

Thiết kế mạch cân bằng năng lượng cho các cell pin nối tiếp dựa trên mạch chuyển đổi Cuk hai chiều

Nguyễn Vĩnh Thụy*, Nguyễn Văn Chí

Khoa Điện tử, Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - Đại học Thái Nguyên, 666 đường 3/2, Thành phố Thái Nguyên, Thái Nguyên, Việt Nam.

*Tác giả liên hệ: nguyenvinhthuy-tdh@tnut.edu.vn

Nhận bài: 04/9/2024; Hoàn thiện: 04/11/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.58-64>

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất thiết kế mạch cân bằng năng lượng cho hai cell pin Lithium-ion liền kề trong gói pin dựa trên nguyên lý bộ chuyển đổi Cuk hai chiều có sửa đổi. Thiết kế này chỉ sử dụng một MOSFET để truyền năng lượng giữa hai cell liền kề với một chuyển mạch điều khiển hướng truyền năng lượng, chuyển mạch thứ 2 điều khiển cắt mạch cân bằng ra khỏi các cell khi trạng thái tích điện (SoC) của 2 cell đã được cân bằng. Thiết kế này khắc phục một số nhược điểm khi áp dụng nguyên lý bộ chuyển đổi Cuk hai chiều để thiết kế mạch cân bằng, đó là cần có nguồn một chiều (DC) nhiều mức để mở MOSFET và vấn đề mất năng lượng trên các phần tử của mạch cân bằng. Mạch cân bằng thiết kế cũng dễ dàng mở rộng cho gói pin có số lượng cell lớn. Các kết quả thử nghiệm điều khiển cân bằng cell dựa trên điều khiển phân hồi trạng thái SoC cho 07 cell pin SAMSUNG 22P nối tiếp để chứng minh hiệu quả của thiết kế mạch cân bằng cho hai cell liền kề được đề xuất trong bài báo.

Từ khóa: Pin Lithium-Ion; Mạch cân bằng; Bộ chuyển đổi Cuk; Trạng thái tích điện; Điều khiển cân bằng tối ưu.

1. MỞ ĐẦU

Đề cung cấp năng lượng cho xe điện (EV), gói pin với nhiều cell được kết nối tiếp và song song để có điện áp cao và dung lượng lớn. Các cell pin Lithium-on được sử dụng phổ biến cho EV vì những ưu điểm như tốc độ tự xả chậm, mật độ năng lượng cao, không có hiệu ứng nhớ và trọng lượng nhẹ hơn so với các loại pin sạc khác. Để giữ cho gói pin hoạt động an toàn, tránh trạng thái sạc/xả quá mức gây hại cho pin thậm chí có thể phát nổ, ..., hệ thống quản lý pin (BMS) được trang bị trên gói pin [1]. Một trong những chức năng chính của BMS là kiểm soát cân bằng năng lượng của các cell, có hai chiến lược để kiểm soát cân bằng năng lượng là dựa trên phản hồi điện áp và phản hồi SoC [2]. Mức năng lượng của các cell trong gói có thể khác nhau khi làm việc vì các cell là không đồng nhất khi sản xuất, tốc độ tự xả khác nhau, nhiệt độ hoạt động và quá trình lão hóa không đồng đều [1, 4]. Để đảm bảo tất cả các cell hoạt động an toàn, tránh các trạng thái xả/sạc quá mức và phát nổ trong quá trình hoạt động, năng lượng còn lại của các cell phải luôn bằng nhau. Nếu một cell có năng lượng thấp hơn các cell khác, nó có thể bị xả quá mức, trong khi các cell khác vẫn còn năng lượng. Do đó, cell đó bị hỏng và không cung cấp được năng lượng điện cho tải. Trong khi đó, nếu một cell có năng lượng cao hơn các cell khác, nó có thể bị sạc quá mức. Một cell bị sạc/xả quá mức có thể bị nổ, dẫn đến hỏng các thiết bị [5]. Vì vậy, một gói pin thường được trang bị mạch cân bằng năng lượng để giữ mức năng lượng của các cell đồng đều để tránh các trạng thái như được đề cập ở trên. Trong các ứng dụng thực tế, việc duy trì mức năng lượng cân bằng là rất quan trọng để tăng tuổi thọ của pin; năng lượng còn lại của cell được thể hiện bằng SoC, chênh lệch SoC tối thiểu giữa các cell trong gói không được vượt quá 2%.

