

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG NHIỆT ĐỘ VÀ DUNG LƯỢNG TỨC THỜI CỦA PIN LI-ION KHI XÉT ĐẾN CÁC CHẾ ĐỘ HOẠT ĐỘNG CỦA XE Ô TÔ ĐIỆN**Nguyễn Thị Bích Thủy¹, Lê Văn Tùng^{2*}, Đặng Ngọc Huy², Lã Thành An²**¹Trường Cao đẳng Lào Cai²Trường Đại học Thành Đông**Tác giả liên hệ: levantungdktd@gmail.com***TÓM TẮT**

Bài báo trình bày mô hình mô phỏng hệ thống truyền động và nguồn pin của xe điện của Tesla Model S trên môi trường Simulink. Mô hình bao gồm các khối điều khiển lái (vận tốc tham chiếu, chân ga/phanh), khối mô phỏng xe – bánh (Vehicle and Tire), hộp số (Gear system), bộ điều khiển công suất động cơ (Power controller) và khối pin Li-ion tích hợp đo lường dòng xả, điện áp và module nhiệt độ. Các thông số kỹ thuật pin (số module, cấu hình tế bào, dung lượng, dòng xả tối đa, điện áp danh định) được lấy từ tài liệu tham khảo. Kết quả mô phỏng cho thấy sự biến thiên của trạng thái sạc (SOC), nhiệt độ pin và dòng xả trong suốt chu trình vận hành xe. Đường đặc tính vận tốc thực tế gần khớp với vận tốc yêu cầu, thể hiện sự đáp ứng của hệ điều khiển. SOC giảm dần theo thời gian do tiêu hao năng lượng, đồng thời nhiệt độ pin tăng lên khi xe hoạt động liên tục. Các kết quả này minh họa khả năng dự đoán mức tiêu thụ điện năng và ảnh hưởng của điều kiện vận hành đến hiệu suất của hệ nguồn xe điện.

Từ khóa: Xe ô tô điện, Pin lithium-ion, sạc pin xe ô tô điện, điều khiển xe ô tô điện

SIMULATION STUDY OF THE INSTANTANEOUS TEMPERATURE AND CAPACITY OF LI-ION BATTERIES UNDER VARIOUS OPERATING CONDITIONS OF ELECTRIC VEHICLES**ABSTRACT**

This paper presents a simulation model of the powertrain and battery system of the Tesla Model S electric vehicle in the Simulink environment. The model consists of several key blocks: driver control (reference speed, accelerator/brake pedals), vehicle and tire dynamics, gear system, motor power controller, and a Li-ion battery block integrated with current discharge measurement, voltage monitoring, and thermal module. Battery specifications (number of modules, cell configuration, capacity, maximum discharge current, nominal voltage) are sourced from reference documentation. Simulation results demonstrate the variation of the state of charge (SOC), battery temperature, and discharge current throughout the vehicle's operating cycle. The actual speed profile closely matches the reference speed, indicating proper system response. SOC gradually decreases over time due to energy consumption, while battery temperature increases with continuous operation. These results illustrate the model's capability to predict energy consumption and the influence of operating conditions on the performance of the electric vehicle's power system.

Keywords: Electric vehicle, Lithium-ion battery, EV battery charging, EV control system

Ngày nhận bài: 08/12/2025 Ngày nhận bài sửa: 15/03/2026 Ngày duyệt đăng bài: 03/02/2026

1. GIỚI THIỆU

Pin lithium-ion (Li-ion) là loại pin sạc phổ biến nhờ vào mật độ năng lượng cao, trọng

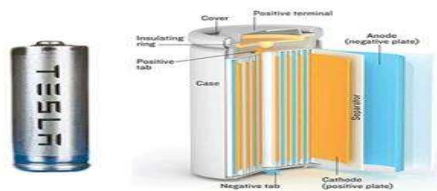
lượng nhẹ và hiệu suất cao. Chúng thường được sử dụng trong điện thoại, máy tính xách tay, thiết bị cầm tay và thậm chí trong những năm gần đây, pin lithium-ion (Li-ion) đã trở thành công nghệ chủ đạo cho nguồn năng lượng của xe điện (EV) do mật độ năng lượng cao và hiệu suất tốt (Scherz & Monk, 2016). Pin xe Tesla Model S (phiên bản P85), có dung lượng tổng lên đến 90 kWh và điện áp hệ thống khoảng 400 V (cấu thành từ 16 module nối tiếp). Mỗi module pin của Model S sử dụng

cell pin 18650 nối tiếp-dãy song song (6S×74P) với dung lượng khoảng 232 Ah (tương đương 5.3 kWh/module (Hình 1 và hình 2). Dòng xả liên tục mỗi module đạt 500 A, dòng xả đỉnh (trong 10 giây) lên đến 750 A, và ngắt xả ở 19.8 V/module. Các thông số này thể hiện đặc tính làm việc và giới hạn của bộ nguồn pin. Tesla, đóng vai trò quan trọng trong việc xác định hiệu suất và phạm vi hoạt động của xe.

