

TỐI ƯU HÓA ĐIỀU PHỐI NĂNG LƯỢNG CHO LƯỚI ĐIỆN MICROGRID DỰA TRÊN THUẬT TOÁN PSO VÀ MÔ HÌNH DỰ BÁO HỒI QUY PHI TUYẾN NARX

ENERGY DISPATCH OPTIMIZATION FOR MICROGRIDS
BASED ON PSO ALGORITHM AND NARX FORECASTING MODEL

Trương Văn Quảng¹, Cao Thị Mai Phương²,
Nguyễn Tấn Văn³, Trịnh Trọng Chương^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.157>

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu chiến lược điều phối năng lượng tối ưu cho hệ thống Microgrid lai (HMG) bao gồm hệ thống PV (năng lượng mặt trời), hệ thống BESS (lưu trữ năng lượng), máy phát điện diesel và lưới điện xoay chiều nhằm đảm bảo an ninh năng lượng tại các khu vực đặc thù của tỉnh Quảng Trị, Việt Nam. Mặc dù sở hữu tiềm năng lớn với công suất quy hoạch trên 8.000MW theo Quy hoạch điện VIII, Quảng Trị hiện vẫn đối mặt với thách thức về hạ tầng điện tại 26 xã biên giới khó tiếp cận lưới điện quốc gia. Nghiên cứu đề xuất một phương pháp điều phối tích hợp nhằm tối đa hóa việc khai thác nguồn năng lượng tái tạo sẵn có và ổn định phụ tải trong mọi thời điểm vận hành. Giải thuật PSO được ứng dụng để cực tiểu hóa chi phí vận hành hệ thống, trong khi mô hình mạng nơ-ron NARX được ứng dụng để dự báo chính xác SR (bức xạ mặt trời), cung cấp dữ liệu đầu vào tin cậy cho quá trình điều phối. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống đáp ứng hoàn toàn nhu cầu phụ tải thực tế, giảm thiểu đáng kể áp lực chi phí cho nhà đầu tư và đạt độ chính xác dự báo năng lượng mặt trời lên tới 95%.

Từ khóa: Điều phối năng lượng, Microgrid lai, PSO, NARX, năng lượng tái tạo.

ABSTRACT

This paper investigates an optimal energy management strategy for a Hybrid Microgrid (HMG) system comprising PV arrays, Battery Energy Storage Systems (BESS), diesel generators, and the AC grid to ensure energy security in specific regions of Quang Tri Province, Vietnam. Despite a significant planned capacity of over 8,000MW under the National Power Development Plan VIII, Quang Tri still faces major infrastructure challenges, particularly in 26 border communes with limited access to the national grid. The study proposes an integrated coordination framework designed to maximize renewable energy utilization and maintain load stability across all operating conditions. The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is employed to minimize system operational costs, while a Nonlinear Autoregressive Exogenous (NARX) neural network model is implemented to accurately forecast Solar Radiation (SR), providing reliable input data for the dispatch process. Simulation results demonstrate that the system fully satisfies actual load demands, significantly mitigates financial pressure for investors, and achieves a solar energy forecasting accuracy of up to 95%.

Keywords: Electrical Energy Dispatch, Cost Optimization Using PSO, Energy Forecasting Using NARX.

¹Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Trường Cao đẳng Kỹ thuật Công nghiệp

³Bệnh viện Vạn Phúc City

*Email: chuongtt@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 28/02/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 26/4/2026

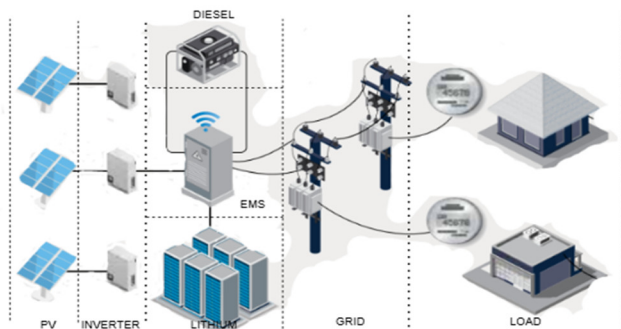
Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

Kí hiệu	Ý nghĩa
EMS	Hệ thống quản lý năng lượng
DERs	Nguồn năng lượng phân tán
ESS	Hệ thống lưu trữ năng lượng
SR	Bức xạ mặt trời
PSO	Thuật toán tối ưu bầy đàn
NARX	Mô hình dự báo phi tuyến
OPEX	Chi phí vận hành

1. GIỚI THIỆU

Các công trình nghiên cứu và phát triển Microgrid đã được quan tâm từ rất lâu, các mô hình hiện hữu thường bộc lộ sự hạn chế về tính thực tiễn khi áp dụng cho đặc thù địa phương, dẫn đến việc chưa khai thác triệt để tiềm năng năng lượng tại chỗ. Tại tỉnh Quảng Trị, một bộ phận dân cư vẫn đối mặt với tình trạng thiếu hụt điện năng kéo dài hoặc chất lượng điện không ổn định do trở ngại về khoảng cách địa lý [1, 2]. Trong khi đó, khu vực này sở hữu trữ lượng SR dồi dào và ổn định - một nguồn năng lượng tái tạo tiềm năng chưa được tận dụng triệt để [3]. Do đó, nghiên cứu này được triển khai nhằm đề xuất một giải pháp kỹ thuật khả thi, thúc đẩy an ninh năng lượng và tạo động lực phát triển kinh tế bền vững cho địa bàn tỉnh.

Microgrid tối ưu giúp vận hành ổn định tại lưới điện yếu nhờ điều phối linh hoạt DERs, lưu trữ và phụ tải, đồng thời hỗ trợ chuyển đổi nối lưới/độc lập dưới 20ms [4-7]. Việc tích hợp năng lượng tái tạo giúp giảm OPEX khoảng 15 - 25%, giảm phát thải CO₂ đến trên 50% và nâng cao độ tin cậy cung cấp điện [5, 8, 9]. Hệ thống cũng duy trì chất lượng điện năng với điện áp trong ngưỡng $\pm 5\%$ và kiểm soát THD theo IEEE 519 [10, 11].



