

MÔ HÌNH HÓA PIN VÀ SUY GIẢM THAM SỐ TRONG HỆ THỐNG QUẢN LÝ NĂNG LƯỢNG TÀU THỦY BẰNG MATLAB/SIMULINK

BATTERY MODELING AND PARAMETER DEGRADATION IN A SHIP ENERGY MANAGEMENT SYSTEM USING MATLAB/SIMULINK

VƯƠNG ĐỨC PHÚC, ĐẶNG ĐÌNH PHÚC*

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: phucdd.ddt@vamaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.983>

Tóm tắt

Trong những năm gần đây, hệ thống lưu trữ năng lượng điện đã trở thành thành phần then chốt trong xu hướng điện hóa phương tiện và tích hợp năng lượng tái tạo, góp phần nâng cao hiệu suất và giảm phát thải. Trong lĩnh vực hàng hải, tàu thủy chạy điện và tàu hybrid được xem là hướng phát triển tiềm năng nhằm tối ưu tiêu thụ năng lượng và đáp ứng yêu cầu vận hành bền vững. Bài báo tập trung mô phỏng hệ thống quản lý năng lượng (EMS) cho tàu thủy điện/hybrid với chiến lược quản lý năng lượng dựa trên luật (rule-based), thể hiện sự khác biệt so với các hệ thống truyền thống.

Nghiên cứu xây dựng mô hình pin lithium-ion dựa trên mô hình mạch tương đương (ECM), cho phép mô tả đặc tính điện áp-dòng điện và trạng thái sạc (SoC) trong các chế độ làm việc khác nhau. Đồng thời, cơ chế suy giảm tham số được tích hợp nhằm phân tích ảnh hưởng của lão hóa đến dung lượng và điện trở trong theo chu kỳ vận hành. Trên cơ sở mô hình toán học và cấu trúc mô phỏng triển khai trong MATLAB/Simulink, nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của suy giảm đặc tính pin đến đáp ứng điện áp và quyết định phân phối năng lượng trong EMS.

Kết quả mô phỏng cho thấy lão hóa pin làm suy giảm khả năng cung cấp năng lượng và thúc đẩy EMS theo chiến lược rule-based chuyển sớm từ chế độ pin sang chế độ lai hoặc máy phát, qua đó góp phần duy trì ổn định hệ thống và nâng cao độ tin cậy vận hành.

Từ khóa: Bộ pin, mô hình mạch tương đương (ECM), trạng thái sạc (SoC), quản lý năng lượng, điều khiển Rule-based.

Abstract

In recent years, electrical energy storage systems have become a key component in the electrification of transportation and the

integration of renewable energy, contributing to improved efficiency and reduced emissions. In the maritime sector, electric and hybrid ships are considered a promising development direction for optimizing energy consumption and meeting sustainable operational requirements. This paper focuses on the simulation of an energy management system (EMS) for electric/hybrid ships based on a rule-based energy management strategy, highlighting its distinction from conventional systems.

The study develops a lithium-ion battery model based on the equivalent circuit model (ECM), which describes voltage-current characteristics and state of charge (SoC) under different operating conditions. In addition, parameter degradation mechanisms are integrated to represent the effects of aging on battery capacity and internal resistance over operating cycles. Based on the mathematical models and simulation framework implemented in MATLAB/Simulink, the impact of battery degradation on voltage response and energy distribution decisions within the EMS is evaluated.

Simulation results show that battery aging reduces energy supply capability and drives the rule-based EMS to switch earlier from battery-only operation to hybrid or generator-based modes, thereby contributing to improved system stability and operational reliability.

Keywords: Battery pack, equivalent circuit model (ECM), state of charge (SoC), Energy management system, Rule-based control.

1. Giới thiệu

Hệ thống lưu trữ năng lượng điện ngày càng trở thành một trong những nền tảng quan trọng thúc đẩy sự phát triển của công nghệ phương tiện điện hóa, năng lượng tái tạo cũng như các hệ thống tự động hóa

hiện đại. Trong lĩnh vực vận tải đường thủy, sự xuất hiện ngày càng nhiều của tàu lai dross điện, tàu hybrid và tàu thủy cỡ nhỏ chạy điện cho thấy xu hướng chuyển dịch rõ rệt sang các giải pháp vận hành hiệu quả và thân thiện môi trường [7]. Cùng với đó, thị trường pin sạc tăng trưởng nhanh và thu hút nhiều nghiên cứu tập trung vào việc nâng cao hiệu suất, độ an toàn và tuổi thọ của các công nghệ pin hiện có, đặc biệt là pin lithium-ion [4], [5].

