

Regenerative Braking Force Distribution Study on Hybrid Electric Vehicles

Tuan Tung Duong*, Bao-Tuyen Nguyen
Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

*Corresponding author. Email: tungdt@hcmute.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 22/04/2025
Revised: 23/05/2025
Accepted: 19/08/2025
Published: 28/11/2025

KEYWORDS

Hybrid Electric Vehicle (HEV);
Regenerative Braking System (RBS);
Braking Force Distribution (BFD);
State of Charge (SOC);
Energy Recovery Efficiency (ERE).

ABSTRACT

The ability to recover kinetic energy is an inherent advantage of hybrid vehicles due to the integration of the regenerative braking system. The structure, design, and control mechanism of hybrid vehicles differ significantly from conventional vehicles using mechanical braking. Among these differences, the control algorithm plays a crucial role in optimizing energy recovery during braking. This study focuses on the regenerative braking force distribution strategy in a power-split Hybrid Electric Vehicle (HEV) system. The control strategy is implemented in two stages: the first stage prioritizes distributing braking force to the front axle to ensure compliance with ECE regulations and the ideal braking force distribution curve, the second stage employs a fuzzy logic controller to optimize the coordination between regenerative braking force and mechanical braking force. The fuzzy controller has three inputs: vehicle speed, braking intensity, and battery state of charge (SOC). The braking force distribution model was developed in MATLAB/Simulink and evaluated through different driving cycles, including UDDS, NEDC, URBAN, and WLTC. Simulation results indicate that the proposed strategy significantly improves energy recovery efficiency. Specifically, the energy recovery efficiency is 40 % for URBAN, 37,54 % for UDDS, 30,75 % for WLTC, and 26,92 % for NEDC cycles, respectively. These results confirm the effectiveness of the proposed regenerative braking force distribution control strategy.

Nghiên cứu phân phối lực phanh tái sinh trên ô tô Hybrid

Dương Tuấn Tùng*, Nguyễn Bảo Tuyền
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: tungdt@hcmute.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 22/04/2025
Ngày hoàn thiện: 23/05/2025
Ngày chấp nhận đăng: 19/08/2025
Ngày đăng: 28/11/2025

TỪ KHÓA

Xe Lai Động Cơ – Điện (HEV);
Hệ Thống Phanh Tái Sinh (RBS);
Phân Phối Lực Phanh (BFD);
Trạng Thái Sạc (SOC);
Hiệu Quả Thu Hồi Năng Lượng (ERE).

TÓM TẮT

Khả năng thu hồi động năng là một lợi thế vốn có của xe hybrid. Do tích hợp hệ thống phanh tái sinh. Cấu trúc, thiết kế và cơ chế điều khiển của xe hybrid khác biệt đáng kể so với các phương tiện sử dụng phanh cơ truyền thống. Trong đó, thuật toán điều khiển đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa khả năng thu hồi năng lượng trong quá trình phanh. Nghiên cứu này tập trung vào chiến lược phân phối lực phanh tái sinh trong hệ thống hybrid điện có cấu trúc hỗn hợp. Chiến lược điều khiển được thực hiện qua hai giai đoạn: giai đoạn đầu tiên ưu tiên phân phối lực phanh lên trục trước nhằm đảm bảo tuân thủ quy định ECE và đường cong phân phối lực phanh lý tưởng. Giai đoạn thứ hai sử dụng bộ điều khiển logic mờ để tối ưu sự phối hợp giữa lực phanh tái sinh và lực phanh cơ học. Bộ điều khiển mờ có ba đầu vào: tốc độ xe, cường độ phanh và trạng thái sạc của ắc quy. Mô hình phân phối lực phanh được xây dựng trên MATLAB/Simulink và được đánh giá qua các chu trình lái khác nhau như UDDS, NEDC, URBAN và WLTC. Kết quả mô phỏng cho thấy chiến lược đề xuất giúp cải thiện đáng kể hiệu suất thu hồi năng lượng. Cụ thể, hiệu suất thu hồi năng lượng lần lượt đạt 40 %, 37,54 %, 30,75 % và 26,92 % tương ứng với các chu trình URBAN, UDDS, WLTC và NEDC. Những kết quả này khẳng định tính

hiệu quả của chiến lược điều khiển phân phối lực phanh tái sinh được đề xuất.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2025.1886>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Trước nhu cầu tiết kiệm năng lượng và giảm phát thải, xe hybrid (HEV) trở thành giải pháp hiệu quả nhờ kết hợp động cơ đốt trong với truyền động điện. Một ưu điểm nổi bật là khả năng phanh tái sinh, chuyển động năng khi phanh thành điện năng nạp cho ắc quy, giúp tăng hiệu suất và giảm hao mòn phanh.

Hiệu quả thu hồi phụ thuộc vào tốc độ xe, trạng thái sạc ắc quy (SOC), chiến lược phối hợp phanh điện – phanh cơ, cũng như điều kiện lái [1]. Do đó, tối ưu hóa phân phối lực phanh là yếu tố then chốt để vừa đảm bảo an toàn vừa nâng cao khả năng thu hồi. Các phương pháp điều khiển hiện đại như mạng nơ-ron, điều khiển mờ, hay thuật toán bầy đàn có thể thu hồi 10 - 35 % năng lượng [1] - [4].

Trong đó, điều khiển mờ tỏ ra hiệu quả nhờ xử lý tốt tính phi tuyến và không chắc chắn. Bằng cách phân phối linh hoạt lực phanh theo tốc độ, yêu cầu giảm tốc và SOC. Phương pháp này vừa đáp ứng yêu cầu phanh, tránh bó cứng bánh xe và nâng cao hiệu quả thu hồi năng lượng.

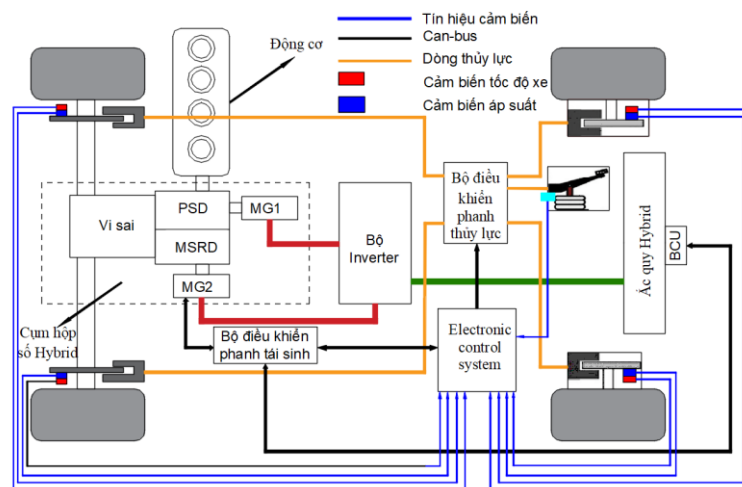
2. Phân tích hệ thống phanh của xe Hybrid

2.1. Sơ đồ hệ thống thu hồi năng lượng phanh

Trên xe hybrid, quá trình giảm tốc có thể tận dụng năng lượng quán tính để tái sinh. Khi giảm tốc, mô-tơ điện MG2 hoạt động như máy phát, biến động năng thành điện năng nạp lại ắc quy cao áp. Hệ thống phanh hybrid vì vậy kết hợp giữa phanh tái sinh bằng động cơ điện và phanh cơ học thủy lực.