Hình 1. Cấu trúc hệ thống quản lý năng lượng trong Microgrid lai đề xuất

Nghiên cứu tập trung thiết lập cơ sở dữ liệu cho hệ EMS nhằm điều phối tối ưu công suất giữa các nguồn DERs và ESS trong mô hình Hybrid MG. Hệ thống đảm bảo tính liên tục của dòng năng lượng qua khả năng chuyển

đổi chế độ vận hành (grid-connected và islanded) với thời gian đáp ứng vượt mà dưới 20ms, đồng thời tích hợp dòng công suất hai chiều để giảm tổn thất truyền tải xuống dưới 5%. Việc ứng dụng các chiến lược phản hồi phụ tải không chỉ nâng cao chất lượng điện năng theo tiêu chuẩn IEEE mà còn giúp tối ưu lợi ích kinh tế cho các cấu trúc AC/DC/Hybrid quy mô nhỏ [12].

Cấu trúc hệ thống ở hình 1 được cấu hình dựa trên các thành phần tài nguyên năng lượng phân tán với các thông số định lượng cơ bản như sau:

- Nguồn PV có diện tích bề mặt hấp thụ 24m², tích hợp bộ nghịch lưu DC/AC kết nối lưới và bộ biến đổi DC/DC điều khiển sạc;
- Hệ thống BESS lưu trữ năng lượng bằng lithium có dung lượng là 2000Ah;
- Nguồn Diesel 8kW là nguồn điện xoay chiều có thể cung cấp trực tiếp cho hệ thống điện đi đến các tải. Quản lý năng lượng EMS điều phối dòng công suất giữa các nguồn DERs và phụ tải thông qua bộ điều khiển trung tâm.

Mặc dù các nghiên cứu tổng hợp tại bảng 1 đã đạt được những tiến bộ đáng kể trong việc ứng dụng các thuật toán tối ưu như PSO, MOPSO và QPSO, giúp giảm OPEX trung bình từ 15% đến 25%, nhưng tính khả thi thực tiễn tại các khu vực đặc thù như miền Trung Việt Nam vẫn chưa được kiểm chứng đầy đủ. Các mô hình dự báo như NARX đã chứng minh độ chính xác cao với hệ số tương quan $R > 0,85$, tuy nhiên, việc tích hợp các dữ liệu dự báo này vào khung điều phối thời gian thực của hệ thống quản lý năng lượng EMS vẫn còn rời rạc [18, 21].

Phần lớn các công trình hiện nay thường tách biệt quá trình tối ưu và dự báo, dẫn đến sai số tích lũy trong điều phối công suất, đặc biệt khi đối mặt với tính bất định cao của SR (biến động lên đến 30 - 40% trong điều kiện thời tiết cực đoan). Hơn nữa, các nghiên cứu về EMS đa mục tiêu hiện tại thường ưu tiên cực tiểu hóa chi phí mà chưa giải quyết triệt để sự cân bằng giữa hiệu quả kinh tế và độ tin cậy cung cấp điện tại các vùng biên giới khó tiếp cận lưới điện.

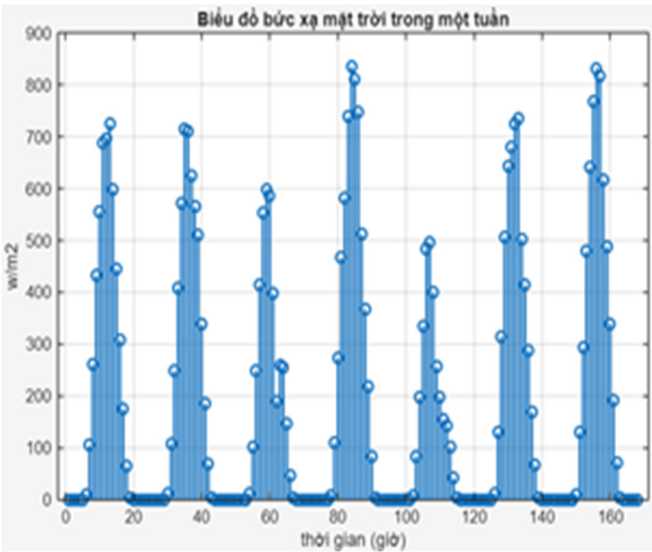
Do đó, tồn tại một khoảng trống nghiên cứu rõ ràng trong việc thiết lập một khung điều phối tích hợp: sử dụng mô hình NARX để dự báo công suất PV với độ chính xác mục tiêu trên 95%, làm dữ liệu đầu vào trực tiếp cho giải thuật PSO đa mục tiêu. Hướng tiếp cận này không chỉ tối ưu chi phí vận hành mà còn giảm thiểu rủi ro mất điện cục bộ, mang lại giá trị định lượng cụ thể cho việc triển khai các hệ thống Microgrid lai trong điều kiện khí hậu nhiệt đới biến động mạnh.

Bảng 1. Tổng hợp các nghiên cứu liên quan đến tối ưu điều phối năng lượng trong Microgrid

