

## A Design of Regenerative Braking Model for PMS Motor in Electric Vehicles

**Le Thanh Phuc\*** , **Nguyen Trung Hieu**   
Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering, Vietnam

\*Corresponding author. Email: [phuclt@hcmute.edu.vn](mailto:phuclt@hcmute.edu.vn)

### ARTICLE INFO

Received: 23/04/2025  
Revised: 15/10/2025  
Accepted: 26/03/2026  
Online First: 26/05/2026  
Published: 28/05/2026

### KEYWORDS

Automotive braking system;  
Regenerative braking;  
Permanent magnet synchronous motor;  
Electric vehicle;  
Sine PWM.

### ABSTRACT

Regenerative braking is a beneficial feature of electric vehicles compared to traditional vehicles, especially operating in urban traffic conditions. Mechanical energy due to the inertia of the vehicle's movement is regenerated into electrical energy stored in the battery system for reuse to supply the motor. This paper presents a design of a regenerative braking model for a PMS motor, including a description of the control circuit design, load adjusting circuit, testing setup, and result evaluation. A 3-phase asynchronous motor is used to create the environment as the deceleration speed of the vehicle. The control circuit changes the speed of the driving motor to simulate the deceleration values during braking. The electrical energy generated during regenerative braking will be conducted through an electrical load with capability of varying value. The test results show the energy obtained corresponding to different braking speeds and accelerations.

## Thiết kế mô hình phanh tái sinh cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu trên xe điện

**Lê Thanh Phúc\*** , **Nguyễn Trung Hiếu**   
Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ. Email: [phuclt@hcmute.edu.vn](mailto:phuclt@hcmute.edu.vn)

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 23/04/2025  
Ngày hoàn thiện: 15/10/2025  
Ngày chấp nhận đăng: 26/03/2026  
Ngày đăng trực tuyến: 26/05/2026  
Ngày xuất bản: 28/05/2026

### TỪ KHÓA

Hệ thống phanh ô tô;  
Phanh tái sinh;  
Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu;  
Ô tô điện;  
Sine PWM.

### TÓM TẮT

Phanh tái sinh là ưu điểm vượt trội của ô tô điện so với ô tô truyền thống hoạt động ở điều kiện giao thông đô thị. Cơ năng do quán tính chuyển động của ô tô được tái tạo thành điện năng tích trữ vào hệ thống pin để dùng lại cung cấp cho động cơ. Bài báo trình bày về mô hình thử nghiệm phanh tái sinh cho động cơ PMS bao gồm mô tả thiết kế mạch điều khiển, mạch tạo tải, bố trí thử nghiệm và đánh giá kết quả. Động cơ kéo loại không đồng bộ 3 pha được dùng để giả lập tốc độ giảm tốc của ô tô. Mạch điều khiển thay đổi tốc độ động cơ kéo tương ứng với các giá trị giảm tốc khi phanh. Năng lượng điện sinh ra khi phanh tái sinh sẽ được đưa qua tải thay đổi độ lớn. Kết quả thử nghiệm cho ra năng lượng thu được ứng với các tốc độ và gia tốc phanh khác nhau.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2026.1889>

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

Ô tô điện ngày nay trở nên phổ biến, là một trong những lựa chọn hàng đầu khi người tiêu dùng cân nhắc mua vì tính thân thiện với môi trường và tính kinh tế khi vận hành. Ô tô điện lưu thông trong đô thị không phát ra khói thải như các loại ô tô truyền thống. Ngoài ra, năng lượng phanh tái sinh được tích

trở ngược lại trên bộ pin làm cho ô tô điện có tính kinh tế năng lượng vượt trội. Với ô tô điện và hybrid, phanh tái sinh là tính năng mang lại ích lợi to lớn vì có khả năng tái tạo lại năng lượng vốn bị tiêu phí trên ô tô truyền thống. Các nghiên cứu hiện tại vẫn đang tìm cách nâng cao hiệu quả phanh tái sinh và thuật toán phân phối lực phanh giữa tái sinh và thủy lực nhằm đáp ứng yêu cầu phanh.

Nghiên cứu của M.K Yoong và cộng sự chỉ ra rằng phanh tái sinh có thể giảm đáng kể năng lượng lãng phí trên ô tô [1]. Công nghệ điện tử tiên tiến như siêu tụ và chuyển đổi buck-boost có thể nâng cao hiệu suất thu hồi năng lượng. Phanh tái sinh phát huy hiệu quả khi ô tô di chuyển đường đô thị, khi việc tăng tốc và giảm tốc được thực hiện liên tục [2]. Động cơ dẫn động trên ô tô điện có thể biến thành máy phát điện, một mặt tái tạo điện nạp cho bộ pin, mặt khác sinh ra lực phanh làm ô tô giảm tốc. Nếu lực phanh này không đủ lớn, bộ điều khiển phanh kích hoạt phanh cơ khí – thủy lực hỗ trợ tăng gia tốc giảm tốc. Di chuyển trong đô thị, ô tô truyền thống mất nhiều năng lượng để tăng tốc. Với ô tô điện, phanh tái sinh giúp thu hồi năng lượng này. Nó có ý nghĩa lớn trong việc giảm phát thải CO<sub>2</sub> trong các đô thị lớn [3]. K. Jacek và cộng sự đã khảo sát năng lượng thu hồi phanh tái sinh trong một khu vực thành phố cho trước với điều kiện giao thông thực tế [4]. Kết quả cho thấy, ở khu vực trung tâm thành phố, ô tô thực hiện nhiều chu kỳ tăng tốc và dừng, năng lượng phanh tái sinh thu được nhiều nhất. Nghiên cứu này cũng đánh giá tổng thể hiệu quả phanh tái sinh trên các khu vực của một thành phố với dữ liệu cụ thể trên ô tô điện và ô tô hybrid.

Theo nghiên cứu của J. Guo và cộng sự, để thu được hiệu quả phanh cao nhất, lực phanh cần phân phối hợp lý giữa các bánh xe ở cầu trước và cầu sau [5]. Bánh xe sẽ bị bó cứng nếu lực phanh vượt quá lực bám giữa bánh xe và mặt đường. J. Biao và cộng sự đã đề xuất thuật toán tối ưu phân phối lực phanh [6]. Nhóm tác giả đã thực hiện mô phỏng trên MATLAB/Simulink. Kết quả cho thấy thuật toán điều khiển có thể đảm bảo ô tô hoạt động ổn định và cân bằng khi vừa phân phối lực phanh tái sinh và lực phanh cơ khí trên các bánh xe. Zhang Z. và cộng sự đã thực hiện mô phỏng HIL (*Hardware – in – loop*) nhằm áp dụng chiến thuật điều khiển logic mờ [7]. Trong đó, lực phân bổ mong muốn được tính toán dựa trên vận tốc ô tô và tình trạng nạp của bộ pin từ đó quyết định thành phần của phanh tái sinh và phanh thủy lực. Nghiên cứu tương tự cũng được thực hiện bởi Yeo H. và cộng sự trên một mô hình ô tô hybrid cụ thể [8]. Các thông số động lực học của ô tô hybrid được tạo ra trên bộ giả lập, phần cứng bao gồm hệ thống thủy lực phanh và bánh xe. Kết quả nghiên cứu đã thiết lập được chế độ phân phối lực phanh thủy lực và điện đảm bảo an toàn và duy trì tình trạng nạp hợp lý của ô tô.