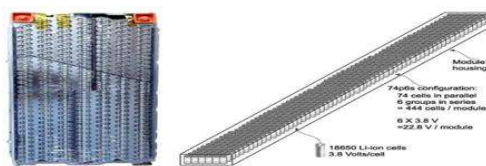
Bảng 1. Thông số kỹ thuật của pin lithium-ion

Thông số	Giá trị	Chú thích
Loại cell sử dụng	Li-ion 18650 (NCR18650B)	Cell hình trụ, 3.6 V – 3.4 Ah
Cấu hình module	6S74P	6 cell nối tiếp, 74 cell song song (444 cell/module)
Số module toàn pack	16	Mắc nối tiếp $\Rightarrow$ 8256 cell tổng cộng
Dung lượng mỗi module	≈ 232 Ah / 5.3 kWh	$3.4\text{Ah} \times 74 = 251.6\text{Ah}$, thực tế ≈ 232 Ah
Tổng dung lượng toàn pack	$\approx 90 - 100$ kWh	Tùy phiên bản: P85 ~ 85 kWh; P100D ~ 100 kWh
Điện áp danh định mỗi cell	3.6 V	Tối đa 4.2 V, ngắt xả 2.5 V
Điện áp danh định mỗi module	22.8 V	$3.8\text{ V} \times 6 = 22.8\text{ V}$
Điện áp toàn pack (danh định)	$\sim 365 - 400$ V	$22.8\text{V} \times 16 = 364.8\text{V}$
Dòng xả đỉnh (tối đa 10 giây)	750 A	Cao nhất cho chế độ tăng tốc nhanh
Điện áp ngắt sạc / ngắt xả mỗi module	25.2 V / 19.8 V	Tương ứng 4.2 V và 3.3 V mỗi cell
Nhiệt độ hoạt động tiêu chuẩn	-18°C đến 60°C	Theo tài liệu kỹ thuật của Tesla

Nguồn: Tổng hợp của tác giả



Hình 1. Cấu tạo pin lithium-ion



Hình 2. Cấu tạo 1 module pin

Nguồn: Tổng hợp của tác giả

Những cực pin được kết nối với nhau bởi tấm bản mỏng ở phía trên và phía dưới với các lỗ tại các cực của pin. Nhiều sợi dây nhỏ hàn từ tấm bản mỏng tới trung tâm các cực của pin. Những sợi dây này được thiết kế để hoạt động như là những sợi cầu chì để phòng biến cố hư hỏng đoạn mạch của bất kì viên pin nào.

Trong quá trình vận hành xe thì nhiệt lượng tỏa ra từ pin là rất lớn, do đó Tesla đã

thiết kế một bộ phận làm mát đan xen giữa các ngăn pin để tối ưu hóa khả năng tản nhiệt. Thay vì sử dụng các khối pin lớn (ắc quy) thì Tesla đã sử dụng các cực pin nhỏ, điều này làm cho khả năng tản nhiệt nhanh hơn và cũng kéo dài tuổi thọ của pin hơn. Bên trong module có một hệ thống ống dẫn chất lỏng làm mát, một loạt các ống dẫn chất lỏng phẳng uốn lượn giữa các hàng tế bào pin. Đó là được kết nối với hai phụ

kiện đường ống ở cuối module. Trong cụm pin những phụ kiện này được kết nối với đường ống rõ ràng từ module này sang module tiếp theo và với một số phụ kiện bên ngoài để cho phép lưu thông chất lỏng có thể được làm nóng

bên ngoài hoặc làm mát khi cần thiết mục đích làm giảm nhiệt độ tỏa ra trong quá trình hoạt động của các cell pin, hệ thống ống dẫn của các module được liên kết với nhau để tuần hoàn dòng chất lỏng làm mát.



