

MODEL PREDICTIVE CONTROL AND NEURAL-FUZZY FOR ELECTRIC DRIVE SYSTEMS OF ELECTRIC VEHICLE

Tran Ngoc Son^{1*}, Lai Khac Lai², Le Thi Thu Ha²

¹University of Economics – Technology for Industries

²TNU – University of Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	25/7/2023	Electric driver systems for electric vehicles provide the traction needed to move the vehicle at the driver's command. They have the following characteristics: Must have a wide speed control range; high torque when starting and climbing; convenient control; stable working in all environmental conditions; have the ability to regenerate energy when braking and when going downhill. This paper proposes the application of an adaptive fuzzy neural system and model-based predictive control for electric vehicle transmission using 3-phase asynchronous motors. Model predictive control is used for torque control loops and adaptive fuzzy neural control is used for speed loops. The results are checked through simulation on Matlab - Simulink software when the vehicle is working in the conditions of unchanged speed and torque and when the vehicle is working in the conditions of changed speed and torque showing that the system is suitable for the vehicle's operating conditions.
Revised:	03/10/2023	
Published:	03/10/2023	
KEYWORDS		
Batter Electric Vehicle		
Model Predictive Control		
Adaptive Neuro-Fuzzy		
Electric Vehicle		
Asynchronous Motor		

ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO THEO MÔ HÌNH VÀ NƠN MỜ CHO HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG XE ĐIỆN

Trần Ngọc Sơn^{1*}, Lại Khắc Lai², Lê Thị Thu Hà²

¹Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

²Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	25/7/2023	Hệ thống truyền động điện của xe điện có chức năng cung cấp công suất kéo cần thiết để di chuyển xe theo mệnh lệnh của người lái xe. Yêu cầu đối với hệ thống truyền động xe điện là chúng phải có dải điều khiển tốc độ rộng, mô men xoắn cao trong quá trình khởi động và leo dốc, thuận tiện trong điều khiển, làm việc ổn định trong điều kiện môi trường thay đổi và dễ dàng tái tạo năng lượng khi phanh và khi xuống dốc. Bài báo đề xuất ứng dụng hệ nơ ron mờ thích nghi và điều khiển dự báo theo mô hình cho truyền động xe điện sử dụng động cơ không đồng bộ 3 pha rotor lồng sóc, trong đó điều khiển dự báo được sử dụng cho mạch vòng điều khiển mô men, điều khiển nơ ron mờ thích nghi được sử dụng cho mạch vòng tốc độ. Kết quả được kiểm tra thông qua mô phỏng trên phần mềm Matlab - Simulink ứng với khi xe làm việc trong điều kiện tốc độ và mô men không thay đổi và khi xe làm việc trong điều kiện tốc độ và mô men thay đổi cho thấy hệ thống phù hợp với các điều kiện hoạt động của xe.
Ngày hoàn thiện:	03/10/2023	
Ngày đăng:	03/10/2023	
TỪ KHÓA		
Xe điện chạy bằng pin		
Điều khiển dự báo theo mô hình		
Nơ ron - mờ thích nghi		
Xe điện		
Động cơ không đồng bộ		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.8407>

* Corresponding author. Email: tnson@uneti.edu.vn

1. Giới thiệu

Với tình trạng khan hiếm nhiên liệu và mối lo ngại ngày càng tăng về tác động môi trường của các phương tiện giao thông, ngày nay các phương tiện chạy bằng động cơ đốt trong (IC) đang dần được thay thế bằng xe điện (EV), chúng có khả năng chạy bằng năng lượng được tạo ra từ các nguồn tái tạo như năng lượng mặt trời, thủy triều và gió, do đó loại bỏ sự phụ thuộc của chúng vào nhiên liệu hóa thạch không thể tái tạo. Xe điện cũng có thể cung cấp năng lượng từ bộ lưu trữ năng lượng của chúng khi đứng yên và có thể được tích hợp với lưới điện để quản lý năng lượng tổng thể [1].