Nghiên cứu của M. Zhengwei và cộng sự cho thấy phanh tái sinh phát huy hiệu quả khi ô tô phanh với mức trung bình và thấp [9]. Mô hình mô phỏng cho kết quả phanh tái sinh có thể thu hồi 79% năng lượng khi phanh mức độ thấp và 29% khi phanh trung bình. Z. Zou và cộng sự đã đánh giá hiệu quả thu hồi năng lượng của phanh tái sinh [10] qua nghiên cứu thực hiện trên xe tải sử dụng siêu tụ. Năng lượng phanh tái sinh được lấy từ động lượng của ô tô đang chuyển động trừ đi lực cản lăn, mô men quán tính và mất mát trong quá trình chuyển đổi.

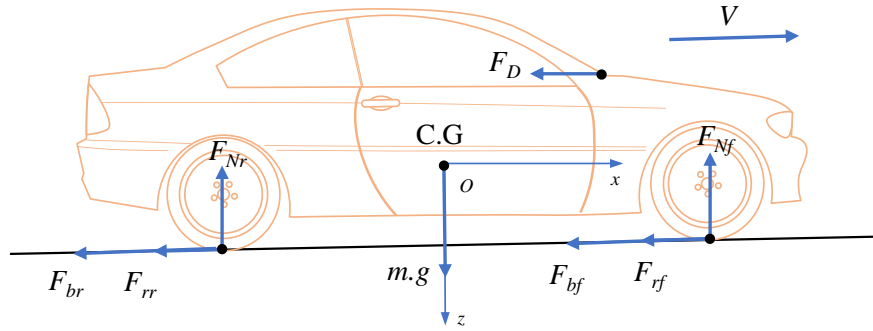
Phanh tái sinh trên ô tô điện và ô tô hybrid đã và đang thu hút được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu. Qua phân tích các công trình nghiên cứu ở trên, hầu hết các nghiên cứu tập trung vào đề xuất các thuật toán phân phối lực phanh nhằm thu được năng lượng tối đa. Nội dung nghiên cứu trong báo cáo này tập trung vào việc thiết kế mô hình đo đặc năng lượng thu được thực tế trên động cơ PMS dẫn động ô tô điện. Mục tiêu là định lượng giá trị cụ thể ứng với các trường hợp phanh từ mức độ thấp đến cao của ô tô điện.

## 2. Mô hình ô tô khi phanh

Khi ô tô chuyển động trên đường phẳng và đang phanh, các lực tác động lên ô tô được mô tả như Hình 1. Trong đó, trọng lực của ô tô tác động xuống mặt đường cân bằng với phản lực mặt đường tác dụng lên ô tô [11].

$$mg = F_{Nf} + F_{Nr} \quad (1)$$

$F_{Nf}$  và  $F_{Nr}$  lần lượt là các phản lực pháp tuyến phân bố ở cầu trước và cầu sau.



**Hình 1.** Các lực tác động lên ô tô khi phanh.

Phương trình cân bằng lực là

$$ma = -(F_{bf} + F_{br}) - (F_{rf} + F_{rr}) - F_D \quad (2)$$

$F_{bf}$  và  $F_{br}$  lần lượt là lực phanh tác động lên bánh xe ở cầu trước và cầu sau.  $F_{rf}$  và  $F_{rr}$  là lực cản lăn ở cầu trước và cầu sau.

$F_D$  là lực cản gió tác động lên trọng tâm của ô tô (C.G) khi di chuyển với tốc độ  $V$ .

$$F_D = \frac{1}{2} \rho AV^2 \quad (3)$$

Trong đó,  $\rho$  là khối lượng riêng của không khí,  $A$  là diện tích cản chính diện của ô tô.

Xét ô tô khi phanh, tổng hợp các lực phanh, lực cản lăn và cản gió làm cho ô tô giảm tốc với gia tốc là  $a$ . Trong đó, lực phanh đóng vai trò chính đáp ứng mong muốn mức độ giảm tốc của người lái xe. Giá trị lực phanh phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó yếu tố cơ bản là hệ số bám giữa bánh xe và mặt đường.

$$\mu = \frac{F_b}{F_N} \quad (4)$$

Trên đường nhựa khô hệ số bám có thể đạt giá trị 0,85, trong khi đó trên đường tuyết trơn trượt, hệ số này chỉ có thể đạt được khoảng 0,3. Như vậy, hệ thống phanh phải cung cấp lực phanh trong phạm vi hệ số bám để đảm bảo ô tô phanh hiệu quả.

Khi ô tô điện chuyển động với vận tốc  $V$  (km/h), tốc độ rotor của động cơ PMS được tính theo công thức sau.

$$RPM = \frac{1000 \times 60 \times V \times i_T}{3600 \times 2 \times \pi \times r} \quad (\text{vòng/phút}) \quad (5)$$

Trong đó,  $r$  là bán kính hiệu dụng bánh xe và  $i_T$  là tỷ số truyền tổng cộng của hệ thống truyền lực.

Ở nghiên cứu này, một động cơ điện được sử dụng để mô tả tác động của chuyển động ô tô lên động cơ PMS. Tốc độ động cơ điện thay đổi thể hiện qua sự thay đổi của giá trị RPM. Ứng với một gia tốc phanh của ô tô, RPM được thay đổi tương ứng mô tả giá trị gia tốc phanh này.

$$a = \frac{dV(t)}{dt} \quad (6)$$

Với gia tốc không đổi, thời gian chuyển động của ô tô bắt đầu phanh đến khi dừng hẳn là

$$T = \frac{V_0}{a} \quad (7)$$

Trong đó,  $V_0$  là tốc độ của ô tô tính ở thời điểm bắt đầu phanh.

