Quy đạo chân ga và phanh của xe ô tô điện

4.2. Kết quả mô phỏng và đánh giá

4.2.1. Chế độ vận hành

Chế độ vận hành của xe ô tô điện được xây dựng như sau:

- Ban đầu xe đứng yên vận tốc $v = 0$ chân ga và chân phanh đều không tác động.
- Khi chân ga tác động xe bắt đầu tăng tốc vận tốc $v > 0$ khối so sánh điều kiện chuyển trạng thái. Mô men đặt T_{e^*} được xác định bằng cộng giá trị đầu ra của bảng nội suy giữa chân ga và chân phanh. Cấu trúc điều khiển hệ thống truyền động kéo cho ô tô điện dùng động cơ AFPMSM tích hợp bánh xe như hình 3.

Để đánh giá hiệu quả bộ điều khiển cho hệ thống truyền động kéo cho ô tô điện dùng động cơ AFPMSM tích hợp bánh xe, hệ thống được mô phỏng trên MATLAB với kịch bản mô phỏng như sau:

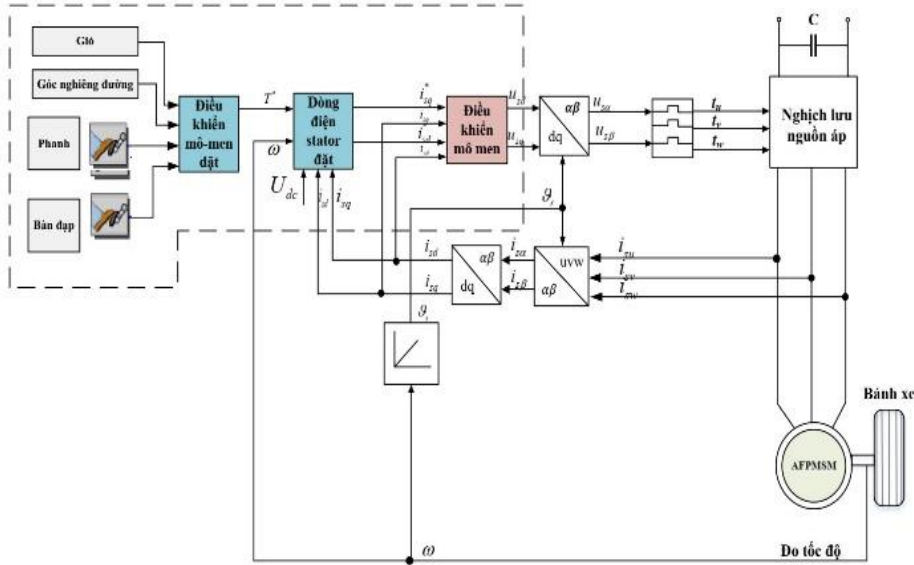
- Giả thiết gia tốc độ của gió bằng 0.
- Xe di chuyển trên đường bằng phẳng nhưng tại thời điểm $t = 3.5s$ đến $4.3s$ xe xuống dốc.
- Tại thời điểm $t = 0s$, xe bắt đầu tăng tốc giá trị chân ga tăng từ 0 đến 1 sau $0,45s$. Mô-men đặt tối đa $205 Nm$ và duy trì trong $2s$.
- Tại $t = 2s$ xe bắt đầu giảm tốc độ và phanh đạt giá trị từ 0 đến 1 tại thời điểm $t = 3,5s$ mô-men giảm dần tới giá trị $-205 Nm$ và trở về giá trị 0 tại thời điểm $t = 4,66s$.

Bên cạnh đó, để đánh giá hiệu quả của giải pháp điều khiển đề xuất ANFIS sẽ được so sánh với bộ điều khiển PI theo hai trường hợp:

- + Thông số động cơ không thay đổi
- + Thông số L_d, L_q thay đổi 20%.)

