

NGUỒN NĂNG LƯỢNG DỰ TRỮ CHO PHƯƠNG TIỆN ĐƯỜNG THỦY CỖ NHỎ

ENERGY STORAGE SYSTEM FOR SMALL MARINE VEHICLES

ĐẶNG ĐÌNH PHÚC, HỨA XUÂN LONG, NGUYỄN DUY QUANG*

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

**Email liên hệ: quangnd.ddt@vimaru.edu.vn*

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.i84.852>

Tóm tắt

Trước sức ép ngày càng tăng từ các quy định giảm phát thải khí nhà kính (GHG) của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO), việc tích hợp hệ thống lưu trữ năng lượng pin (Battery Energy Storage System - BESS) trên các phương tiện đường thủy cỡ nhỏ đang được quan tâm như một giải pháp chuyển đổi năng lượng khả thi và bền vững. Trong bối cảnh đó, bài báo này tập trung phân tích vai trò của pin Lithium-ion - công nghệ pin chiếm ưu thế hiện nay - trong các hệ thống BESS phục vụ điện khí hóa tàu thủy. Trên cơ sở đánh giá hiệu suất, tuổi thọ và các đặc điểm kỹ thuật quan trọng của từng loại pin (NMC, LFP, LTO, ...), nghiên cứu đề xuất phương pháp chọn pin phù hợp với từng loại phương tiện dựa trên nhu cầu công suất và đặc thù vận hành. Ngoài ra, bài báo xây dựng mô hình mô phỏng hoạt động của phà điện sử dụng hệ thống BESS trong điều kiện thực tế, nhằm phân tích ảnh hưởng của các yếu tố như thời gian cập cảng, tần suất sạc, mức tiêu thụ tải và độ sâu xả (DoD) đến hiệu suất toàn hệ thống. Mục tiêu chính của nghiên cứu là xác định các giới hạn vận hành an toàn, từ đó đề xuất cấu hình pin và chiến lược khai thác hợp lý giúp duy trì hành trình ổn định, tối ưu hóa tuổi thọ pin và giảm chi phí vận hành. Kết quả đạt được góp phần xây dựng cơ sở khoa học cho việc ứng dụng hệ thống lưu trữ năng lượng trên các phương tiện thủy cỡ nhỏ, mở ra hướng phát triển bền vững cho ngành vận tải biển nội địa.

Từ khóa: BESS, năng lượng tái tạo, điện khí hóa, IMO, phát thải GHG.

Abstract

Amid increasingly stringent regulations on greenhouse gas (GHG) emissions set by the International Maritime Organization (IMO), integrating Battery Energy Storage Systems (BESS) into small-scale marine vessels is

emerging as a viable and sustainable energy transition solution. This paper focuses on analyzing the role of Lithium-ion batteries - currently the dominant battery technology - in BESS applications for maritime electrification. Based on performance assessments, service life, and key technical characteristics of various battery chemistries (such as NMC, LFP, and LTO), the study proposes a method for selecting appropriate battery types tailored to specific vessel categories and operational profiles. In addition, the paper presents a simulation model of an electric ferry powered by a BESS to evaluate system performance under realistic operating conditions. The model investigates the effects of port stay duration, charging frequency, load demand, and depth of discharge (DoD) on the overall energy efficiency and battery degradation. The primary objective is to identify safe operational limits and propose optimal battery configurations and usage strategies to ensure consistent voyage schedules, extend battery lifespan, and minimize operational costs. The results provide a scientific foundation for applying BESS on small marine vessels and highlight the potential of Lithium-ion battery systems to facilitate low-emission, cost-effective, and reliable maritime transportation. This research contributes to the broader effort of enabling sustainable development in the domestic shipping sector.

Keywords: BESS, renewable energy, electrification, IMO, GHG emissions.

1. Đặt vấn đề

Ngành vận tải biển thải ra khoảng 940 triệu tấn CO₂ mỗi năm, chiếm 2,5% lượng khí nhà kính toàn cầu, bên cạnh các khí ô nhiễm khác như SO₂ và NO_x từ nhiên liệu hóa thạch. Do đó, việc giảm phát thải GHG là ưu tiên hàng đầu không chỉ trong hàng hải mà

còn trong toàn bộ lĩnh vực công nghiệp.

