

ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI VÀ GIÁM SÁT TUỔI THỌ CHO HỆ THỐNG PIN XE ĐIỆN SỬ DỤNG BỘ LỌC KALMAN MỞ RỘNG

Lê Đình Hiếu*, Phan Đình Chữ, Trần Văn Tấn Đạt,
Tần Quang Diên, Trần Quang Hùng

Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Đại học Huế

*Email: ledinhhieuh@hueuni.edu.vn

Ngày nhận bài: 8/7/2025; ngày hoàn thành phản biện: 27/7/2025; ngày duyệt đăng: 01/10/2025

TÓM TẮT

Các giải pháp lưu trữ năng lượng tiên tiến với hiệu quả cao và khả năng quản lý vận hành đang thúc đẩy sự phát triển của xe điện. Đặc biệt, bộ pin đóng vai trò là nguồn năng lượng chính cho động cơ, đòi hỏi phải quản lý hiệu quả công suất, tuổi thọ pin và nhiệt độ. Hệ thống quản lý pin là một thành phần thiết yếu, chịu trách nhiệm giám sát điện áp, dòng điện, cân bằng sạc, bảo vệ sạc / xả và kiểm soát nhiệt độ. Nghiên cứu này so sánh về các thuật toán của bộ lọc Kalman và bộ lọc Kalman mở rộng. Kết quả cho thấy bộ lọc Kalman mở rộng mang lại hiệu quả vượt trội hơn, có độ chính xác cao hơn, với sai số dòng điện dưới 1,5% và được áp dụng ở mức khoảng 1%. Sau 50 giờ hoạt động, dung lượng pin giảm từ 4,2 Ah xuống 3,2 Ah ~ 23,8% và trạng thái sức khỏe giảm từ 100% xuống ~ 76%, tiến gần đến giới hạn kỹ thuật là 70%.

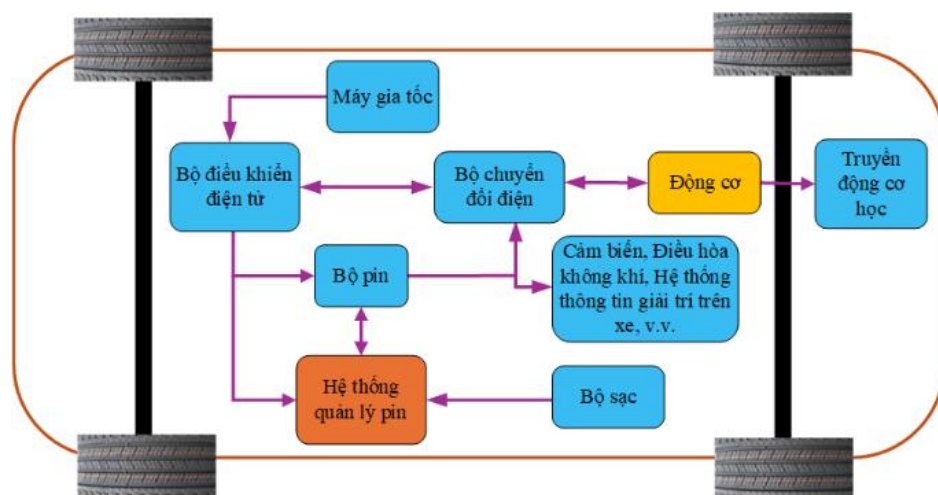
Từ khóa: Hệ thống quản lý pin (BMS), Xe điện (EV), Lithium-ion (LIB), Trạng thái tuổi thọ (SOH), Bộ lọc Kalman (KF), Bộ lọc Kalman mở rộng (EKF).

1. MỞ ĐẦU

Hệ thống truyền động điện đang dần thay thế động cơ đốt trong trong các phương tiện hiện đại, nhờ những tiến bộ trong công nghệ pin, thiết kế phần cứng và tối ưu hóa hệ thống như được nhấn mạnh trong [1]. Qua nghiên cứu [2], có thể thấy rằng các thành phần truyền thống như bình nhiên liệu và hộp số đang được thay thế bằng pin, bộ điều khiển hiệu suất và động cơ điện, đơn giản hóa kiến trúc xe và nâng cao hiệu quả, hiệu quả chi phí và tác động đến môi trường. Bước thay đổi quan trọng trong [3], được trình bày ở trung tâm của sự thay đổi này là pin thứ cấp (có thể sạc lại), đặc biệt là pin LIB có mật độ năng lượng cao, tuổi thọ cao và trọng lượng thấp. Tuy nhiên, LIB cần

được giám sát liên tục để đảm bảo hiệu suất và an toàn, bao gồm cả việc giám sát trạng thái sạc, nhiệt độ và dòng điện như được nêu trong [4]. BMS, được minh họa trong Hình 1, đóng một vai trò quan trọng trong quá trình này bằng cách theo dõi tình trạng pin, quản lý nguồn điện và nhiệt độ, kiểm soát quá trình sạc / xả, đánh giá SOH và bảo vệ chống lại các điều kiện bất thường, do đó đảm bảo độ tin cậy của hệ thống và kéo dài tuổi thọ pin [5].

