

OPTIMAL ACTIVE SoC BALANCING FOR A STRING OF LITHIUM-ION BATTERY CELLS BASED ON OPTIMIZATION WITH CONSTRAINTS ON TEMPERATURE AND AGING

Ta Quang Duy^{1*}, Nguyen Van Chi²

¹Vinh Phuc College of Economics and Technology, ²TNU - University of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 13/02/2025	This paper presents an optimal active SoC balancing treatment considering the aging effect for Lithium Ion batteries in the next connected string implemented by CuK switching circuit. With the SoC controlling the target balancing for the cells in the string, it is ensured that in all operating cases, the current and temperature of the cells cannot exceed the permissible technical limits corresponding to the aging level of the cells. The nonlinear optimal control problem was established based on the current and temperature balancing constraints and examines the effect of cell aging in the model of the SoC balancing system. The sequential quadratic programming method was used to solve the mathematical priority at the sample extraction times that determines the optimal duty of PWM to the balancing balances. The SoC balancing results for the cells were compared between the case where all the cells in the string are new and the case where the cells in the string have different chemical ages, showing the difference in the balance control and temperature control of the cells in the string during the SoC balancing process. The application of the SoC balancing method for the cells in the string proposed in this paper enables the cells in the string to operate more safely. Hence, the battery life of the cells can be extended.
Revised: 27/02/2025	
Published: 27/02/2025	
KEYWORDS	
Lithium-Ion battery	
State of charge	
Optimal control	
Cell balance	
State of health	

ĐIỀU KHIỂN CÂN BẰNG SoC CHO CÁC CELL PIN LITHIUM-ION DỰA TRÊN TỐI ƯU HÓA CÓ RÀNG BUỘC NHIỆT ĐỘ VÀ ẢNH HƯỞNG CỦA SỰ GIÀ HÓA

Tạ Quang Duy^{1*}, Nguyễn Văn Chi²

¹Trường Cao đẳng Kinh tế - Kỹ thuật Vinh Phúc, ²Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 13/02/2025	Bài báo này trình bày phương pháp điều khiển cân bằng SoC tích cực tối ưu có xét đến ảnh hưởng của già hóa cho các cell pin Lithium Ion trong chuỗi nối tiếp sử dụng mạch chuyển đổi CuK. Với mục đích điều khiển quá trình cân bằng SoC cho các cell trong chuỗi đảm bảo dòng và nhiệt độ của các cell không được vượt quá các giới hạn kỹ thuật cho phép tương ứng với mức độ già hóa của các cell, bài toán điều khiển tối ưu được thiết lập dựa trên các ràng buộc về dòng cân bằng, nhiệt độ và xét đến sự già hóa của các cell. Phương pháp SQP được sử dụng để giải bài toán tối ưu tại các thời điểm trích mẫu nhằm xác định độ rộng xung PWM tối ưu đưa đến các mạch cân bằng. Kết quả cân bằng SoC cho các cell được so sánh giữa trường hợp tất cả các cell trong chuỗi đều mới và trường hợp các cell trong chuỗi có mức độ già hóa khác nhau cho thấy sự khác biệt trong việc kiểm soát dòng cân bằng và nhiệt độ của các cell trong chuỗi trong quá trình cân bằng SoC. Việc ứng dụng phương pháp cân bằng SoC cho các cell trong chuỗi được đề xuất trong bài báo này cho phép các cell trong chuỗi vận hành an toàn hơn, tuổi cell của cell pin được kéo dài hơn.
Ngày hoàn thiện: 27/02/2025	
Ngày đăng: 27/02/2025	
TỪ KHÓA	
Pin Lithium-Ion	
Trạng thái điện tích	
Kiểm soát tối ưu	
Cân bằng cell	
Trạng thái sức khỏe	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12044>

* Corresponding author. Email: quangduyvp@gmail.com

1. Giới thiệu

Các hệ thống lưu trữ năng lượng dùng pin Lithium Ion (BESS) thường được tạo thành từ nhiều tế bào (cell) hoặc các mô đun tế bào (modul cell) mắc nối tiếp nhằm cung cấp đủ công suất và điện áp cho phụ tải. Hai thông số trạng thái quan trọng trong hệ thống BESS là trạng thái điện tích (SoC- state of charge) và trạng thái sức khỏe (SoH – state of health). SoC là lượng điện tích còn lại trong cell, hay khả năng cung cấp năng lượng cho tải, SoH là tham số đặc trưng cho sức khỏe của cell. Hai tham số SoC và SoH được định nghĩa bởi các biểu thức (1) sau đây [1], [2]:

$$SoC(k) = \frac{Q^r(k)}{Q^m} 100\%; \quad SoH(k) = \frac{Q^a(k)}{Q^{rate}} 100\% \quad (1)$$

Trong đó $Q^r(k)$ là mức sạc hiện tại, Q^m là mức sạc tối đa có thể. Giá trị của SoC thay đổi trong khoảng từ 0% đến 100%. Khi cell pin đã được sử dụng trong một thời gian nhất định, dung lượng thực tế $Q^a(k)$ sẽ giảm so với Q^{rate} , dẫn đến SoH giảm.

