

THỰC HIỆN CHIẾN LƯỢC CẮT ĐỈNH TẢI DỰA TRÊN THUẬT TOÁN FUZZY-PID CHO TÀU DỊCH VỤ ĐIỆN GIÓ NGOÀI KHƠI

RESEARCH ON IMPLEMENTING PEAK SHAVING STRATEGY BASED ON FUZZY-PID ALGORITHM FOR OFFSHORE WIND SERVICE VESSELS

ĐỖ KHẮC TIỆP*, NGUYỄN VĂN TIẾN

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

*Email liên hệ: dokhactiep@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1099>

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu chiến lược cắt đỉnh tải nhằm tối ưu hóa vận hành hệ thống điện hybrid trên tàu dịch vụ điện gió ngoài khơi. Điểm mới của nghiên cứu là việc đề xuất bộ điều khiển Fuzzy-PID tự thích nghi để quản lý hệ thống lưu trữ năng lượng bằng pin (BESS), thay thế cho các bộ điều khiển PID truyền thống có thông số cố định vốn khó đáp ứng với các đặc tính tải phi tuyến. Trong môi trường biển thực tế, phụ tải tàu thủy biến động ngẫu nhiên do tác động của hệ thống định vị động (DP) và thiết bị nâng hạ. Bộ điều khiển đề xuất sử dụng Logic mờ để tinh chỉnh trực tuyến các thông số của bộ điều khiển PID dựa trên sai số công suất thực tế. Cơ chế này cho phép BESS phản hồi linh hoạt để hấp thụ các dao động công suất tần số cao, giúp máy phát điện luôn duy trì làm việc ổn định tại điểm vận hành tối ưu. Nghiên cứu cũng tích hợp các ràng buộc an toàn nghiêm ngặt về trạng thái sạc/xả (SoC) để bảo vệ tuổi thọ pin và ngăn ngừa mất điện lưới. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink qua bốn kịch bản đặc trưng — bao gồm chế độ DP, tải đỉnh đột ngột, sự cố máy phát và tải thấp — đã khẳng định tính hiệu quả của thuật toán. Bộ điều khiển đề xuất giúp tiết kiệm nhiên liệu ước tính 8-12% và loại bỏ hoàn toàn các vi phạm giới hạn vận hành của máy phát.

Từ khóa: Cắt đỉnh tải, Bộ điều khiển Fuzzy, Bộ điều khiển PID, BESS.

Abstract

The paper investigates a peak shaving strategy aimed at optimizing the operation of hybrid power systems on offshore wind service vessels. The core novelty of this research is the proposal of a self-tuning Fuzzy-PID controller to manage the Battery Energy Storage System (BESS), replacing traditional fixed-parameter PID controllers that struggle to respond to nonlinear load

characteristics. In real-world maritime environments, vessel loads fluctuate randomly due to the impact of Dynamic Positioning (DP) systems and lifting equipment. The proposed controller utilizes Fuzzy Logic to adaptively tune PID parameters online based on real-time power errors. This mechanism allows the BESS to respond flexibly, absorbing high-frequency power fluctuations and ensuring the diesel generator maintains stable operation at its optimal loading point. The study also integrates strict safety constraints regarding the State of Charge (SoC) to protect battery lifespan and prevent blackouts. Simulation results on the MATLAB/Simulink platform across four characteristic scenarios—including DP mode, sudden peak loads, generator failure, and low-load conditions—confirm the effectiveness of the algorithm. The proposed controller achieves an estimated fuel saving of 8-12% and completely eliminates operational limit violations for the generator.

Keywords: Peak Shaving, Fuzzy Logic Controller, PID Controller, BESS.

1. Giới thiệu

Trong hệ thống điện tàu thủy hiện đại, sự biến động không ngừng của phụ tải là thách thức lớn nhất đối với việc duy trì tính ổn định và hiệu suất của lưới điện nội bộ [1]. Các máy phát điện Diesel (DG) truyền thống thường có đặc tính quán tính nhiệt và cơ học lớn, dẫn đến sự chậm trễ trong việc đáp ứng các thay đổi tải đột ngột [2]. Đặc biệt, sự xuất hiện của các "đỉnh tải" ngắn hạn buộc hệ thống quản lý năng lượng (PMS) phải vận hành dư thừa số lượng máy phát ở chế độ dự phòng quay, gây ra tình trạng vận hành hiệu suất thấp và tăng tích tụ muội than trong buồng đốt do cháy non tải [3], [4].

Chiến lược cắt đỉnh tải sử dụng hệ thống lưu trữ năng lượng bằng Pin (BESS) đã trở thành giải pháp

kỹ thuật then chốt để giải quyết vấn đề này [5]. BESS với ưu thế về tốc độ phản hồi tính bằng miligiây có khả năng hấp thụ các dao động công suất tần số cao, cho phép các máy phát điện duy trì trạng thái làm việc ổn định tại điểm vận hành tối ưu [6], [7]. Việc thực hiện chiến lược này không chỉ giới hạn ở việc bù đắp công suất mà còn đóng vai trò bảo vệ hệ thống trước nguy cơ sụt áp và rã lưới khi có sự thay đổi tải cục bộ [8].

Trong hệ thống điện tàu thủy hybrid, chiến lược cắt đỉnh tải là việc sử dụng hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS) để hấp thụ hoặc bù đắp các đỉnh công suất ngắn hạn, giúp máy phát diesel duy trì công suất ổn định trong dải vận hành tối ưu. Các phương án thực hiện bao gồm: PID thông số cố định, điều khiển dự báo (MPC) và bộ điều khiển thông minh thích nghi như Fuzzy-PID,... Phương án Fuzzy-PID được lựa chọn trong nghiên cứu này vì khả năng tự hiệu chỉnh trực tuyến phù hợp với phụ tải ngẫu nhiên của tàu dịch vụ điện gió ngoài khơi.

Tuy nhiên, hiệu quả của chiến lược cắt đỉnh tải phụ thuộc hoàn toàn vào cấu trúc của bộ điều khiển công suất. Các bộ điều khiển PID kinh điển với thông số cố định thường gặp khó khăn trong việc cân bằng giữa tốc độ đáp ứng và độ ổn định [9]. Trong môi trường vận hành thực tế, đặc tính của tải tàu thủy mang tính phi tuyến và ngẫu nhiên rất cao, khiến việc xác định các hệ số tối ưu trở nên phức tạp [10], [11]. Nếu bộ điều khiển không linh hoạt, BESS có thể bị xả/ nạp quá mức cần thiết, gây tổn hại đến tuổi thọ hóa học của cell pin và làm mất cân bằng trạng thái sạc (SoC) [12].

