

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT TP HCM

ĐINH NGỌC SANG

NGHIÊN CỨU NÂNG CAO LỢI NHUẬN ĐIỆN GIÓ TRONG THỊ
TRƯỜNG ĐIỆN

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện
Mã số chuyên ngành: 9520201

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2026

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Trương Việt Anh

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS. TS. Dương Thanh Long

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Cơ sở tại Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM vào ngày 23 tháng 8 năm 2025.

CHƯƠNG MỞ ĐẦU

Nghiên cứu được lựa chọn dựa trên bối cảnh chính sách và thách thức môi trường toàn cầu, phù hợp với Nghị quyết 70-NQ/TW về chiến lược năng lượng Việt Nam hướng tới thị trường điện đồng bộ, minh bạch và ưu tiên khai thác năng lượng tái tạo. Nghiên cứu cũng phù hợp xu hướng tất yếu chuyển đổi xanh trên thế giới nhằm giảm khí thải CO₂. Trong đó nhấn mạnh là nguồn điện gió, song lại chịu tính bất định cao do biến động tốc độ gió, gây sai số lớn trong dự đoán công suất phát. Bên cạnh đó, trong thị trường điện cạnh tranh, các nhà máy điện phải chào thầu chính xác công suất phát tương lai; bất cứ sai lệch thực tế dẫn đến rủi ro thiệt hại kinh tế lớn qua các mức phạt theo quy định.

Nghiên cứu hướng tới xây dựng mô hình và giải pháp tăng doanh thu hoặc lợi nhuận, qua đó nâng cao hiệu quả đầu tư điện gió trong điều kiện bất định. Tiếp cận từ hai khía cạnh: Mô hình hóa xác suất sản lượng điện gió trong thị trường và đề xuất phương pháp nâng hiệu quả đầu tư điện gió. Kết quả nghiên cứu có 03 đóng góp cơ bản: (i) góp phần hoàn thiện mô hình xác suất bất định tích hợp đa nguồn năng lượng trong bối cảnh cạnh tranh của thị trường; (ii) bổ sung thêm phương pháp tối ưu lai LSTM-GA/PSO trong cộng đồng các thuật toán meta-heuristic; và (iii) đề xuất kết hợp hệ thống trữ năng với vận hành máy biến áp giúp cân bằng cung – cầu và nâng cao hiệu quả điện gió trong điều kiện bất định.

Tuy nhiên, nghiên cứu tập trung nâng cao doanh thu và hiệu quả đầu tư điện gió trong một điều kiện thực nghiệm giới hạn nhất định. Cụ thể hạn chế phạm vi nghiên cứu trong mô hình bất định Weibull của điện gió trong một cơ chế phạt của thị trường điện ngày hôm sau với các dữ liệu mô hình điện chuẩn IEEE khai thác các công cụ từ Matpower/Matlab. Ngoài ra, nghiên cứu cũng tập trung trong một số thuật toán phổ biến như LSTM/GA/PSO để đánh giá kết quả và đề xuất khả năng phát triển cho nhiều thuật toán hơn. Hơn nữa, với việc tập trung khía cạnh lợi ích tài chính, nghiên cứu hạn chế chưa xem xét các yếu tố tương đồng của các kịch bản như: tổn thất truyền tải, biến đổi khí hậu, hay thay đổi pháp lý.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

1.1. Bối cảnh xu hướng phát triển năng lượng thế giới

Tổng quan từ các báo cáo đến 2024 thế giới vẫn phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch, mặc dù thời gian gần đây NLTT tăng mạnh, chiếm 30% điện toàn cầu. Dự báo đến 2050, điện gió và mặt trời sẽ dần thay thế nhiên liệu hóa thạch, trở thành nguồn năng lượng chính.

1.2. Bối cảnh phát triển năng lượng tại Việt Nam

Việt Nam đã ban hành Quy hoạch điện VIII nhấn mạnh phát triển điện gió, dự kiến chiếm 13% năm 2030 để đạt mục tiêu "Net Zero" 2050. Tuy nhiên, đối mặt nhiều thách thức về hạ tầng truyền tải, chính sách hỗ trợ và cạnh tranh với các nguồn năng lượng khác.

1.3. Thách thức

Trong bối cảnh thị trường điện chuyển dần sang cơ chế cạnh tranh tự do, các nhà máy điện gió phải chào thầu công suất phát điện chính xác cho từng khung giờ, trong khi tốc độ gió biến động ngẫu nhiên khiến sản lượng phát có tính bất định cao, dẫn đến sai lệch dự báo và nguy cơ bị phạt hợp đồng. Sự giảm dần ưu đãi giá FIT cùng yêu cầu đấu thầu minh bạch khiến chủ đầu tư ĐG phải đối mặt với nhiều thách thức mới: (i) sai số dự báo gió gây mất cân bằng hệ thống và giảm hiệu quả kinh tế; (ii) sự biến động công suất làm gia tăng rủi ro thị trường và yêu cầu chiến lược chào thầu tối ưu; (iii) việc xử lý khối lượng dữ liệu lớn, phi tuyến và ngẫu nhiên đòi hỏi các phương pháp tối ưu tiên tiến và mạnh hơn.

1.4. Xu hướng nghiên cứu gần đây

Các nghiên cứu gần đây tập trung vào: (1) Dự báo sản lượng điện gió bằng AI; (2) Tích hợp lưu trữ năng lượng; (3) Tối ưu hóa hệ thống điện kết hợp NLTT; (4) Mô hình khai thác tài chính để giảm rủi ro đầu tư. Nhìn chung trong thời gian qua, xu hướng nghiên cứu tập trung vào việc ứng dụng AI và các thuật toán tối ưu nhằm giải quyết thách thức bất định điện gió. Sự kết hợp giữa dự báo bằng AI và tối ưu hóa meta-heuristic đang trở thành hướng đi chủ đạo. Trong khi đó, nghiên cứu các mô hình tài chính kinh tế để cải thiện thiệt hại cho các bên vẫn còn hạn chế.

1.5. Khoảng trống của các nghiên cứu

Mặc dù mô hình tích hợp năng lượng tái tạo đã được phát triển ở các thị trường điện tiên tiến, song nghiên cứu về bất định điện gió trong đó vẫn còn rời rạc, chưa gắn kết tổng thể trong hệ thống thị trường do tính phức tạp và biến động khó lường. Sự cộng hưởng giữa ngẫu nhiên của gió và phản ứng thị trường gây ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả đầu tư và lợi ích các bên tham gia. Việc mô hình hóa và tối ưu hóa các yếu tố xác suất, cùng với đánh giá hiệu quả tích hợp hệ thống trữ năng trong điều kiện giảm ưu đãi, tất cả vẫn là khoảng trống nghiên cứu quan trọng cần được tiếp cận trong giai đoạn phát triển mới của điện gió.

1.6. Tính cấp thiết

Biến động khó lường của điện gió cùng áp lực cạnh tranh trong thị trường điện đã làm giảm lợi nhuận và gia tăng rủi ro tài chính cho nhà đầu tư, đặt ra nhu cầu cấp thiết giải pháp nâng cao hiệu suất khai thác điện gió nhằm củng cố niềm tin đầu tư và thúc đẩy phát triển bền vững. Nghiên cứu này hướng tới hai nội dung nghiên cứu chính: Xây dựng mô hình và các phương pháp. Theo đó, triển khai ba trọng tâm chính như trình bày trong phương hướng nghiên cứu dưới đây.