Hệ thống truyền động điện của xe điện chạy bằng pin (BEV) có chức năng cung cấp công suất kéo cần thiết để di chuyển xe theo mệnh lệnh của người lái xe. Hiện nay, hệ thống truyền động điện có 2 nhóm, đó là hệ thống truyền động điện được chuyển đổi từ xe nhiên liệu truyền thống và hệ thống truyền động xe điện chuyên dụng. Đối với hệ thống truyền động điện được chuyển đổi từ xe nhiên liệu truyền thống về cơ bản chỉ thay thế động cơ nhiên liệu bằng động cơ điện, giữ nguyên kết cấu cơ khí truyền lực đến các bánh xe. Đối với hệ thống truyền động điện chuyên dụng áp dụng cho những xe điện thiết kế từ đầu, loại này có 2 cấu hình là cấu hình ngoài bánh và cấu hình trong bánh.

Động cơ sử dụng trong xe điện có thể là động cơ một chiều hoặc động cơ xoay chiều 3 pha, mỗi loại có ưu nhược điểm riêng và được lựa chọn áp dụng cho từng trường hợp cụ thể. Hiện nay người ta có xu hướng sử dụng động cơ xoay chiều 3 pha kết hợp với bộ biến đổi điện tử công suất, chúng có ưu điểm là chi phí thấp, hiệu quả cao, vận hành mạnh mẽ tin cậy [2].

Điều khiển hệ thống truyền động xe điện là yêu cầu quan trọng nhất trong điều khiển xe điện. Trong quá trình tăng tốc khi khởi động xe, điều quan trọng là phải có mô-men xoắn khởi động cao để xe có thể đạt tốc độ tối đa khi đang tải. Đây là khu vực của mô-men xoắn không đổi. Khi đạt đến tốc độ tối đa, chiếc xe sẽ hoạt động với công suất không đổi. Điều này đặt ra giới hạn về tốc độ mà phương tiện có thể đạt được khi điều khiển mô-men xoắn nhất định [3].

Đã có nhiều nghiên cứu và công việc được thực hiện trong lĩnh vực điều khiển hệ thống truyền động xe điện. Liu và cộng sự đã đưa ra nhận xét tổng quan về các chiến lược điều khiển máy điện trong xe điện [4]. Marcin Zelechowski và cộng sự đã đề xuất phương pháp điều chế véc tơ không gian điều khiển trực tiếp mô men xoắn hệ thống truyền động sử dụng động cơ không đồng bộ (KĐB) [5]. Các tác giả trong [6] đã đề xuất điều khiển dự báo cho robot di động sử dụng phương pháp tuyến tính hóa. Ahmed và các cộng sự đã đưa ra bộ điều khiển dự báo theo mô hình liên tục để điều khiển mô men động cơ không đồng bộ trong dải tốc độ rộng [7]. Các tác giả trong [8], [9] đã thực hiện so sánh giữa phương pháp điều khiển tựa từ thông (FOC) và phương pháp điều khiển mô-men xoắn trực tiếp, tập trung nhiều hơn vào việc so sánh giữa các triển khai khác nhau của chiến lược điều khiển mô-men xoắn trực tiếp (DTC) và đánh giá dựa trên các tiêu chí như độ gọn mô-men xoắn, độ gọn từ thông stato, tổng méo hài, ...

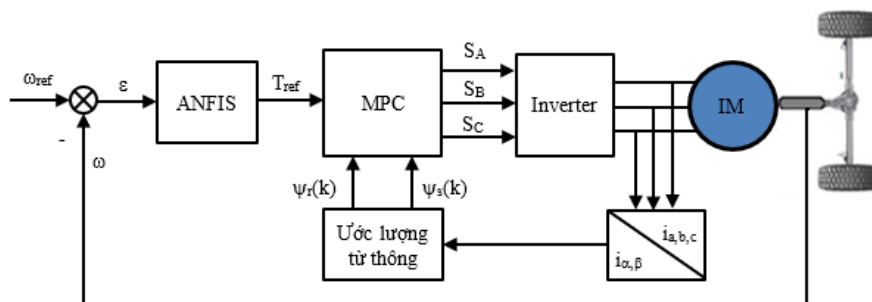
Bài báo này trình bày thuật toán điều khiển tốc độ và mô-men xoắn hệ thống biến tần - động cơ không đồng bộ trong truyền động xe điện dựa trên hệ mờ ron mờ và điều khiển dự báo theo mô hình (ANFIS-MPC). Bài báo được cấu trúc như sau: Sau phần giới thiệu, phần 2 trình bày cấu trúc hệ điều khiển và thiết kế mạch các vòng điều khiển, phần 3 trình bày kết quả mô phỏng để kiểm tra đáp ứng động của hệ thống theo hai kịch bản, ứng với khi hệ thống làm việc trong điều kiện tốt nhất và khi hệ thống làm việc trong điều kiện xấu nhất, phần cuối cùng là kết luận và kiến nghị.

