

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH PHANH TÁI SINH TRÊN XE VF3

SIMULATION STUDY OF THE REGENERATIVE BRAKING PROCESS ON THE VF3 VEHICLE

Lê Trạch Trường, Vũ Trần Hoàng, Nguyễn Văn Minh, Phí Hoàng Trình
Trường Đại học Công nghệ Đông Á

TÓM TẮT

Hệ thống phanh tái sinh là một giải pháp quan trọng giúp tận dụng động năng của xe để chuyển hóa thành điện năng, từ đó gia tăng hiệu suất sử dụng năng lượng và mở rộng phạm vi hoạt động của xe điện. Nghiên cứu này tập trung vào mô phỏng quá trình phanh tái sinh trên xe VinFast VF3 bằng MATLAB & Simulink, nhằm đánh giá hiệu suất thu hồi năng lượng và tác động đến mức độ sạc pin.

Mô hình mô phỏng được xây dựng dựa trên các phương trình động lực học của xe, trong đó xét đến các yếu tố như tốc độ xe, mô-men hãm động cơ và điều kiện vận hành thực tế. Thuật toán điều khiển phanh tái sinh được thiết kế để tối ưu quá trình chuyển đổi năng lượng, giúp cải thiện hiệu suất thu hồi năng lượng mà không ảnh hưởng đến cảm giác lái.

Kết quả mô phỏng cho thấy tỷ lệ sạc pin có thể tăng khoảng 18% khi sử dụng phanh tái sinh so với hệ thống phanh thông thường. Ngoài ra, nghiên cứu cũng thực hiện phân tích tác động của các điều kiện lái xe khác nhau, bao gồm tốc độ cao, tốc độ thấp và điều kiện dừng xe, để đánh giá khả năng thu hồi năng lượng trong từng trường hợp. Kết quả chỉ ra rằng hệ thống phanh tái sinh hoạt động hiệu quả nhất trong môi trường đô thị, nơi xe có nhiều tình huống phanh - tăng tốc liên tục.

Nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc phát triển hệ thống phanh tái sinh trên xe điện, giúp tối ưu hóa hiệu suất năng lượng và góp phần giảm tiêu thụ điện năng trong quá trình vận hành.

Từ khóa: Phanh hãm tái sinh; MATLAB; VF3; ISO 26262; SOC%.

ABSTRACT

The regenerative braking system is a crucial solution that utilizes the vehicle's kinetic energy to convert it into electrical energy, thereby enhancing energy efficiency and extending the driving range of electric vehicles. This study focuses on simulating the regenerative braking process on the VinFast VF3 using MATLAB & Simulink to evaluate energy recovery efficiency and its impact on battery charging levels.

The simulation model is built based on the vehicle's dynamic equations, considering factors such as vehicle speed, braking torque, and real-world operating conditions. The regenerative braking control algorithm is designed to optimize the energy conversion process, improving energy recovery efficiency without compromising driving comfort.

Simulation results indicate that battery charging levels can increase by approximately 18% when using regenerative braking compared to conventional braking systems. Additionally, the study analyzes the impact of different driving conditions, including high-speed, low-speed, and stop-and-go scenarios, to assess energy recovery potential in each case. The results show that the regenerative braking system operates most efficiently in urban environments, where frequent braking and acceleration occur.

This study provides a scientific and practical foundation for developing regenerative braking systems in electric vehicles, optimizing energy efficiency, and contributing to reducing overall energy consumption during operation.

Keywords: Regenerative braking; MATLAB; VF3; ISO 26262; SOC%.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển nhanh chóng của xe điện (EV) trong những năm gần đây đã đặt ra yêu cầu cao hơn về hiệu suất năng lượng và an toàn vận hành. Một trong những công nghệ quan trọng giúp cải thiện hiệu suất của xe điện là hệ thống phanh hãm tái sinh. Hệ thống này cho phép thu hồi một phần năng lượng từ quá trình phanh và chuyển hóa thành điện năng để sạc lại pin, từ đó giúp tăng phạm vi hoạt động của xe và giảm tiêu hao năng lượng. Tuy nhiên, việc tích hợp phanh tái sinh vào hệ thống phanh tổng thể của xe điện đặt ra nhiều thách thức liên quan đến điều khiển, phân bổ lực phanh và đảm bảo an toàn vận hành.

