

ỨNG DỤNG SIMCAPE TRONG MÔ PHỎNG HỆ THỐNG TRUYỀN LỰC XE ĐIỆN

APPLICATION OF SIMSCAPE IN ELECTRIC VEHICLE POWERTRAIN SIMULATION

ThS. Nguyễn Thế Hoàng*, ThS. Trần Việt Linh, KS. Lê Thị Hồng Thắng

Khoa Cơ - Điện, Trường Đại học Mở - Địa chất

*Email: nguyenthehoang@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Việc nghiên cứu mô phỏng hệ thống truyền lực ô tô điện đóng vai trò quan trọng nhằm tối ưu hiệu suất và mở rộng quãng đường di chuyển sau mỗi lần sạc. Nghiên cứu tiến hành xây dựng mô hình mô phỏng hoàn chỉnh hệ thống truyền lực ô tô điện trong môi trường Matlab/Simcape, qua đó đánh giá khả năng hoạt động của hệ thống khi động cơ làm việc ở cả vùng công suất định mức và vùng từ thông yếu. Kết quả chứng minh hiệu quả của điều khiển véc-tơ có bù yếu từ, giúp hệ thống duy trì công suất định mức trong vùng tốc độ cao trên ô tô điện. Hệ số trượt trên bánh xe chủ động của ô tô điện có sự dao động trong biên độ hẹp với tần số cao, tuy nhiên vẫn nằm trong vùng hệ số bám cao. Kết quả nghiên cứu mở ra hướng phát triển mới thông qua tích hợp mô hình pin thực tế và hệ thống phanh tái sinh nhằm nâng cao hiệu suất năng lượng tổng thể.

Từ khóa: Ô tô điện; Ô tô Hybrid; Hệ thống truyền lực ô tô điện; Phương pháp điều khiển véc-tơ; Động cơ PMSM; Pin Lithium ion; Hệ thống truyền lực; Vùng từ thông yếu; Hệ thống phanh tái sinh.

ABSTRACT

The simulation study of the powertrain system plays a crucial role in optimizing efficiency and extending the driving range per charge. This research undertakes the development of a comprehensive electric vehicle (EV) powertrain simulation model within the Matlab/Simcape environment, enabling the evaluation of the system's operational capability when the Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) operates across both the rated power region and the flux-weakening region. The results demonstrate the effectiveness of vector control with flux-weakening compensation, which successfully allows the system to sustain rated power output in the EV's high-speed range. Furthermore, the slip ratio on the EV's driving wheels exhibits high-frequency oscillations within a narrow amplitude, yet consistently remains within the region of high adhesion coefficient. These findings pave the way for a new development trajectory, specifically through the integration of a realistic battery model and a regenerative braking system to enhance overall energy efficiency.

Keywords: Electrical Vehicle; Hybrid vehicle; Transpose system; Battery Lithium ion; FOC; PMSM; Powertrain system; Flux-weakening region; Regenerative braking system. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

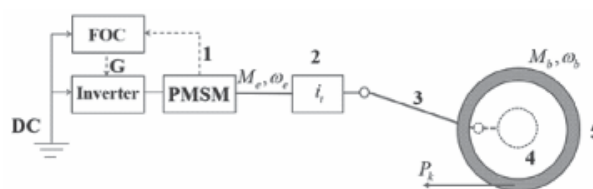
Trong những năm gần đây, xu hướng chuyển đổi từ phương tiện chạy nhiên liệu hóa thạch sang ô tô điện diễn ra mạnh mẽ. Việc nghiên cứu hoàn thiện hệ thống truyền lực ô tô điện nhằm nâng cao hiệu quả tổng thể của hệ thống truyền lực, từ đó kéo dài quãng đường di chuyển của xe trong một lần sạc đang là trọng tâm nghiên cứu.

Các nghiên cứu trước đây của Pillay và Krishnan [1] hay Emadi [2], đã khẳng định hiệu quả của phương pháp điều khiển véc-tơ đối với động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM). Tuy nhiên, nội dung nghiên cứu tập trung vào mô hình điện hoặc quá trình điều khiển động cơ độc lập. Mô hình mô phỏng chuỗi truyền và biến đổi năng lượng từ pin, bộ nghịch lưu, động cơ PMSM đến bánh xe chưa được xem xét. Tính đến nay, chưa có đánh giá đầy đủ nào về các tương tác giữa phần điện và phần cơ học của xe, cũng như các ảnh hưởng từ yếu tố bên ngoài đến hệ thống. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm xây dựng mô hình mô phỏng hoàn chỉnh của hệ thống truyền lực ô tô điện trong môi trường Matlab/Simulink nhằm kiểm chứng khả năng hoạt động của hệ thống, đặc biệt khi động cơ hoạt động ở vùng từ thông yếu với tốc độ làm việc cao hơn tốc độ định mức. Kết quả nghiên cứu sẽ làm rõ đặc tính biến đổi