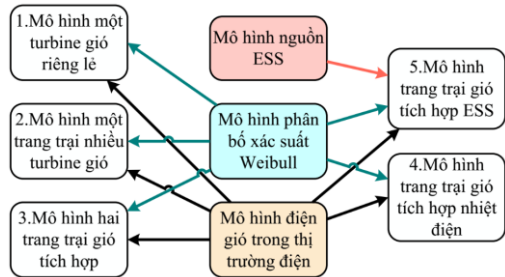
1.7. Mục tiêu và phương hướng nghiên cứu

Mục tiêu chính của luận văn là nghiên cứu tăng doanh thu điện gió trong điều kiện bất định với thời kỳ phát triển mới, cạnh tranh tự do và công bằng trên thị trường điện. Qua nghiên cứu tổng quan, để đạt được mục tiêu đó cần phát huy hai nội dung với 3 trọng tâm được triển khai như sau: (i) xây dựng mô hình xác suất bất định và tích hợp điện gió với các nguồn truyền thống phục vụ đánh giá hiệu quả đầu tư; (ii) phát triển phương pháp lai giữa LSTM và GA/PSO nâng cao chất lượng tối ưu hóa mô hình; và (iii) nghiên cứu tích hợp hệ thống trữ năng với vận hành máy biến áp truyền tải để tăng hiệu quả trong mở rộng quy mô điện gió hiện hữu.

CHƯƠNG 2: Mô hình bất định điện gió trong thị trường điện

2.1. Đặt vấn đề

Để nâng cao hiệu quả đầu tư và giảm rủi ro từ tính bất định của điện gió, nghiên cứu đề xuất tích hợp vận hành nhà máy điện gió với nhiệt điện và hệ thống lưu trữ năng lượng.



Hình 2.1: Năm mô hình

2.1.1. Tính bất định của điện gió trong thị trường điện

Thị trường điện vận hành theo nhiều mô hình, từ độc quyền đến cạnh tranh, mỗi loại có ưu nhược điểm riêng. Xu hướng tương lai tập trung vào tự do hóa, số hóa và tích hợp năng lượng tái tạo, trong đó dự báo sản lượng và cơ chế đấu thầu đóng vai trò quan trọng như đã nêu trong tổng quan.

2.1.2. Bài toán liên kết nguồn điện

Hệ thống điện gồm hai nhóm chính: nguồn chủ động như nhiệt điện, thủy điện có hồ điều tiết; còn nguồn thụ động như ĐG, ĐMT bất định sản lượng. Việc điều phối hợp lý giữa các nguồn chủ và bị động có thể kiểm soát rủi ro và cân bằng cung - cầu. Chương này nghiên cứu các giải pháp tối ưu kết hợp giữa chúng cùng với ESS để tăng độ ổn định cho lưới điện.

2.1.3. Liên kết trang trại điện gió

Hình 2.1 minh họa năm mô hình đầu tư điển hình được phân tích và so sánh.

2.2. Lý thuyết cơ sở mô hình hóa

2.2.1. Mô hình hóa xác suất công suất phát điện gió

2.2.1.1. Xác suất của một tua-bin gió

Mật độ xác suất gió biểu thức (2-1) theo [69], sản lượng điện biểu diễn [37]:

$$P_w(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \text{ and } v > v_{out} \\ P_{wr} \left(\frac{v-v_{in}}{v_r-v_{in}} \right), & v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_{wr}, & v_r < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (2-2)$$

2.2.1.2. Tổ hợp xác suất

Khi có nhiều tua-bin gió hoặc nhiều trang trại gió cộng tác với nhau thành một liên kết thống nhất, phân bố mật độ xác suất tổ hợp:

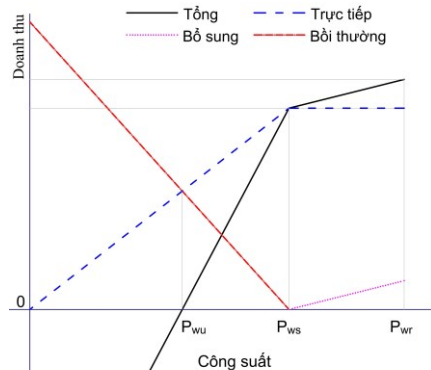
$$f_{\Sigma w}(P_{\Sigma w}) = \prod_{i=1}^{N_w} f_{w,i}(P_{w,i}) \quad (2-3)$$

$$P_{\Sigma w} = \sum_{i=1}^{N_w} P_{w,i} \quad (2-4)$$

2.2.2. Mô hình đấu thầu điện gió trong thị trường điện

Đa số các nghiên cứu gần đây hướng tới đấu thầu điện tái tạo trên thị trường điện. Với mô hình đấu thầu giá công suất phát điện mô tả: Công suất phát điện P_{ws} , Công suất sự P_{wr} , và công suất thiếu hụt P_{wu} .

Hình 2.4 cho thấy doanh thu trực tiếp và bất định tuyến tính, trong khi đó dòng tiền hầu như tăng ít công suất vượt dự đoán nhưng lại giảm mạnh khi thấp hơn. Đặc biệt, không có thu nhập mà phải bồi thường khi P_w thấp hơn P_{wu} .



Hình 2.4: Doanh thu và chi phí của điện gió trên thị trường điện

2.2.3. Mô hình hệ thống ESS

Chi phí đầu tư ESS cao nên chỉ triển khai khi không có lựa chọn khác.

$$C_e(P_e) = \lambda_e \cdot P_e + C_{e0,i} \quad (2-5)$$

P_e là công suất ESS bù cho ĐG; λ_e là giá điện; $C_{e0,i}$ là chi phí cố định.

2.3. Lý thuyết cơ sở

2.3.1. Hàm mục tiêu

Mục tiêu đầu tư ĐG là mong muốn đạt được lợi ích cao nhất.

$$tối đa \{F = R_w(P_w) - C_{Pw}(P_p)\} \quad (2-6)$$

R_w là thu nhập; C_{Pw} là chi phí. Trong bối cảnh thị trường, doanh thu gồm hai thành phần: trực tiếp (không xác suất) và doanh thu xác suất (bất định), chi tiết:

$$R_w(P_w) = \sum R_{w,i} = \sum [R_{ws,i}(P_{ws,i}) + R_{wu,i}(\Delta P_{w,i})] \quad (2-7)$$

P_w là công suất gió bán; $R_{w,i}$, $R_{ws,i}$, $R_{wu,i}$ là doanh thu tổng, trực tiếp, và bất định; $P_{ws,i}$ và $\Delta P_{w,i} = P_{wav,i} - P_{ws,i}$ là công suất chào và độ lệch thực tế.

Ở đây có hai khoản doanh thu: trực tiếp – theo giá bán và sản lượng chào thầu; và bất định – theo sản lượng sai lệch giữa thực tế và dự báo.

