

NGHIÊN CỨU SO SÁNH PHƯƠNG PHÁP ƯỚC LƯỢNG THÔNG SỐ TRONG ỨNG DỤNG GIÁM SÁT TÌNH TRẠNG VẬN HÀNH CỦA SIÊU TỤ

A COMPARATIVE STUDY OF PARAMETER ESTIMATION METHODS
IN THE APPLICATION OF CONDITION MONITORING FOR SUPERCAPACITORS

Nguyễn Đăng Toàn¹, Vũ Hoàng Giang^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2025.376>

TÓM TẮT

Hệ thống tích trữ năng lượng cung cấp nhiều dịch vụ phụ trợ về cả phương diện công suất và điện năng, điều này cho phép hỗ trợ việc vận hành và ổn định hệ thống điện hiện đại. Trong đó, siêu tụ ngày càng thu hút nhiều sự chú ý bởi khả năng có thể hỗ trợ hệ thống trong các chế độ quá độ với tính chất động học nhanh. Trong quá trình vận hành, siêu tụ chịu các tác động khác nhau từ điện áp và nhiệt làm cho chúng bị lão hóa và có thể gây ra các lỗi bên trong. Do đó, giám sát tình trạng của siêu tụ đóng vai trò quan trọng trong đảm bảo hiệu quả và độ tin cậy trong vận hành hệ thống. Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu so sánh hai phương pháp ước lượng thông số chính của siêu tụ là điện dung và điện trở nối tiếp tương đương. Phương pháp bình phương cực tiểu đệ quy và phương pháp dựa trên bộ lọc Kalman không tuyến tính được lựa chọn trong nghiên cứu này. Kết quả phân tích và mô phỏng cho thấy, hai phương pháp có thể cung cấp thông tin về thông số đáp ứng mục đích giám sát tình trạng của siêu tụ. Hơn nữa, phương pháp sử dụng UKF cho kết quả ước lượng với sai lệch ước lượng nhỏ và đáp ứng nhanh trong hệ thống có sự thay đổi đột ngột về thông số do lỗi trong siêu tụ.

Từ khóa: Điện trở nối tiếp tương đương, giám sát tình trạng, phương pháp bình phương cực tiểu hồi quy, bộ lọc Kalman không tuyến tính, siêu tụ.

ABSTRACT

Energy storage systems provide various auxiliary services in terms of power and energy that allow to support for the operation and stability of modern power systems. Among them, supercapacitors are increasingly attracting much attention due to their ability to support systems in transient regimes with fast dynamic characteristics. During operation, supercapacitors are subjected to effects from voltage and heat, which cause them to age and may lead to internal faults. Therefore, monitoring the condition of supercapacitors plays an important role in ensuring the efficiency and reliability of system operation. This paper presents the results of a comparative study of estimation methods for two main supercapacitor parameters, namely capacitance and equivalent series resistance. The Recursive Least Squares (RLS) method and the Unscented Kalman filter (UKF) based technique are selected. The analysis and simulation results show that these two methods are able to provide parameter information that meets the purpose of monitoring the condition of the supercapacitor. Furthermore, the UKF based method provides with small estimation errors and fast response in systems where sudden changes of parameter may occur due to supercapacitor faults.

Keywords: Equivalent series resistance, condition monitoring, recursive least squares, unscented Kalman filter, supercapacitor.

¹Khoa Năng lượng mới, Trường Đại học Điện lực

*Email: giangvh@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 01/7/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 24/9/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2025

1. GIỚI THIỆU

Mức độ thâm nhập của nguồn điện sử dụng năng lượng tái tạo vào hệ thống điện (HTĐ) ngày càng tăng ở

nhiều quốc gia. Sự phát triển này nhằm đáp ứng nhu cầu của phụ tải và quá trình chuyển dịch năng lượng trong lĩnh vực phát điện. Tuy nhiên, do đặc tính bất định của các

nguồn điện này, nhiều tác động tiêu cực trở lại đã được đề cập như là một vấn đề cần xem xét thỏa đáng, hướng đến quá trình phát triển năng lượng bền vững. Sử dụng các hệ thống tích trữ năng lượng được xem là một giải pháp giảm thiểu các tác động và nâng cao hiệu quả của toàn HTĐ nói chung.