Để khắc phục các hạn chế nêu trên, các thuật toán điều khiển thông minh dựa trên Logic mờ đã được nghiên cứu rộng rãi nhờ khả năng xử lý thông tin không chính xác và điều chỉnh linh hoạt theo ngữ cảnh [13]. Logic mờ cho phép tích hợp các quy tắc kinh nghiệm của chuyên gia vận hành vào hệ thống điều khiển tự động, giúp bộ điều khiển cảm nhận được mức độ nghiêm trọng của sự biến động tải để đưa ra phản ứng phù hợp [14].

Nghiên cứu này tập trung vào việc thiết kế và mô phỏng bộ điều khiển Fuzzy-PID tự thích nghi nhằm thực hiện chiến lược Peak Shaving tối ưu. Hệ thống đề xuất sử dụng sai số công suất thời gian thực để điều chỉnh trực tiếp các thông số của bộ PID, từ đó tối ưu hóa dòng năng lượng giữa Pin và Máy phát điện [15]. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc nâng cấp hệ thống quản lý năng lượng trên các tàu hybrid thế hệ mới, đảm bảo sự hài hòa giữa hiệu suất vận hành và độ bền của thiết bị lưu trữ.

2. Mô hình toán học của hệ thống điện Hybrid

Hệ thống điện hybrid trên tàu dịch vụ điện gió ngoài khơi bao gồm ba thành phần chính: Diesel- máy phát (DG), hệ thống lưu trữ năng lượng bằng pin (BESS) và phụ tải. Các thành phần này được kết nối qua thanh cái một chiều hoặc xoay chiều thông qua bộ biến đổi công suất. Mô hình toán học được xây dựng để mô tả động lực học của từng phần tử và sự tương tác giữa chúng, làm cơ sở cho thiết kế bộ điều khiển.

Mô hình hệ thống trong nghiên cứu này được xây dựng dựa trên nguyên lý cân bằng công suất tại lưới điện chính trên tàu. Trong đó, các biến động về điện áp và tần số được giả định nằm trong giới hạn cho phép của các quy phạm đăng kiểm quốc tế. Việc giả định này cho phép mô hình tập trung sâu vào phân tích và tối ưu hóa chiến lược cắt đỉnh tải thông qua điều phối dòng công suất giữa các nguồn, đảm bảo tính hiệu quả của thuật toán đề xuất mà không làm phức tạp hóa quá trình tính toán điện lực cục bộ.

2.1. Mô hình Diesel - máy phát

Diesel- máy phát bao gồm động cơ Diesel và máy phát đồng bộ. Đáp ứng công suất tác dụng của tổ máy khi có tín hiệu điều khiển từ bộ điều tốc thường được mô tả bằng hàm truyền bậc nhất có trễ như công thức (1) [2, 9].

$$G_{DG}(s) = \frac{P_{DG}(s)}{P_{ref}(s)} = \frac{K_{DG}}{1 + \tau_{DG}s} e^{-T_d s} \quad (1)$$

Trong đó: P_{DG} - Công suất đầu ra của máy phát; P_{ref} - Công suất đặt; K_{DG} - Hệ số khuếch đại; T_d - Thời gian trễ do quán tính cơ khí và thời gian cháy nhiên liệu; τ_{DG} - Hằng số thời gian của hệ thống điều tốc - động cơ.

Bộ điều khiển tổ máy DG sử dụng bộ điều tốc truyền thống để điều tiết công suất theo hàm truyền (1).

2.2. Mô hình hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS)

BESS được kết nối với lưới qua bộ biến đổi nguồn (PCS). Bộ biến đổi có khả năng điều khiển công suất hai chiều với thời gian đáp ứng rất nhanh (cỡ mili giây). Do đó, ở thang thời gian 1 giây, PCS có thể coi là bộ khuếch đại lý tưởng với giới hạn:

$$P_{BESS}(t) = u(t) \cdot P_{BESS,max} \quad (2)$$

Với: $u(t) \in [-1, 1]$ là tín hiệu điều khiển (giá trị âm: Sạc, giá trị dương: Xả); $P_{BESS,max}$ là công suất định mức của bộ biến đổi.

Trạng thái năng lượng của pin (State of Charge - SoC) được mô tả bằng phương trình vi phân (3) [7,15].

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = -\eta \frac{P_{BESS}(t)}{E_{BESS}} \quad (3)$$

Với E_{BESS} là dung lượng định mức của hệ thống pin (kWh). Rồi rạc hóa phương trình trên với chu kỳ trích mẫu T_s :

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{\eta T_s}{E_{BESS}} P_{BESS}(k) \quad (4)$$

với η là hiệu suất sạc/xả, lấy giá trị $\eta = 0.95$; Giới hạn vận hành để bảo vệ tuổi thọ pin: $SOC_{min} = 0.2$ và $SOC_{max} = 0.9$.

Việc mô hình hóa BESS tập trung vào đặc tính động học của dòng công suất và trạng thái sạc (SoC) thay vì các phản ứng điện hóa nội tại. Phương pháp này phù hợp với mục tiêu điều phối năng lượng tổng thể trên tàu thủy, nơi tốc độ đáp ứng và khả năng bù công suất đỉnh là các yếu tố then chốt. Bằng cách sử dụng mô hình tích phân công suất có xét đến hiệu suất vận hành, nghiên cứu cung cấp một cái nhìn thực chứng về hiệu quả của chiến lược cắt đỉnh tải dưới tác động của các kích bản tải biến động mạnh, đồng thời đảm bảo tính tinh gọn về mặt toán học cho bộ điều khiển Fuzzy-PID đề xuất.