2.3.2. Doanh thu bán điện trực tiếp

$$R_{ws,i}(P_{ws,i}) = \lambda_{w,i} P_{ws,i} \quad (2-8)$$

Đồng biến với sản lượng ĐG được bán theo kế hoạch đấu thầu và đơn giá, thường xác định bình quân chi phí nguồn nhiệt điện:

$$C_T(P_{TG}) = \sum_{i=1} (a_i + b_i P_{TG,i} + c_i P_{TG,i}^2) \quad (2-9)$$

$$\lambda_{TG,i} = b_i + c_i P_{TG,i} \quad (2-10)$$

2.3.3. Chi tiết nguồn thu bất định

2.3.3.1. Xét điện gió độc lập

Thu nhập bán điện dư R_{RW} và bồi thường thiếu hụt C_{Pw} , được tính,

$$R_{wu,i}(\Delta P_{w,i}) = \begin{cases} R_{RW,i}(\Delta P_{w,i}), & \text{if } P_{wav,i} \geq P_{ws,i} \\ C_{Pw,i}(\Delta P_{w,i}), & \text{if } P_{wav,i} \leq P_{ws,i} \end{cases} \quad (2-11)$$

$$\begin{aligned} R_{RW,i}(\Delta P_{w,i}) &= k_{R,i} \lambda_{w,i} (P_{wav,i} - P_{ws,i}) \\ &= k_{R,i} \lambda_{w,i} \int_{P_{ws,i}}^{P_{wav,i}} (p_{w,i} - P_{ws,i}) f_w(p_{w,i}) dp_{w,i} \end{aligned} \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned} C_{Pw,i}(\Delta P_{w,i}) &= k_{P,i} \lambda_{w,i} (P_{wav,i} - P_{ws,i}) = k_{P,i} \lambda_{w,i} \int_0^{P_{ws,i}} (p_{w,i} - \\ &P_{ws,i}) f_w(p_{w,i}) dp_{w,i} \end{aligned} \quad (2-13)$$

P_{wav} và P_{ws} CS thực tế và chào; xác suất $f_w(p_{w,i})$. $k_{R,i}$, $k_{P,i}$ HS dư và phạt.

2.3.3.2. Xét bù đắp của nguồn nhiệt điện

Việc ĐG chi trả chi phí cho nhiệt điện có thể được tính trong biểu thức sau đây,

$$C_{Tp}(P_{Tp}) = \lambda_T P_{Tp}; \quad P_p \in (0 \div P_{TR}) \quad (2-14)$$

P_{Tp} là sản lượng nhiệt điện bù ĐG; Khả năng bù tối đa,

$$P_{TR} = P_{Tr} - P_{Ts} \quad (2-15)$$

Doanh thu bất định được tính:

$$R_{wu}(P_p) = \begin{cases} R_w(P_p), & \text{if } P_p \geq 0 \\ C_{TP}(P_{TP}), & \text{if } P_{TR} \geq -P_p > 0 \\ C_{PW}(P_p), & \text{if } -P_p > P_{TR} \end{cases} \quad (2-16)$$

2.3.3.3. Xét bổ sung nguồn trữ năng

Chi phí phải trả cho cả nhiệt điện và ESS khi đó được tính,

$$C_p(P_p) = C_{TP}(P_{TP}) + C_e(P_e) \quad (2-17)$$

Và khi đó chi phí trong doanh thu bất định thay đổi như sau,

$$C_{wu}(P_p) = \begin{cases} R_w(P_p), & \text{if } P_p \geq 0 \\ C_{TP}(P_{TP}), & \text{if } P_{TR} \geq -P_p > 0 \\ C_{TP}(P_{TR}) + C_e(P_e), & \text{if } P_e + P_{TR} \geq -P_p > P_{TR} \\ C_{PW}(P_p), & \text{if } -P_p > P_e + P_{TR} \end{cases} \quad (2-18)$$

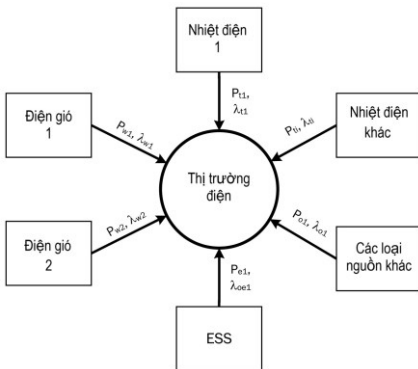
2.3.4. Các mô hình khảo sát

2.3.4.1. Mô hình một tua bin (MHITB): Mô hình trang trại một tuabin gió độc lập, là mô hình không thực nhưng xét làm cơ sở. Các nguồn điện độc lập, giá bán và sản lượng theo chiến lược riêng.

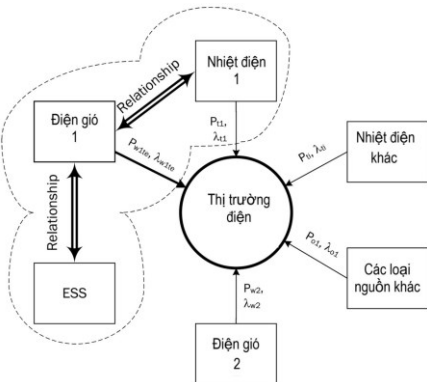
2.3.4.2. Mô hình một trang trại (MH1ĐG): Mô hình một trang trại gió độc lập với các nguồn điện khác như Hình 2.5.

2.3.4.3. Mô hình hai trang trại (MH2ĐG): Kết nối các trang trại điện gió với nhau để giảm rủi ro do biến động sản lượng điện từng trang trại.

2.3.4.4. Mô hình điện gió với nhiệt điện (MHĐG-N): Liên kết ĐG và nhiệt điện.



Hình 2.5: Mô hình MH1ĐG



Hình 2.8: Mô hình liên kết MHĐG-T-N

2.3.4.5. *Mô hình MHDG-T-N*: là MHDG-N có tích hợp trữ năng. Hình 2.8 thể hiện mô hình liên kết các nguồn với ESS để khai thác tối đa hiệu quả ĐG. Nhiệt điện và ESS có nhiệm vụ bù đắp cho thiếu hụt của ĐG.

2.3.5. *Lưu đồ chu trình khảo sát và đánh giá*: trình bày trên Hình 2.9

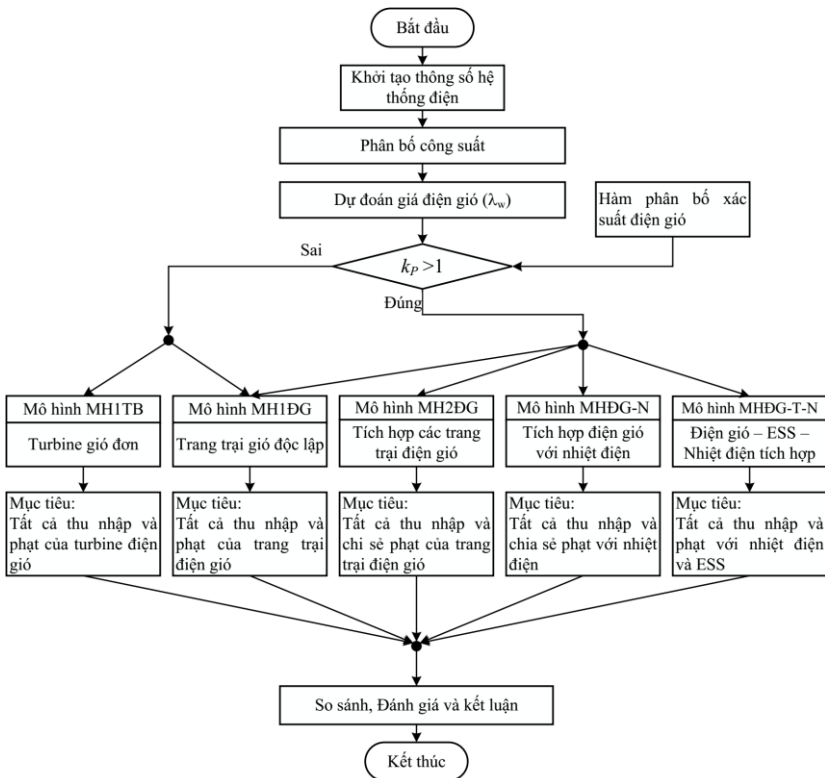
2.3.6. *Thực nghiệm*

2.3.6.1. *Dữ liệu đầu vào*

HTĐ chuẩn IEEE 30-bus được sử dụng để thực nghiệm tham số tại [75, 76], thay thế hai nguồn ĐG tại bus 5 và 11, với 25 và 20 tua-bin công suất 3 MW.