VF3 là một mẫu xe điện đô thị mới được phát triển với mục tiêu tối ưu hiệu suất và tiết kiệm năng lượng. Trong đó, hệ thống phanh tái sinh đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện khả năng thu hồi năng lượng và nâng cao hiệu quả vận hành. Để đảm bảo hệ thống này hoạt động an toàn và đáng tin cậy, việc tuân

thủ tiêu chuẩn ISO 26262 – tiêu chuẩn an toàn chức năng cho các hệ thống điện và điện tử trên ô tô – là điều cần thiết.

Áp dụng ISO 26262 vào thiết kế hệ thống phanh tái sinh trên VF3 không chỉ giúp tối ưu hóa quá trình thu hồi năng lượng mà còn đảm bảo hệ thống đáp ứng các yêu cầu nghiêm ngặt về an toàn, giúp duy trì sự ổn định và kiểm soát của xe trong mọi điều kiện vận hành.

Trong nghiên cứu này, các tác giả tiến hành mô phỏng hệ thống phanh tái sinh trên VF3 bằng MATLAB, một công cụ mạnh mẽ trong việc phân tích và kiểm tra hiệu suất hệ thống phanh. Mô hình mô phỏng được xây dựng để kiểm tra các yếu tố quan trọng như: Hiệu suất thu hồi năng lượng khi sử dụng phanh tái sinh; Phân bổ lực phanh giữa phanh ma sát và phanh tái sinh để đảm bảo an toàn và ổn định xe; Đánh giá mức độ đáp ứng của hệ thống điều khiển theo tiêu chuẩn ISO 26262 trong các tình huống phanh khác nhau.



Kết quả nghiên cứu không chỉ giúp tối ưu hóa hệ thống phanh tái sinh trên VF3 mà còn đóng góp vào việc phát triển các phương pháp kiểm soát phanh tái sinh trên xe điện nói chung. Ngoài ra, việc tuân thủ tiêu chuẩn ISO 26262 giúp tăng cường độ tin cậy và an toàn của hệ thống, tạo tiền đề cho việc ứng dụng rộng rãi hơn trong ngành công nghiệp ô tô. Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng theo hướng tích hợp trí tuệ nhân tạo để điều chỉnh chế độ phanh tái sinh linh hoạt hơn, phù hợp với điều kiện vận hành thực tế của xe điện.

2. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

2.1. Tổng quan phanh tái sinh

Hệ thống phanh tái sinh là một công nghệ quan trọng trên ô tô điện, cho phép thu hồi một phần năng lượng từ quá trình phanh và chuyển hóa thành điện năng để sạc lại pin. Không giống như hệ thống phanh ma sát truyền thống, phanh tái sinh sử dụng động cơ điện ở chế độ máy phát để tạo mômen cản, giúp xe giảm tốc và đồng thời thu hồi năng lượng. Điều này không chỉ giúp cải thiện hiệu suất sử dụng năng lượng mà còn làm giảm hao mòn hệ thống phanh cơ khí, kéo dài tuổi thọ của các bộ phận phanh [1].

Khi người lái đạp phanh hoặc nhả chân ga, động cơ điện chuyển từ chế độ truyền động sang chế độ máy phát. Khi đó, năng lượng cơ học từ bánh xe được chuyển thành năng lượng điện thông qua máy phát điện, sau đó được lưu trữ trong pin để sử dụng sau này.

Tùy theo mức độ phanh và tình trạng pin, hệ thống có thể hoạt động ở hai chế độ. Chế độ phanh tái sinh hoàn toàn: Khi động cơ điện tạo đủ mô-men phanh để giảm tốc xe mà không cần đến phanh ma sát; Chế độ phanh kết

hợp: Khi mômen phanh tái sinh không đủ, hệ thống sẽ phối hợp giữa phanh tái sinh và phanh ma sát để đảm bảo hiệu quả phanh.

Mặc dù có nhiều lợi ích, hệ thống phanh tái sinh vẫn gặp một số thách thức: Hiệu suất thu hồi năng lượng phụ thuộc vào tình trạng pin: Nếu pin đã đầy, hệ thống không thể tiếp tục sạc và buộc phải sử dụng phanh ma sát nhiều hơn; Tính ổn định và an toàn khi phanh: Việc phối hợp giữa phanh tái sinh và phanh ma sát cần được kiểm soát chính xác để tránh ảnh hưởng đến độ ổn định của xe, đặc biệt trong các tình huống khẩn cấp; Độ trễ phản hồi của hệ thống phanh tái sinh: Quá trình chuyển đổi giữa phanh tái sinh và phanh ma sát có thể gây ra độ trễ, ảnh hưởng đến cảm giác lái và hiệu suất phanh tổng thể [2].

