

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ MẠCH CÂN BẰNG THỤ ĐỘNG TRONG BỘ PIN Ô TÔ ĐIỆN BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ

PERFORMANCE EVALUATION OF PASSIVE CELL BALANCING CIRCUITS FOR ELECTRIC VEHICLE BATTERY PACKS USING NUMERICAL SIMULATION

Nguyễn Văn Hạnh*, Trần Trọng Thế, Trần Huy Hoàng

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: nvhanh@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Trong xu hướng phát triển ô tô điện và chuyển dịch sang năng lượng sạch, bộ pin lithium-ion đóng vai trò then chốt quyết định đến hiệu suất, độ bền và mức độ an toàn của phương tiện. Tuy nhiên, sự sai lệch điện áp giữa các cell trong cùng một bộ pin là hiện tượng phổ biến trong quá trình vận hành, làm giảm dung lượng khai thác, đẩy nhanh quá trình suy giảm chất lượng pin và tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn.

Bài báo tập trung phân tích cơ sở lý thuyết của pin lithium-ion, chức năng của hệ thống quản lý pin (BMS) và nguyên lý hoạt động của mạch cân bằng thụ động. Trên cơ sở đó, mô hình mạch cân bằng thụ động được xây dựng và mô phỏng trên nền tảng Matlab/Simulink nhằm đánh giá khả năng duy trì sự đồng đều điện áp giữa các cell trong quá trình sạc – xả. Kết quả mô phỏng cho thấy mạch cân bằng thụ động có thể đưa điện áp các cell về mức tương đối cân bằng, góp phần cải thiện độ ổn định của bộ pin, mặc dù vẫn tồn tại tổn hao năng lượng dưới dạng nhiệt.

Nghiên cứu cung cấp cơ sở kỹ thuật cho việc thiết kế và ứng dụng mạch cân bằng thụ động trong hệ thống BMS, đặc biệt phù hợp với các hệ thống yêu cầu cấu trúc đơn giản, chi phí thấp và dễ triển khai trong thực tế.

Từ khóa: Pin lithium-ion; BMS; Cân bằng cell; Mô phỏng; Ô tô điện.

ABSTRACT

In the development trend of electric vehicles and the transition toward sustainable energy, lithium-ion battery packs play a crucial role in determining vehicle performance, durability, and operational safety. However, voltage imbalance among cells within a battery pack is a common phenomenon during operation, leading to reduced usable capacity, accelerated degradation, and potential safety risks.

This study focuses on the theoretical background of lithium-ion batteries, the functions of the Battery Management System (BMS), and the operating principle of passive cell balancing circuits. Based on this foundation, a passive balancing circuit model is developed and simulated using the Matlab/Simulink platform to evaluate its capability to maintain voltage uniformity among cells during charging and discharging processes. Simulation results indicate that the passive balancing

circuit can effectively reduce voltage deviation between cells and improve pack stability, although energy losses in the form of heat dissipation remain unavoidable.

The research provides a technical basis for the design and application of passive balancing circuits in BMS, particularly for systems requiring simple structure, low cost, and ease of implementation in practical electric vehicle applications.

Keywords: *Lithium-ion battery; Battery Management System; Cell balancing; Simulation; Electric vehicle.*

1. GIỚI THIỆU

Sự phát triển nhanh của ô tô điện làm gia tăng yêu cầu về hiệu suất và độ tin cậy của bộ pin lithium-ion – nguồn năng lượng trung tâm của hệ thống truyền động điện [1], [2]. Trong quá trình vận hành, do sai lệch đặc tính giữa các cell và điều kiện làm việc không đồng đều, hiện tượng mất cân bằng điện áp thường xuất hiện trong bộ pin [3]. Sự chênh lệch này làm giảm dung lượng khả dụng, thúc đẩy quá trình lão hóa và có thể dẫn đến quá sạc hoặc quá xả ở một số cell riêng lẻ [4].

