ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ TIẾT KIỆM NHIÊN LIỆU CỦA THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN SOC TRÊN XE HYBRID TRONG ĐIỀU KIỆN GIAO THÔNG ĐÔ THỊ

EVALUATING THE FUEL ECONOMY OF SOC CONTROL ALGORITHMS IN HYBRID VEHICLES UNDER URBAN TRAFFIC CONDITIONS

Phạm Tất Thắng, Đặng Ngọc Bách, Vũ Văn Tấn*
Bộ môn Cơ khí ô tô, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông vận tải
**Email tác giả liên hệ: vvtan@utc.edu.vn*

TÓM TẮT

Hiệu suất của ô tô điện lai (HEV) Nối tiếp – Song song phụ thuộc lớn vào chiến lược giới hạn trạng thái sạc (SOC). Việc thiết lập dải SOC luôn vấp phải sự đánh đổi: dải quá hẹp khiến động cơ đốt trong phải khởi động/dừng liên tục gây mất ổn định cơ học, trong khi dải quá rộng gây hao phí năng lượng do máy phát phải gánh tải nạp. Thông qua mô phỏng trên chu trình tiêu chuẩn WLTP và điều kiện giao thông đô thị Hà Nội, bài báo đánh giá các kịch bản điều khiển biên độ SOC khác nhau nhằm tìm ra điểm vận hành cân bằng. Kết quả chứng minh chiến lược thiết lập dải sạc ở mức trung bình cao là giải pháp hiệu quả nhất. Phương pháp này vừa triệt tiêu sự mất ổn định của động cơ, vừa duy trì đủ không gian đệm tĩnh để cực đại hóa năng lượng thu hồi từ phanh tái sinh, qua đó cải thiện đáng kể mức tiêu hao nhiên liệu tổng thể.

Từ khóa: *Ô tô điện lai (HEV); Trạng thái sạc (SOC); Chiến lược điều khiển; WLTP.*

ABSTRACT

The efficiency of a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle (HEV) depends heavily on the State of Charge (SOC) limit strategy. Setting the SOC range always involves a trade-off: a very narrow range makes the engine start and stop too often, causing mechanical instability. Meanwhile, a very wide range causes energy loss because the generator has to work hard to charge the battery. By simulating the standard WLTP cycle and Hanoi's urban traffic conditions, this paper evaluates different SOC range control scenarios to find the best balance point. The results show that setting a medium-high SOC range is the most effective solution. This method reduces engine instability while keeping enough battery space to maximize energy recovery from regenerative braking, thereby greatly improving overall fuel economy.

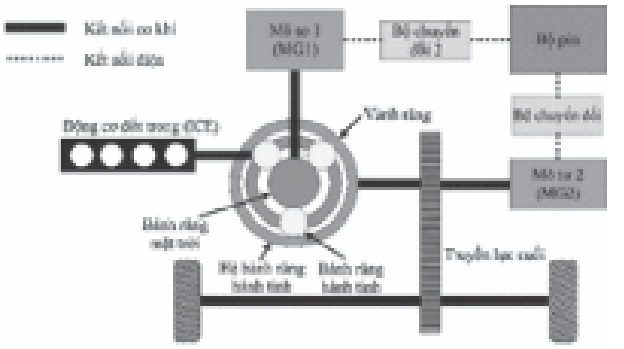
Keywords: *Hybrid Electric Vehicle (HEV); State of Charge (SOC); Control strategy; WLTP.* ☞