2. Thuật toán ANFIS-MPC điều khiển hệ thống truyền động xe điện

2.1. Sơ đồ khối hệ thống

Hình 1 chỉ ra sơ đồ khối hệ thống truyền động xe điện sử dụng động cơ không đồng bộ rotor lồng sóc. Mạch lực gồm nghịch lưu nguồn áp với 6 van IGBT lắp theo sơ đồ cầu, cung cấp nguồn điện xoay chiều 3 pha có điện áp và tần số có thể điều khiển được cho động cơ không đồng bộ,

trục động cơ nối với bộ truyền động vi sai của xe. Giả thiết bỏ qua tổn hao và sai số của bộ truyền cơ khí. Bài toán điều khiển đặt ra là cần điều khiển ổn định tốc độ và mô men động cơ phù hợp với yêu cầu của xe điện, đó là chúng phải có dải điều khiển tốc độ rộng, mô men xoắn cao trong quá trình khởi động và leo dốc, thuận tiện trong điều khiển, làm việc ổn định trong điều kiện môi trường thay đổi và dễ dàng tái tạo năng lượng khi phanh và khi xuống dốc. Vấn đề điều khiển tái tạo năng lượng chưa được đề cập trong bài báo này.



Hình 1. Sơ đồ khối điều khiển dự báo động cơ KĐB cho xe điện

Mạch điều khiển gồm 2 mạch vòng như Hình 1, vòng điều khiển mô men (bên trong) sử dụng chiến lược điều khiển dự báo theo mô hình (MPC), vòng điều khiển tốc độ (bên ngoài) sử dụng bộ điều khiển mờ thích nghi (ANFIS).

2.2. Thiết kế bộ điều khiển MPC cho mạch vòng mô men

MPC là một trong những chiến lược điều khiển dưới dạng kỹ thuật số [1]. Ưu điểm của chiến lược điều khiển này là phản ứng linh hoạt; phù hợp với hệ thống MIMO với các ràng buộc và các hàm chi phí (hàm mục tiêu). Đối với nghịch lưu nguồn áp 3 pha có 8 trạng thái chuyển mạch khả dĩ được liệt kê trong Bảng 1. Bộ điều khiển dự báo tạo ra các tín hiệu điều khiển (S_A , S_B , S_C) để đóng mở các van IGBT của Inverter thỏa mãn hàm mục tiêu và các ràng buộc. Muốn vậy, cần phải xây dựng mô hình toán học hệ thống; xác định các biến điều khiển, biến dự báo, các ràng buộc; xây dựng hàm mục tiêu và chiến lược tối ưu hóa.

Bảng 1. Các trạng thái chuyển mạch của nghịch lưu

TT	Sa	Sb	Sc	Véc tơ điện áp
1	0	0	0	$V_0 = 0$
2	1	0	0	$V_1 = 2 \cdot V_{dc}/3$
3	1	1	0	$V_2 = \frac{V_{dc}}{3} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
4	0	1	0	$V_3 = -\frac{V_{dc}}{3} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
5	0	1	1	$V_4 = -2 \cdot V_{dc}/3$
6	0	0	1	$V_5 = -\frac{V_{dc}}{3} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
7	1	0	1	$V_6 = \frac{V_{dc}}{3} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
8	1	1	1	$V_7 = 0$

+ Mô hình toán:

Mô hình toán của động cơ không đồng bộ rotor lồng sóc được biểu diễn [10], [11].