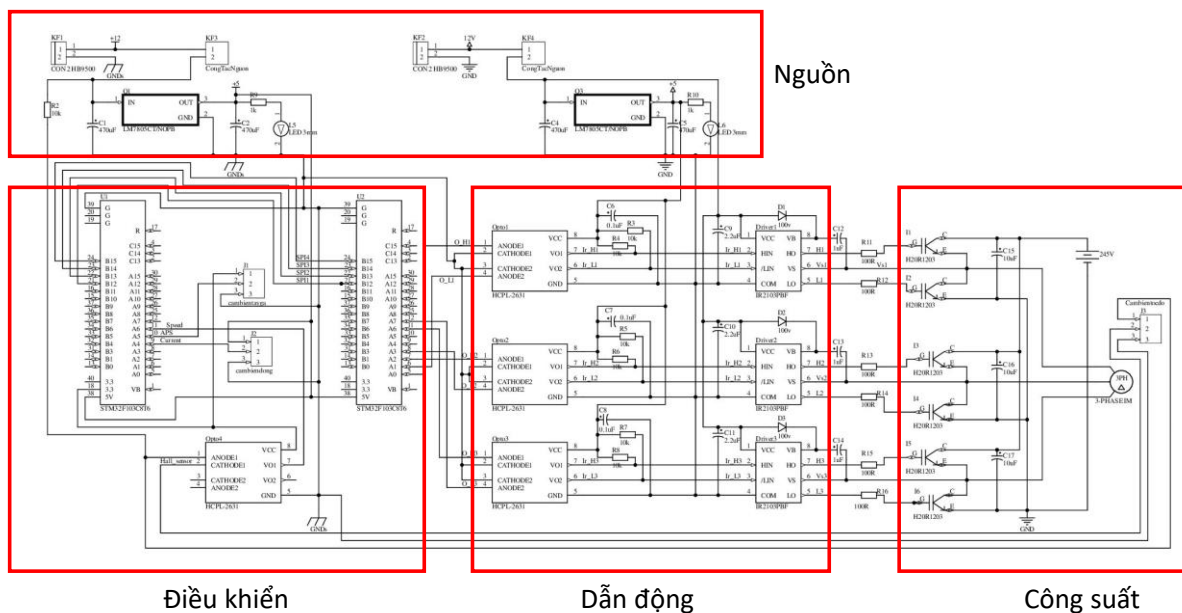
### 3. Bộ điều khiển động cơ điện và sơ đồ mạch tạo tải

#### 3.1. Bộ điều khiển động cơ không đồng bộ

Một động cơ không đồng bộ 3 pha được sử dụng để kéo động cơ PMS (*Permanent Magnet Synchronous*). Động cơ không đồng bộ tạo ra các dải tốc độ khác nhau từ đó giả lập gia tốc khi ô tô phanh. Theo nguyên tắc hoạt động của động cơ không đồng bộ, từ trường xoay tạo ra trên stator sẽ cảm ứng trên rotor làm cho rotor quay. Tốc độ của rotor nhỏ hơn tốc độ của từ trường xoay thể hiện sự trượt của rotor.

Trong nghiên cứu này, phương pháp sine PWM (*Pulse Width Modulation*) được sử dụng để dẫn động động cơ không đồng bộ 3 pha [12]. Để thay đổi tốc độ, các bản đồ sine được lưu ở vi điều khiển. Tùy theo yêu cầu về tốc độ mà chương trình vi điều khiển sẽ xuất các bản đồ phù hợp.

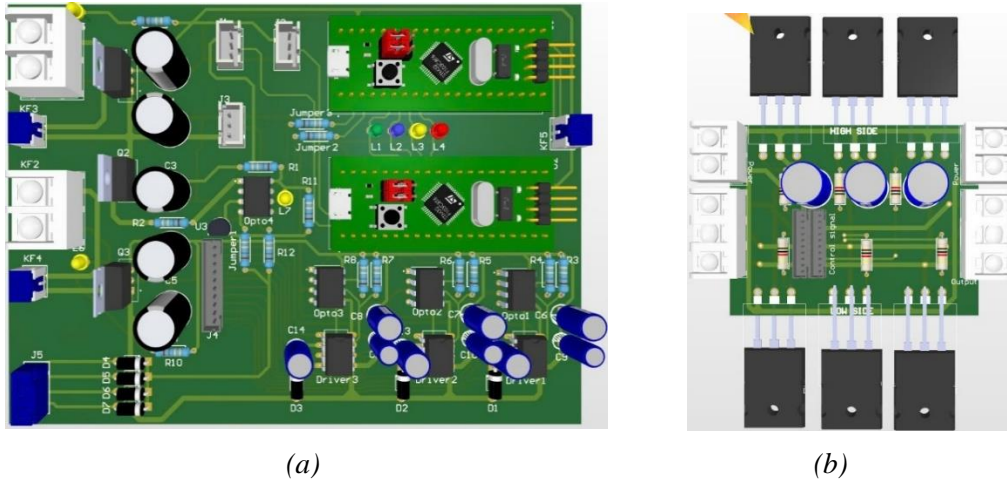
Hình 2 mô tả sơ đồ nguyên lý của mạch điều khiển động cơ không đồng bộ 3 pha. Phần nguồn cấp cho mạch bao gồm 2 nguồn cách ly, nguồn cấp cho vi điều khiển và nguồn cấp cho IC dẫn động. Sử dụng 2 nguồn độc lập phục vụ việc cách ly phần điện áp cao, cấp cho động cơ không đồng bộ và điện áp thấp, cấp cho mạch lập trình điều khiển. Phần điều khiển được lập trình và lưu các chương trình tính toán, thuật toán sine PWM và thu thập tín hiệu đầu vào cảm biến. Phần dẫn động kết nối phần điều khiển và phần công suất, khuếch đại và cách ly tín hiệu. Phần công suất đảm nhận chuyển đổi dòng điện 1 chiều thành xoay chiều 3 pha.



**Hình 2.** Sơ đồ nguyên lý mạch điều khiển động cơ.

Hình 3 mô tả bố trí các linh kiện trên một mạch thực tế dựa trên sơ đồ nguyên lý mô tả ở trên. Mạch điều khiển có 2 phần: Phần điều khiển thể hiện trong Hình 3(a) và phần công suất thể hiện trong Hình 3(b). Phần điều khiển sử dụng vi điều khiển STM32, chương trình vi điều khiển chứa thuật toán sine PWM thay đổi tốc độ của động cơ không đồng bộ. Đồng thời vi điều khiển cũng nhận tín hiệu từ các cảm biến như tốc độ động cơ, vị trí bàn đạp ga. 3 opto được sử dụng để cách ly tín hiệu từ vi điều khiển đến IC dẫn động và ngược lại. 3 IC dẫn động loại IR2103 điều khiển 3 nhánh mạch công suất.