mô men, tốc độ, công suất và các tham số động lực học của xe, từ đó xây dựng cơ sở cho việc thiết kế, tối ưu hệ thống truyền động trên ô tô điện.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Đối tượng chính trong nghiên cứu này là hệ thống truyền lực của ô tô điện cầu sau chủ động trang bị động cơ đồng bộ rô to nam châm vĩnh cửu (PMSM) có điện áp 360V, công suất 100 kW tại tốc độ góc 4700 vòng/phút. Động cơ được điều khiển theo phương pháp véc-tơ kết hợp với bộ nghịch lưu IGBT lý tưởng. Hệ thống truyền lực sử dụng hộp số 1 cấp. Sơ đồ nguyên lý được mô tả như trong Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống truyền lực ô tô điện:
(1) Động cơ PMSM công suất 100 kW; (2) Hệ thống truyền lực ô tô điện; (3) Các đăng; (4) Vi sai – truyền lực chính; (5) Bánh xe

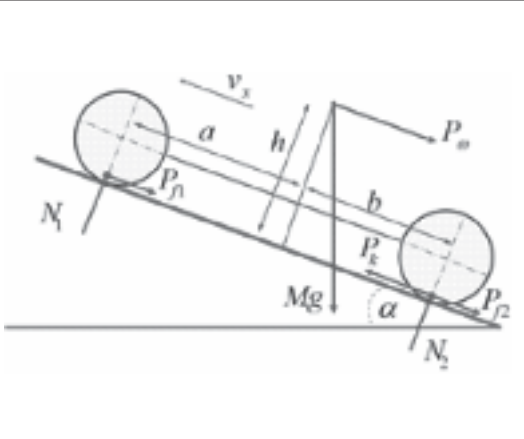
Mô hình hệ thống truyền lực ô tô bằng phần mềm Matlab – Simulink phiên bản 2022. Với bộ tham số đầu vào giả định vào như trong bảng 1.

Bảng 1. Bảng tham số dữ liệu đầu vào

STT	Tên tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Tham số động cơ điện			
1.1	Công suất định mức	P	100	kW
1.2	Điện áp định mức	V	360	V
1.3	Tốc độ định mức	n	4700	Vòng/phút
1.4	Số đôi cực	p	4	-
1.5	Điện trở pha stato	R _s	0,007	Ω
1.6	Cảm kháng trục d	L _d	0,00028	H

1.7	Cảm kháng trục q	L_q	0,00042	H
1.8	Từ thông nam châm vĩnh cửu	ψ	0.085	Wb
1.9	Mô men cực đại	$T_{\max}$	230	N.m
1.10	Mô men quán tính rotor	J	0.08	kg•m ²
1.11	Hệ số ma sát nhớt	B	0.001	N.m.s/rad
2	Tham số bộ nghịch lưu (Inverter)			
2.1	Điện áp rơi thuận IGBT	$IGBT_{Vf}$	1,5	V
2.2	Điện trở dẫn IGBT	$IGBT_{Ron}$	0,0007	Ω
2.3	Thời gian ngắt IGBT	$IGBT_{Goff}$	1×10^{-6}	s
2.4	Ngưỡng kích hoạt IGBT	$IGBT_{Vth}$	0,5	V
2.5	Điện áp rơi thuận diode	$DIODE_{Vf}$	1,1	V
2.6	Điện trở dẫn diode	$DIODE_{Ron}$	0,0007	Ω
2.7	Thời gian ngắt diode	$DIODE_{Goff}$	1×10^{-6}	s
2.8	Tần số chuyển mạch PWM	PWM_{fsw}	10	kHz
2.9	Thời gian chết PWM	$PWM_{deadtime}$	2×10^{-6}	s
3	Tham số điều khiển theo phương pháp véc-tơ			
3.1	Tần số băng thông vòng tốc độ	f_w	60	Hz
3.2	Hệ số tỷ lệ vòng tốc độ	Kp_w	10	
3.3	Hệ số tích phân vòng tốc độ	Ki_w	600	
3.4	Hệ số chống bão hòa vòng tốc độ	Kaw_w	6000	
3.5	Hệ số tỷ lệ dòng d	Kp_d	4	
3.6	Hệ số tích phân dòng d	Ki_d	240	
3.7	Hệ số chống bão hòa dòng d	Kaw_d	1920	
3.8	Hệ số tỷ lệ dòng q	Kp_q	5,8	
3.9	Hệ số tích phân dòng q	Ki_q	348	
3.10	Hệ số chống bão hòa dòng q	Kaw_q	2784	