Người ta hiểu trong [6] rằng sự mất cân bằng điện áp giữa các tế bào pin thường phát sinh trong các chu kỳ sạc và xả do sự khác biệt điện hóa vốn có trong thiết bị lưu trữ năng lượng (ESD). Để giải quyết vấn đề này, BMS bao gồm cân bằng tế bào như một chức năng quan trọng để nâng cao tuổi thọ và an toàn của pin. Bằng cách phát triển các kỹ thuật cân bằng điện áp và điện tích hiệu suất cao, hệ thống đảm bảo phân phối điện áp đồng đều, ngăn ngừa các rủi ro tiềm ẩn như quá nhiệt hoặc hỏa hoạn, đồng thời cải thiện độ tin cậy hoạt động tổng thể.



Hình 1. Hệ thống quản lý ắc quy bên trong xe điện

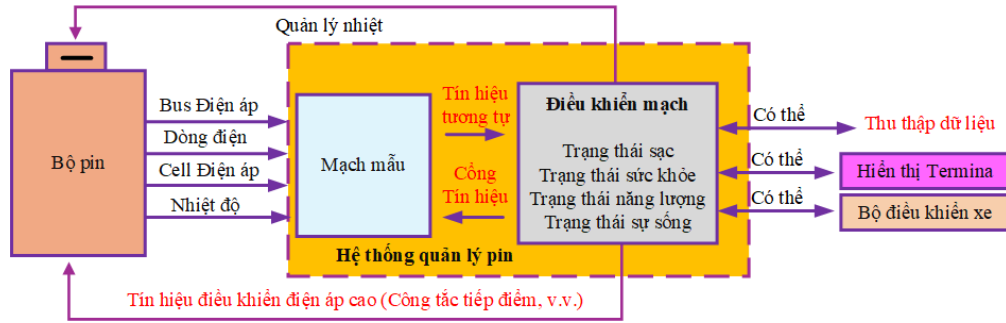
Bài viết được tổ chức như sau: Phần 1 giới thiệu hệ thống quản lý ắc quy của xe điện. Các phương pháp nghiên cứu và thử nghiệm được mô tả trong Phần 2 cùng với các tiêu chí đánh giá. Cuối cùng, các kết luận được trình bày trong Phần 3.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Hệ thống quản lý pin

Trong bộ pin, các tế bào được kết nối nối tiếp hoặc song song để đạt được điện áp và dung lượng cần thiết, nhưng do các đặc tính hoạt động riêng của chúng, mỗi tế bào phải được giám sát và kiểm soát chặt chẽ [7, 8]. Để duy trì hiệu suất và độ bền, hệ thống phải hoạt động trong các giới hạn nghiêm ngặt như nhiệt độ, tốc độ sạc / xả, ngưỡng dòng điện và ranh giới điện áp.

Những nhiệm vụ này được quản lý bởi BMS, hoạt động như "bộ não" của pin, đảm bảo an toàn, kéo dài tuổi thọ và tối ưu hóa hiệu suất. Các chức năng BMS cốt lõi bao gồm giám sát nhiệt độ, kiểm soát nhiệt, cân bằng tế bào, ước tính SOC và SOH và bảo vệ chống xuống cấp [9]. BMS được thiết kế tốt cũng hỗ trợ giao tiếp với các hệ thống xe khác để vận hành đồng bộ và hiệu quả tổng thể của hệ thống. Sơ đồ chung của hệ thống quản lý pin được minh họa trong Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ chung của hệ thống quản lý ắc quy

2.2. Giám sát dòng điện và điện áp trong tế bào pin Li-ion

Xe điện sử dụng bộ pin LIB, trong đó mỗi tế bào có thể hoạt động khác nhau, yêu cầu giám sát liên tục để đảm bảo hoạt động hiệu quả, an toàn. Điều này bao gồm theo dõi voltage, dòng điện, nhiệt độ và phát hiện lỗi để tránh sạc quá mức, sạc thiếu và quá nhiệt. Xả ổn định là điều cần thiết, nhưng bất kỳ sự mất cân bằng nào cũng có thể dẫn đến thiệt hại nghiêm trọng hoặc thậm chí hỏa hoạn. Do đó, điều chỉnh điện áp và dòng điện tế bào trong thời gian thực và hiển thị trạng thái pin tổng thể là rất quan trọng để bảo vệ hệ thống và can thiệp kịp thời [10].