Trong quá trình hoạt động, bắt buộc các cell trong chuỗi nối tiếp phải có SoC bằng nhau tại mọi thời điểm. Việc mất cân bằng SoC của các cell mắc nối tiếp có thể dẫn đến quá xả/quá nạp, giảm tuổi thọ, tăng nhiệt cực đoan. Gần đây, một số công trình đã sử dụng phản hồi SoC của cell để điều khiển cân bằng cell một cách hiệu quả hơn [1], [2]. Cách tiếp cận này tốt hơn vì SoC phản ánh chính xác hơn năng lượng còn lại trong cell. Tuy nhiên, phương pháp này yêu cầu phải ước lượng SoC của các cell do SoC không thể đo được trực tiếp [3] - [6]. Một số công trình đã sử dụng đường cong hồi quy để ước lượng SoC của các cell nhằm giảm bớt gánh nặng tính toán khi phải ước lượng SoC. Một cách tiếp cận đồng thời ước lượng dòng qua cell và SoC đã được đề xuất nhằm giảm thiểu nhu cầu lắp đặt cảm biến dòng điện được đưa ra trong tài liệu [7] - [10]. Tất cả những nghiên cứu ở trên nói chung vẫn chưa kiểm soát được quá trình tăng nhiệt của cell trong quá trình cân bằng đồng thời với chế độ xả/xả và chưa xét đến sự ảnh hưởng của quá trình già hóa. Chính vì vậy việc cân bằng SoC của các cell trong chuỗi một cách hiệu quả và tốt hơn nên đi cùng với việc kiểm soát nhiệt độ và có xét đến sự già hóa của các cell, đây là một bài toán đầy thách thức trong thời điểm hiện tại. Các mạch cân bằng tích cực sử dụng tụ điện và cuộn cảm, cùng với các chuyển mạch, để truyền năng lượng điện từ cell có năng lượng cao hơn sang cell có năng lượng thấp hơn, tuy không gây lãng phí năng lượng điện nhưng các thuật toán cân bằng phức tạp khó triển khai được trên các mạch này [11]. Phương pháp sử dụng các mạch cân bằng dựa trên bộ chuyển đổi cho phép kiểm soát được các dòng cân bằng giữa các cell liên kết theo các thuật toán phức tạp hơn, thuật toán phức tạp không những cho phép kiểm soát dòng cân bằng theo dòng nạp/xả mà còn cho phép kiểm soát dòng cân bằng [12] - [16].

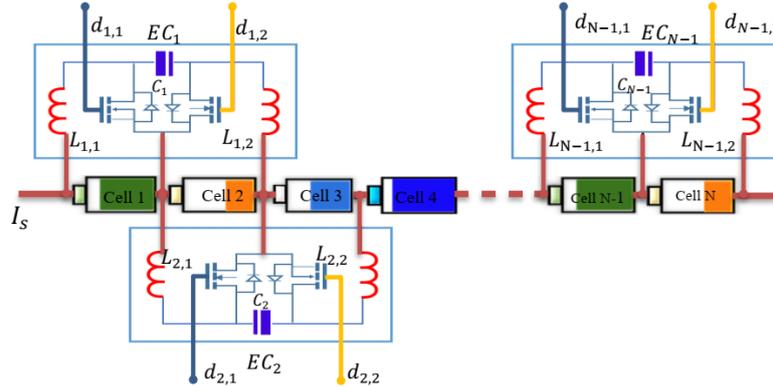
Bài báo này trình bày phương pháp điều khiển cân bằng SoC tích cực tối ưu cho các cell trong chuỗi được thực hiện bằng mạch chuyển đổi CuK hai chiều. Giả thiết SoC và SoH đã được ước lượng bằng các công trình nghiên cứu trước đây của nhóm tác giả [17], bài toán điều khiển tối ưu cân bằng cell tích cực trong bài báo này được thiết lập dựa trên các ràng buộc về dòng cân bằng qua cell, nhiệt độ và có xét đến sự ảnh hưởng của sự già hóa thông qua tham số SoH trong mô hình động học của hệ thống cân bằng cell.

Nội dung của bài báo được cấu trúc như sau. Phần 2 mô tả phương pháp nghiên cứu mô hình trạng thái hệ thống cân bằng cell tích cực sử dụng bộ chuyển đổi Cuk, thành lập bài toán điều khiển tối ưu cân bằng tích cực có xét đến tác dụng của già hóa. Kết quả thảo luận được trình bày trong phần 3, phần 4 là kết luận.

2. Phương pháp nghiên cứu

Giả thiết một BESS được tạo bởi một chuỗi gồm N cell pin Lithium Ion mắc nối tiếp, được cân bằng sử dụng phương pháp cell to cell liên kết với $N - 1$ mạch cân bằng; mạch cân bằng được thiết kế dựa trên nguyên lý của mạch chuyển đổi CuK hai chiều [14], [15] như mô tả trên Hình 1. Tín hiệu điều khiển $N - 1$ mạch cân bằng là xung PWM (pulse width modulation) với độ rộng xung là đại lượng điều khiển. Trong nghiên cứu này, tần số xung PWM được giữ là hằng số $f_s = 20kHz$.

