

MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG PHANH TÁI SINH SỬ DỤNG ĐỘNG CƠ PMSM CHO Ô TÔ ĐIỆN

SIMULATION AND EVALUATION OF A REGENERATIVE BRAKING SYSTEM USING A PMSM MOTOR FOR ELECTRIC VEHICLES

TS. **Bùi Thanh Nhu**, TS. **Lê Quý Chiên***, ThS. **Nguyễn Văn Hậu**,
ThS. **Đào Đức Hùng**, ThS. **Nguyễn Thu Hương**, ThS. **Nguyễn Mạnh Hùng**
Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

*Email: chiencodiencnqn@gmail.com

TÓM TẮT

Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày kết quả nghiên cứu việc xây dựng và mô phỏng một hệ thống phanh tái sinh (regenerative braking) cho ô tô điện sử dụng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM). Mô hình được triển khai trên nền tảng MATLAB/Simulink, bao gồm các khối chính: mô hình động lực học xe, bộ biến tần, động cơ PMSM, bộ điều khiển và hệ thống lưu trữ năng lượng. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống phanh tái sinh có khả năng thu hồi năng lượng hiệu quả trong quá trình giảm tốc, đồng thời cải thiện hiệu suất năng lượng tổng thể của xe ô tô điện. Nội dung nghiên cứu có thể sử dụng trong việc hỗ trợ giảng dạy, học tập, nghiên cứu khoa học và nâng cao chất lượng đào tạo của cán bộ và giảng viên trong ngành công nghệ kỹ thuật ô tô tại Trường đại học Công nghiệp Quảng Ninh cũng như các trường khối kỹ thuật trên toàn quốc.

Từ khóa: *Mô phỏng số; Bộ điều khiển; Phanh tái sinh ô tô điện; Xe ô tô điện; PMSM; Chất lượng đào tạo; Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh.*

ABSTRACT

This paper presents the research results on the development and simulation of a regenerative braking system for electric vehicles based on a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM). The system is modeled and implemented on the MATLAB/Simulink platform, comprising the main components: vehicle dynamics model, inverter, PMSM drive, control system, and energy storage system. Simulation results demonstrate that the proposed regenerative braking system is capable of effectively recovering energy during vehicle deceleration, thereby improving the overall energy efficiency of the electric vehicle. The outcomes of this study can serve as a reference for teaching, learning, and scientific research, and contribute to enhancing the quality of training for staff and lecturers in the field of automotive engineering at Quang Ninh University of Industry as well as other technical institutions nationwide.

Keywords: *Numerical simulation; Controllers; Regenerative braking for electric vehicles; Electric cars; PMSM; Training quality; Quang Ninh University of Industry.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh hiện nay, khi tình trạng biến đổi khí hậu và quản lý tài nguyên năng lượng trở thành những vấn đề cấp bách, ô tô điện đang trở thành một giải pháp hứa hẹn để giảm thiểu tác động tiêu cực của xe động cơ đốt trong đến môi trường. Trong ngữ cảnh này, hệ thống phanh tái sinh trên xe ô tô điện đóng vai trò quan trọng, đặt ra nhu cầu hết sức cấp thiết để tìm hiểu và đánh giá về tầm quan trọng của công nghệ này. Hệ thống phanh tái sinh (Regenerative braking system) trên xe ô tô điện là một công nghệ phanh đặc biệt thiết kế để thu hồi năng lượng khi xe giảm tốc hoặc phanh. Thay vì sử dụng hệ thống phanh cơ truyền thống, hệ thống này tận dụng nguyên tắc chuyển động của xe để tạo ra điện năng và lưu trữ nó trong pin hoặc hệ thống pin của xe. Bên cạnh đó, sự gia tăng nhanh chóng của xe điện (Electric Vehicles - EVs), việc nâng cao hiệu suất sử dụng năng lượng và giảm tổn hao trong quá trình vận hành là một trong những mục tiêu nghiên cứu trọng tâm. Đặc biệt, trong các chu trình lái xe đô thị, quá trình phanh diễn ra với tần suất cao, khiến một lượng lớn năng lượng động học của xe bị tiêu tán dưới dạng nhiệt tại hệ thống phanh ma sát truyền thống. Phanh tái sinh (regenerative braking) cho phép thu hồi phần năng lượng này bằng cách vận hành động cơ điện ở chế độ máy phát và nạp năng lượng trở lại cho bộ tích trữ, từ đó góp phần nâng cao hiệu suất tổng thể và kéo dài quãng đường di chuyển của xe.