2.3. Triển khai bộ lọc Kalman mở rộng (EKF)

Để mô phỏng giám sát tốt hơn và bao gồm sự không chắc chắn của mô hình. Hai biến ngẫu nhiên $w_k \in \mathbb{R}^n$ và $v_k \in \mathbb{R}^m$ lần lượt đại diện cho nhiễu quá trình và nhiễu đo lường. Không gian trạng thái và phương trình đo lường được mở rộng thành:

$$x_{k+1} = \mathbf{A}_k x_k + \mathbf{B}_k u_k + w_k \quad (1)$$

$$y_k = \mathbf{H}_k x_k + \mathbf{D}_k u_k + v_k \quad (2)$$

Giả định thêm rằng các biến w_k và v_k là nhiễu trắng phân phối Gauss. Nếu nhiễu quá trình và nhiễu đo lường không tương quan và có giá trị trung bình bằng không, có thể giả định rằng:

$$E[ww^t] = Q \quad (3)$$

$$E[vv^t] = r \quad (4)$$

Trong đó, \mathbb{E} là toán tử kỳ vọng thống kê, r là hiệp phương sai của nhiễu đo lường và \mathbf{Q} là ma trận hiệp phương sai của nhiễu quá trình. Để bao gồm hành vi phi tuyến, giả định rằng phương trình không gian trạng thái và phương trình đo lường có dạng:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (5)$$

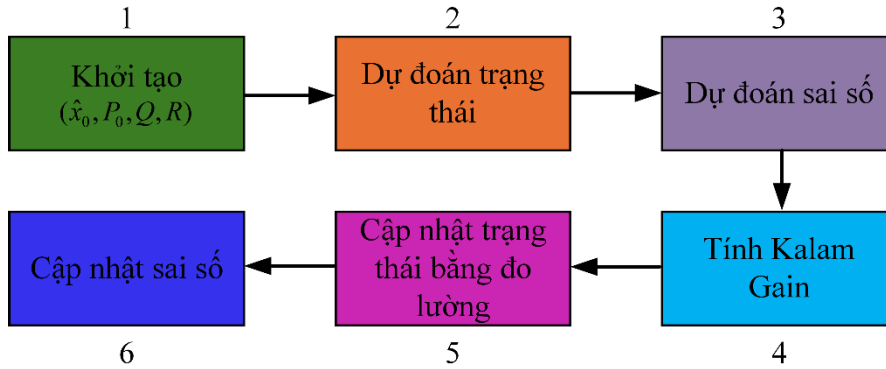
$$y_k = e(x_k, u_k) + v_k \quad (6)$$

Trong đó: f và e là các hàm khả vi.

Nếu độ lệch theo thời gian của hai hàm này là nhỏ, chúng có thể được xấp xỉ bằng khai triển Taylor bậc nhất. Hơn nữa, các hàm này được tính toán tại giá trị xấp xỉ trạng thái gần nhất: hoặc là \hat{x}_k^+ hoặc \hat{x}_k^- . Quy trình này tạo nên sự khác biệt của EKF. Theo giả định này, các ma trận \mathbf{A} và \mathbf{H} từ thương trình (1) và (2) có thể được định nghĩa lại như sau:

$$\mathbf{A}_k := \left. \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k} \quad (7)$$

$$\mathbf{H}_k := \left. \frac{\partial e(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k} \quad (8)$$



Hình 3. Các bước vận hành bộ lọc Kalman mở rộng

2.4. Ước tính và bảo vệ kiểm soát sạc / xả Li-ion

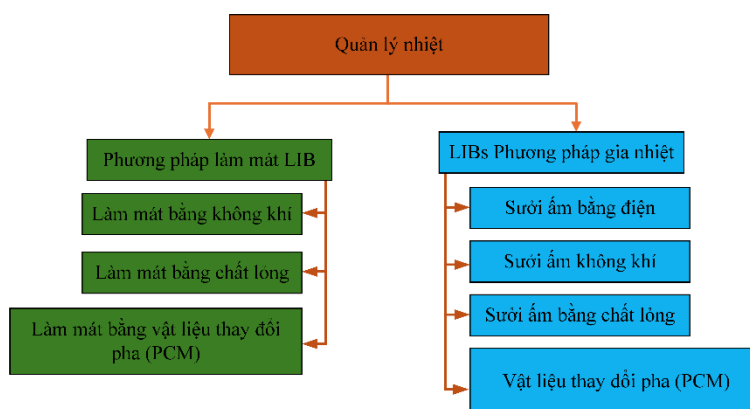
Hiệu suất và tuổi thọ của pin lithium-ion (LIB) phần lớn phụ thuộc vào việc duy trì các điều kiện sạc và xả tối ưu. LIB thường hoạt động ở chế độ dòng điện không đổi – điện áp không đổi (CC–CV) và được quản lý bởi bộ điều khiển PI, với các trạng thái chính như trạng thái chức sạc (SOC), SOH, trạng thái chức năng (SOF) và thời gian sử

dụng còn lại (RUL) được giám sát chặt chẽ [11]. SOC cho biết năng lượng còn lại của pin và có thể được ước tính bằng các phương pháp như điện áp hở mạch (OCV), đếm Coulomb, bộ lọc Kalman và các kỹ thuật dựa trên AI như mạng nơ-ron hoặc logic mờ. SOH phản ánh tình trạng tổng thể của pin, thường được đánh giá thông qua các mô hình phân tích sự xuống cấp, điện trở bên trong và tổn thất dung lượng.