Để đáp ứng yêu cầu thiết kế và khai thác thực tế, nhiều công trình đã chỉ ra sự cần thiết của việc mô hình hóa đặc tính pin nhằm dự đoán chính xác điện áp, dòng điện và thời gian hoạt động trong các điều kiện tải khác nhau [2]. Một trong những hướng tiếp cận phổ biến là sử dụng mô hình mạch tương đương (Equivalent Circuit Model - ECM) nhờ ưu điểm về tính trực quan, khả năng triển khai thuận lợi và phù hợp cho các bài toán điều khiển, ước lượng trạng thái sạc (SoC) [1]. Ngoài ra, các phương pháp lọc và quan sát trạng thái như Kalman mở rộng cũng được áp dụng nhằm nâng cao độ chính xác của việc ước lượng SoC trong hệ thống quản lý pin [3].

Tuy nhiên, thách thức hiện nay không chỉ nằm ở việc mô phỏng đặc tính tức thời mà còn ở khả năng phản ánh sự suy giảm tham số theo thời gian do cơ chế lão hóa. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng các cơ chế lão hóa theo chu kỳ và theo thời gian lịch làm suy giảm dung lượng và tăng điện trở trong, ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống [4], [5]. Đối với các tổ hợp pin lớn sử dụng trên tàu thủy, việc tối ưu vận hành cần xét đến cấu hình nối tiếp - song song, chế độ phóng điện và điều kiện nhiệt độ nhằm giảm chi phí bảo trì và kéo dài tuổi thọ khai thác [8].

Xuất phát từ các yêu cầu đó, bài báo trình bày phương pháp mô phỏng pin có tích hợp suy giảm tham số trong môi trường MATLAB/Simulink và đánh giá đặc tính làm việc của cụm pin phục vụ thiết kế và tối ưu hệ thống năng lượng cho phương tiện đường thủy, đường biển.

Theo các quy định mới của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO), việc cắt giảm phát thải khí nhà kính trong lĩnh vực vận tải biển là yêu cầu bắt buộc, thúc đẩy xu hướng chuyển đổi từ tàu sử dụng nhiên liệu hóa thạch sang tàu thủy điện và tàu hybrid. Trong các hệ thống này, pin không chỉ đóng vai trò là nguồn năng lượng mà còn là đối tượng trung tâm được giám sát và điều phối bởi hệ thống quản lý năng lượng (EMS).

Khác với EMS truyền thống trên tàu diesel, EMS

trên tàu thủy điện/hybrid phải đưa ra quyết định phân phối năng lượng dựa trên trạng thái pin như SoC, SoH và mức suy giảm theo chu kỳ. Do đó, mô hình hóa chính xác đặc tính và sự suy giảm của pin là điều kiện tiên quyết để EMS hoạt động hiệu quả và an toàn.

Vì vậy, nghiên cứu mô hình pin có tích hợp suy giảm tham số không chỉ mang ý nghĩa khoa học trong việc phản ánh hành vi điện hóa của pin mà còn có giá trị thực tiễn trong việc hỗ trợ xây dựng và đánh giá chiến lược quản lý năng lượng cho tàu thủy điện/hybrid. Trên cơ sở đó, bài báo trình bày kiến trúc tổng thể của hệ thống quản lý năng lượng (EMS) và mục tiêu xây dựng mô hình pin lithium-ion có tích hợp cơ chế suy giảm tham số nhằm đánh giá đặc tính vận hành của cụm pin trong điều kiện khai thác dài hạn.

2. Hệ thống quản lý năng lượng trên tàu thủy

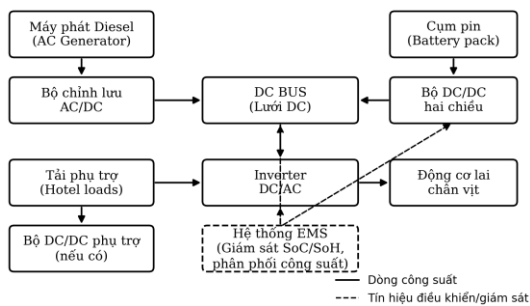
2.1. Cấu trúc tổng thể

Hệ thống quản lý năng lượng (Energy Management System - EMS) trên tàu thủy điện/hybrid là cấu phần trung tâm có nhiệm vụ điều phối, phân phối và tối ưu dòng năng lượng giữa các nguồn phát, hệ lưu trữ và các tải tiêu thụ trên tàu. Trong bối cảnh xu hướng điện hóa tàu thủy ngày càng phát triển, EMS không chỉ đảm bảo đáp ứng công suất cho hệ truyền động mà còn duy trì tính ổn định của lưới điện tàu, giảm tiêu hao năng lượng và nâng cao độ tin cậy vận hành [7]. Một hệ thống EMS điển hình trên tàu thường bao gồm: Cụm pin (battery pack), bộ biến đổi công suất (DC/DC, DC/AC), động cơ điện lai chân vịt, tải phụ trợ (chiếu sáng, điều hòa, bơm,...), hệ giám sát và điều khiển trung tâm, cùng các khối đo lường - bảo vệ. Trong đó, pin đóng vai trò là nguồn lưu trữ năng lượng chính, cung cấp điện cho động cơ và các tải quan trọng trong các chế độ hành trình khác nhau, đặc biệt khi yêu cầu giảm phát thải và tăng hiệu suất khai thác [8].