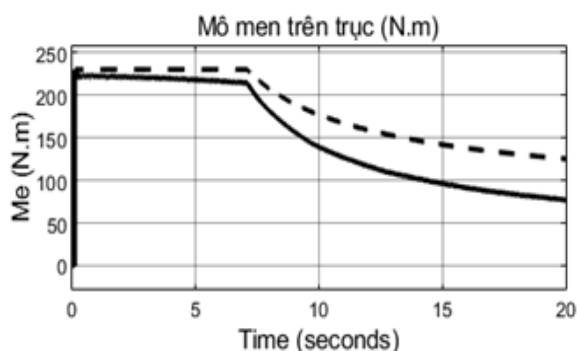
Bảng 2. Bộ tham số động lực học giả định của của ô tô điện

4.1	Khối lượng toàn xe	M	2060	kg	
4.2	Khoảng cách từ CG đến trục trước	a	1,3	m	
4.3	Khoảng cách từ CG đến trục sau	b	1,3	m	
4.4	Diện tích cản khí động	A	2,5	m ²	
4.5	Hệ số cản không khí	C_d	0,2		
4.6	Bán kính bánh xe	r_b	0,345	m	
4.7	Tỷ số truyền toàn hệ thống	i_t	9		
4.8	Góc dốc	α	0°		
4.9	Hệ số cản lăn	f	0.02		

Quá trình mô phỏng được thực hiện trong 20 giây với thời gian lấy mẫu $T_s = 2 \cdot 10^{-6}$ s, thời gian điều khiển $T_{sc} = 5 \cdot 10^{-5}$ s. Tín hiệu điều khiển do khối Step tạo ra mô phỏng trạng thái xe tăng tốc nhanh nhất với bước thời gian (Step time) là 0,1 giây. Giá trị ban đầu (Initial Value) là 0, giá trị cuối (Final Value) là 9000 vòng/phút. Các tín hiệu ghi nhận gồm các đường đặc tính làm việc của động cơ PMSM và đường đặc tính động lực học của ô tô.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

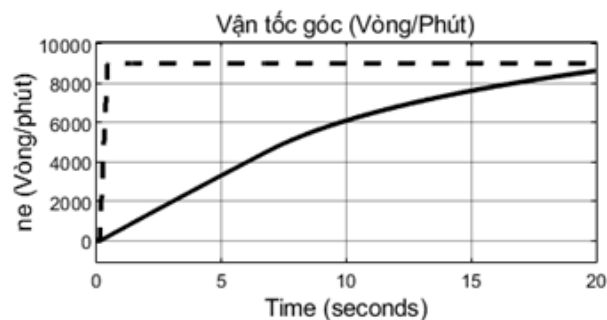
Kết quả mô phỏng đặc tính đặc tính làm việc của động cơ PMSM công suất 100 kW được thể hiện trong các Hình 2, Hình 3, Hình 4. Về tổng thể, các đường đặc tính này phù hợp với thực tế. Điều này khẳng định tính đúng đắn của các tham số đầu vào của chương trình mô phỏng, đồng thời cũng cho thấy bộ điều khiển gồm khối FOC (Field Oriented Control) và Inverter đã hoạt động tốt.



Hình 2. Đồ thị đặc tính mô men của động cơ PMSM 100 kW

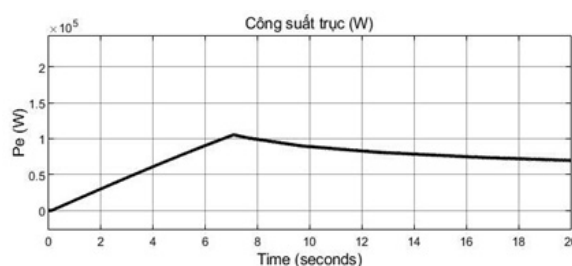
Hình 2 mô tả đặc tính mô men trên trục của động cơ. Đường đặc tính mô men của động cơ (nét liền) đã bám sát đường đặc tính điều khiển (nét đứt). Từ thời điểm có tín hiệu điều khiển, mô men động cơ nhanh chóng đạt giá trị lớn nhất $T_{max} = 229,8$ Nm. Mô men dao động trong biên độ hẹp và giảm nhẹ xuống 219,6 Nm

ở giây thứ 7. Sau đó, giá trị mô men giảm theo đường cong với độ dốc giảm dần.