Hình 3(b) bao gồm 6 IGBT loại H20R1203 chịu được điện áp và dòng điện cao. Việc lựa chọn linh kiện này vì lý do linh kiện này có sẵn trên thị trường, phục vụ cho các mạch công suất trong các thiết bị dân dụng. Khi cho mạch công suất hoạt động, các IGBT cần tản nhiệt để duy trì thời gian hoạt động của chúng, tránh tình trạng quá nhiệt gây cháy nổ.

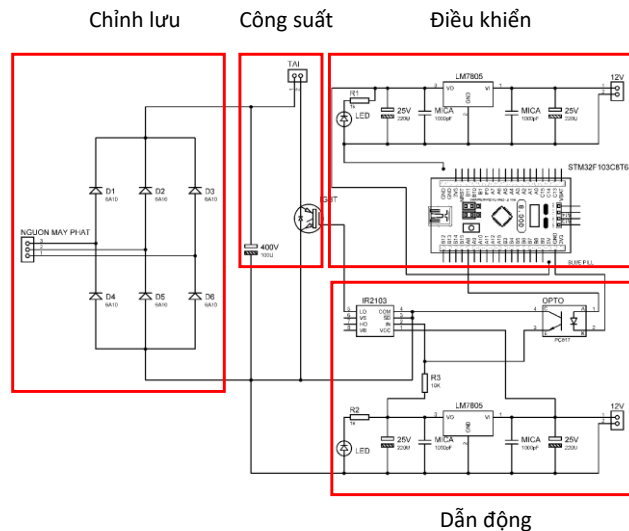


**Hình 3.** Thành phần của mạch điều khiển.

### 3.2. Mạch tạo tải cho động cơ PMS phanh tái sinh

Sơ đồ nguyên lý mạch tạo tải được mô tả như Hình 4. Để thực hiện chức năng thay đổi tải điện cho động cơ PMS, mạch này gồm 4 phần: điều khiển, dẫn động, công suất và chỉnh lưu. Phần điều khiển có thể lập trình được, để thực hiện các nhiệm vụ phức tạp như tùy chỉnh được tải điện thông qua thay đổi chu kỳ nghĩa vụ của xung PWM và kiểm tra các điều kiện an toàn vận hành. Phần dẫn động là cầu nối giữa phần điều khiển và phần công suất. Tín hiệu nhỏ từ phần điều khiển được khuếch đại đủ lớn cho phần công suất và ngăn ngừa nguồn điện áp cao tạo ra từ phanh tái sinh đi vào phần điều khiển gây chập cháy.

Phần công suất điều khiển tải thông qua thay đổi tín hiệu PWM. Tần số đủ lớn để không gây ra gián đoạn dòng điện đi qua tải nhưng cũng không quá lớn có thể gây ra tổn thất lớn rơi trên thiết bị này. Do dòng điện tạo ra trong động cơ PMS là xoay chiều 3 pha nên cần mạch chỉnh lưu để biến đổi thành điện 1 chiều.

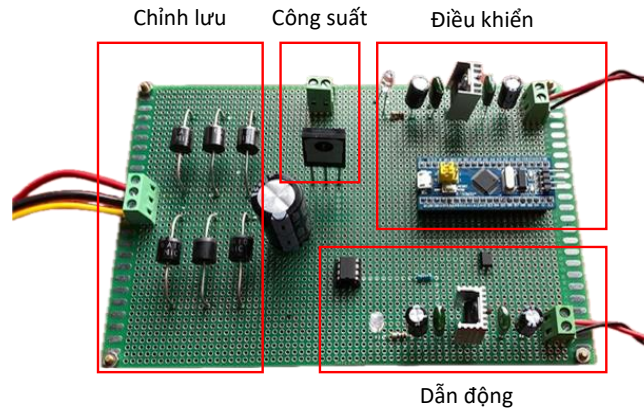


**Hình 4.** Sơ đồ nguyên lý mạch tạo tải.

Mạch tạo tải thực tế được thiết kế như Hình 5. Phần điều khiển bao gồm mạch cấp nguồn và vi điều khiển loại STM32. Chức năng của phần này là tạo ra xung PWM gửi đến mạch dẫn động. Độ rộng xung PWM quyết định mức độ tải yêu cầu. Phần dẫn động bao gồm opto cách ly và IC dẫn động loại IR2103. Chức năng của phần này là cách ly xung PWM từ nguồn điện áp cao không đi về vi điều khiển và khuếch đại tín hiệu đủ để kích vào mạch công suất.

Phần công suất là một IGBT loại FGA 20N60, có chức năng điều chỉnh dòng điện đi ra từ phần chỉnh lưu. IGBT có thể chịu được điện áp cao do điện từ phanh tái sinh tạo ra, đồng thời có thể dẫn được dòng

đủ lớn cung cấp cho tải điện. Tần số đóng ngắt của IGBT được chọn là 10 kHz. Phần chỉnh lưu bao gồm 6 diode chỉnh lưu, có chức năng chuyển đổi dòng điện xoay chiều 3 pha thành 1 chiều. Dòng điện 1 chiều sau đó đi qua tụ để tích trữ tạm thời và ổn định điện áp trước khi đi qua phần công suất.



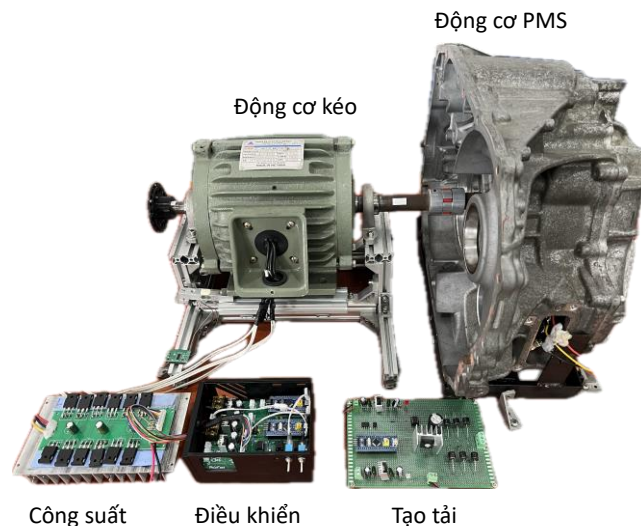
**Hình 5.** Thành phần của mạch tạo tải.

Dòng điện xoay chiều 3 pha từ động cơ PMS (lúc này đóng vai trò là máy phát điện) đi qua mạch tạo tải. Đầu ra của mạch tạo tải là dòng điện thay đổi được độ lớn.

#### 4. Thiết kế mô hình và tiến hành thử nghiệm

Mô hình thử nghiệm phanh tái sinh cho động cơ PMS được bố trí như Hình 6. Bộ điều khiển dùng nguồn cao áp cung cấp cho động cơ kéo loại không đồng bộ 3 pha. Nguồn cao áp là bộ pin Lithium-ion có thể cung cấp giá trị lớn nhất đến 252 V [13]. Động cơ kéo là loại không đồng bộ 3 pha, các thông số cơ bản được mô tả trong [14].