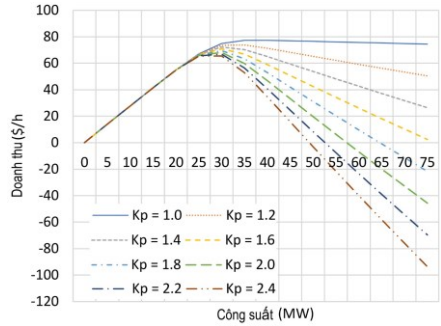
2.3.6.2. *Thử nghiệm MHITB*

Một tua-bin gió 3MW được lắp đặt tại bus 5 của hệ thống. Kết quả doanh thu trên Bảng 2.3 giảm liên tục theo tỷ lệ bồi thường và có giá trị âm.



Hình 2.9: Lưu đồ cực đại lợi nhuận

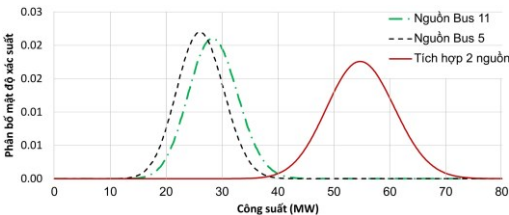
2.3.6.3. *Thử nghiệm MH1ĐG*: phân tích một trang trại gió tại bus 5, với hàm xác suất của 25 tua-bin tổng công suất đặt 75 MW. Kết quả Hình 2.13 doanh thu tăng tuyến tính dưới 25 MW nhưng giảm khi vượt 40 MW, với CS đỉnh 30–40 MW do tác động của bồi thường. Khi phạt tăng, doanh thu giảm nhanh, thậm chí có thể âm, đồng thời đỉnh doanh thu cũng dịch chuyển từ 45 MW xuống 30 MW.



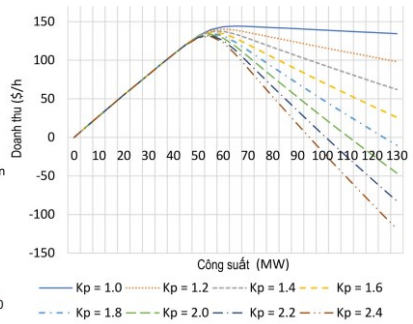
Hình 2.13: Doanh thu điện gió tại Bus 5

2.3.6.4. *Thử nghiệm MH2ĐG*: tổ hợp xác suất hai trang trại tại bus 5 và 11 cho ở Hình 2.14, có đỉnh thấp hơn và dịch chuyển về mức công suất cao hơn, phản ánh sự kết hợp công suất. Doanh thu từ hai nguồn điện gió Hình 2.15 cũng thay đổi theo xác suất, đạt giá trị tối đa khi công suất trong khoảng 55-65 MW.

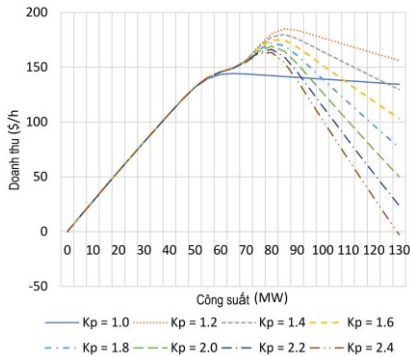
2.3.6.5. *Thử nghiệm MHĐG-N*: nhiệt điện bù CS thiếu cho điện gió, cho thấy doanh thu tăng khi tỷ lệ phạt vượt chi phí sản xuất. Và khi phạt lớn hơn 1.1, doanh thu tối đa tăng từ dưới 150 USD/h lên hơn 180 USD/h, nhưng phạt càng cao có mức trần doanh thu bị giới hạn, Hình 2.16. Ngoài ra, CS đầu thầu khuyến khích tăng 60 MW lên gần 90 MW nhờ sự hỗ trợ của nhiệt điện.



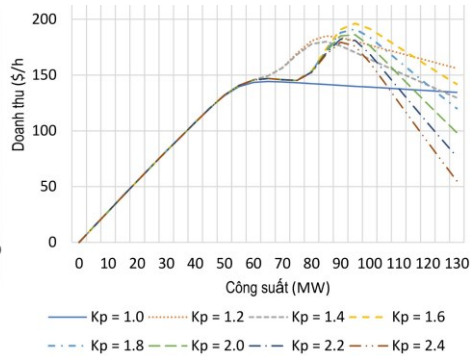
Hình 2.14: Xác suất tổ hợp hai ĐG



Hình 2.15: Doanh thu tổ hợp ĐG



Hình 2.16: Doanh thu MHDG-N

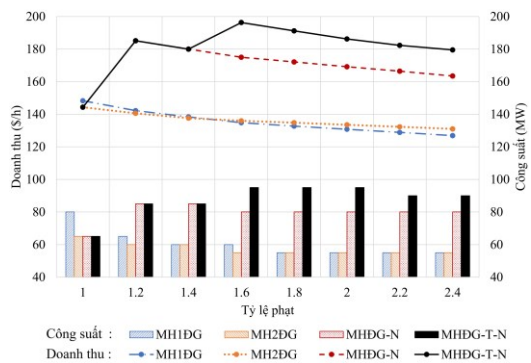


Hình 2.17: Doanh thu MHDG-T-N

2.3.6.6. Thử nghiệm MHDG-T-N: Hệ thống ESS với công suất 10 MW giúp tối ưu doanh thu cho ĐG khi phạt cao. Đường cong doanh thu có ba giai đoạn, Hình 2.17: không đổi khi đền bù thấp, hưởng lợi khi đền bù từ 1.2-1.4, và tối đa hóa lợi nhuận khi phạt vượt 1.5. Mô hình này giúp doanh thu ĐG tăng lên 200 USD/h và công suất khuyến khích gần 100 MW, cao hơn so với mô hình chỉ có ĐG.