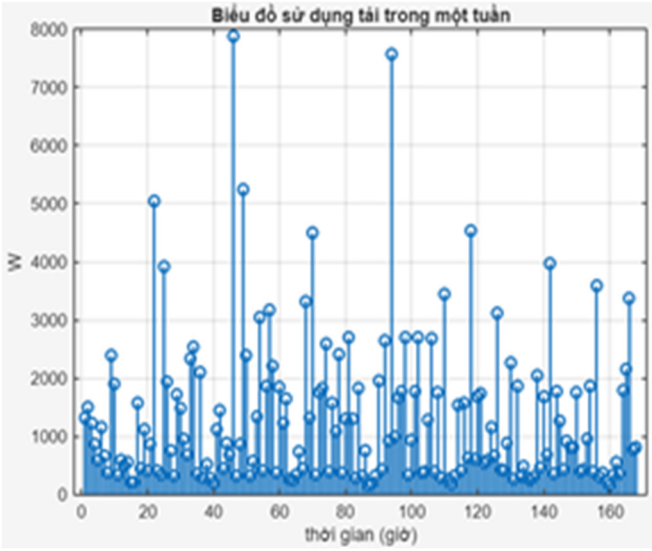
Tài liệu	Phương pháp	Kết quả chính	Hạn chế và hướng phát triển
[13, 14]	Multi-objective QPSO cho day-ahead scheduling grid-connected MG (PV + wind + battery + grid), tối ưu operational cost + CO ₂ emissions.	QPSO vượt trội PSO truyền thống (tránh premature convergence); giảm đáng kể chi phí và phát thải.	Dựa chủ yếu trên simulation; forecasting renewable chưa chi tiết NARX; chưa xét full environmental pollution (NO _x , SO ₂). Hướng phát triển: Tích hợp NARX forecasting + real-time replanning.
[15]	Mô hình NARX phân cấp (tiered: fleet/zone/site) dự báo day-ahead công suất PV.	Cải thiện 3,21% (zone) và 5,35% (site) so với mô hình đơn; NRMSE = 0,137 - 0,148; R > 80%.	Khó thích ứng với thay đổi thời tiết đột ngột; hiệu quả cao nhất khi pattern thời tiết ổn định. Hướng phát triển: Kết hợp NARX với (PSO) trong EMS multi-objective.
[16]	Review toàn diện optimization (PSO, hybrid), power prediction (NARX, LSTM, VMD-NARX...) và VSG trong microgrid.	Tóm tắt ưu điểm các kỹ thuật hiện tại; chỉ ra synergy giữa prediction và optimization.	Thiếu nghiên cứu tích hợp chặt chẽ NARX forecasting vào PSO-EMS multi-objective (cost + emission); uncertainty handling và real-time còn yếu. Hướng phát triển: Nghiên cứu hybrid NARX + PSO/QPSO cho microgrid thực tế (đặc biệt regional như Việt Nam).
[17, 18]	Forecast-aided EMS kết hợp PSO tối ưu lịch hành hiệu quả, charge/discharge ESS trong industrial microgrid (case study Việt Nam - khí hậu nhiệt đới).	Giảm chi phí vận hành hiệu quả, phù hợp với dữ liệu load thực tế tại Việt Nam; tích hợp forecasting load vào PSO.	Dựa trên simulation industrial microgrid; chưa tích hợp đầy đủ multi-objective (cost + emission) và NARX cho solar. Hướng phát triển: Áp dụng NARX dự báo solar + real-time replanning cho microgrid Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

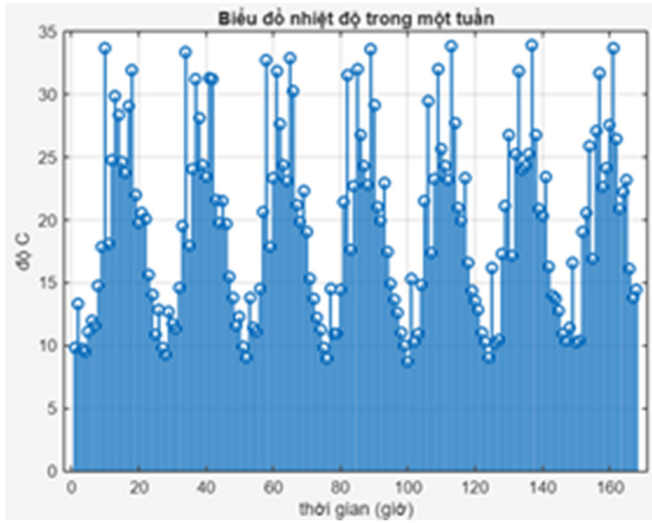
Nghiên cứu sử dụng bộ dữ liệu gồm công suất phụ tải khu dân cư, bức xạ mặt trời, nhiệt độ môi trường và trạng thái vận hành của lưới điện. Ngoài ra, dữ liệu giá điện và giá dầu diesel tại Việt Nam năm 2025 được thu thập để phục vụ bài toán tối ưu chi phí vận hành. Dữ liệu được thu thập là một năm và độ phân giải là một giờ.



(a) Bức xạ mặt trời trong một tuần



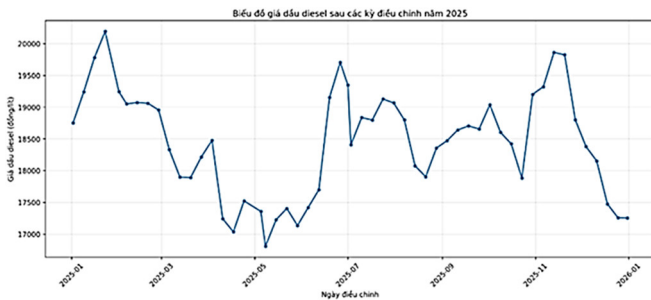
(b) Công suất phụ tải trong một tuần



(c) Nhiệt độ môi trường trong một tuần

Hình 2. Dữ liệu đầu vào của mô hình trong một tuần điển hình

Dữ liệu nghiên cứu (hình 2) được tổng hợp từ các nguồn uy tín (Kaggle, NASA POWER). Riêng kịch bản vận hành độc lập tại vùng biên giới được xây dựng bằng dữ liệu tổng hợp (synthetic data) qua công cụ Python, mô phỏng thực tế thời gian cấp điện hạn chế từ 3 - 5 giờ/ngày. Việc phân tích kịch bản cục đoạn này không làm giảm tính tổng quát mà giúp khẳng định khả năng thích ứng và tính thực tiễn của hệ thống EMS để xuất trong điều kiện hạ tầng năng lượng không ổn định. Dữ liệu giá điện và giá dầu tại Việt Nam chịu sự quản lý của Nhà nước nên mức độ biến động trong năm 2025 nhìn chung không lớn. Đối với giá điện, năm 2025 chỉ ghi nhận một đợt điều chỉnh từ ngày 10/5/2025 theo Quyết định số 1279/QĐ-BCT; trong đó, mức giá điện kinh doanh cấp điện áp dưới 6kV vào giờ cao điểm tăng từ 5.174 đồng/kWh lên 5.422 đồng/kWh. Đối với dầu diesel, giá dầu diesel 0,055 được điều chỉnh 54 kỳ trong năm 2025 theo chu kỳ điều hành giá xăng dầu. Mức giá dao động trong khoảng 16.809 - 20.194 đồng/lít, trong đó giá cao nhất ghi nhận vào ngày 23/01/2025, thấp nhất vào ngày 08/5/2025, đến kỳ điều hành cuối năm ngày 31/12/2025 giảm còn 17.255 đồng/lít quan sát trong hình 3.