Động cơ kéo kết nối với động cơ PMS bằng khớp mềm. Tốc độ của động cơ kéo bằng tốc độ động cơ PMS. Dòng điện xoay chiều 3 pha tạo ra trên động cơ PMS được chỉnh lưu và điều chỉnh thông qua bộ tạo tải. Thiết bị tải điện được kết nối với đầu ra của bộ công suất như mô tả trong Hình 5. Các thông số điện áp và dòng điện được ghi lại nhằm đánh giá năng lượng thu được.



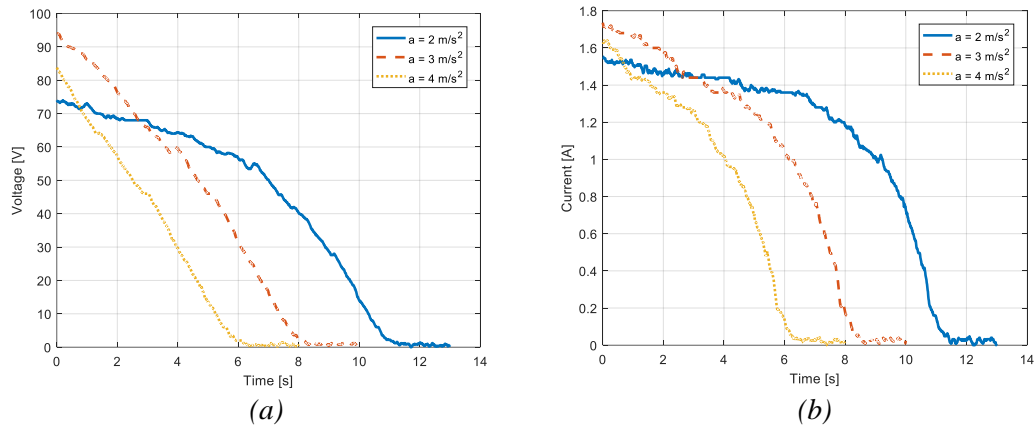
**Hình 6.** Sơ đồ bố trí thử nghiệm.

Trong mô hình thử nghiệm này, tỷ số truyền tổng cộng của hệ thống truyền lực của ô tô được chọn là  $i_T = 3$  và bán kính hiệu dụng bánh xe là  $r = 0,2$  m.

Mô phỏng ô tô chạy với vận tốc ban đầu là 80 km/h, gia tốc giảm tốc khi phanh thay đổi với 3 giá trị là  $a_1 = 4$  m/s<sup>2</sup>,  $a_2 = 3$  m/s<sup>2</sup> và  $a_3 = 2$  m/s<sup>2</sup>. Áp dụng công thức (5), số vòng quay của động cơ dẫn động ứng với tốc độ 80 km/h là  $RPM = 3185$  vòng/phút. Từ tốc độ này, động cơ giảm tốc dần đều đến khi

dừng hẳn. Áp dụng công thức (7), thời gian động cơ quay tương ứng với gia tốc  $a_1$ ,  $a_2$  và  $a_3$  lần lượt là  $T_1 = 5,6$  s,  $T_2 = 7,4$  s và  $T_3 = 11,1$  s.

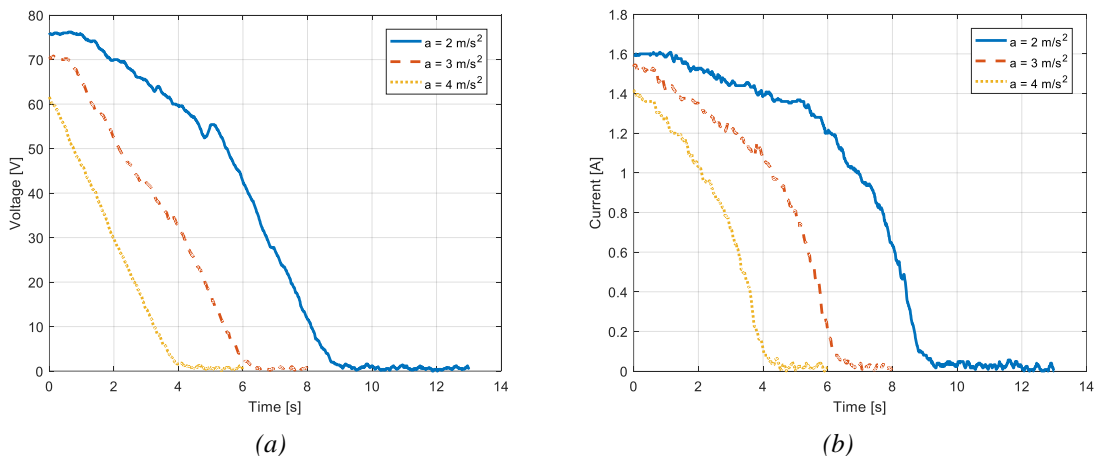
Kết quả thử nghiệm được mô tả ở Hình 7, trong đó Hình 7(a) là giá trị điện áp đo được sau khi chỉnh lưu và Hình 7(b) là dòng điện đi qua tải. Điện áp và dòng điện đều giảm khi ô tô từ từ giảm tốc. Điện áp tạo ra trên động cơ PMS khi bắt đầu phanh trong khoảng 80 V, điện áp này giảm về không khi ô tô dừng hẳn. Dòng điện khoảng 1,6 A khi bắt đầu phanh và giảm về không cuối quá trình phanh. Thử nghiệm này được tiến hành khi cố định tải điện bên ngoài.



**Hình 7.** Điện áp và dòng điện đo được khi giảm tốc ô tô ở 80 km/h.

Mô phỏng ô tô chạy với vận tốc ban đầu là 60 km/h, gia tốc giảm tốc khi phanh thay đổi với 3 giá trị là  $a = 4 \text{ m/s}^2$ ,  $a = 3 \text{ m/s}^2$  và  $a = 2 \text{ m/s}^2$ . Áp dụng công thức (5), số vòng quay của động cơ dẫn động ứng với tốc độ 60 km/h là  $RPM = 2386$  vòng/phút. Từ tốc độ này, động cơ giảm tốc dần đều đến khi dừng hẳn. Áp dụng công thức (8), thời gian động cơ quay tương ứng với gia tốc  $a_1$ ,  $a_2$  và  $a_3$  lần lượt là  $T_1 = 4,2$  s,  $T_2 = 5,6$  s và  $T_3 = 8,3$  s.