Để kiểm soát tình trạng trên, hệ thống quản lý pin (BMS) được tích hợp nhằm giám sát và bảo vệ bộ pin, trong đó chức năng cân bằng cell giữ vai trò quan trọng [5]. Cân bằng thụ động là phương pháp được ứng dụng phổ biến nhờ cấu trúc đơn giản và chi phí triển khai thấp. Nguyên lý của phương pháp này dựa trên việc sử dụng điện trở xả để tiêu tán phần năng lượng dư thừa của các cell có điện áp cao, qua đó giảm độ lệch điện áp trong toàn bộ pack pin [6], [7]. Mặc dù tồn tại tổn hao năng lượng dưới dạng nhiệt, giải pháp này vẫn phù hợp với các hệ thống yêu cầu tính đơn giản và độ tin cậy cao [8].

Trên cơ sở đó, nghiên cứu tập trung phân tích nguyên lý và xây dựng mô hình mô phỏng mạch cân bằng thụ động nhằm đánh giá khả năng duy trì sự đồng đều điện áp giữa các cell trong bộ pin ô tô điện.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

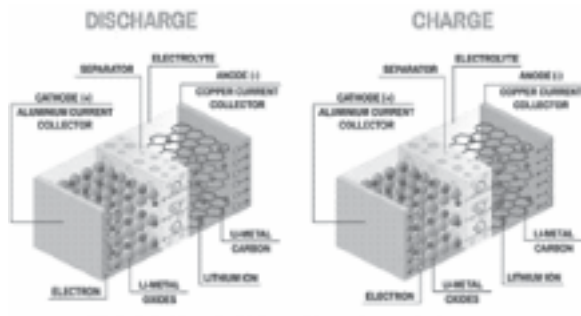
2.1. Pin lithium-ion trong ô tô điện

Pin lithium-ion hiện là giải pháp lưu trữ năng lượng được sử dụng phổ biến trong ô tô điện nhờ ưu thế về mật độ năng lượng và độ bền chu kỳ cao [1]. Mỗi cell pin bao gồm điện cực dương, điện cực âm, chất điện phân và màng ngăn (Hình 1). Trong quá trình làm việc, các ion Li^+ dịch chuyển qua lại giữa hai điện cực trong chu kỳ sạc và xả, tạo nên dòng điện cung cấp cho hệ thống [2]. Điện áp vận hành của cell thường dao động trong khoảng 3,0-4,2 V; nếu vượt ngưỡng cho phép có thể gây suy giảm tuổi thọ và ảnh hưởng đến mức độ an toàn của pin [3].

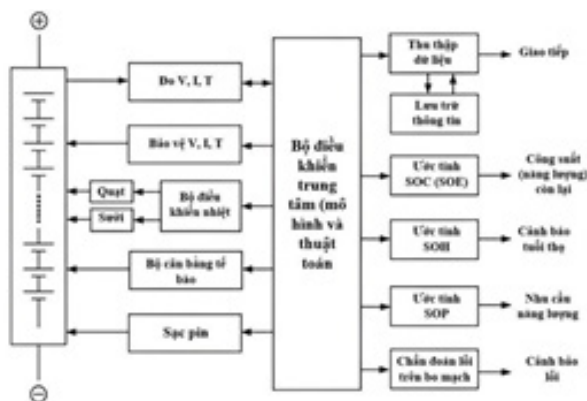
Khi nhiều cell được ghép nối tiếp thành bộ pin, sự khác biệt về dung lượng và điện trở trong sẽ làm phát sinh chênh lệch điện áp theo thời gian [4]. Vì vậy, hệ thống quản lý pin (BMS) được tích hợp để theo dõi các thông số vận hành như điện áp, dòng điện, nhiệt độ và thực hiện chức năng cân bằng cell nhằm đảm bảo hoạt động ổn định (Hình 2) [5].