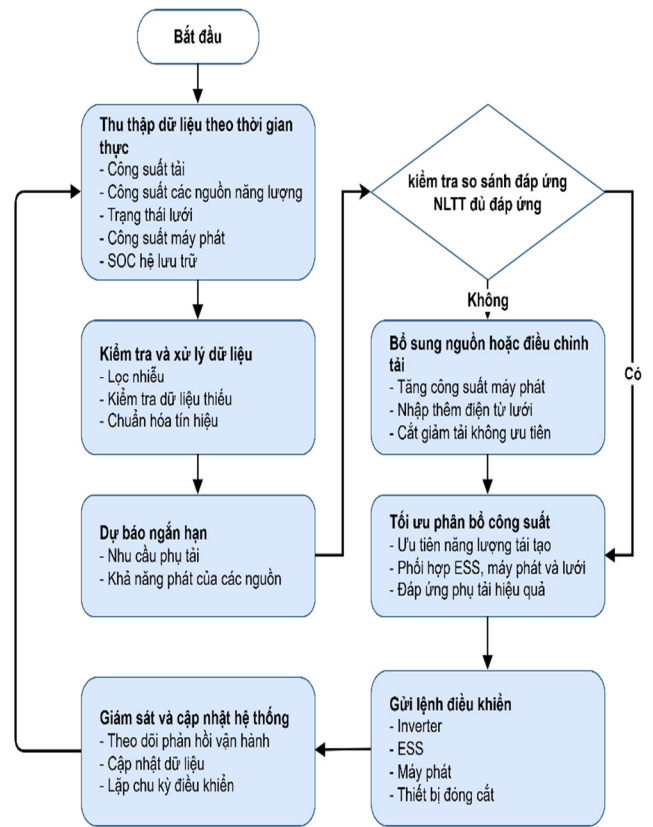


Hình 3. Diễn biến giá dầu diesel 0,055 tại Việt Nam trong năm 2025



Hình 4. Phân bố bức xạ mặt trời tại Việt Nam

Lưu đồ thuật toán điều phối năng lượng Microgrid OS



Hình 5 Lưu đồ thuật toán điều phối năng lượng sử dụng PSO kết hợp dự báo NARX

Hình 4 minh họa phân bố mức độ bức xạ mặt trời trên toàn lãnh thổ Việt Nam, qua đó làm nổi bật tiềm năng và lợi thế của khu vực nghiên cứu. Để tối ưu hóa hiệu suất vận hành và gia tăng khả năng hấp thụ bức xạ, các tấm pin PV được thiết kế lắp đặt với một góc nghiêng nhất định so với mặt phẳng ngang. Do đó, việc xác định chính xác lượng bức xạ thu nhận trên bề mặt nghiêng là cần thiết, công thức sau được sử dụng để tính toán:

$$G_t = G_b + G_d \left[A_i + (1 - A_i) \frac{1 + \cos \beta}{2} \left(1 + f \sin^3 \frac{\beta}{2} \right) \right] + G_p \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (1)$$

Trong đó:

G_t là bức xạ trên mặt phẳng nằm nghiêng;

G_b là bức xạ trực tiếp;

G_d là bức xạ khuếch tán;

G_p là bức xạ phản xạ từ mặt đất;

β là góc nghiêng của tấm pin;

f là hệ số di hướng.

Bảng 2. Thông số của BESS

Thời gian sạc/xả	10 giờ
Công suất lớn nhất	2,4kW
Dung lượng lưu trữ lớn nhất	90%
Dung lượng lưu trữ nhỏ nhất	30%
Hiệu suất sạc xả	90%
Hiệu suất biến tần	94%

Hệ thống lưu trữ sử dụng pin lithium có điện áp đầu cuối 12V và dung lượng định mức 2000Ah hoặc 24kWh. Pin khi sạc đầy được phép sạc/xả hoàn toàn trong 10 giờ, dẫn đến công suất đầu vào/đầu ra tối đa là 2,4kW. Tuy nhiên, để bảo vệ tuổi thọ pin, trạng thái sạc (SOC) được duy trì trong khoảng 30 đến 90%.

3. XÂY DỰNG HỆ THỐNG ĐIỀU PHỐI NĂNG LƯỢNG

3.1. Xây dựng kịch bản điều phối khi chưa có tối ưu

Xây dựng hệ thống trên nguyên tắc cung cấp đủ cho tải hoạt động trong mọi tình huống không được để mất tải. Sẽ ưu tiên các nguồn năng lượng từ hệ thống năng lượng mặt trời trực tiếp sau đó đến lưới điện pin và cuối cùng là máy phát điện.

- Trường hợp thứ nhất khi lưới điện đang hoạt động, hệ thống ưu tiên khai thác nguồn năng lượng tái tạo. Phần năng lượng dư thừa từ hệ thống năng lượng tái tạo được sử dụng để sạc pin lưu trữ; khi pin đạt trạng thái đầy, công suất dư sẽ được hòa vào lưới điện. Ngược lại, khi công suất từ hệ thống PV không đáp ứng đủ nhu cầu tải, hệ thống ưu tiên xả pin, sau đó mới sử dụng điện từ lưới, hạn chế tối đa việc huy động các nguồn phát điện bổ sung.

- Trường hợp thứ hai khi lưới điện mất điện ưu tiên sử dụng nguồn năng lượng đến từ PV tiếp theo đó đến pin và cuối cùng là máy phát điện.

Sau đây là công thức cập nhật trạng thái của pin qua các trường hợp và sau các thời điểm:

+ Công suất phát của hệ PV:

$$E_{PV,DC} = G \cdot A \cdot \eta \quad (2)$$

+ Xét đến sự ảnh hưởng của nhiệt độ:

$$E_{PV,DC} = (1 - a(T_{Cell} - 25))G \cdot A \cdot \eta \quad (3)$$

Trong đó:

$E_{PV,DC}$ là năng lượng của PV phía DC;

η hiệu suất pin;

G là bức xạ mặt trời;

a hệ số suy giảm nhiệt;

A diện tích tấm pin;

T_{Cell} nhiệt độ tế bào quang điện.

+ Nhiệt độ tế bào quang điện:

$$T_{Cell} = T_{ambient} + \frac{NOCT-20}{0,8} \quad (4)$$

Trong đó:

$T_{ambient}$ nhiệt độ môi trường;

$NOCT$ nhiệt độ định mức của tế bào.

+ Công suất PV phía AC:

$$E_{PV,AC} = E_{PV,DC} \cdot \eta_{inv} \quad (5)$$

Trong đó:

η_{inv} là hiệu suất.

+ Dung lượng pin:

$$E_{bat} = V_{nom} \cdot C_{Ah} \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

Trong đó:

E_{bat} là dung lượng pin (kWh);

V_{nom} điện áp định mức;

C_{Ah} dung lượng pin.