Tình trạng tuổi thọ của pin LIB có thể được đánh giá theo nhiều cách thông qua các phương pháp như đếm Coulomb, điện áp hở mạch, quang phổ trở kháng, lọc Kalman và các kỹ thuật học máy như mạng nơ-ron và máy vectơ hỗ trợ. SOF phản ánh hiệu suất hiện tại của pin so với dung lượng tối đa của nó, trong khi RUL được ước tính bằng cách sử dụng các bộ lọc thích ứng, mô hình Bayes và thuật toán AI. Trong xe điện, pin được cấu hình theo kiểu song song nối tiếp sẽ xuống cấp theo thời gian do các chu kỳ sạc-xả lặp đi lặp lại, gây mất cân bằng. Để giải quyết vấn đề này, BMS giám sát và điều chỉnh quá trình sạc, ngăn ngừa sạc quá mức hoặc xả sâu, đồng thời đảm bảo an toàn tăng tuổi thọ pin.

2.5. Quản lý năng lượng, năng lượng và nhiệt

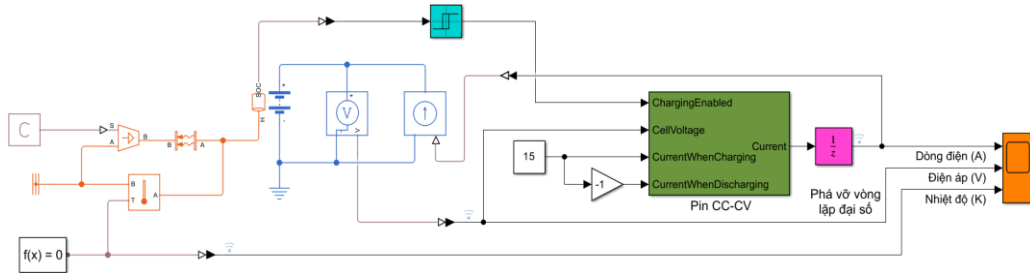
Phân phối điện hiệu quả là một thách thức quan trọng trong lĩnh vực EV, vì quản lý năng lượng không đúng cách có thể làm giảm hiệu suất của hệ thống và dẫn đến mất năng lượng [12]. Các yếu tố như hoạt động không đồng đều của các thiết bị điện tử và nguồn điện không ổn định càng làm giảm hiệu quả của hệ thống lưu trữ pin (BESS). Hệ thống quản lý và điều khiển năng lượng thông minh là cần thiết để đảm bảo cung cấp điện ổn định, giảm tổn thất năng lượng và tối ưu hóa hiệu suất, đồng thời xem xét các yếu tố như SOC, SOH và lão hóa pin [13][14]. Kiểm soát nhiệt độ cũng rất quan trọng để duy trì điều kiện hoạt động an toàn cho pin LIB. BMS kiểm soát các cơ chế sưởi ấm và làm mát để đảm bảo rằng LIB nằm trong phạm vi nhiệt độ tối ưu từ 15°C đến 45°C. Nhiệt độ quá cao, quá thấp hoặc quá cao, có thể làm hỏng pin, gây ra voltage mất cân bằng, hoặc thậm chí dẫn đến các phản ứng nguy hiểm như nổ. Do đó, quản lý nhiệt hiệu quả là điều cần thiết để đảm bảo an toàn và tuổi thọ của hệ thống LIB.