Đã có nhiều nghiên cứu về điều khiển cân bằng năng lượng cho các cell, có hai loại chính bao gồm phương pháp cân bằng cell chủ động và phương pháp cân bằng cell thụ động. Phương pháp cân bằng thụ động dần không được sử dụng trong các ứng dụng đòi hỏi công suất lớn vì chúng tiêu tán năng lượng điện trong các điện trở công suất và gây lãng phí năng lượng [6]. Các phương pháp cân bằng cell chủ động sử dụng tụ điện và cuộn cảm, cùng với chuyển mạch để truyền năng lượng

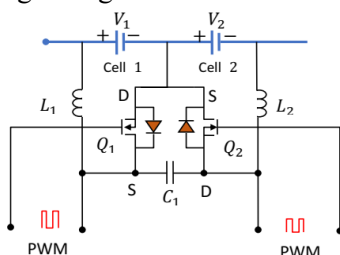
từ các cell có mức năng lượng cao hơn sang các cell có mức năng lượng thấp hơn. Vì vậy, năng lượng được lưu trữ trong các cell không bị lãng phí, mặc dù cấu trúc của mạch cân bằng và chiến lược điều khiển cân bằng rất phức tạp hơn, đặc biệt là đối với hệ thống lưu trữ điện lớn với nhiều cell được nối nối tiếp. Ngoài ra, chi phí cho bộ xử lý trong mạch cân bằng này khá cao. Các phương pháp cân bằng cell chủ động bao gồm các phương pháp như cell bypass, cell-to-cell, cell-to-pack, pack-to-cell và cell-to-pack-to-cell [7–9]. Trong tài liệu [10], tất cả các phương pháp cân bằng chủ động đã được so sánh. Qua phân tích các thông số, các tác giả đã chỉ ra rằng phương pháp cell-to-cell hiệu quả hơn và có thể được sử dụng trong các ứng dụng công suất lớn. Để thực hiện các phương pháp cell-to-cell, cần có các mạch chuyển đổi để cân bằng năng lượng của các cell trong gói pin. Trong các tài liệu [1] và [11, 16], cho thấy bộ chuyển đổi Cuk rất hiệu quả để truyền năng lượng giữa hai cell liền kề. Bộ chuyển đổi Cuk là bộ chuyển đổi DC-DC không bị cô lập [9, 12, 13], mạch yêu cầu hai cuộn cảm, một tụ điện và hai MOSFET để truyền hoặc nhận năng lượng cho các cell liền kề. Ưu điểm của bộ chuyển đổi này là kiểm soát được dòng điện theo yêu cầu. Tuy nhiên, việc thiết kế và triển khai trong thực tế có hai vấn đề bất lợi khi áp dụng nguyên lý của bộ chuyển đổi Cuk hai chiều: Thứ nhất là mạch Cuk ban đầu sử dụng hai MOSFET để điều khiển quá trình truyền năng lượng theo hai hướng. Đối với việc điều khiển cân bằng năng lượng các cell trong gói, cần $n-1$ mạch cân bằng dựa trên mạch Cuk [9]. Để mở $2(n-1)$ MOSFET trong $n-1$ mạch cân bằng năng lượng, cần có nguồn điện DC với nhiều mức điện áp khác nhau, do đó gây khó khăn trong quá trình chế tạo mạch. Thứ hai là khi mức năng lượng của các cell được cân bằng, $n-1$ mạch cân bằng năng lượng vẫn được kết nối với các cell; điều này sẽ gây ra dòng điện rò qua các tụ điện giữa hai cell, dẫn đến mất năng lượng [14].