4.2.2. Trường hợp 1: Thông số L_d, L_q của động cơ AFPMSM là hằng số

Bộ điều khiển PI được thiết kế như sau: Để thiết kế bộ điều khiển mô-men cho động cơ AFPMSM thì cần hiểu rõ về sự tương tác của động cơ, biến tần và bộ điều khiển dòng điện. Coi hệ số khuếch đại của biến tần là K_r và hằng số thời gian của biến tần là T_r , bằng một nửa khoảng thời gian của tần số sóng mang PWM. Nếu hiệu suất mong muốn của vòng điều khiển dòng điện giống với hệ thống là một khâu trễ bậc nhất. Hàm truyền đạt dòng điện được viết như công thức (20):



Hình 3. Cấu trúc điều khiển hệ thống truyền động động cơ AFPMSM tích hợp bánh xe

$$\begin{aligned} \frac{i_q}{i_q^*} &= \frac{(K_a K_i T_m) s}{K_a K_b + (T_m + K_a K_i T_m H_c) s + (T_m T_{af}) s^2} \\ &\cong \left(\frac{K_r T_m}{K_b} \right) \frac{s}{(1 + s T_1)(1 + s T_2)} \end{aligned} \quad (20)$$

Trong đó tham số của động cơ AFPMSM được đặt:

$$K_a = \frac{1}{R_s}; T_a = \frac{L_q}{R_s}; K_m = \frac{i}{B_r}; T_m = \frac{J}{B_i}; K_b = K_i K_m \lambda_{af}$$

Vì vậy các tham số của bộ điều khiển PI dòng điện stator trục d và q được xác định như công thức (21):

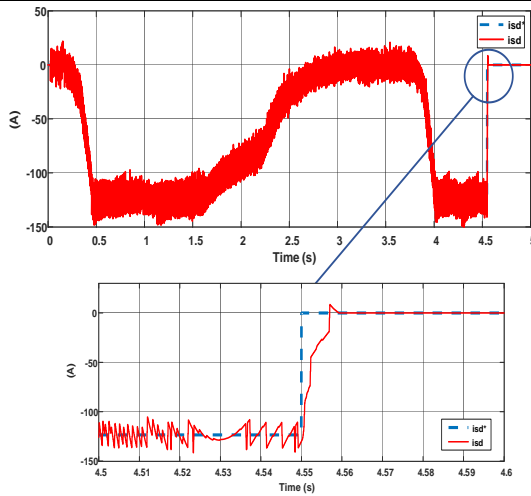
$$K_i = \frac{T_m K_r}{T_2 K_b}; T_i = T_1 \quad (21)$$

Bộ tham số khuếch đại, tích phân PID- I_d ($K_i=7.103004e+2$; $K_p=0.8779$); PID- I_q ($K_i=1.0615e+3$; $K_p=1.0744$).

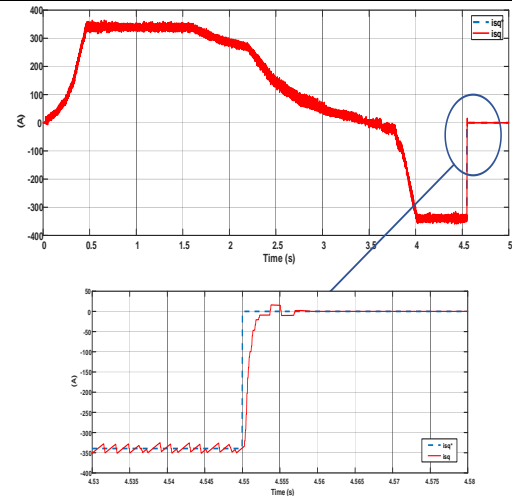
Các đáp ứng dòng điện stator của bộ điều khiển mô-men mờ-ron được so sánh với bộ điều khiển PI thể hiện qua hình 4 và hình 5. Bảng đánh giá các tiêu chí của đáp ứng dòng điện stator của bộ điều khiển PI và ANFIS được trình bày qua bảng 1.