Trên xe dẫn động cầu trước, chỉ cầu trước tham gia phanh tái sinh, trong khi cầu sau vẫn dùng phanh cơ học. Do tải trọng dồn về trước khi giảm tốc, cần điều chỉnh phân phối lực phanh giữa hai cầu để giữ ổn định và tránh bó cứng bánh sau. Bộ phân phối lực phanh đảm nhiệm việc phân chia áp suất dầu hợp lý, đồng thời phối hợp hoạt động giữa hai loại phanh.

Hình 1 minh họa sơ đồ cấu trúc hệ thống phanh trên một xe điện dẫn động cầu trước. Hệ thống phanh hỗn hợp gồm mô-tơ điện, phanh thủy lực, ắc quy và bộ điều khiển điện tử. Phanh thủy lực tạo lực hãm bằng áp suất dầu, còn phanh tái sinh chuyển đổi mô-tơ sang chế độ máy phát để hãm xe và tạo điện năng. Bộ điều khiển điện tử thu nhận tín hiệu từ bàn đạp phanh, tốc độ xe, SOC và điện áp pin để xác định ý định phanh, từ đó quyết định phối hợp phanh điện – phanh cơ. Nếu có thể thu hồi, lực phanh được phân phối hợp lý. Nếu không, phanh thủy lực sẽ đảm nhận hoàn toàn để bảo đảm an toàn.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống phanh.

2.2. Phương trình động lực học

Khi xe chạy trên đường thẳng, mặt đường khô ráo và hệ số bám hai bên đồng đều, động cơ và mô-tơ là nguồn công suất chính. Khi phanh, cảm biến bàn đạp gửi tín hiệu đến bộ điều khiển để xác định tổng lực phanh. Lực này được phân phối giữa cầu trước – cầu sau và giữa phanh cơ – phanh tái sinh. Mô-tơ điện tạo mô-men phanh tái sinh, biến một phần động năng thành điện năng lưu trữ trong ắc quy. Quá trình này tuân theo phương trình động lực học của ô tô hybrid: [5]

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j$$

$$\frac{T_{iq} i_g i_o \eta_T}{r} = Wf \cos \alpha + W \sin \alpha + \frac{C_d A u^2}{21,15} + \delta m \frac{du}{dt} \quad (1)$$

Trong đó: F_f : Lực cản lăn, F_w : Lực cản gió, F_i : Lực cản dốc, F_j : Lực quán tính, T_{iq} : Mô men xoắn đầu ra động cơ điện, i_g : Tỷ số truyền động, i_o : Tỷ số truyền lực cuối, W : Trọng lượng toàn tải của xe, f : Hệ số cản lăn, C_d : Hệ số cản gió, u : Tốc độ xe, m : Khối lượng toàn tải xe, du/dt : Gia tốc, δ : Hệ số chuyển đổi khối lượng quay, r : Bán kính lăn của bánh xe, η_T : Hiệu suất cơ học của hệ thống truyền động.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật xe Toyota Cross Hybrid [6]

Thông số xe	Giá trị
Khối lượng toàn tải /kg	1850
Chiều dài cơ sở /m	2,64
Chiều cao trọng tâm xe /m	0,624
Khoảng cách từ trọng tâm đến trục sau /m	1,056
Diện tích cản gió /m ²	2,21
Hệ số cản gió	0,32
Điện áp cực đại ắc quy	201,6
Công suất cực đại MG2 /kW	53
Momen xoắn cực đại /N.m	163

3. Nguyên lý phân phối lực phanh giữa cầu trước và cầu sau

3.1. Đường cong phân phối lực phanh lý tưởng I

Đường cong phân bố lực phanh lý tưởng xác định cách phân phối lực giữa trục trước và trục sau nhằm tối ưu hiệu quả phanh trong mọi điều kiện bám đường. Mục tiêu là đảm bảo bánh trước và bánh sau khóa đồng thời, tận dụng tối đa lực bám và duy trì ổn định hướng chuyển động, đặc biệt trong phanh khẩn cấp. Hình 2 minh họa đường cong này, được biểu diễn bằng phương trình [7].

$$F_{xR} = \frac{1}{2} \left[\frac{W}{h_g} \sqrt{b^2 + \frac{4h_g L}{W} F_{xF}} - \left(\frac{Wb}{h_g} + 2F_{xF} \right) \right] \quad (2)$$

Trong đó: F_{xF} : Lực phanh tác dụng lên bánh sau, F_{xR} : Lực phanh tác dụng lên bánh trước, h_g : Chiều cao trọng tâm xe, L : Chiều dài cơ sở của xe, b : Khoảng cách từ trọng tâm đến cầu sau.

3.2. Đường cong quy định phanh ECE

Nhằm duy trì sự ổn định hướng chuyển động và hiệu quả phanh cho hệ thống phanh ô tô, quy định phanh ECE R13 do Ủy ban Kinh tế Châu Âu ban hành đã thiết lập các tiêu chuẩn chi tiết về lực phanh tác dụng lên bánh trước và bánh sau đối với xe hai cầu [8].

Đối với các loại xe có hệ số bám đường dao động từ 0,2 đến 0,8 và lực phanh cần thỏa mãn điều kiện:

$$z \geq 0,1 + 0,85(\mu - 0,2) \quad (3)$$

Mối quan hệ giữa lực phanh cầu trước và cầu sau được thể hiện bằng phương trình:

$$\frac{h_g (F_{xF} + F_{xR})^2}{mgL} + \frac{F_{xF} + F_{xR}}{L} (b + 0,07h_g) + \frac{0,07mgb}{L} - 0,85F_{xF} = 0 \quad (4)$$

3.3. Tập đường f , r

Lực phanh tối đa mà mặt đường có thể chịu được phụ thuộc vào hệ số bám đường μ .