Do đó, cần có một mô hình mô phỏng chi tiết và chính xác để phân tích đặc tính làm việc của hệ thống phanh tái sinh cũng như đánh giá hiệu quả thu hồi năng lượng trong các điều kiện vận hành khác nhau.

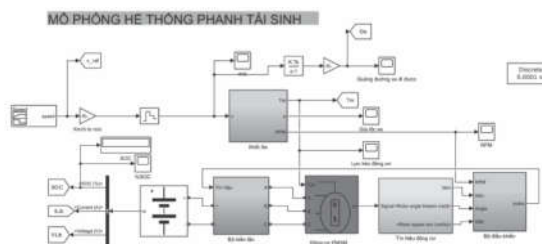
Xuất phát từ những yêu cầu trên, bài báo này xây dựng và phân tích mô hình mô phỏng

hệ thống phanh tái sinh cho xe điện sử dụng động cơ PMSM trên môi trường MATLAB/Simulink, nhằm làm rõ nguyên lý làm việc, đánh giá khả năng thu hồi năng lượng và làm cơ sở cho việc phát triển các chiến lược điều khiển phanh tái sinh hiệu quả hơn trong tương lai.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Cấu trúc tổng thể của hệ thống

Cấu trúc tổng thể của mô hình mô phỏng hệ thống phanh tái sinh cho xe điện sử dụng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM (Hình 1). Mô hình được xây dựng trên ứng dụng MATLAB/Simulink bao gồm bốn khối chức năng chính: khối nguồn DC (khối pin), khối biến tần, khối động cơ PMSM, khối điều khiển phanh tái sinh, và khối mô hình xe.



Hình 1. Sơ đồ tổng quát mô hình phanh tái sinh sử dụng động cơ PMSM cho ô tô điện [3].

Khối pin, đóng vai trò cung cấp và hấp thụ năng lượng cho hệ thống.

Khối động cơ PMSM được mô hình hóa với các cổng điện ba pha và cổng tải, cho phép mô phỏng chính xác quan hệ điện - cơ. Các tín hiệu như dòng stator, mô-men điện từ; tốc độ rotor được trích xuất từ động cơ và đưa về khối điều khiển làm tín hiệu phản hồi.

Khối điều khiển phanh tái sinh bao gồm các vòng điều khiển tốc độ và dòng điện, cùng

với các phép biến đổi tọa độ Clarke-Park. Dựa trên tín hiệu yêu cầu phanh, bộ điều khiển xác định mô-men hãm mong muốn và tạo ra dòng tham chiếu tương ứng. Trong chế độ phanh tái sinh, dòng tham chiếu được điều chỉnh sao cho động cơ làm việc như một máy phát, qua đó chuyển đổi năng lượng cơ học từ trục động cơ thành năng lượng điện.

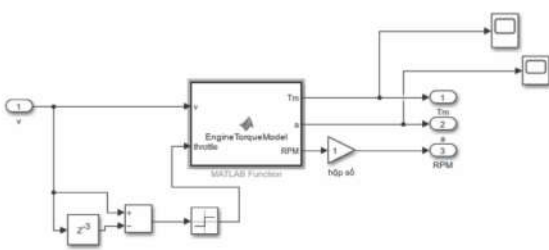
Khối xe mô phỏng quán tính và đặc tính cản của hệ truyền động xe điện. Mỗi quan hệ giữa tải và mô-men điện từ của động cơ cho phép đánh giá hiệu quả phanh, khả năng thu hồi năng lượng cũng như đáp ứng động lực học của toàn hệ thống.