$$\frac{u_s}{R_\sigma} = i_s + \tau_\sigma \frac{di_s}{dt} + j\omega_k \tau_\sigma i_s - \frac{k_r}{R_\sigma} \left(\frac{1}{\tau_s} - j\omega \right) \psi_r \quad (1)$$

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (2)$$

$$\psi_r + \tau_\sigma \frac{di_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \tau_r \psi_r - L_m i_s = 0 \quad (3)$$

$$\psi_r = L_m i_s + L_r i_r \quad (4)$$

Trong đó:

$$\tau_s = L_s / R_s; \tau_r = L_r / R_r; \sigma = 1 - L_m^2 / (L_s + L_r)$$

$$k_r = L_m / L_r; k_s = L_m / L_s; R_\sigma = R_s + R_r k_r^2; \tau_\sigma = \sigma L_s / R_\sigma$$

Rời rạc hóa (2) và (4) ta thu được các công thức ước lượng từ thông stator và từ thông rotor

$$\psi_s(k) = \psi_s(k-1) + T_s u_s(k) - T_s R_s i_s(k) \quad (5)$$

$$\psi_r(k) = \frac{L_r}{L_m} \psi_s(k) + i_s(k) \frac{L_m^2 - L_r L_s}{L_m} \quad (6)$$

Từ thông, dòng điện và mô men dự báo được tính:

$$\psi_s(k+1) = \hat{\psi}_s(k) + T_s v_s(k) - R_s T_s i_s(k) \quad (7)$$

$$i_s(k+1) = \left(1 + \frac{\tau_s}{\tau_\sigma}\right) i_s(k) + \frac{T_s}{T_\sigma + T_s} \left\{ \frac{1}{R_\sigma} \left[\left(\frac{k_r}{\tau_r} - k_r j\omega \right) \psi_r(k) + v_s(k) \right] \right\} \quad (8)$$

$$T_e(k+1) = \frac{3}{2} p^* \text{Im} \{ \bar{\psi}_s(k+1) \hat{i}_s(k+1) \} \quad (9)$$

+ Hàm mục tiêu và các ràng buộc:

Tại mỗi thời điểm một trong 8 trạng thái của Bảng 1 được lựa chọn thỏa mãn mục tiêu bám của mô men xoắn và từ thông stator động cơ theo tín hiệu tham chiếu với sai số nhỏ nhất, hàm mục tiêu được biểu diễn

$$J = (T_{ref} - T_e(k+1))^2 + \lambda (\psi_s^{ref} - \psi_s(k+1))^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

Trong đó

T_{ref}, ψ_s^{ref} là mô men tham chiếu và từ thông tham chiếu; $T_e(k+1), \psi_s(k+1)$ là mô men xoắn và từ thông dự báo; trọng số λ thể hiện sự khác nhau giữa các số hạng trong biểu thức hàm mục tiêu.

Các ràng buộc: để đảm bảo an toàn và tuổi thọ động cơ dòng điện stator động cơ trong quá trình khởi động không vượt quá 2,5 lần dòng điện định mức, tức là:

$$I_{\max} \leq I_n \quad (11)$$

Tương ứng, điều kiện ràng buộc đối với mô men xoắn là:

$$T_{\max} \leq T_n \quad (12)$$

Các bước thiết kế MPC như sau:

- (1) Nạp các thông số hệ thống, chọn chu kỳ trích mẫu (T_s) và giá trị hàm mục tiêu ban đầu (J_0)
- (2) Ước lượng từ thông stator $\psi_s(k)$ theo (5) và từ thông rotor $\psi_r(k)$ theo (6)
- (3) Cho $i = 1$ đến 8, Tính $\psi_s^i(k+1)$ theo (7), $i_s^i(k+1)$ theo (8), $T_e^i(k+1)$ theo (9) và J_k^i theo biểu thức (10)
- (4) Chọn trạng thái có $J_{(k+1)} = \min \{ J_k^i \}$; thu được S_A^k, S_B^k, S_C^k đưa đến điều khiển Inverter
- (5) Lặp lại quá trình tính từ bước 2 cho các chu kỳ tiếp theo