+ Giới hạn sạc/xả theo SOC:

$$\text{sạc: } E_{dis,max} = \min(P_{bat,max}, E_{bat}(SOC - SOC_{min})) \quad (7)$$

$$\text{xả: } E_{ch,max} = \min(P_{bat,max}, E_{bat}(SOC_{max} - SOC)) \quad (8)$$

Trong đó:

SOC trạng thái của pin (0-1)

+ Cập nhật trạng thái SOC:

$$\text{khi xả: } SOC_{t+1} = SOC_t - \frac{|E_{bat,DC}|}{E_{bat}} \quad (9)$$

$$\text{Khi sạc: } SOC_{t+1} = SOC_t + \frac{|E_{bat,DC}|}{E_{bat}} \quad (10)$$

+ Quy đổi AC/DC của pin:

$$\text{Khi sạc: } E_{DC} = E_{AC} \cdot \eta_{bat,inv} \quad (11)$$

$$\text{Khi xả: } E_{AC} = E_{DC} \cdot \eta_{bat,inv} \quad (12)$$

Trong đó:

$$\eta_{bat,inv} = 0,94$$

• Nguyên tắc hoạt động

$$E_{load} = E_{PV} + E_{lithium} + E_{grid} + E_{diesel} \quad (13)$$

• Công suất diesel

$$E_{diesel} = E_{load} - E_{PV} - E_{lithium} \quad (14)$$

3.2. Khi có tối ưu kinh tế sử dụng PSO

Quy trình điều phối được thiết lập nhằm ưu tiên tối đa hóa việc khai thác nguồn năng lượng tái tạo và đảm bảo tính liên tục của phụ tải P_{Load} :

+ Kịch bản 1: PV đáp ứng hoàn toàn nhu cầu phụ tải:

$$E_{PV} \geq E_{load}$$

PV cung cấp toàn bộ cho tải: $P_{PV} = P_{load}$

Phần dư nạp cho pin nếu chưa đầy:

$$E_{lithium} = E_{PV} - E_{load}$$

+ Kích bản 2: PV không đáp ứng đủ phụ tải:

$$E_{PV} < E_{load}$$

Lượng thiếu hụt ưu tiên lấy từ pin ra nếu còn xả được:

$$E_{thieu} = E_{load} - E_{PV}$$

Sử dụng diesel và điện lưới dựa trên tối ưu

$$\text{Khi mất điện: } E_{diesel} = E_{load} - E_{PV}$$

Khi có điện, thuật toán PSO được sử dụng để tối ưu hàm mục tiêu:

$$Cost = \sum (P_{grid} \cdot price_{grid} + P_{diesel} \cdot price_{diesel}) \quad (15)$$

Biến tối ưu:

$$x = [P_{grid}(t); P_{diesel}(t)] \text{ với } t = 1, 2, \dots$$

Cập nhật vận tốc:

$$v = wv + c_1 r_1 (pbest - x) + c_2 r_2 (gbest - x) \quad (16)$$

Cập nhật vị trí:

$$x = v + x \quad (17)$$

Trong đó:

v là vận tốc tốc độ thay đổi nghiệm;

x là vị trí của nghiệm hiện tại;

w là hệ số quán tính;

c_1 điều khiển xu hướng quay về nghiệm tốt nhất của chính nó;

c_2 hệ số bầy đàn;

r_1, r_2 hệ số ngẫu nhiên tránh mắc kẹt ở nghiệm cục bộ;

$pbest$ nghiệm tốt nhất mà nó từng đạt được;

$gbest$ nghiệm tốt nhất toàn thể.

3.3. Xây dựng mô hình dự báo bức xạ mặt trời sử dụng mô hình NARX

Dữ liệu được xử lý bằng phương pháp làm mịn Savitzky-Golay nhằm giảm nhiễu và loại bỏ các giá trị bất thường phát sinh từ sai số đo của cảm biến. Quá trình này giúp cải thiện chất lượng dữ liệu đầu vào, từ đó nâng cao độ chính xác của mô hình dự báo. Mô hình được xây dựng để dự báo trước 24 giờ để lập kế hoạch phát và lưu trữ điện [15].

Công thức xử lý dữ liệu:

$$\tilde{y}_i = \sum_{j=-m}^m C_j y_{i+j} \quad (18)$$

Trong đó:

y_{i+j} là dữ liệu đầu vào;

C_j hệ số Savitzky-Golay;

$\tilde{y}_i$ dữ liệu sau khi làm mượt;

m là nửa độ rộng khoảng làm mượt.

Công thức dự báo mô hình NARX:

$$y(t) = f \left(\begin{matrix} x(t-T), x(t-2T), \dots, x(t-nT), \\ y(t-T), \dots, y(t-nT) \end{matrix} \right) \quad (19)$$

Trong đó:

n là số điểm quá khứ trong dự báo;

T là số bước thời gian;

Hàm $x()$ và $y()$ là đầu vào ảnh hưởng và đầu vào là chính nó;

Hàm $f()$ là hàm biểu diễn mối quan hệ phụ thuộc theo thời gian;

Công thức tính sai số mô hình:

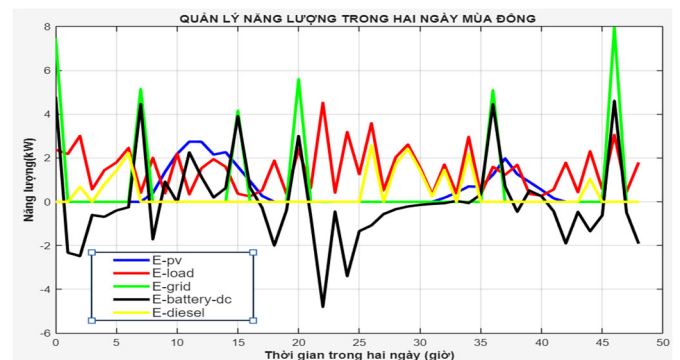
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x| \quad (20)$$

Trong đó: x_i là giá trị dự báo và x là giá trị thực tế.