Tập đường f dùng để khảo sát lực phanh tiếp xúc giữa lốp và mặt đường của bánh trước và bánh sau. Trong trường hợp bánh trước bị bó cứng còn bánh sau chưa bị bó cứng. Mối quan hệ được thiết lập như sau [8]:

$$F_{xR} = \frac{L - \mu h_g}{\mu h_g} F_{xF} - \frac{Wb}{h_g} \quad (5)$$

Tập hợp đường f với các giá trị khác nhau của hệ số bám có giao điểm tại trục tung F_{xR} tại giá trị $-Wb/h_g$ và tất cả các đường f đều đi qua điểm $(0, -Wb/h_g)$.

Tập đường r dùng để khảo sát lực phanh tiếp xúc giữa lốp và mặt đường của bánh trước và bánh sau. Trong trường hợp bánh sau bị bó cứng còn bánh trước chưa bị bó cứng. Mối quan hệ được thiết lập như sau:

$$F_{xR} = \frac{-\mu h_g}{L + \mu h_g} F_{xF} + \frac{\mu Wa}{L + \mu h_g} \quad (6)$$

Tập hợp đường r với các giá trị khác nhau của hệ số bám có giao điểm tại trục tung F_{xF} tại giá trị Wa/h_g và tất cả các đường r đều đi qua điểm $(Wb/h_g, 0)$.

Giao điểm giữa tập hợp đường f và r biểu thị trạng thái bánh trước và bánh sau khóa đồng thời. Đường nối giữa các điểm giao nhau này chính là đường cong phân phối lực phanh lý tưởng I .

3.4. Phân phối lực phanh giữa bánh trước và bánh sau

Phân phối lực phanh giữa cầu trước và cầu sau ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định và khả năng bám đường khi phanh. Hệ thống phân phối lực phanh cố định chỉ tối ưu khi hệ số bám trùng với giá trị thiết kế, nếu không dễ gây bó cứng bánh và giảm hiệu quả phanh, đồng thời không phản ánh thay đổi tải trọng hay điều kiện mặt đường. Trên xe hybrid, việc điều khiển phân phối lực phanh còn giúp tối ưu thu hồi năng lượng. Do đó, bài báo đề xuất chiến lược phân phối lực phanh nhiều giai đoạn, kết hợp đường cong I và tiêu chuẩn ECE để nâng cao hiệu quả theo từng mức độ phanh.

Theo Hình 2, quá trình phanh được chia thành bốn giai đoạn dựa trên cường độ phanh: phanh thấp, phanh trung bình, phanh cao và phanh khẩn cấp [5].

Khi $z \leq 0,15$ cường độ phanh nhẹ. Đoạn AB thể hiện bánh trước cung cấp toàn bộ lực phanh cần thiết cho xe ta có quy luật phân phối lực phanh như sau:

$$\begin{cases} F_{xF} = Wz \\ F_{xR} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó F_{xF} và F_{xR} lần lượt là lực phanh của cầu trước và cầu sau.

(1) Khi lực phanh $z_1 < z \leq z_2$, đoạn BC, theo quy định ECE nên phân phối lực phanh trước và sau phải được bố trí phía trên đường cong M , do đó trong trường hợp này, bánh trước và bánh sau

cung cấp lực phanh cùng một lúc, tránh hiện tượng bị bó cứng bánh sau hoặc trượt lết, nguyên tắc phân phối như sau:

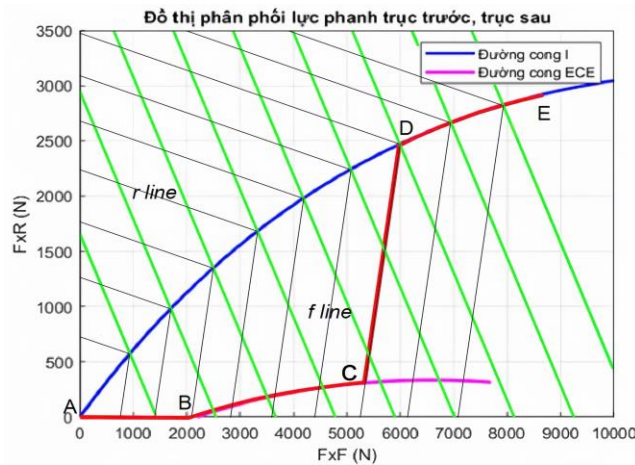
$$\begin{cases} F_{xF} = \frac{z+0,07}{0,85} \frac{W}{L} (b+zh_g) \\ F_{xR} = Wz - F_{xF} \end{cases} \quad (8)$$

(2) Khi lực phanh là $z_2 < z \leq z_3$, đoạn CD, khi lực phanh tăng thì khả năng khóa bánh trước tăng. Để đảm bảo lực phanh cầu trước không vượt quá lực mà hệ số bám mặt đường có thể cung cấp, lực phanh bánh sau cũng tăng phù hợp. Nguyên tắc phân phối như sau:

$$\begin{cases} F_{xF} = \frac{W\mu}{L} (b+zh_g) \\ F_{xR} = F_{xF} \left(\frac{L-\mu h_g}{\mu h_g} \right) - W \frac{b}{h_g} \end{cases} \quad (9)$$

(3) Trong trường hợp phanh khẩn cấp, khi cường độ phanh $z > 0,7$ đoạn DE. Trong điều kiện này lực phanh của bánh trước và bánh sau được phân phối theo đường cong I, cả cầu trước và cầu sau đều khóa đồng thời để tối ưu hóa việc sử dụng độ bám đường, nguyên tắc phân phối như sau:

$$\begin{cases} F_{xF} = W\mu \frac{b+zh_g}{L} \\ F_{xR} = W\mu \frac{a-zh_g}{L} \end{cases} \quad (10)$$



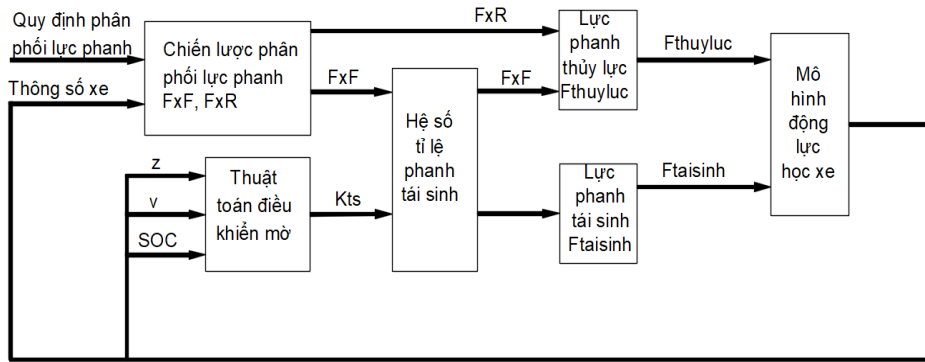
Hình 2. Đồ thị điều khiển phân phối lực phanh bánh trước và bánh sau.