Ở quy mô lớn, thủy điện tích năng được xem là loại tích trữ năng lượng tập trung và hiệu quả. Trong khi đó các loại tích trữ năng lượng cỡ nhỏ hơn như ắc quy phù hợp với các lưới điện có nguồn phân tán. Ắc quy là loại tích trữ năng lượng phổ biến nhất với sự đa dạng về công nghệ chế tạo và ứng dụng vì vậy giá thành cũng có tính cạnh tranh cao. Tuy nhiên, trong chế độ vận hành có dao động công suất nhanh, ắc quy gặp khó khăn nhất định trong việc đáp ứng yêu cầu khôi phục sự ổn định các thông số của HTĐ. Trong những ứng dụng như vậy, sự kết hợp với siêu tụ (supercapacitors - SC) cho thấy tính hiệu quả được cải thiện rõ ràng. SC có mật độ công suất và khả năng phóng, nạp với tốc độ cao hơn nhiều so với ắc quy. Vì vậy, nếu chiến lược điều khiển phù hợp được áp dụng để phân chia công suất giữa hai loại hệ thống tích trữ năng lượng này thì có thể phát huy được ưu điểm của chúng trong hoàn thành mục tiêu điều khiển công suất chung của hệ thống.

Siêu tụ có thể được sử dụng trong các hệ thống điện tử công suất để đáp ứng tải đỉnh. Ví dụ trong xe điện, SC dùng để cung cấp năng lượng trong quá trình quá độ và tích trữ năng lượng trong quá trình hãm tái sinh (như trong các tàu điện đường sắt). Ưu điểm nổi bật của SC bao gồm điện dung lớn, điện trở nối tiếp nhỏ, thân thiện với môi trường, tuổi thọ (vòng đời) dài và đặc biệt có thể điều khiển dễ dàng nhờ sự kết hợp với các linh kiện, bộ biến đổi điện tử công suất [1-3]. Tụ điện lớp kép (The double-layer capacitor - DLC) là phần tử phù hợp với ứng dụng cung cấp nguồn điện không gián đoạn; phối hợp cùng ắc quy cho phép cắt đỉnh của tải. SC có ưu điểm về mật độ công suất cao hơn so với ắc quy và khoảng từ 10 đến 20 lần so với tụ điện điện phân [4]. Loại tụ điện lớp kép sử dụng vật liệu nền các bon phù hợp cho các ứng dụng liên quan đến công suất. Nhược điểm của SC là điện áp định mức thấp, đòi hỏi cần ghép nối tiếp nhiều SC để có điện áp phù hợp với ứng dụng. Ngoài ra, hiện tượng tự phóng và hạn chế về đáp ứng tần số cũng là nhược điểm của SC [5].

Tuổi thọ của SC phụ thuộc vào chế độ làm việc trong từng ứng dụng cụ thể. Trong các hệ thống đòi hỏi phóng hoặc nạp sâu với dòng điện lớn thì SC sẽ bị phát nóng mạnh và quá trình lão hóa diễn ra nhanh. Dưới tác động của nhiệt và điện áp, SC bị già cỗi và kéo theo sự thay đổi

của các thông số mô hình mạch tương đương như điện trở nối tiếp tương đương (ESR) và điện dung của tụ (C). Trong ứng dụng xe điện, SC được coi là đã già cỗi nếu điện dung suy giảm 20% hay điện trở nối tiếp tương đương tăng hai lần [1]. Trong quá trình lão hóa có thể xuất hiện các khuyết tật, làm suy giảm hiệu suất của SC, nặng hơn có thể dẫn tới hỏng hóc.

Để xác định thông số mô hình ứng với các mạch điện tương đương, nhiều phương pháp có thể áp dụng. Thông số của mô hình với mạch tương đương ba nhánh được xác định dựa trên phương pháp tối ưu phân đoạn (Segmentation Optimization - SO). Đây là phương pháp dựa trên phân tích mạch và phương pháp bình phương cực tiểu đệ quy [2]. Bộ đồng ước lượng để xác định thông số mô hình và trạng thái sạc của siêu tụ được đề xuất trong [3], trong đó bộ lọc Kalman mở rộng được sử dụng để điều chỉnh thông số mô hình, trong khi bộ lọc Kalman không tuyến tính (UKF) được thiết kế nhằm đảm bảo khả năng ước lượng trạng thái nhanh và ổn định. Mô hình số được xây dựng và kiểm chứng trong [4]. Đồng thời, một kỹ thuật quan sát theo kiểu Luenberger đã được sử dụng để đánh giá trạng thái sạc (State of Charge - SoC) trong thời gian thực.

Trong giám sát tình trạng và chẩn đoán lỗi của SC, sự tăng lên của ESR thể hiện sự lão hóa điện cực, các lớp vật lý hoặc lỗi bên trong; hoặc sự tăng lên của các điện trở thành phần của ESR. Sự lão hóa cũng dẫn đến sự suy giảm giá trị điện dung, làm giảm hiệu suất lưu trữ của SC. Giám sát điện dung cho phép xác định được trạng thái sức khỏe (State of Healthy - SoH) và tuổi thọ còn lại của SC. Sự kết hợp giữa hai thông số này còn cho phép phân biệt lỗi ở lớp điện môi hay lỗi dẫn điện.