Hình 3. Hệ thống tản nhiệt pin của hãng Tesla

Nguồn: Tổng hợp của tác giả

Để đảm bảo quá trình sạc và xả của bộ pin diễn ra an toàn và hiệu quả, hệ thống quản lý pin (BMS – Battery Management System) đóng vai trò quan trọng trong việc giám sát và điều khiển toàn bộ hoạt động của cụm pin. Một trong những yếu tố quan trọng mà BMS cần theo dõi là nhiệt độ, bởi vì nhiệt độ ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất làm việc của pin. Pin Li-ion thường hoạt động ổn định trong dải nhiệt độ từ -20°C đến 60°C . Do đó, hệ thống cần trang bị các cảm biến nhiệt độ tại những vị trí được tính toán hợp lý, thường thông qua các mô phỏng để đảm bảo giám sát được chính xác tình trạng nhiệt của khối pin. Ngoài ra, việc theo dõi điện áp của từng cell pin cũng rất quan trọng. BMS cần có ít nhất một kênh đo điện áp cho mỗi cell để kiểm soát hoạt động trong ngưỡng an toàn. Điện áp đo được không chỉ giúp phát hiện các cell bất thường mà còn được dùng để xác định trạng thái sạc của pin (SOC - State of Charge). Độ chính xác của giá trị điện áp càng cao thì việc ước tính SOC càng đáng tin cậy, từ đó giúp hệ thống tối ưu quá trình sử dụng năng lượng và kéo dài tuổi thọ pin.

Song song với cảm biến điện áp, BMS cũng sử dụng cảm biến dòng điện để theo dõi lưu lượng dòng ra vào pin. Thông tin dòng điện cũng có thể được sử dụng để tính toán SOC bằng phương pháp đo tích phân dòng. Trên các phương tiện chạy điện hiện nay, cảm biến dòng thường có khả năng làm việc trong dải rất rộng, từ vài mA đến hàng nghìn Ampe, phù hợp với nhiều chế độ vận hành khác nhau. Cuối cùng,

để hệ thống hoạt động an toàn, BMS còn cần được trang bị thêm các thiết bị hỗ trợ như bộ lọc nhiễu điện từ (EMI) nhằm giảm thiểu ảnh hưởng từ nhiễu đến các cảm biến, thiết bị cách ly điện để phân tách vùng điện áp cao và thấp trong hệ thống, và các bộ tiếp điểm (contactor) có chức năng ngắt dòng điện DC trong trường hợp phát hiện sự cố nguy hiểm, qua đó bảo vệ toàn bộ hệ thống và người sử dụng.

2. MÔ PHỎNG HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN XE Ô TÔ ĐIỆN ĐỂ ĐÁNH GIÁ QUÁ TRÌNH NẠP XẢ VÀ NHIỆT ĐỘ THAY ĐỔI CỦA PIN

Để nghiên cứu hiệu ứng của mô hình điều khiển và hành trình xe lên tính chất của hệ nguồn, nhiều công trình đã sử dụng phần mềm Matlab/Simulink để xây dựng mô hình toàn cục của xe điện. Các chu trình tốc độ chuẩn (như FTP-75 với thời gian 2474 giây) thường được áp dụng để đánh giá năng lượng tiêu thụ và phạm vi xe điện. Nghiên cứu này áp dụng mô hình hệ truyền động điện tổng quát tích hợp với khối mô phỏng pin trong Simulink, nhằm thu thập dữ liệu về nhiệt độ pin, SOC, dòng xả và điện áp pin trong suốt quá trình chạy xe. Các dữ liệu kỹ thuật về pin và cấu hình hệ thống được tham khảo từ tài liệu chuyên ngành. Kết quả mô phỏng sẽ giúp đánh giá đặc tính làm việc của nguồn pin trong điều kiện vận hành thực tế của xe điện. Mô hình mô phỏng được xây dựng trong môi trường Simulink với cấu trúc tổng quát như hình 4. Thông số kỹ thuật chính của bộ pin được tham khảo từ dữ liệu

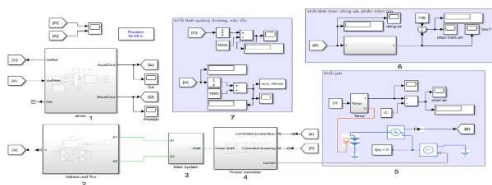
thực tế của Tesla Model S như bảng 1. Các thành phần chính được liên kết với nhau trong mô hình nhằm mô phỏng hành vi của xe điện dưới các điều kiện vận hành khác nhau (Sarmadiana và cộng sự, 2022; Hu & cộng sự, 2011; Masarati & cộng sự, 2022). Mức dung lượng pin (SOC) được tính toán theo công thức tích phân Coulomb như sau:

$$SOC(t_1) = SOC(t_0) + \frac{\eta}{C_{nom}} \times \int_{t_0}^{t_1} \frac{i(t)}{3600} dt$$