Theo Báo cáo GHG lần thứ 4 của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) năm 2020, lộ trình cắt giảm phát thải đến năm 2050 đặt ra thách thức lớn cho ngành. Một trong các giải pháp khả thi là tối ưu sử dụng năng lượng và áp dụng nguồn năng lượng thay thế. Việc điện khí hóa hệ thống đẩy và các hệ thống phụ trợ không chỉ đáp ứng yêu cầu khí thải mà còn nâng cao hiệu suất vận hành.

Trong bối cảnh đó, nhiều tàu đã sử dụng động cơ đốt trong kết hợp máy phát hoặc chuyển hoàn toàn sang hệ thống điện tích hợp. Tuy nhiên, chuyển đổi này còn gặp thách thức về hiệu suất thấp của các hệ thống chuyển đổi nhiệt-điện. Năng lượng tái tạo như mặt trời, gió, sóng có tiềm năng nhưng thiếu ổn định, đòi hỏi phải kết hợp với hệ thống lưu trữ năng lượng.

Nghiên cứu này tập trung đánh giá ứng dụng hệ thống lưu trữ năng lượng (ESS) sử dụng pin Lithium-Ion (LIB) trên các phương tiện thủy cỡ nhỏ. LIB được xem là giải pháp kinh tế nhất hiện nay nhờ ưu thế về trọng lượng, kích thước, hiệu suất và chi phí. Mặc dù số lượng tàu thương mại sử dụng ESS ngày càng tăng, các nghiên cứu chuyên sâu về LIB trên tàu vẫn còn hạn chế. Do đó, nhóm tác giả tiến hành thu thập và phân tích dữ liệu thực tế về các phương tiện thủy sử dụng ESS, nhằm làm rõ đặc điểm kỹ thuật và hiệu quả ứng dụng LIB. Mục tiêu là nhận diện cơ hội, thách thức và đóng góp giải pháp điện khí hóa khả thi cho lĩnh vực vận tải thủy nội địa.

2. Thách thức khi tích hợp BESS và các loại pin Lithium-ion dùng trên phương tiện đường thủy

2.1. Những thách thức khi tích hợp BESS trên phương tiện đường thủy

Khi ngành vận tải biển đang thay đổi với các quy định nghiêm ngặt nhằm giảm phát thải khí nhà kính, việc tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo vào hệ thống điện tàu nhỏ nổi lên như một lĩnh vực then chốt để thăm dò. Điều này không chỉ phù hợp với các yêu

cầu quốc tế mà còn mở ra con đường cho các giải pháp năng lượng sáng tạo như năng lượng mặt trời và năng lượng gió, đã cho thấy triển vọng trong việc nâng cao hiệu quả hoạt động và an toàn môi trường. Bằng cách tận dụng các hệ thống lưu trữ năng lượng pin (BESS), tàu có thể đạt được hiệu quả nhiên liệu cao hơn trong khi vẫn đảm bảo cung cấp năng lượng đáng tin cậy trong các nhu cầu hoạt động khác nhau. Khi việc nghiên cứu BESS được phát triển, điều quan trọng là phải giải quyết các thách thức liên quan đến việc tích hợp chúng vào các tiêu chuẩn hàng hải hiện có [2]. Một trong những số đó là chuẩn hóa các giao diện BESS, không chỉ giảm thiểu chi phí lắp đặt mà còn giảm rủi ro vận hành có thể phát sinh từ các hệ thống được thiết kế riêng. Hơn nữa, quá trình chuyển đổi sang hệ thống đẩy điện phải đi kèm với các chương trình đào tạo toàn diện cho các thuyền viên và kỹ sư, đảm bảo họ được trang bị để vận hành, quản lý hiệu quả các công nghệ mới này. Khía cạnh đào tạo rất quan trọng khi các ngành công nghiệp thích ứng với các công nghệ xanh mới, thúc đẩy đổi mới và bền vững trong các hoạt động vận tải biển [3].