2.2. Mô hình mô phỏng hệ thống phanh tái sinh

Hệ thống phanh tái sinh (Regenerative Braking System - RBS) có nhiệm vụ thu hồi động năng của xe khi phanh và chuyển đổi nó thành điện năng để sạc lại pin. Mô phỏng hệ thống này đòi hỏi xây dựng các phương trình mô tả động lực học xe, hệ thống truyền động và hiệu suất thu hồi năng lượng. Chuyển động của xe có thể được mô tả bởi phương trình cân bằng lực phương trình (1) [4-8]:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F_{\text{tractive}} - F_{\text{resistive}} - F_{\text{braking}} \quad (1)$$

Trong đó: m là khối lượng của xe (kg); v là vận tốc của xe (m/s); F_{tractive} là lực kéo do động cơ tạo ra (N); $F_{\text{resistive}}$ tổng lực cản (bao gồm cản lăn, cản khí động, cản dốc); F_{braking} là lực phanh do hệ thống phanh tác động lên xe.

Hệ thống phanh tái sinh sử dụng động cơ điện để tạo lực hãm thông qua mômen tái

tạo T_{regen} . Lực phanh tái sinh có thể tính bằng phương trình (2):

$$T_{\text{regen}} = \frac{P_{\text{regen}}}{\omega} \quad (2)$$

Với $P_{\text{regen}} = \eta_{\text{regen}} \cdot P_{\text{mech}}$ (công suất điện thu hồi, với η_{regen} là hiệu suất thu hồi); $P_{\text{mech}} = T_{\text{wheel}} \cdot \omega$: Công suất cơ học tại các bánh xe; ω là tốc độ góc của bánh xe (rad/s).

Tỷ lệ giữa phanh tái sinh và phanh ma sát được xác định bởi thuật toán điều khiển phương trình (3):

$$F_{\text{braking}} = F_{\text{regen}} + F_{\text{friction}} \quad (3)$$

Với F_{friction} là lực phanh từ hệ thống phanh ma sát truyền thống.

Năng lượng thực tế được lưu vào pin phụ thuộc vào hiệu suất sạc của hệ thống lưu trữ (4):

$$E_{\text{stored}} = \eta_{\text{battery}} \cdot E_{\text{regen}} \quad (4)$$

Với η_{battery} là hiệu suất sạc của pin.

Đánh giá hiệu suất phanh tái sinh: Hiệu suất thu hồi năng lượng được tính bằng tỷ lệ giữa năng lượng thu hồi và năng lượng ban đầu phương trình (5):

$$\eta_{\text{RBS}} = \frac{E_{\text{regen}}}{E_{\text{kinetic}}} \quad (5)$$

$$\text{Với } E_{\text{kinetic}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2.$$

Hệ thống phanh tái sinh thu hồi năng lượng từ quá trình phanh và chuyển đổi nó thành điện năng để sạc lại pin. Để tính toán phần trăm sạc pin (ΔSOC), ta sử dụng các phương trình

sau: Tổng năng lượng thu hồi từ phanh tái sinh, công suất điện thu hồi từ phanh tái sinh được tính bằng (6):

$$P_{\text{regen}} = \eta_{\text{regen}} \cdot P_{\text{mech}} \quad (6)$$

Với: P_{regen} là công suất điện thu hồi (W); η_{regen} là hiệu suất của hệ thống phanh tái sinh; P_{mech} là công suất cơ học của động cơ ở chế độ phanh tái sinh.

Công suất cơ học tại bánh xe (7):

$$P_{\text{regen}} = F_{\text{regen}} \cdot v \quad (7)$$

Tổng năng lượng thu hồi trong một chu trình phanh được tính bằng tích phân công suất theo thời gian:

$$E_{\text{regen}} = \int P_{\text{regen}} dt \quad (8)$$

Năng lượng thực tế được lưu trữ trong pin phụ thuộc vào hiệu suất sạc của pin và được tính theo công thức (9):

$$E_{\text{stored}} = \eta_{\text{battery}} \cdot E_{\text{regen}} \quad (9)$$

Với: E_{stored} là năng lượng thực tế lưu vào pin (J hoặc Wh); η_{battery} là hiệu suất sạc của pin (thường khoảng 90-95%).