Mạch cân bằng thứ $i, i = 1, 2, \dots, N$, làm nhiệm vụ cân bằng tích cực SoC cho 02 cell liền kề i và $i + 1$, có hai cuộn cảm $L_{i,1}, L_{i,2}$, tụ điện C_i và 02 MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor). Hai MOSFET được điều khiển bằng xung PWM có độ rộng xung lần lượt là $d_{i,1}$ và $d_{i,2}$, tại một thời điểm chỉ có 01 MOSFET mở, khi MOSFET 1 mở bằng $d_{i,1}$, năng lượng điện được truyền từ cell i tới cell $i + 1$, khi MOSFET 2 mở bằng $d_{i,2}$ thì năng lượng điện được truyền theo chiều ngược lại từ $i + 1$ đến i [16], [17]. Giả thiết rằng hệ thống được mô hình hóa trên miền rời rạc với chu kỳ trích mẫu là ΔT . Gọi $\zeta_i(k)$ là SoC của cell thứ i tại thời điểm $k, i = 1, 2, \dots, N$, thì SoC của cell i tại thời điểm tiếp theo $k + 1$ là:



Hình 1. Mô hình hệ thống cân bằng tích cực cho chuỗi gồm N cell pin Lithium Ion mắc nối tiếp sử dụng cấu hình cân bằng cell to cell liền kề sử dụng mạch biến đổi Cuk hai chiều

$$\zeta_i(k + 1) = \zeta_i(k) - \Delta\zeta_{E_i}(k) - \Delta\zeta_S(k) \quad (2)$$

trong đó $\Delta\zeta_S(k)$ là lượng SoC tăng lên hay giảm đi do quá trình sạc/xả, $\Delta\zeta_{E_i}(k)$ là lượng SoC cell i nhận được từ hoặc truyền đi đến hai cell lân cận là cell $i - 1$ và cell $i + 1$ được xác định bằng công thức (3) và (4) sau đây:

$$\Delta\zeta_S(k) = \frac{I_s(k)\Delta T}{Q_i^a(k)} = \frac{I_s(k)\Delta T}{\left(\frac{SoH_i(k)Q^{rate}}{100}\right)} \quad (3)$$

với $I_s(k)$ là dòng điện qua cell, $I_s(k) < 0$ khi nạp, $I_s(k) > 0$ khi xả; $Q_i^a(k)$ là dung lượng thực tế của cell tại thời điểm k , dung lượng này được xác định từ tham số SoH của cell i tại thời điểm k là $SoH_i(k)$ theo công thức $Q_i^a(k) = \frac{SoH_i(k)Q^{rate}}{100}, i = 1, 2, \dots, N$ với Q^{rate} là dung lượng danh định.

$$\Delta\zeta_{E_i}(k) = -\Delta\zeta_{E_{t,i}}(k) + \Delta\zeta_{E_{r,i}}(k) \quad (4)$$

với $\Delta\zeta_{E_{t,i}}(k)$ là lượng SoC cell i truyền đến các cell lân cận $i - 1$ và $i + 1$; $\Delta\zeta_{E_{r,i}}(k)$ là lượng SoC mà cell i nhận được từ hai cell lân cận $i - 1$ và $i + 1$; các đại lượng $\Delta\zeta_{E_{t,i}}(k)$ và $\Delta\zeta_{E_{r,i}}(k)$ được xác định bằng công thức (5) sau đây:

$$\begin{cases} \Delta\zeta_{E_{r,1}}(k) = 0, & i = 1 \\ \Delta\zeta_{E_{t,i}}(k) = \frac{I_{L_{i,2}}(k)\Delta T}{Q_i^a(k)}, \Delta\zeta_{E_{r,i}}(k) = \frac{I_{L_{i,1}}(k)\Delta T}{Q_i^a(k)}, & i = 2, 3, \dots, N - 1 \\ \Delta\zeta_{E_{r,N}}(k) = 0, & i = N \end{cases} \quad (5)$$

với $I_{L_{i,1}}(k)$ và $I_{L_{i,2}}(k)$ lần lượt là các dòng điện qua các cuộn cảm $L_{i,1}, L_{i,2}$ của mạch cân bằng thứ i , được xác định bằng công thức (6):

$$I_{L_{i,1}} = \begin{cases} \frac{T_s V_i d_{i,1}^2}{2L_{i,1}} \triangleq \varphi_{i,1}(d_{i,1}) & \text{cell } i \rightarrow \text{cell } i + 1 \\ -\frac{T_s (V_{C_i} - V_i) d_{i,2}^2}{2L_{i,2}} \triangleq \varphi'_{i,1}(d_{i,2}) & \text{cell } i + 1 \rightarrow \text{cell } i \end{cases} \quad (6)$$

$$I_{L_{i,2}} = \begin{cases} \frac{T_s(V_{C_i} - V_{i+1})d_{i,1}^2}{2L_{i,2}} \triangleq \varphi_{i,2}(d_{i,1}) & \text{cell } i \rightarrow \text{cell } i + 1 \\ -\frac{T_s V_{i+1} d_{i,2}^2}{2L_{i,1}} \triangleq \varphi'_{i,2}(d_{i,2}) & \text{cell } i + 1 \rightarrow \text{cell } i \end{cases}$$