Trong nghiên cứu này, để khắc phục hai nhược điểm trên, mạch cân bằng được thiết kế bằng cách chỉ sử dụng một MOSFET và một role để điều khiển việc truyền năng lượng giữa hai cell liền kề; một role khác được sử dụng để cắt mạch cân bằng khỏi hai cell khi hai cell có cùng mức năng lượng. Điều khiển cân bằng được thực hiện trực tiếp bởi các mạch cân bằng năng lượng cho bất kỳ hai cell liền kề nào hoặc từ xa cho tất cả các cell qua bộ vi xử lý sử dụng truyền thông RS485 [15]. Phần còn lại của bài báo này được trình bày như sau. Trong phần 2, mạch cân bằng cell dựa trên bộ chuyển đổi Cuk sửa đổi. Phần 3, kết quả thử nghiệm của điều khiển cân bằng năng lượng dựa trên phản hồi SoC. Các kết luận và kiến nghị được trình bày trong phần 4.

2. MẠCH CÂN BẰNG CELL DỰA TRÊN BỘ CHUYỂN ĐỔI CUK HAI CHIỀU

2.1. Mạch cân bằng năng lượng dựa trên bộ chuyển đổi Cuk cơ bản

Xem xét 02 MOSFET của mạch cân bằng cell như trong hình 1. Hai MOSFET không có cùng mức điện áp trên chân D và S vì chân D của MOSFET1 và chân S của MOSFET2 được nối chung. Để mở MOSFET1, điện áp của tín hiệu PWM phải lớn hơn $V_2 + 3.6\text{ V}$ (3.6 V là điện áp V_{DS} của MOSFET). Tương tự, để mở MOSFET2, điện áp của tín hiệu PWM chân G lớn hơn $V_1 + 3.6\text{ V}$. Vì vậy, để thực hiện $n-1$ mạch cân bằng cho n cell nối tiếp cần phải có nguồn cung cấp với điện áp $2(n-1)$, vì vậy, hệ thống khó thực hiện. Mặt khác, khi mức năng lượng của hai cell liền kề cân bằng hai MOSFET bị khóa, nhưng vì linh kiện là không lý tưởng nên có dòng điện rò qua L và C , điều này gây ra sự tiêu tán năng lượng không cần thiết của các cell.

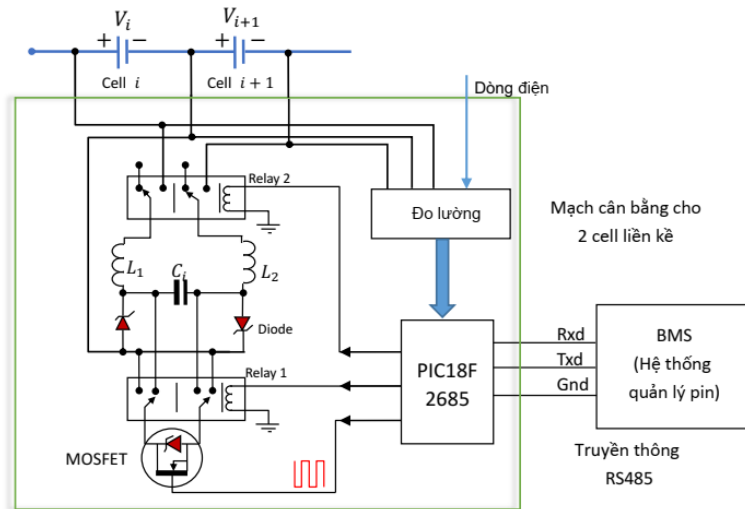


Hình 1. Mạch cân bằng 2 cell liền kề dựa trên nguyên lý của bộ chuyển đổi Cuk hai chiều.

Hai vấn đề trên là hai nhược điểm của việc áp dụng nguyên lý bộ chuyển đổi Cuk hai chiều khi thiết kế mạch cân bằng cho gói pin. Trong phần tiếp theo, mạch cân bằng cho hai cell liền kề dựa trên việc sửa đổi bộ chuyển đổi Cuk hai chiều được đề xuất để khắc phục hai nhược điểm trên.