Các giải pháp cân bằng hiện nay chủ yếu gồm hai dạng. Cân bằng thụ động tiêu tán phần năng lượng dư của cell có điện áp cao thông qua điện trở xả, ưu điểm là cấu trúc đơn giản nhưng tồn tại tổn hao nhiệt [6]. Trong khi đó, cân bằng chủ động sử dụng các phần tử tích

trừ hoặc bộ biến đổi công suất để chuyển năng lượng giữa các cell, giúp nâng cao hiệu suất song yêu cầu mạch điều khiển phức tạp hơn [7].



Hình 1. Cấu tạo và nguyên lý pin lithium-ion



Hình 2. Phần mềm hệ thống quản lý pin BMS

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu được thực hiện bằng phương pháp phân tích lý thuyết kết hợp mô phỏng số trên nền tảng Matlab/Simulink [9, 10]. Quy trình gồm:

- Xây dựng mô hình mạch tương đương của cell pin;
- Thiết kế mạch cân bằng thụ động;
- Thiết lập kịch bản sạc – xả;
- Xuất kết quả và đánh giá.

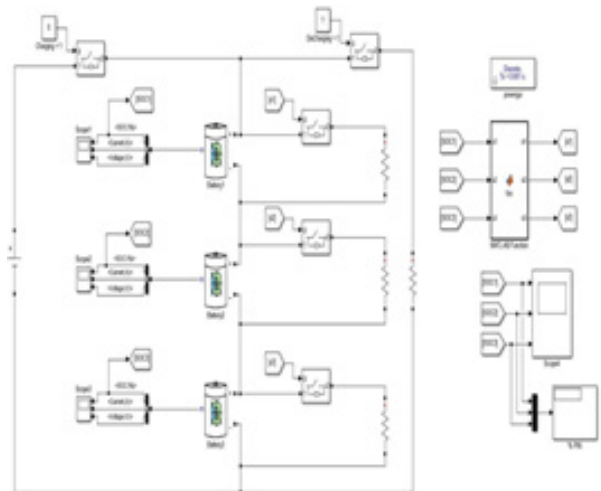
4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Kết quả mô phỏng hệ thống cân bằng

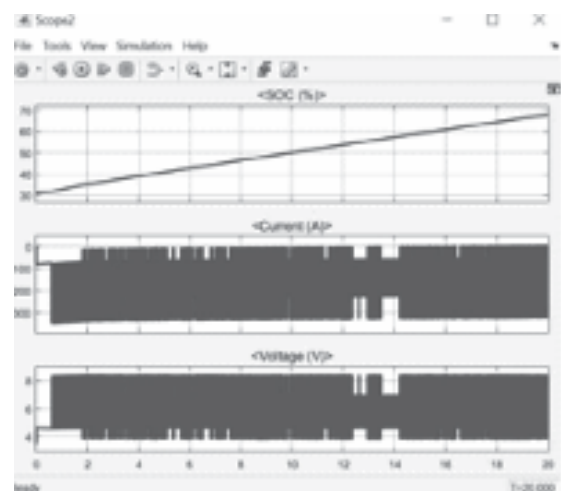
cell pin được thực hiện trong hai chế độ: quá trình sạc và quá trình xả. Các tiêu chí đánh giá bao gồm độ lệch điện áp giữa các cell, thời gian đạt trạng thái cân bằng và mức tổn hao năng lượng của hệ thống.

4.1. Kết quả về SOC(%), Ampe(A), Vol(V)

Đối với phương pháp cân bằng thụ động, năng lượng được chuyển trực tiếp từ cell có điện áp cao sang cell có điện áp thấp thông qua mạch chuyển đổi.