trong đó V_i là điện áp trên cell thứ i , V_{C_i} là điện áp trên tụ C_i , $T_s = 1/f_s$ là chu kỳ của xung PWM. Hai hàm $\varphi_{i,1}(d_{i,1})$ và $\varphi_{i,2}(d_{i,1})$ mô tả trạng thái của cell i nạp cho cell $i + 1$, hàm $\varphi'_{i,1}(d_{i,2})$ và $\varphi'_{i,2}(d_{i,2})$ biểu diễn trạng thái cell $i + 1$ nạp cho cell i . Phương trình truyền nhiệt của cell i , $i = 1, 2, \dots, N$ trong dãy được biểu diễn bằng công thức (7) sau đây [18]:

$$T_i(k+1) = T_i(k)e^{-\frac{\gamma A - i_{C_i}(k) \frac{\partial OCV_i(k)}{\partial T_i(k)}}{m c_p} \Delta T} + \frac{i_{C_i}^2(k) R_0 + \gamma A T_{amb}}{\gamma A - i_{C_i}(k) \frac{\partial OCV_i(k)}{\partial T_i(k)}} (e^{-\frac{\gamma A - i_{C_i}(k) \frac{\partial OCV_i(k)}{\partial T_i(k)}}{m c_p} \Delta T} - 1) \quad (7)$$

với $i_{C_i}(k)$ là dòng điện đi qua các cell trong dãy được xác định bằng công thức (8):

$$\begin{cases} i_{C_1} = -\varphi_{1,1}(d_{1,1}) - \varphi'_{1,1}(d_{1,2}) - I_s(kT), & i = 1 \\ i_{C_i} = \varphi_{i,2}(d_{i,1}) - \varphi_{i,1}(d_{i,1}) + \varphi'_{i,2}(d_{i,2}) - \varphi'_{i,1}(d_{i,2}) - I_s(kT), & i = 2, 3, \dots, N-1 \\ i_{C_N} = \varphi_{(N-1),1}(d_{N-1,1}) - \varphi'_{N-1,1}(d_{N-1,2}) - I_s(kT), & i = N \end{cases} \quad (8)$$

Trong công thức (7), $\frac{\partial OCV(k)}{\partial T(k)}$ là đạo hàm riêng của OCV cell theo nhiệt độ cell, với γ là hệ số trao đổi nhiệt tương đương, A là diện tích bề mặt của cell, m là khối lượng của cell, c_p là nhiệt dung riêng của cell, T_{amb} là nhiệt độ môi trường xung quanh của gói pin. Định nghĩa các véc tơ như công thức (9) và các ma trận ở công thức (10) đến công thức (15):

$$\begin{aligned} \zeta(k) &= [\zeta_1(k) \zeta_2(k) \dots \zeta_N(k)]^T \\ \mathbf{u}_1(k) &= [d_{11} \ d_{21} \ \dots \ d_{N-1,1}]^T \\ \mathbf{u}_2(k) &= [d_{12} \ d_{22} \ \dots \ d_{N-1,2}]^T \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(k) &= [T_1(k) \ T_2(k) \ \dots \ T_N(k)]^T \\ I_s(k) &= [I_s(k)\Delta T \ I_s(k)\Delta T \ \dots \ I_s(k)\Delta T]^T \\ \mathbf{B}_1(k) &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \beta_1(k) & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \beta_2(k) & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \beta_{N-1}(k) \end{bmatrix}, \beta_i(k) = \begin{cases} \frac{\varphi_{i,2}(d_{i,1})}{\varphi_{i,1}(d_{i,1})}, & \varphi_{i,1}(d_{i,1}) \neq 0 \\ 0, & \varphi_{i,1}(d_{i,1}) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{B}_2(k) = \begin{bmatrix} \beta'_1(k) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & \beta'_2(k) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \beta'_3(k) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \beta'_i(k) = \begin{cases} \frac{\varphi'_{i,1}(d_{i,2})}{\varphi'_{i,2}(d_{i,2})}, & \varphi'_{i,2}(d_{i,2}) \neq 0 \\ 0, & \varphi'_{i,2}(d_{i,2}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \varphi_1(\mathbf{u}_1(k)) &= [\varphi_{1,1}(d_{1,1})\Delta T \ \varphi_{2,1}(d_{2,1})\Delta T \ \dots \ \varphi_{N-1,1}(d_{N-1,1})\Delta T]^T \\ \varphi_2(\mathbf{u}_2(k)) &= [\varphi'_{1,2}(d_{1,2})\Delta T \ \varphi'_{2,2}(d_{2,2})\Delta T \ \dots \ \varphi'_{N-1,2}(d_{N-1,2})\Delta T]^T \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{E}_1(k) = \begin{bmatrix} e^{-\frac{\gamma A - i_{C_1}(k) \frac{\partial OCV_1(k)}{\partial T_1(k)}}{m c_p} \Delta T} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\gamma A - i_{C_2}(k) \frac{\partial OCV_2(k)}{\partial T_2(k)}}{m c_p} \Delta T} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\frac{\gamma A - i_{C_N}(k) \frac{\partial OCV_N(k)}{\partial T_N(k)}}{m c_p} \Delta T} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$E_2(k) = \begin{bmatrix} \frac{i_{c_1}^2(k)R_0 + \gamma AT_{amb}}{\gamma A - i_{c_1}(k) \frac{\partial OCV_1(k)}{\partial T_1(k)}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{i_{c_2}^2(k)R_0 + \gamma AT_{amb}}{\gamma A - i_{c_2}(k) \frac{\partial OCV_2(k)}{\partial T_2(k)}} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{i_{c_N}^2(k)R_0 + \gamma AT_{amb}}{\gamma A - i_{c_N}(k) \frac{\partial OCV_N(k)}{\partial T_N(k)}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$T(k) = [T_1(k) \ T_2(k) \ \dots \ T_N(k)]^T$$