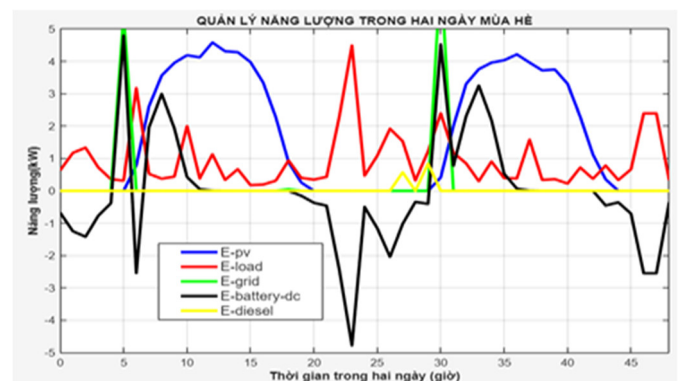
4. KẾT QUẢ MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

4.1. Kết quả điều phối tải khi chưa áp dụng tối ưu

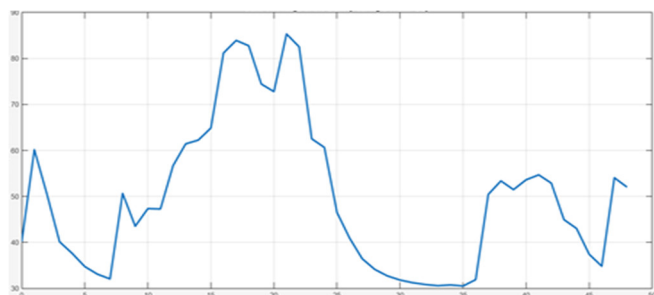
Trong hình 6 thể hiện kết quả khi điều phối tải dựa trên nguyên tắc ưu tiên nguồn năng lượng tái tạo. Hình 6a và 6c trình bày kết quả mô phỏng trong hai ngày mùa đông. Trong điều kiện bức xạ mặt trời thấp, hệ thống BESS không được sạc đầy, do đó hệ thống vẫn cần huy động thêm công suất từ lưới điện và máy phát diesel để bảo đảm cân bằng công suất.



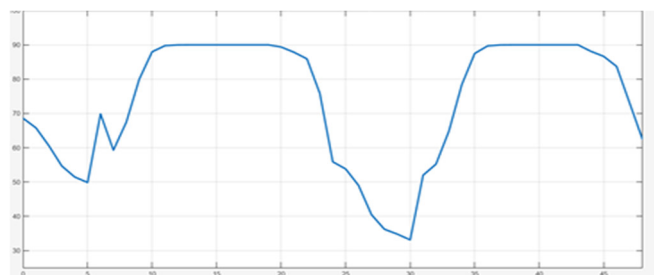
(a) Biểu đồ năng lượng mùa đông



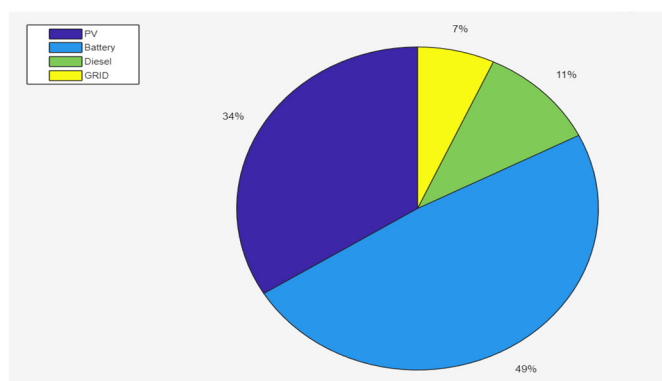
(b) Biểu đồ năng lượng mùa hè



(c) Biểu đồ trạng thái pin mùa đông



(d) Biểu đồ trạng thái pin mùa hè



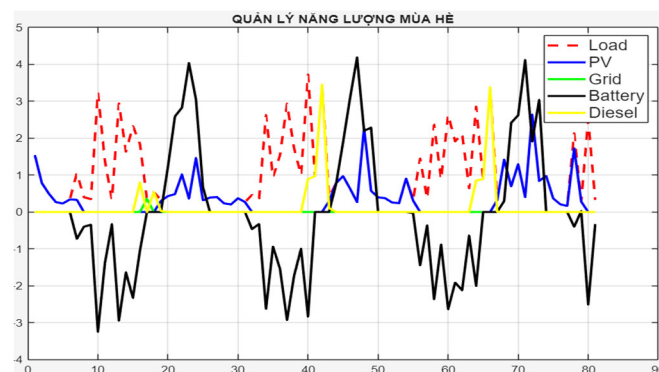
(e) Biểu đồ phần trăm năng lượng cung cấp một năm

Hình 6. Kết quả điều phối năng lượng theo nguyên tắc ưu tiên nguồn năng lượng tái tạo trước tối ưu

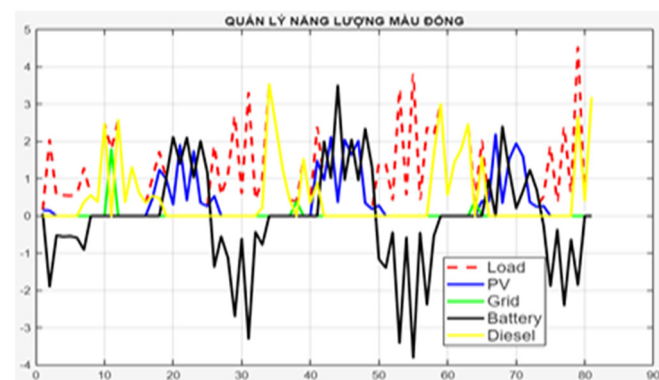
Kết quả tại hình 6b và 6d cho thấy trong điều kiện mùa hè, công suất phát từ hệ PV tăng đáng kể, góp phần đáp ứng phần lớn nhu cầu phụ tải và cải thiện trạng thái sạc của BESS. Ở một số thời điểm, công suất PV dư thừa có thể được sử dụng để sạc pin hoặc hòa lưới, cho thấy khả năng mở rộng quy mô hệ thống trong các nghiên cứu tiếp theo. Hình 6e cho tổng quát sự phân bố của các tải trong một năm lưới điện chỉ cung cấp 7% lượng năng lượng tiêu thụ trong đó pin và năng lượng mặt trời chiếm trên 80% nguồn cung cấp năng lượng cho thấy hiệu quả sử dụng hệ thống năng lượng tái tạo này. Tuy nhiên, tỷ lệ khai thác năng lượng tái tạo cao chưa đủ để đánh giá toàn diện hiệu quả vận hành của hệ thống. Cần xem xét thêm tiêu chí chi phí vận hành, mức độ huy động diesel, công suất mua từ lưới và trạng thái SOC của BESS. Các kết quả sau tối ưu bằng PSO được trình bày ở hình 7 nhằm làm rõ hiệu quả kinh tế và kỹ thuật của phương pháp đề xuất.