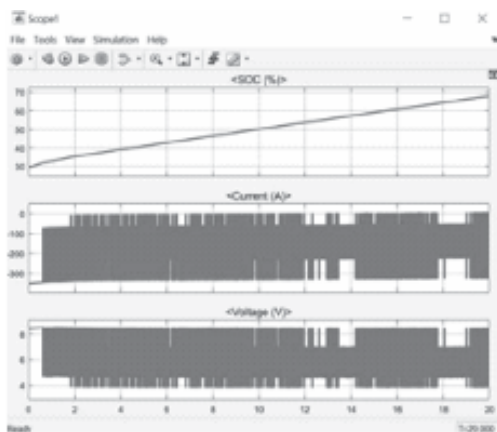


Hình 3. Sơ đồ mạch cân bằng thụ động

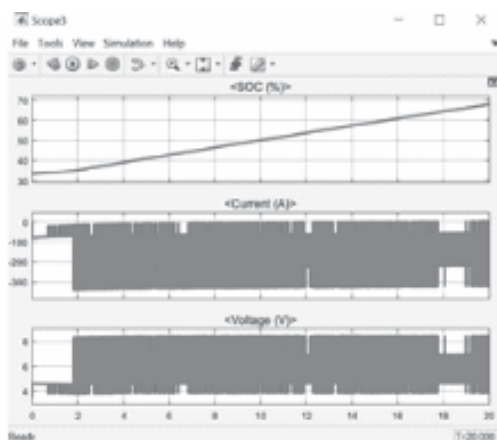


Hình 4. Kết quả đồ thị SOC(%), Ampe(A), Vol(V) của cell 1 pin quá trình sạc

Bên cạnh sự thay đổi về điện áp và dòng điện, diễn biến của SOC trong quá trình sạc cũng phản ánh rõ hạn chế của phương pháp cân bằng thụ động. Khi các cell được nạp năng lượng, những cell có dung lượng thấp hơn sẽ tăng SOC nhanh hơn, trong khi các cell đã gần đầy sẽ bị mạch cân bằng xả bớt năng lượng thông qua điện trở (Hình 4, 5, 6).



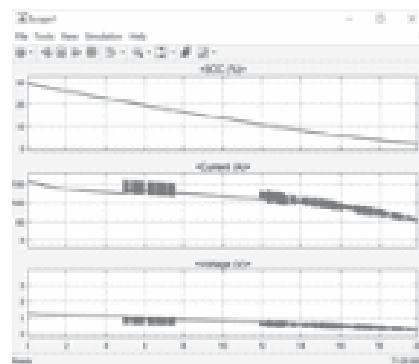
Hình 5. Kết quả đồ thị SOC(%), Ampe(A), Vol(V) của cell 3 pin quá trình sạc



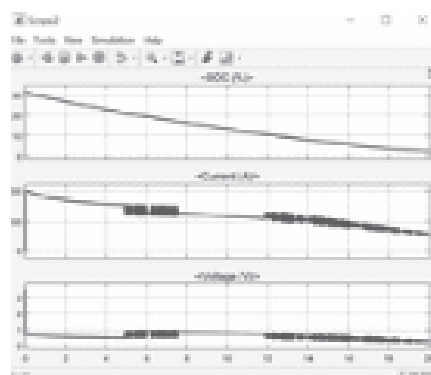
Hình 6. Kết quả đồ thị SOC(%), Ampe(A), Vol(V) của cell 3 pin quá trình sạc

Sự thay đổi đồng thời của trạng thái dung lượng (SOC), dòng điện và điện áp của từng cell trong quá trình xả khi sử dụng mạch cân bằng thụ động cho thấy rõ những hạn chế của phương pháp này. Kết quả mô phỏng cho

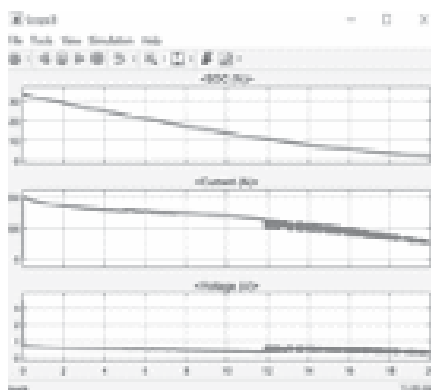
thấy điện áp của các cell yếu suy giảm nhanh hơn đáng kể so với các cell còn lại, trong khi dòng xả qua các cell vẫn gần như giống nhau do chúng được mắc nối tiếp trong bộ pin (Hình 7, 8, 9).