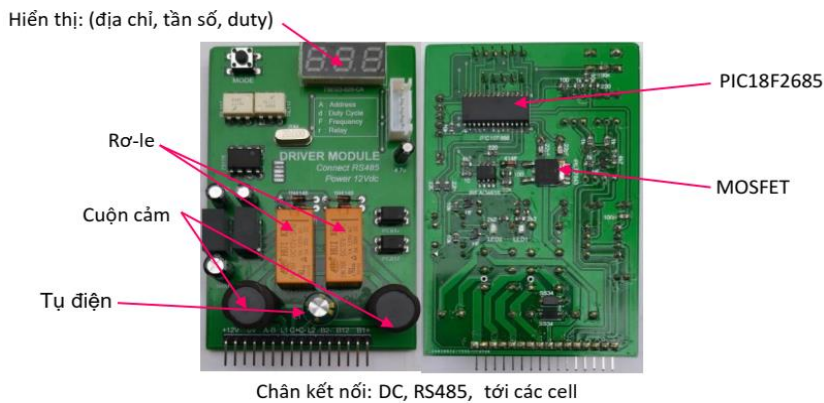
2.2. Mạch cân bằng cell cho hai cell kề nhau dựa trên bộ chuyển đổi Cuk hai chiều sửa đổi

Mạch cân bằng cho hai cell liền kề thứ i và $i+1$ dựa trên việc sửa đổi bộ chuyển đổi Cuk hai chiều được đề xuất như thể hiện trong hình 2, trong đó có phần tử chính là 02 cuộn cảm L_1, L_2 , tụ điện C , 01 MOSFET, 02 role, vi xử lý PIC 18F2685, 02 đi-ốt.



Hình 2. Mạch cân bằng cell đề xuất dựa trên bộ chuyển đổi Cuk hai chiều sửa đổi.

Giả sử mức năng lượng của hai cell được cân bằng dựa trên phản hồi SoC, SoC_i biểu thị SoC của cell thứ i , nguyên lý hoạt động của mạch cân bằng như sau: Khi SoC của hai cell thứ i và $i+1$ được cân bằng trong phạm vi $|SoC_1 - SoC_2| < \epsilon$, ϵ là ngưỡng cân bằng được thiết lập theo yêu cầu, role 2 mở, toàn bộ mạch bao gồm L_1, L_2 và tụ điện C_i được tách khỏi hai cell, không có dòng điện rò qua các cell, L và C , do đó không gây tổn thất. Khi hai cell có chênh lệch SoC nằm ngoài phạm vi cho phép $|SoC_1 - SoC_2| \geq \epsilon$, rơ-le 1 đóng, tụ C_i và 2 cuộn cảm L_1, L_2 được kết nối với các cell, mạch cân bằng cell hoạt động. Nếu $SoC_1 > SoC_2$, rơ-le 1 đóng, năng lượng của cell 1 truyền sang cell 2. Nếu $SoC_2 > SoC_1$ rơ-le 1 tắt, năng lượng của cell 2 được chuyển đến cell 1. Vi xử lý PIC18F2685 xuất tín hiệu PWM với duty mong muốn đến MOSFET và các tín hiệu điều khiển rơ le nhằm kiểm soát sự cân bằng. Hình ảnh của mạch cân bằng năng lượng cho 2 cell liền kề đã thiết kế như hình 3.

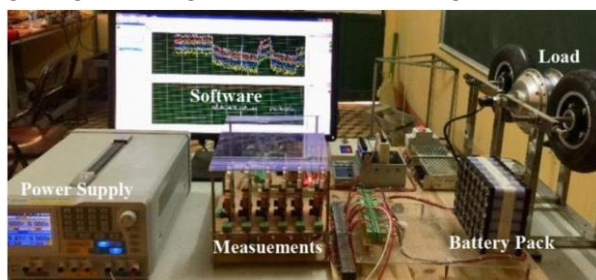


Hình 3. Mạch cân bằng cell đề xuất.

Trong chu kỳ chuyển mạch, lượng năng được truyền từ cell này sang cell khác phụ thuộc vào tần số và duty của tín hiệu PWM đưa đến điều khiển MOSFET. Biến điều khiển của chu kỳ điều khiển cân bằng có thể được lựa chọn linh hoạt theo duty hoặc tần số.

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM ĐIỀU KHIỂN CÂN BẰNG SOC

Thực nghiệm sử dụng chiến lược điều khiển cân bằng tối ưu dựa trên phản hồi SoC cho gói pin với 7 cell SAMSUNG 22P nối nối tiếp để chứng minh hiệu suất hoạt động của mạch cân bằng cell được đề xuất trong bài báo. Hệ thống thí nghiệm được thể hiện trong hình 4. Các thông số vật lý của cell được liệt kê trong bảng 1. Thông số của mạch cân bằng được thể hiện như trong bảng 2.



