

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG ĐIỀU KHIỂN HỆ TRUYỀN LỰC Ô TÔ THUẦN ĐIỆN

CONTROL SIMULATION STUDY OF BATTERY ELECTRIC VEHICLE POWERTRAIN

Nguyễn Hùng Mạnh^{1,*}, Trần Văn Lợi²

¹Trường Đại học Điện lực

²Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: manhhnh@epu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu mô phỏng điều khiển hệ truyền lực ô tô thuần điện (BEV) bằng công cụ Matlab/Simulink, tập trung vào việc đánh giá hiệu quả bộ điều khiển PID cho tốc độ mô tơ điện nam châm vĩnh cửu (PMSM). Mô hình nghiên cứu tích hợp hệ thống truyền lực cơ khí quy dẫn và bộ điều khiển PID để phân tích đặc tính động học trong các điều kiện vận hành có tải và không tải. Kết quả mô phỏng khẳng định bộ điều khiển PID đáp ứng tốt khả năng thay đổi tốc độ và duy trì ổn định hệ thống. Việc tinh chỉnh các tham số PID đóng vai trò quyết định trong việc giảm thiểu hiện tượng vọt lố và tối ưu hóa hiệu suất vận hành. Nghiên cứu đề xuất một mô hình mô phỏng tin cậy cho thiết kế hệ thống điều khiển xe điện, tạo tiền đề để phát triển các cấu hình truyền động phức tạp và thử nghiệm với chu trình lái thực tế trong tương lai.

Từ khóa: Ô tô thuần điện; Hệ thống truyền lực ô tô điện; Mô phỏng; Bộ điều khiển PID; Mô tơ điện nam châm vĩnh cửu (PMSM).

ABSTRACT

This paper investigates the simulation-based control of a Battery Electric Vehicle (BEV) powertrain using Matlab/Simulink, focusing on evaluating PID controller performance for Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) speed. The research model integrates a reduced mechanical powertrain with a PID controller to analyze dynamic characteristics under both loaded and no-load conditions. Simulation results confirm that the PID controller effectively responds to speed variations while maintaining system stability. Fine-tuning PID parameters is decisive in minimizing overshoot and optimizing operational efficiency. This study proposes a reliable simulation model for electric vehicle control system design, providing a foundation for developing complex drive configurations and testing with real-world driving cycles in the future.

Keywords: Battery Electric Vehicles (BEV); Electric Vehicles Drivetrain System; PID controller; Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Theo những nghiên cứu cho thấy các phương tiện vận tải sử dụng động cơ đốt trong tiêu thụ tới 30% năng lượng toàn thế giới [1] và tạo ra tới 17% lượng phát thải khí nhà kính gây hại [2]. Trong bối cảnh ô nhiễm môi trường tạo ra các hiệu ứng biến đổi khí hậu ngày càng nghiêm trọng, xu hướng thay thế ô tô sử dụng động cơ đốt trong bằng ô tô điện (BEV- Battery Electric Vehicle) được coi là giải pháp tiềm năng thay thế cho xe sử dụng động cơ đốt trong (ICEV) để giảm thiểu khí thải và bảo vệ môi trường [2]. Mặc dù có nhiều ưu điểm như hiệu suất chuyển đổi năng lượng cao (trên 90%), vận hành êm ái và không gây ô nhiễm, BEV vẫn còn một số hạn chế như phạm vi di chuyển, giá thành và tuổi thọ pin. Hệ truyền động điện - cơ đóng vai trò quan trọng trong quá trình chuyển đổi điện thành cơ năng hoặc ngược lại, ảnh hưởng đến hiệu suất vận hành của xe. Vì vậy, việc tiến hành nghiên cứu mô hình hóa hệ thống và mô phỏng điều khiển hệ truyền động này là cần thiết nhằm tối ưu hóa hiệu suất năng lượng sử dụng, nhằm kéo dài tuổi thọ pin và cải thiện tính động lực của ô tô điện.