2.3.7. Nhận xét và đánh giá kết quả thực nghiệm

Doanh thu tăng dần khi kết hợp nhiều nguồn điện, trong đó mô hình tích hợp trữ năng đạt cao nhất. Giảm rủi ro từ nguồn gió và tối ưu hóa kế hoạch đấu thầu, doanh thu 196,3 USD/giờ, tăng 132% so với MH2ĐG. Phạt cao làm giảm doanh thu ĐG, nhưng phối hợp các nguồn điện có thể giảm rủi ro, Hình 2.18, Khi phạt 1,6 thì doanh thu đỉnh mô hình có trữ năng cao nhất gần 200 USD/giờ. **Mô hình MHDG-T-N:** Đấu thầu hợp lý và kết hợp linh hoạt các nguồn năng lượng là yếu tố tạo thành công.



Hình 2.18: Doanh thu và công suất đỉnh ĐG

CHƯƠNG 3: Phương pháp tối ưu lai AI-MH

3.1. Giới thiệu

Nghiên cứu đề xuất hai thuật toán lai LSTM-GA và LSTM-PSO nhằm tối ưu đầu thầu điện gió, kết hợp thông minh nhân tạo trong thuật toán tối ưu.

3.2. Lý thuyết mô hình toán học

3.2.1. Mô tả bài toán

Mục tiêu: tối ưu mô hình MHĐG-T-N đề xuất trong Chương 2.

Quá trình: lai các thuật toán LSTM-GA, và LSTM-PSO.

Kết quả: (1) đánh giá so với nghiên cứu Chương 2; (2) so sánh với các thuật toán truyền thống và một số cải tiến gần đây theo [77].

3.2.2. Hàm mục tiêu

Tối đa lợi ích gồm thu nhập trực tiếp khi chào thầu và doanh thu bất định:

$$\text{Tối đa } \{F = R_w + IC_w\} \quad (3-1)$$

3.2.2.1. Doanh thu trực tiếp

$$R_w = R_w^d(P_{ws}) + R_T^d(P_{Ts}) \quad (3-2)$$

Doanh thu trực tiếp R_w gồm ĐG R_w^d và nhiệt điện liên doanh R_T^d , theo giá chào.

$$R_w^d = \lambda_w x P_{ws} \quad (3-3)$$

$$R_T^d = \lambda_T x P_{Ts} \quad (3-4)$$

3.2.2.2. Thu nhập bất định

$$IC_w = R_w^u(\Delta P_w) - (C_E + C_T + C_P) \quad (3-5)$$

Chi tiết các thành phần tham số tính theo các biểu thức sau:

$$C_E = \eta_E(\lambda_C - \lambda_B)P_E \quad (3-6)$$

$$C_T = R_T^d(P_{Ts}) + R_T^u(\Delta P_T) \quad (3-7)$$

$$C_P = \lambda_P \Delta P_P \quad (3-8)$$

$$\Delta P_w = P_{wav} - P_{ws} \quad (3-9)$$

$$R_w^u = \begin{cases} R_{Rw}(\varphi_{out}), & \text{khi } \varphi_{out} \geq 0 \\ -C_{Pw}(\varphi_{out}), & \text{khi } \varphi_{out} < 0 \end{cases} \quad (3-13)$$

φ_{out} là độ lệch công suất thời gian thực. Lưu ý các doanh thu và chi phí là đại lượng ngẫu nhiên theo xác suất biến động công suất, ở đây dùng phân bố Weibull

3.2.2.3. Chỉ số giá điện trong thị trường điện

Nguyên lý giá điện biến động và phạt thị trường xác định theo [78].

3.2.3. Các ràng buộc

3.2.3.1. Giới hạn vận hành HTĐ

Các ràng buộc vận hành HTĐ truyền tải tương tự nghiên cứu [79].

3.2.3.2. Giới hạn tua-bin gió

Vận tốc gió để tua-bin có thể làm việc bị giới hạn trên và dưới.

3.2.3.3. Điều kiện đầu tư ESS

Hệ thống ESS chỉ đầu tư khi có lợi ích như trong [80].

3.3. Lý thuyết phương pháp tối ưu

3.3.1. Tóm lược các thuật toán gốc

3.3.1.1. GA

Thuật toán tiến hóa tham khảo [81] và [82], trình bày tóm tắt các vòng lặp tiến hóa gen cho đến khi đạt mục tiêu.

3.3.1.2. PSO

Thuật toán PSO tham khảo nghiên cứu [89], mô tả dịch chuyển của các cá thể đến khi tìm được mục đích.

3.3.1.3. LSTM

LSTM mạng nơ-ron hồi tiếp tham khảo [95], phù hợp dự báo chuỗi thời gian. Có cấu trúc nơ-ron tập hợp 3 nhóm lớp chính: Đầu vào, các lớp ẩn, đầu ra. Kiến trúc mạng được mô tả với các liên kết các Cell. Mỗi Cell biểu diễn bởi các hàm toán học biến đổi và liên kết. Quá trình học cần thực thi để xây dựng các tham số kiến trúc, dựa vào đó để dự đoán.

3.3.2. Thuật toán lai đề xuất

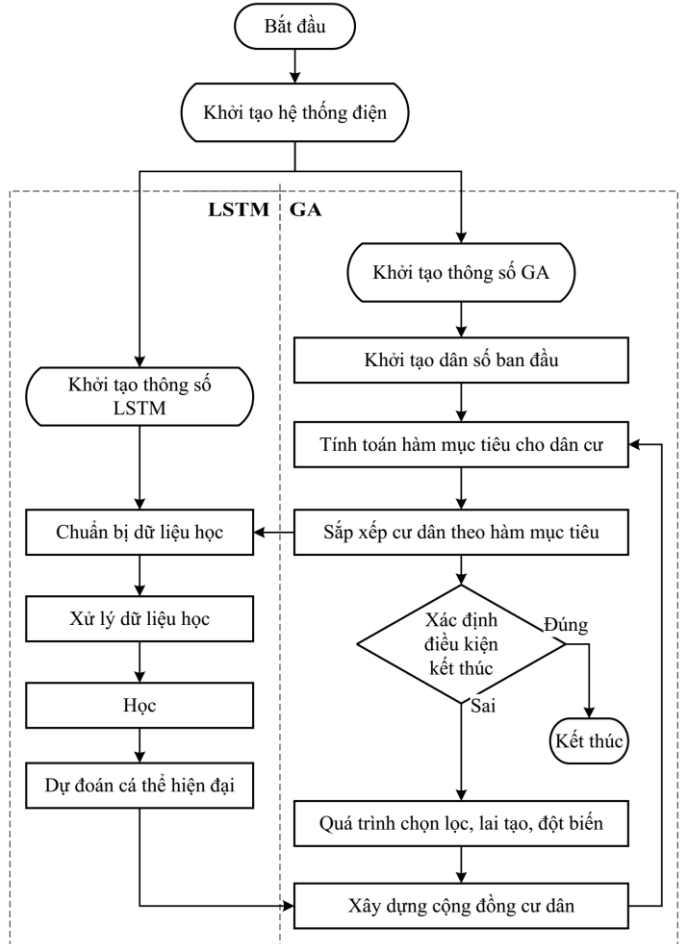
3.3.2.1. Nguyên lý ý tưởng

GA và PSO hoạt động dựa trên sự kết hợp giữa cạnh tranh và hợp tác, giúp các vòng lặp sau tiệm cận nghiệm tối ưu hơn. Nếu có cá thể mang đặc tính vượt trội, chúng sẽ thúc đẩy quá trình tiến hóa trong GA và tăng tốc độ hội tụ trong PSO. Bằng LSTM có thể dự đoán đặc tính ưu việt (xu hướng gen tốt trong GA, hướng tọa độ mục tiêu trong PSO), các đặc tính tốt đó gán cho một cá thể mới, gọi là cá

thể tương lai. Cá thể tương lai được gia nhập công đồng hiện tại để giúp cho đẩy mạnh tốc độ tối ưu và cải thiện độ chính xác.