Hình 4. Mô hình hệ thống thí nghiệm điều khiển cân bằng cell đề xuất.

Bảng 1. Các thông số vật lý của cell SAMSUNG 22P.

Loại pin: ICR 18650-22P	Dung lượng: 2150 mAh	Điện áp danh định: 3.62 V
Sạc	4.20 V max; 1075 mA tiêu chuẩn; 2150 mA max	
Xả	2.75 V cut-off; 430mA tiêu chuẩn; 10000 mA max	

Bảng 2. Các thông số của mạch cân bằng.

<i>L</i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>f</i>	<i>SoC_{min}</i>	<i>SoC_{max}</i>	<i>I_{cmax}</i>	<i>I_{Dmax}</i>
0.1 mH	470 μF	1 s	10 kHz	5%	95%	1.5 A	2 A

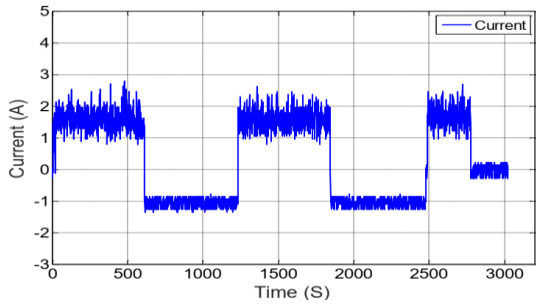
Các kịch bản sạc/xả và cân bằng cell minh họa các chế độ hoạt động được tiến hành đồng thời trong thực nghiệm này, SoC ban đầu của các cell được liệt kê trong bảng 3.

Bảng 3. Thông số SoC ban đầu của các cell

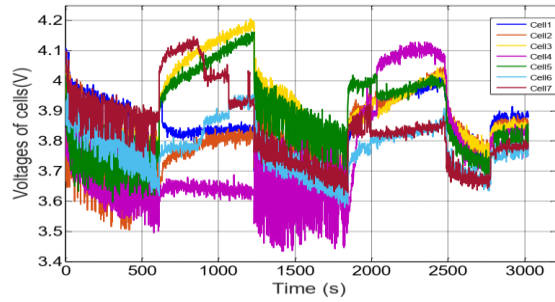
<i>Cell 1</i>	<i>Cell 2</i>	<i>Cell 3</i>	<i>Cell 4</i>	<i>Cell 5</i>	<i>Cell 6</i>	<i>Cell 7</i>
76%	86%	62%	96%	48%	91%	72%

Hình 5 mô tả sự thay đổi của dòng điện qua gói pin trong thực nghiệm. Tổng thời gian thực nghiệm là 50 phút. Trong 10 phút đầu và trong khoảng (21 ÷ 30) phút và (41 ÷ 46) phút, các cell được xả với dòng xả 1,5 A. Trong khoảng từ (10 ÷ 21) phút và (30 ÷ 41) phút, các cell được sạc bằng dòng không đổi 1 A. Từ (46 ÷ 50) phút các cell không sạc/xả. Hình 6 và hình 7 cho thấy sự thay đổi điện áp và nhiệt độ của cell trong quá trình cân bằng SoC của các cell. Kết quả của quá trình cân bằng năng lượng của các cell được thể hiện trong hình 8, sau thời gian khoảng 50 phút các cell có cùng SoC bằng 53%. Quá trình cân bằng được dừng lại bởi hệ thống BMS khi chênh lệch SoC các cell nằm trong phạm vi ± 1%.