1. GIỚI THIỆU

Trong nỗ lực điện hóa giao thông nhằm giảm thiểu phát sinh khí nhà kính, ô tô điện lai (Hybrid Electric Vehicle – HEV) cấu trúc Nối tiếp – Song song (Series – Parallel) được xem là giải pháp chuyển tiếp tối ưu nhất, giải quyết triệt để bài toán giới hạn tầm hoạt động của xe thuần điện. Bằng việc kết hợp động cơ đốt trong (ICE) và hệ thống mô-tơ điện, cấu trúc này cho phép ICE luôn hoạt động ở vùng hiệu suất nhiệt cao, độc lập với sự biến thiên tải trọng ở bánh xe [1]. Sự vượt trội về tính kinh tế nhiên liệu của xe HEV bộc lộ rõ nhất trong điều kiện giao thông đô thị "dừng và khởi hành liên tục". Nhờ khả năng vận hành thuần điện ở dải tốc độ thấp và hệ thống phanh tái sinh giúp thu hồi động năng [2], các nghiên cứu thực nghiệm về tiêu hao nhiên liệu trong điều kiện lái thực tế của Huang và cộng sự [3] đã khẳng định: Mặc dù mức tiêu hao nhiên liệu ngoài thực tế thường cao hơn kết quả thử nghiệm trong phòng lab, xe HEV vẫn mang lại hiệu quả kinh tế vượt trội khi tiết kiệm được từ (23% - 49%) lượng nhiên liệu so với các phương tiện truyền thống sử dụng động cơ đốt trong (ICE) cùng phân khúc. Hiệu quả của Chiến lược Quản lý Năng lượng (EMS) phụ thuộc lớn vào việc kiểm soát dải SOC. Việc duy trì SOC ở vùng thấp (40% - 60%) giúp hệ thống tối đa hóa chế độ xả kiệt [4]. Tuy nhiên, dải sạc quá hẹp dễ gây ra hiện tượng động cơ bật/tắt liên tục, làm giảm độ êm dịu và tăng phát thải [5]. Ngược lại, nếu ép sạc quá cao (~ 100%), động cơ (ICE) sẽ phải liên tục kéo thêm phụ tải dư thừa từ máy phát, gây lãng phí nhiên liệu và làm mất không gian thu hồi năng lượng phanh tái sinh [6]. Khắc phục hạn chế của các nghiên cứu trước khi thường bỏ qua giới hạn phần cứng thực tế và điều kiện giao thông bản địa, bài báo này định lượng hiệu quả tiết kiệm nhiên liệu của 3 dải SOC: (30% - 100%), (40% - 60%) và (50% - 80%) trên cả chu trình thử nghiệm quốc tế WLTP và chu trình đô thị Hà Nội thực tế. Đóng góp cốt lõi là việc làm rõ sự đánh đổi giữa tối ưu nhiên liệu và độ ổn định cơ điện. Kết quả mô phỏng chứng minh dải cân bằng (50% - 80%) là giải pháp toàn diện nhất: triệt tiêu tổn hao công suất vô ích, loại bỏ hoàn toàn sự đóng/ngắt động cơ liên tục và cực đại hóa năng lượng phanh tái sinh, đặc biệt phù hợp với đặc thù ùn tắc giao thông tại Việt Nam.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH HỆ THỐNG HYBRID

Cấu trúc truyền lực tổng thể của hệ thống được minh họa như trong Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ thống truyền lực ô tô Hybrid Nối tiếp – Song song

Như thể hiện trên Hình 1, hệ thống sử dụng bộ chia công suất dạng bánh răng hành tinh để liên kết cơ học và phân phối dòng năng lượng linh hoạt giữa động cơ đốt trong (ICE), Máy phát điện (Motor 1 – MG1) và Mô tơ kéo (Motor 2 – MG2). Tùy thuộc vào yêu cầu công suất và trạng thái sạc của pin, hệ thống điều khiển EMS xác lập các chế độ vận hành chính bao gồm: Chế độ thuần điện (EV Mode), Chế độ lai (Hybrid Mode), Chế độ tăng tốc, Chế độ phanh tái sinh.