Để EMS hoạt động hiệu quả, mô hình hóa pin là bước nền tảng nhằm mô phỏng chính xác trạng thái làm việc của hệ lưu trữ trong các điều kiện tải biến thiên và môi trường vận hành phức tạp. Các đại lượng quan trọng cần được mô tả bao gồm điện áp đầu cực, dòng điện, nhiệt độ, trạng thái sạc (State of Charge - SoC) và khả năng suy giảm dung lượng theo thời gian. Trong các phương pháp mô hình hóa, mô hình mạch tương đương (Equivalent Circuit Model - ECM) được sử dụng phổ biến nhờ cân bằng tốt giữa độ chính xác và chi phí tính toán, đồng thời thuận lợi cho triển khai mô phỏng hệ thống và thiết kế điều khiển [1], [2]. ECM cho phép biểu diễn hành vi điện hóa của pin thông qua các phần tử điện trở - điện dung, từ đó phản ánh đặc tính đáp ứng quá độ và trạng thái ổn định của

pin khi sạc/xả. Bên cạnh đó, các phương pháp ước lượng trạng thái dựa trên lọc Kalman mở rộng (EKF) được áp dụng để nâng cao độ chính xác trong xác định SoC, hỗ trợ EMS đưa ra chiến lược phân phối năng lượng tối ưu và tránh các trạng thái vận hành nguy hiểm [3].

Một thách thức quan trọng của EMS trên tàu thủy là sự suy giảm tham số của pin theo chu kỳ sạc/xả và theo thời gian sử dụng. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng lão hóa pin làm giảm dung lượng khả dụng và tăng điện trở trong, kéo theo suy giảm hiệu suất, tăng tổn hao và rủi ro mất ổn định điện áp trong hệ thống [4], [5]. Do đó, mô hình pin trong EMS cần tích hợp cơ chế suy giảm để dự đoán tuổi thọ và hỗ trợ lập kế hoạch vận hành - bảo trì hợp lý. Ngoài ra, EMS còn phải tuân thủ các yêu cầu kỹ thuật liên quan đến hệ thống điện DC trung áp trên tàu, đảm bảo tiêu chuẩn an toàn và khả năng vận hành liên tục trong các kịch bản tải khác nhau [8].



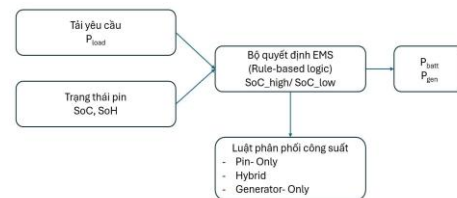
Hình 1. Cấu trúc hệ thống quản lý năng lượng (EMS) cho tàu thủy hybrid sử dụng pin và máy phát

Từ các phân tích trên, bài báo đề xuất cấu trúc mô phỏng EMS trên tàu thủy điện/ hybrid trong MATLAB/Simulink, trong đó mô hình pin ECM được tích hợp đồng thời với mô hình suy giảm tham số nhằm phản ánh sát điều kiện vận hành thực tế. Lưới DC (DC bus) đóng vai trò là nút ghép năng lượng trung tâm trong hệ thống quản lý năng lượng tàu thủy hybrid. Thông qua các bộ biến đổi công suất (AC/DC, DC/DC), lưới DC cho phép kết nối linh hoạt giữa máy phát điện, hệ pin và các tải tiêu thụ, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho EMS thực hiện chiến lược phân phối năng lượng dựa trên trạng thái pin (SoC, SoH) và chế độ vận hành tàu. Kiến trúc này phù hợp với xu hướng hệ thống điện DC trung áp trên tàu thủy hiện đại theo khuyến nghị của IEEE Std 1709-2010. Cách tiếp cận này cho phép đánh giá ảnh hưởng của lão hóa đến đặc tính cụm pin nối tiếp - song song, từ đó hỗ trợ tối ưu chiến lược điều khiển năng lượng và nâng cao độ tin cậy của hệ thống điện tàu.

Trên cơ sở cấu trúc hệ thống ở Hình 1, pin là đối tượng được EMS giám sát và điều phối thông qua các đại lượng trạng thái như SoC, SoH và đặc tính suy giảm theo chu kỳ. Do đó, việc mô hình hóa chính xác pin và sự suy giảm tham số là nền tảng để đánh giá hiệu quả hoạt động của EMS trong các điều kiện vận hành khác nhau.

2.2. Chiến lược quản lý năng lượng

Trong nghiên cứu này, chiến lược quản lý năng lượng được xây dựng theo phương pháp rule-based, phù hợp với mục tiêu mô phỏng - đánh giá hệ thống và đặc biệt thích hợp cho các bài toán thiết kế ban đầu của tàu thủy điện/hybrid. Phương pháp rule-based cho phép EMS đưa ra quyết định phân phối công suất dựa trên các ngưỡng và điều kiện logic đơn giản, đồng thời đảm bảo tính ổn định, dễ triển khai và minh bạch trong vận hành.