4.2. Kết quả ứng dụng tối ưu PSO cho chi phí và NARX để dự báo bức xạ mặt trời

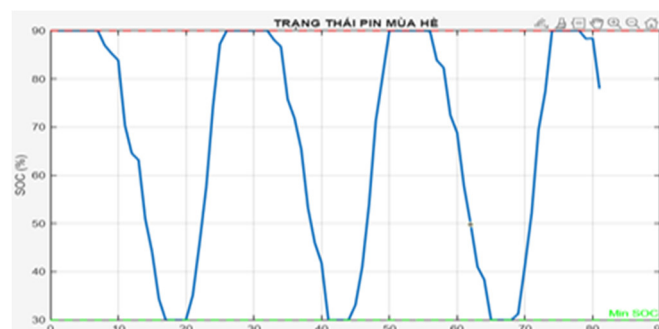
Kết quả sau khi áp dụng mô hình PSO và dự báo mạng nơ-ron NARX (hình 5) cho thấy sự cải thiện rõ rệt về mặt kinh tế và vận hành kỹ thuật.



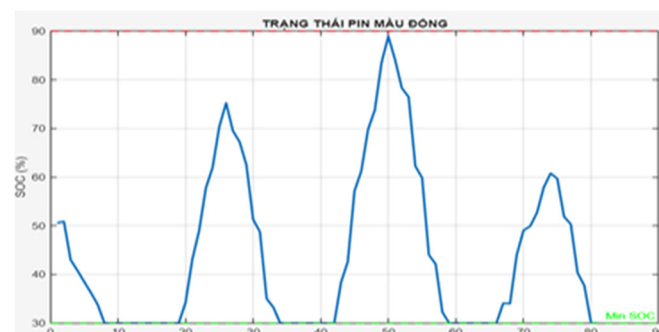
(a) Biểu đồ năng lượng mùa hè



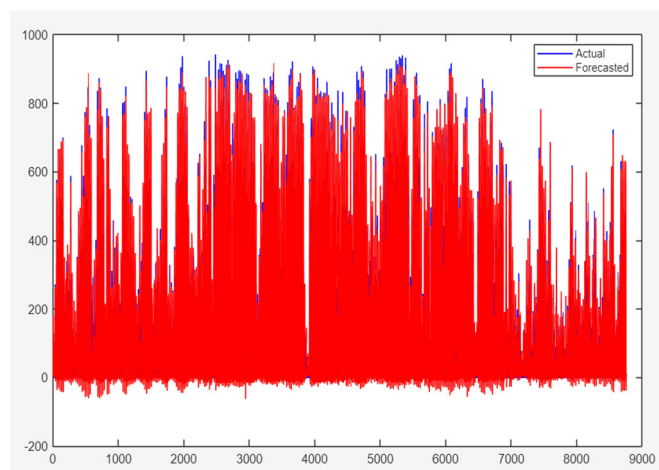
(b) Biểu đồ năng lượng mùa đông



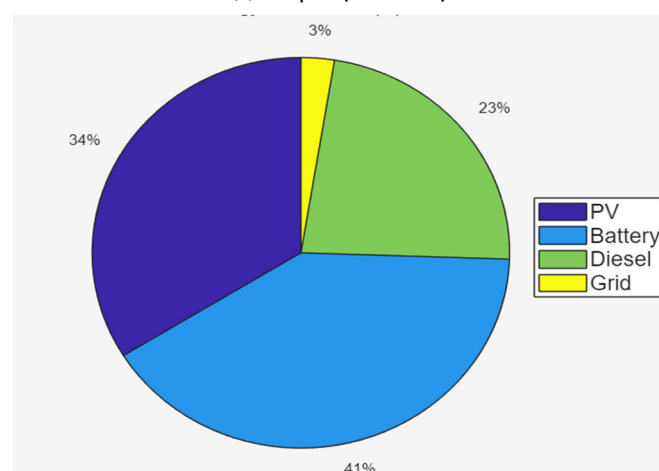
(c) Biểu đồ trạng thái pin mùa hè



(d) Biểu đồ trạng thái pin mùa đông



(e) Kết quả dự báo bức xạ



(f) Biểu đồ phần trăm năng lượng

Hình 7. Kết quả điều phối năng lượng sau tối ưu bằng PSO và dự báo bức xạ mặt trời bằng NARX

Hiệu quả vận hành và Quản lý lưu trữ (hình 7a-d):

Các biểu đồ cung cấp năng lượng và trạng thái sạc (SOC) của pin trong cả hai điều kiện mùa đông và mùa hè khẳng định hệ thống luôn duy trì khả năng đáp ứng **100% phụ tải**. Quá trình sạc/xả của hệ thống lưu trữ được điều phối linh hoạt, tuân thủ nghiêm ngặt các ràng buộc kỹ thuật (duy trì SOC trong khoảng **30% đến 90%**) để tối ưu tuổi thọ thiết bị. **Tối ưu chi phí vận hành (hình 7f):** Việc ứng dụng giải thuật PSO đã tạo ra sự thay đổi chiến lược trong phân bổ nguồn lực so với kịch bản truyền thống.