Để hiện thực hóa và kiểm soát chính xác sự chuyển đổi giữa các trạng thái vận hành nêu trên, động lực học của hệ thống truyền lực

Power – Split được chi phối trực tiếp bởi cơ cấu bánh răng hành tinh. Trong cấu hình này, động cơ đốt trong (ICE) được kết nối với giá bánh răng hành tinh (Carrie), máy phát điện (MG1) nối với bánh răng mặt trời (Sun Gear), và mô – tơ kéo (MG2) nối với bánh răng vành chậu (Ring Gear). Với tỷ số truyền của cơ cấu là $\mu = R_S / R_r$, mối quan hệ về tốc độ quay (ω) và mô – men xoắn (T) giữa các thành phần được ràng buộc chặt chẽ qua hệ phương trình [7]:

$$\omega_e = \frac{\mu}{1+\mu}\omega_{MG1} + \frac{1}{1+\mu}\omega_{MG2} \quad (1)$$

$$T_e + T_{MG1} + T_{MG2} = 0 \quad (2)$$

$$T_e = (1+\mu)T_{MG2} = -\frac{1+\mu}{\mu}T_{MG1} \quad (3)$$

Trong đó: ω_e là tốc độ động cơ đốt trong (ICE), ω_{MG1} là tốc độ của máy phát MG1, ω_{MG2} là tốc độ của động cơ điện MG2.

Bên cạnh yếu tố động lực học, để bộ điều khiển EMS đưa ra quyết định phân bổ dòng công suất chính là trạng thái (SOC) của cụm pin điện cao áp. Sự biến thiên dung lượng pin tại bất kỳ thời điểm t nào trong chu trình hoạt động đều được hệ thống giám sát và tính toán liên tục theo phương trình:

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{1}{C_b}\int_0^t N_b(\tau)d\tau \quad (4)$$

Trong đó: SOC_0, C_b - Tương ứng là phần trăm và dung lượng ban đầu, N_b - Công suất nạp/xả.

3. KHẢO SÁT CÁC VÙNG HOẠT ĐỘNG CỦA DUNG LƯỢNG PIN (SOC)

Trạng thái sạc (State of Charge – SOC) đại diện cho mức năng lượng khả dụng hiện tại của cụm pin điện áp cao, được định nghĩa là tỷ số giữa dung lượng còn lại và dung lượng định danh của pin [1]. Việc duy trì SOC trong một dải làm việc lý tưởng đóng vai trò sống còn trong việc tối ưu hóa hiệu suất nhiệt của động cơ đốt trong, kéo dài tuổi thọ chu kỳ nạp/xả, và đảm bảo không gian đệm để hấp thụ hiệu quả dòng điện từ hệ thống phanh tái sinh. Dựa trên nguyên lý này, nhằm đánh giá tác động của chiến lược quản lý năng lượng, nghiên cứu tiến hành thiết lập và khảo sát ba dải vận hành SOC trên chu trình mô phỏng.

Dải vận hành đầu tiên được thiết lập là chế độ sạc nguyên bản (30% – 100%). Mục đích của cấu hình này là để quan sát phản ứng của hệ thống khi duy trì mục tiêu SOC tiệm cận mức đầy, qua đó đánh giá mức độ phụ tải kéo máy phát (MG1) mà động cơ ICE phải gánh chịu, cũng như sự suy giảm không gian đệm dùng cho việc thu hồi động năng. Nhằm tạo sự đối chứng, dải vận hành thứ hai áp dụng chế độ xả kiệt với biên độ hẹp (40% – 60%) để kiểm tra giới hạn của việc ưu tiên chạy thuần điện (EV Mode). Với cấu hình này, nghiên cứu chú trọng khảo sát hiện tượng hệ thống có thể rơi vào trạng thái đóng/ngắt động cơ liên tục khi tiệm cận các ngưỡng biên hẹp.

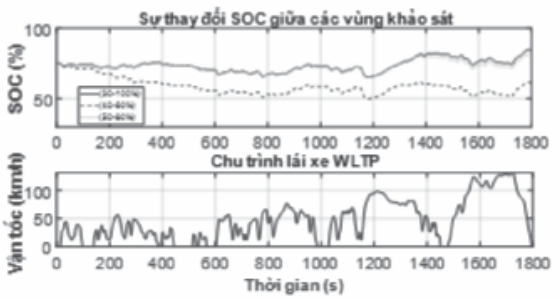
Cuối cùng dải sạc cân bằng (50% – 80%) được đưa vào khảo sát như một phương án trung gian. Nghiên cứu đặt ra giả thuyết rằng biên độ 30% sẽ cung cấp đủ không gian để triệt tiêu hiện tượng đóng/ngắt máy liên tục, đồng thời mức trần 80% sẽ luôn duy trì được 20% dung lượng trống. Hiệu quả thực tế của khoảng đệm này trong việc hấp thụ dòng năng lượng phanh tái sinh, đặc biệt trong các điều kiện giao thông ùn tắc, sẽ được đo lường và làm rõ thông qua các kết quả chạy mô phỏng ở phần sau.