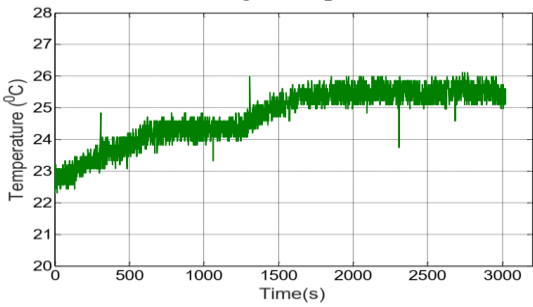
Từ hình 9a đến 9f mô tả về khả năng điều khiển truyền năng lượng giữa hai cell liền kề. Hình 9a mô tả duty xung điều khiển truyền năng lượng giữa cell 1 và cell 2 do mạch cân bằng 1 thực hiện. Trong 450 giây đầu, cell 2 truyền năng lượng cho cell 1 với biên độ cực đại (duty = 0,5). Từ thời điểm 450 giây trở đi, SoC của hai cell gần như bằng nhau, duty của tín hiệu PWM giảm từ 0.5 xuống bằng 0 tại thời điểm 10 phút, sau đó 2 cell có cùng mức SoC. Từ khoảng thời gian 10 phút trở đi, hai cell được sạc, cell 1 có SoC cao hơn cell 2 vì cell 2 truyền năng lượng cho cell 3 liền kề, cell 1 truyền năng lượng cho cell 2 cho đến thời điểm 46 phút SoC của hai cell gần như bằng nhau.



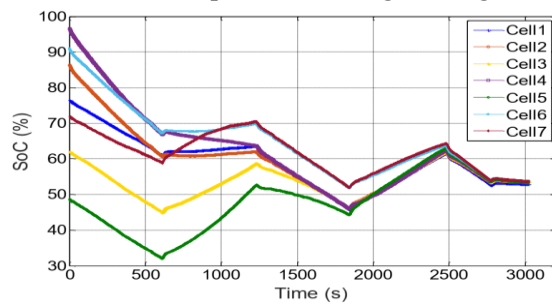
Hình 5. Dòng điện qua các cell.



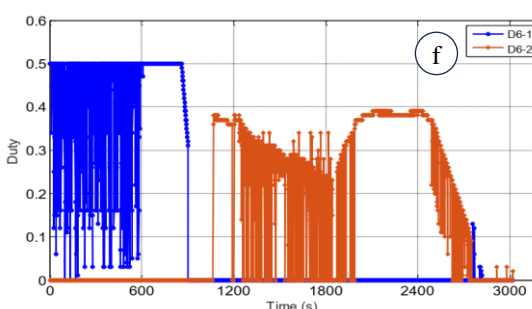
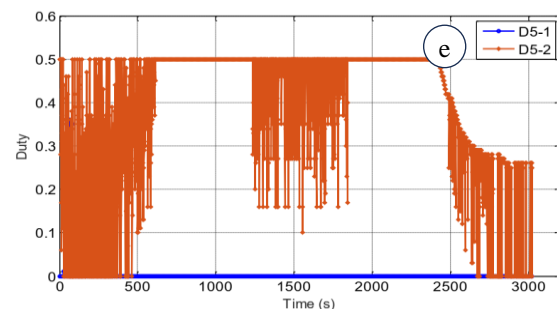
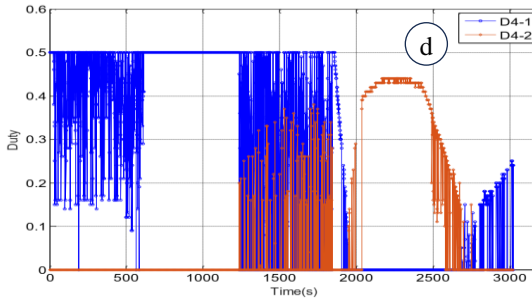
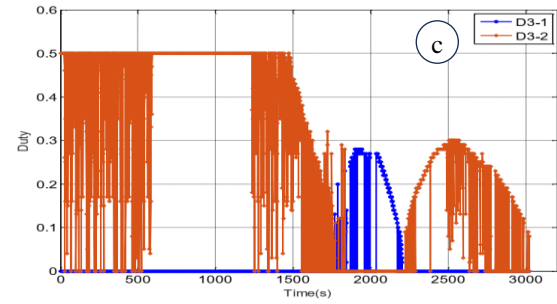
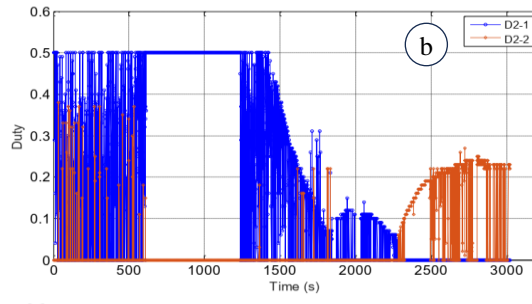
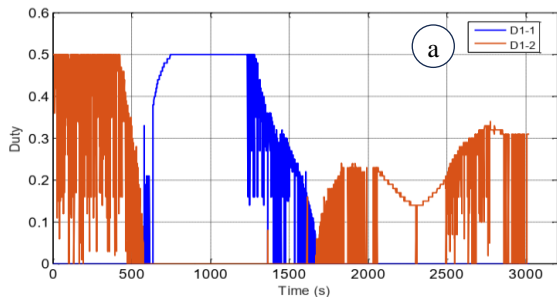
Hình 6. Điện áp các cell trong thực nghiệm.