Hình 2. Chiến lược quản lý năng lượng dựa trên luật (Rule-based)

Các tín hiệu đầu vào chính của EMS bao gồm: Công suất tải yêu cầu P_{load} , trạng thái sạc pin (SoC), và trạng thái suy giảm của pin (thông qua dung lượng khả dụng hoặc điện trở trong). Trên cơ sở các tín hiệu này, EMS xác định công suất cấp từ pin P_{batt} và từ máy phát P_{gen} theo các luật vận hành sau:

Chế độ pin (Battery-only mode):

Khi SoC lớn hơn ngưỡng trên SoChigh và công suất tải nhỏ hơn công suất cho phép của pin, toàn bộ tải được cấp bởi pin, máy phát không hoạt động. Chế độ này ưu tiên khai thác năng lượng lưu trữ, giảm tiêu hao nhiên liệu và phát thải.

Chế độ lai (Hybrid mode):

Khi SoC nằm trong khoảng trung gian [SoClow, SoChigh] hoặc tải vượt quá khả năng cấp đơn lẻ của pin, EMS phân phối công suất cho cả pin và máy phát. Trong chế độ này, pin đóng vai trò san bằng tải và giảm dao động công suất của máy phát.

Chế độ máy phát (Generator-only mode):

Khi SoC nhỏ hơn ngưỡng dưới SoClow, EMS ưu tiên cấp tải từ máy phát, đồng thời hạn chế phóng điện pin sâu nhằm tránh gia tăng tốc độ suy giảm dung lượng và điện trở trong.

Ngoài ra, khi xét đến ảnh hưởng của lão hóa pin, các ngưỡng SoC và giới hạn dòng/ công suất pin có thể được điều chỉnh tương ứng với trạng thái suy giảm (SoH), nhằm bảo vệ pin và duy trì độ tin cậy của hệ thống điện tàu. Chiến lược rule-based này cho phép đánh giá trực tiếp mối liên hệ giữa suy giảm tham số pin và quyết định phân phối năng lượng trong EMS, phù hợp với mục tiêu nghiên cứu của bài báo.

3. Mô hình toán học và cấu trúc mô phỏng của hệ thống

3.1. Mô hình Peukert

Đây là mô hình đơn giản nhất mô tả sự phụ thuộc của thời gian phóng điện (t) vào dòng điện phóng (I) dựa trên một luật mũ. Phương trình Peukert được định nghĩa như sau:

$$t = H \left(\frac{Q}{IH} \right)^k \quad (1)$$

Trong đó:

t - Thời gian pin phóng điện (h),

I - Dòng điện phóng (A),

Q - Dung lượng danh định (Ah) ở dòng danh định tương ứng với H ,

H - Thời gian xả danh định (h),

k - Hệ số Peukert (không đơn vị) phản ánh mức độ phụ thuộc của dung lượng vào dòng xả.

Một dạng phổ biến khác của phương trình này là:

$$Q_p = I^k t \quad (2)$$

Với Q_p là dung lượng quy chiếu ở dòng 1A; k là hệ số Peukert.

3.2. Mô hình Shepherd

Mô hình Shepherd thường được dùng để mô tả điện áp đầu ra $V(t)$ của pin theo thời gian dựa trên trạng thái sạc (SoC) và dòng điện xả [6]. Một biểu diễn kinh điển của mô hình Shepherd:

$$V_{batt}(t) = V_0 - \left(\frac{KQ}{Q - it} \right) i(t) - Ri(t) \quad (3)$$

Trong đó:

$V_{batt}(t)$ - Điện áp đầu ra tại thời điểm t ,

V_0 - Điện áp không tải (hằng số),

Q - Dung lượng danh định pin (Ah),

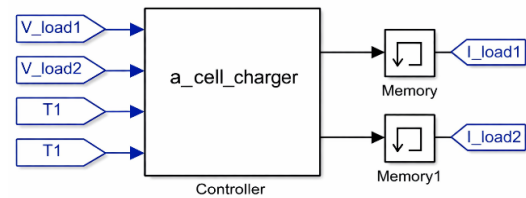
$i(t)$ - Dòng tải (A),

K - Hằng số phân cực,

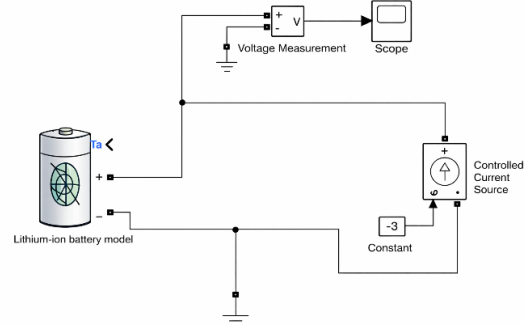
R - Điện trở trong.