Trong nghiên cứu này, mô hình truyền thống bao gồm điện trở nối tiếp tương đương và điện dung được lựa chọn vì tính đơn giản trong khi vẫn cho phép có thể thực hiện mô phỏng, điều khiển và đánh giá hiệu năng của tụ. Điện trở nối tiếp tương đương là thông số thể hiện cho tổn hao năng lượng do nội trở, điện trở tiếp xúc và điện trở của chất điện phân. Trong vận hành, giá trị điện trở quyết định độ sụt áp tức thời khi dòng nạp thay đổi. Trong khi đó, thông số chức năng chính của SC là điện dung, quyết định năng lượng điện trường mà tụ điện có thể tích lũy. Đây là thông số quan trọng trong thiết kế điều khiển chính xác quá trình phóng nạp của SC. Trường hợp lý tưởng, điện dung được giả thiết không đổi. Tuy nhiên, điện dung thực tế thay đổi phụ thuộc vào điện áp và nhiệt độ làm việc. Mặc dù đơn giản nhưng sơ đồ này có thể được sử dụng trong các phân tích chế độ phóng

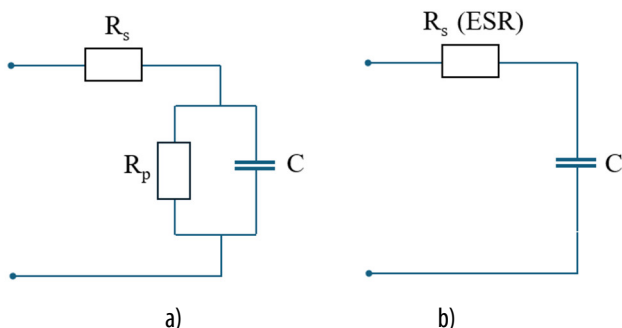
nạp của SC và phục vụ cho các mục đích cơ bản khác. Từ nhận định này, dựa trên mô hình của mạch điện tương đương đơn giản, hai phương pháp ước lượng thông số đã được áp dụng để xác định điện dung và điện trở nối tiếp tương đương của SC. Thuật toán RLS có thể được sử dụng trong xác định thông số ban đầu, ở chế độ ổn định; trong khi thuật toán UKF phù hợp với giám sát tình trạng của SC trong miền thời gian thực. Ngoài ra, việc sử dụng hệ số quên thích nghi của thuật toán RLS và các bộ lọc kết hợp sau ước lượng của thuật toán UKF cũng được đề xuất để nâng cao chất lượng ước lượng.

Phần tiếp theo của bài báo được cấu trúc như sau: Phần 2 giới thiệu mô hình của siêu tụ. Trong mục 3, mô hình thuật toán bình phương cực tiểu hồi quy và bộ lọc Kalman không tuyến tính được trình bày và áp dụng cho mô hình của siêu tụ. Các kết quả mô phỏng và phân tích được trình bày trong mục 4. Cuối cùng là một số kết luận được đưa ra trong mục 5.

2. MÔ HÌNH SIÊU TỤ

Trong nghiên cứu SC, các sơ đồ mạch điện thay thế được đề xuất để mô tả phản ứng của SC. Để thể hiện đầy đủ hơn quá trình vật lý bên trong của SC trong quá trình phóng, nạp thì đòi hỏi các mô hình phức tạp hơn. Các sơ đồ mạch điện thay thế của SC cũng rất khác nhau tùy thuộc vào mục tiêu ứng dụng và quá trình xác định mô hình. Mô hình có thể được sử dụng để phân tích trong miền tần số hoặc trong miền thời gian. Trong nhóm thứ nhất, các mô hình mạch điện tương đương sử dụng trở kháng Warburg (điện hóa) kết hợp phần tử mô phỏng hành vi điện dung không lý tưởng, do bề mặt điện cực không đồng nhất, lổ xổp phức tạp, hoặc sự phân bố thời gian trễ, trở kháng lổ xổp [5].

Mô hình đơn giản nhất gồm có điện dung, điện trở song song tương đương và điện trở nối tiếp tương đương [6, 7], được minh họa trên hình 1.



Hình 1. Mô hình đơn giản của siêu tụ trong đó:

- R_s bao gồm điện trở điện phân và điện trở tiếp xúc;

- R_p mô hình hóa hiện tượng tự phóng của siêu tụ thái [6, 7].

Khi không xét tới hiện tượng tự phóng, sơ đồ mạch tương đương của siêu tụ được đơn giản hóa như trên hình 1b. Mô hình mạch điện tương đương hình 1 phù hợp để định cỡ (xác định công suất) hệ thống và mô phỏng các quá trình phóng, nạp với tốc độ chậm của SC [8]. Thông số của các phần tử trên sơ đồ có thể thu được từ bảng thông số kỹ thuật của SC do nhà sản xuất cung cấp. Để mô tả đầy đủ hơn, đặc biệt là các quá trình phóng, nạp nhanh thì các mạch điện phức tạp với nhiều nhánh được sử dụng [5, 8, 9].