2.2. Khối mô hình xe (Vehicle Dynamics Block)

Khối xe mô phỏng động lực học dọc của xe, được biểu diễn bởi phương trình [3]:

$$m \int \frac{dv}{dt} = F_k - F_c$$

Trong đó: m là khối lượng xe; v là vận tốc xe; F_k là lực kéo hoặc lực phanh từ động cơ; F_c bao gồm lực cản lăn và lực cản không khí.



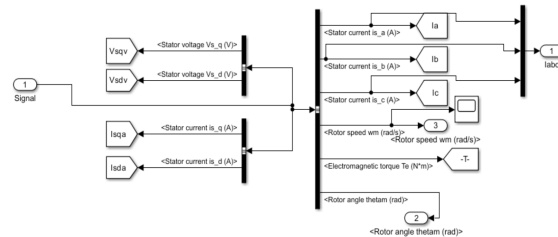
Hình 2. Mô hình mô phỏng động học [5]

Tín hiệu vận tốc được sử dụng làm đầu vào cho bộ điều khiển đồng thời tích phân để xác định quãng đường xe đi được.

Khối tín hiệu động mô tả cấu trúc khối

đo lường và trích xuất tín hiệu của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM trong hệ thống phanh tái sinh. Khối này có nhiệm vụ thu thập các đại lượng điện và cơ quan trọng của động cơ, phục vụ cho cả thuật toán điều khiển và quá trình đánh giá hiệu suất hệ thống trong mô phỏng.

Các thành phần điện áp và dòng điện stator trong hệ tọa độ quay dq bao gồm V_{sd} , V_{sq} , I_{sd} và I_{sq} được trích xuất nhằm phản ánh trạng thái điều khiển định hướng từ thông (Field-Oriented Control - FOC). Trong chế độ phanh tái sinh, thành phần dòng I_{sd} mang giá trị âm, cho phép tạo mô-men điện từ ngược chiều quay, trong khi I_{sq} được điều chỉnh để đảm bảo ổn định từ thông và giới hạn dòng của động cơ.



Hình 3. Mô phỏng tín hiệu động cơ [5]

Bên cạnh đó, các dòng stator ba pha i_a , i_b , i_c được giám sát để đánh giá tính cân bằng pha và chất lượng dạng sóng dòng điện khi bộ biến tần làm việc ở chế độ phát điện. Tốc độ rotor ω_m và góc rotor θ_m cung cấp thông tin phản hồi quan trọng cho khối biến đổi tọa độ và bộ điều khiển dòng trong hệ thống FOC. Mô-men điện từ T_e được sử dụng để đánh giá trực tiếp khả năng tạo mô-men phanh và hiệu quả đáp ứng theo yêu cầu điều khiển.

Việc kết hợp đồng thời các tín hiệu trong hệ tọa độ abc và dq cho phép phân tích toàn diện hoạt động của PMSM trong chế độ phanh tái sinh, từ đó làm rõ mối quan hệ giữa

chiến lược điều khiển dòng, đặc tính điện - cơ của động cơ và khả năng thu hồi năng lượng của hệ thống.

2.3. Khối pin DC (Battery & SOC Block) [2]

Khối pin thực hiện các chức năng:

- Nhận dòng điện tái sinh trong quá trình phanh;
- Cập nhật trạng thái sạc (State of Charge - SOC);
- Cung cấp điện áp DC cho bộ biến tần.

SOC được tính toán theo biểu thức:

$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{1}{Q_{bat}} \int i_{bat}(t) dt$$

Trong đó:

- SOC(t): Trạng thái sạc của pin tại thời điểm t;
- SOC(0): SOC ban đầu;
- Q_{bat} : Dung lượng pin [Ah];
- i_{bat} : Dòng pin;
- $i_{bat} > 0$: Chế độ làm việc;
- $i_{bat} < 0$: Chế độ sạc pin (phanh tái sinh).