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} e^{-\frac{\gamma A - i_{c_1}(k) \frac{\partial OCV_1(k)}{\partial T_1(k)}}{mC_p} \Delta T} - 1 & e^{-\frac{\gamma A - i_{c_2}(k) \frac{\partial OCV_2(k)}{\partial T_2(k)}}{mC_p} \Delta T} - 1 & \dots & e^{-\frac{\gamma A - i_{c_N}(k) \frac{\partial OCV_N(k)}{\partial T_N(k)}}{mC_p} \Delta T} - 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Cuối cùng, từ các phương trình (2), (7) cùng với các ma trận được định nghĩa ở các công thức (9) - (15), phương trình sai phân động học phi tuyến động học của toàn bộ hệ thống cân bằng cell cho gói pin dùng phản hồi SoC như (16).

$$\zeta(k+1) = \zeta(k) + \left(B_1(k\Delta T)\varphi_1(\mathbf{u}_1(k)) + B_2(k\Delta T)\varphi_2(\mathbf{u}_2(k)) + I_s(k) \right) (Q^a(k))^{-1} \quad (16)$$

$$T(k+1) = E_1(k)T(k) + E_2(k)\Phi(k)$$

với $Q^a(k) = [Q_1^a(k) \ Q_2^a(k) \ \dots \ Q_n^a(k)]^T$.

Phương trình động học sai phân rời rạc (16) mô tả quan hệ giữa các đầu ra mô hình là SoC và nhiệt độ của các cell trong dãy pin tại thời điểm kế tiếp theo với các đầu vào là dòng điện qua cell pin và xung điều khiển của các mạch cân bằng tại thời điểm hiện tại.

Mục tiêu của điều khiển tối ưu cân bằng cell tích cực là khi chênh lệch SoC giữa bất cứ cặp cell liền kề nào vượt quá một giá trị ε đủ nhỏ cho trước nào đó thì thuật toán điều khiển cân bằng cell được kích hoạt. Thuật toán này xác định các tín hiệu $\mathbf{u}_1(k)$ và $\mathbf{u}_2(k)$ tối ưu, sau đó đưa tới các mạch điều khiển cân bằng làm cho SoC của các cell cân bằng trở lại trong giới hạn cho phép, hay thỏa mãn điều kiện (17)

$$|SoC_i - SoC_{i+1}| < \varepsilon, i = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (17)$$

với mọi giá trị tùy ý của dòng điện qua các cell nằm trong giới hạn vận hành $i_{Cmin} < i_{C_i} < i_{Cmax}$, $i = 1, 2, \dots, N$, và đồng thời giữ cho nhiệt độ của cell không vượt quá giới hạn tăng nhiệt cho phép, hay thỏa mãn điều kiện (18)

$$|T_i - T_{amb}| \leq T_{limit}, i = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

Hàm mục tiêu được xây dựng dựa trên việc xem xét các yếu tố kỹ thuật sau: chênh lệch dòng nạp từ cell i đến cell $i + 1$ và từ cell $i + 1$ đến i là nhỏ nhất; chênh lệch giữa SoC của các cell và SoC trung bình giữa các cell là nhỏ nhất; chênh lệch nhiệt độ giữa các cell và nhiệt độ môi trường là nhỏ nhất như công thức (19) sau đây:

$$\min J(\zeta(k), \mathbf{u}_1(k), \mathbf{u}_2(k)) = \sum_{j=1}^{N-1} q_j [\varphi_{j,1}(\mathbf{u}_1(k)) - \varphi_{j,2}(\mathbf{u}_2(k))]^2 + \sum_{i=1}^N p_i [\zeta_i(k+1) - M_\zeta(k+1)]^2 + \sum_{i=1}^N r_i [T_i(k+1) - T_{amb}]^2 \quad (19)$$

với động học phi tuyến của các hàm $\zeta_i(k+1)$ và $T_i(k+1)$, $i = 1, 2, \dots, N$ được mô tả ở phương trình (16), SoC trung bình của các cells trong dãy được xác định là $M_\zeta(k) = \frac{\sum_{i=1}^N \zeta_i(k)}{N}$, $q_j(\frac{1}{A})$, $p_i(\frac{1}{\%})$ và $r_i(1/^{oC})$ là các hệ số trọng số của 03 yếu tố kỹ thuật.