Trong đó:

- η là hiệu suất Coulomb (xấp xỉ 0.99)
- C_{nom} là dung lượng danh định của pin (Ah)
- $i(t)$ là dòng điện tại thời điểm t

Nhiệt lượng sinh ra trong pin được tính theo công thức: $Q = I^2 \times R \times \Delta t$



Hình 4. Sơ đồ mô hình mô phỏng hệ truyền động điện và nguồn pin của xe điện

Nguồn: Nghiên cứu của tác giả

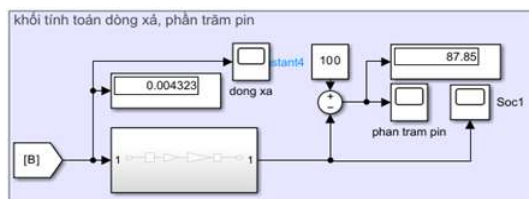
Hình 4 gồm: 1- khối tạo tham chiếu vận tốc, điều khiển ga và phanh (driver); 2- khối mô phỏng xe, bánh (Vehicle and Tire); 3- hộp số (Gear system), 4- khối điều khiển công suất động cơ (Power controller); 5- khối pin; 6- khối tính toán dòng xả, phần trăm pin; 7- khối tính quãng đường vận tốc. Mô phỏng được thực hiện trên Matlab/Simulink với bước mẫu phù hợp, tổng thời gian giả lập 3600 giây (1 giờ).

Một trong những khối quan trọng trong mô hình mô phỏng hệ thống nguồn xe điện là khối tính toán dòng xả và phần trăm dung lượng pin (SOC) như hình 5. Khối này có chức năng giám sát lượng điện năng tiêu thụ từ pin thông qua dòng xả (đơn vị Ampe), từ đó tính toán lượng dung lượng còn lại theo thời gian mô phỏng. Trong mô hình Simulink, dòng điện xả ra từ bộ nguồn được đưa vào một khối phụ (Subsystem), bên trong đó thực hiện toàn bộ

Trong đó:

- I là dòng điện xả
- R là nội trở bên trong của pin
- Δt là khoảng thời gian xả

Các phương trình trên được triển khai thông qua khối điều khiển quản lý pin (Battery Management System – BMS) trong Simulink. Thời gian mô phỏng là 3600 giây với bước thời gian nhỏ nhằm đảm bảo độ chính xác cao. Mô hình vận hành theo chu trình tải giả định (gồm pha tăng tốc, giữ tốc độ và phanh) tương ứng với các tín hiệu chân ga và chân phanh đầu vào.



Hình 5. Khối tính toán dòng xả và phần trăm pin

quá trình tính toán SOC theo nguyên tắc tích phân Coulomb rời rạc.

Cụ thể, tín hiệu đầu vào là dòng điện $I(t)$ được đưa qua một chuỗi các phép biến đổi. Trước hết, dòng điện được nhân với hằng số $\frac{1}{3600}$ để chuyển đổi đơn vị từ ampe-giây (As) sang ampe-giờ (Ah), vì $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ As}$. Sau đó, kết quả được nhân tiếp với hệ số $\frac{1}{166} \times 100$, trong đó 166 là dung lượng danh định của bộ pin (giả định là 166 Ah), còn nhân với 100 nhằm quy đổi kết quả thành phần trăm (%) của dung lượng. Tức là, mỗi lượng điện tiêu thụ sẽ được tính bằng phần trăm tương ứng so với toàn bộ dung lượng khả dụng của bộ pin. Toàn bộ biểu thức tính toán mức giảm SOC tại mỗi thời điểm như sau (Pearre & cộng sự, 2022; Mo & cộng sự, 2022; Dinkhah & cộng sự, 2019):

$$\Delta SOC(t) = \frac{I(t) \times \Delta t}{3600 \times C_{nom}} \times 100$$

Trong đó, Δt là bước thời gian mô phỏng, C_{nom} là dung lượng danh định (ở đây là 166 Ah), và $I(t)$ là dòng xả tại thời điểm t .