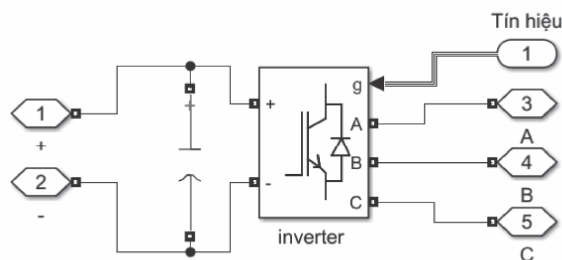
2.4. Bộ biến tần (Inverter Block)

Bộ biến tần có nhiệm vụ [1]:

Chuyển đổi điện áp một chiều DC từ pin cao áp thành điện áp xoay chiều ba pha cung cấp cho động cơ PMSM hoạt động.

Trong chế độ phanh tái sinh, bộ biến tần biến đổi dòng điện ba pha xoay chiều từ động cơ thành dòng điện một chiều được nạp về pin cao áp.

Ngoài ra, bộ biến tần trong hệ truyền động EV-PMSM còn đóng vai trò trong việc điều khiển dòng, mô-men và tốc độ động cơ.



Hình 4. Mô hình mô phỏng bộ biến tần [1]

Bộ biến tần ba pha trong hệ truyền động ô tô điện sử dụng động cơ PMSM. Bộ biến tần được cấp nguồn từ pin thông qua mạch DC-link và tụ điện song song để ổn định điện áp một chiều. Cấu trúc cầu nghịch lưu gồm sáu khóa bán dẫn công suất kèm diode song song ngược, cho phép truyền năng lượng hai chiều. Các khóa được điều khiển bằng tín hiệu PWM (Pulse Width Modulation) điều khiển điện áp trung bình, thường là SVPWM (bộ điều chế độ rộng xung vector không gian), để tổng hợp điện áp xoay chiều ba pha tại các đầu ra A, B và C.

Do đặc tính cảm kháng của cuộn dây stator, dòng điện ba pha có dạng gần hình sin và lệch pha nhau 120° , tạo ra từ trường quay tương tác với từ trường nam châm vĩnh cửu trên rotor PMSM để sinh mô-men điện từ. Trong chế độ kéo, năng lượng được truyền từ pin tới động cơ, trong khi ở chế độ phanh tái sinh, năng lượng được truyền ngược từ động cơ qua bộ biến tần về DC-link để nạp lại cho pin.

2.5. Mô hình động cơ PMSM

Động cơ PMSM được mô hình hóa trong hệ tọa độ dq, với các phương trình điện áp [1]:

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f$$

Mô-men điện từ được xác định bởi:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

Trong chế độ phanh tái sinh, mô-men T_e có giá trị âm, tạo lực phanh cho xe.

Chế độ kéo (Driving): $i_q > 0$; $T_m > 0$.

Công suất: $P = T_m \cdot \omega > 0$.

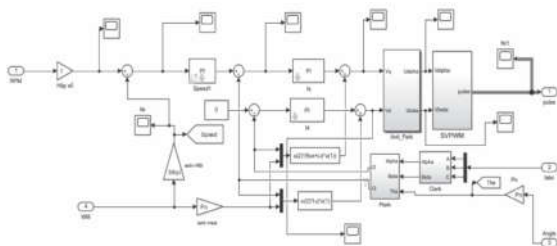
Chế độ phanh tái sinh: $i_q < 0$; $T_m < 0$.

PMSM hoạt động như máy phát: Năng lượng \rightarrow inverter \rightarrow DC bus \rightarrow pin.

Công suất: $P = T_m > 0$.