Độ lớn dòng điện qua cell cần được hạn chế theo SoH, do đó công thức hạn chế dòng được đưa thêm vào bài toán điều khiển tối ưu như sau, giới hạn dòng điện qua cell sẽ được điều chỉnh lại theo SoH để hạn chế sự nguy hại cho cell.

$$I_{Cmax}(k) = i_{Cmax} [I_1^{max}(k) \quad I_2^{max}(k) \quad \dots \quad I_n^{max}(k)]^T \quad (20)$$

$$I_{Cmin}(k) = i_{Cmin} [I_1^{min}(k) \quad I_2^{min}(k) \quad \dots \quad I_n^{min}(k)]^T$$

$$\text{với } I_i^{max}(k) = \frac{SoH_i(k)i_{Cmax}}{100}, I_i^{min}(k) = \frac{SoH_i(k)i_{Cmin}}{100}, i = 1, 2, \dots, N$$

Giới hạn tăng nhiệt cho từng cell phụ thuộc vào SoH được thiết lập qua biểu thức

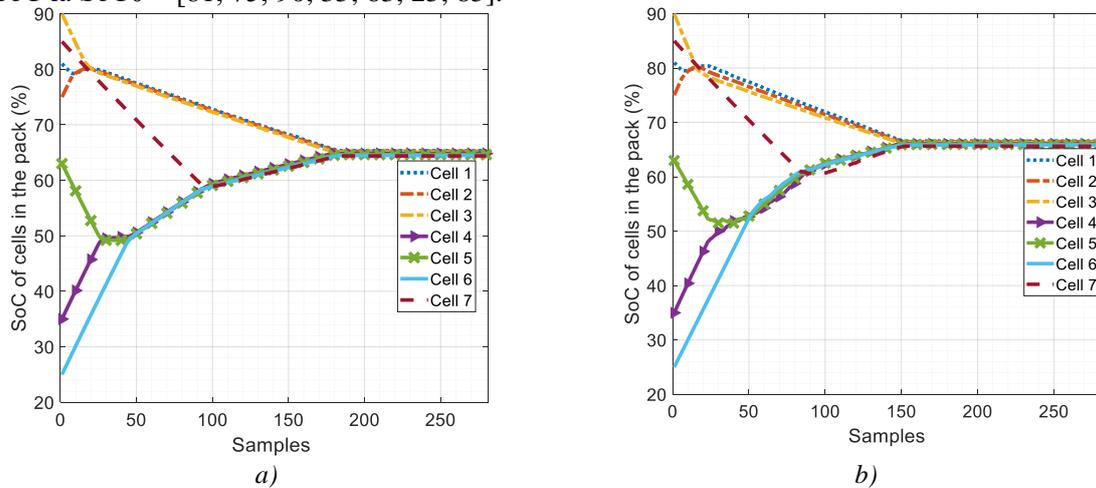
$$T_{limit}(k) = \frac{T_{limit}}{100} [SoH_1(k) \quad SoH_2(k) \quad \dots \quad SoH_n(k)]^T \quad (21)$$

Để giải bài toán tối ưu phi tuyến (19) chúng tôi sử dụng phương pháp SQP.

3. Kết quả và thảo luận

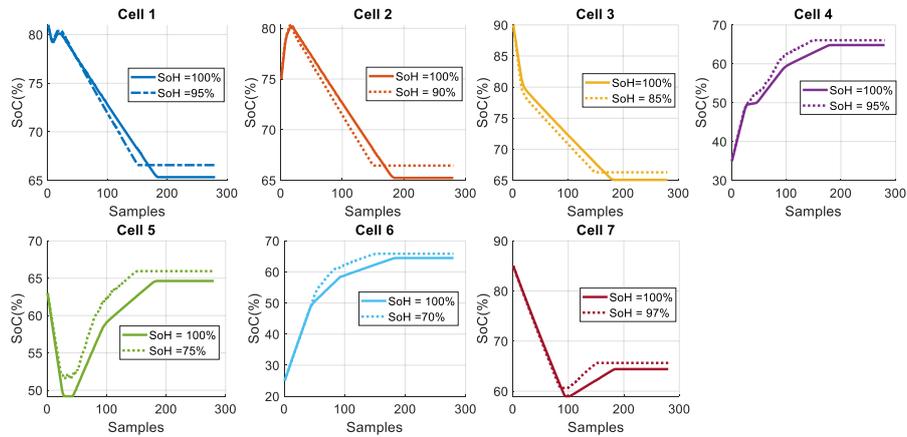
Mô đun gồm 07 cell pin SAMSUNG 22P 16850 mắc nối tiếp, các tham số của mỗi cell là: $u_{min} = 3,6V$; $u_{max} = 4,2V$; $Q^{rate} = 2200mAh$; $m = 43,11 \cdot 10^{-3}kg$; $l = 65 \cdot 10^{-3}m$; $d = 18 \cdot 10^{-3}m$; $Scell = 2\pi i \left(\frac{d}{2}\right) \left(\frac{d}{2} + l\right)$; $k_{hc} = 0,9$; $Cp = 95300k_{hc}$; $\gamma = 893k_{hc}$. Mạch CuK hai chiều có $L_{i,1} = L_{i,2} = 0,1mH$, $C = 450\mu F$.