2.2. Các loại pin Lithium-ion dùng trên phương tiện đường thủy

Ngày nay, phần lớn các tàu điện là tàu du lịch nhỏ; tuy nhiên xét đến tổng năng lượng được lắp đặt trên tàu, việc sử dụng pin trên tàu lớn đóng vai trò quan trọng (ví dụ: Phà, tàu du lịch, tàu đánh cá,...), mặc dù số lượng tàu lớn đang hoạt động vẫn thấp so với số lượng tàu nhỏ. Nhìn chung, tàu trọng tải càng nhỏ thì việc lắp đặt hệ thống BESS càng dễ dàng.

Như Bảng 1, yêu cầu về tải của tàu có thể thay đổi rất nhiều phụ thuộc vào loại tàu và mục đích sử dụng. Do đó, việc điện khí hóa tàu được phát triển mạnh cho một số loại phương tiện như tàu Ro-ro là loại tàu tốt nhất cho việc điện khí hóa vì trong quá trình xếp dỡ thì tàu cập cảng trong một thời gian tương đối dài, thời gian này rất thích hợp cho quá trình nạp lại năng lượng cho BESS.

Bảng 1. Các loại pin phù hợp với từng loại phương tiện đường thủy [4]

Loại tàu	Công suất (MW)	Loại pin thích hợp			
		Dung lượng	Công suất	Tuổi thọ	Loại
Tàu RoRo	2-10	Cao	Tùy thuộc nhu cầu	Rất cao	NMC, LFP, LTO
Tàu cao tốc	1-15	Cao	Cao	Cao	NMC, LFP, LTO
Tàu lai đất	2-4	Cao	Cao	Tùy thuộc nhu cầu	NMC, LFP, LTO
Tàu đánh cá	0.5-5	Thấp	Trung bình thấp	Tùy thuộc nhu cầu	NMC, LFP
Tàu chở hàng có cần cẩu	5-15	Thấp	Cao	Cao	NMC, LFP, LTO
Du thuyền	1-30	Cao	Thấp	Thấp	NMC, LFP, LTO

Trong những công nghệ ESS khác nhau, pin lithium-ion có thể đáp ứng được các yêu cầu khác nhau. Tuy nhiên, điều quan trọng nhất phải xét tới hiệu suất của pin ảnh hưởng tới tuổi thọ của chúng như thế nào trong các chế độ khác nhau. Tốc độ sạc và xả, độ xả sâu (Depth of Discharge - DoD), dung lượng, độ hao hụt ảnh hưởng đáng kể tới tuổi thọ của pin lithium-ion trên tàu trong chế độ điều động, hành trình hay cập cảng [5]. Do đó cần phải quản lý các yếu tố này để tối ưu hoá hoạt động của tàu cũng như hiệu suất, độ an toàn của pin. Ví dụ, trong khoảng thời gian điều động, nhu cầu điện năng là cao điểm, tốc độ xả dòng điện cao có thể tạo ra nhiệt độ cao. Hơn nữa, dung lượng tức là lượng năng lượng tích lũy có thể được xả khỏi pin trước khi pin không còn đủ tiêu chuẩn với mục đích sử dụng ban đầu, có thể dẫn tới tình trạng không đáp ứng được nhu cầu điện năng do mất dung lượng và điện trở của pin tăng cao. Đối với hành trình dài ngày, tốc độ xả thấp thông thường sẽ giảm thiểu áp lực lên pin, kéo dài tuổi thọ của pin. Tuy nhiên, nếu năng lượng được lưu trữ trong BESS thấp, việc xả sâu thường xuyên cũng có thể dẫn tới rút ngắn tuổi thọ của pin. Trong trường hợp này, thông lượng năng lượng trong suốt thời gian sử dụng có ảnh hưởng lớn vì dung lượng pin giảm sẽ dẫn tới quãng đường di chuyển và tốc độ của tàu. Duy trì độ xả sâu vừa phải (tối đa 80%) là một biện pháp hiệu quả để cân bằng hiệu suất và tuổi thọ của pin. Khi cập cảng, tốc độ sạc là yếu tố chính gây áp lực lên pin. Giảm tốc độ sạc pin có thể thực hiện bằng cách kéo dài thời gian tàu đỗ tại cảng, tuổi thọ pin vì vậy có thể được kéo dài hơn.