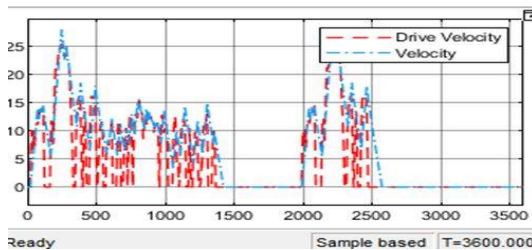
Khối hiển thị (display) phía ngoài sẽ liên tục cập nhật và hiển thị giá trị SOC theo thời gian thực, ví dụ như trong ảnh mô phỏng hiển thị giá trị SOC hiện hành là 87.85%. Việc cập nhật SOC theo thời gian cho phép đánh giá được tốc độ tiêu hao năng lượng trong các pha vận hành thực tế, nhất là khi xe tăng tốc, leo dốc, hoặc giữ tải cao.

Nhìn chung, khối này đóng vai trò như một mô hình thu nhỏ của hệ thống quản lý pin (Battery Management System – BMS) trong thực tế, nơi SOC được tính theo dòng xả và

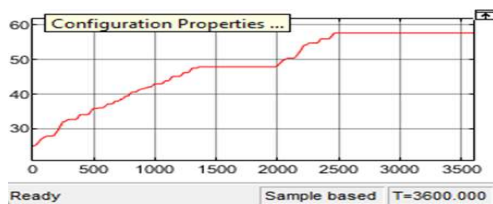
dòng sạc thực tế. Dù chưa có yếu tố hồi tiếp phức tạp như hiệu chỉnh nhiệt độ, dòng rò hay cân bằng cell, phương pháp này đã đủ chính xác để mô phỏng xu hướng tiêu hao pin trong các chu kỳ tải khác nhau (Chen & cộng sự, 2021). Đây là một phần quan trọng của mô hình tổng thể, giúp phản ánh trực quan khả năng tiêu hao và phạm vi vận hành còn lại của xe điện trong quá trình mô phỏng.

3. KẾT QUẢ

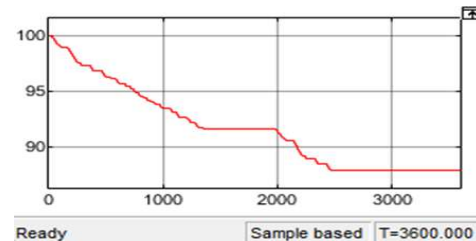
Hình 6 trên thể hiện mối quan hệ giữa vận tốc đặt (đường nét đỏ – Drive Velocity) và vận tốc thực tế của xe (đường chấm xanh – Velocity) trong suốt chu kỳ mô phỏng kéo dài 3600 giây



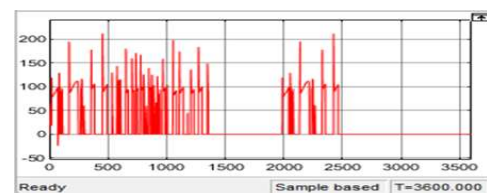
Hình 6. Biểu đồ vận tốc xe điện và tín hiệu điều khiển theo thời gian



Hình 8. Nhiệt độ pin theo thời gian



Hình 7. Biểu đồ phần trăm dung lượng pin (SOC) theo thời gian



Hình 9. Dòng xả của pin trong quá trình vận hành

Nguồn: Tổng hợp của tác giả

Dữ liệu vận tốc mô phỏng được lấy từ mô hình Simulink trong các pha chạy thực – nghỉ theo tín hiệu chân ga và chân phanh. Kết quả cho thấy:

Trong các giai đoạn xe tăng tốc, vận tốc thực tế nhanh chóng bám sát với vận tốc yêu cầu, thể hiện tính chính xác của khối điều khiển (Power Controller). Độ trễ nhỏ giữa hai đường biểu diễn thể hiện thời gian đáp ứng nhanh và khả năng ổn định của hệ thống truyền động.

Các đoạn xe dừng hoàn toàn (vận tốc = 0) phản ánh thời điểm phanh hoàn toàn hoặc nhả

ga. Chu trình vận hành bao gồm 2 giai đoạn chính:

Giai đoạn 1: 0–1400s – nhiều pha tăng tốc và dừng xen kẽ.

Giai đoạn 2: 2000–2600s – tăng tốc lại và dừng hẳn

Biểu đồ cũng giúp kiểm chứng hoạt động của tín hiệu chân ga và chân phanh. Các đoạn sườn dốc trong đồ thị vận tốc trùng với thời điểm tín hiệu ga/phanh được kích hoạt, cho thấy hệ thống phản hồi chính xác với lệnh điều

khuyến đầu vào. Đồ thị biểu diễn sự suy giảm trạng thái sạc (State of Charge – SOC, đơn vị %) của bộ pin trong suốt thời gian mô phỏng. Bắt đầu từ 100%, dung lượng giảm dần theo thời gian do pin liên tục xả điện để cấp nguồn cho động cơ.