Hình 7. Nhiệt độ các cell trong thực nghiệm.



Hình 8. Quá trình cân bằng SoC của các cell.



Hình 9. Duty của tín hiệu PWM điều khiển các mạch cân bằng.

Phân tích tương tự như hình 9a, từ hình 9b đến hình 9f cho thấy việc điều khiển quá trình truyền năng lượng sang các cell liên kế được thực hiện bởi các mạch cân bằng còn lại. Đối với mạch cân bằng 5, quá trình truyền năng lượng chỉ được thực hiện theo một hướng từ cell 6 đến cell 5 trong toàn bộ quá trình cân bằng, vì cell 6 ban đầu có SoC cao nhất (96%) và cell 5 có SoC thấp nhất (48%). Thục nghiệm này được thực hiện theo kịch bản xả/sạc và điều khiển cân bằng đồng thời, do đó, thời gian cân bằng sẽ lâu hơn (khoảng 3000 giây như thể hiện trong các hình). Nếu các cell được cân bằng trong kịch bản chỉ sạc, chỉ xả hoặc không xả/sạc, quá trình cân bằng có thể nhanh hơn.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày thiết kế mạch cân bằng năng lượng cho hai cell pin Lithium-ion liên kế trong gói pin dựa trên nguyên lý của bộ chuyển đổi Cuk hai chiều. Thiết kế này chỉ sử dụng 01 MOSFET để truyền năng lượng giữa hai cell liên kế, 1 role để điều khiển hướng truyền năng lượng, 01 role để đóng/ngắt mạch cân bằng năng lượng với các cell. Việc điều khiển cân bằng năng lượng có thể được thực hiện trực tiếp bởi từng mạch cân bằng hoặc từ xa bởi BMS sử dụng giao tiếp RS485. Mạch cân bằng này phù hợp với các chiến lược điều khiển cân bằng cell khác nhau (cân bằng dựa trên SoC hoặc điện áp của cell). Thiết kế này loại bỏ việc phải sử dụng nguồn DC nhiều mức để mở 2n MOSFET, dẫn đến sự bất tiện khi thiết kế n - 1 mạch cân bằng năng lượng dựa trên nguyên lý bộ chuyển đổi Cuk hai chiều cho gói pin có n cell được kết nối nối tiếp. Thiết kế này loại bỏ sự mất năng lượng trên các thành phần của mạch cân bằng khi các cell được cân bằng, thiết kế này cũng được mở rộng dễ dàng cho gói pin có số lượng cell lớn. Mô hình thực nghiệm xây dựng cho 07 cell pin Samsung 22P nối tiếp dựa trên về phản hồi SoC đã chứng minh hiệu quả của mạch cân bằng được đề xuất trong bài báo. Mạch cân bằng này có thể được áp dụng hiệu quả vào việc điều khiển cân bằng cell cho gói pin Lithium-Ion có công suất lớn dùng trong xe điện hoặc trong trạm lưu trữ năng lượng trong hệ thống năng lượng tái tạo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Rahimi EH, Ojha U, Baronti F, et al. “*Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles*”, IEEE Ind Electron Mag 7, 4–16, (2013). <https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2250351>
- [2]. Rivera Barrera JP, Muñoz Galeano N, Sarmiento-Maldonado HO “*SoC estimation for lithium-ion batteries: Review and future challenges*”. Electron 6, 102–120, (2017). <https://doi.org/10.3390/electronics6040102>
- [3]. Alvarez DA, Estévez B, Adyr A, et al. “*A review of battery equalizer circuits for electric vehicle applications*”. Energ 13, 5688–5705, (2020). <https://doi.org/10.3390/en13215688>
- [4]. How Lithium-Ion batteries in EVs catch fire. Available from: <https://adreesghoshal.medium.com/how-lithium-ion-batteries-in-evs-catch-fire>
- [5]. Wu TZ, Ji F, Liao L, et al. “*Voltage-SOC balancing control scheme for series-connected lithium-ion battery packs*.” J Energy Storage 25, 100895, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100895>
- [6]. Hauser A, Kuhn R “*Cell balancing, battery state estimation, and safety aspects of battery management systems for electric vehicles*.” Adv Battery Technol Electr Veh, 283–326, (2015). <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-377-5.00012-1>.
- [7]. Shang Y, Zhang C, Cui N, et al. “*A cell-to-Cell battery equalizer with zerocurrent switching and zero-voltage gap based on quasi-resonant LC converter and boost converter*”. IEEE Trans Power Electron 30, 3731–3747, (2015). <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2345672>
- [8]. Cao J, Schofield N, Emadi “*A Battery balancing methods: A comprehensive review*.” IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference 2008, 1–6, (2008). <http://doi:10.1109/VPPC.2008.4677669>
- [9]. Ouyang Q, Chen J, Xu C, et al. “*Cell balancing control for serially connected lithium-ion batteries*.” American Control Conference (ACC), 3095–3100, (2016). <https://doi:10.1109/ACC.2016.7525393>
- [10]. Gallardo-Lozano J, Romero-Cadaval E, Milanés-Montero MI, et al. “*Battery equalization active methods*.” J Power Sources 246, pp. 934–949, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.026>