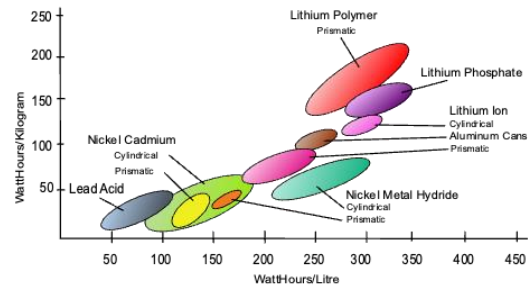
3. Lựa chọn loại pin Lithium-ion cho hệ thống lưu trữ năng lượng tàu thủy

3.1. Tiêu chí đánh giá pin Lithium-ion khi sử dụng cho BESS

Hiệu suất của pin phụ thuộc vào ba yếu tố chính: thành phần hóa học, công nghệ chế tạo và cách bố trí hệ thống. Quá trình thiết kế pin có thể được chia thành hai giai đoạn chính: lựa chọn cell pin và lựa chọn cấu hình hệ thống. Trong đó, việc lựa chọn hóa chất cell phù hợp đòi hỏi sự cân nhắc kỹ lưỡng giữa các thông số như dung lượng, phạm vi điện áp, công suất tối đa và hiệu suất lão hóa.

Một trong những thông số quan trọng để đánh giá pin trong các ứng dụng vận tải là công suất riêng được định nghĩa là mật độ năng lượng liên quan đến kích thước (Wh/m^3 hoặc Wh/L) và trọng lượng (Wh/kg). Hình 1 minh họa các giá trị năng lượng riêng trung bình cho các công nghệ cell pin sạc khác nhau. Qua đó, có thể nhận thấy rằng năng lượng riêng của các

công nghệ pin dao động trong khoảng từ 20Wh/kg đến 200Wh/kg . Do năng lượng riêng thấp, pin axit-chì được xem là lựa chọn kém tối ưu cho các ứng dụng hàng hải yêu cầu khả năng lưu trữ năng lượng cao. Ngược lại, pin lithium-ion, có khả năng giảm thiểu đáng kể trọng lượng và kích thước trong khi vẫn đáp ứng được yêu cầu về năng lượng cần thiết.

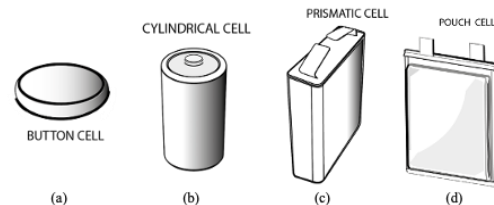


Nguồn: Bartinez Bertrand, 2017

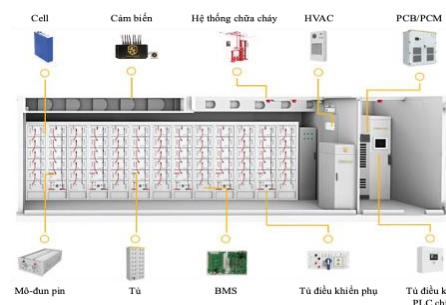
Hình 1. Năng lượng riêng của các loại pin thứ cấp khác nhau được biểu diễn thông qua hai thông số chính: Mật độ năng lượng khối lượng (Wh/kg) và mật độ năng lượng thể tích (Wh/L)

3.2. Cấu trúc chung của hệ thống BESS

Các tế bào (cell) là đơn vị chức năng chính của pin, bao gồm các thành phần cơ bản như điện cực, chất điện phân và cực. Các thành phần này được xếp và đặt trong một vỏ kín để đảm bảo tính toàn vẹn và an toàn. Dựa trên quy trình sản xuất và hình dạng cuối cùng, có bốn loại cell chính (như Hình 2).