Hình 4. Phân loại hệ thống quản lý nhiệt

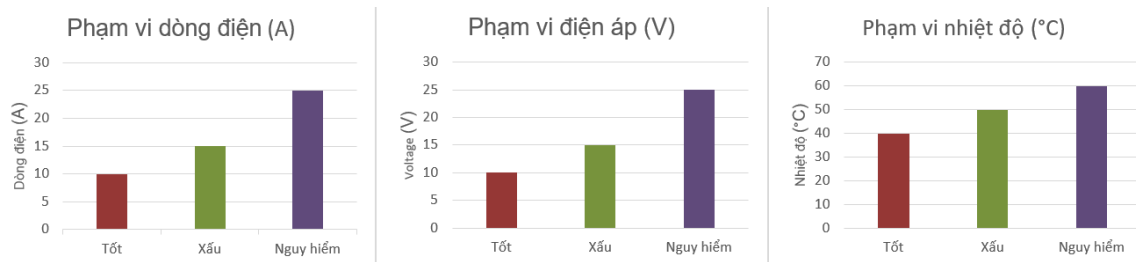
3. KẾT QUẢ

Trong quản lý pin, EKF áp dụng các mô hình phi tuyến như tương đương mạch, RC hoặc mô hình Thevenin để dự đoán trạng thái pin dựa trên tín hiệu dòng điện và điện áp thu được. Sau đó, nó cập nhật các dự đoán này bằng cách sử dụng các phép đo mới và ma trận khuếch đại Kalman để tính đến nhiễu và sự không chắc chắn. Điều này nâng cao độ trung thực và độ bền của BMS, đặc biệt là trong các ứng dụng yêu cầu động lực học cao và hiệu suất thời gian thực.



Hình 5. Mô phỏng quá trình sạc và xả của hệ thống xe điện

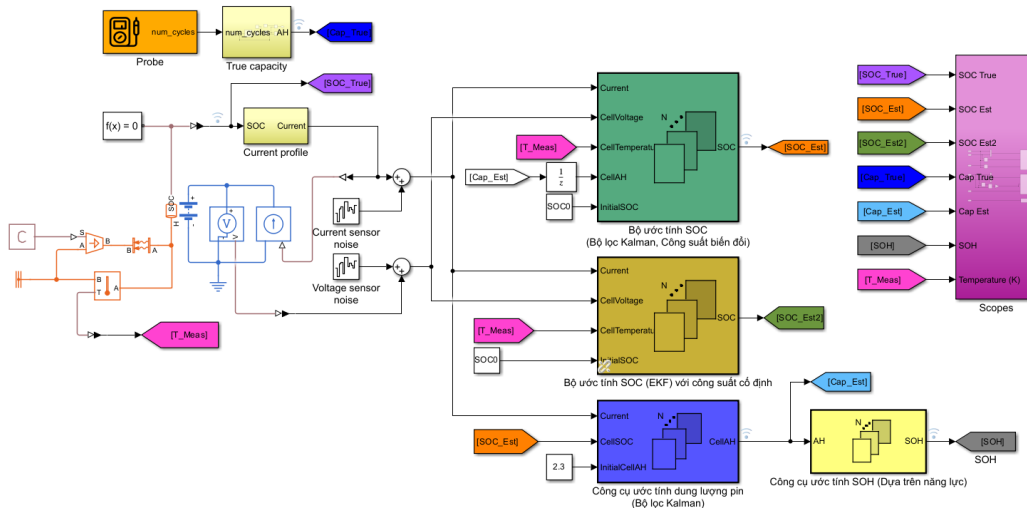
Sơ đồ trên mô phỏng quá trình sạc ắc quy của hệ thống xe điện, bên cạnh việc kiểm tra các điều kiện an toàn khi sạc xe như quá áp, quá dòng và nhiệt độ. Thông qua đó, xây dựng thuật toán điều khiển sạc pin theo tiêu chuẩn CC-CV. Cuối cùng, đánh giá tuổi thọ pin thông qua chu kỳ pin. Cho thấy cách các thuật toán dòng điện và điện áp cố định được sử dụng để chu kỳ pin. Khối pin CC-CV thực hiện các chu kỳ sạc và xả trên pin trong 10 giờ. SOC ban đầu là 0,3. Trong quá trình sạc, dòng điện không đổi cho đến khi pin đạt đến điện áp tối đa, tại thời điểm đó dòng điện bắt đầu giảm, giảm xuống 0. Khi pin cạn kiệt, mô hình sử dụng dữ liệu này để tính toán dòng điện không đổi đầu ra điện.



Hình 6. Kết quả đạt được so với tiêu chuẩn an toàn thế giới[15]

Chúng ta có thể thấy rằng dòng điện tăng mạnh từ mức tốt (10 A) lên mức nguy hiểm (25 A), tăng 150%. Khi dòng xả quá cao, điện trở trong của pin tăng lên và gây thất thoát nhiệt, dễ dẫn đến hư hỏng hoặc nổ. Tiếp theo, điện áp tăng nhẹ (khoảng 2,4%) từ mức tốt đến mức nguy hiểm, nhưng điều này rất quan trọng vì chỉ cần vượt quá 4,2 V có thể gây ra sự phân hủy chất điện phân và phòng pin. Do đó, điều khiển điện áp là chìa khóa. Cuối cùng, nhiệt độ tăng đều đặn 10°C mỗi mức. Nếu nhiệt độ vượt quá 60°C,

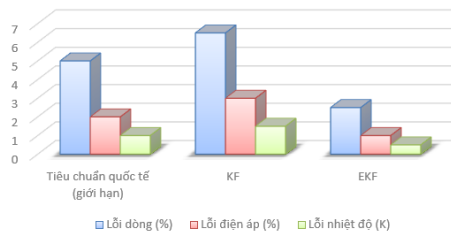
cấu trúc tế bào hóa học sẽ bị phá hủy. Ở mức "Xấu" (50°C), có rủi ro an toàn và nên giảm hoặc dừng sạc / xả.