4. Thuật toán điều khiển thu hồi năng lượng phanh

4.1. Chiến lược điều khiển thu hồi năng lượng tối ưu

Điều khiển mờ ứng dụng toán học mờ kết hợp kinh nghiệm và lý thuyết điều khiển để xử lý các hệ thống phức tạp mà mô hình toán học khó mô tả. Trong xe hybrid dẫn động cầu trước, lực phanh cầu trước cần được phân phối giữa phanh cơ khí và phanh tái sinh. Do quá trình này chịu nhiều yếu tố ảnh hưởng và không có mô hình rõ ràng, điều khiển mờ là phương pháp tối ưu.

Ba tham số tốc độ xe, cường độ phanh và trạng thái sạc pin (SOC) được dùng làm đầu vào, và hệ số tỷ lệ lực phanh tái sinh k_{rs} được sử dụng làm đầu ra bộ điều khiển mờ. Tích hợp bộ điều khiển mờ vào chiến lược phân phối lực phanh giúp phân phối lực giữa cầu trước - cầu sau và giữa lực phanh cơ khí - tái sinh ở cầu trước. Hình 3 minh họa cấu trúc chiến lược này.

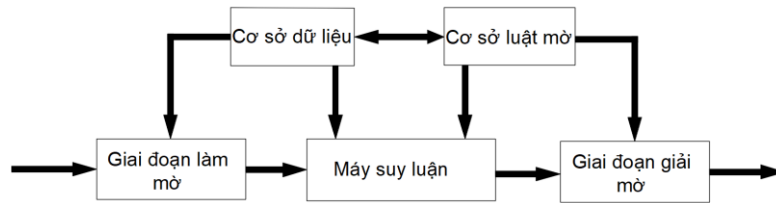


Hình 3. Sơ đồ chiến lược điều khiển mờ thu hồi năng lượng

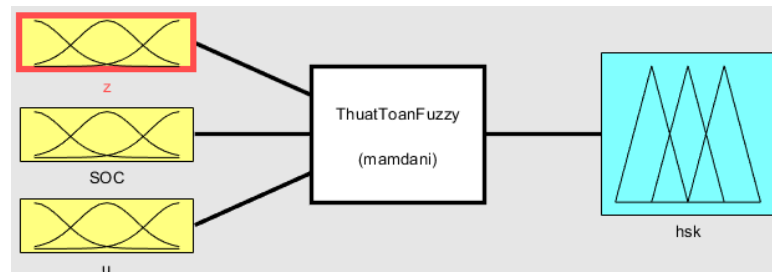
4.2. Thiết kế bộ điều khiển mờ

4.2.1. Bộ điều khiển mờ

Điều khiển mờ là một dạng điều khiển thông minh dựa trên chiến lược hoặc hành vi của một đối tượng điều khiển thông qua việc sử dụng kiến thức chuyên môn. Kiến thức này được thể hiện dưới dạng If - Then (Nếu - Thì) và các biến ngôn ngữ.



Hình 4. Cấu trúc bộ điều khiển mờ



Hình 5. Bộ điều khiển mờ dạng Mamdani

Sơ đồ hình 4 minh họa cấu trúc bộ điều khiển mờ, gồm 5 thành phần chính: biến mờ, giai đoạn mờ hóa, cơ sở kiến thức chuyên môn, máy suy luận, giai đoạn giải mờ [9].

Hàm thành viên (Membership function): Gaussian cho các biến đầu vào và đầu ra được biểu diễn dưới dạng Gaussian [10]:

$$\zeta(y, \delta, c) = e^{-\frac{(y-c)^2}{2\delta^2}} \quad (11)$$

Trong đó: y là giá trị đầu vào (biến độc lập, có thể là z, soc, u); δ là vị trí trung tâm của đường cong (tức là vị trí đỉnh của hàm thành viên), c là độ rộng của đường cong (độ lan tỏa của hàm Gauss).

Trong nghiên cứu này, trường hợp phanh khẩn cấp hoặc khi phanh ở tốc độ cao để đảm bảo an toàn trong điều khiển xe thì momen phanh tái sinh bằng không, chỉ sử dụng lực phanh cơ khí. Trong trường hợp xe di chuyển với tốc độ thấp sử dụng phanh tái sinh là không hiệu quả vì hiệu suất động cơ điện thấp.

Trong hệ thống biến đầu vào và đầu ra được mờ hóa như sau:

Biến đầu vào:

Cường độ phanh (z) có miền giá trị $z = [0,1]$, tập mờ là: thấp, trung bình, cao và rất cao. Khi cường độ z thấp, hệ số phân phối phanh tái sinh k_{ts} tăng để tối ưu hóa thu hồi năng lượng. Với z trung bình, tỷ lệ phanh tái sinh tiếp tục được ưu tiên. Khi z cao hoặc đường trơn hoặc tải trọng lớn k_{ts} giảm ưu tiên sử dụng phanh cơ khí để đảm bảo an toàn.

Tốc độ xe (u) có miền giá trị $u = [0,140]$ km/h, tập mờ là: thấp, trung bình, cao và rất cao. Ở tốc độ thấp, phanh cơ khí được ưu tiên do động cơ điện không tạo đủ lực phanh. Ở tốc độ trung bình và cao, phanh tái sinh tăng dần để tối ưu thu hồi năng lượng đồng thời duy trì ổn định xe.

Trạng thái sạc (SOC) có miền giá trị $SOC = [0,1]$ với tập mờ : thấp, trung bình, cao và rất cao.

- $SOC < 10\%$: Giảm lực phanh tái sinh để tránh dòng sạc cao làm hư pin.
- $10\% \leq SOC \leq 90\%$: Tăng lực phanh tái sinh để tối ưu thu hồi năng lượng mà vẫn an toàn cho pin.
- $SOC > 90\%$: Giảm lực phanh tái sinh để tránh hiện tượng mạ lithium và giảm hiệu suất pin.

