

PHÂN TÍCH VÀ MÔ PHỎNG HỆ THỐNG CÂN BẰNG CELL PIN CHỦ ĐỘNG TRÊN Ô TÔ ĐIỆN

ANALYSIS AND SIMULATION OF ACTIVE BATTERY CELL BALANCE SYSTEMS IN ELECTRIC VEHICLES

Đinh Văn Phương*, Nguyễn Thanh Bình

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: dvphuong@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Trong xu hướng phát triển phương tiện điện và chuyển dịch sang năng lượng sạch, hệ thống pin lithium-ion giữ vai trò quyết định đến hiệu suất, độ bền và mức độ an toàn của ô tô điện. Tuy nhiên, sự mất cân bằng điện áp giữa các cell trong bộ pin làm suy giảm dung lượng khai thác, rút ngắn tuổi thọ và tiềm ẩn rủi ro vận hành.

Bài báo trình bày cơ sở lý thuyết về pin lithium-ion và hệ thống quản lý pin (BMS), đồng thời tập trung nghiên cứu phương pháp cân bằng cell pin chủ động nhằm duy trì sự đồng đều điện áp giữa các cell trong bộ pin. Trên cơ sở đó, mô hình mạch cân bằng chủ động được xây dựng và mô phỏng trên nền tảng Matlab/Simulink để phân tích quá trình phân phối năng lượng giữa các cell trong các chế độ sạc và xả.

Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp cân bằng chủ động có khả năng tái phân phối năng lượng giữa các cell hiệu quả, giúp giảm độ lệch điện áp, cải thiện trạng thái dung lượng và nâng cao hiệu suất khai thác của bộ pin. Nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở kỹ thuật cho việc thiết kế và tối ưu hóa hệ thống quản lý pin trong ô tô điện, từ đó nâng cao hiệu quả quản lý năng lượng, tuổi thọ và độ an toàn của hệ thống pin.

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

ABSTRACT

In the trend of developing electric vehicles and transitioning to clean energy, lithium-ion battery systems play a crucial role in the performance, durability, and safety of electric cars. However, voltage imbalance between cells in a battery pack reduces usable capacity, shortens lifespan, and poses operational risks.

This paper presents the theoretical basis of lithium-ion batteries and battery management systems (BMS), and focuses on researching an active cell balancing method to maintain voltage uniformity among cells in a battery pack. Based on this, an active balancing circuit model is built and simulated on the Matlab/Simulink platform to analyze the energy distribution process between

cells in charging and discharging modes.

Simulation results show that the active balancing method can effectively redistribute energy between cells, reducing voltage deviation, improving capacity state, and enhancing the operating efficiency of the battery pack. This research contributes to providing a technical basis for the design and optimization of battery management systems in electric vehicles, thereby improving energy management efficiency, lifespan, and safety of the battery system.

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

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, xu hướng điện hóa phương tiện giao thông đang phát triển mạnh mẽ trên toàn cầu nhằm giảm phát thải khí nhà kính và hướng tới mục tiêu trung hòa carbon. Ô tô điện (Electric Vehicle – EV) được xem là giải pháp quan trọng thay thế động cơ đốt trong truyền thống nhờ khả năng vận hành không phát thải tại chỗ và hiệu suất năng lượng cao [1]. Trong cấu trúc của xe điện, bộ pin lithium-ion đóng vai trò là nguồn cung cấp năng lượng chính, quyết định trực tiếp đến quãng đường di chuyển, hiệu suất vận hành và độ an toàn của phương tiện [2].

Tuy nhiên, trong quá trình hoạt động, các cell pin trong cùng một bộ pin thường xuất hiện sự sai lệch về điện áp, dung lượng và điện trở trong do sai số chế tạo, điều kiện nhiệt độ và chu kỳ sạc – xả không đồng đều [3]. Sự mất cân bằng này làm giảm dung lượng khai thác của toàn bộ pack pin, đẩy nhanh quá trình lão hóa và có thể gây ra hiện tượng quá sạc (over-charging) hoặc quá xả (over-discharging), tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn [4].