Hình 7. Mô phỏng tình trạng tuổi thọ của pin dựa trên sự suy giảm dung lượng

Sơ đồ trình bày trong Hình 6 mô phỏng tình trạng tuổi thọ của pin dựa trên sự suy giảm dung lượng, nhằm phân tích và so sánh các phương pháp đánh giá SOC và SOH của pin để đảm bảo an toàn, kéo dài tuổi thọ của pin. Nó cho thấy cách dự đoán dung lượng pin và SOH sử dụng bộ lọc Kalman. Khi bắt đầu mô phỏng, SOC của pin được đặt thành 0,5, thể hiện mức năng lượng 50% so với dung lượng đầy đủ của nó. Ngược lại, công cụ ước lượng trạng thái, hoạt động độc lập với các phép đo trực tiếp, được khởi tạo với giá trị SOC giả định là 0,8. Sự khác biệt có chủ ý giữa SOC thực và ước tính này cho phép đánh giá có ý nghĩa về khả năng hội tụ của công cụ ước tính về SOC thực tế theo thời gian, đặc biệt là trong các điều kiện sạc và phóng điện khác nhau. Trong khoảng thời gian 50 giờ, pin trải qua nhiều chu kỳ sạc và xả. Dung lượng của pin (Ah) và SOC được ước tính bằng EKF, đạt được sai số ước tính dung lượng dưới 4%. Khi SOC được ước tính bằng cách sử dụng công suất cố định, một sai lệch đáng chú ý so với SOC thực sự sẽ xảy ra. Để thể hiện chính xác chức năng của công cụ ước tính và giảm thời gian mô phỏng, mô hình hóa tỷ lệ mòn dần công suất là điều cần thiết.

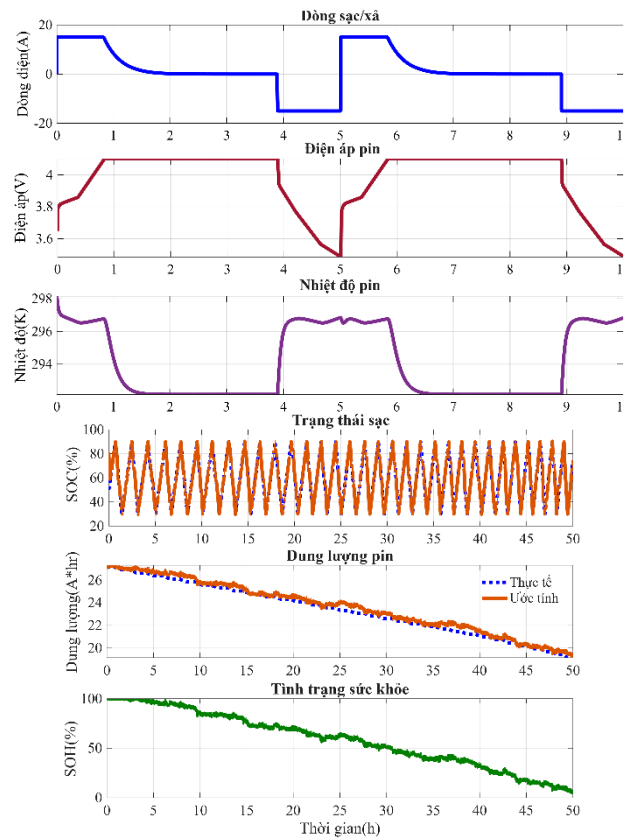
So sánh tiêu chuẩn KF và EKF với tiêu chuẩn thế giới



Hình 8. So sánh các thuật toán KF và EKF với tiêu chuẩn kiểm tra an toàn của thế giới [15]

Đầu tiên, KF vượt quá giới hạn tiêu chuẩn trong cả ba yếu tố, đặc biệt là sai số dòng điện và nhiệt độ. Ngược lại, EKF nằm trong giới hạn an toàn và thấp hơn tiêu chuẩn quốc tế, thể hiện độ chính xác vượt trội. So sánh KF và EKF, có thể thấy EKF giảm sai số dòng điện từ 7% khoảng 3% (giảm ~ 57%), sai số điện áp từ 4% khoảng 2% (giảm 50%) và sai số nhiệt độ từ 2K khoảng 0,5K (giảm 75%). Với các thông số trên, chúng ta có thể thấy rằng EKF rõ ràng vượt trội hơn KF về SOC, SOH. Quan trọng hơn, yêu cầu về an toàn được coi là ngưỡng an toàn tối đa của IEC 62660-1, SAE J2464 và UL 2580. EKF không chỉ đáp ứng mà còn vượt quá tiêu chuẩn này. KF có sai số vượt quá giới hạn quốc tế nên chỉ phù hợp với các hệ thống đơn giản không yêu cầu độ chính xác cao.