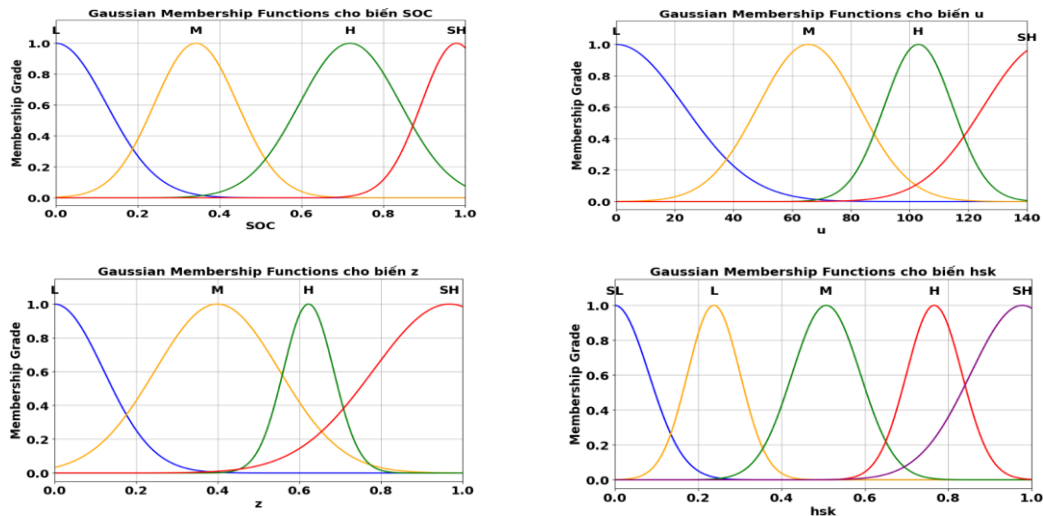
Khi trạng thái sạc (SOC) cao thì hệ số k_{ts} giảm, dẫn đến thu hồi năng lượng ít hơn. Điều chỉnh này được thực hiện nhằm ngăn ngừa việc sạc quá mức và các tác động xấu đến tuổi thọ của pin. Hệ số k_{ts} tỷ lệ nghịch với trạng thái sạc (SOC). Tỷ lệ thuận với cường độ phanh tái sinh z_{ts} .

Biến đầu ra: Hệ số tỷ lệ phanh tái sinh (k_{ts}) có miền giá trị $k_{ts} = [0,1]$, tập mờ là (SL, L, M, H, SH).

- K_{ts} nhỏ: Động cơ điện tham gia ít vào quá trình phanh, thu hồi năng lượng thấp.
- K_{ts} lớn: Động cơ điện tham gia nhiều, tăng thu hồi năng lượng.

Trong đó:

SL, L, M, H, SH là trạng thái thể hiện giá trị lần lượt là “rất thấp”, “thấp”, “trung bình”, “cao”, “rất cao”.



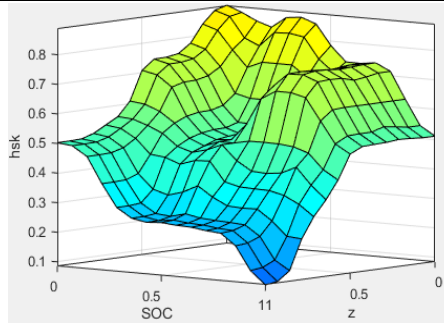
Hình 6. Hàm thành viên bộ điều khiển mờ

4.2.2. Luật mờ

Các quy tắc mờ được xây dựng dựa trên chuyên môn và kinh nghiệm thực tiễn để tối ưu hiệu quả thu hồi năng lượng, duy trì sự ổn định khi phanh và bảo vệ tuổi thọ pin. Các quy tắc này điều khiển phân phối lực phanh đến trực tiếp theo dạng If - Then, phản ánh mối quan hệ giữa tốc độ xe, cường độ phanh và SOC với hệ số phân phối phanh tái sinh k_{ts} [11]:

Luật mờ T_i : Nếu z là z_i , SOC là SOC_i , v là v_i Thì k_{ts} là k_{tsi} , $i = 1, 2, \dots, n$

Trong đó: z_i , SOC_i , v_i , k_i lần lượt là tập mờ cường độ phanh, vận tốc, trạng thái sạc, tỉ lệ lực phanh.



Hình 7. Biểu đồ 3D thể hiện kết quả của bộ điều khiển mờ

Lập luận mờ (fuzzy logic reasoning) dựa trên logic mờ là một phương pháp suy luận trong môi trường không chắc chắn. Một số phương pháp như Baldwin, Tsukamoto, Mizumoto, Zadeh đã được đưa ra. Trong đó, phương pháp Zadeh bao gồm các phép toán Max, Min.

Hàm $\text{Min}(A,B)$ được sử dụng để phân tích mệnh đề A và B. Giá trị mức độ thành viên của k được thể hiện như sau [12].

$$\chi_{w_i}(k_{tsi}) = \min \{ \chi_{N_1^i}(z), \chi_{N_2^i}(SOC), \chi_{N_3^i}(u) \} \quad (12)$$

Trong đó: $\chi_{w_i}(k_{tsi})$; $\chi_{N_1^i}(z)$; $\chi_{N_2^i}(SOC)$; $\chi_{N_3^i}(u)$ lần lượt là mức độ thành viên của k_{tsi} ; z; SOC; u.

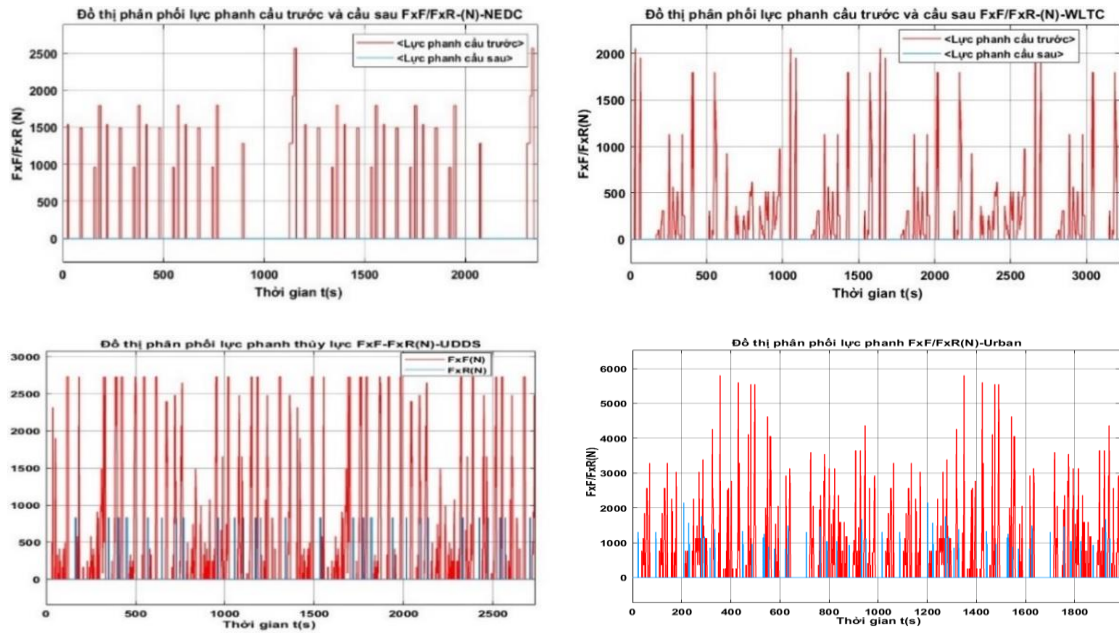
Bảng 2. Luật mờ (Fuzzy Rules)