Bảng 1. Kết quả đánh giá đáp ứng dòng điện stator của bộ điều khiển PI và ANFIS

Bộ ĐK/Tham số đánh giá	Bộ điều khiển PI	Bộ điều khiển ANFIS
Dòng điện stator i_{sd}		
Thời gian xác lập tăng tốc	0.4 (s)	0.4 (s)
Quá điều chỉnh	10%	0%
Dòng điện stator i_{sq}		
Thời gian xác lập	0.4 (s)	0.4 (s)
Quá điều chỉnh	10%	0%

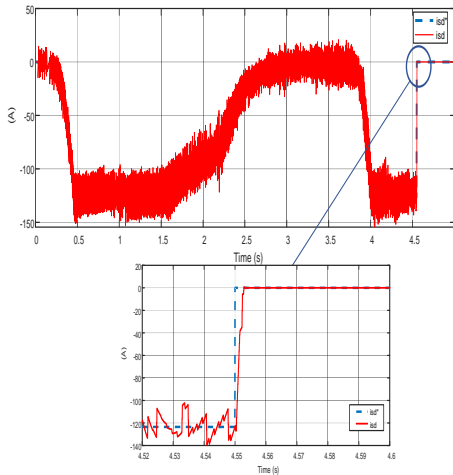


a. Đáp ứng dòng điện i_{sd}

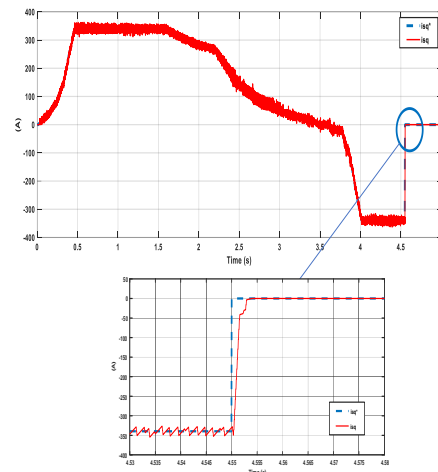


b. Đáp ứng dòng điện i_{sq}

Hình 4. Đáp ứng dòng điện i_{sd} , i_{sq} của bộ điều khiển PI



Đáp ứng dòng điện i_{sd}



Đáp ứng dòng điện i_{sq}

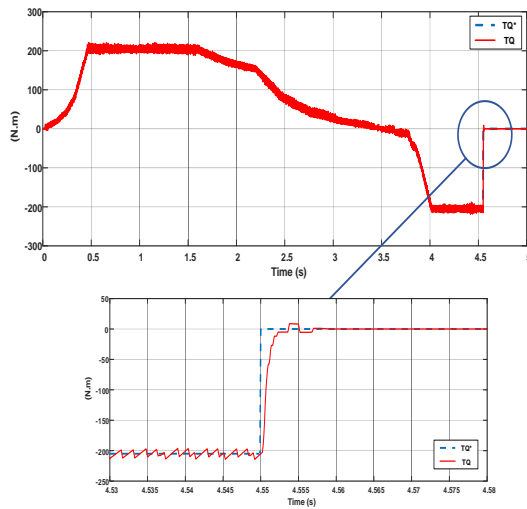
Hình 5. Đáp ứng dòng điện i_{sd} , i_{sq} của bộ điều khiển ANFIS

Qua kết quả mô phỏng hình 4 và hình 5 cho thấy rằng đáp ứng dòng điện stator cả hai bộ điều khiển có thời gian xác lập nhanh (0.4s), chính xác ở chế độ xác lập (tín hiệu thực bám tín hiệu đặt). Tuy nhiên bộ điều khiển đề xuất ANFIS cho kết quả khả quan hơn bộ điều khiển PI về quá điều chỉnh (không có quá điều chỉnh), trong khi đó bộ điều khiển PI với quá điều chỉnh dòng điện tại thời điểm quá độ là 10%.

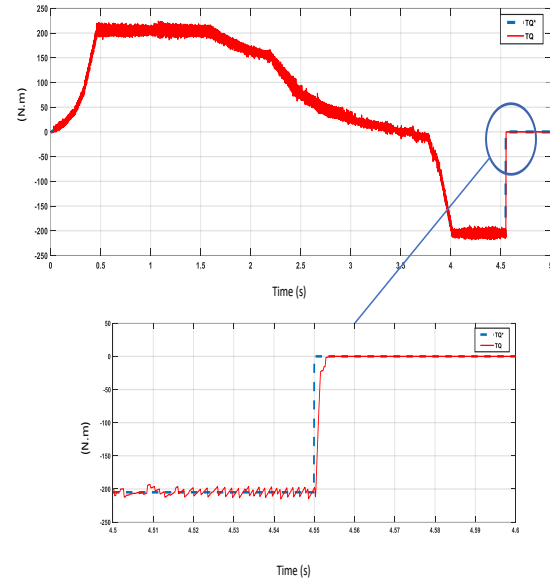
Các đáp ứng mô men và tốc độ của bộ điều khiển mô men ANFIS được so sánh với bộ điều khiển PI thể hiện qua hình 6 và hình 7. Bảng đánh giá các tiêu chí của đáp ứng mô-men của bộ điều khiển PI và ANFIS được thể hiện qua bảng 2.