4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

4.1. Đánh giá với chu trình tiêu chuẩn WLTP ☞

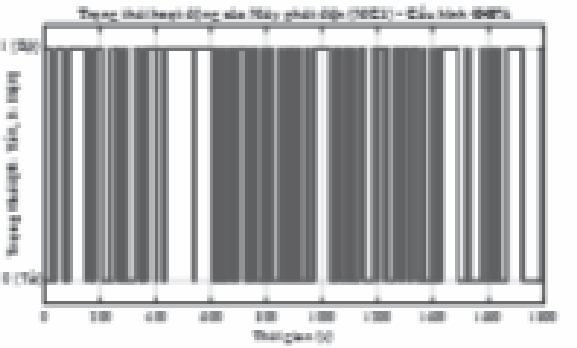
Quá trình mô phỏng được thực hiện trên chu trình tiêu chuẩn WLTP với dung lượng pin khởi điểm được thiết lập tại SOC_0 = 75%. Quan sát đồ thị biến thiên trạng thái sạc ở Hình 2, dải xả kiệt (40% – 60%) lập tức sụt giảm dung lượng để ưu tiên chế độ thuần điện (EV). Tuy nhiên sau đó, quỹ đạo SOC tăng giảm quanh mốc 60%. Sự thiếu ổn định này xảy ra do hệ thống phải liên tục can thiệp để duy trì pin trong giới hạn chật hẹp của biên độ 20%.

Mặt khác, quỹ đạo của dải sạc nguyên bản (30% – 100%) và dải sạc cân bằng (50% – 80%) hoàn toàn trùng khớp ở nửa đầu chu trình do mức pin 75% nằm trong vùng an toàn. Sự phân hóa chỉ xuất hiện ở giai đoạn cuối khi dung lượng chạm ngưỡng 80%. Tại điểm nút này, cấu hình 30% – 100% tiếp tục sạc (đường SOC đi lên), điều này khiến động cơ vẫn phải tiêu hao nhiên liệu để kéo máy phát và làm mất đi khoảng đệm an toàn. Trái lại, cấu hình 50% – 80% chủ động ngắt phụ tải sạc (đường SOC đi xuống) để duy trì nghiêm ngặt 20% dung lượng trống. Sự tách rời quỹ đạo này chính là minh chứng rõ nét việc dải 50% – 80% vừa giải phóng gánh nặng cho động cơ, vừa đảm bảo không gian lý tưởng để hấp thụ năng lượng phanh tái sinh trong các pha giảm tốc tiếp theo.