2.6. Bộ điều khiển

Cấu trúc điều khiển của bộ biến tần ba pha cấp nguồn cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM sử dụng chiến lược điều khiển vector định hướng theo từ thông rotor. Hệ thống bao gồm các vòng điều khiển dòng điện và tốc độ, các phép biến đổi tọa độ, bộ điều chế độ rộng xung vector không gian (SVPWM), bộ nghịch lưu và động cơ PMSM [1].



Hình 5. Sơ đồ điều khiển vector (FOC) cho động cơ PMSM [5]

Trong chế độ kéo, năng lượng được truyền từ nguồn DC đến động cơ để sinh mô-men kéo. Ngược lại, trong chế độ phanh tái sinh, dòng tham chiếu mang giá trị âm, tạo ra mô-men điện từ ngược chiều quay rotor, khiến động cơ hoạt động như một máy phát. Khi đó, năng lượng cơ học được chuyển đổi thành năng lượng điện nạp cho bộ pin, qua đó nâng cao hiệu suất tổng thể của hệ truyền động điện.

2.7. Nguyên lý phanh tái sinh [3]

Mô hình mô phỏng hệ thống phanh tái sinh cho xe điện sử dụng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSM (Hình 1) được xây dựng nhằm tái hiện quá trình chuyển đổi năng lượng từ cơ sang điện trong giai đoạn giảm tốc. Khi người lái giảm tốc hoặc phanh, tín hiệu điều khiển mô-men được gửi tới bộ điều khiển động cơ, yêu cầu tạo mô-men điện từ ngược chiều quay của rotor.

Bộ điều khiển FOC xử lý tín hiệu phản hồi tốc độ và dòng điện, sinh ra các điện áp điều khiển V_d và V_q . Các điện áp này được đưa vào bộ điều chế vectơ không gian (SVPWM) để tạo xung điều khiển cho bộ biến tần ba pha.

Trong chế độ phanh tái sinh, thành phần dòng I_{sq} mang giá trị âm, khiến PMSM làm việc ở chế độ máy phát và biến đổi năng lượng cơ học thành năng lượng điện.

Năng lượng điện sinh ra được truyền từ stator động cơ qua bộ biến tần tới liên kết DC. Tại đây, điện áp và dòng DC được giám sát và điều chỉnh để đảm bảo phù hợp với giới hạn làm việc của bộ pin. Dòng điện DC nạp ngược lại về pin, làm tăng trạng thái sạc (SOC), thể hiện quá trình thu hồi năng lượng trong pha phanh.

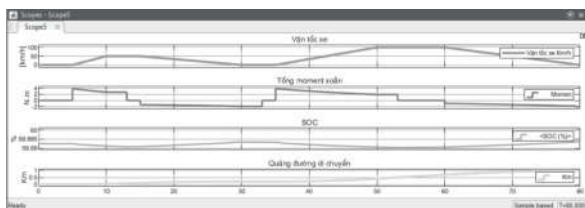
Mô hình cho phép đánh giá đồng thời đáp ứng mô-men phanh, đặc tính dòng điện, điện áp DC-link và hiệu quả thu hồi năng lượng, từ đó làm cơ sở cho việc phân tích và tối ưu hóa chiến lược điều khiển phanh tái sinh trong hệ truyền động xe điện.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng (Hình 6) của hệ thống phanh tái sinh từ mô hình tổng quát cho thấy [5]:

- Đường màu cam biểu diễn vận tốc: Tốc độ xe giảm dần trong suốt quá trình phanh, cho thấy khả năng giảm tốc hiệu quả nhờ chiến lược điều khiển tái sinh.

- Đường màu tím mô-men xoắn của động cơ (Nm): Mô-men xoắn điện từ thể hiện giá trị âm trong suốt quá trình phanh, xác nhận rằng động cơ PMSM hoạt động ở chế độ máy phát để cung cấp mô-men xoắn phanh.