Bảng 2. Kết quả đánh giá đáp ứng mô-men, tốc độ của bộ điều khiển PI và ANFIS

Bộ ĐK/Tham số đánh giá	Bộ điều khiển PI	Bộ điều khiển ANFIS
Đáp ứng mô-men		
Hình dáng đáp ứng	Giống đáp ứng dòng điện i_{sq}	Giống đáp ứng dòng điện i_{sq}
Độ đập mạch mô -men	8%	3%



Hình 6. Đáp ứng mô-men của bộ điều khiển PI



Hình 7. Đáp ứng mô-men của bộ ĐK ANFIS

Dựa trên kết quả mô phỏng hình 6 và hình 7 nhận thấy rằng đáp ứng mô-men của 2 bộ điều khiển có hình dáng giống đáp ứng dòng điện stator i_{sq} . Tuy nhiên, bộ điều khiển ANFIS cho đáp ứng mô-men có biên độ đập mạch nhỏ (3%) hơn so với biên độ đập mạch mô-men bộ điều khiển PI (8%).

Dựa vào những kết quả mô phỏng trong trường hợp các thông số động cơ AFPMSM là hằng số, nhận thấy rằng hai bộ điều khiển PI và ANFIS phát huy hiệu quả tốt, trong đó bộ điều khiển mô-men ANFIS cho kết quả khả quan hơn, nhưng chưa rõ ràng so với bộ điều khiển PI. Chính vì vậy, bài báo sẽ đánh giá hiệu quả của hai bộ điều khiển này trong trường hợp thông số L_d , L_q thay đổi tại mục 4.2.3.

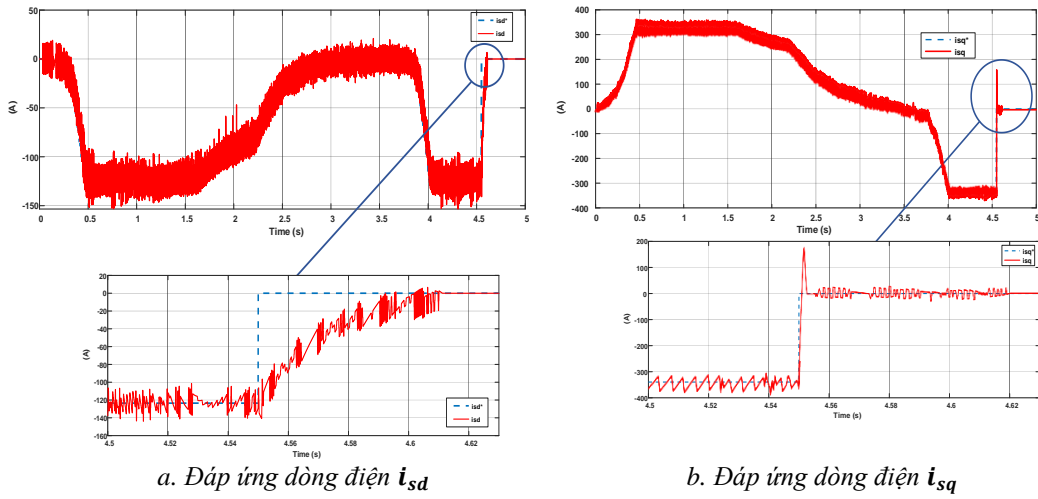
4.2.3. Thông số L_d , L_q của động cơ AFPMSM thay đổi 20%

Các đáp ứng dòng điện stator của bộ điều khiển mô men ANFIS được so sánh với bộ điều khiển PI thể hiện qua hình 8 và hình 9 Bảng đánh giá các tiêu chí của đáp ứng dòng điện stator của bộ điều khiển PI và ANFIS được trình bày qua bảng 3.