Từ cơ sở thuật toán của Hình 4 và Hình 6, kết quả được thể hiện rõ ràng trong Hình 8.a) và Hình 8.b) cho thấy dòng sạc/xả, điện áp thay đổi theo chu kỳ nhiệt độ, tăng khi sạc/xả mạnh, giảm với pin không tải cùng với biểu đồ chu kỳ sạc / xả liên tục, dung lượng pin thực tế, ước tính giảm dần và cho thấy tuổi thọ pin giảm dần khi số chu kỳ tăng lên. Từ kết quả mô phỏng, có thể thấy một số hạn chế. Đối với Hình 8a, vì đây là mô tả ngắn hạn 10 giờ nên chất lượng ước tính SOC / SOH không rõ ràng, chỉ có dữ liệu đầu vào. Ngoài ra, Hình 8b, SOC dao động mạnh, điều này không đại diện cho pin được sử dụng trong một ứng dụng ổn định. Ngoài ra, sai số trong ước tính công suất tăng dần, dẫn đến SOC không chính xác nếu không hiệu chỉnh và không thấy ảnh hưởng của nhiệt độ lên SOH. Ngược lại, những ưu điểm mà nó mang lại cũng rất đáng kể, chẳng hạn như phản ánh chính xác các điều kiện hoạt động thực tế cho pin. Dữ liệu đủ để nhập công cụ ước tính SOC / SOH và hiển thị rõ ràng tác động của dòng sạc và nhiệt độ đối với điện áp.



a)

b)

Hình 9. a) Kết quả mô phỏng việc sạc/xả dòng điện, voltage mức và giá trị nhiệt độ liên quan đến pin; b) Kết quả mô phỏng trạng thái thực tế và ước tính của giá trị sạc, dung lượng và tình trạng tuổi thọ pin.

Đồng thời, hiệu quả của thuật toán ước tính chỉ số SOC và SOH được đánh giá, phản ánh rõ ràng các hiện tượng lão hóa và suy giảm dung lượng của pin bao gồm cả công cụ ước tính cuối cùng hoạt động tốt, với sai số nhỏ được làm rõ trong Bảng 1.

Bảng 1. So sánh lỗi định lượng giữa Bộ lọc Kalman và Bộ lọc Kalman mở rộng

Phương pháp	RMSE	MAE
Bộ lọc Kalman	0.0146	0.0109
Bộ lọc Kalman mở rộng	0.0092	0.0068

Có thể thấy EKF cho giá trị RMSE và MAE thấp hơn so với KF, cho thấy khả năng ước lượng tốt hơn trong hệ thống có tính phi tuyến.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bằng cách phân tích chu kỳ sạc/xả pin và sự xuống cấp, hiệu quả của EKF và KF trong việc ước tính trạng thái và tuổi thọ của pin có thể được đánh giá. Trong chu kỳ làm việc 10 giờ điển hình, dòng điện dao động trong khoảng +20 A (sạc) và -20 A (xả), điện áp thay đổi từ 2,5 V đến 4,2 V và nhiệt độ thay đổi một chút từ 298 K đến 295 K. EKF theo dõi chính xác SOC, cho thấy sai số tối thiểu trong điều kiện tải động. Trong 50 giờ, dung lượng pin giảm từ khoảng 4,2 Ah xuống 3,2 Ah, giảm 23,8%, trong khi SOH giảm từ 100% xuống khoảng 76%, cho thấy sự suy giảm liên quan đến chu kỳ. Những phát hiện này làm nổi bật khả năng của EKF, KF trong việc ước tính các trạng thái thời gian thực bao gồm SOC và theo dõi sự suy giảm lâu dài để dự đoán tuổi thọ pin. Giả sử suy giảm tuyến tính, ngưỡng SOH là 70% (thường đánh dấu hết tuổi thọ) sẽ đạt được sau 65–70 h, cho phép BMS lên lịch bảo trì hoặc thay thế kịp thời. Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn tồn tại những hạn chế nhất định khi mới chỉ thực hiện thực nghiệm trên mô hình của một dòng pin cụ thể mà chưa mở rộng đối chứng trên nhiều chủng loại hóa học pin khác nhau. Đồng thời, mặc dù phương pháp lọc cổ điển đã chứng minh được tính ổn định, việc tích hợp các công nghệ trí tuệ nhân tạo AI để nâng cao khả năng thích nghi và độ chính xác trong môi trường nhiễu phức tạp vẫn là một hướng đi triển vọng cần được khai thác trong tương lai.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo này được hỗ trợ kinh phí nghiên cứu theo mã Đề án: B2024-DHH-11 và Đại học Huế thuộc Chương trình nghiên cứu tiên tiến, số. K.KTCN2025-SV-02.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Liu et al., "Comparative analysis of non-exhaust airborne particles from electric and internal combustion engine vehicles," *Journal of hazardous materials*, Vol. 420, p. 126626, (2021).
- [2] M.-A. Beaudoin and B. Boulet, "Fundamental limitations to no-jerk gearshifts of multi-speed transmission architectures in electric vehicles," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 160, p. 104290, (2021).
- [3] O. A. Kuznetsov, S. Mohanty, E. Pigos, G. Chen, W. Cai, and A. R. Harutyunyan, "High energy density flexible and ecofriendly lithium-ion smart battery," *Energy Storage Materials*, Vol. 54, pp. 266-275, (2023).
- [4] A. Samanta and S. S. Williamson, "A comprehensive review of lithium-ion cell temperature estimation techniques applicable to health-conscious fast charging and smart battery management systems," *Energies*, Vol. 14, no. 18, p. 5960, (2021).