2.3. Mô hình cân bằng công suất và phụ tải

Tại điểm kết nối chung, phương trình cân bằng công suất tác dụng được xác định như biểu thức (5).

$$P_{DG}(t) + P_{BESS}(t) = P_{load}(t) + P_{loss}(t) \quad (5)$$

Giả thiết bỏ qua tổn thất công suất trong hệ thống ($P_{loss} \approx 0$), ta có phương trình đơn giản hóa (6).

$$P_{DG}(t) = P_{load}(t) - P_{BESS}(t) \quad (6)$$

3. Thiết kế bộ điều khiển

Bộ điều khiển Fuzzy-PID được đề xuất có cấu trúc song song, trong đó bộ PID cơ sở được hiệu chỉnh trực tuyến bởi bộ logic mờ dựa trên sai số và tốc độ thay đổi sai số. Mục tiêu là duy trì công suất máy phát P_{DG} bám theo điểm vận hành tối ưu $P_{opt} = 1360kW$ (thông số thực từ tàu CSOV 8720), đồng thời tận dụng BESS để cắt các đỉnh tải ngắn hạn.

3.1. Cấu trúc bộ điều khiển

Hình 1 mô tả cấu trúc tổng thể của hệ thống điều khiển. Trong cấu hình này, DG luôn là Master đảm bảo ổn định lưới điện tàu, BESS là Slave bù công suất

theo yêu cầu cắt đỉnh tải. Do đó, tổng công suất cấp cho tải luôn bằng $P_{DG} + P_{BESS}$, và P_{DG} được tự do thay đổi chậm theo điểm vận hành tối ưu, còn P_{BESS} đáp ứng nhanh các biến động tần số cao.

Tín hiệu phụ tải P_{load} được đo lường và so sánh với điểm vận hành tối ưu P_{opt} để tạo thành sai số:

$$e(t) = P_{opt} - P_{load}(t) \quad (7)$$

Bộ điều khiển Fuzzy-PID dựa trên sai số này để tính toán công suất đặt cho hệ thống lưu trữ năng lượng P_{BESS}^* . Tín hiệu này sau đó được đưa qua khâu giới hạn công suất và logic bảo vệ trạng thái nạp (SOC) để xác định công suất thực tế P_{BESS} .

Máy phát sẽ nhận phần công suất bù trừ còn lại theo phương trình cân bằng (8):

$$P_{DG} = P_{load} - P_{BESS} \quad (8)$$

Vòng phản hồi của hệ thống được khép kín thông qua việc cập nhật liên tục trạng thái SOC, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến các giới hạn điều khiển trong các chu kỳ kế tiếp.

3.2. Thiết kế bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID được thiết kế ở dạng số với chu kỳ trích mẫu $T_s = 1s$:

$$u_{PID}(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{j=0}^k e(j) + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (9)$$

Trong đó, $e(k)$ là giá trị của sai số liên tục $e(t)$ từ công thức (7) tại thời điểm lấy mẫu thứ k, tức $e(k) = e(kT_s)$.

Các tham số danh định K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} được xác định bằng phương pháp Ziegler-Nichols cho hệ thống máy phát có hàm truyền như biểu thức (1) với hằng số thời gian $\tau_{DG} = 2s$. Kết quả thu được các giá trị thiết kế như sau: $K_{p0} = 0,6$; $K_{i0} = 0,08$; $K_{d0} = 0,02$.

3.3. Bộ logic mờ thích nghi

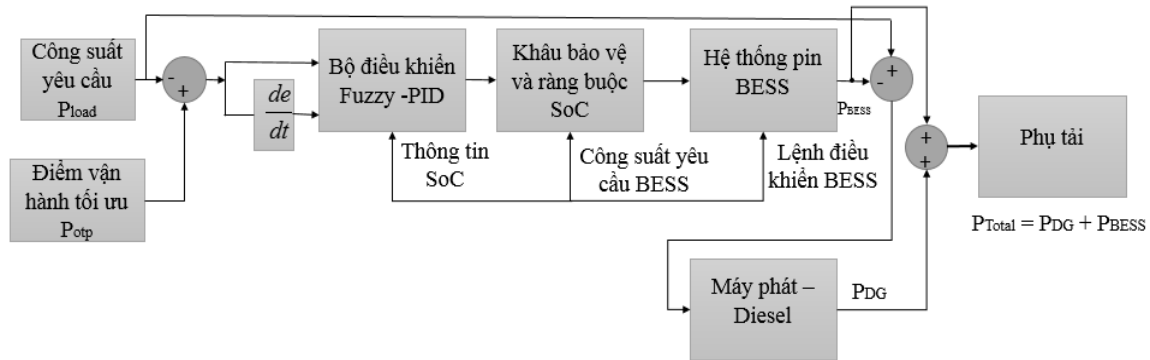
Bộ logic mờ được thiết kế với hai đầu vào là sai số $e(k)$ và đạo hàm của sai số $\dot{e}(k)$:

$$\dot{e}(k) \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s}$$

Đầu ra của bộ logic mờ là các hệ số hiệu chỉnh $\alpha_p, \alpha_i, \alpha_d$. Các hệ số này được sử dụng để điều chỉnh trực tuyến các tham số của bộ điều khiển PID theo công thức (10).

$$\begin{aligned} K_p &= K_{p0} \cdot \alpha_p \\ K_i &= K_{i0} \cdot \alpha_i \\ K_d &= K_{d0} \cdot \alpha_d \end{aligned} \quad (10)$$

Trong đó: K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} là các giá trị tham số đã



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc của hệ thống

được xác định trước đó. Việc hiệu chỉnh này giúp bộ điều khiển thích nghi tốt hơn với các biến động phụ tải phức tạp của tàu CSOV.

Các tập mờ cho đầu vào được định nghĩa trên miền giá trị chuẩn hóa của e và $\dot{e}$ với các hàm liên thuộc dạng hình tam giác. Gồm 5 biến ngôn ngữ đầu vào gồm: NL (Negative Large), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small), PL (Positive Large). Và 3 biến ngôn ngữ đầu ra: S (Small), M (Medium), L (Large).

Các luật mờ được xây dựng dựa trên kinh nghiệm vận hành: Khi sai số lớn (đỉnh tải xuất hiện), cần tăng K_p và K_d để đáp ứng nhanh, đồng thời giảm K_i để tránh tích phân bão hòa. Bảng 1 trình bày một số luật điển hình cho α_p .

Các luật tương tự cho α_i và α_d với xu hướng: α_i giảm khi $|e|$ lớn, α_d tăng khi $|\dot{e}|$ lớn.