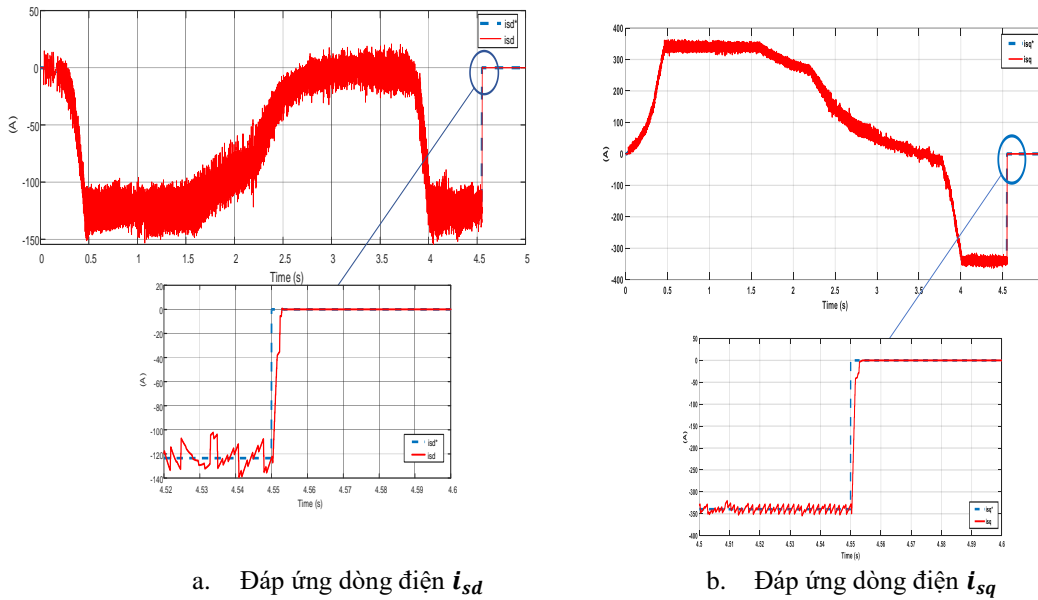
Bảng 3. Kết quả đánh giá đáp ứng dòng điện stator của bộ điều khiển PI và ANFIS

Bộ ĐK/Tham số đánh giá	Bộ điều khiển PI	Bộ điều khiển ANFIS
Dòng điện stator i_{sd}		
Thời gian xác lập tăng tốc	0.5 (s)	0.5 (s)
Quá điều chỉnh	10%	0%
Dòng điện stator i_{sq}		
Thời gian xác lập	0.5 (s)	0.5 (s)
Quá điều chỉnh	20%	0%

Qua kết quả hình 8 và hình 9 cho thấy rằng đáp ứng dòng điện stator cả hai phương pháp điều khiển có thời gian xác lập như nhau (0.5s), chính xác ở chế độ xác lập (tín hiệu thực bám tín hiệu đặt). Tuy nhiên bộ điều khiển đề xuất ANFIS cho kết quả khả quan hơn bộ điều khiển PI về độ quá điều chỉnh (không có quá điều chỉnh), trong khi đó bộ điều khiển PI với quá điều chỉnh dòng điện i_{sd} là 10% và i_{sq} là 20%.



Hình 8. Đáp ứng dòng điện i_{sd} , i_{sq} của bộ điều khiển PI

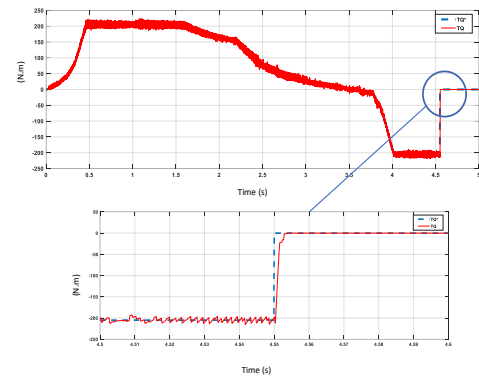
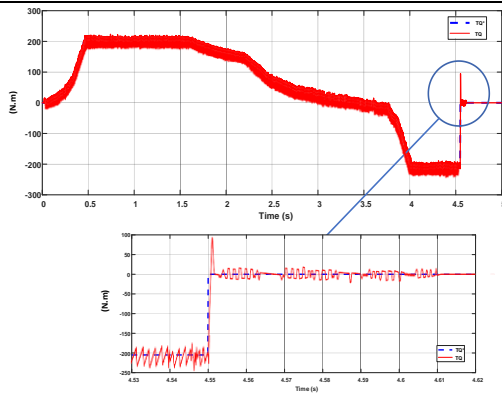