3.3.2.2. Lai LSTM-GA

Chi tiết lưu đồ lai hóa LSTM-GA như Hình 3.5. Thực hiện qua các bước mô tả chi tiết trong thuyết minh luận án. Mô hình LSTM được huấn luyện từ dữ liệu quần thể trước, sau đó dự đoán cá thể tương lai và cải thiện độ chính xác thông qua lai ghép và đột biến,



Hình 3.5. Lưu đồ thuật toán LSTM-GA

giúp rút ngắn số vòng lặp tiến hóa liên kết tương lai.

3.3.2.3. Lai LSTM-PSO

Thuật toán này cũng tích hợp LSTM để dự đoán cá thể tương lai và thực thi 7 bước chi tiết trong thuyết minh luận án. Lưu đồ Hình 3.6. Quá trình dịch chuyển các cá thể tương tác có cả cá thể tương lai được nhiễu loạn trong cộng đồng.

3.4. Thử nghiệm

3.4.1. Sáu kịch bản

(1): Toán học truyền thống rời rạc; (2) GA: Tối ưu GA gốc; (3) LSTM-GA: Lai LSTM-GA; (4) PSO: Tối ưu PSO gốc; (5) LSTM-PSO; và (6): một tối ưu toán học đã công bố [79].

3.4.2. Dữ liệu

3.4.2.1. Hệ thống điện chuẩn IEEE 30-bus và các dữ liệu khác: Chương 2.

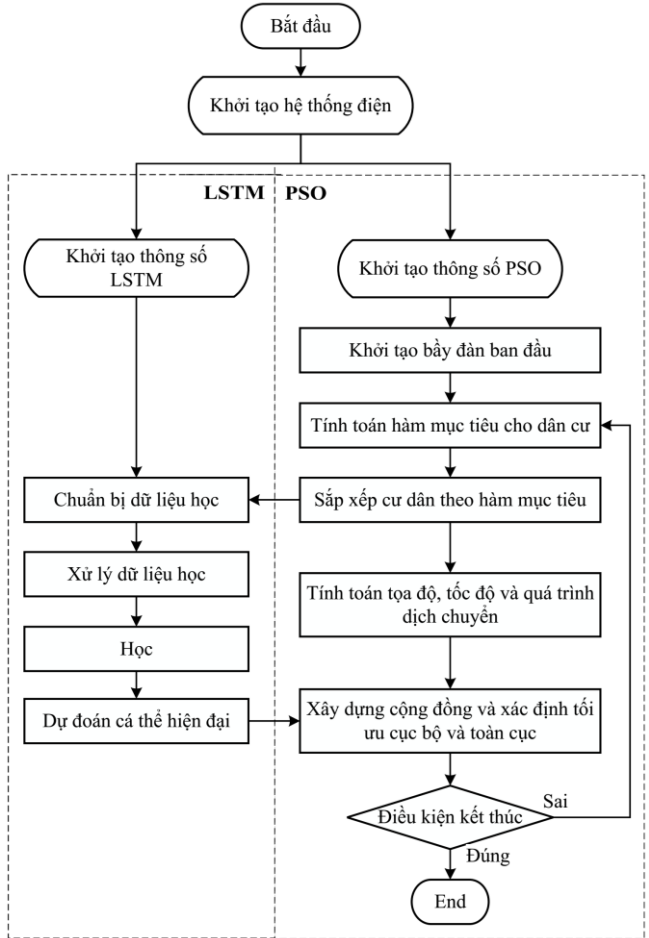
3.4.2.2. Dữ liệu cài đặt cho thuật toán GA, PSO và kiến trúc LSTM: Theo các Bảng 3.1-3.3 chi tiết trong thuyết minh luận án.

3.4.2.3. Công cụ thí nghiệm: Code Matlab, công cụ Matpower.

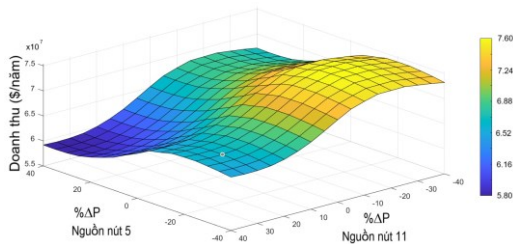
3.4.3. Kết quả

3.4.3.1. Kích bản 1

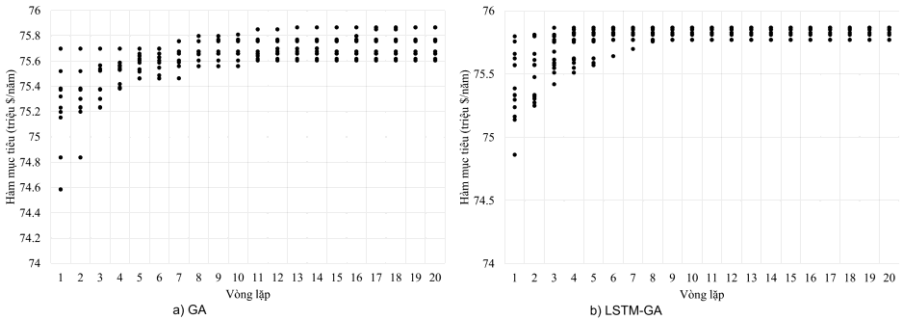
Kết quả như Hình 3.7, đạt đỉnh doanh thu với độ lệch -10% đến -30%; Cực đại 74 triệu



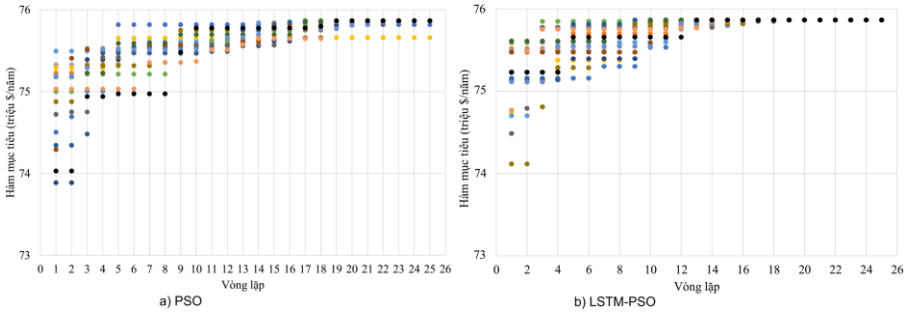
Hình 3.6. Lưu đồ LSTM-PSO



Hình 3.7. Phân bố doanh thu điện gió



Hình 3.8. Quá trình tiến hóa sau 20 vòng lặp GA và LSTM-GA



Hình 3.9. Quá trình hội tụ sau 25 vòng lặp PSO và LSTM-PSO

Bảng 3.4 So sánh chỉ tiêu các kịch bản

Kịch bản	1	2	3	4	5	6
Độ lệch % ΔP	Bus 5	-25% (-15%)÷(-28%)	(-15%)÷(-18%)	(-15.6%)÷(-16.5%)	(-15.7%)÷(-16.5%)	-30%
	Bus 11	-20% (-16%)÷(-28%)	(-16%)÷(-17%)	(-15.6%)÷(-26%)	(-15.6%)÷(-16.5%)	-30%
Công suất điện gió chào thầu cao nhất (MW)	104	97÷114	111÷114	100÷114	113÷114	95
Công suất ESS (MW)	10	18	19	16	16	10
Doanh thu (triệu \$/năm)	74	73.32÷75.90	75.75÷75.94	74.86÷75.94	75.84÷75.94	71

$\$/\text{năm}$ tại $\% \Delta P5 = -25\%$ và $\% \Delta P11 = -20\%$, $PE5 = PE11 = 5\text{MW}$.