- [5] M. S. H. Lipu et al., "Battery management, key technologies, methods, issues, and future trends of electric vehicles: A pathway toward achieving sustainable development goals," *Batteries*, Vol. 8, no. 9, p. 119, (2022).
- [6] A. A. Habib et al., "Voltage equalization circuit for retired batteries for energy storage applications," *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 367-374, (2022).
- [7] Z. Song, X.-G. Yang, N. Yang, F. P. Delgado, H. Hofmann, and J. Sun, "A study of cell-to-cell variation of capacity in parallel-connected lithium-ion battery cells," *ETransportation*, Vol. 7, p. 100091, (2021).
- [8] A. Nath and B. Rajpathak, "Analysis of cell balancing techniques in BMS for electric vehicle," in *2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSPP)*, (2022).
- [9] R. R. Kumar, C. Bharatiraja, K. Udhayakumar, S. Devakirubakaran, K. S. Sekar, and L. Mihet-Popa, "Advances in batteries, battery modeling, battery management system, battery thermal management, SOC, SOH, and charge/discharge characteristics in EV applications," *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 105761-105809, (2023).
- [10] S. K. Pradhan and B. Chakraborty, "Battery management strategies: An essential review for battery state of health monitoring techniques," *Journal of energy storage*, Vol. 51, p. 104427, (2022).
- [11] L. M. Baicu, M. Andrei, and B. Dumitrascu, "Microcontroller-Based Platform for Lithium-Ion Battery Charging and Experimental Evaluation of Charging Strategies," *Technologies*, Vol. 13, no. 5, p. 178, (2025).
- [12] C. Zhao, P. B. Andersen, C. Træholt, and S. Hashemi, "Grid-connected battery energy storage system: a review on application and integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 182, p. 113400, (2023).
- [13] G. Vennam, A. Sahoo, and S. Ahmed, "A survey on lithium-ion battery internal and external degradation modeling and state of health estimation," *Journal of Energy Storage*, Vol. 52, p. 104720, (2022).
- [14] H. Liu et al., "Big field data-driven battery pack health estimation for electric vehicles: A deep-fusion transfer learning approach," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 218, p. 111585, (2024).
- [15] J. Jaguemont and F. Bardé, "A critical review of lithium-ion battery safety testing and standards," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 231, p. 121014, (2023).

STATE ESTIMATION AND HEALTH MONITORING IN ELECTRIC VEHICLE BATTERY SYSTEMS USING THE EXTENDED KALMAN FILTER

Le Dinh Hieu*, Phan Dinh Chu, Tran Van Tan Dat,
Tan Quang Dien, Tran Quang Hung

School of Engineering and Technology, Hue University

*Email: ledinhhieuh@hueuni.edu.vn

ABSTRACT

Advanced energy storage solutions with high efficiency and optimized operational management are accelerating the rapid development of electric vehicles (EVs). In particular, the battery pack, serving as the primary energy source for the traction motor, requires efficient management of power delivery, lifespan, and temperature. The Battery Management System (BMS) is a critical component responsible for monitoring voltage and current, performing charge balancing, preventing overcharge and overdischarge, and regulating thermal conditions.

A comparative analysis between the Kalman Filter (KF) and the Extended Kalman Filter (EKF) algorithms indicates that the EKF achieved higher estimation accuracy, with a current measurement error below 1.5% and an application deviation of approximately 1%. After 50 hours of operation, the battery capacity decreased from 4.2 Ah to 3.2 Ah (a reduction of approximately 23.8%), and the State of Health (SOH) declined from 100% to around 76%, approaching the technical threshold of 70%.

Keywords: Battery Management System (BMS), Electric Vehicle (EV), Lithium-Ion Battery (LIB), State of Health (SOH), Kalman Filter (KF), Extended Kalman Filter (EKF).