Phương pháp giải mờ trọng tâm được sử dụng để tính giá trị rõ cho các hệ số hiệu chỉnh $\alpha_p, \alpha_i, \alpha_d$. Trong nghiên cứu này, để đơn giản hóa việc hiện thực hóa thuật toán trên môi trường MATLAB, các hệ số được tính toán trực tiếp từ biên độ sai số chuẩn hóa theo các biểu thức (11).

$$\begin{aligned}\alpha_p &= 1 + 1.5 \cdot \frac{|e|}{1000} \\ \alpha_i &= \frac{1}{1 + 3 \cdot |e|/1000} \\ \alpha_d &= 1 + 0.5 \cdot \frac{|\dot{e}|}{1000}\end{aligned}\quad (11)$$

Hệ phương trình (11) là một dạng rút gọn của luật mờ nhưng vẫn bảo toàn bản chất của bộ điều khiển thích nghi: Khi sai số $|e|$ càng lớn, các thông số K_p và K_d sẽ càng tăng để tăng tốc độ đáp ứng, trong khi K_i sẽ giảm xuống để hạn chế hiện tượng tích phân bão hòa và quá điều chỉnh.

3.4. Các ràng buộc an toàn

Để đảm bảo hệ thống lưu trữ năng lượng không bị quá sạc hoặc quá xả, tín hiệu điều khiển công suất đặt P_{BESS}^* được hiệu chỉnh thông qua các điều kiện logic sau:

Nếu $SOC \leq SOC_{min}$ và $P_{BESS}^* > 0$ (hệ thống yêu cầu xả pin), đặt: $P_{BESS} = \min(0, P_{BESS}^*)$;

Nếu $SOC \geq SOC_{max}$ và $P_{BESS}^* < 0$ (hệ thống yêu cầu sạc pin), đặt: $P_{BESS} = \max(0, P_{BESS}^*)$.

Ngoài ra, công suất đầu ra của máy phát cũng bị giới hạn nghiêm ngặt trong dải vận hành an toàn để đảm bảo hiệu suất động cơ và tránh hiện tượng non tải hoặc quá tải: $P_{DG,min} \leq P_{DG} \leq P_{DG,max}$.

Trong đó, ở điều kiện vận hành bình thường, các giá trị giới hạn được xác định là: $P_{DG,max}=400kW$ và $P_{DG,min}=1700kW$.

Bảng 1. Thông số của bộ điều khiển SMC

$e/\dot{e}$	NL	NS	ZE	PS	PL
NL	L	L	M	S	S
NS	L	M	M	S	S
ZE	M	M	M	M	M
PS	S	S	M	M	L
PL	S	S	M	L	L

Với hệ phương trình (11) đóng vai trò là một dạng xấp xỉ hàm của bề mặt điều khiển mờ đã được thiết lập qua các luật tại Bảng 1. Việc chuyển đổi từ hệ luật mờ sang dạng biểu thức đại số rút gọn giúp tối ưu hóa thuật toán về mặt thời gian thực, giảm độ phức tạp tính toán trong khi vẫn bảo toàn nguyên lý thích nghi cốt lõi: Tự động tăng cường các thành phần tỉ lệ và vi phân để triệt tiêu nhanh đỉnh tải, đồng thời tiết giảm

thành phần tích phân khi sai số vượt ngưỡng an toàn. Cách tiếp cận này đảm bảo tính nhất quán giữa lý thuyết logic mờ và triển khai thực tế trên môi trường mô phỏng MATLAB/Simulink.

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Thiết lập mô phỏng

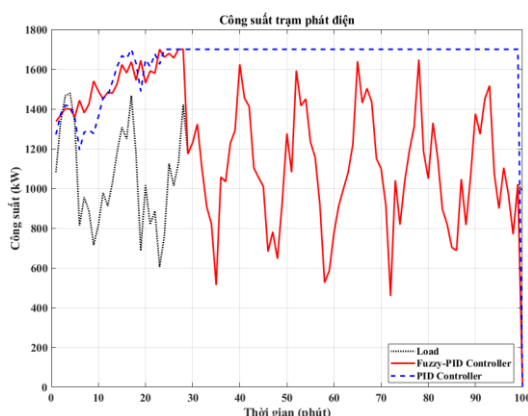
Để đánh giá hiệu quả của chiến lược cắt đỉnh tải sử dụng bộ điều khiển Fuzzy-PID, nghiên cứu thực hiện mô phỏng số trên nền tảng MATLAB/Simulink với bốn kịch bản vận hành đặc trưng của tàu dịch vụ điện gió ngoài khơi CSOV 8720. Cấu hình hệ thống điện hybrid bao gồm 03 máy phát có công suất định mức mỗi máy 1700kW, dải vận hành tối ưu từ 400kW đến 1360kW; hệ thống pin BESS dung lượng 600 kWh, công suất tối đa 1500kW; thời gian trích mẫu $T_s=1$ giây, thời gian mô phỏng $T_{sim}=100$ phút.

4.2. Kết quả mô phỏng

Để đánh giá một cách toàn diện hiệu quả của bộ điều khiển Fuzzy-PID trong việc ổn định hệ thống năng lượng trên tàu dịch vụ điện gió ngoài khơi, nghiên cứu này thiết lập 4 kịch bản vận hành mô phỏng. Các kịch bản này được xây dựng dựa trên các tình huống thực tế mà tàu thường xuyên gặp phải trong quá trình thực hiện nhiệm vụ tại các trang trại điện gió ngoài khơi, từ trạng thái tải ổn định đến các biến động đột ngột về nguồn và tải.

*** Kịch bản 1: Chế độ định vị động (sóng gió mạnh).**

Phụ tải dao động liên tục với biên độ 300kW và nhiễu ngẫu nhiên, mô phỏng tác động của hệ thống định vị động (DP) trong điều kiện sóng gió.



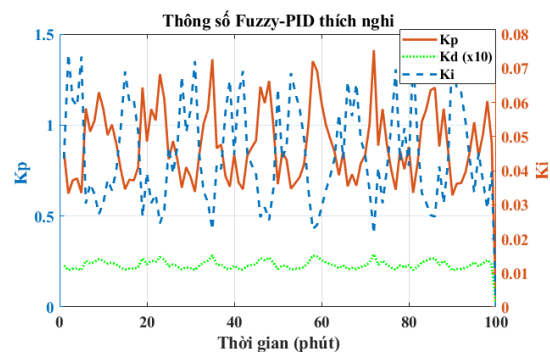
Hình 2. Đáp ứng công suất của hệ thống trạm phát điện với kịch bản sóng gió mạnh

Hình 2 biểu diễn diễn biến công suất thực tế của trạm phát điện chính trên tàu trong quá trình mô phỏng,

so sánh phản hồi của bộ điều khiển thích nghi Fuzzy-PID (đường đỏ) chính là tín hiệu công suất ra của trạm phát DG với bộ điều khiển PID truyền thống (đường xanh nét đứt) dưới tác động của phụ tải biến động liên tục (đường đen chấm).