Để khắc phục vấn đề trên, hệ thống quản lý pin (Battery Management System – BMS) được phát triển nhằm giám sát, điều khiển và bảo vệ bộ pin trong suốt quá trình vận hành [5]. Một trong những chức năng quan trọng nhất

của BMS là cân bằng cell (cell balancing), giúp duy trì sự đồng đều điện áp giữa các cell, tối ưu hóa hiệu suất và kéo dài tuổi thọ pin [6]. Hiện nay, hai phương pháp cân bằng chính được áp dụng là cân bằng thụ động và cân bằng chủ động. Cân bằng thụ động có cấu trúc đơn giản và chi phí thấp nhưng gây tổn hao năng lượng dưới dạng nhiệt [7]. Ngược lại, cân bằng chủ động cho phép chuyển năng lượng giữa các cell, nâng cao hiệu suất tổng thể nhưng yêu cầu mạch điều khiển phức tạp hơn [8].

Mặc dù nhiều nghiên cứu quốc tế đã phân tích nguyên lý và hiệu quả của các phương pháp cân bằng pin, việc xây dựng mô hình mô phỏng và so sánh định lượng giữa hai phương pháp trong điều kiện cụ thể vẫn có ý nghĩa thực tiễn cao, đặc biệt trong đào tạo và nghiên cứu ứng dụng tại Việt Nam. Do đó, bài báo tập trung phân tích cơ sở lý thuyết, xây dựng mô hình và mô phỏng hệ thống cân bằng cell pin chủ động nhằm đánh giá hiệu quả của từng phương pháp, làm cơ sở cho thiết kế và tối ưu hóa BMS trong ô tô điện.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

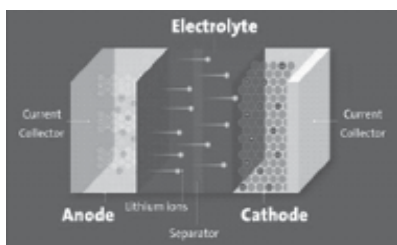
2.1. Pin lithium-ion trong ô tô điện

Pin lithium-ion là nguồn năng lượng chủ đạo trong ô tô điện nhờ mật độ năng lượng cao và tuổi thọ chu kỳ lớn [1]. Một cell pin gồm

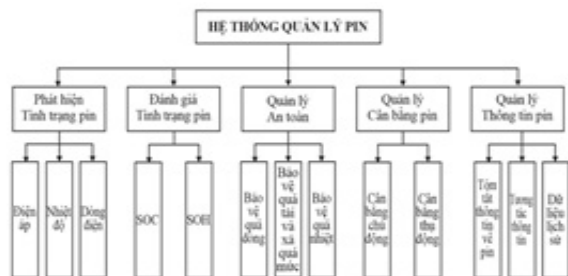
cathode, anode, chất điện phân và màng ngăn (Hình 1). Trong quá trình sạc – xả, ion Li^+ di chuyển giữa hai điện cực tạo ra dòng điện cung cấp cho tải [2]. Điện áp làm việc của mỗi cell thường trong khoảng 3,0-4,2 V; vượt quá giới hạn này có thể gây quá sạc hoặc quá xả, ảnh hưởng đến độ bền và an toàn của pin [3].

Trong bộ pin gồm nhiều cell mắc nối tiếp, sự sai lệch đặc tính giữa các cell dẫn đến mất cân bằng điện áp theo thời gian [4]. Để đảm bảo vận hành an toàn, hệ thống quản lý pin (BMS) được sử dụng nhằm giám sát điện áp, dòng điện, nhiệt độ và thực hiện cân bằng cell [5] (Hình 2).

Hiện nay, có hai phương pháp cân bằng chính. Cân bằng thụ động sử dụng điện trở để xả năng lượng dư thừa của cell có điện áp cao, có ưu điểm đơn giản và chi phí thấp nhưng gây tổn hao nhiệt [6]. Cân bằng chủ động chuyển năng lượng giữa các cell bằng các phần tử tích trữ (tụ, cuộn cảm hoặc bộ DC-DC), giúp nâng cao hiệu suất nhưng cấu trúc phức tạp hơn [7].



Hình 1. Cấu tạo pin lithium-ion



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc chức năng của hệ thống quản lý pin

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

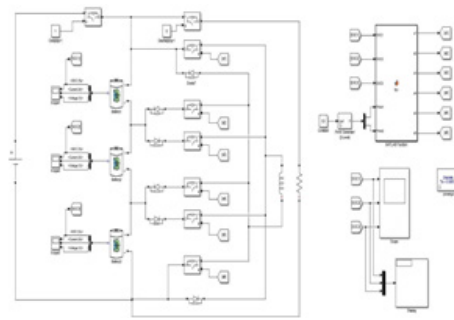
Nghiên cứu được thực hiện bằng phương pháp phân tích lý thuyết kết hợp mô phỏng số trên nền tảng Matlab/Simulink [9, 10]. Quy trình gồm:

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

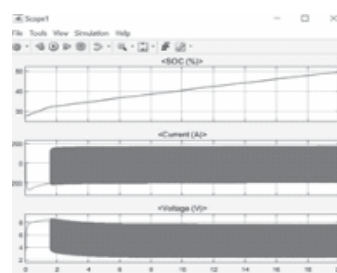
4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

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 đối với mạch cân bằng chủ động



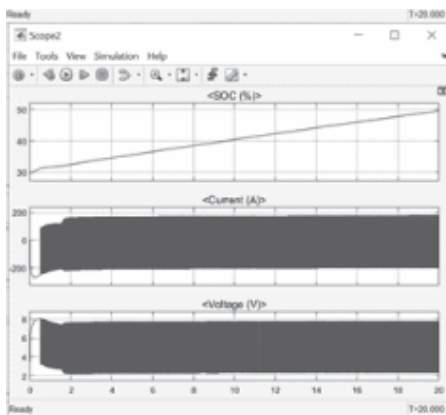
Hình 3. Sơ đồ mạch cân bằng chủ động



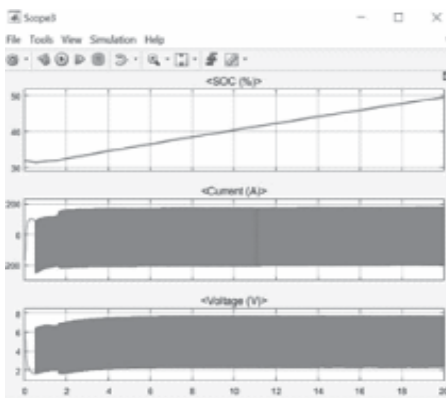
Hình 4. Kết quả đồ thị SOC(%), Ampe(A), Vol(V) của cell pin 1 quá trình sạc

Trong quá trình sạc, khi điện áp một số cell vượt ngưỡng cài đặt, điện trở xả được kích hoạt để tiêu tán phần năng lượng dư thừa. Kết quả cho thấy điện áp giữa các cell được đưa về mức tương đối đồng đều sau một khoảng thời gian nhất định. Tuy nhiên, quá trình cân bằng diễn ra chậm và xuất hiện tổn hao năng lượng dưới dạng nhiệt, làm giảm hiệu suất tổng thể của bộ pin.

Đồ thị biểu diễn sự biến thiên đồng thời của SOC, dòng điện và điện áp trên từng cell trong quá trình sạc khi áp dụng mạch cân bằng chủ động cho thấy rất rõ cách hệ thống điều khiển dòng năng lượng giữa các cell (Hình 4, 5, 6).



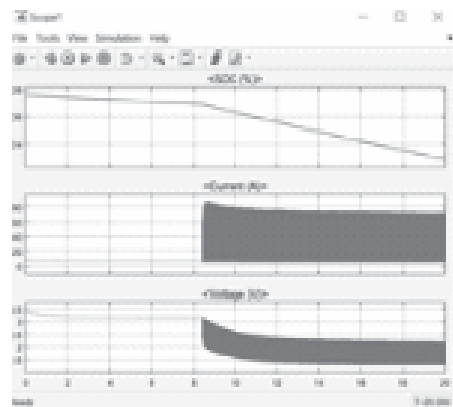
Hình 5. Kết quả đồ thị SOC(%), Ampe(A), Vol(V) của cell pin 2 quá trình sạc



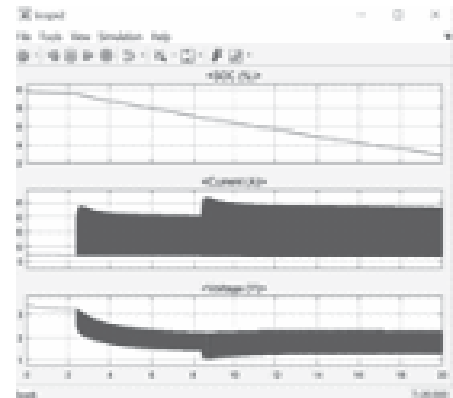
Hình 6. Kết quả đồ thị SOC(%), Ampe(A), Vol(V) của cell pin 3 quá trình sạc

Trong chế độ xả, sự chênh lệch điện áp giữa các cell vẫn tồn tại trong thời gian dài trước khi đạt trạng thái cân bằng, đặc biệt khi độ lệch ban đầu lớn.