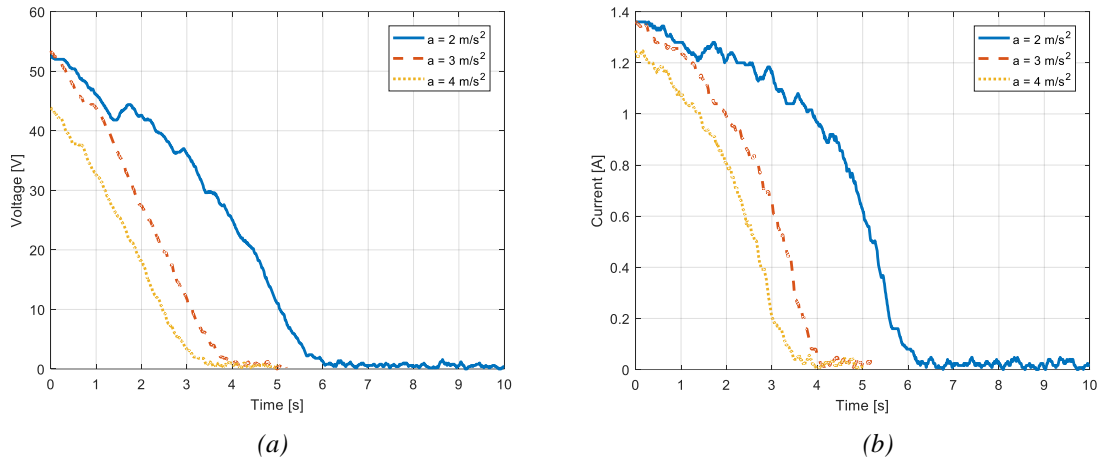
Kết quả đo đạt khi thử nghiệm với các gia tốc khác nhau được mô tả ở Hình 8, trong đó Hình 8(a) là giá trị điện áp đo được sau khi chỉnh lưu và Hình 8(b) là dòng điện đi qua tải. Điện áp đo được tại thời điểm bắt đầu phanh khoảng 70 V và dòng điện khoảng 1,5 A.



**Hình 8.** Điện áp và dòng điện đo được khi giảm tốc ô tô ở 60 km/h.

Mô phỏng ô tô chạy với vận tốc ban đầu là 40 km/h, gia tốc giảm tốc khi phanh thay đổi với 3 giá trị là  $a = 4 \text{ m/s}^2$ ,  $a = 3 \text{ m/s}^2$  và  $a = 2 \text{ m/s}^2$ . Áp dụng công thức (5), số vòng quay của động cơ dẫn động ứng với tốc độ 40 km/h là  $RPM = 1592$  vòng/phút. Từ tốc độ này, động cơ giảm tốc dần đều đến khi dừng hẳn. Áp dụng công thức (7), thời gian động cơ quay tương ứng với gia tốc  $a_1$ ,  $a_2$  và  $a_3$  lần lượt là  $T_1 = 2,8$  s,  $T_2 = 3,7$  s và  $T_3 = 5,6$  s.

Hình 9 mô tả kết quả đo được, trong đó Hình 9(a) là giá trị điện áp đo được sau khi chỉnh lưu và Hình 9(b) là dòng điện đi qua tải. Điện áp lớn nhất khoảng 50 V và dòng điện lớn nhất khoảng 1,3 A. Với trường hợp tốc độ ô tô thấp nhất, giá trị điện áp và dòng điện ghi nhận là nhỏ nhất tương ứng với 3 trường hợp tốc độ.



**Hình 9.** Điện áp và dòng điện đo được khi giảm tốc ô tô ở 40 km/h.

Năng lượng thu được trong quá trình phanh tái sinh khi đo được giá trị điện áp và dòng điện là

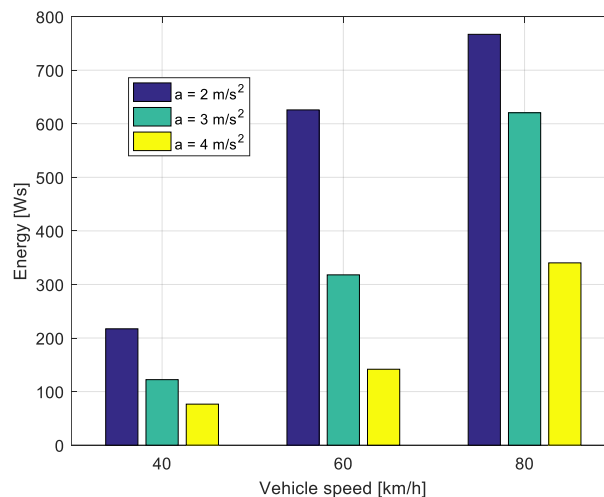
$$W = \int_0^T U(t)I(t)dt \tag{8}$$

Trong trường hợp thực hiện phép đo rời rạc, năng lượng được tính là

$$W = \sum_{k=1}^n U_k I_k \Delta T \tag{9}$$

Trong đó,  $n$  là số mẫu đo và  $\Delta T$  là thời gian giữa 2 lần lấy mẫu liên tiếp. Giá trị năng lượng từ phanh tái sinh tính theo công thức trên được tổng hợp trong Hình 10.

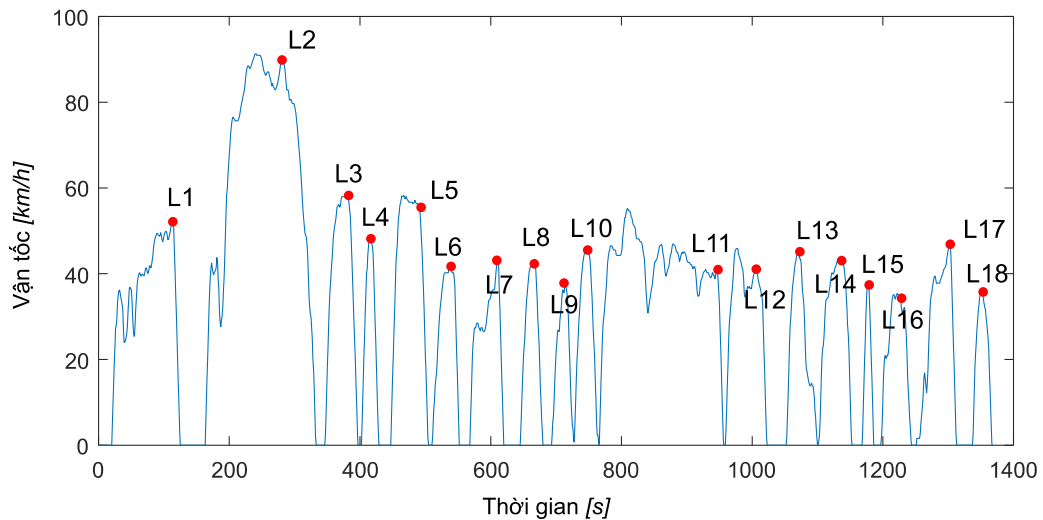
Khi ô tô chuyển động với tốc độ cao 80 km/h, năng lượng thu được từ phanh tái sinh là lớn nhất so với 2 trường hợp tốc độ là 60 km/h và 40 km/h. Năng lượng cao nhất thu được khi ô tô phanh với gia tốc  $a = 2 \text{ m/s}^2$ , giá trị đạt được nằm trong khoảng 750 Ws. Giá trị năng lượng tái sinh nhỏ nhất ứng với trường hợp ô tô chuyển động với tốc độ 40 km/h và gia tốc phanh là  $a = 4 \text{ m/s}^2$ , năng lượng thu được là 80 Ws.