3.3. Cấu trúc sơ đồ khối của hệ thống trong mô phỏng

Mô hình MATLAB-Simulink được sử dụng để xây dựng sơ đồ khối mô phỏng hệ thống pin nhằm phân tích đặc tính vận hành và đánh giá sự suy giảm dung lượng theo thời gian cũng như số chu kỳ làm việc. Trong cấu trúc này, khối pin thuộc thư viện Simscape Battery đóng vai trò trung tâm, mô tả các thông số như dung lượng danh định, điện áp hở mạch, điện trở trong và đặc tính suy giảm theo chu kỳ sạc-xả. Các khối đo lường dòng điện, điện áp và nhiệt độ được tích hợp nhằm thu thập dữ liệu phục vụ đánh giá trạng thái sạc (SoC) và trạng thái sức khỏe (SoH) của pin. Hệ thống còn bao gồm khối tải và khối nguồn sạc để mô phỏng quá trình phóng và nạp trong các điều kiện vận hành khác nhau, cho phép quan sát sự biến thiên của điện áp và dòng điện theo từng chu trình.



Hình 3. Sơ đồ khối mô phỏng làm việc với 2 tế bào pin



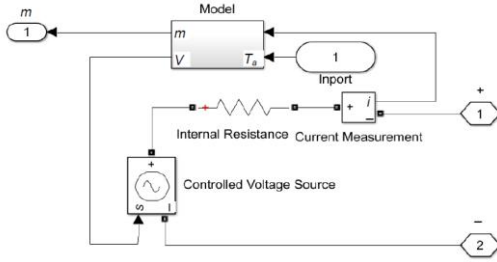
Hình 4. Mô hình mạch xả pin khi mô phỏng

Đối với pin lithium-ion, mô hình cho phép thiết lập các đường cong đặc trưng phóng điện và các tham số suy giảm thực tế, từ đó hỗ trợ dự đoán tuổi thọ còn lại. Người dùng có thể tùy chỉnh các tham số trong giao diện cấu hình khối hoặc nhập dữ liệu thực nghiệm để tăng độ chính xác của mô phỏng. Nhờ cấu trúc sơ đồ khối rõ ràng và linh hoạt, MATLAB-Simulink không chỉ hỗ trợ nghiên cứu đặc tính pin mà còn phục vụ thiết kế, kiểm chứng và tối ưu hóa hệ thống quản lý năng lượng trong các ứng dụng công nghiệp yêu cầu độ tin cậy và hiệu suất cao.

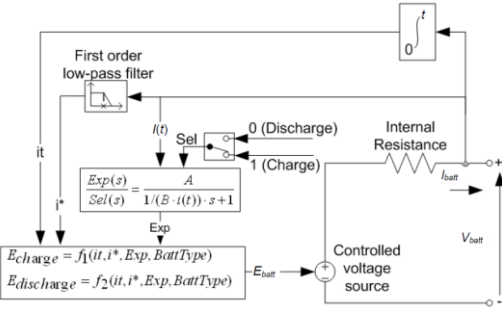
Mô hình pin được xây dựng theo cấu trúc phân cấp

Kỹ thuật và Công nghệ Hàng hải

(hierarchical structure) nhằm thuận tiện cho việc mô phỏng và mở rộng. Trong đó, khối Internal Resistance dùng để thiết lập điện trở trong của pin, khối Current Measurement có nhiệm vụ đo dòng điện làm việc và truyền tín hiệu dòng điện về khối mô hình pin. Ngoài ra, khối Controlled Voltage Source đóng vai trò là nguồn điện áp điều khiển, cho phép mô phỏng điện áp đầu cực pin thay đổi theo trạng thái vận hành.



Hình 5. Cấu trúc phân cấp của kiểu pin



Hình 6. Sơ đồ mạch điện tương đương của pin

Trên Hình 6 cho thấy mạch tương đương của pin được mô hình hóa bởi các khối. Khối pin thực hiện một mô hình động chung.

Mô hình tích hợp sử dụng các phương trình sau liên quan đến các thông số điện của pin:

Khi xả ($i^* > 0$):

$$u_1(it, i^*, it) = V_0 - Ri - K \left(\frac{Q}{Q - it} \right) i^* - K' \left(\frac{Q}{Q - it} \right) it + A \exp(-B \cdot it) \quad (4)$$

Khi nạp ($i^* < 0$):

$$u_2(it, i^*, it) = V_0 - Ri - K \left(\frac{Q}{it - 0,1 \cdot Q} \right) i^* - K' \left(\frac{Q}{Q - it} \right) it + A \exp(-B \cdot it) \quad (5)$$

Trong đó:

V_0 - Điện áp không đổi, V;

K - Là điện trở phân cực, Ohm;

K' - Là hằng số phân cực, V/(Ah);

i^* - Là dòng điện sau bộ lọc,

I - Là dòng điện của pin, A

V - Là biên độ điện áp, V;

B - Là nghịch đảo của hằng số thời gian, (Ah)⁻¹.