Hình 7. Kết quả đồ thị SOC(%), Ampe(A), Vol(V) của cell pin 1 quá trình xả



Hình 8. Kết quả đồ thị SOC(%), Ampe(A), Vol(V) của cell pin 2 quá trình xả



Hình 9. Kết quả đồ thị SOC(%), Ampe(A), Vol(V) của cell pin 3 quá trình xả

4.2. So sánh và đánh giá với mạch cân bằng chủ động

So sánh tổng thể với cân bằng chủ động cho thấy mạch cân bằng thụ động có hiệu suất thấp hơn và khả năng duy trì trạng thái đồng đều giữa các cell kém hơn, đặc biệt trong điều kiện bộ pin có độ lệch điện áp ban đầu lớn. Tuy nhiên, mạch cân bằng thụ động tuy đơn giản và dễ triển khai nhưng hiệu quả năng lượng thấp hơn và thời gian cân bằng dài hơn.

Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng lựa chọn phương pháp cân bằng phụ thuộc vào yêu cầu thiết kế hệ thống: đối với các ứng dụng yêu cầu hiệu suất cao và dung lượng lớn như ô tô điện, cân bằng chủ động là giải pháp phù hợp hơn; còn đối với các hệ thống nhỏ hoặc yêu cầu chi phí thấp, cân bằng thụ động vẫn là phương án khả thi.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã phân tích cơ sở lý thuyết về pin lithium-ion và hệ thống quản lý pin (BMS), đồng thời xây dựng mô hình mô phỏng phương pháp cân bằng cell thụ động. Cân bằng thụ động có ưu điểm về cấu trúc đơn giản và chi phí thấp nhưng hiệu quả năng lượng chưa cao. Kết quả nghiên cứu là cơ sở cho việc lựa chọn và tối ưu hóa giải pháp cân bằng phù hợp trong thiết kế hệ thống BMS cho ô tô điện, góp phần nâng cao hiệu suất khai thác và độ an toàn của bộ pin. ❖

Ngày nhận bài: 06/3/2026
Ngày phản biện: 18/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. IEA, “*Global EV Outlook 2024*”. International Energy Agency, Paris, 2024.
- [2]. J. M. Tarascon, M. Armand, “*Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries*”. Nature, Vol. 414, No. 6861, pp. 359-367, 2001.
- [3]. Gregory L. Plett, “*Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*”. Artech House, 2015.
- [4]. D. Linden, T. B. Reddy, “*Handbook of Batteries*”, 3rd Edition. McGraw-Hill, 2002.
- [5]. H. He, R. Xiong, J. Fan, “*Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation*”. Applied Energy, Vol. 87, No. 11, pp. 347-352, 2010.
- [6]. M. Daowd, N. Omar, P. Van Den Bossche, J. Van Mierlo, “*Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation*”. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pp. 1-7, 2011.
- [7]. S. Li, C. Mi, “*Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles*”. Wiley-IEEE Press, 2018.
- [8]. Y. Shang, N. Cui, C. Zhang, “*A review of passive and active battery balancing techniques*”. Energies, Vol. 12, No. 21, 2019.
- [9]. Nguyễn Văn Anh, “*Nghiên cứu thuật toán cân bằng điện áp cho pin Li-ion trong hệ thống lưu trữ năng lượng xe điện*”. Luận văn Thạc sĩ, Đại học Bách khoa Hà Nội, 2022.
- [10]. Nguyễn Hồng Thái, “*Ứng dụng MATLAB/Simulink trong mô phỏng hệ thống điện - điện tử ô tô*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2018.