Input		Output		Input		Output		Input		Output		Input		Output	
z	soc	u	k	z	soc	u	k	z	soc	u	k	z	soc	u	k
H	H	SH	SL	L	SH	SH	SL	M	H	SH	M	SH	L	SH	L
H	H	H	L	L	SH	H	L	M	H	H	M	SH	L	H	M
H	H	M	L	L	SH	M	M	M	H	M	H	SH	L	M	M
H	H	L	M	L	SH	L	H	M	H	L	H	SH	L	L	H
SH	H	SH	SL	H	M	SH	L	L	H	SH	L	M	L	SH	L
SH	H	H	SL	H	M	H	L	L	H	H	H	M	L	H	M
SH	H	M	L	H	M	M	M	L	H	M	H	M	L	M	H
SH	H	L	L	H	M	L	M	L	H	L	SH	M	L	L	SH
M	SH	SH	SL	SH	M	SH	SL	H	L	SH	L	L	L	SH	M
M	SH	H	L	SH	M	H	L	H	L	H	M	L	L	H	H
M	SH	M	M	SH	M	M	L	H	L	M	M	L	L	M	SH
M	SH	L	H	SH	M	L	M	H	L	L	H	L	L	L	SH

5. Phân tích kết quả mô phỏng

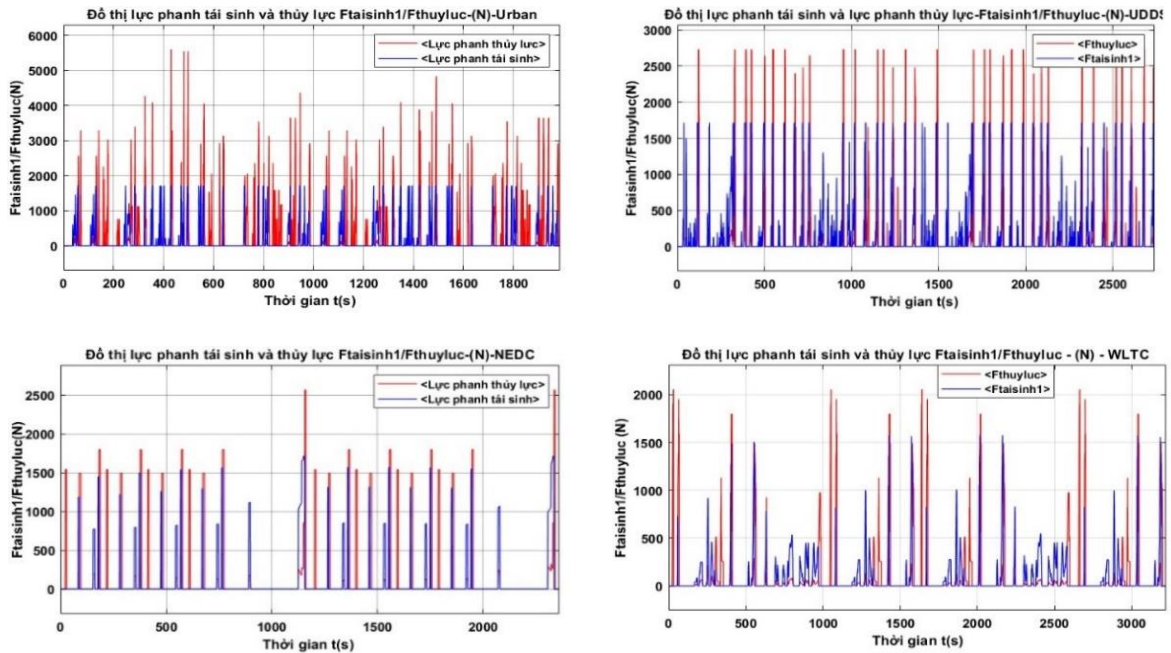
5.1. Đồ thị phân phối lực phanh cầu trước và cầu sau

Hình 8 thể hiện phân phối lực phanh cầu trước và cầu sau trong bốn chu trình. Ở chu trình NEDC và WLTC, cường độ phanh $\leq 0,15$, lực chủ yếu phân phối cho cầu trước, cầu sau gần như không có lực phanh. Trong chu trình URBAN và UDSS, lực phanh cầu trước vượt trội, ưu tiên phân phối lực phanh về cầu trước, đặc biệt chu trình URBAN do phanh nhiều và gấp nên lực phanh cầu trước đôi khi tăng vọt.



Hình 8. Đồ thị phân phối lực phanh cầu trước và cầu sau của bốn chu trình URBAN, UDDS, WLTC, NEDC