2.3. Thiết kế ANFIS cho mạch vòng tốc độ

ANFIS là một loại mạng nơ ron nhân tạo dựa trên hệ thống suy luận mờ Takagi-Sugeno [12], [13], ANFIS cho phép xây dựng ánh xạ vào - ra dựa trên kiến thức của con người (thông qua luật if-then của điều khiển mờ) kết hợp với các cặp dữ liệu vào - ra huấn luyện. Do kết hợp cả mạng nơ ron và logic mờ nên ANFIS phát huy được ưu điểm của cả 2 loại. Việc thiết kế ANFIS cho mạch vòng tốc độ được thực hiện qua các bước: Xây dựng cấu trúc, luật học, xây dựng tập dữ liệu huấn luyện và kiểm tra.

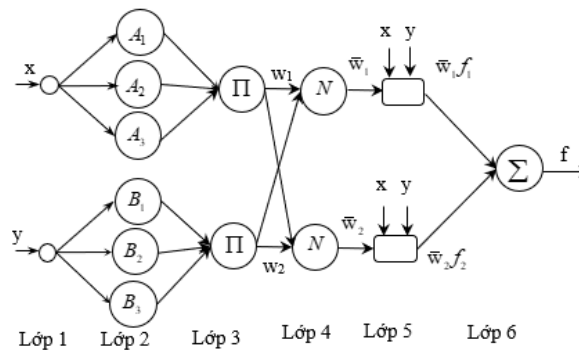
Cấu trúc của mạng nơ ron mờ như Hình 2, gồm 6 lớp, có 2 ngõ vào và 1 ngõ ra. Lớp 1 có 2 nút tương ứng với các tín hiệu vào; mỗi phần tử trong lớp 2 biểu diễn một liên thuộc có dạng hình chuông $\mu_{A_i}(x); \mu_{B_j}(y) (i=1,2,3; j=1,2,3)$; lớp 3 thực hiện phép tính lấy tích các hàm

liên thuộc; lớp 4 thực hiện phép tính $\bar{w}_k = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^2 w_j}$; lớp 5 thực hiện giải mờ và lớp 6 thực hiện

phép lấy tổng để có giá trị ở ngõ ra. Với cấu trúc như Hình 2 sẽ có cả thảy 9 luật học, luật học thứ k có dạng:

$$R_k : IF \mu_{A_i}(x_1) AND \mu_{B_j}(x_2) THEN f = p_k x + q_k y + h_k \quad (13)$$

Trong đó p_k, q_k, h_k là các tham số tuyến tính của mệnh đề kết luận được điều chỉnh trong quá trình huấn luyện.



Hình 2. Cấu trúc của ANFIS

Tập dữ liệu huấn luyện và kiểm tra thu được từ thực nghiệm hoặc mô phỏng. Trong bài báo này chúng tôi thu được tập dữ liệu huấn luyện bằng phương pháp mô phỏng dựa vào mô hình toán của động cơ. Bộ dữ liệu gồm 1200 mẫu, một số mẫu trong số đó được liệt kê trong Bảng 2.

Bảng 2. Một số mẫu của bộ dữ liệu huấn luyện

t	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉	t ₁₀	...
x	0.015	0.015	0.015	0.014	0.012	0.01	0.007	0.004	0.001	-0	...
y	6.588	6.588	6.588	6.588	6.588	6.588	6.588	6.588	6.588	6.588	...
f	31.07	31.11	31.09	31.02	30.9	30.72	30.51	30.28	30.07	29.89	...

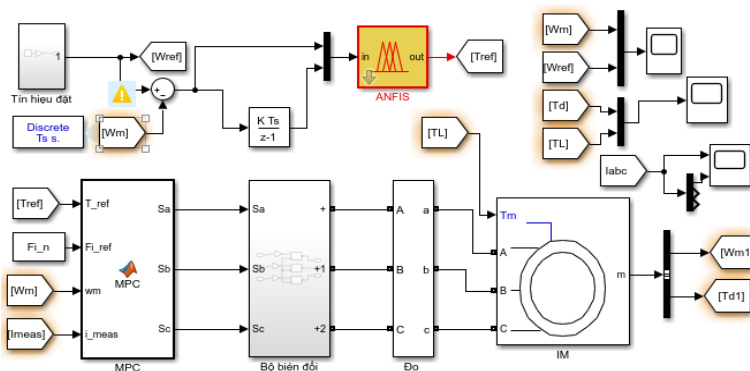
Sử dụng 70% số mẫu (tương ứng 840 mẫu) cho huấn luyện mạng, số mẫu còn lại sử dụng cho kiểm tra. Sau 100 kỳ huấn luyện ta được bộ điều khiển ANFIS với sai số cỡ 5.10^{-4} , sai số này đủ nhỏ có thể chấp nhận được.