Hình 2. Phân loại LIB theo hình dạng: (a) Pin đồng xu; (b) Pin hình trụ; (c) Pin hình lăng trụ; (d) Pin dạng túi



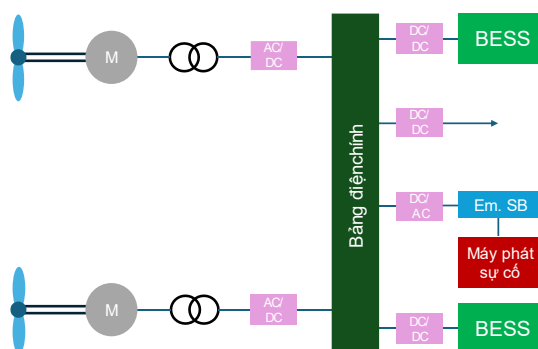
Hình 3. Các thành phần cơ bản có trong hệ thống BESS

Để đáp ứng yêu cầu về năng lượng và công suất, các tế bào thường được kết hợp để tạo thành các hệ thống pin lớn hơn. Ngoài các kết nối điện, hệ thống BESS hàng hải thường bao gồm các thiết bị quản lý điện tử (như PCB/PCM, BMS), hệ thống an toàn và hệ thống làm mát, tất cả được tích hợp bên trong vỏ chống thấm nước [6] (như Hình 3).

3.3. Cấu trúc mạng điện cho hệ thống đẩy sử dụng BESS

Cấu trúc mạng điện trên tàu chủ yếu phụ thuộc vào loại hệ thống đẩy (cơ khí, lai hoặc điện). Theo truyền thống, các tàu có các nguồn điện riêng dành cho hệ thống đẩy, hệ thống phụ trợ và cho trường hợp khẩn cấp. Năng lượng cho hệ thống đẩy được tạo ra bởi động cơ đốt trong (động cơ chính), trong khi năng lượng cho hệ thống phụ trợ và khẩn cấp được sản xuất bởi các tổ máy phát điện bao gồm một máy phát điện được dẫn động bởi động cơ đốt trong (tổ máy phát).

Thông thường, tàu được đẩy bằng cơ chế cơ khí thông qua động cơ đốt trong nối đồng trục với đồng trục truyền động và hộp số, cung cấp mô-men xoắn cho chân vịt. Để đáp ứng nhu cầu tải điện biến động (ví dụ như tàu dịch vụ cung ứng ngoài khơi) hoặc yêu cầu không gian cụ thể (ví dụ như tàu du lịch), hiện nay có nhiều loại hệ thống đẩy điện với chân vịt được dẫn động bởi động cơ điện (Electric Motor - EM). Các sơ đồ bố trí điển hình so sánh hệ thống đẩy truyền thống được thể hiện trong Hình 4, trong đó, trong sơ đồ, các động cơ điện được kết nối với bảng điện chính của tàu thông qua bộ chuyển đổi và tất cả các tải cần thiết. Trong Hình 4, hệ thống đẩy điện và tải phụ trợ được cung cấp bởi nguồn năng lượng lưu trữ.



Hình 4. Hệ thống đẩy tàu thủy thuần điện

4. Phương pháp và mô hình hóa

Việc mô hình hóa và ước tính bao gồm các yếu tố như thời gian sạc cần thiết, trạng thái sạc (State of Charge - SoC) của pin trong quá trình vận hành, C-rate (tải trọng pin), mức tiêu thụ năng lượng và tổn

thất hiệu suất năng lượng. Từ các thông số này, có thể đánh giá sự thay đổi trạng thái sức khỏe pin (State of Health - SoH) và tuổi thọ pin, mặc dù vẫn còn một số thông số không đảm bảo.

Công suất sạc đỉnh không thể đạt được trong toàn bộ thời gian sạc khi pin ở trạng thái sạc cao (SoC). Do đó, các giá trị trung bình thấp hơn được nhập vào mô hình. Trong kịch bản, thời gian kết nối và ngắt kết nối với trạm sạc được đặt là 2,5 - 3 phút.

4.1. Kịch bản cơ sở

Giả thiết cho phương tiện đường thủy trong nghiên cứu điển hình được xây dựng dựa trên lịch trình hoạt động của tàu cao tốc với hành trình 45km (theo Bảng 2). Lịch trình hiện tại dựa trên thời gian di chuyển 75 phút giữa các cảng.