3. THUẬT TOÁN ƯỚC LƯỢNG THÔNG SỐ

Mục này trình bày áp dụng phương pháp bình phương cực tiểu đệ quy (RLS) và phương pháp dựa trên bộ lọc Kalman để ước lượng ESR và C. Từ phương trình trạng thái của SC, thông số cần ước lượng phù hợp được thiết lập để áp dụng cấu trúc của các thuật toán RLS và UKF. Hơn nữa, cải tiến phương pháp RLS bằng cách sử dụng hệ số quên (Adaptive Forgetting Factor) thích nghi cũng được áp dụng để ổn định sai số ước lượng.

3.1. Thuật toán bình phương cực tiểu đệ quy (RLS)

Từ có phương trình:

$$v(t) = R_s i(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (1)$$

trong đó: R_s là ESR (đơn vị là Ω); C là điện dung (đơn vị là F); v : điện áp đầu cực (đơn vị là V); và i : dòng điện đầu vào (đơn vị là A).

Đặt $q(t) = \int_0^t i(\tau) d\tau$, phương trình (1) có thể được viết dưới dạng:

$$v(t) = \theta_1 i(t) + \theta_2 q(t) \quad (2)$$

$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2]^T$ là véc tơ thông số cần ước lượng. Để áp dụng thuật toán bình phương cực tiểu đệ quy (RLS), định nghĩa các thành phần như sau:

- Véc tơ đặc trưng: $\phi(t) = \begin{bmatrix} i(t) \\ q(t) \end{bmatrix}$
- Đầu ra (được đo): $y(t) = v(t)$
- Sai lệch: $e(t) = y(t) - \phi^T(t) \cdot \theta(t)$

Các phương trình cập nhật RLS:

Cập nhật thông số và cập nhật ma trận hiệp phương sai tương ứng là:

$$K(t) = \frac{P(t-1) \cdot \phi(t)}{\lambda + \phi^T(t) P(t-1) \cdot \phi(t)} \quad (3)$$

$$\theta(t) = \theta(t-1) + K(t) \cdot e(t) \quad (4)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda} [P(t-1) - K(t)\phi^T(t)P(t-1)] \quad (5)$$

Trong đó: λ là hệ số quên, $\lambda \in (0,1]$; $P(t)$: ma trận hiệp phương sai.

Rời rạc hóa phương trình với thời gian lấy mẫu Δt , đặt $\theta_1 = R_s$; $\theta_2 = 1/C$; mô hình trở thành:

$$v[k] = \theta_1 i[k] + \theta_2 \sum_{j=0}^k i[j] \Delta t \quad (6)$$

Đặt $\phi[k] = \begin{bmatrix} i[k] \\ \sum_{j=0}^k i[j] \Delta t \end{bmatrix}$, $y[k] = v[k]$, từ đó có thể viết (3) dạng hồi quy tuyến tính:

$$y[k] = \phi^T[k] \cdot \theta[k] + e[k] \quad (7)$$

trong đó: $\theta[k] = \begin{bmatrix} \theta_1[k] \\ \theta_2[k] \end{bmatrix}$: thông số cần ước lượng; $e[k]$: sai số mô hình.

Cách tính hệ số quên thích nghi rất đa dạng cho các ứng dụng khác nhau [10, 11]. Hệ số quên có thể điều chỉnh dần theo thời gian và tiến dần đến 1 khi bước k tăng [12, 13]. Trong nghiên cứu này, hệ số quên thích nghi được điều chỉnh tăng dần khi k tăng theo quy luật sau:

$$\lambda[k] = 1 - \frac{1}{k+c} \quad (8)$$

trong đó: c là hằng số để tăng tốc học khởi tạo. Có thể thấy so với trường hợp sử dụng hệ số quên không đổi, thuật toán sẽ quên dữ liệu cũ theo hàm mũ với một tốc độ cố định. Trong khi đó, với công thức được lựa chọn, hệ số quên sẽ tiến dần đến 1, nghĩa là mức độ quên giảm dần theo thời gian và tốc độ giảm chậm lại khi k tăng lên. Ưu điểm của công thức là đơn giản trong thực hiện và giúp thuật toán ổn định hơn, đặc biệt trong môi trường nhiễu. Giá trị ban đầu của hệ số quên nhỏ hơn 1 cho phép thuật toán phản ứng tốt hơn với dữ liệu mới. Tuy nhiên, phản ứng đối với các biến động sau này kém hơn và là một nhược điểm trong giám sát thông số của hệ thống.

3.2. Bộ lọc Kalman không lấy mẫu tuyến tính (UKF)

Trong phương trình (1) ta có u_c là điện áp trên điện dung C: $\frac{du_c}{dt} = \frac{i(t)}{C}$.