3. Kết quả mô phỏng

Để kiểm chứng tính hiệu quả của các thuật toán ANFIS-MPC ở trên, ta tiến hành mô phỏng hệ thống trong MATLAB-Simulink. Sơ đồ mô phỏng được chỉ ra trên Hình 3. Biến tần nguồn điện

áp sử dụng IGBT lưỡng cực công cách li, động cơ KĐB ba pha có công suất định mức 15 kW được sử dụng với điều chế véc tơ không gian. Tần số chuyển đổi được sử dụng là 5 kHz. Các thông số mô phỏng được chỉ ra trong Bảng 3. Mô phỏng được thực hiện theo 2 kịch bản ứng với hai điều kiện làm việc của xe.

- Kịch bản 1: Xe làm việc với tốc độ không đổi và mô men xoắn không đổi.
- Kịch bản 2: Xe làm việc với tốc độ thay đổi và mô men xoắn thay đổi.



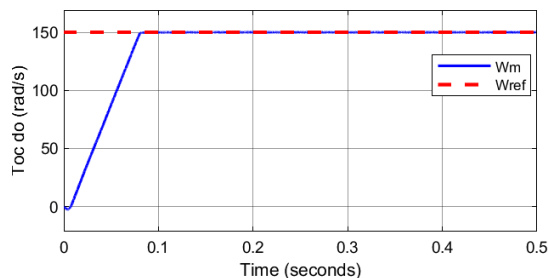
Hình 3. Sơ đồ mô phỏng

Bảng 3. Thông số hệ thống sử dụng trong mô phỏng

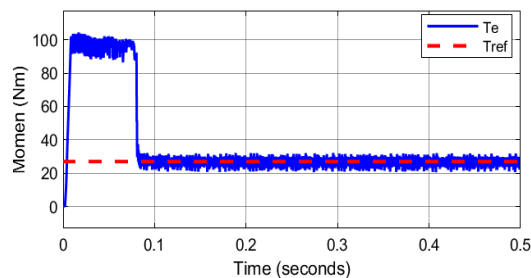
Thông số	Giá trị
Công suất động cơ	15 kw
Tốc độ định mức	1460 vòng/phút
Điện áp định mức	400 V
Mô men định mức	37 Nm
Điện trở, điện cảm Stator (R_s , L_s)	0,7384 Ω ; 0,003045 H
Điện trở, điện cảm rotor (R_r , L_r)	0,7402 Ω ; 0,003045 H
Hỗ cảm	0,1241 H
Mô men quán tính (J_1)	0,0343 kgm^2
Số đôi cực (p)	2
Mô men quán tính phần cơ khí (qui về trục động cơ (J_2))	1,1 kgm^2

3.1. Kết quả mô phỏng theo kịch bản 1

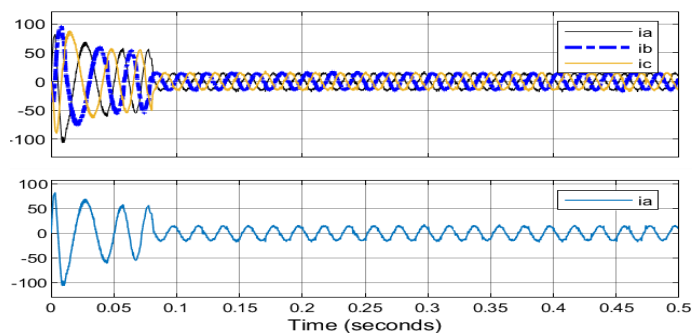
Trong trường hợp này, hệ thống được vận hành ở tốc độ và giá trị mô-men xoắn không đổi, cả hai đều là giá trị định mức của máy. Tốc độ định mức là 1460 vòng / phút, tức là xấp xỉ 150 rad/s, và mô-men xoắn là 27 Nm. Các kết quả mô phỏng được chỉ ra trên các hình từ Hình 4 đến Hình 6, trong đó: Hình 4 biểu diễn đặc tính động của tốc độ động cơ so với tốc độ đặt; Hình 5 biểu diễn mô-men xoắn điện từ của động cơ; Hình 6 biểu diễn dòng điện stator 3 pha và dòng điện pha A.