Sẽ có một độ lệch nhỏ về thời gian di chuyển giữa các chặng nếu thiết kế của phà là loại phà một đầu. Việc xoay chuyển phà trên một chặng hành trình sẽ làm tăng thêm vài phút để thao tác, tùy thuộc vào thời tiết, dòng chảy và tình trạng biển.

Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng là loại phà hai đầu, giúp thời gian thao tác gần như bằng nhau trên cả hai chặng của hành trình khứ hồi.

Mức tiêu thụ năng lượng từ pin giữa các lần sạc được tính toán trung bình là 1.685,5kW. Con số này bao gồm các tổn thất trong hệ thống truyền động từ pin đến chân vịt, dẫn đến Độ sâu xả (Depth of Discharge - DoD) là 25% cho mỗi chuyến đi. Năng lượng cung cấp cho pin trong quá trình sạc kéo dài 15 - 2,5 = 12,5 phút tại mỗi cảng là 1.510kW. Trong thực tế, đường cong sạc không phải là tuyến tính, do đó 90% công suất cực đại của bộ sạc (8,9MVA) đã được sử dụng để tính toán.

Công suất cực đại của cả hai trạm sạc được đặt tại hai cảng là 8,9 MVA nhằm đáp ứng yêu cầu về trọng lượng vỏ thép. Dung lượng pin sử dụng được tính toán cho một ngày hoạt động, bao gồm cả quá trình sạc ban đêm và các tổn thất trong chuỗi sạc (như Hình 5).

4.2. Kịch bản thời gian cập cảng ngắn hơn

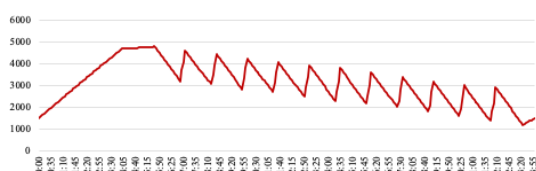
Trong kịch bản này, thời gian sạc tại mỗi cảng được giả định giảm từ 15 phút xuống còn 10 phút do các yếu tố khách quan như thời tiết hoặc mật độ tàu tại cảng. Khi trừ đi thời gian kết nối/ngắt kết nối (2,5 phút), tổng thời gian sạc chỉ còn 7,5 phút. Với công suất bộ sạc ở mức 90% công suất cực đại (8,9 MVA), lượng năng lượng có thể sạc mỗi lượt giảm còn khoảng 910kW, so với 1.510kW trong điều kiện tiêu chuẩn.

Việc giảm thời gian sạc dẫn đến trạng thái sạc

Bảng 2. Lịch trình di chuyển của phà điện

Lịch trình	Thời gian					
Khởi hành từ cảng A	05:35	08:35	11:35	14:35	17:35	20:35
Cập cảng B	06:50	09:50	12:50	15:50	18:50	21:50
Thời gian sạc tại cảng B	00:15	00:15	00:15	00:15	00:15	00:15
Khởi hành từ cảng B	07:05	10:05	13:05	16:05	19:05	22:05
Cập cảng A	08:20	11:20	14:20	17:20	20:20	23:20
Thời gian sạc tại cảng A	00:15	00:15	00:15	00:15	00:15	

(SoC) tại điểm khởi hành thấp hơn, độ sâu xả (DoD) tăng lên, và nguy cơ hết năng lượng trong cuối ngày vận hành. Mô hình cho thấy hệ thống BESS hiện tại không đủ khả năng bù đắp năng lượng khi thời gian sạc rút ngắn đáng kể, trừ khi được nâng cấp dung lượng hoặc công suất sạc (như Hình 6).



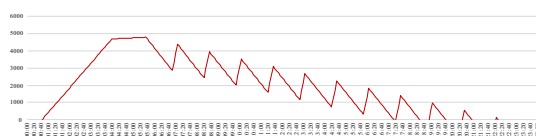
Hình 5. Năng lượng pin tiêu thụ trong chu kỳ vận hành liên tục 24 giờ, bao gồm 12 chuyến đi một chiều hoặc 6 chuyến đi 2 chiều, được khảo sát trên mô hình phà điện hai đầu



Hình 6. Năng lượng pin tiêu thụ trong chu kỳ vận hành liên tục 24 giờ, theo kịch bản thời gian cập cảng 10 phút

4.3. Kịch bản nhu cầu tải cao hơn

Kịch bản này mô phỏng điều kiện tải tăng thêm 15% do nhu cầu vận chuyển hành khách hoặc hàng hóa tăng cao, hoặc ảnh hưởng của thời tiết làm tăng lực cản. Mức tiêu thụ năng lượng giữa hai lần sạc tăng từ 1.686kW lên khoảng 1.938kW.