Áp dụng thuật toán UKF [14] vào cho hệ thống với các lựa chọn như sau:

- Lựa chọn trạng thái cần ước lượng là: $x(t) = [u_c \ R_s \ \log(C)]^T$, trong đó, biến trạng thái $\log(C)$ để đảm bảo giá trị dương của điện dung.

- Mô hình phi tuyến có dạng:

$$u_c[k+1] = u_c[k] + \frac{i[k]}{C[k]} \cdot \Delta t, \quad C[k] = e^{x_3[k]}$$

- Đầu vào: $u(t) = i(t)$

- Giá trị đo là điện áp đầu cực:

$y_k = v(k) = R_s(k) \cdot i(k) + u_c(k) + \omega_{mk}$, trong đó: ω_{mk} nhiễu đo.

Sau khi ước lượng được điện dung và điện trở, bộ lọc được áp dụng để xử lý nhiễu đảm bảo tính ổn định và độ chính xác của kết quả. Bộ lọc Gaussian để làm mượt dữ liệu thời gian bằng tích chập nhân Gauss và bộ lọc Butterworth (thông thấp, tuyến tính bậc 2) để xử lý các nhiễu lặp, dao động không đều.

Bộ lọc Gaussian được thiết kế dựa trên Hàm Gaussian:

$$G(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{k^2}{2\sigma^2}}.$$

Bộ lọc Butterworth bậc n có hạng truyền:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega/\omega_c)^{2n}}}$$

trong đó, ω_c : tần số cắt.

Dù đã lọc bằng Gaussian, vẫn có dao động nhỏ giá trị điện dung ước lượng do đo lường nhiễu hoặc động học không mô hình hóa hết.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Mục này giới thiệu kết quả siêu tụ với mô hình mạch điện tương đương đơn giản trong hình 1. Các phương trình mô tả siêu tụ và thuật toán trình bày trong mục 3. Thông số của SC được lấy từ dữ liệu thực tế của siêu tụ do Maxwell Technologies sản xuất [15]. Thông số chính bao gồm điện dung $C = 380F$, điện trở nối tiếp tương đương: $ESR = 2,8m\Omega$, dòng điện hiệu dụng làm việc liên tục $I_{max} = 25A$ và điện áp định mức $V_r = 2,7V$.

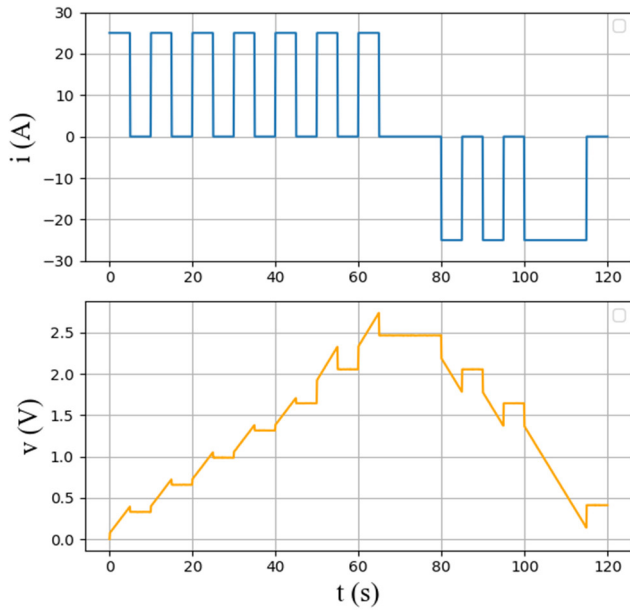
Ma trận hiệp phương sai trong thuật toán RLS được chọn bằng $P = \begin{bmatrix} 10^3 & 0 \\ 0 & 10^3 \end{bmatrix}$;

Các ma trận hiệp phương sai trong thuật toán UKF (trạng thái, quá trình và đo lường) được chọn bằng:

$$P = \begin{bmatrix} 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 \end{bmatrix}; \quad Q = \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} \end{bmatrix}; \quad R = 10^{-6}$$

Đáp ứng của điện áp đầu cực của SC khi dòng điện thay đổi được thể hiện trên hình 2. Trong điều kiện đầu vào của dòng điện đã cho, hai kịch bản mô phỏng ước lượng thông số được thực hiện bao gồm:

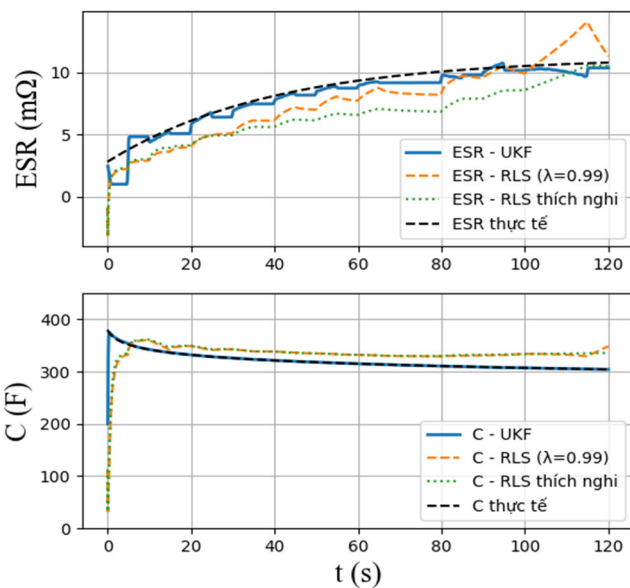
- Quá trình lão hóa làm thay đổi thông số theo thời gian với tốc độ thay đổi chậm;
- Sự thay đổi đột ngột của thông số do lỗi bên trong tụ.



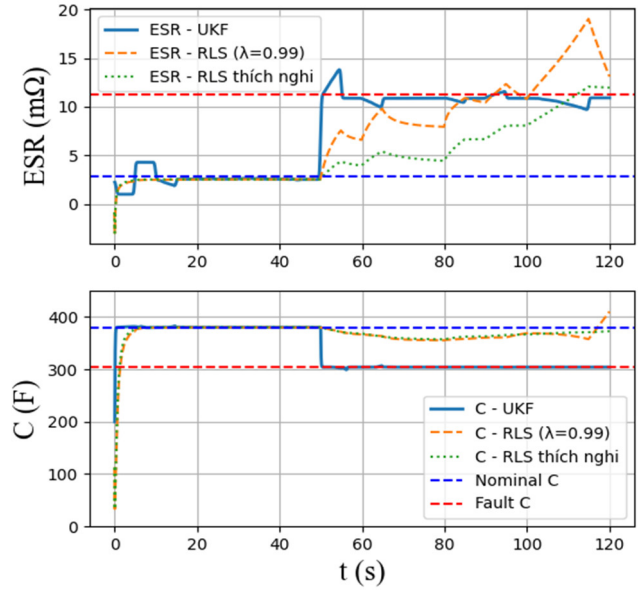
Hình 2. Sự thay đổi của dòng điện (hình trên) và điện áp đầu cực của siêu tụ (hình dưới)

Để mô phỏng quá trình lão hóa, thông số thay đổi như sau: ESR tăng từ giá trị ban đầu $2,8\text{m}\Omega$ và tiến dần đến giá trị gấp bốn lần; C giảm 20% từ giá trị ban đầu $C = 380\text{F}$ (kịch bản 1). Sự thay đổi này dùng để kiểm tra biên phát hiện lỗi và đánh giá khả năng phát hiện nhanh (độ trễ 10 - 90%, thời gian hội tụ). Kết quả ước lượng được thể hiện trên hình 3a).

Có thể nhận thấy kết quả ước lượng của phương pháp UKF tốt nhất; phương pháp RLS với hệ số quên có sai số ước lượng tốt so với phương pháp RLS có hệ số quên thích nghi vì hệ số này giảm theo thời gian.



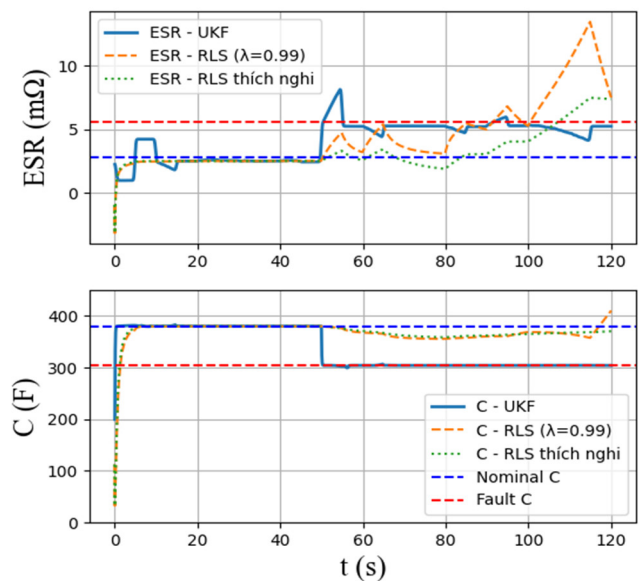
a)