Kết quả mô phỏng cho thấy sự khác biệt rõ rệt về khả năng điều tiết: Trong khi bộ điều khiển Fuzzy-PID (đường đỏ) duy trì linh hoạt công suất máy phát trong dải 500 - 1700 kW bám sát dao động tải, thì PID truyền thống (đường xanh) bị bão hòa hoàn toàn tại ngưỡng cực đại 1700kW từ phút thứ 30

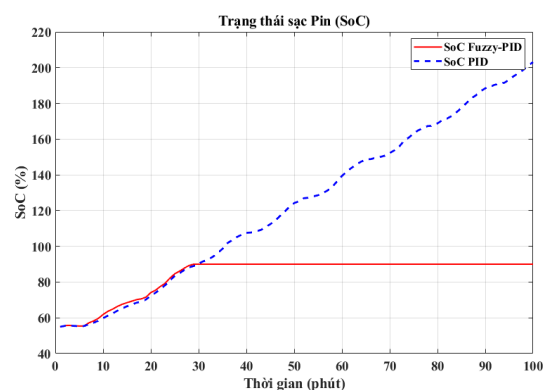
Để làm rõ cơ chế vận hành của thuật toán đề xuất, Hình 3 minh họa quá trình biến đổi động của các hệ số K_p , K_i , K_d trong suốt 100 phút mô phỏng. Sự thay đổi liên tục của các giá trị này theo đặc tính tải chính giúp hệ thống đạt được độ linh hoạt cao hơn so với các



Hình 3. Thông số bộ điều khiển Fuzzy-PID thích nghi

bộ điều khiển thông số cố định.

Hình 4 so sánh đặc tính nạp xả của pin thông qua thông số SoC giữa hai thuật toán điều khiển. Trong khi bộ điều khiển PID truyền thống không thể kiểm soát ngưỡng sạc khiến SoC tăng mất kiểm soát, bộ điều khiển Fuzzy-PID đã thể hiện ưu thế vượt trội khi



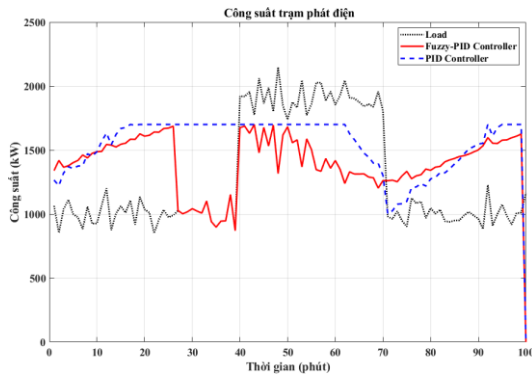
Hình 4. Trạng thái sạc pin của hệ thống lưu trữ

duy trì trạng thái sạc ổn định và dừng chính xác tại ngưỡng an toàn 90%.

*** Kịch bản 2: Chế độ tải đỉnh đột ngột**

Xuất hiện xung tải có độ lớn 900kW kéo dài 30 phút, tương đương khởi động cầu trục hoặc hệ thống bù chuyển động.

Hình 5 minh họa hiệu quả của chiến lược cắt đỉnh tải khi hệ thống đối mặt với sự gia tăng đột ngột của phụ tải trong khoảng thời gian từ phút 40 đến phút 70.



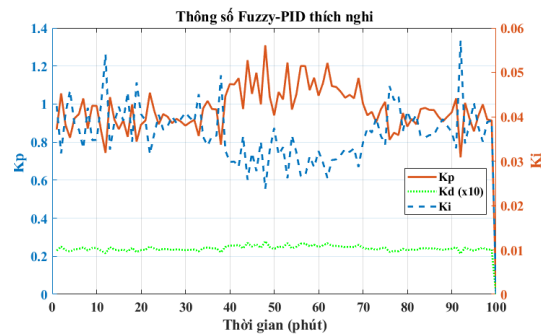
Hình 5. Đáp ứng công suất của hệ thống trạm phát điện với kịch bản tải đỉnh đột ngột

Từ Hình 5 ta thấy, trong giai đoạn tải đỉnh từ phút 40 đến 70, khi phụ tải đột ngột tăng vọt lên mức xấp xỉ 2000kW, bộ điều khiển Fuzzy-PID (đường đỏ) chính là tín hiệu công suất ra của trạm phát DG đã thực hiện tốt chức năng cắt đỉnh tải bằng cách giới hạn công suất máy phát ổn định quanh mức 1300-1600 kW, nhường phần thiếu hụt cho hệ thống pin bù đắp. Ngược lại, bộ điều khiển PID truyền thống (đường xanh - nét đứt) bị bão hòa hoàn toàn ở mức tối đa 1700kW trong thời gian dài, gây áp lực vận hành cực hạn lên máy phát. Sự linh hoạt của thuật toán thích nghi còn được thể hiện rõ tại phút 27, khi hệ thống chủ động cắt giảm công suất máy phát xuống mức 1000kW để tối ưu hóa hiệu suất sạc pin, giúp duy trì dự phòng năng lượng tốt hơn cho các chu kỳ tải cao tiếp theo.

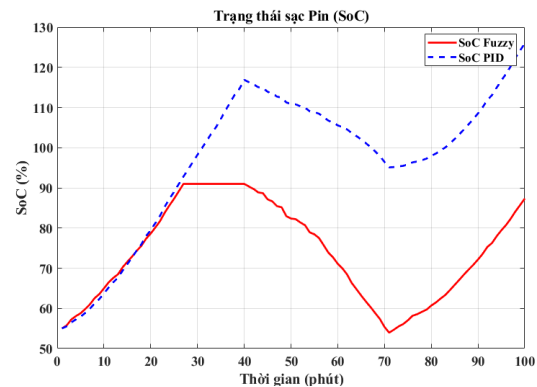
Để làm rõ nguyên lý vận hành của thuật toán đề xuất trong điều kiện tải đỉnh đột ngột, Hình 6 minh họa quá trình tự thích nghi của các thông số bộ điều khiển K_p , K_i , K_d tương ứng với kịch bản xuất hiện tải đỉnh đột ngột. Sự biến đổi động của các hệ số này chính là cơ sở giúp hệ thống duy trì tính ổn định và phản hồi chính xác trước những thay đổi đột ngột về công suất của lưới điện trên tàu.