Hình 9. Đáp ứng dòng điện i_{sd} , i_{sq} của bộ điều khiển ANFIS

Các đáp ứng mô men của bộ điều khiển mô men ANFIS được so sánh với bộ điều khiển PI thể hiện qua hình 10 và hình 11. Bảng đánh giá các tiêu chí của đáp ứng mô-men và tốc độ của bộ điều khiển PI và ANFIS được thể hiện qua bảng 4.

Bảng 4. Kết quả đánh giá đáp ứng mô-men, tốc độ của bộ điều khiển PI và ANFIS

Bộ DK/Tham số đánh giá	Bộ điều khiển PI	Bộ điều khiển ANFIS
Đáp ứng mô-men		
Độ đập mạch mô -men	30%	5%
Đáp ứng tốc độ		
Thời gian xác lập tăng tốc	2.2 (s)	2.2 (s)
Quá điều chỉnh	20%	0%



Hình 10. Đáp ứng mô-men của bộ điều khiển PI

Hình 11. Đáp ứng mô-men của bộ điều khiển ANFIS

Qua kết quả hình 10 và hình 11 nhận thấy rằng mô men của hai bộ điều khiển có hình dạng giống đáp ứng dòng điện i_{sq} . Bộ điều khiển ANFIS cho đáp ứng mô-men có độ đập mạch nhỏ hơn (5%) so với bộ điều khiển PI (30%).

Dựa trên những kết quả mô phỏng khi thông số động cơ AFPMSM L_d, L_q tăng lên 20%, nhận thấy đáp ứng mô-men của cấu trúc điều khiển ANFIS nhanh và bám sát giá trị đặt, nhanh hơn bộ điều khiển PI (đáp ứng mô-men chậm hơn, biên độ quá điều chỉnh cao.) Bên cạnh đó, biên độ đập mạch mô-men của bộ điều khiển ANFIS nhỏ hơn so với biên độ đập mạch mô-men bộ điều khiển PI. Vì vậy cấu trúc điều khiển ANFIS cho độ bền vững hệ thống tốt hơn so với cấu trúc điều khiển PI.

5. Kết luận

Công trình nghiên cứu đã thiết kế thành công bộ điều khiển mô-men động cơ AFPMSM một mặt tích hợp bánh xe điện cho hệ truyền động kéo ô tô điện theo phương pháp điều khiển thích nghi mờ-nơ ron (ANFIS). Bộ điều khiển mô-men này kết hợp ưu điểm của mô hình mờ Sugeno có chứa tập các quy tắc, và các lớp tiếp theo được thực hiện theo thuật toán lan truyền ngược của mạng nơ-ron, sao cho đáp ứng điện áp trục d và q theo yêu cầu. Hiệu quả của bộ điều khiển mô-men ANFIS cho kết quả khả quan hơn bộ điều khiển PI trong trường hợp lý tưởng và thông số động cơ thay đổi. Vì vậy tính bền vững của hệ truyền động điện kéo được cải thiện và nâng cao. Bộ điều khiển ANFIS này thiết kế không phụ thuộc vào mô hình toán học AFPMSM vì vậy thực hiện thiết kế đơn giản. Tuy nhiên tại các kết quả mô phỏng MATLAB nhận thấy đáp ứng dòng điện, mô-men vẫn tồn tại đập mạch lớn. Vì vậy, điều khiển mô-men AFPMSM cần thiết nghiên cứu, thiết kế sử dụng các giải pháp điều khiển thông minh, trí tuệ nhân tạo, điều khiển lai khác và các bộ điều khiển có thể triển khai thực nghiệm xuống AFPMSM trong tương lai.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2023-DT-001TĐ".