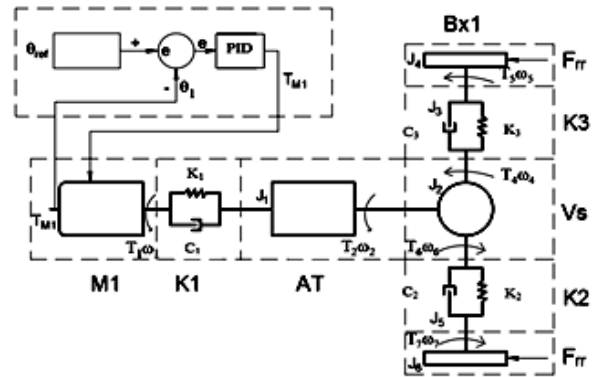
Mục tiêu nghiên cứu nhằm phát triển một mô hình mô phỏng cho hệ truyền lực của ô tô chạy điện, từ đó phân tích hiệu quả hoạt động của từng cấu hình truyền động và đề xuất các phương án cải tiến nhằm nâng cao tính kinh tế và hiệu suất hệ thống.

2. MÔ HÌNH HÓA HỆ VÀ MÔ PHỎNG ĐIỀU KHIỂN

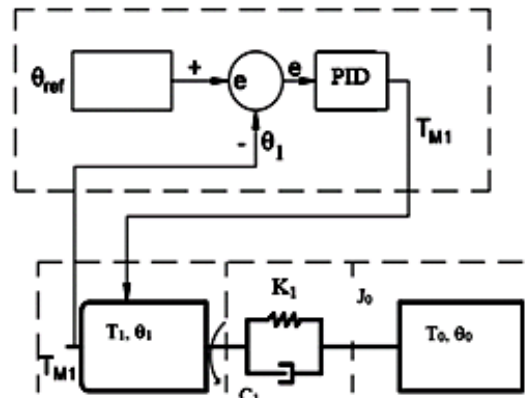
2.1. Mô hình hệ truyền lực ô tô thuần điện

Mô hình truyền lực điện - cơ khí ô tô thuần điện bao gồm hai thành phần chính: mô tơ điện và hệ truyền lực cơ khí. Sơ đồ khối hệ truyền lực điện - cơ bao gồm: mô tơ điện, ly

hợp, hộp số, truyền lực chính, vi sai, bán trục, cụm bánh xe như thể hiện trên hình 1 [3, 4].



Hình 1. Mô hình hóa hệ truyền lực ô tô điện



Hình 2. Mô hình thu gọn hệ truyền lực

Trong đó: K_1, C_1, J_1 - Độ cứng, hệ số cản, mô men quán tính tổng cộng quy dẫn của ly hợp, trục hộp số; $K_2, C_2, J_2, K_3, C_3, J_3$ - Độ cứng, hệ số cản và mô men quán tính quy dẫn của bán trục trái và phải; J_4, J_5 - Mô men quán tính của bánh xe trái/phải; T_{ml} - Mô men từ bộ điều khiển mô tơ điện.

Đơn giản hóa mô hình nghiên cứu, quy dẫn mô men quán tính các bánh xe, bán trục về vị trí bộ truyền lực chính - vì sai và bỏ qua các ảnh hưởng của các yếu tố cản tới hệ thống truyền lực. Mô hình hệ truyền lực thu gọn như thể hiện trên hình 2. Biểu thức mô men quán tính quy dẫn và tổng cộng có dạng:

$$J' = J_4 + (m_{bx} \cdot r_{bx}) \cdot \cos \theta + J_3 + (m_{bt} \cdot r_1) \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$J_{\Sigma} = J' + (m_{tlc-vs} \cdot r_2) \cdot \cos(\theta \cdot i_{tlc}) + J_2 \quad (2)$$

$$J_0 = J_{\Sigma} + (m \cdot r) \cdot \cos(\theta \cdot i_{hs} \cdot i_{tlc}) \quad (3)$$

Mô hình sau khi quy dẫn bao gồm các thành phần chính (hình 2) bao gồm: mô tơ điện đặc trưng bởi mô men T_1 , mô men quán tính J_1 , góc quay trục mô tơ θ_1 ; hệ thống truyền lực được quy dẫn với các đặc trưng: mô men quán tính J_0 , góc quay θ_0 , mô men cản T_0 . Phương trình động lực học mô tả hệ thống truyền lực điện - cơ quy dẫn:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 = T_1 - C_1 \cdot (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_0) - K_1 \cdot (\theta_1 - \theta_0) \\ J_0 \cdot \ddot{\theta}_0 = C_1 \cdot (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_0) - K_1 \cdot (\theta_1 - \theta_0) - T_0 \end{cases} \quad (4)$$