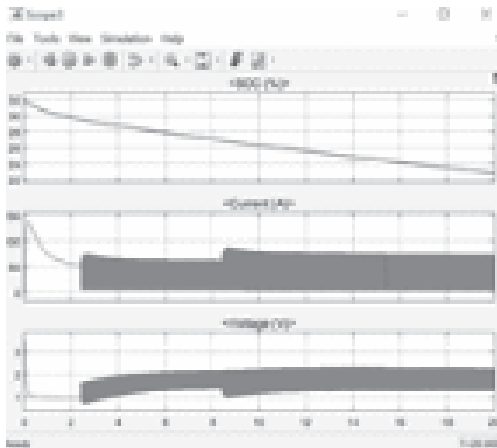
Đồ thị thể hiện sự biến thiên đồng thời của SOC, dòng điện và điện áp của từng cell trong quá trình xả khi áp dụng mạch cân bằng chủ động cho thấy rất rõ cách hệ thống can thiệp vào quá trình phân phối năng lượng giữa các cell. Có thể quan sát rằng dòng xả không còn phân bố một cách tự nhiên theo đặc tính riêng của từng cell, mà được điều khiển để các cell có SOC cao hơn đảm nhận phần lớn dòng tải, trong khi các cell có SOC thấp được giảm tải (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. Nhận xét kết quả

Kết quả mô phỏng cho thấy mạch cân bằng cell pin chủ động có khả năng điều chỉnh và phân phối năng lượng giữa các cell trong bộ pin một cách hiệu quả. Trong quá trình sạc, khi điện áp của một số cell tăng nhanh hơn các cell còn lại, hệ thống cân bằng chủ động sẽ chuyển một phần năng lượng từ các cell có điện áp cao sang các cell có điện áp thấp hơn. Nhờ đó, độ chênh lệch điện áp giữa các cell được giảm dần theo thời gian, giúp các cell đạt trạng thái cân bằng ổn định.

Các đồ thị mô phỏng biểu diễn sự biến thiên đồng thời của trạng thái dung lượng (SOC), dòng điện và điện áp của từng cell cho thấy quá trình phân phối năng lượng được điều khiển chủ động bởi hệ thống quản lý pin (BMS). Trong giai đoạn sạc, các cell có SOC thấp nhận được năng lượng bổ sung từ các cell có SOC cao hơn, làm cho sự chênh lệch SOC giữa các cell giảm đáng kể. Điều này giúp quá trình sạc diễn ra đồng đều hơn và hạn chế hiện tượng quá sạc ở một số cell.

Trong chế độ xả, mạch cân bằng chủ động tiếp tục đóng vai trò điều phối năng lượng

giữa các cell. Các cell có trạng thái dung lượng cao hơn sẽ cung cấp nhiều năng lượng hơn cho tải, trong khi các cell có dung lượng thấp hơn được giảm tải. Cơ chế này giúp duy trì sự ổn định điện áp của toàn bộ bộ pin và hạn chế sự suy giảm nhanh của các cell yếu.

Tổng thể kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp cân bằng chủ động giúp cải thiện đáng kể sự đồng đều về điện áp và trạng thái dung lượng giữa các cell trong bộ pin. Điều này không chỉ nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng của hệ thống pin mà còn góp phần kéo dài tuổi thọ và tăng độ an toàn trong quá trình vận hành của ô tô điện.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và mô phỏng mạch cân bằng cell pin chủ động cho bộ pin lithium-ion trên ô tô điện bằng Matlab/Simulink. Kết quả cho thấy hệ thống có khả năng điều phối và tái phân phối năng lượng giữa các cell, giúp giảm độ chênh lệch điện áp và duy trì trạng thái dung lượng (SOC) tương đối đồng đều.

Nhờ đó, quá trình sạc – xả của bộ pin diễn ra ổn định hơn, góp phần nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng và độ tin cậy của hệ thống pin. Kết quả nghiên cứu là cơ sở cho việc phát triển và tối ưu hóa hệ thống quản lý pin (BMS) trong các ứng dụng ô tô điện và hệ thống lưu trữ năng lượng. ❖

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, 2024.
- [2]. J. M. Tarascon, M. Armand, “*Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries*”. *Nature*, Vol. 414, 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, pp. 347-352, 2010.
- [6]. M. Daowd et al., “*Passive and Active Battery Balancing Comparison Based on MATLAB Simulation*”. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 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 Comparative Study of Active Balancing Topologies for Lithium-Ion Batteries*”. *Energies*, Vol. 12, 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.