Độ chính xác của mô hình dự báo (hình 7e): Mô hình NARX được huấn luyện và kiểm định trên bộ dữ liệu chuỗi thời gian kéo dài 8.760 giờ. Trên cơ sở đó, mô hình được sử dụng để thực hiện dự báo ngắn hạn theo cửa sổ trượt 24 giờ tiếp theo. Kết quả cho thấy sai số trung bình của dự báo **24 giờ** đạt khoảng **5%**, thể hiện hiệu suất cao và tính ổn định của mô hình. Mặc dù kết quả này chưa được tích hợp vào hệ thống thực tế, nhưng nó cho thấy tiềm năng ứng

dụng của các phương pháp học máy trong bài toán dự báo bức xạ mặt trời. Việc kết hợp dự báo học máy với thuật toán tối ưu bầy đàn không chỉ nâng cao tính khả thi trong điều phối hệ thống mà còn mang lại lợi ích kinh tế đáng kể cho các mô hình Microgrid tại khu vực Quảng Trị.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã xây dựng thành công hệ thống quản lý năng lượng tích hợp mô hình dự báo NARX và thuật toán tối ưu hóa PSO cho lưới điện Microgrid lai tại khu vực Quảng Trị. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống có khả năng đáp ứng đầy đủ nhu cầu phụ tải, đồng thời góp phần đảm bảo an ninh năng lượng cho các khu vực biên giới khó tiếp cận lưới điện truyền thống. Mô hình dự báo NARX đạt độ chính xác khoảng 95%, qua đó hỗ trợ hiệu quả trong việc lập kế hoạch sạc/xả pin và nâng cao tính ổn định vận hành của hệ thống, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn IEEE 519. Các kết quả đạt được cho thấy tiềm năng ứng dụng thực tiễn của giải pháp, góp phần hướng tới mục tiêu tự chủ năng lượng theo định hướng của Quy hoạch điện VIII.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi HaUI trong đề tài nghiên cứu khoa học sinh viên 2026.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. VietNamNet News, *Quảng Trị: 26 xã miền núi khó đạt chuẩn nông thôn mới giai đoạn 2024 - 2025*. VietNamNet News. [Online]. Available: <https://vietnamnet.vn/quang-tri-26-xa-mien-nui-kho-dat-chuan-nong-thon-moi-giai-doan-2024-2025-2337660.html>
- [2]. Báo và phát thanh, truyền hình Quảng Trị, *Mỗi mùa hè điện lưới quốc gia*. Báo và Phát thanh, Truyền hình Quảng Trị. <https://baoquangtri.vn/xa-hoi/202511/moi-mon-cho-dien-luoi-quoc-gia-7663f97/>.
- [3]. *Tiềm năng lắp điện mặt trời tại Quảng Trị - Điện mặt trời EC-Tech*. Điện Mặt Trời EC-Tech, Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://ec-tech.vn/tiem-nang-lap-dien-mat-troi-tai-quang-tri/>.
- [4]. U.S. Department of Energy, *Microgrid Overview*. Grid Deployment Office, 2024.
- [5]. Oak Ridge National Laboratory, *Microgrid Controller Survey Report: 2024 Update*, ORNL/TM-2024/3407, 2024.
- [6]. S. Bacha, A. K. Jain, and related authors, *Design, control, reliability, economic and energy management of microgrid: A review*. Energy Reports, 2023.
- [7]. S. Manson, B. Nayak, W. Allen, *Robust Microgrid Control System for Seamless Transition Between Grid-Tied and Island Operating Modes*. Schweitzer Engineering Laboratories, Buenos Aires, Argentina, 2018.

- [8]. Y. Wang, et al., "Renewable energy consumption optimization allocation strategy for a regional microgrid system," *Frontiers in Energy Research*, 2025.
- [9]. K. Anderson, et al., "Looking beyond bill savings to equity in renewable energy microgrid deployment," *Energy Research & Social Science*, 2022.
- [10]. B. Kroposki, et al., *An Overview of Issues Related to IEEE Std 1547-2018 Requirements Regarding Voltage and Reactive Power Control*. National Renewable Energy Laboratory, 2021.
- [11]. IEEE Standards Association, *IEEE Std 519-2022: IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems*. 2022.
- [12]. S. Phommixay, M. L. Doumbia, D. L. St-Pierre, "Review on the cost optimization of microgrids via particle swarm optimization," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11, 1, 73-89, 2019. doi: 10.1007/s40095-019-00332-1.
- [13]. K. Paul, et al., "Optimizing sustainable energy management in grid connected microgrids using quantum particle swarm optimization for cost and emission reduction," *Scientific Reports*, 15, 1, p. 5843, 2025. doi: 10.1038/s41598-025-90040-0.
- [14]. L. Yang, et al., "Multi-Objective optimal scheduling for Multi-Renewable energy power system considering flexibility constraints," *Processes*, 10, 7, p. 1401, 2022. doi: 10.3390/pr10071401.
- [15]. S. Al-Dahidi, M. Alrbai, B. Rinchi, L. Al-Ghussain, O. Ayadi, A. Alahmer, "A tiered NARX model for forecasting day-ahead energy production in distributed solar PV systems," *Cleaner Engineering and Technology*, 23, p. 100831, 2024. doi: 10.1016/j.clet.2024.100831.
- [16]. L. Miao, et al., "Current status, challenges and future perspectives of operation Optimization, power Prediction and Virtual synchronous Generator of microgrids: A Comprehensive review," *Energies*, 18, 13, p. 3557, 2025. doi: 10.3390/en18133557.
- [17]. Y.N. Jeon, J.H. Ko, "Forecast-Aided Converter-Based control for optimal microgrid operation in Industrial Energy Management System (EMS): A case study in Vietnam," *Energies*, 18, 12, p. 3202, 2025. doi: 10.3390/en18123202.
- [18]. H. P. H. Anh, C. Van Kien, "Optimal energy management of microgrid using advanced multi-objective particle swarm optimization," *Engineering Computations*, 37, 6, 2085–2110, 2020. doi: 10.1108/ec-05-2019-0194.
- [19]. M. E. T. Souza, L. C. G. Freitas, "Grid-Connected and Seamless Transition Modes for microgrids: An overview of control methods, operation elements, and general requirements," *IEEE Access*, 10, 97802–97834, 2022. doi: 10.1109/access.2022.3206362.
- [20]. K. R. Padiyar, A. M. Kulkarni, *Dynamics and control of electric transmission and microgrids*. John Wiley & Sons Ltd, 2018. doi: 10.1002/9781119173410.
- [21]. N. Đ. Hạnh, N. V. Hùng, P. V. Thái, T. V. Quảng, T. T. Lý, T. T. Chường, "Nghiên cứu dự báo tốc độ gió khu vực Quảng Trị sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo NARX," *Journal of Measurement, Control and Automation*, 29 (1), 66-77, 2025. <https://vjol.info.vn/mca/article/view/114911>.

AUTHORS INFORMATION

**Truong Van Quang¹, Cao Thi Mai Phuong²,
Nguyen Tan Van³, Trinh Trong Chuong¹**

¹Hanoi University of Industry, Vietnam

²College of Industrial Techniques, Bacninh, Vietnam

³Van Phuc City Hospital, Ho Chi Minh City, Vietnam