Đồ thị Hình 7 minh chứng hiệu quả điều tiết năng lượng linh hoạt của bộ điều khiển Fuzzy-PID (đường

đỏ) khi pin chủ động xả từ mức 91% xuống còn 54% trong giai đoạn tải đỉnh (phút 40 - 70) để bù đắp công suất thiếu hụt cho lưới điện. Trong khi đó, bộ điều khiển PID truyền thống (đường xanh nét đứt) không chỉ để SoC tăng vượt ngưỡng an toàn lên mức 117% mà còn không thể huy động hiệu quả năng lượng dự trữ để giảm tải cho máy phát, khiến SoC vẫn duy trì ở mức cao phi lý trên 95% sau khi tải đỉnh kết thúc. Khả năng đưa SoC phục hồi dần về mức 87% vào cuối chu kỳ mô phỏng của thuật toán thích nghi cho thấy tính chu kỳ và sự bền vững trong việc quản lý năng lượng



Hình 6. Thông số bộ điều khiển Fuzzy-PID thích nghi khi tải đỉnh đột ngột



Hình 7. Trạng thái sạc pin (SoC) khi tải đỉnh đột ngột

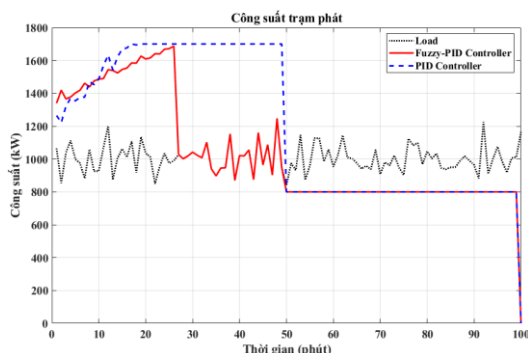
của hệ thống.

*** Kịch bản 3: Khi một máy phát điện của trạm phát bị sự cố**

Mô phỏng được tiến hành với giả định tại thời điểm $t=50$ phút, một máy phát bị sự cố, công suất khả dụng giảm từ 1700kW xuống 800kW (giảm 50%).

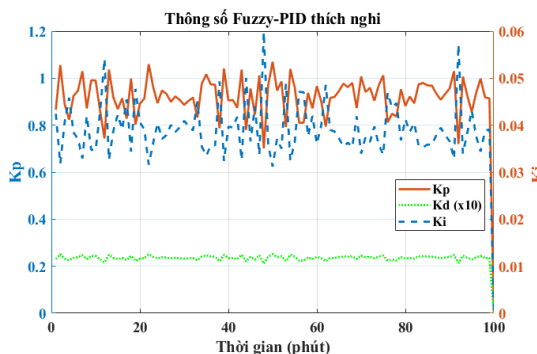
Hình 8 mô tả trạng thái của hệ thống trạm phát điện trong trường hợp có 1 máy phát bị sự cố. Tại thời điểm phút 50, khi công suất nguồn cấp tối đa bị sụt giảm từ 1700kW xuống còn 800kW do sự cố, cả 2 bộ điều khiển đều nhanh chóng đưa máy phát về ngưỡng giới hạn mới để bảo vệ hệ thống. Tuy nhiên, trong giai đoạn trước sự cố (phút 27 - 50), Fuzzy-PID (đường đỏ) chính là tín hiệu công suất ra của trạm phát DG thể hiện ưu thế vượt trội

khi duy trì công suất thực tế bám sát tải quanh mức 1000kW, thay vì bị bão hòa liên tục ở ngưỡng 1700kW như bộ điều khiển PID truyền thống.

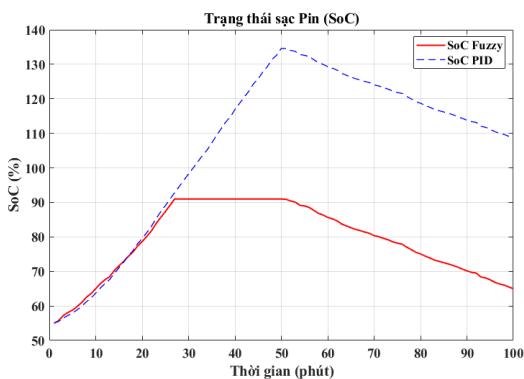


Hình 8. Đáp ứng công suất của hệ thống trạm phát điện với kịch bản có 1 máy phát lỗi

Hình 9 trình bày chi tiết quá trình tự điều chỉnh các tham số K_p , K_i , K_d của bộ điều khiển Fuzzy-PID trong kịch bản xảy ra sự cố máy phát tại phút thứ 50. Sự biến thiên động của các giá trị này minh chứng cho khả năng của thuật toán trong việc nhận diện và phản hồi tức thời trước những thay đổi đột ngột về công suất nguồn cấp cực đại trên lưới điện.



Hình 9. Thông số bộ điều khiển Fuzzy-PID thích nghi khi có 1 máy phát bị sự cố



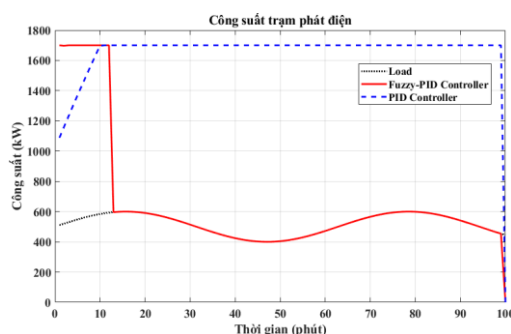
Hình 10. Trạng thái sạc pin (SoC) khi có 1 máy phát bị sự cố

Từ kết quả Hình 10 ta nhận thấy, bộ điều khiển Fuzzy-PID (đường đỏ) duy trì SoC dừng chính xác tại ngưỡng bảo vệ 91% từ phút 27 đến phút 50, sau đó chủ động xả năng lượng xuống mức 65% để hỗ trợ lưới điện ngay khi công suất nguồn cấp bị thất thoát do sự cố. Ngược lại, bộ điều khiển PID truyền thống (đường xanh nét đứt) để SoC tăng mất kiểm soát lên đến 135%, dẫn đến việc không thể tối ưu hóa dung lượng dự trữ và gây nguy cơ hư hỏng vật lý nghiêm trọng cho hệ thống pin lưu trữ.