2.2. Mô hình mô tơ điện và điều khiển mô tơ điện

Trong các dòng ô tô điện thương mại hiện nay, mô tơ điện nam châm vĩnh cửu (Permanent Magnet Motor - PMM) được sử dụng phổ biến trên các loại ô tô điện thương mại, đặc biệt là loại mô tơ điện đồng bộ xoay chiều 3 pha PMSM [5]. PMSM có những ưu điểm vượt trội về hiệu suất, độ bền và khả năng điều khiển. Trong nghiên cứu này sử dụng mô tơ điện loại này. Mô hình toán mô tơ điện đồng bộ xoay chiều 3 pha được thể hiện ở bảng dưới [6].

Nội dung	Biểu thức	
Phương trình điện áp Stator:	$\begin{cases} u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \end{cases}$	(5)
Phương trình điện áp Rotor:	$\begin{cases} u'_{rq} = R'_r i'_{rq} + \frac{d\varphi'_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi'_{rd} \\ u'_{rd} = R'_r i'_{rd} + \frac{d\varphi'_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi'_{rq} \end{cases}$	(6)
Phương trình các đại lượng cơ:	$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} p (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sd} i_{sq}) \\ T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m \\ \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \end{cases}$	(7)

Trong đó: φ_{sq} , φ_{sd} là từ thông stator trục q, d.

Trong quá trình vận hành của mô tơ điện, ba đại lượng chính gồm: tốc độ quay, mô men xoắn và công suất có mối quan hệ tương hỗ chặt chẽ. Sự thay đổi của một thông số sẽ kéo theo sự biến thiên tương ứng của hai thông số còn lại. Tùy thuộc vào yêu cầu cụ thể của từng ứng dụng, chiến lược điều khiển sẽ tập trung vào một trong ba đại lượng này. Đối với ứng dụng trên ô tô điện, hướng nghiên cứu tập trung vào việc điều khiển tốc độ.

Trong nghiên cứu này sử dụng bộ điều khiển PID. PID sử dụng ba thành phần tỷ lệ P (Proportional), tích phân I (Integral) và đạo hàm D (Derivative). Mỗi thành phần P, I, D có một hệ số tương ứng (K_p , K_i và K_d) để điều chỉnh mức độ ảnh hưởng của thành phần đó đến tín hiệu điều khiển. Việc điều chỉnh các hệ số này là rất quan trọng để đạt được hiệu suất điều khiển tốt nhất. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển như thể hiện trên hình 3.

Phương trình toán học biểu diễn mối quan hệ giữa tín hiệu điều khiển $u(t)$, sai lệch ($e(t)$) theo thời gian (t) được biểu diễn dưới đây:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (8)$$

Trong đó: $u(t)$ – Tín hiệu điều khiển tại thời điểm t ; $e(t)$ – Sai lệch giữa giá trị đặt và giá trị hiện tại của biến số tại thời điểm t ; K_p – Hệ số tỉ lệ; K_i – Hệ số tích phân; K_d – Hệ số đạo

hàm; $\int_0^t e(t) dt$ – Tích phân của sai lệch từ thời

điểm 0 đến t ; $\frac{de(t)}{dt}$ – Đạo hàm của sai lệch theo thời gian.



Hình 3. Sơ đồ minh họa mô phỏng điều khiển tốc độ mô tơ điện bằng PID

Thông thường, việc chọn các thông số K_p , K_i và K_d thường được xác định thông qua thực nghiệm dựa trên đáp ứng xung của hệ thống. Phương pháp Ziegler - Nichols được sử dụng để hiệu chỉnh tham số PID cho mô hình quán tính bậc nhất có trễ. Phương pháp cần xác định được giá trị giới hạn của khâu tỉ lệ K_{gh} và chu kỳ giới hạn của hệ kín T_{gh} . Hai thông số giới hạn này được xác định từ chương trình mô phỏng thực nghiệm hình thành các thông số bộ điều khiển như bảng 1.