Đối với pin, ảnh hưởng của sự suy giảm dung lượng và điện trở trong được thể hiện bằng mô hình sau:

$$Q(n) = \begin{cases} Q_{BOL} - \varepsilon(n)(Q_{BOL} - Q_{EOL}), & \text{if } k/2 \neq 0; \\ Q(n-1), & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (6)$$

$$R(n) = \begin{cases} R_{BOL} - \varepsilon(n)(R_{EOL} - R_{BOL}), & \text{if } k/2 \neq 0; \\ R(n-1), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó:

$n = kT_h$ ($k = 1, 2, 3, \dots, \infty$) - Thông số thời gian hoạt động của pin;

T_h - Là khoảng thời gian của nửa chu kỳ nạp-phóng điện, s;

Q_{BOL} - Dung lượng lớn nhất của pin khi bắt đầu thời gian sử dụng ở nhiệt độ môi trường xung quanh, Ah;

Q_{EOL} - Tương tự khi kết thúc tuổi thọ sử dụng ở nhiệt độ môi trường, Ah;

R_{BOL} - Điện trở trong của pin khi bắt đầu sử dụng ở nhiệt độ môi trường, Ohm; R_{EOL} - Tương tự khi kết thúc tuổi thọ sử dụng ở nhiệt độ môi trường, Ohm;

$\varepsilon(n)$ - Hệ số lão hóa pin.

Hệ số lão hóa bằng 0 khi bắt đầu thời gian sử dụng và thống nhất khi kết thúc, được biểu thị bằng hệ phương trình:

$$\varepsilon(n) = \begin{cases} \varepsilon(n-1) + \frac{0,5}{N(n-1)} \left(2 - \frac{DOD(n-2) + DOD(n)}{DOD(n-1)} \right), & \text{if } k/2 \neq 0; \\ \varepsilon(n-1), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó:

$DOD(n)$ - Độ xả sâu của pin sau khi hết thời gian nửa chu kỳ, %;

$N(n)$ - Số chu kỳ tối đa, được tính theo công thức:

$$N(n) = H \left(\frac{DOD(n)}{100} \right)^\xi \exp \left(-\psi \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a(n)} \right) \right) \left(I_{dis_ave(n)} \right)^{-\gamma_1} \left(I_{ch_ave(n)} \right)^{-\gamma_2} \quad (9)$$

Trong đó:

H - Là một hằng số;

ξ - Là hệ số;

ψ - Tốc độ không đổi đối với số chu kỳ;

$I_{dis_ave}(n)$ - Dòng xả trung bình trong nửa chu kỳ, A;

$I_{ch_ave}(n)$ - Dòng điện tích trung bình trong nửa chu kỳ, A;

$T_{ref}, T_{a(n)}$ - Nhiệt độ môi trường xung quanh lý tưởng và hiện tại, K;

γ_1, γ_2 - Số mũ của dòng xả và điện tích tương ứng.

4. Mô phỏng và thảo luận

4.1. Thông số mô phỏng

Để đánh giá ảnh hưởng của suy giảm tham số pin đến đặc tính làm việc trong hệ thống quản lý năng lượng (EMS), nghiên cứu tiến hành mô phỏng quá trình phóng điện của một tế bào pin lithium-ion trong môi trường MATLAB/Simulink dựa trên mô hình mạch tương đương (ECM) đã trình bày ở mục 3. Cách tiếp cận này phù hợp với các nghiên cứu mô hình hóa pin phục vụ bài toán điều khiển và quản lý năng lượng ở mức hệ thống [1], [2].

Mục tiêu của mô phỏng không nhằm xây dựng một mô hình điện hóa mới, mà tập trung phân tích sự thay đổi đặc tính điện áp đầu cực và trạng thái sạc (SoC) khi các tham số đặc trưng của pin (dung lượng khả dụng và điện trở trong) bị suy giảm theo chu kỳ làm việc, như đã được chỉ ra trong các nghiên cứu về cơ chế lão hóa pin lithium-ion [4], [5].

Các thông số mô phỏng chính được trình bày trong Bảng 1. Hai trường hợp được xét gồm: pin mới (0 chu kỳ) và pin đã suy giảm (2000 chu kỳ tương đương).

Việc lựa chọn dòng tải 3A nhằm đảm bảo điều kiện tải ổn định, tạo cơ sở so sánh trực tiếp ảnh hưởng của suy giảm tham số đến đáp ứng điện áp. Nếu sử dụng

dòng lớn, thành phần sụt áp tức thời do điện trở trong có thể chiếm ưu thế và làm che khuất ảnh hưởng của cơ chế lão hóa. Do đó, nghiên cứu tập trung vào phân tích xu hướng thay đổi đặc tính điện theo mức suy giảm tham số, thay vì đánh giá chế độ tải cực đại.

Các tham số suy giảm được xác định theo các biểu thức (6)-(9), trong đó dung lượng giảm dần và điện trở trong tăng dần theo số chu kỳ tương đương (Equivalent Full Cycles - EFC), phù hợp với các kết quả thực nghiệm đã công bố trong [4], [5].