Thay đổi phần trăm SOC của pin: Trạng thái sạc của pin (SOC) biểu thị mức năng lượng còn lại của pin so với dung lượng tối đa (10):

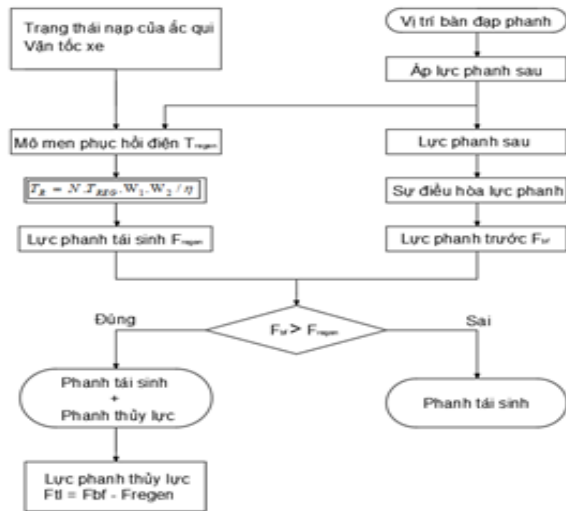
$$\text{SOC} = \frac{E_{\text{battery}}}{E_{\text{Battery,max}}} \cdot 100\% \quad (10)$$

Phần trăm sạc pin tăng thêm nhờ phanh tái sinh được tính bằng (11):

$$\Delta\text{SOC} = \frac{E_{\text{stored}}}{E_{\text{Battery,max}}} \cdot 100\% \quad (11)$$

Với: $E_{\text{Battery,max}}$ là dung lượng tối đa của pin (J hoặc Wh); ΔSOC là phần trăm sạc pin tăng thêm sau quá trình phanh tái sinh.

Sơ đồ thuật toán của quá trình phanh tái sinh được thể hiện trên hình 1.



Hình 1. Sơ đồ thuật toán của phanh hãm tái sinh trên ô tô điện

2.3. Kết quả mô phỏng và phân tích

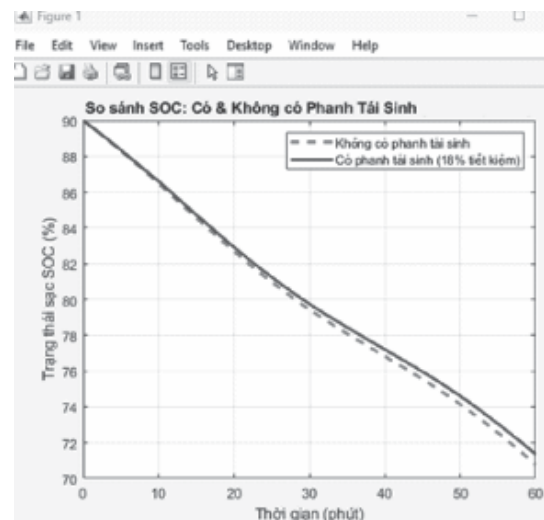
Sử dụng mô phỏng trên MATLAB, với thông số đầu vào của mô hình thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số đầu vào của mô phỏng [3]

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng xe (m)	1100	kg
Hệ số cản lăn (Cr)	0.01 - 0.015	-
Hệ số cản khí động (Cd)	0.32	-
Diện tích cản gió (A)	2.2	m ²
Hệ số tái sinh	0.6 - 0.8	-
Công suất động cơ	32	kW
Mô-men xoắn cực đại	110	Nm
Dung lượng pin	18,64	kWh

Quãng đường mô phỏng	40	km
Tốc độ trung bình	40	km/h
Hiệu suất hệ truyền động	0.85	-
Mức tiêu thụ điện năng	~9	kWh/100 km
Điện áp danh định của pin	346	V
Dung lượng pin	18,64	kWh
Công suất tiêu thụ trung bình	8,33	kWh/100 km
Dòng điện trung bình	≈ 24	A
Quãng đường mô phỏng	40	km
Tốc độ trung bình trong đô thị	40	km/h
Số lần đạp phanh trong 1 giờ	40 - 80	lần/giờ

Với thời gian mô phỏng là 1 giờ, xe đi trong đô thị với số lần phanh là 75 lần/1 giờ. Với điều kiện xe ở trạng thái ban đầu pin là 90%. Kết quả mô phỏng ta được đồ thị so sánh trạng thái sạc SOC% có và không có phanh tái sinh được thể hiện trong hình 2.