**Hình 10.** Năng lượng thu được từ phanh tái sinh.

Kết quả cho thấy, khi ô tô chuyển động với tốc độ càng cao, phanh tái sinh tạo ra năng lượng càng lớn. Trong điều kiện cố định tải điện mạch ngoài, gia tốc càng lớn thì năng lượng thu được càng nhỏ vì thời gian duy trì phanh ngắn. Trong thử nghiệm này, việc tính toán năng lượng phanh chưa xét đến yếu tố phanh cơ khí cần phải bổ sung vào trong trường hợp phanh tái sinh không đáp ứng đủ lực phanh.

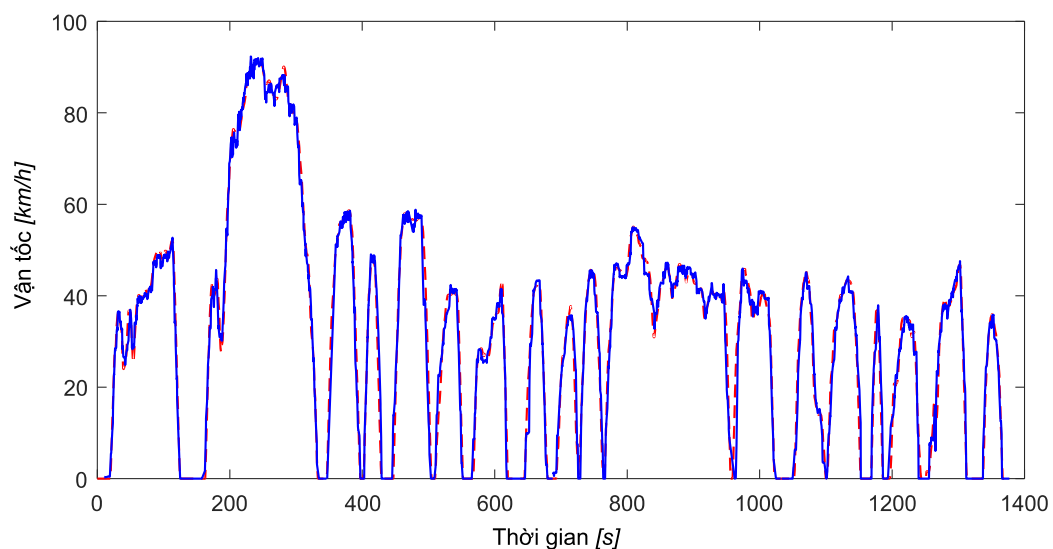
Thử nghiệm tiếp theo được tiến hành với chu trình thử UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule*) của Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ, cho ô tô di chuyển trong đô thị. Thời gian thử tổng cộng là 1369 s (tương đương với 22,8 phút), với vận tốc trung bình là 31,5 km/h và vận tốc cực đại là 91,2 km/h.



**Hình 11.** Chu trình thử UDDS với các thời điểm giảm tốc về 0 km/h.

Như mô tả trong Hình 11, trong suốt quá trình thử, ô tô có 18 lần giảm tốc về 0 km/h, được đánh số từ L1 đến L18. Đây là các thời điểm dùng để tính năng lượng thu được từ phanh tái sinh.

Hình 12 thể hiện kết quả đo vận tốc xe quy đổi từ tốc độ động cơ kéo theo chu trình thử UDDS. Đường liền nét là vận tốc xe đo được và đường đứt là vận tốc của chu trình yêu cầu. Vận tốc xe được điều chỉnh để bám sát theo vận tốc chu trình. Dựa vào các thời điểm giảm tốc về 0 km/h như mô tả trong Hình 11, dòng điện và điện áp đầu ra được ghi nhận. Năng lượng phanh tái sinh được tính theo công thức (9).



**Hình 12.** Vận tốc xe thử nghiệm theo chu trình UDDS.

Các giá trị năng lượng đo tại các thời điểm phanh được tổng hợp ở Bảng 1. Trong đó,  $V_0$  là vận tốc tại thời điểm giảm tốc,  $a_{tb}$  là gia tốc giảm tốc trung bình và  $W$  là năng lượng thu được.

**Bảng 1.** Thông số đo được ở các thời điểm giảm tốc.

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
$V_0$ (km/h)	51,8	90,1	58,7	48,3	57,1	41,5	43,5	42,7	37,5
$a_{tb}$ (m/s <sup>2</sup> )	1,3	0,48	1,02	0,96	0,72	1,24	1,34	0,85	0,88
$W$ (Ws)	571,8	2660,1	828,7	718,3	1127,1	461,5	463,5	712,7	607,5

	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18
$V_0$ (km/h)	46	41,2	41	45,5	4,5	37,8	32,2	46,8	35,6
$a_{tb}$ (m/s <sup>2</sup> )	0,67	1,14	0,63	0,4	0,61	1,29	0,44	0,81	0,57
$W$ (Ws)	966	511,2	911	1465,5	1013,5	407,8	1102,2	516,8	555,6

Dữ liệu cho thấy ở thời điểm giảm tốc L1, năng lượng thu được nhiều nhất đạt 2660,1 Ws. Đây là thời điểm tốc độ xe đang ở cao nhất khi giảm tốc trong chu trình thử đạt 90,1 km/h. Ở thời điểm giảm tốc L15, năng lượng thu được là nhỏ nhất đạt 407,8 Ws. Tuy đây không phải là thời điểm ô tô có vận tốc thấp nhất khi giảm tốc nhưng thời gian giảm tốc ngắn nên năng lượng thu hồi thấp. Như vậy, dựa vào việc thử nghiệm trên mô hình, năng lượng phanh tái sinh ở các thời điểm ô tô giảm tốc có đã được ghi nhận.