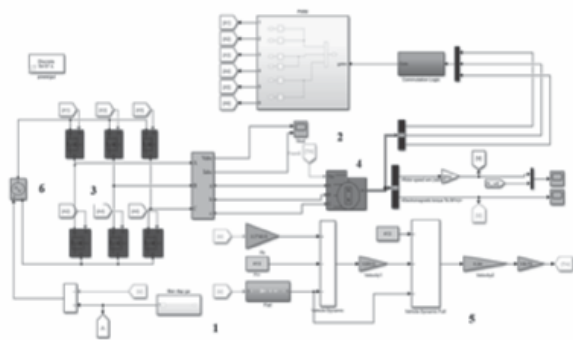
Bảng 1. Giá trị thông số bộ điều khiển PID.

Bộ điều khiển	Các thông số bộ điều khiển		
	K_p	K_i	K_d
PI	$0,5.K_{gh}$	-	-
PI	$0,45.K_{gh}$	$0,83.T_{gh}$	-
PID	$0,6.K_{gh}$	$0,5.T_{gh}$	$0,125.T_{gh}$

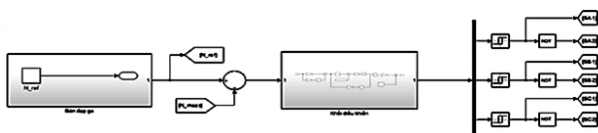
2.3. Mô phỏng hệ truyền động điện

Mô phỏng hệ thống truyền động điện được thực hiện trên nền tảng Matlab/Simulink với các khối chức năng chính gồm (Hình 4): Khối tín hiệu đầu vào (1) (gồm bàn đạp ga và bộ điều khiển PID), khối chuyển đổi tín hiệu cơ thành tín hiệu xung điều khiển biến tần (2); khối biến tần điều khiển động cơ 3 pha (3), khối mô tơ điện (4), khối hệ thống truyền lực và động lực học thân xe (5), khối nguồn điện xoay chiều (6) [7].

Tín hiệu điều khiển và bộ điều khiển PID là đầu vào của hệ thống để xác định vận tốc mong muốn. Tín hiệu này sẽ thay đổi liên tục phụ thuộc vào điều kiện hoạt động của xe: phản ứng của người lái, vận tốc chạy xe, tình trạng đường và tình huống cụ thể. Khi nghiên cứu xây dựng mô hình truyền động điện, tín hiệu bàn đạp ga được mô phỏng làm đầu vào cho bộ điều khiển PID. Tín hiệu bàn đạp ga và bộ điều khiển PID được mô tả như hình 5.

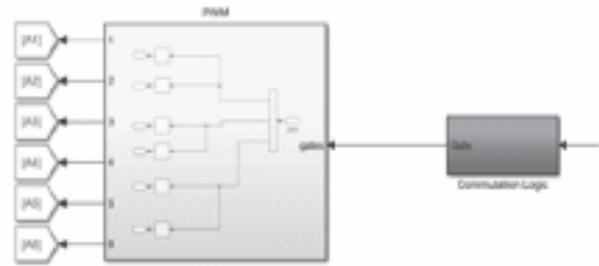


Hình 4. Mô phỏng hệ truyền động ô tô điện trong Matlab-Simulink

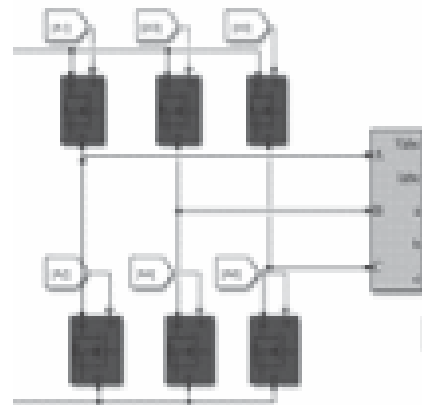


Hình 5. Khối Simulink mô phỏng tín hiệu bàn đạp ga và bộ điều khiển PID

Phương pháp điều khiển tốc độ mô tơ được áp dụng trong nghiên cứu là điều chế tần số thông qua kỹ thuật PWM, như minh họa ở hình 6. Nguyên lý điều khiển dựa trên việc thay đổi tần số của chuỗi xung điện áp cấp cho mô tơ nhằm điều chỉnh tốc độ quay. Nguồn cung cấp cho biến tần được giả định là nguồn một chiều lý tưởng. Thứ tự kích xung được thiết lập để điều khiển các mạch công suất sử dụng IGBT. Mạch nghịch lưu ba pha sử dụng sáu IGBT, được điều khiển theo nguyên lý PWM, được thể hiện trong Hình 7.