Xung đột quyền lợi

Các tác giả tuyên bố không có xung đột quyền lợi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] X. Zhang, D. Göhlich, and J. Li, "Energy-Efficient Torque Allocation Design of Traction and Regenerative Braking for Distributed Drive Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 1, pp. 285-295, Jan. 2018.
- [2] M. Yıldırım, M. Polat, and H. Kurum, "A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles," in *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, Antalya, Turkey, 21-24 Sept. 2014.
- [3] T. A. Zarma, A. A. Galadima, and A. A. Maruf, "Review of Motors for Electrical Vehicles," *Journal of Scientific Research and Reports*, Oct. 2019, doi: 10.9734/jsrr/2019/v24i630170.
- [4] J. Shazly, S. Wahsh, and A. Yassin, "Thermal modeling of an AFPMSM: A review," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 18-26, May 2015.
- [5] S. M. Saleh and A. Y. Hassan, "Sensorless based SVPWM-DTC of AFPMSM for electric vehicles," *Sci. Rep.*, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-12825-x.

- [6] X. D. T. Garcia *et al.*, “Comparison between FOC and DTC Strategies for Permanent Magnet Synchronous Motors,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5, pp. 76-81, 2011.
- [7] S. Wang, J. Zhao, T. Liu, and M. Hua, “Adaptive Robust Control System for Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor of Electric Medium Bus Based on Torque Optimal Distribution Method,” *Energies*, 2019, doi:10.3390/en1224468.
- [8] D. Crocco, M. D. Agostinis, N. Vincenzi, “Structural Analysis of an Articulated Urban Bus Chassis via Finite Element Method: A Methodology Applied to a Case Study,” *J. Mech. Eng.*, vol. 57, pp. 799–809, 2011.
- [9] V. T. Ha, N. T. Lam, P. V. Tuan, and N. H. Quang, “Experiment-based Comparative Analysis of Nonlinear Speed Control Methods for Induction Motors,” *J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 53, no. 2, p. 210212, 2021.
- [10] P. Bhatt, H. Mehar, and M. Sahajwani, “Electrical Motors for Electric Vehicle – A Comparative Study,” *Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA)*, 2019, doi: 10.2139/ssrn.3364887.
- [11] D. Tan and C. Lu, “The Influence of the Magnetic Force Generated by the In-Wheel Motor on the Vertical and Lateral Coupling Dynamics of Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4655-4668, 2016.
- [12] M. R. Ishaque *et al.*, “Fuzzy Logic-Based Duty Cycle Controller for the Energy Management System of Hybrid Electric Vehicles with Hybrid Energy Storage System,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 7, p. 3192, 2021.
- [13] N. S. Farhan, F. A. Hasan, A. R. D. Humud, “Field oriented control of AFPMSM for electrical vehicle using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS),” *Engineering and Technology Journal*, vol. 39, no. 10, pp.1571-1582, 2021.
- [14] R. Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Prentice-Hall Of India Pvt. Limited, 2001.

TÓM TẮT TIỂU SỬ CỦA CÁC TÁC GIẢ BẰNG TIẾNG ANH.



Dao Duy Hoang was born in 1998 and is a master's student at the School of Electrical and Electronics Engineering, Hanoi University of Science and Technology. The main research direction is electric drive control and power electronics in industry and transportation. Email: Hoang_DD21118M@sis.hust.edu.vn



Tran Trong Minh received his Ph.D. in 2007 from Hanoi University of Science and Technology. In 2016, Dr. Tran Trong Minh received the title of Associate Professor. Main research direction: developing new power semiconductor converter structures; Building and developing applications of power electronics; problems related to control and automation of industrial processes. Is the primary author and co-author of many articles and conference reports at home and abroad. Among them is the author of Power Electronics Policy (KHKT publishing house-2008), Power Electronics Textbook (education publisher-2012), and co-author of books such as Integrated Production Systems. Computer (KHKT publishing house-2006). Email: minh.trantrong@hust.edu.vn



Vo Thanh Ha received her Ph.D. in Control and Automation Engineering from Hanoi University of Science and Technology, Vietnam, in 2020. She has been a lecturer at the University of Transport and Communications since 2005. Her research interests include electric drives, power electronics, control applications for traction drives, robots, autonomous vehicles, driving assistance systems for electric cars, and renewable energy. Email: yothanhha.ktd@utc.edu.vn. ORCID:

<https://orcid.org/0000-0003-4023-260X>