Hình 3. Đồ thị đặc tính vận tốc góc của động cơ PMSM 100 kW

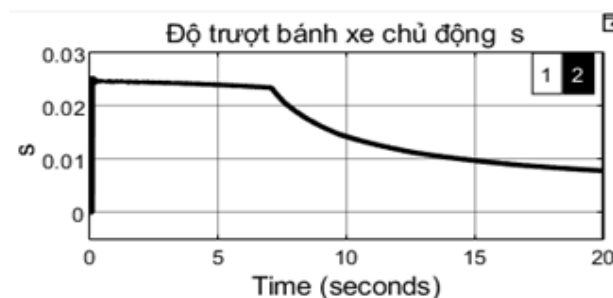
Kết quả mô phỏng quy luật thay đổi tốc độ của động cơ (Hình 3) có thể được chia thành hai giai đoạn làm việc của động cơ: vùng vận tốc trực dưới 4700 vòng/phút, và vùng từ thông yếu khi vận tốc trực trong khoảng từ 4700 đến 9000 vòng/phút. Ở vùng vận tốc thấp, tốc độ góc tăng tuyến tính do mô men động cơ tạo ra được duy trì ổn định, trong khi vận tốc xe (Hình 7) còn nhỏ nên ảnh hưởng của sức cản không khí chưa đáng kể. Động cơ làm việc trong vùng từ thông yếu, tốc độ góc của động cơ vẫn tiếp tục tăng nhưng với gia tốc giảm.



Hình 4. Đặc tính công suất của động cơ PMSM công suất 100 kW

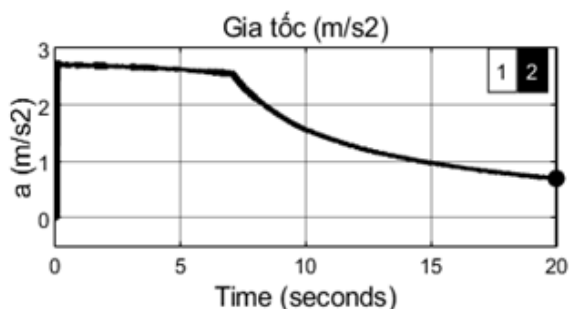
Trong giai đoạn đầu, công suất động cơ tăng tốc gần như tuyến tính (Hình 4). Do công suất động cơ tỷ lệ thuận với tốc độ trên trục, nó đạt giá trị lớn nhất 100,9 kW tại tốc độ 4664 vòng/phút. Dòng điện lớn nhất đạt 460 A. So

sánh với nghiên cứu của K. Zhou và cộng sự [7], hệ thống hiện tại cho thời gian đạt công suất định mức nhanh hơn khoảng 3 giây.



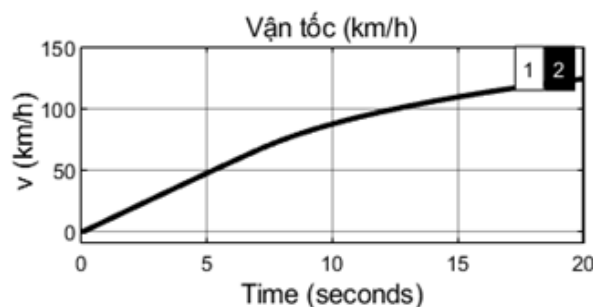
Hình 5. Đặc tính trượt của bánh xe chủ động

Độ trượt của bánh xe chủ động về cơ bản là biến đổi ổn định từ 0,025 xuống 0,005. Đây là vùng trượt bánh xe bám đường tốt, không xảy ra hiện tượng trượt quay. Độ trượt dao động trong biên độ hẹp do ảnh hưởng từ mô men động cơ.