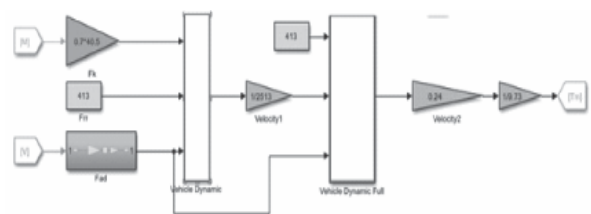


Hình 6. Khối Simulink bộ điều khiển phát xung PWM



Hình 7. Khối Simulink bộ nghịch lưu ba pha 6 IGBT

Khối mô hình động lực học ô tô được mô tả trên hình 8.



Hình 8. Khối Simulink mô phỏng động lực học theo phương dọc của ô tô

3. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

3.1. Mô phỏng hoạt động hệ truyền lực ô tô điện

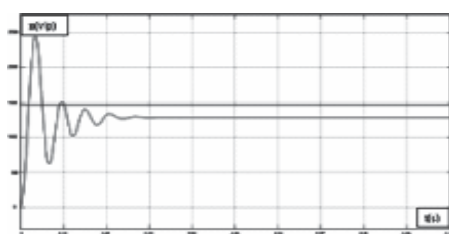
Các thông số đầu vào thực hiện mô phỏng được thể hiện trên bảng 2.

Bảng 2. Các thông số đầu vào cho mô hình mô phỏng

STT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Mô men quán tính khối lượng bánh xe	$J_4; J_6$	2,0	[kg.m ²]
2	Mô men quán tính khối lượng bán trục	$J_3; J_5$	$7,952.10^{-8}$	[kg.m ²]
3	Mô men quán tính khối lượng bánh răng truyền lực chính và vi sai	J_2	0,435	[kg.m ²]
4	Mô men quán tính khối lượng bánh răng hộp số	J_1	0,003	[kg.m ²]
5	Khoảng cách giữa hai bánh xe	d	2,8	m
6	Chiều dài bán trục	r_1	1,6	m
7	Khoảng cách giữa vi sai và hộp số	r_2	0,1	m
8	Khối lượng bánh xe	m_{bx}	19,5	kg
9	Khối lượng bán trục	m_{bt}	11,8	kg
10	Khối lượng vi sai	m_{vs}	9,5	kg

Mô phỏng hoạt động của hệ truyền lực ở hai chế độ: mô tơ chạy không tải và có tải.

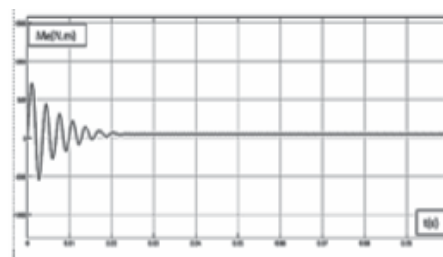
a) Chế độ mô tơ chạy không tải: Mô phỏng với vị trí bàn đạp ga sao cho mô tơ điện đạt tốc độ mong muốn là 1500 (v/p). Kết quả mô phỏng về tốc độ (hình 9) và mô men từ trường mô tơ điện (hình 10).



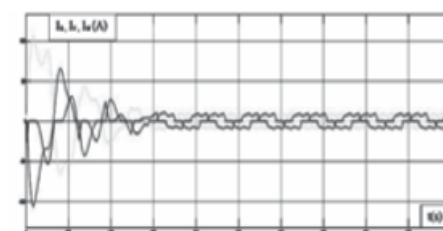
Hình 9. Đặc tính tốc độ mô tơ điện (Chế độ không tải)



Hình 10. Đặc tính mô men từ trường mô tơ điện (Chế độ không tải)



Hình 11. Đặc tính mô men từ trường mô tơ điện (Chế độ có tải)



Hình 12. Biến thiên cường độ dòng điện đi vào Stator khi có tải

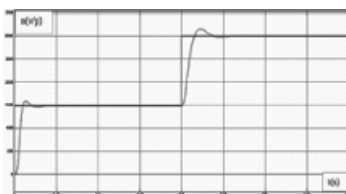
Khi xe khởi động (khoảng thời gian $t = 0,025s$), tốc độ quay của mô tơ dao động mạnh rồi giảm dần về mức ổn định. Mô men từ trường dao động mạnh để thắng lực cản của bộ truyền động. Mô men từ trường âm do lực quán tính của bộ truyền động nên chuyển qua chế độ máy phát.

b) Chế độ mô tơ chạy có tải: Duy trì vị trí bàn đạp ga có giá trị mong muốn để tốc độ mô tơ đạt 1500 (v/p). Kết quả mô phỏng thể hiện về tốc độ, mô men từ trường của mô tơ điện và cường độ dòng điện đi vào stator như thể hiện trên hình 11, 12.