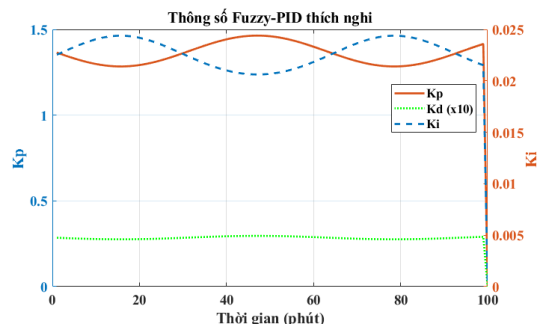
* Kịch bản 4: Khi tải nhẹ

Tại chế độ này tải trung bình chỉ đạt 500 kW, thấp hơn điểm vận hành tối ưu của máy phát, yêu cầu BESS thực hiện chế độ “sạc - xả” để nâng tải cho máy phát lên vùng hiệu suất cao.

Trong kịch bản tải nhẹ tại Hình 11, bộ điều khiển Fuzzy-PID (đường đỏ) chỉ duy trì máy phát ở mức công suất cao 1700kW trong 12 phút đầu để sạc nhanh cho pin, sau đó ngay lập tức giảm và điều tiết bám sát phụ tải thực tế quanh mức 400 - 600 kW, trái ngược hoàn toàn với bộ điều khiển PID truyền thống (đường xanh nét đứt) bị kẹt ở trạng thái bão hòa cực đại 1700kW xuyên suốt quá trình mô phỏng gây lãng phí năng lượng nghiêm trọng.

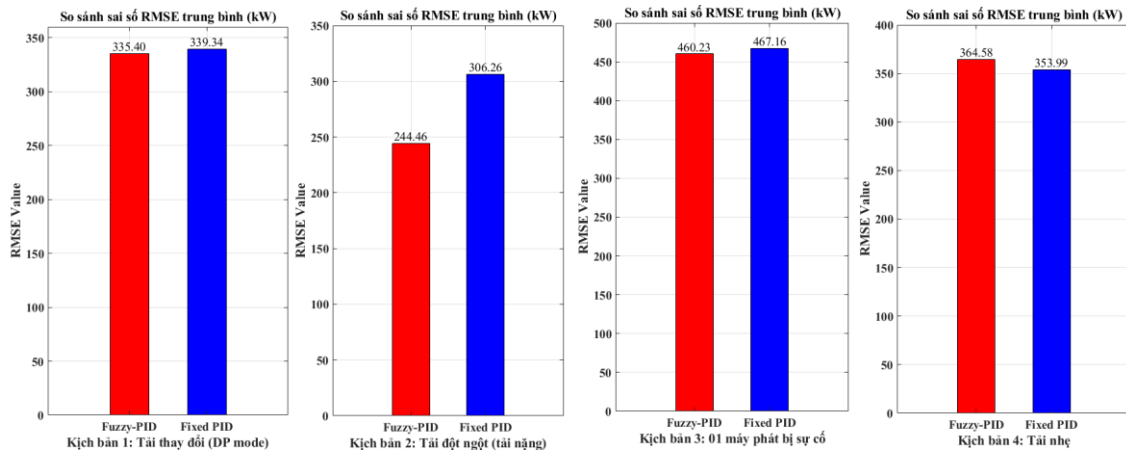


Hình 11. Đáp ứng công suất của hệ thống trạm phát điện với kịch bản tải nhẹ



Hình 12. Thông số bộ điều khiển Fuzzy-PID thích nghi với kịch bản tải nhẹ

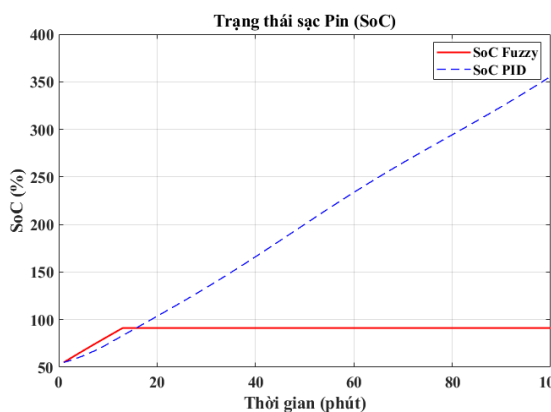
Hình 12 trình bày diễn biến các thông số thích nghi K_p , K_i , K_d của bộ điều khiển Fuzzy-PID trong kịch bản



Hình 14. Đánh giá hiệu quả điều khiển thông qua chỉ số RMSE theo từng kịch bản

tải nhẹ, cho thấy khả năng tự điều chỉnh mượt mà theo đặc tính hình sin của phụ tải nhằm tối ưu hóa hiệu suất vận hành của hệ thống.

Sự khác biệt về hiệu quả quản lý năng lượng dự trữ giữa hai phương pháp điều khiển trong kịch bản tải nhẹ được thể hiện rõ nét qua diễn biến trạng thái sạc (SoC) tại Hình 13. Trong khi bộ điều khiển PID truyền thống (đường xanh nét đứt) để SoC tăng tuyến tính mất kiểm soát lên mức 350% ở cuối chu kỳ mô phỏng, thì thuật toán Fuzzy-PID (đường đỏ) chính là tín hiệu công suất ra của trạm phát DG, chứng minh khả năng bảo vệ hệ thống vượt trội khi sạc nhanh pin từ mức 55% và dừng chính xác tại ngưỡng an toàn 90% chỉ sau 12 phút, duy trì ổn định mức này trong suốt thời gian còn lại để ngăn ngừa tình trạng quá nhiệt và hư hỏng vật lý.



Hình 13. Trạng thái sạc pin (SoC) với kịch bản tải nhẹ

4.3. Chỉ tiêu đánh giá định lượng

Để có cái nhìn khách quan về hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất, chỉ số sai số bình phương trung bình (RMSE) giữa công suất thực tế của máy phát và

điểm vận hành tối ưu (P_{opt}) đã được tính toán và so sánh chi tiết cho cả 4 kịch bản mô phỏng.