Hình 2. Sự thay đổi SOC của chu trình WLTP

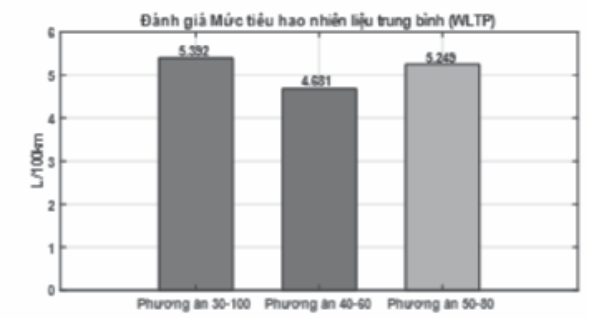
Sự thiếu ổn định của dải 40% – 60% được làm rõ qua tín hiệu điều khiển máy phát MG1 trên Hình 3. Trong cơ cấu Power – Split, do động cơ đốt trong (ICE) và máy phát (MG1) liên kết động học chặt chẽ qua cụm bánh răng hành tinh, máy phát MG1 đóng vai trò là tải tiêu thụ trực tiếp của ICE khi hệ thống yêu cầu sạc. Do vậy, tín hiệu kích hoạt MG1 phản ánh chính xác tần suất hệ thống ra lệnh cho động cơ xăng phải tham gia vào quá trình phát điện. Từ Hình 3, do biên độ làm việc quá hẹp (chỉ 20%), ngay khi pin chạm ngưỡng 40% hoặc sạc đầy lên 60%, thuật toán EMS buộc phải chuyển đổi trạng thái liên tục. Các xung nhịp đóng/ngắt dày đặc là minh chứng thực nghiệm cho việc động cơ bị ép vào chu kỳ khởi động/dừng cực đoan. Điều này gây tổn hao chuyển tiếp lớn, làm suy giảm độ êm dịu chuyển động và đẩy nhanh quá trình hao mòn cơ khí.



Hình 3. Đồ thị trạng thái đóng/ngắt của MG1

Sự đánh đổi trong chiến lược điều khiển được thể hiện rõ nét qua biểu đồ so sánh mức tiêu thụ nhiên liệu tại Hình 4. Dải 40% – 60% ghi nhận mức tiêu hao nhiên liệu thấp nhất do đã vắt kiệt năng lượng dự trữ ban đầu để chạy thuần điện. Tuy nhiên, lợi ích kinh tế này hoàn toàn không đủ để bù đắp cho nhược điểm phá hủy tuổi thọ động cơ. Trong khi đó, dải 30% – 100% gây lãng phí nhiên liệu cao nhất do động cơ xăng liên tục phải gánh tải kéo máy phát. Từ những phân tích đối sánh này, có thể khẳng định dải vận hành 50% – 80% là giải pháp tối ưu toàn diện nhất: vừa cắt giảm đáng kể lượng

nhiên liệu so với thiết kế nguyên bản, vừa duy trì sự ổn định vận hành tuyệt đối.

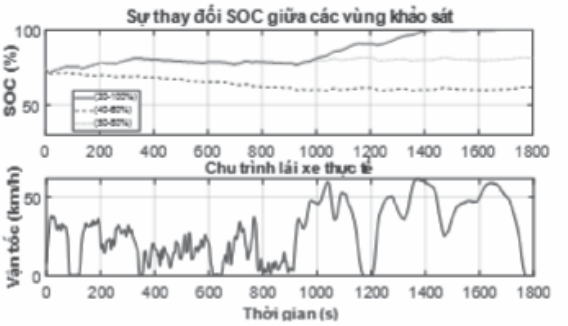


Hình 4. Mức tiêu hao nhiên liệu WLTP

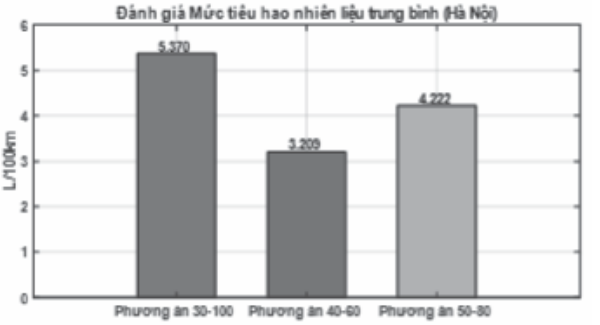
4.2. Đánh giá với chu trình thực tế tại Hà Nội

Sau khi thử nghiệm thành công trên chu trình tiêu chuẩn WLTP, nghiên cứu tiến hành thử nghiệm trên chu trình thực tế tại Hà Nội. Dữ liệu vận tốc nội đô được thu thập trực tiếp trong điều kiện giao thông thực tế thông qua ứng MATLAB Mobile tích hợp trên thiết bị di động. Các tín hiệu thô sau đó trải qua quá trình lọc nhiễu và xử lý số liệu nghiêm ngặt, đảm bảo chu trình thử nghiệm phản ánh với độ tin cậy cao nhất hành vi tăng/giảm tốc liên tục của dòng phương tiện.