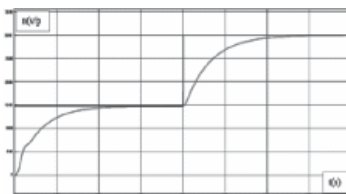
Khi ô tô khởi động (thời gian $t = 0,03s$), tốc độ dao động liên tục sau đó dần ổn định. Mô men từ trường tăng mạnh nhằm vượt qua mô men quán tính ban đầu của ô tô, mô men từ trường âm do lực cản quán tính của bộ truyền động nên chuyển qua chế độ máy phát. Do mô men tỉ lệ thuận với cường độ dòng điện, nên khi mô men tăng, dòng điện stator cũng đạt giá trị cao tương ứng. Điều này phù hợp với nguyên lý hoạt động và thể hiện sự đáp ứng tốt của động cơ điện.

3.2. Kết quả mô phỏng bộ truyền động sử dụng bộ điều khiển PID với tải trọng

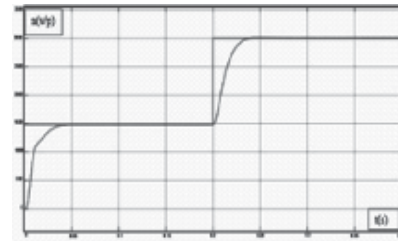
Trong quá trình mô phỏng bộ truyền động ở chế độ không tải, có tải và thay đổi tốc độ thì hệ thống xảy ra hai trường hợp độ trễ và “vọt lố”. Bộ điều khiển PID được thiết kế nhằm giảm thiểu hai hiện tượng này, kết quả được thể hiện qua Hình 13 và Hình 14.



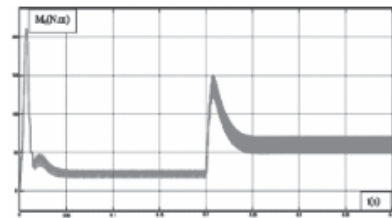
Hình 13. Đặc tính tốc độ mô tơ điện khi sử dụng bộ điều khiển PID (Xuất hiện vọt lố)



Hình 14. Đặc tính tốc độ mô tơ điện khi sử dụng bộ điều khiển PID (Xuất hiện độ trễ)



Hình 15. Đặc tính tốc độ mô tơ điện khi sử dụng bộ điều khiển PID



Hình 16. Đặc tính mô men từ trường của mô tơ điện khi sử dụng bộ điều khiển PID

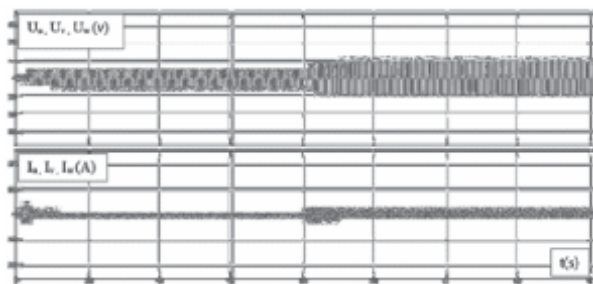
Các tham số này được lựa chọn một cách ngẫu nhiên để có thể đáp ứng về tốc độ ngõ ra/ vào nhưng chưa phải là bộ tham số tốt nhất. Kết quả mô phỏng cho thấy với những khoảng thời gian đầu: (0-0,02) s và (0,02-0,04) s, đáp ứng tốc độ khá nhanh. Tuy nhiên, trong khoảng thời gian (0,04-0,07) s đáp ứng tốc độ chậm hơn. Thêm vào đó, xảy ra độ vọt lố mỗi khi thay đổi tốc độ cao hơn so với định mức.