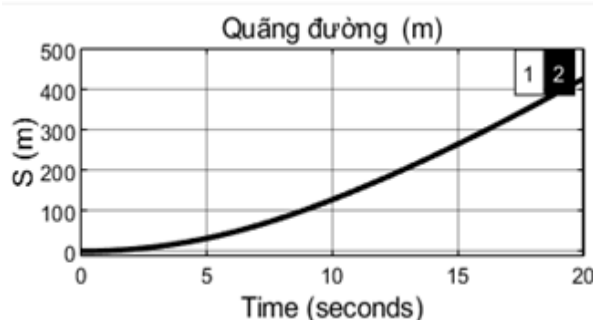


Hình 6. Đặc tính gia tốc dọc của ô tô

Xe đạt vận tốc 100 km/h sau 12,65 giây (Hình 7) với quãng đường di chuyển là 197 m (Hình 8). Kết quả này đang thấp hơn khoảng 3 giây so với mức dưới 9 giây là thời gian tăng tốc từ 0 đến 100 km/h của mẫu xe VinFast VF 34e được một số đại lý chính hãng công bố. Trong giai đoạn đầu gia tốc đạt 2,5 m/s² sau đó giảm xuống 0,7 m/s².



Hình 7. Đặc tính vận tốc của ô tô



Hình 8. Quãng đường tăng tốc của ô tô trong 20 giây.

Về tổng thể, mô hình đã mô tả chính xác các mối quan hệ giữa mô men, tốc độ và công suất của động cơ PMSM trong quá trình tăng tốc. Khả năng duy trì công suất ổn định ở vùng tốc độ cao thể hiện rõ ưu thế của phương pháp điều khiển véc-tơ có bù yếu từ. Ngoài ra, đặc tính động lực học của xe cho thấy hệ thống truyền lực được thiết kế có thể đáp ứng yêu cầu vận hành thực tế của các dòng xe điện tầm trung như VinFast VF e34.

4. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình mô phỏng hoàn chỉnh hệ thống truyền lực ô tô điện trang bị động cơ điện PMSM công suất 100 kW. Kết quả mô phỏng đánh giá các đặc tính điện, cơ học của hệ thống phù hợp thực tế và các nghiên cứu trước đó. Hệ thống đã duy trì được công suất định mức 100 kW trong toàn bộ vùng tốc độ cao nhờ phương pháp điều



khuyến véc-tơ giúp động cơ PMSM hoạt động trong vùng từ thông yếu.

Trong tương lai, mô hình có thể tích hợp thêm mô hình pin thực tế với các đặc tính nhiệt, suy giảm tuổi thọ của pin hoặc kết hợp hệ thống phanh tái sinh để làm tăng hiệu quả thu hồi năng lượng.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài nghiên cứu cấp Trường Đại học Mở - Địa chất, trong khuôn khổ đề tài cấp cơ sở mã số T25-04. Nhóm tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Mở - Địa chất đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **14/10/2025**

Ngày phản biện: **28/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. P. Pillay and R. Krishnan, “*Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives. Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive*”. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, no. 2, pp. 265-273, Mar./Apr. 1989. SCIRP
- [2]. M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, “*Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*”, 2nd ed.. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017. doi:10.1201/9781420054002. Taylor & Francis
- [3]. X. Men, H. Xu, Y. Zhu, and Y. Li, “*Implementation of an Improved Motor Control for Electric Vehicles as Industrial Applications*”. Energies, vol. 15, no. 13, art. 4833, 2022. doi:10.3390/en15134833. MDPI
- [4]. G. Sieklucki and D. Kara, “*Design and Modelling of Energy Conversion with the Two-Region Torque Control of a PMSM in an EV Powertrain*”. Energies, vol. 15, no. 13, art. 4887, 2022. doi:10.3390/en15134887. MDPI
- [5]. J. Medina, “*Utility of Field Weakening and Field-Oriented Control in PMSM Drives: Simulation Case Study*”. Proceedings, vol. 47, no. 1, art. 17, 2023. doi:10.3390/proceedings2023047017. MDPI
- [6]. H. Wei, Z. Xu, and Y. Jiang, “*High-Speed Control Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor in Flux-Weakening Field*”. Energy Reports, 2020 (online first).
- [7]. K. Zhou, M. Ai, D. Sun, N. Jin, và X. Wu, “*Field Weakening Operation Control Strategies of PMSM Based on Feedback Linearization*”. Energies, vol. 12, no. 23, p. 4526, 2019, doi: 10.3390/en12234526mdpi.com.
- [8]. Y. Zhang, C. Zhao, B. Dai, và Z. Li, “*Dynamic Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Electric Vehicle Based on Simulink*”. Energies, vol. 15, no. 3, p. 1134, 2022, doi: 10.3390/en15031134.