Phân tích chi tiết:

Giai đoạn 0–2000s: SOC giảm tương đối đều, từ 100% xuống còn khoảng 91%, do xe vận hành với chu kỳ tăng tốc và giữ tốc độ thấp.

Giai đoạn 2000–2600s: tốc độ sụt SOC nhanh hơn, giảm từ 91% xuống khoảng 88%, do đây là thời điểm xe tăng tốc lại, yêu cầu công suất lớn hơn.

Giai đoạn 2600s trở đi: SOC gần như giữ nguyên ở mức ~87.85%, cho thấy xe không hoạt động (vận tốc = 0), dòng xả về gần 0.

Đường cong SOC cho thấy năng lượng tiêu hao phụ thuộc chặt chẽ vào vận tốc, thời gian hoạt động và mức tải. Tốc độ giảm SOC là chỉ báo tốt cho việc ước lượng phạm vi hoạt động còn lại (range) của xe điện. Mô phỏng đồng thời với vận tốc (Hình 7) cho thấy rằng các đoạn giảm mạnh SOC tương ứng với các pha tốc độ cao hoặc tải lớn. Biểu đồ thể hiện sự thay đổi nhiệt độ pin (trục tung, đơn vị °C) trong suốt quá trình mô phỏng kéo dài 3600 giây. Nhiệt độ ban đầu của pin là khoảng 25°C, và tăng dần theo thời gian, đạt khoảng 57°C vào cuối quá trình mô phỏng. Đồ thị cho thấy quá trình tăng nhiệt độ diễn ra theo từng bậc, tương ứng với các pha xe tăng tốc và tiêu thụ dòng điện lớn. Cụ thể:

Giai đoạn từ 0 đến khoảng 1000 giây: nhiệt độ tăng nhanh từ 25°C lên gần 45°C do xe hoạt động mạnh ở các pha đầu.

Từ 1000–2000 giây: nhiệt độ tiếp tục tăng chậm và ổn định đến khoảng 48°C, phản ánh giai đoạn tải vừa phải hoặc xe duy trì tốc độ ổn định.

Giai đoạn 2000–2500 giây: xuất hiện một pha tăng nhiệt rõ rệt, từ 48°C lên gần 56°C, cho

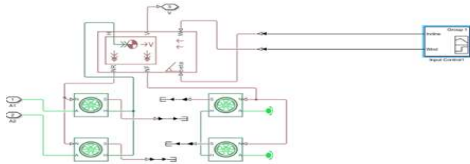
thấy xe đã trải qua một đợt tải cao (tăng tốc mạnh hoặc leo dốc).

Từ 2500 giây đến cuối: nhiệt độ ổn định ở khoảng 57°C, cho thấy tải giảm, dòng xả nhỏ hoặc hệ thống hoạt động trong điều kiện nhẹ.

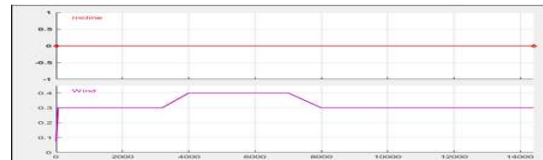
Tốc độ tăng nhiệt và giá trị nhiệt độ đạt được trong mô phỏng này phản ánh tốt đặc tính tản nhiệt giới hạn của pin Li-ion nếu không được làm mát tích cực. Kết quả này nhấn mạnh vai trò của hệ thống quản lý nhiệt (thermal management) trong việc duy trì nhiệt độ hoạt động của pin trong vùng an toàn (thường dưới 60°C), giúp kéo dài tuổi thọ và đảm bảo an toàn cho hệ thống điện áp cao trên xe điện.

Hình 9 thể hiện biểu đồ dòng xả của pin xe điện theo thời gian mô phỏng. Dòng điện tiêu thụ dao động mạnh trong khoảng từ 0 đến 2600 giây, với cường độ dòng có thể đạt hơn 200 A tại các thời điểm tăng tốc. Trong giai đoạn cuối mô phỏng, dòng xả về gần 0, thể hiện rằng xe không còn hoạt động. Đây là dấu hiệu chính xác cho thấy hệ thống chỉ tiêu thụ điện năng trong các pha vận hành có tải.