Do ảnh hưởng của các yếu tố như quán tính khối lượng và lực ma sát, vận tốc thực tế của hệ thống luôn có độ lệch nhất định so với giá trị đặt đầu vào. Kết quả mô phỏng trên hình 15, phải mất khoảng thời gian $t = 0,16s$ mới dần ổn định tốc độ ở giá trị mong muốn. Sau khi tính toán và thử nghiệm đã chọn được các thông số phù hợp cho bộ điều khiển PID: $K_p = 0,01035$; $K_i = 12,77$; $K_d = 12,564$.

Bộ điều khiển PID sẽ dựa vào tốc độ đặt N_{ref} và tốc độ thực tế đo từ cảm biến để điều chỉnh đầu ra nhằm đạt được tốc độ mong muốn. Kết quả mô phỏng cho thấy khi sử dụng các tham số cố định K_p , K_i , K_d hệ thống có sai số

nhỏ và đảm bảo khả năng vận hành. Tăng tốc ổn định hơn và đi dần theo đường tốc độ mong muốn sau đó chạy ổn định.

Đáp ứng điện áp và dòng điện của mô tơ điện cho thấy dạng sóng của 3 dòng điện pha của mô tơ (Hình 17). Các đáp ứng cho thấy thời gian xác lập luôn nhỏ và độ vọt lố của tốc độ và dòng điện cũng nhỏ hơn giới hạn cho phép.



Hình 17. Đặc tính điện áp và dòng điện mô tơ điện

Phương pháp Ziegler - Nichols được áp dụng để hiệu chỉnh các thông số điều khiển dựa trên đặc tính phản hồi từ đồ thị. Việc tinh chỉnh các hệ số K_p , K_i và K_d giúp giảm đáng kể độ vọt lố của tốc độ, mô men và dòng điện động cơ giảm xuống đặc biệt là độ vọt lố của dòng điện giảm đáng kể. Điều này sẽ giúp cho động cơ và thiết bị đóng cắt cũng như linh kiện bán dẫn công suất bền hơn. Các kết quả thu được từ mô phỏng cho thấy bộ PID đã đáp ứng tốt yêu cầu vận hành của hệ thống truyền động điện.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình mô phỏng hệ truyền động ô tô điện (BEV) trên Matlab/Simulink, tích hợp đặc tính động học của mô tơ PMSM và hệ truyền lực cơ khí. Kết quả mô phỏng khẳng định bộ điều khiển PID sau khi tinh chỉnh tham số giúp hệ thống đạt độ ổn định cao, giảm thiểu vọt lố và đáp ứng tốt các điều kiện vận hành khác nhau. Đây là mô hình nền tảng tin cậy cho việc thiết kế hệ

thống điều khiển xe điện. Các nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung tích hợp chế độ phanh tái sinh và mở rộng cấu hình dẫn động đa cầu để hoàn thiện tính thực tiễn của hệ thống. ❖

Ngày nhận bài: **16/3/2026**

Ngày phản biện: **30/3/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. MAI Malik, MA Mujtaba, MA Kalam, AS Silitonga, A Ikram, "Recent advances in hydrogen supplementation to promote biomass fuels for reducing greenhouse gases". International Journal of Hydrogen Energy, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.154>.
- [2]. Muhammad Ali Ijaz Malik, Md Abul Kalam, Adeel Ikram, Sadaf Zeeshan, Syed Qasim Raza Zahidi, "Energy transition towards electric vehicle technology: Recent advancements". Energy Reports Volume 13, June 2025, pp. 2958-2996. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.02.029>.
- [3]. Giancarlo Genta, "Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation". World Scientific, 1997 - Mathematics.
- [4]. M. Yerri Veeresh, V. Naga Bhaskar Reddy, R. Kiranmayi, "Performance Of PMSM-Based Battery Electric Vehicle Using P.I., P.I.D., And F.L. Controllers". Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 27, No 7, pp. 2917-2925.
- [5]. N. Hashemnia and B. Asaei, "Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles". 18th International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal, 2008, pp. 1-5.
- [6]. P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling of permanent magnet motor drives". IEEE Trans. Ind. Electron. 35(4): 537-541, 1988, DOI: 10.1109/41.9176.
- [7]. Liuping Wang, Shan Chai, Dae Yoo, Lu Gan, Ki Ng, "PID and Predictive Control of Electrical Drives and Power Supplies Using MATLAB/Simulink". John Wiley & Sons, Incorporated, ISBN: 9781118339473, 1118339479, 2014.