- [11]. Moore S, Schneider P “A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems”. SAE 2001 World Congress 0959, 1–7, (2001). <https://doi.org/10.4271/2001-01-0959>
- [12]. Sanjaya M, “Switching power supplies A to Z,” 1st edition, eBook, ISBN-9780080461557, (2006). Available from: <https://www.elsevier.com/books/switching-power-supplies-a-z/maniktala/978-0-7506-7970-1>.
- [13]. Maksimovic D, Cuk S, “A unified analysis of PWM converters in discontinuous modes.” IEEE Trans Power Electron 6, pp. 476–490, (1991). <https://doi.org/10.1109/63.85890>
- [14]. Wu ST, Chang YN, Chang CY, et al. “A fast charging balancing circuit for LiFePO4 battery.” Electron 8, 1144, (2019). <https://doi.org/10.3390/electronics8101144>
- [15]. Guo Z, Zhu H “An application of communication system on the navigation light's filament status based on RS-485.” 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 1–3, (2012). <https://doi.org/10.1109/RSETE.2012.6260381>
- [16]. Rahman I, Riawan DC, Ashari M “Design and implementation of DC-DC bidirectional Cuk converter with average current mode control for lead acid battery testing.” International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA) 2019, 183–188, (2019). <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2019.8937200>

ABSTRACT

Design of energy balancing circuit for battery cells connected in series based on modifying the bidirectional Cuk converter

This paper proposes a design of an energy balance circuit for two adjacent Lithium-ion battery cells in the cell string based on the modifying of the bidirectional CuK converter principle. This design only uses one MOSFET to transfer energy between two cells in a direction controlled by the first relay, the second relay controls the cutting energy balance circuit off the cells when they have the same energy level. This design overcomes some disadvantages caused by applying the principle of bidirectional CuK converter to design the energy balancing circuit, these are the need for a multiple level DC source to open MOSFETs and the issue of the energy loss on the elements of the energy balance circuit. This design is also easy to expand for the battery string with a large number of cells. The experimental results of online optimal energy balance control based on state of charge (SoC) feedback for 07 SAMSUNG 22P battery cells connected in series are presented to prove the efficiency of the energy balance circuit design for two adjacent cells proposed in this paper.

Keywords: Lithium-Ion battery; Balance circuit; CuK converter; State of charge; Optimal balancing control.