Dựa trên kết quả tổng hợp tại Hình 14, hiệu quả của bộ điều khiển Fuzzy-PID so với PID được thể hiện qua các số liệu cụ thể như sau:

Kịch bản 1 (Tải thay đổi): Thuật toán Fuzzy-PID đạt giá trị RMSE là 335,40kW, giảm nhẹ so với mức 339,34kW của PID truyền thống. Điều này cho thấy trong điều kiện tải dao động cực mạnh và liên tục, bộ điều khiển thích nghi giúp máy phát bám sát điểm tối ưu tốt hơn, giảm dao động công suất dư thừa.

Kịch bản 2 (Tải đỉnh đột ngột): Đây là kịch bản chứng kiến sự cải thiện rõ rệt nhất. Fuzzy-PID đạt 244,46kW, thấp hơn đáng kể so với mức 306,26kW của Fixed PID (cải thiện khoảng 20,2%). Kết quả này minh chứng cho khả năng huy động năng lượng từ pin để cắt đỉnh tải vô cùng hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất.

Kịch bản 3 (Sự cố máy phát): Khi hệ thống nguồn bị thất chặt, Fuzzy-PID duy trì RMSE ở mức 460,23kW, tối ưu hơn so với mức 467,16kW của bộ điều khiển truyền thống, giúp hệ thống chuyển đổi trạng thái ổn định hơn ngay cả khi mất một nguồn phát.

Kịch bản 4 (Tải nhẹ): Mặc dù ở kịch bản tải nhẹ, PID đạt chỉ số RMSE thấp hơn (353,99kW so với 364,58kW). Tuy nhiên, cần nhấn mạnh rằng trong kịch bản tải nhẹ, việc hy sinh một chút RMSE (để bảo vệ pin khỏi quá sạc) là hoàn toàn xứng đáng, vì PID truyền thống tuy có RMSE thấp hơn nhưng lại gây ra $SoC > 350\%$ (phi thực tế). Do đó, giá trị RMSE của Fuzzy-PID phản ánh sự cân bằng chính xác giữa việc ổn định máy phát và bảo vệ ngưỡng sạc an toàn cho Pin.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã thực hiện thiết kế và mô phỏng thành công chiến lược cắt đỉnh tải (Peak Shaving) dựa trên thuật toán Fuzzy-PID tự thích nghi cho hệ thống điện hybrid trên tàu dịch vụ điện gió ngoài khơi. Thông qua quá trình triển khai trên môi trường MATLAB/Simulink, kết quả khẳng định bộ điều khiển đề xuất có khả năng vượt trội trong việc tinh chỉnh trực tuyến các tham số K_p, K_i, K_d dựa trên sai số công suất thực tế, giúp hệ thống lưu trữ năng lượng bằng pin phản hồi linh hoạt với các biến động tải phi tuyến từ hệ thống định vị động và thiết bị nâng hạ. Chiến lược này giúp máy phát điện Diesel duy trì vận hành ổn định tại điểm tối ưu 1360kW, loại bỏ hoàn toàn các vi phạm giới hạn như chạy non tải hoặc quá tải, từ đó tiết kiệm nhiên liệu ước tính 8-12% và kéo dài tuổi thọ động cơ. Việc tích hợp các ràng buộc an toàn nghiêm ngặt về trạng thái sạc (SoC) đã bảo vệ hiệu quả tuổi thọ pin, giữ SoC dừng chính xác tại ngưỡng an toàn 90% thay vì tăng mất kiểm soát như bộ điều khiển PID truyền thống. Đặc biệt, tại kịch bản tải đỉnh đột ngột, Fuzzy-PID giúp cải thiện chỉ số RMSE lên đến 20,2%, minh chứng cho tính khả thi và hiệu quả kinh tế cao của giải pháp trong việc nâng cấp hệ thống quản lý năng lượng cho các thể hệ tàu hybrid hiện đại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Sorensen, A. J. (2013), *Marine Control Systems: Propulsion and Motion Control of Ships and Ocean Structures*.
- [2] Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K. & Hopman, J. J. (2017), *Design and control of hybrid marine propulsion systems*, Applied Energy.
- [3] Nuchturee, C., Li, T. & Xia, H. (2020), *Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships - A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.134, pp.110145.
- [4] IMO (2020), *Fourth IMO GHG Study 2020*, International Maritime Organization.
- [5] He, X., Luo, B., Deng, X., Zhu, G., Zhang, G. & Wang, Q. (2021), *Research on Energy Management Strategy of Hybrid Energy Storage System for Electric Ship*, 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2).
- [6] Arellano-Prieto, Y., Chavez-Panduro, Rossi, P. S. & Finotti, F. (2022), *Energy Storage Solutions for Offshore Applications*, Energies, Vol.15(17), p.6153.
- [7] Kolodziejewski, M. & Michalska-Pozoga, I. (2023), *Battery Energy Storage Systems in Ships' Hybrid/Electric Propulsion Systems*, Energies, Vol.16(3), p.1122.
- [8] DNV (2025), *Rules for classification: Ships - Electrical installations*.
- [9] Astrom, K. J. & Hagglund, T. (2006), *Advanced PID Control*, ISA.
- [10] Martins, R., Hesse, H. C., Jungbauer, J., Vorbuchner, T. & Musilek, P. (2018), *Optimal Component Sizing for Peak Shaving in Battery Energy Storage System for Industrial Applications*, Energies, Vol.11(8), p.2048.
- [11] Camara, M. B. & Dakyo, B. (2023), *Coordinated Control of the Hybrid Electric Ship Power-Based Batteries/Supercapacitors/Variable Speed Diesel Generator*, Energies, Vol.16(18), pp.6666.
- [12] Wang, Q., Deng, X., He, X., Zhu, G. & Zhang, G. (2023), *Energy Management Strategy for Hybrid Ships Based on Dynamic Planning*, 2023 9th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR), IEEE.
- [13] Zadeh, L. A. (1965), *Fuzzy Sets, Information and Control*.
- [14] Passino, K. M. & Yurkovich, S. (1998), *Fuzzy Control*, Addison Wesley.
- [15] Lu, C., Xu, H., Pan, X. & Song, J. (2014), *Optimal Sizing and Control of Battery Energy Storage System for Peak Load Shaving*, Energies, Vol.7(12), pp.8396-8410.

Ngày nhận bài:	02/04/2026
Ngày nhận bản sửa:	10/05/2026
Ngày duyệt đăng:	13/05/2026