5.2. Đồ thị phân phối lực phanh tái sinh và lực phanh thủy lực

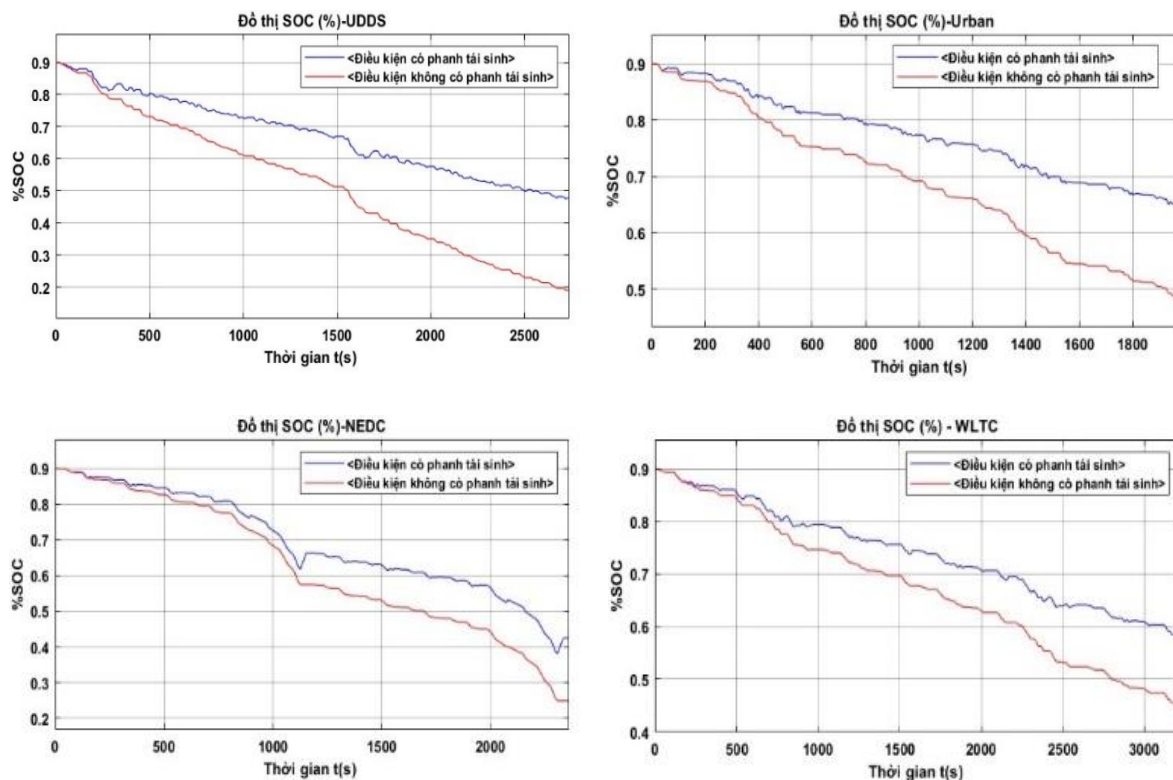


Hình 9. Đồ thị phân phối lực phanh tái sinh và thủy lực của bốn chu trình URBAN, UDDS, WLTC, NEDC

Hình 9 thể hiện phân bố lực phanh tái sinh (xanh) và lực phanh thủy lực (đỏ) theo thời gian trên cầu trước trong bốn chu trình lái: URBAN, UDDS, WLTC và NEDC. Chu trình URBAN có lực phanh dao động mạnh, mật độ cao, cực đại khoảng 5700 N; phanh tái sinh chiếm ưu thế ở các pha giảm tốc nhẹ – trung bình, phanh thủy lực bổ sung khi lực phanh lớn, phối hợp hiệu quả. UDDS có lực phanh chủ yếu 0 - 2650 N với tần suất cao, phanh tái sinh hoạt động ổn định, phanh thủy lực hỗ trợ khi cần lực lớn, tối ưu thu hồi năng lượng. WLTC xuất hiện lực phanh tần suất trung bình, phân bố không đều; phanh tái sinh hiệu quả trong các pha khởi động và tắt động cơ, phanh thủy lực cần cho giảm tốc mạnh. NEDC có

biên độ và tần suất lực phanh thấp, chủ yếu sử dụng phanh thủy lực, phanh tái sinh đóng góp nhỏ do ít pha phanh. Như vậy, hiệu quả phanh tái sinh phụ thuộc vào đặc tính chu trình: URBAN và UDSS có tiềm năng thu hồi năng lượng lớn nhờ tần suất và lực phanh phù hợp, trong khi NEDC hiệu suất thấp. Chiến lược điều khiển phối hợp phanh cần điều chỉnh theo điều kiện vận hành để tối ưu hóa thu hồi năng lượng.

5.3. Đồ thị trạng thái sạc



Hình 10. Đồ thị trạng thái sạc SOC của bốn chu trình URBAN, UDSS, WLTC, NEDC

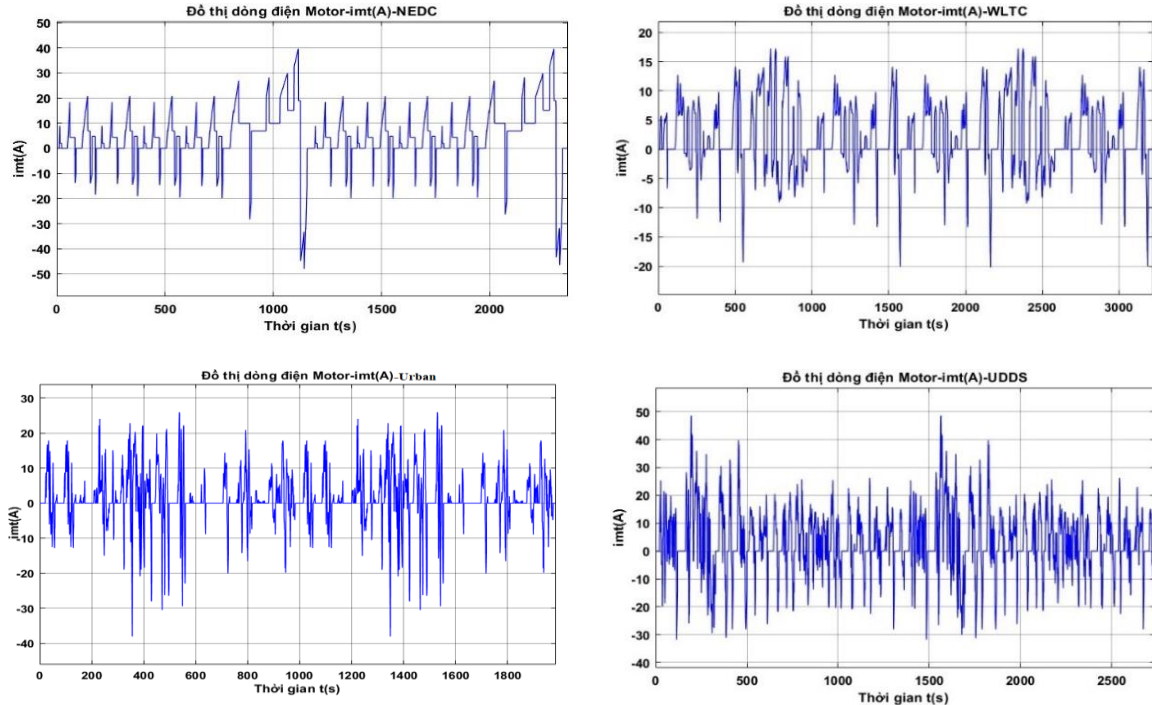
Bảng 3. So sánh hiệu quả thu hồi năng phanh tái sinh

Chu trình	Thời gian (s)	Quãng đường (km)	Điều kiện không có phanh tái sinh			Điều kiện có phanh tái sinh			ϵ (%)
			SOC(%) ban đầu	SOC(%) cuối cùng	Δ SOC (%)	SOC(%) ban đầu	SOC(%) cuối cùng	Δ SOC1 (%)	
URBAN	1986	9,74	90	48,41	41,59	90	65	25	40 %
UDSS	2738	23,98	90	19,09	70,91	90	45,71	44,29	37,54%
WLTC	3222	22,86	90	45,49	44,51	90	59,18	30,82	30,75%
NEDC	2360	22,04	90	24,93	47,55	90	42,45	65,07	26,92%