Hình 6. Đồ thị hiển thị kết quả mô phỏng mô hình [5]

- Đồ thị SOC (State of Charge phần trăm pin) - Đường xanh dương nhạt:

Trạng thái pin ban đầu ~60%, sự thay đổi của trạng thái sạc pin (SOC) phản ánh đúng hướng truyền năng lượng.

Trong chế độ kéo, SOC giảm do pin cấp năng lượng cho động cơ, trong khi ở chế độ phanh tái sinh, SOC tăng nhẹ nhờ năng lượng cơ học được thu hồi và nạp trở lại pin thông qua bộ biến tần.

Mức tăng SOC tương đối nhỏ do thời gian phanh ngắn và giới hạn công suất nạp của pin.

- Quãng đường di chuyển (km) - Đường màu xanh lá:

Đường cong quãng đường di chuyển cho thấy độ dốc giảm dần, phù hợp với sự giảm tốc độ xe trong quá trình phanh.

Những kết quả sau khi mô phỏng chứng minh rằng hệ thống được đề xuất đảm bảo hiệu suất phanh ổn định đồng thời cho phép thu hồi năng lượng hiệu quả, từ đó cải thiện hiệu suất năng lượng tổng thể của xe điện. Điều này chứng minh tính đúng đắn của mô hình và hiệu quả của chiến lược phanh tái sinh.

4. KẾT LUẬN

Từ các kết quả nghiên cứu nêu trên, nhóm tác giả nhận thấy: Nội dung nghiên cứu đã xây dựng được thành công chương trình mô phỏng mô hình hệ thống phanh tái sinh sử dụng động cơ PMSM cho ô tô điện trong môi trường MATLAB/Simulink. Mô hình phản ánh chính xác mối quan hệ giữa động lực học xe, điều khiển động cơ và hệ thống lưu trữ năng lượng. Kết quả cho thấy phanh tái sinh giúp nâng cao hiệu suất năng lượng và là giải pháp cần thiết cho xe ô tô điện hiện đại.

Trong tương lai, mô hình có thể được mở rộng bằng cách tích hợp phanh ma sát và các chiến lược phân phối lực phanh tối ưu. Sản phẩm được áp dụng, triển khai sử dụng trong Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh cũng như khối các trường kỹ thuật và có thể phục vụ cho công tác khai thác sử dụng phục vụ trong các xưởng, ga ra, nhà máy về lĩnh vực Ô tô, ứng dụng trong ngành và phục vụ xã hội. ❖

Ngày nhận bài: 25/01/2026

Ngày phản biện: 03/02/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Trần Quang Thọ (2020), “Truyền động điện tự động”. NXB. Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh.
- [2]. Nguyễn Phùng Quang (2006), “Matlab & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.

- [3]. Cao Trọng Hiền, Đào Mạnh Hùng (2010), “*Lý thuyết ô tô*”. NXB. Giao thông Vận tải.
- [4]. Nguyễn Trọng Hoan (2019), “*Thiết kế tính toán ô tô*”. NXB. Giáo dục Việt Nam.
- [5]. Đề tài NCKH cấp cơ sở (2025), “*Nghiên cứu công nghệ phanh tái sinh và xây dựng thuật toán mô phỏng quá trình phanh trên xe điện phục vụ học tập tại xưởng thực hành Cơ khí ô tô*”. Năm học 2024-2025, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh.
- [6]. Energy Education, “*Regenerative braking*”. Energy Education Encyclopedia.
- [7]. “*Battery Controller based on Bidirectional Buck/boost Converter with PI Controller modelled in MATLAB*”, <https://www.youtube.com/watch?v=5INHrLNl3MQ>
- [8]. P. Bhandari, S. Dubey, S. Kandu, and R. Deshbhratar, “*Regenerative Braking Systems (RBS)*”. Int. J. Sci. Eng. Res., vol. 8, no. 2, Feb. 2017. [Online]. Available: <https://www.ijser.org/researchpaper/Regenerative-Braking-Systems-RBS.pdf>
- [9]. Website: www.google.com.vn