Hình 4. Tốc độ động cơ



Hình 5. Mô-men điện từ



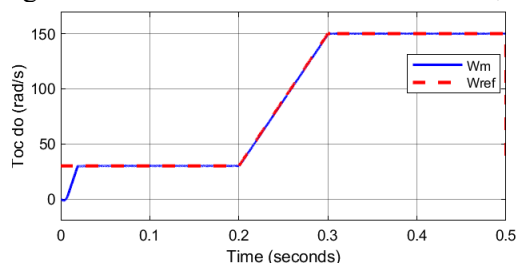
Hình 6. Dòng điện pha Stator

Nhận xét: Các kết quả mô phỏng chỉ ra rằng khi áp dụng tốc độ và mô-men xoắn định mức cho hệ thống tốc độ và động cơ bám theo giá trị đặt, mô men điện từ động cơ ban đầu tăng cao để gia tốc động cơ sau đó cũng bám theo giá trị định mức.

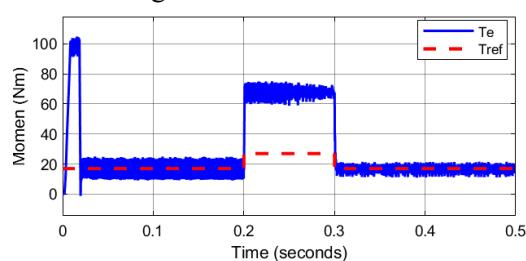
3.2. Kết quả mô phỏng theo kịch bản 2

Hệ thống được vận hành trong điều kiện khi cả tốc độ và mô-men xoắn thay đổi. Đối với tốc độ, hệ được khởi động và chạy với tốc độ 35 rad/s trong 2 giây sau đó tăng dần lên 150 rad/s để mô tả điều kiện tăng tốc. Đối với mô-men xoắn thay đổi thay đổi tại các thời điểm 0,2 giây và 0,3 giây. Các kết quả mô phỏng trong trường hợp này được chỉ ra trên các hình: Hình 7 biểu diễn đặc tính động của tốc độ động cơ so với tốc độ đặt; Hình 8 biểu diễn mô-men xoắn điện từ theo thời gian; Hình 9 biểu diễn dòng điện stator 3 pha và dòng điện pha A.

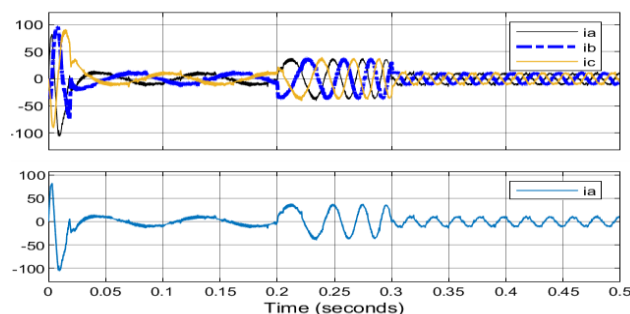
Nhận xét: Ta thấy rằng khi có sự thay đổi tốc độ, đáp ứng tốc độ động cơ luôn bám theo tốc độ tham chiếu. Đối với đặc tính mô men về cơ bản cũng bám theo mô men đặt. Tại thời điểm ban đầu mô men xoắn tăng cao là để tăng tốc động cơ. Khoảng thời gian từ (0,2 - 0,3)s mô men xoắn tăng cao là do mô men tham chiếu và tốc độ tham chiếu đều tăng.