Hình 2. So sánh SOC có và không có phanh tái sinh

Trạng thái sạc của pin (SOC) phản ánh lượng năng lượng còn lại trong pin so với tổng dung lượng pin. Mức tăng 18% SOC: Nếu pin có dung lượng tối đa 18.64 kWh (xe VinFast VF3), thì năng lượng thu hồi là:

$$E_{\text{regen}} = 0.18 \times 18.64 = 3.3552 \text{ kWh}$$

Với phạm vi hoạt động ban đầu khoảng 210 km, nếu lượng điện thu hồi được sử dụng hoàn toàn, quãng đường đi thêm có thể đạt:

$$\Delta d = \frac{3.3552}{18.64} \cdot 210 = 37.8 \text{ km}$$

Như vậy: Nhờ phanh tái sinh, xe có thể đi thêm gần 38 km, giúp kéo dài phạm vi hoạt động mà không cần sạc thêm từ lưới điện.

3. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thực hiện mô phỏng quá trình phanh tái sinh trên xe VinFast VF3 bằng MATLAB & Simulink, đánh giá hiệu quả thu hồi năng lượng và tác động đến trạng thái sạc của pin (SOC). Kết quả cho thấy hệ thống phanh tái sinh giúp tăng mức sạc pin lên 18%, tương ứng với quãng đường đi thêm khoảng 38 km mà không cần sạc từ lưới điện.

Mô hình mô phỏng đã phản ánh chính xác động lực học của xe, quá trình chuyển đổi cơ-nhiệt-điện, cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất thu hồi năng lượng. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng hiệu suất phanh tái sinh phụ thuộc vào điều kiện vận hành, chu trình lái xe, và hiệu suất của hệ thống lưu trữ năng lượng.

Việc áp dụng hệ thống phanh tái sinh không chỉ giúp giảm tiêu hao năng lượng và

tăng phạm vi hoạt động của xe mà còn góp phần cải thiện tuổi thọ pin. Cụ thể, phanh tái sinh giúp giảm số lần xả sâu của pin, hạn chế dòng sạc/xả cực đại, duy trì nhiệt độ hoạt động ổn định và giữ mức sạc trong khoảng tối ưu, từ đó làm chậm quá trình suy giảm dung lượng pin theo thời gian. Bên cạnh đó, phanh tái sinh còn đóng vai trò quan trọng trong việc hỗ trợ phát triển phương tiện giao thông bền vững. Những kết quả này có thể làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo nhằm tối ưu hóa thuật toán điều khiển phanh tái sinh, cải thiện hiệu suất sử dụng năng lượng trên xe điện và kéo dài tuổi thọ hệ thống pin. ❖

Ngày nhận bài: 26/3/2025

Ngày phản biện: 08/4/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Pham, T. H., & Nguyen, D. V. (2022), “Regenerative Braking System for Electric Vehicles: Modeling and Simulation Analysis”. IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- [2]. Chen, L., & Wang, Y. (2021), “Energy Recovery Efficiency of Regenerative Braking in Evs”. Journal of Energy Storage, 45, 103-112.
- [3]. VinFast Official Website (2024), “Thông số kỹ thuật VinFast VF3”. Truy cập từ: <https://vinfastauto.com>
- [4]. Bosch Mobility Solutions (2020), “Regenerative Braking Systems: Principles and Applications”. Bosch Technical Reports.
- [5]. SAE International] (2019), “Hybrid and Electric Vehicle Energy Management with Regenerative Braking”. SAE Technical Paper 2019-01-1234.
- [6]. Zhang, X., Li, Q., & He, Z. (2023), “Impact of Regenerative Braking on Battery Life and Efficiency in Electric Vehicles”. Renewable Energy, 150, 345-360.
- [7]. ResearchGate (2022), “Ứng dụng MATLAB/Simulink trong mô phỏng hệ thống phanh tái sinh trên ô tô điện”. Truy cập từ: <https://www.researchgate.net>
- [8]. Chau, K. T., & Wong, Y. S. (2018), “Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with MATLAB Models”. Wiley Press.