## 5. Kết luận

Kết quả nghiên cứu của đề tài đã thiết lập được mô hình thử nghiệm phanh tái sinh cho ô tô điện. Hệ thống có thể mô phỏng các gia tốc phanh thay đổi tương đối với mức độ phanh khác nhau bằng cách thay đổi tốc độ động cơ dẫn động. Mạch tạo tải có thể chỉnh lưu dòng điện xoay chiều 3 pha thành dòng điện 1 chiều, sau đó điều chỉnh tải thay đổi. Mô hình kết nối các bộ phận có thể bố trí gọn trong phạm vi phòng thí nghiệm.

Thử nghiệm với quá trình phanh tái sinh trên mô hình thử nghiệm cho thấy khi ô tô chạy tốc độ cao, động năng lớn từ ô tô được chuyển đổi thành điện trên động cơ PMS. Giá trị điện áp và dòng điện thu được cao có thể dùng để nạp lại cho bộ pin trên ô tô điện. Khi ô tô phanh với gia tốc lớn, năng lượng tái sinh không cao nếu tải điện bên ngoài không đổi. Trong trường hợp này, phanh thủy lực cần được sử dụng, một phần động năng ô tô bị tiêu phí trên các má phanh bánh xe. Việc thử nghiệm trên một chu trình thử thực tế giúp thu thập được năng lượng phanh tái sinh ở các thời điểm ô tô giảm tốc về 0 km/h. Kết quả này có thể được dùng để áp dụng chiến thuật thu hồi năng lượng hợp lý.

Mô hình thử nghiệm đề xuất có thể đo đặc năng lượng hệ thống phanh tái sinh trên ô tô trên cơ sở giả lập môi trường vận hành trong phòng thí nghiệm. Nghiên cứu tiếp theo có thể tiến hành nhằm phân hồi tải tạo ra trên động cơ PMS hoạt động ở chế độ phát điện. Tín hiệu mô men được đưa vào bộ điều khiển động cơ không đồng bộ để giảm tốc độ động cơ phù hợp với tải điện tạo ra.

## Lời cảm ơn

Nhóm tác giả gửi lời cảm ơn đến Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành Phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cho công trình này, thuộc đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường mã số T2025-13 năm 2025.

## Xung đột lợi ích

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

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. K. Yoong *et al.*, "Studies of regenerative braking in electric vehicle," in *2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, IEEE, Nov. 2010, pp. 40–45. doi: 10.1109/STUDENT.2010.5686984.

- [2] R. Maia, M. Silva, R. Araújo, and U. Nunes, "Electrical vehicle modeling: A fuzzy logic model for regenerative braking," *Expert Syst Appl*, vol. 42, no. 22, pp. 8504–8519, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2015.07.006.
- [3] P. Clarke, T. Muneer, and K. Cullinane, "Cutting vehicle emissions with regenerative braking," *Transp Res D Transp Environ*, vol. 15, no. 3, pp. 160–167, May 2010, doi: 10.1016/j.trd.2009.11.002.
- [4] J. KROPIWNICKI and M. FURMANEK, "Analysis of the regenerative braking process for the urban traffic conditions," *Combustion Engines*, vol. 178, no. 3, pp. 203–207, Jul. 2019, doi: 10.19206/CE-2019-335.
- [5] J. Guo, J. Wang, and B. Cao, "Regenerative braking strategy for electric vehicles," in *2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, Jun. 2009, pp. 864–868. doi: 10.1109/IVS.2009.5164393.
- [6] J. Biao, Z. Xiangwen, W. Yangxiong, and H. Wencho, "Regenerative Braking Control Strategy of Electric Vehicles Based on Braking Stability Requirements," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 465–473, Apr. 2021, doi: 10.1007/s12239-021-0043-1.
- [7] Z. Zhang, Y. Dong, and Y. Han, "Dynamic and Control of Electric Vehicle in Regenerative Braking for Driving Safety and Energy Conservation," *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 179–197, Feb. 2020, doi: 10.1007/s42417-019-00098-0.
- [8] H. Yeo and H. Kim, "Hardware-in-the-loop simulation of regenerative braking for a hybrid electric vehicle," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 216, no. 11, pp. 855–864, Nov. 2002, doi: 10.1243/095440702321031405.
- [9] Z. Ma and D. Sun, "Energy Recovery Strategy Based on Ideal Braking Force Distribution for Regenerative Braking System of a Four-Wheel Drive Electric Vehicle," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 136234–136242, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3011563.
- [10] Z. Zou, J. Cao, B. Cao, and W. Chen, "Evaluation strategy of regenerative braking energy for supercapacitor vehicle," *ISA Trans*, vol. 55, pp. 234–240, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.isatra.2014.09.011.
- [11] Andrew Day and David Bryant, *Braking of Road Vehicles*. Elsevier, 2022. doi: 10.1016/C2019-0-04185-4.
- [12] L. T. Phuc and D. C. Tri, "Applying sine PWM Technique to Control Three-phase Induction Motor in Electric Motorcycles," in *2022 6th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, IEEE, Jul. 2022, pp. 564–571. doi: 10.1109/GTSD54989.2022.9988765.
- [13] Lê Thanh Phúc, Vũ Đình Huân, "Xác định các thông số và thiết kế mô hình bộ pin cao áp cho ô tô điện", *Tạp chí cơ khí Việt Nam số 321*, tr. 160 – 164, tháng 11 năm 2024.
- [14] D. C. Tri and L. T. Phuc, "Design of Driver Circuit to Control Induction Motor Applied in Electric Motorcycles", *5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 2020, p. 326 – 333

**Le Thanh Phuc** received the B.E. degree in automotive engineering from Ho Chi Minh city University of Technology and Engineering, Vietnam, in 2004 and the M.E. degree in automotive engineering from Ho Chi Minh city University of Technology and Engineering, Vietnam, in 2007. He received PhD degree in mechanical engineering from Concordia University in Montreal Canada in 2013. His research interest is on electric vehicles, vehicle dynamics, driver models and engine control. His published paper is related to controlling of electric motorbikes, impaired driver model, PWM technique applied on induction motor.

Email address: [phuclt@hcmute.edu.vn](mailto:phuclt@hcmute.edu.vn) ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0272-099X>

**Nguyen Trung Hieu** obtained the B.E degree in Automotive Engineering from Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering, Vietnam, in 2012. He subsequently completed the Master of Science degree in Vehicle Engineering from the National Taipei University of Technology, Taiwan, in 2015. His research interests are primarily focused on Vehicle Dynamics and Control, Electric Vehicles, and Automotive Embedded Systems.

Email address: [hieuntr@hcmute.edu.vn](mailto:hieuntr@hcmute.edu.vn) ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3056-4370>