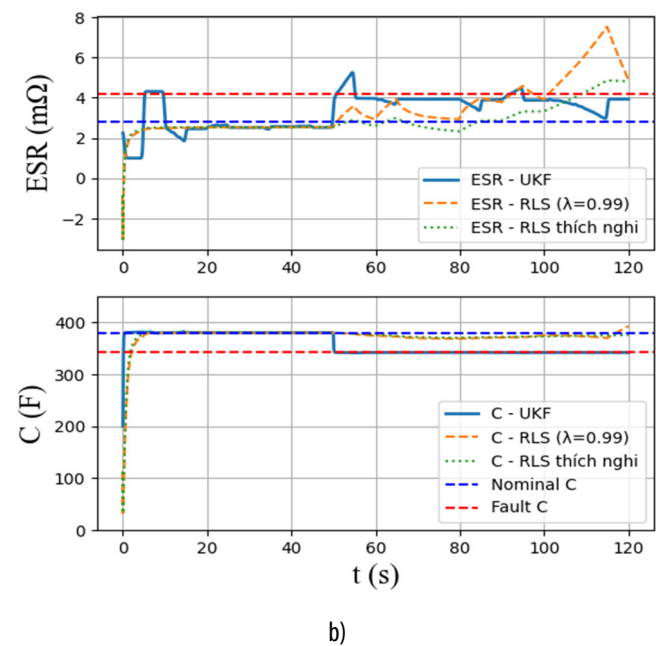
b)

Hình 3. Ước lượng thông số của siêu tụ theo kịch bản 1: a) Lão hóa; b) Thay đổi do lỗi

Để mô phỏng sự cố, giả thiết có lỗi bên trong SC gây ra sự tăng lên đột biến của ESR 4 lần và làm giảm C xuống 20% tại thời điểm $t = 50\text{s}$. Trong các khoảng thời gian còn lại, các thông số được giả thiết không đổi nên kết quả ước lượng của các phương pháp đều có sai lệch nhỏ và ổn định trong khoảng thời gian $t = (0 - 50\text{s})$. Tuy nhiên, sau thời điểm xuất hiện lỗi, phương pháp UKF cho kết quả ước lượng tốt trong khi phương pháp RLS chậm đáp ứng với sự thay đổi nhanh của thông số. RLS với hệ số quên thích nghi cho kết quả ước lượng chậm đáp ứng hơn nhưng ổn định hơn so với RLS có hệ số này không đổi.

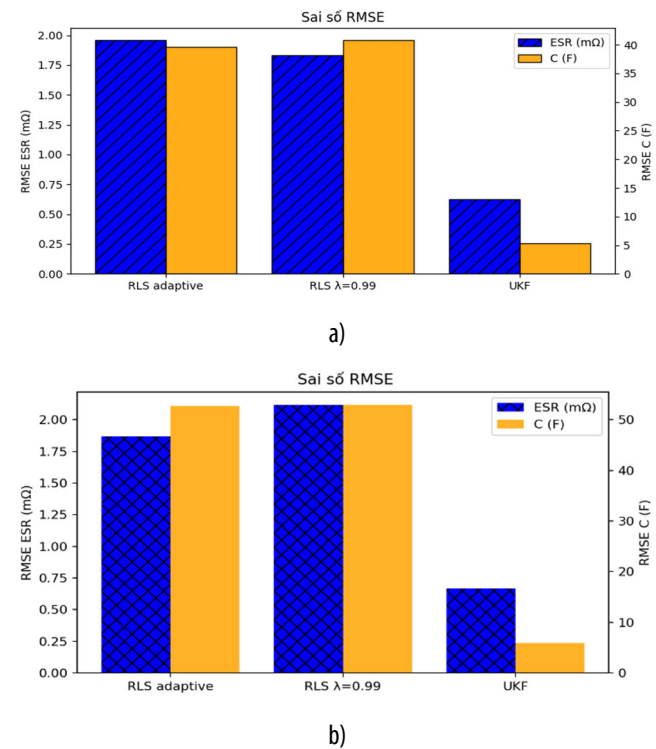


a)



Hình 4. Ước lượng thông số của siêu tụ khi có lỗi tại $t = 50s$: a) Kích bản 2; b) Kích bản 3

Ngưỡng “hết vòng đời” (End - of - life: EOL) trong tài liệu thường lấy lúc C giảm xấp xỉ 20% và ESR tăng khoảng 2 lần so với ban đầu (Kích bản 2) [16]. Trước đó mức thay đổi ở giữa vòng đời có thể lấy với C giảm 10% và ESR tăng 1,5 lần (Kích bản 3). Kết quả mô phỏng được thể hiện trên hình 4. Nhận xét tương tự hình 3 có thể được rút ra cho hình 4.



Hình 5. Kết quả tính toán sai số RMSE của kích bản 2: a) Lão hóa; b) Sự cố

So sánh sai số ước lượng giữa các phương pháp trên hình 5 cho thấy, UKF cho kết quả sai số tốt nhất, đặc biệt là ước lượng giá trị điện dung trong trường hợp sự cố, khoảng 1,5%.

Bảng 1. So sánh hai phương pháp RLS và UKF

Phương pháp	Đáp ứng với thông số ổn định	Đáp ứng với thông số thay đổi nhanh	Khối lượng tính toán	Ứng dụng
RLS	✓	✗	✓	Xác định thông số ban đầu
UKF	✓	✓	✗	Giám sát thông số trong miền thời gian thực

✗: hạn chế; ✓: tốt.