Hình 7. Năng lượng pin tiêu thụ trong chu kỳ vận hành liên tục 24 giờ, theo kịch bản nhu cầu tải tăng 15%

Với dung lượng pin và chu kỳ sạc không đổi, độ sâu xả (DoD) tăng từ 25% lên khoảng 28,7%. Mức tăng này tuy chưa vượt ngưỡng khuyến cáo (80%)

nhưng nếu kéo dài trong nhiều chặng liên tục không thể vận hành theo lịch trình trong ngày (như Hình 7).

5. Kết luận

Nghiên cứu đã đánh giá tính khả thi và hiệu quả của việc ứng dụng pin Lithium-ion trong hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS) cho phương tiện thủy cỡ nhỏ, thông qua mô hình mô phỏng theo các kịch bản thực tế. Kết quả cho thấy, các yếu tố như thời gian sạc, biến động tải và chiến lược vận hành ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất và tuổi thọ pin. Việc tối ưu lịch trình vận hành và lựa chọn cấu hình pin phù hợp là cần thiết để đáp ứng nhu cầu năng lượng liên tục, đồng thời kéo dài tuổi thọ hệ thống. Trong tương lai, hướng nghiên cứu sẽ tập trung vào việc tích hợp hệ thống quản lý pin thông minh (BMS) và khả năng kết hợp với các nguồn năng lượng tái tạo nhằm nâng cao tính linh hoạt và bền vững trong vận hành.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.58**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] IMO (2021). *Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020 - Executive Summary*. International Maritime Organization, London, UK, 2021.
- [2] Зарипов, Р. М. (2023), *Development and research of a small electric-powered vessel using photovoltaic cells*, Қазақстан Ғылымы Мен Техникасы, DOI: <https://doi.org/10.48081/abv15196>.
- [3] Pengcheng, P., Sun, Y., Yuan, C., Yan, X., & Tang, X. (2021), *Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111048>.
- [4] Muhammad Sadiq, Syed Wajahat Ali, Yacine Terriche, Muhammad Umair Mutarraf, Mustafa Alrayah Hassan, Khalid Hamid, Zulfiqar Ali, Jia

- Yin Sze, Chun-Lien Su (2021), *Future greener seaports: A review of new infrastructure, challenges, and energy efficiency measures*, IEEE Access, Vol.9, pp.75125-75153.
- DOI:
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3081430>
- [5] Bordin, C., & Mo, O. (2019), *Including power management strategies and load profiles in the mathematical optimization of energy storage sizing for fuel consumption reduction in maritime vessels*, Journal of Energy Storage, Vol.23, pp.425-441.
- [6] Bielewski, M., Blagoeva, D., Cordella, M., Di Persio, F., Gaudillat, P., Hildebrand, S., Mancini, L., Mathieux, F., Moretto, P., Paffumi, E., et al (2020). *Analysis of Sustainability Criteria for Lithium-Ion Batteries Including Related Standards and Regulations*. European Commission, Brussels, Belgium.
- [7] Gifford, S. Charting a Course: Batteries in the Maritime Industry (2025). *Faraday Insights Report No. 22*, Faraday Institution, Oxfordshire, UK.
- [8] Cao, Y., Chen, L., Wang, X., Zhang, T., & Xu, H. (2023), *Optimization of battery energy storage system size and power allocation strategy for fuel cell ship*, Energy Science & Engineering, Vol.11, No.1, pp.123-136.
- [9] DNV (2022). *Batteries Gain Momentum in the Maritime Sector*. Maritime Impact.
- [Online]. Available: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Batteries-gain-momentum-in-the-maritime-sector>

Ngày nhận bài:	09/04/2025
Ngày nhận bản sửa:	25/04/2025
Ngày duyệt đăng:	28/04/2025