Kết quả thí nghiệm cho 7 cell pin cùng các tham số, cùng điều kiện đầu mắc nối tiếp trong hai kịch bản có SoH bằng 100% và có SoH khác nhau. Các tham số thiết lập giới hạn ràng buộc cho bài toán điều khiển tối ưu cân bằng SoC cho các cell được chọn là: dòng nạp cực đại cho cell mới: $I_{Cmax0} = -1A$; dòng xả cực đại cho cell mới: $I_{dmax0} = 1,5A$; dung lượng danh định: $Q^{rate} = 2,2Ah$; giới hạn tăng nhiệt cho phép: $Temp_{limt0} = 10^0C$. Tiến hành thực nghiệm cho trường hợp các cell đã sử dụng một thời gian với mức độ lão hóa khác nhau tương ứng có SoH lần lượt của các cell là $SoH = [95; 90; 85; 95; 75; 70; 97]$, các cell bị mất cân bằng lần lượt có SoC là $SoC0 = [81; 75; 90; 35; 63; 25; 85]$.

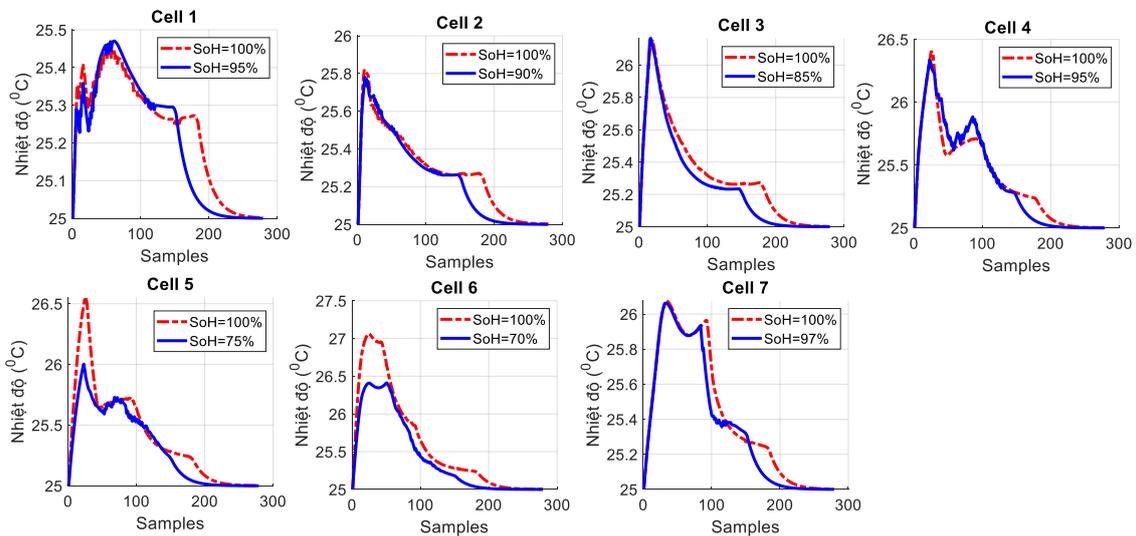


Hình 2. Quá trình cân bằng SoC tối ưu cho hai trường hợp: a) chuỗi các cell mới có $SoH = 100\%$ và b) chuỗi các cell đã bị già hóa tương ứng với các mức SoH khác nhau

Hình 2a mô tả quá trình cân bằng SoC tối ưu trong trường hợp các cell đều là mới và có $SoH = 100\%$, quá trình cân bằng diễn ra trong khoảng thời gian 180samples (180 phút), khi kết thúc quá trình cân bằng các cell có SoC bằng nhau và bằng trung bình cộng của các SoC tại thời điểm ban đầu (64,8571%). Hình 2b mô tả diễn biến cân bằng SoC của các cell với các mức lão hóa khác nhau (có SoH khác nhau), quá trình cân bằng diễn ra trong khoảng thời gian 152 samples, ngắn hơn so với trường hợp các cell mới. Các cell cân bằng với SoC bằng nhau và bằng 66,07%, cao hơn một chút so với trường hợp các cell mới, đây là do ảnh hưởng của 02 cell số 5 và số 6 lão hóa nhiều nhất có SoH lần lượt là 75% và 70%, và do quá trình nạp cho cell số 6 với $SoC = 25\%$. Đối với cell có SoH càng nhỏ thì cùng một dòng nạp thì có SoC cao hơn các cell khác, do vậy khi cân bằng thì SoC của cả pack sẽ cao hơn.



Hình 3. So sánh quá trình cân bằng SoC tối ưu của từng cell cho hai trường hợp: mới với SoH =100% và đã bị già hóa tương ứng với các mức SoH nhỏ hơn 100% khác nhau



Hình 4. Diễn biến tăng nhiệt độ của từng cell trong hai trường hợp: mới với SoH =100% và đã bị già hóa tương ứng với các mức SoH nhỏ hơn 100% khác nhau

Hình 3 mô tả so sánh diễn biến của SoC của từng cell cho hai trường hợp mới và đã lão hóa với mức SoH khác nhau. Khi cell có $SoH < 100\%$ thì quá trình tăng và giảm SoC khi nạp và khi xả sẽ nhanh hơn cell có $SoH = 100\%$ và SoC tại thời điểm kết thúc quá trình cân bằng thường lớn hơn. Hình 4 so sánh diễn biến tăng nhiệt độ của từng cell trong hai trường hợp. Các dòng điện và nhiệt độ của các cell trong cả hai trường hợp đều thỏa mãn giới hạn ràng buộc đặt ra.