Hình 7. Tốc độ động cơ



Hình 8. Mô-men động cơ



Hình 9. Dòng điện 3 pha Stator

Trong cả 2 trường hợp ta thấy rằng đặc tính động của tốc độ động cơ không có độ quá điều chỉnh, thời gian quá độ ngắn, sai số xác lập bằng không.

4. Kết luận

Trong bài báo này chúng tôi đề xuất thuật toán mờ thích nghi và điều khiển dự báo theo mô hình cho hệ thống truyền động xe điện. Kết quả mô phỏng cho thấy đáp ứng động của hệ thống phù hợp với yêu cầu truyền động xe điện, việc thay đổi tốc độ êm, không có quá điều chỉnh, mô men xoắn khi khởi động và khi thay đổi tốc độ lớn. Bài báo chưa đề cập đến vấn đề thu năng lượng khi phương tiện xuống dốc hoặc khi phanh, vùng làm việc suy yếu từ thông của động cơ, kiểm tra kết quả trên hệ thống vật lý, đây là các nội dung cần tiếp tục nghiên cứu để hoàn thiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] C.-L. Cai, X.-G. Wang, Y.-W. Bai, Y.-C. Xia, and K. Liu, "Motor Drive System Design for Electric Vehicle," *International Conference on Electric Information and Control Engineering*, April 15-17, 2011, Wuhan, China, pp. 1-4.
- [2] J. Li, J. J. Yu, and Z. Chen, "A review of control strategies for permanent magnet synchronous motor used in electric vehicles," in *Applied Mechanics and Materials*, 2013, pp. 1679–1685, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.321-324.1679.
- [3] MathWorks, "Motor Control Blockset™ Design and implement motor control algorithms," 2023. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/motor-control.html>. [Accessed June 06, 2023].
- [4] C. Liu, K. T. Chau, C. H. T. Lee, and Z. Song, "A Critical Review of Advanced Electric Machines and Control Strategies for Electric Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 1004–1028, Jun. 01, 2021, doi: 10.1109/JPROC.2020.3041417.
- [5] M. Żelechowski, "Space Vector Modulated-Direct Torque Controlled (DTC-SVM) Inverter-Fed Induction Motor Drive," Ph.D. Thesis, Warsaw University of Technology, Warsaw – Poland, 2005.
- [6] F. Kühne, W. F. Lages, and J. M. G. da S. Jr, "Model Predictive Control of a Mobile Robot Using Linearization," *Engineering, Mathematics*, vol. 26, pp. 525-530, 2015.
- [7] A. A. Ahmed, B. K. Koh, and Y. Il Lee, "Continuous Control Set-Model Predictive Control for Torque Control of Induction Motors in a Wide Speed Range," *Electric Power Components and Systems*, vol. 46, no. 19-20, pp. 2142-2158, Dec. 2018, doi: 10.1080/15325008.2018.1533602.
- [8] T. Liu, G. Chen, and S. Li, "Application of Vector Control Technology for PMSM Used in Electric Vehicles," *the Open Automation and Control Systems Journal*, vol. 6, pp. 1334-1341, 2014.
- [9] L. Niu, M. Yang, X. Gui, and D. Xu, "A Comparative Study of Model Predictive Current Control and FOC for PMSM," *17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China, pp. 3143-3147.
- [10] J. Holtz, "The Dynamic Representation of AC Drive Systems by Complex Signal Flow Graphs," *Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Industrial*, 1994, pp. 1-6.
- [11] M. Popescu "Induction motor modelling for vector control purposes," Helsinki University of Technology, 2000. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/269517505>. [Accessed June 10, 2023].
- [12] S. Chopra, G. Dhiman, A. Sharma, M. Shabaz, P. Shukla, and M. Arora, "Taxonomy of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System in Modern Engineering Sciences," *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6455592.
- [13] Y. X. Ding, S. Cheng, Y. T. Huang, and D. Y. Hong, "Deep PID Neural Network Controller for Precise Temperature Control in Plastic Injection-moulding Heating System," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., Sep. 2022, pp. 114–119, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.497.