Nhận xét rút ra từ kết quả trên hình 3 có thể dẫn đến tổng hợp so sánh và đề xuất ứng dụng trong bảng 1.

5. KẾT LUẬN

So sánh áp dụng phương pháp ước lượng thông số bằng thuật toán bình phương cực tiểu đệ quy và thuật toán Kalman không tuyến tính đã được thực hiện trong bài toán ước lượng thông số điện dung và điện trở nối tiếp tương đương của siêu tụ. Kết quả cho thấy, thuật toán UKF có thể cung cấp thông tin với sai lệch nhỏ và ổn định để giám sát tình trạng của siêu tụ. Việc sử dụng hệ số quên thích nghi có thể nâng cao độ ổn định trong ước lượng thông số trong điều kiện biến động trạng thái.

Trong nghiên cứu tiếp theo, việc sử dụng mô hình chi tiết sẽ được áp dụng để mô phỏng đầy đủ hơn các quá trình và ước lượng thông số trong điều kiện đó kỳ vọng sẽ cải thiện sai số ước lượng và phù hợp thông số thực tế của siêu tụ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Oukaour, et al., “Supercapacitors aging diagnosis using least square algorithm,” *Microelectron. Reliab.*, 53, 9-11, 1638-1642, 2013.
- [2]. Y. Zhao, W. Xie, Z. Fang, S. Liu, “A Parameters Identification Method of the Equivalent Circuit Model of the Supercapacitor Cell Module Based on Segmentation Optimization,” *IEEE Access*, 8, 92895-92906, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993285.
- [3]. Y. Wang, C. Liu, R. Pan, Z. Chen, “Modeling and state-of-charge prediction of lithium-ion battery and ultracapacitor hybrids with a co-estimator,” *Energy*, 121, 739-750, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.044>.

[4]. M. Ceraolo, G. Lutzemberger, D. Poli, "State-of-Charge Evaluation of Supercapacitors," *J. Energy Storage*, 11, 211-218, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.03.001>.

[5]. D. Slaifstein, F. M. Ibanez, K. Siwek, "Supercapacitor modeling: A system identification approach," *IEEE Trans. Energy Convers.*, 38, 1, 192-202, 2022.

[6]. R. L. Spyker, R. M. Nelms, "Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 36, 3, 829-836, 2000.

[7]. L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun, D. G. Dorrell, "A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 81, 1868-1878, 2018.

[8]. S. Marín-Coca, A. Ostadrahimi, S. Bifaretti, E. Roibás-Millán, and S. Pindado, "New parameter identification method for supercapacitor model," *IEEE Access*, 11, 21771-21782, 2023.

[9]. L. A. Cantera-Cantera, I. Cervantes, M. Martinez, "Heteroscedasticity in supercapacitors under nonlinear operating conditions: Analyzing the efficacy of deterministic parameter identification algorithms," *J. Energy Storage*, 103, 114189, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114189>.

[10]. X. Sun, J. Ji, B. Ren, C. Xie, D. Yan, "Adaptive Forgetting Factor Recursive Least Square Algorithm for Online Identification of Equivalent Circuit Model Parameters of a Lithium-Ion Battery," *Energies*, 12(12), 2242, 2019. doi: [10.3390/en12122242](https://doi.org/10.3390/en12122242).

[11]. M. A. A. Mohamed, J. Du Gard, T. F. Yu, T. Grandjean, "Improving dynamic parameter estimation in electric vehicle batteries: A comparative study of FFRLS methods with Open Circuit Voltage assumptions," *J. Energy Storage*, 118, 116163, 2025.

[12]. L. Ljung, "Theory for the user," *Syst. Identif.*, 1987.

[13]. S. S. Haykin, *Adaptive filter theory*. Pearson Education India, 2002.

[14]. E. A. Wan, R. Van Der Merwe, "The unscented Kalman filter for nonlinear estimation," in *Proceedings of the IEEE 2000 adaptive systems for signal processing, communications, and control symposium (Cat. No. 00EX373)*, IEEE, 153-158, 2000.

[15]. "Maxwell Technologies." [Online]. Available: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/2.7V-350F_ds_3002974-EN.3_20200908.pdf

[16]. X. Chen, Y. Wu, R. Holze, "Ag(e)ing and Degradation of Supercapacitors: Causes, Mechanisms, Models and Countermeasures," *Molecules*, 28(13), 5028, 2023. doi: [10.3390/molecules28135028](https://doi.org/10.3390/molecules28135028).

AUTHORS INFORMATION

Toan Nguyen-Dang, Hoang Giang Vu

Faculty of New Energy, Electric Power University, Vietnam