4.2. Kết quả mô phỏng

4.2.1. So sánh đặc tính điện áp của pin mới và pin suy giảm

Hình 7 trình bày đặc tính phóng điện của pin mới và pin suy giảm dưới cùng điều kiện tải 3A trong thời gian 300s.

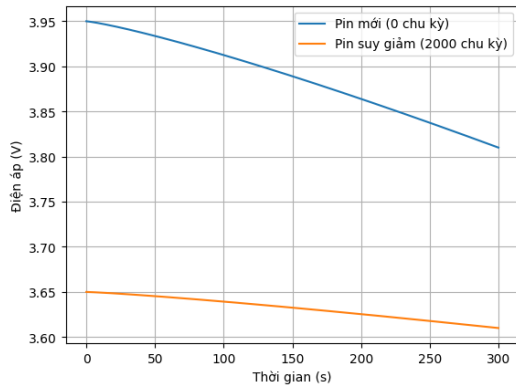
Đối với pin mới, điện áp đầu cực tại thời điểm bắt đầu phóng điện giảm nhanh từ khoảng 4,05V xuống xấp xỉ 3,95V do ảnh hưởng của điện trở trong và hiện tượng phân cực. Sau giai đoạn sụt áp ban đầu, điện áp giảm dần theo thời gian và đạt khoảng 3,81V tại thời điểm 300s. Dạng đường cong này phù hợp với đặc tính phóng điện điển hình của pin lithium-ion được mô tả trong các mô hình ECM kinh điển [2], [6].

Đối với pin đã trải qua khoảng 2000 chu kỳ sạc-xả, điện áp đầu cực ban đầu chỉ đạt khoảng 3,77V và tiếp tục suy giảm xuống khoảng 3,61V sau 300s. So với pin mới, có thể nhận thấy:

Điện áp ban đầu thấp hơn do dung lượng khả dụng giảm.

Bảng 1. Thông số mô phỏng trong MATLAB/Simulink

STT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Ghi chú
1	Dòng tải phóng điện	I_load	3 A	Tải dòng không đổi
2	Thời gian mô phỏng	t_sim	300 s	Quan sát đáp ứng điện áp theo thời gian
3	Trạng thái pin ban đầu	SoCo	Thiết lập trong mô hình	Có thể đặt 100% hoặc theo cấu hình Simscape
4	Trường hợp pin mới	N_cycle	0 chu kỳ	Pin chưa lão hóa
5	Trường hợp pin suy giảm	N_cycle	2000 chu kỳ	Pin đã qua nhiều chu kỳ sạc-xả
6	Điện áp đầu cực ban đầu (pin mới)	V _o	~ 4,05 V	Theo kết quả mô phỏng
7	Điện áp cuối quá trình xả (pin mới)	V_end	~ 3,81 V	Sau 300s
8	Điện áp đầu cực ban đầu (pin suy giảm)	V _o	~ 3,77 V	Theo kết quả mô phỏng
9	Điện áp cuối quá trình xả (pin suy giảm)	V_end	~ 3,61 V	Sau 300s



Hình 7. So sánh đặc tính phóng điện của pin mới và pin suy giảm ($I = 3A$, $t = 300s$)

Mức sụt áp dưới cùng điều kiện dòng tải lớn hơn do điện trở trong tăng.

Đường đặc tính điện áp nằm thấp hơn trong toàn bộ khoảng thời gian mô phỏng. Kết quả này phù hợp với các phân tích về cơ chế lão hóa pin lithium-ion, trong đó quá trình suy giảm theo chu kỳ dẫn đến tăng điện trở trong và giảm dung lượng hiệu dụng [4], [5].

4.2.2. Ảnh hưởng đến trạng thái sạc và chiến lược EMS

Sự suy giảm điện áp đầu cực của pin kéo theo sự thay đổi trong tốc độ giảm của trạng thái sạc (SoC). Khi pin bị lão hóa, SoC có xu hướng chạm ngưỡng dưới sớm hơn so với pin mới trong cùng điều kiện tải. Theo chiến lược quản lý năng lượng dựa trên luật (rule-based), khi SoC giảm xuống dưới ngưỡng này, hệ thống EMS sẽ chuyển từ chế độ chỉ sử dụng pin (pin-only) sang chế độ lai hoặc chỉ sử dụng máy phát (generator-only). Việc chuyển đổi này nhằm hạn chế hiện tượng phóng điện sâu, giảm tốc độ suy giảm dung lượng và duy trì sự ổn định điện áp trên thanh cái DC của hệ thống. Như vậy, sự suy giảm tham số của pin không chỉ ảnh hưởng đến đặc tính điện áp tức thời mà còn tác động trực tiếp đến quyết định phân phối công suất trong EMS. Khi pin bị lão hóa, quá trình chuyển đổi chế độ vận hành diễn ra sớm hơn, từ đó làm thay đổi chiến lược khai thác năng lượng tổng thể của tàu thủy điện/ hybrid. Kết quả này phù hợp với xu hướng nghiên cứu các chiến lược EMS có xét đến yếu tố suy giảm pin trong các hệ thống hybrid hiện đại [7], [8].