Với đặc thù giao thông nội đô ùn tắc, đồ thị vận tốc xuất hiện dày đặc các pha đỗ dừng ở dải tốc độ thấp. Kết quả mô phỏng cho thấy, khoảng đệm 20% dung lượng trống của cấu hình 50% – 80% đã phát huy tối đa hiệu quả khi hấp thụ trọn vẹn nguồn năng lượng phanh tái sinh khổng lồ từ các pha giảm tốc liên tục. Ngay cả trong điều kiện khắc nghiệt của giao thông Hà Nội, quỹ đạo SOC vẫn duy trì được sự ổn định, không rơi vào trạng thái cạn kiệt năng lượng hay quá tải nhiệt, khẳng định tính khả thi và độ tin cậy cao của chiến lược điều khiển khi ứng dụng vào thực tiễn tại Việt Nam.



Hình 5. Sự thay đổi SOC của chu trình thực tế



Hình 6. Mức tiêu hao nhiên liệu chu trình thực tế

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá thành công chiến lược quản lý năng lượng hệ thống Hybrid Power – Split qua chu trình WLTP và dữ liệu vận tốc thực tế tại Hà Nội. Kết quả chỉ ra rằng, dải sạc nguyên bản (30% - 100%) gây lãng phí nhiên liệu, trong khi dải xả kiệt (40% - 60%) dù tiết kiệm nhất nhưng lại phát sinh tần suất đóng/ngắt động cơ đốt trong (ICE) cực đoan, làm suy giảm nghiêm trọng tuổi thọ cơ khí.

Khắc phục hoàn toàn các nhược điểm trên, dải sạc cân bằng (50% - 80%) được khẳng định là giải pháp tối ưu toàn diện. Với biên độ vận hành 30% kết hợp 20% dung lượng đệm, cấu hình này vừa triệt tiêu hiện tượng dao động bám biên, vừa tối đa hóa khả năng thu hồi năng lượng phanh tái sinh trong điều kiện giao thông nội đô ùn tắc. Nghiên cứu cung cấp cơ sở thực ☞

tiễn tin cậy để hiệu chỉnh thông số ECU, hướng tới cân bằng giữa tính kinh tế nhiên liệu và độ bền vững của phương tiện.❖

Ngày nhận bài: **25/5/2026**
Ngày phản biện: **04/6/2026**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K., "*Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicle*s", 3rd ed. CRC Press, 2018.

[2]. M. A. Hannan, F. A. Azidin, and A. Mohamed , "*Hybrid electric vehicles and their challenges: A review*". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 29, pp. 135-150, 2014.

[3]. Y. Huang et al., "*Fuel consumption and emissions performance under real driving: Comparison between hybrid and conventional vehicles*". Science of The Total Environment, vol. 659, pp. 275-282, 2019.

[4]. F. Zhang, L. Wang, S. Coskun, H. Pang, Y. Cui, and J. Xi, "*Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Review, Classification, Comparison, and Outlook*". Energies, vol. 13, no. 13, p. 3352, Jun. 2020, doi: 10.3390/en13133352.

[5]. D. Zhu, E. Pritchard, S. R. Dadam, V. Kumar, and Y. Xu, "*Optimization of rule-based energy management strategies for hybrid vehicles using dynamic programming*". Combustion Engines, vol. 184, no. 1, pp. 3-10, 2021, doi: 10.19206/CE-131967.

[6]. R. K. Chidambaram, D. Chatterjee, B. Barman, P. P. Das, D. Taler, J. Taler, and T. Sobota, "*Effect of regenerative braking on battery life*". Energies, vol. 16, no. 14, p. 5303, Jul. 2023.

[7]. X. Yang, C. Jiang, M. Zhou, and H. Hu, "*Bi-level energy management strategy for power-split plug-in hybrid electric vehicles: A reinforcement learning approach for prediction and control*". Front. Energy Res., vol. 11, p. 1153390, Mar. 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1153390.