Trong bốn chu trình thử nghiệm, đường SOC với phanh tái sinh luôn cao hơn so với không có phanh tái sinh, chứng tỏ hệ thống này giúp hạn chế sụt SOC và thu hồi năng lượng hiệu quả, với hiệu suất trên 26 %. Chu trình URBAN (quãng đường 9,74 km) có tần suất phanh cao, đặc trưng đô thị với phanh - dừng liên tục, hiệu suất thu hồi đạt 40 %, cao nhất. UDSS hiệu quả rõ rệt với 37,54 %, xếp thứ hai. WLTC (22,86 km) đạt 30,75 %, cho thấy khả năng tái sinh phụ thuộc vào kiểu phanh và mật độ phanh, không chỉ phụ thuộc vào độ dài quãng đường. NEDC (22,04 km, tốc độ ổn định) hiệu suất thấp nhất 26,92 % do ít thay đổi phanh và tốc độ ổn định. Như vậy, hiệu quả phanh tái sinh phụ thuộc vào tần

suất, kiểu phanh và đặc tính chu trình, với môi trường đô thị và chu trình có nhiều pha phanh - dừng tạo điều kiện tốt nhất để thu hồi năng lượng.

5.3. Đồ thị dòng điện của Motor



Hình 11. Đồ thị dòng điện của Motor của bốn chu trình URBAN, UDDS, WLTC, NEDC.

Hình 11 thể hiện dòng điện của Motor trong các chu trình URBAN, UDDS, WLTC, NEDC. Khi xe tăng tốc (gia tốc dương), dòng điện đi vào Motor (dương) để cung cấp mô-men dẫn động. Khi xe giảm tốc (gia tốc âm), dòng điện ra từ Motor (âm) để sạc pin trong quá trình phanh tái sinh. Dòng xả cực đại lần lượt là: UDDS 48,59 A (lớn nhất), URBAN 40,17 A, WLTC 17,24 A (bé nhất), NEDC 39,61 A. Dòng sạc cực đại lần lượt là: URBAN -30,68 A, WLTC -20,21 A (bé nhất), NEDC -48,04 A (lớn nhất), UDDS -31,81 A.

6. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất và triển khai một chiến lược điều khiển phân phối lực phanh tái sinh sử dụng điều khiển mờ trên xe hybrid dẫn động cầu trước. Chiến lược gồm hai giai đoạn phân phối: lần thứ nhất nhằm đảm bảo tuân thủ quy định ECE và phân phối lực phanh lý tưởng, lần thứ hai sử dụng bộ điều khiển mờ với các đầu vào gồm tốc độ xe, cường độ phanh và SOC để tối ưu sự phối hợp giữa lực phanh điện và cơ học. Mô hình được xây dựng trên nền tảng Matlab/Simulink và kiểm nghiệm trên các chu trình lái thực tế như UDDS, NEDC, URBAN, WLTC. Kết quả cho thấy hiệu quả thu hồi năng lượng đạt được lần lượt là 37,54 %, 26,92 %, 40 % và 30,75 %, cho thấy tính hiệu quả rõ rệt của chiến lược đề xuất. Hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu này sẽ tập trung vào kiểm nghiệm thực nghiệm trên mô hình xe thực tế, ứng dụng cảm biến thông minh để nâng cao độ chính xác, và mở rộng so sánh với các phương pháp điều khiển tiên tiến như học sâu hoặc học tăng cường. Bên cạnh đó, việc đánh giá toàn diện về môi trường, chi phí – lợi ích và khả năng tích hợp AI cũng sẽ là những hướng đi quan trọng nhằm nâng cao tính ứng dụng và hiệu quả của hệ thống phanh tái sinh.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả gửi lời cảm ơn đến Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM đã hỗ trợ cơ sở vật chất trong suốt quá trình nghiên cứu.

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Y. Hwang and J. S. Chen, "Optimized fuel economy control of power-split hybrid electric vehicle with particle swarm optimization," *Energies*, vol. 13, no. 9, p. 2278, 2020.
- [2] Z. Yin, X. Ma, C. Zhang, R. Su, and Q. Wang, "A logic threshold control strategy to improve the regenerative braking energy recovery of electric vehicles," *Energies*, vol. 15, no. 24, p. 16850, 2023.
- [3] J. Biao, Z. Xiangwen, W. Yangxiong, and H. Wenchao, "Regenerative braking control strategy of electric vehicles based on braking stability requirements," *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 22, no. 2, pp. 465–473, 2021.
- [4] W. Li, H. Xu, X. Liu, Y. Wang, Y. Zhu, X. Lin, "Regenerative braking control strategy for pure electric vehicles based on fuzzy neural network," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, no. 2, p. 102430, 2024.
- [5] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
- [6] Toyota, *2022 Corolla Cross Owner's Manual (OM0A010U)*, May 31, 2022.
- [7] A. Goodarzi, J. Mehrmashhadi, and E. Esmailzadeh, "Optimised braking force distribution strategies for straight and curved braking," *Int. J. Heavy Vehicle Syst.*, vol. 16, nos. 1–2, pp. 78–101, 2009.
- [8] R. Limpert, *Brake Design and Safety*. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2011.
- [9] J. Mendes, R. Araújo, P. Sousa, F. Apóstolo, and L. J. Alves, "An architecture for adaptive fuzzy control in industrial environments," *Comput. Ind.*, vol. 62, no. 3, pp. 364–373, 2011.
- [10] C. S. Reddy and K. Raju, "An improved fuzzy approach for COCOMO's effort estimation using Gaussian membership function," *J. Softw.*, vol. 4, no. 5, pp. 452–459, 2009.
- [11] L. X. Wang and J. M. Mendel, "Generating fuzzy rules by learning from examples," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 22, no. 6, pp. 1414–1427, 1992.
- [12] Y. S. Yun, "A Zadeh's max–min composition operator for 3-dimensional triangular fuzzy number," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 39, no. 3, pp. 3783–3793, 2020.

Tuan Tung Duong has received his B.E, M.E, and Ph.D degree in Automotive Engineering from HCMC University of Technology and Education (HCMUTE) in 2005, 2010 and 2020. He currently works at Faculty of International Education, HCMUTE. His research interest includes Powertrain System, Automotive Control System and Regenerative Braking System.
Email: tungdt@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4479-3359>. Mobile: 0914805623

Bao-Tuyen Nguyen received his B.E. degree in Automotive Engineering from Industrial University of Ho Chi Minh City (IUH) in 2020. He is currently a graduate student at the Faculty of Automotive Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE).
Email: 2230514@student.hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9314-4645>.