Để phân tích mối quan hệ giữa dòng xả và vận tốc, biểu đồ vận tốc xe được sử dụng để đối chiếu. Trong hình 8, vận tốc yêu cầu (đường đỏ) và vận tốc thực tế (đường xanh) được mô phỏng trong khoảng 0–3600 giây. Xe trải qua các pha tăng tốc–dừng xen kẽ, cụ thể từ 0–1400 giây và từ 2000–2600 giây. Các đỉnh lớn trong biểu đồ dòng xả trùng khớp với các đoạn tăng tốc mạnh, khi vận tốc tăng từ 0 lên trên 25 km/h. Điều này cho thấy dòng xả tỷ lệ thuận với độ dốc tăng vận tốc, đặc biệt ở các thời điểm bắt đầu tăng tốc sau khi dừng, khi động cơ cần lực kéo lớn hơn để thắng quán tính. Mô hình khí động học tổng thể có thể được xem trong hình 10. Các khối mô phỏng động cơ, bánh xe và lực cản đầu vào từ độ dốc và gió được kết nối trực tiếp với hệ thống điều khiển vận tốc. Nhờ đó, mô hình có thể tính được ảnh hưởng của các yếu tố môi trường đến dòng điện tiêu thụ một cách chính xác.



Hình 10. Bên trong khối vehicle and tire



Hình 11. Tín hiệu đưa vào tốc độ gió và độ nghiêng

Nguồn: Tổng hợp của tác giả

Dòng xả của pin phản ánh trực tiếp tải động cơ, trong đó bao gồm ảnh hưởng của tăng tốc, độ dốc địa hình và gió đối kháng. Khi xe tăng tốc hoặc gặp gió mạnh, dòng xả tăng mạnh. Ngược lại, khi xe dừng hoặc giữ tốc độ ổn định trong điều kiện tải thấp, dòng xả giảm. Mô hình đã mô phỏng tốt đặc tính vật lý này, giúp phản ánh chính xác quá trình tiêu thụ điện năng trong quá trình vận hành xe điện.

4. NHẬN XÉT

Kết quả mô phỏng thu được từ mô hình hệ thống truyền động xe điện tích hợp pin Li-ion đã thể hiện rõ mối quan hệ giữa các yếu tố vận hành như: tốc độ xe, dòng xả, dung lượng (SOC), và nhiệt độ pin. Từ các biểu đồ và dữ liệu phân tích, có thể đưa ra các nhận xét cụ thể như sau:

4.1. Về khả năng điều khiển vận tốc và phản ứng hệ thống

Hệ thống điều khiển vận tốc có khả năng bám sát tốt với tín hiệu tham chiếu, thể hiện ở hình 7 khi đường vận tốc thực tế (Velocity) gần như trùng với đường vận tốc yêu cầu (Drive Velocity). Các giai đoạn tăng tốc và dừng được mô phỏng rõ ràng, thời gian đáp ứng ngắn, độ trễ giữa lệnh và phản hồi nhỏ, chứng minh bộ điều khiển được thiết kế chính xác và ổn định. Việc mô phỏng nhiều pha vận hành (chạy – nghỉ – tăng tốc – giữ tốc độ) giúp phản ánh hành vi thực tế của xe điện trong giao thông đô thị hoặc chu trình hỗn hợp.

4.2. Về tiêu thụ năng lượng – SOC

Trạng thái sạc pin (SOC) giảm đều theo thời gian khi xe hoạt động. Điều này hoàn toàn phù hợp với đặc tính của dòng xả trong mô

hình Coulomb, phản ánh chính xác mức tiêu hao năng lượng.

4.3. Về sinh nhiệt và nhiệt độ pin

Biểu đồ nhiệt độ pin (Hình 8) cho thấy nhiệt độ tăng từ 25°C lên đến 57°C trong quá trình mô phỏng. Đây là sự gia tăng hợp lý trong điều kiện không có hệ thống làm mát chủ động (giả định mô hình không sử dụng bộ làm mát). Kết quả mô phỏng khẳng định mối tương quan giữa mức tải (tốc độ / chân ga) và mức tiêu hao năng lượng (SOC) cũng như nhiệt độ pin. Từ đó, ta có thể khẳng định: hiệu quả hoạt động của xe điện phụ thuộc chặt chẽ vào cách người dùng vận hành xe, nhất là trong các chu trình có nhiều pha tăng tốc liên tục hoặc lái xe ở tốc độ cao.