4. Kết luận

Bài báo này đã trình bày phương pháp điều khiển cân bằng SoC tích cực tối ưu cho các cell pin Lithium Ion trong chuỗi nối tiếp được thực hiện bằng mạch chuyển đổi CuK hai chiều. Với mục đích điều khiển quá trình cân bằng SoC cho các cell trong chuỗi đảm bảo trong mọi trường hợp vận hành, dòng và nhiệt độ của các cell không được vượt quá các giới hạn kỹ thuật cho phép tương ứng với mức độ già hóa của các cell. Bài toán điều khiển tối ưu được thiết lập dựa trên các ràng buộc về dòng cân bằng, nhiệt độ và xét đến sự ảnh hưởng của già hóa trong mô hình động học của hệ thống cân bằng SoC. Phương pháp SQP được sử dụng để giải bài toán tối ưu tại các thời điểm trích mẫu nhằm xác định độ rộng xung PWM tối ưu đưa đến các mạch cân bằng. Quá trình thực nghiệm cân bằng SoC được tiến hành cho trường hợp tất các cell trong chuỗi đều mới

và trường hợp các cell trong chuỗi có mức độ già hóa khác nhau tương ứng trong kịch bản cân bằng khi không xả nạp. Kết quả cho thấy mặc dù các cell có các mức độ già hóa khác nhau, việc điều chỉnh các dòng cân bằng qua cell đã được thực hiện tối ưu sao cho các dòng qua cell, nhiệt độ của các không vượt quá các giá trị cho phép thông qua các ràng buộc được thay đổi tương ứng. Thời gian cân bằng của các cell sẽ trở lên dài hơn khi các cell có SoH càng thấp, hay mức độ già hòa càng cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] T. Wu, F. Ji, L. Liao, and C. Chang, "Voltage-SOC balancing control scheme for series-connected lithium-ion battery packs," *J. Energy Storage*, vol. 25, 2019, Art. no. 100895.
- [2] T. Stuart and W. Zhu, "Fast equalization for large lithium ion batteries," *IEEE Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 2, pp. 1-6, 2021.
- [3] M.-Y. Kim and S.-Y. Moon, "Automatic charge equalization circuit based on regulated voltage source for series connected lithium-ion batteries," in *Proceedings of the 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia*, vol. 2, pp. 2248-2255, 2020.
- [4] M. Daoud and M. Antoine, "Single Switched Capacitor Battery Balancing System Enhancements," *Energies*, vol. 6, pp. 2149-2174, 2013.
- [5] A. C. Baughman and M. Ferdowsi, "Double-Tiered Switched-Capacitor Battery Charge Equalization Technique," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, pp. 2277-2285, 2008.
- [6] S. Yarlagadda, "A Battery Management System Using an Active Charge Equalization Technique Based on a DC/DC Converter Topology," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, pp. 2720-2729, 2013.
- [7] Y.-S. Lee and C.-Y. Duh, "Battery equalization using bi-directional cuk converter in DCVM operation," in *Proceedings of the 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, Recife, Brazil*, vol. 16, pp. 765-771, 2005.
- [8] A. F. Moghaddam and A. V. D. Bossche, "A Cuk Converter Cell Balancing Technique by Using Coupled Inductors for Lithium-Based Batteries," *Energies*, vol. 12, pp. 851-875, 2019.
- [9] Z. Zhang and S. Cuk, "A high efficiency 1.8 kW battery equalizer," in *Proceedings of the Eighth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, San Diego, USA, 1993*, pp. 221-227.
- [10] C. S. Moo, Y. C. Hsieh, and I. S. Tsai, "Charge equalization for series-connected batteries," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 39, pp. 704-710, 2003.
- [11] Y. Ma and H. Lin, "Modified State-of-Charge Balancing Control of Modular Multilevel Converter with Integrated Battery Energy Storage System," *Energies*, vol. 12, pp. 253-271, 2018.
- [12] S.-C. Choi, J.-Y. Jeon, D.-Y. Kim, and C.-Y. Won, "State-of-Charge Balancing Control of a Battery Power Module for a Modularized Battery for Electric Vehicle," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 11, pp. 629-638, 2016.
- [13] Z. G. Wei, J. Hu, H. He, Y. Li, and B. Xiong, "Load Current and State of Charge Co-Estimation for Current Sensor-Free Lithium-ion Battery," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 1, pp. 10970-10975, 2021.
- [14] B. Poorali, E. Adib, and H. Farzanehfard, "Soft-switching DC-DC Cuk converter operating in discontinuous-capacitor-voltage mode," *IET Power Electron.*, vol. 10, pp. 1679-1686, 2017.
- [15] D. Maksimovic and S. Cuk, "A unified analysis of PWM converters in discontinuous modes," *IEEE Trans Power Electron.*, vol. 6, pp. 476-490, 1991.
- [16] Q. Ouyang, J. Chen, and C. Xu, "Cell balancing control for serially connected lithium-ion batteries," *American Control Conference (ACC)*, 2016, pp. 3095-3100.
- [17] V. C. Nguyen, V. T. Nguyen, M.-D. Ngo, and S.-J. Ahn, "Optimal SoC Balancing Control for Lithium-Ion Battery Cells Connected in Series," *Energies*, vol. 10, pp. 2875-2890, 2021.
- [18] Z. B. Omariba, L. Zhang, and D. Sun, "Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129335-129352, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2940090.