4.3. Nhận xét tổng hợp

Từ các kết quả mô phỏng có thể thấy rằng sự gia tăng điện trở trong và suy giảm dung lượng theo chu kỳ làm việc ảnh hưởng rõ rệt đến điện áp đầu cực của pin dưới cùng điều kiện tải. So với pin mới, pin suy giảm thể hiện khả năng duy trì điện áp kém hơn, ngay

cả khi tải được giữ ổn định ở mức trung bình. Sự thay đổi các đặc tính điện này dẫn đến sự thay đổi thời điểm kích hoạt các ngưỡng điều khiển trong hệ thống EMS. Do đó, nếu không xem xét đến quá trình suy giảm tham số của pin, việc thiết kế và đánh giá chiến lược quản lý năng lượng có thể không phản ánh chính xác điều kiện vận hành thực tế trong khai thác dài hạn. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ mối liên hệ giữa trạng thái sức khỏe của pin (SoH) và hành vi phân phối năng lượng trong hệ thống quản lý năng lượng của tàu thủy điện/ hybrid.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp mô hình hóa pin lithium-ion phục vụ mô phỏng hệ thống quản lý năng lượng (EMS) cho tàu thủy điện/ hybrid trong môi trường MATLAB/Simulink. Trên cơ sở mô hình mạch tương đương (ECM) đã được công bố trong các nghiên cứu trước [1], [2], [6], nghiên cứu tích hợp cơ chế suy giảm tham số (giảm dung lượng và tăng điện trở trong theo chu kỳ) nhằm phản ánh ảnh hưởng của lão hóa đến đặc tính vận hành của pin.

Kết quả mô phỏng với dòng tải không đổi 3A trong thời gian 300s cho thấy pin suy giảm có điện áp đầu cực thấp hơn và mức sụt áp lớn hơn so với pin mới dưới cùng điều kiện làm việc. Xu hướng này phù hợp với các kết quả nghiên cứu về cơ chế lão hóa pin lithium-ion [4], [5].

Sự thay đổi đặc tính điện này dẫn đến thay đổi thời điểm kích hoạt các ngưỡng điều khiển trong chiến lược quản lý năng lượng dựa trên luật (rule-based). Cụ thể, trong trường hợp pin suy giảm, trạng thái sạc (SoC) đạt đến ngưỡng dưới sớm hơn, làm EMS chuyển chế độ vận hành sớm hơn nhằm duy trì ổn định điện áp và bảo vệ hệ lưu trữ năng lượng. Điều này cho thấy việc tích hợp mô hình suy giảm tham số vào mô phỏng EMS là cần thiết để đánh giá chính xác hiệu suất vận hành dài hạn của hệ thống điện tàu thủy điện/ hybrid, phù hợp với định hướng nghiên cứu EMS có xét đến suy giảm pin trong các công trình gần đây [7], [8].

Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình sẽ được mở rộng theo hướng xét đến tải biến thiên, cấu hình cụm pin nhiều tế bào nối tiếp - song song và ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường đến quá trình suy giảm tham số, nhằm nâng cao tính ứng dụng trong thiết kế và tối ưu hệ thống năng lượng tàu thủy.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.63**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. He, R. Xiong, and J. Fan (2011), *Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation*, Energies.
- [2] M. Chen and G. A. Rincon-Mora (2006), *Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance*, IEEE Transactions on Energy Conversion.
- [3] G. L. Plett (2004), *Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-Based HEV Battery Packs*, Journal of Power Sources.
- [4] J. Vetter et al. (2005), *Ageing Mechanisms in Lithium-Ion Batteries*, Journal of Power Sources.
- [5] M. Ecker et al. (2014), *Calendar and Cycle Life Study of Li(NiMnCo)O₂-Based 18650 Lithium-Ion Batteries*, Journal of Power Sources.
- [6] Shepherd C. M. (1965), *Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge*, Journal of Electrochemical Society, Vol.112 (7), pp.657-664.
- [7] Choi, Y., & Kim, K. (2024), *Energy management strategy for hybrid electric ships considering battery degradation*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.12(10), p. 1755.
doi: 10.3390/jmse12101755.
- [8] Ge, Y., Zhang, L., Wang, H., & Sun, Z. (2023), *Energy management systems for hybrid ship power systems: A review*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.11(7),p. 1271.
doi: 10.3390/jmse11071271
- [9] Tian, J.; Chen, C.; Shen, W.; Sun, F.; Xiong, R (2023), *Deep learning framework for lithium-ion battery state of charge estimation: Recent advances and future perspectives*, Energy Storage Mater. Vol.61, p. 102883.
- [10] Yang, F.; Shi, D.; Mao, Q.; Lam, K.H (2023), *Scientometric research and critical analysis of battery state-of-charge estimation*, J. Energy Storage, Vol.58, p. 106283.

Ngày nhận bài:	26/01/2026
Ngày nhận bản sửa:	14/02/2026
Ngày duyệt đăng:	22/02/2026