4.4. Về tính phù hợp của mô hình mô phỏng

Mô hình đã thể hiện được đầy đủ các yếu tố vật lý cơ bản của hệ thống truyền động điện: Tính toán dòng điện theo tải động cơ; Cập nhật nhiệt độ pin theo dòng xả; Theo dõi SOC bằng tích phân dòng Coulomb

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, mô hình mô phỏng tổng quát của hệ thống truyền động và nguồn điện trên xe điện đã được xây dựng thành công trên nền tảng phần mềm MATLAB/Simulink. Mô hình tích hợp đầy đủ các thành phần từ khối điều khiển vận tốc, động cơ điện, hộp số, bánh xe cho đến khối pin Li-ion có tính đến dòng xả, điện áp, dung lượng (SOC) và sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian. Các kết quả mô phỏng đã phản ánh rõ ràng và chính xác mối quan hệ giữa các đại lượng đầu ra: Vận tốc thực tế của xe bám sát tín hiệu điều khiển đầu vào, thể hiện hiệu quả điều khiển của hệ thống;

Dung lượng pin (SOC) giảm dần theo thời gian, phụ thuộc trực tiếp vào tải và thời gian hoạt động. Các pha tăng tốc hoặc chạy liên tục làm SOC giảm nhanh hơn; Nhiệt độ pin tăng lên theo thời gian, đặc biệt rõ rệt trong các pha có dòng xả cao. Kết quả cho thấy nếu không có hệ thống làm mát chủ động, pin dễ dàng đạt tới giới hạn nhiệt độ cho phép.

Từ phân tích biểu đồ và thông số kỹ thuật trích từ các tài liệu chuyên ngành, có thể khẳng định mô hình mô phỏng phản ánh đúng đặc tính vật lý của hệ thống pin và truyền động trên xe điện. Đồng thời, các phương pháp tính SOC và sinh nhiệt được áp dụng (tích phân Coulomb, công suất nội trở) cũng phù hợp với lý thuyết và thực tiễn chế tạo hệ thống BMS hiện nay. Nghiên cứu đã cung cấp một cơ sở mô phỏng đáng tin cậy, có thể mở rộng để tích hợp các chu trình tải tiêu chuẩn (NEDC, WLTP), các chiến lược điều khiển BMS tiên tiến, hoặc mô hình làm mát pin chi tiết hơn. Trong tương lai, việc kết hợp mô hình này với dữ liệu thực nghiệm từ cảm biến thực tế trên xe sẽ giúp cải thiện độ chính xác, từ đó hỗ trợ thiết kế hệ thống pin tối ưu hơn cho các dòng xe điện thương mại hoặc nghiên cứu học thuật.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Scherz, P., & Monk, S. (2016). *Li-ion Batteries*. In *Practical Electronics for Inventors*, 4th ed., Chapter 3, 281–282. McGraw-Hill Education.
- MathWorks. (n.d.). *Battery Management System (BMS) overview*. Retrieved May 15, 2025, from <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/battery-management-system-bms-overview.html>
- Sarmadiana, R. R., Sasongko, N. A., Nugraha, H. W., Septiadi, W., & Kurniawan, A. T. (2022). A coupled thermal–electrical model of 21700 cylindrical lithium-ion battery under various discharge rates and its validation. *Energies*, 15(24).
- Hu, J., Li, Y., Wei, J., & Xu, J. (2011). *Research on the electric vehicle control system*. Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)
- P. Masarati, L. Garavaglia, & G. Sala (2022). Electric Vehicle Technologies A Review. *World Electric Vehicle Journal*, 13(12).
- Prakash, K.; Ali, M.; Siddique, M.N.I.; Karmaker, A.K.; Macana, C.A.A.; Dong, D.; Pota, H.R (2022). *Bi-level planning and scheduling of electric vehicle charging stations for peak shaving and congestion management in low voltage distribution networks*. *Comput. Electr. Eng.* 2022, 102.
- Pearre, N.S.; Swan, L.G.; Burbidge, E.; Balloch, S.; Horrocks, L.; Piper, B.; Anctil, J. (2022). Regional Electric Vehicle Fast Charging Network Design Using Common Public Data. *World Electr. Veh.* 13, 212.
- Mo, T.; Li, Y.; Lau, K.T.; Poon, C.K.; Wu, Y.; Luo, Y. (2022). Trends and Emerging Technologies for the Development of Electric Vehicles. *Energies*, 15.
- Dinkhah, S.; Negri, C. A.; He, M.; Bayne, S. B. (2019). *V2G for Reliable Microgrid Operations: Voltage/Frequency Regulation with Virtual Inertia Emulation*. In Proceedings of the 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Novi, MI, USA, 1–6.
- Chen, J.; Huang, S.; Shahabi, L. (2021). Economic and environmental operation of power systems including combined cooling, heating, power and energy storage resources using developed multi-objective grey wolf algorithm. *Appl. Energy*, 298.