3.4.3.2. Kịch bản 2 và 3: 15 lần chạy liên tục GA và LSTM-GA cho kết quả các quỹ đạo hội tụ thể hiện trên Hình 3.8.(a): GA truyền thống đạt cực trị sau 10-15 vòng lặp nhưng đôi khi bị kẹt tại cực trị địa phương, gây phân tán nghiệm. Hình (b): LSTM-GA cải thiện đáng kể khả năng hội tụ toàn cục và độ chính xác.

3.4.3.3. *Kịch bản 4 và 5*: Tương tự 15 lần liên tục chạy PSO và LSTM-PSO, kết quả Hình 3.9. Về cơ bản tương tự GA nhưng tốt hơn.

3.4.4. Thảo luận

3.4.4.1. Đánh giá hiệu quả đầu tư điện gió

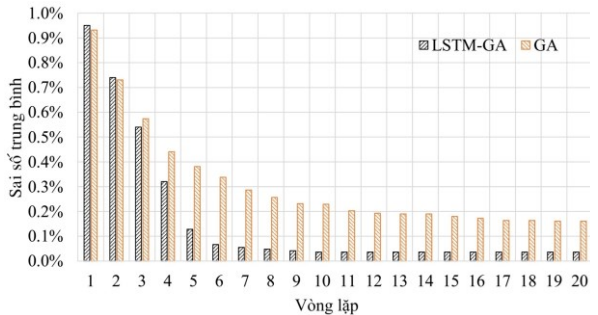
Kết quả thử nghiệm sáu kịch bản trong Bảng 3.4 cho thấy phương pháp lai khẳng định mô hình MHDG-T-N có hiệu quả đầu tư điện gió cao hơn nữa. Doanh thu cao hơn, công suất đầu thầu khuyến khích cao hơn, giúp khai thác ĐG nhiều hơn.

3.4.4.2. Đánh giá các thuật toán lai

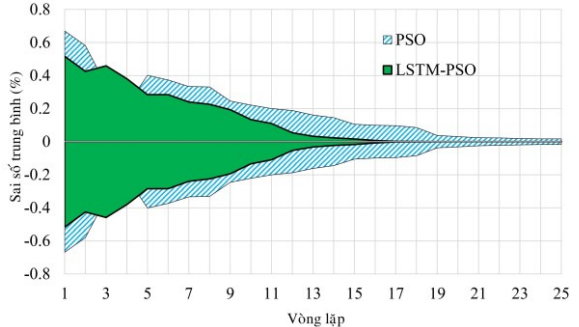
Hình 3.10 và 3.11 minh họa quá trình 3 giai đoạn hội tụ. GD 1, hiệu suất các thuật toán gần như tương đương do LSTM chưa tác động đáng kể. GD 2, bắt đầu tăng tốc với các thuật toán lai, và GD 3 ổn định để về đích nhanh hơn.

Phân tích: Khởi đầu 5-10 vòng lặp đầu, dữ liệu huấn luyện LSTM còn ít nên thuật toán lai chưa tối ưu chưa phát huy; Tăng tốc 5-10 vòng lặp tiếp theo, huấn luyện LSTM dần ổn định, giúp thuật toán lai hội tụ nhanh hơn, rút ngắn 10-15 vòng để đạt cực trị, tối ưu hóa hiệu suất đáng kể; Hội tụ ở các vòng lặp cuối, thuật toán lai hội tụ chặt chẽ hơn, ít phân tán, nhờ LSTM giúp điều chỉnh vượt bẫy cực trị địa phương.

3.5. Kết luận: Đề xuất thuật toán lai LSTM-GA và LSTM-PSO, tích hợp AI với MH, cải thiện số vòng lặp và ổn định. Hiệu quả mô hình MHDG-T-N doanh thu nâng cao.



Hình 3.10. So sánh quá trình hội tụ GA và LSTM-GA



Hình 3.11. So sánh quá trình hội tụ PSO và LSTM-

CHƯƠNG 4: Ứng dụng ESS kết hợp tối ưu MBA truyền tải để tăng hiệu quả mở rộng trang trại điện gió

4.1. Đặt vấn đề

4.1.1. Tổng quan

Tối ưu hóa hiệu quả đầu tư điện gió bằng cách mở rộng các trang trại hiện có thay vì xây dựng mới được đề xuất trong chương này, tăng hoạt động máy biến áp truyền tải sẵn có để giảm chi phí và rủi ro. Hai phương án được so sánh: đầu tư trang trại mới với chi phí cao và rào cản pháp lý, hoặc mở rộng cơ sở hiện có để tối ưu công suất phát. Các giải pháp khai thác tối ưu máy biến áp trong mô hình tích hợp ĐG và ESS được đề xuất đã tăng hiệu suất và khai thác điện gió.

4.1.2. Bài toán

Bài toán nghiên sử dụng ESS kết hợp vai trò của máy biến áp trong truyền tải điện gió, tối ưu hiệu suất vận hành thay vì mở rộng hạ tầng. Một mô hình kết hợp ĐG – ESS - MBA được đề xuất, trong đó giải pháp điều chỉnh linh động theo biểu đồ công suất kết hợp lưu trữ năng lượng giúp tăng hiệu quả kinh tế.

4.2. Lý thuyết toán học

4.2.1. Hàm mục tiêu

Chỉ tiêu NPV và ROI được đánh giá,

$$Cực đại \left\{ NPV = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} - I_o \right\} \quad (4-1)$$

$$Hoặc \left\{ ROI = \frac{NPV}{I_o} \right\} \quad (4-2)$$

$$I_o = C_{tw} + C_{tr} + C_{ESS} \quad (4-3)$$

$$CF_i = B_i - C_i + B_i^C \quad (4-4)$$

$$C_i = C_{tur,i}^{O\&M} + C_{tr,i}^{O\&M} + C_{ESS,i}^{O\&M} \quad (4-5)$$

$$B_i^C = \sum_{t=1}^T (P_t^{wav} \cdot C_{price}) \quad (4-6)$$

4.2.2. Mô hình máy biến áp truyền tải

Mô phỏng bằng chi phí với các ràng buộc vận hành theo tiêu chuẩn IEC:

$$C_{tr} = RI_{tr} \cdot P_{tr}^r \quad (4-7)$$

4.2.2.1. Giới hạn về công suất truyền tải tối đa

$$I_t^2 \cdot T_{size} \geq P_t^{wav} \quad (4-8)$$

4.2.2.2. Giới hạn nhiệt độ máy biến áp tối đa

Giới hạn nhiệt độ theo tiêu chuẩn có cuộn dây và dầu cách điện,

$$\theta_t^{hst} \leq \theta_t^{hst,max} \quad (4-10)$$

$$\theta_t^{top} \leq \theta_t^{top,max} \quad (4-11)$$

4.2.2.3. Giới hạn tuổi thọ máy biến thế

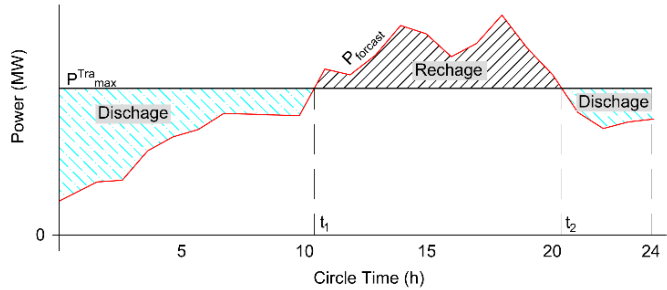
LOL tính theo tốc độ già máy biến áp,

$$LOL = \sum_t^T V_t \quad (4-17)$$

$$LOL \leq \frac{LT_{MBA}}{LT_{Wind}} \cdot 8760 \quad (4-19)$$

4.2.3. Mô hình nguồn trữ năng: Mô phỏng bằng lợi ích, gồm vốn đầu tư một lần, doanh thu bán điện và chi phí trữ năng theo chu kỳ, và chi phí vận hành. Các

biểu thức tính toán từ (4-20) đến (4-22). Ưu thế ở đây là doanh thu và chi phí lưu trữ tận dụng công suất điện gió bất định. Các năng lượng lưu trữ khi



Hình 4.2 Biểu đồ năng lượng sạc và xả dự kiến

sạc và xả có hai loại:

4.2.3.1. Năng lượng trực tiếp

Hình 4.2 ví dụ đồ thị năng lượng sạc và xả trong một ngày. Hai thành phần năng lượng sạc xả trực tiếp tính như sau:

$$E_R^D = \int_{t_1}^{t_2} (P_{forecast}(t) - P_{max}^{Tra}) dt \quad (4-22)$$

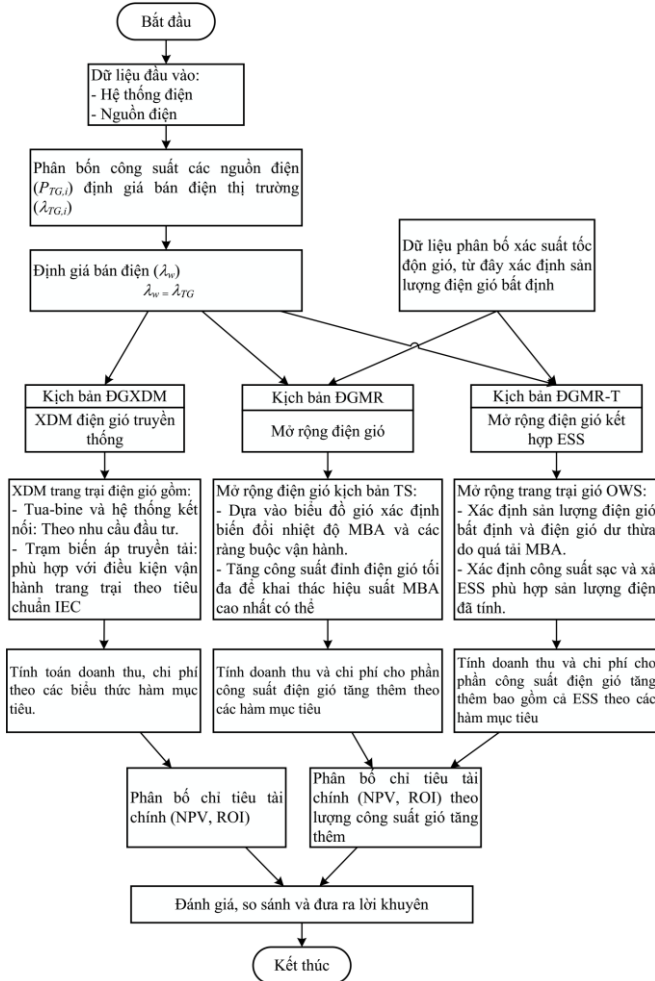
$$E_D^D = \int_0^{t_1} (P_{max}^{Tra} - P_{forecast}(t)) dt + \int_{t_2}^{24} (P_{max}^{Tra} - P_{forecast}(t)) dt \quad (4-23)$$

4.2.3.2. Năng lượng bất định

Phụ thuộc hai giá trị ngẫu nhiên: vận tốc gió bất định và xác suất công suất phát ĐG vượt quá các giá trị chào thầu, tính như sau,

$$E_R^U = \int_{t_0}^{t_2} \left(\int_{P_{Tra}^{max}}^{P^{wr}} (p_t^w - P_{Tra}^{max}) \cdot f_w(p_t^w) \cdot dp_t^w \right) dt + \int_{t_0}^{t_1} \left(\int_{P_{forecast}}^{P^{wr}} (p_t^w - P_{forecast}) \cdot f_w(p_t^w) \cdot dp_t^w \right) dt \quad (4-24)$$

$$E_D^U = \int_{t_0}^{t_1} \left(\int_{P_{forecast}}^{P^{wr}} (p_t^w - P_{forecast}) \cdot f_w(p_t^w) \cdot dp_t^w \right) dt \quad (4-25)$$



Hình 4.3: Lưu đồ chu trình

4.2.4. Mô hình xác suất điện gió và thị trường điện

Xem chương 2.

4.3. Các kịch bản

Ba kịch bản đánh giá: (1) ĐGXĐN: xây dựng ĐG mới; (2) ĐGMR: Tăng ĐG hiện có; (3) ĐGMR-T: tiếp tục tăng ĐG kết hợp ESS; và (4) một kịch bản đã công bố [98].

4.4. Lưu đồ chu trình khảo sát và đánh giá: Hình 4.3.

4.5. Thí nghiệm

4.5.1. Dữ liệu đầu vào

Các dữ liệu hệ thống điện IEEE 30-bus, thị trường điện, nguồn điện gió và hệ thống ESS tham khảo trong chương 2.

Riêng dữ liệu máy biến thế theo tiêu chuẩn IEC, trích dẫn dữ liệu trong thuyết minh luận án.

4.5.2 Kết quả thực nghiệm

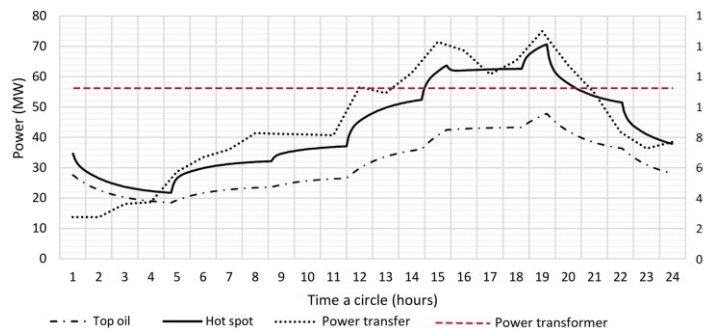
4.5.2.1. Kịch bản 1

Công suất tối ưu của máy biến áp được tính toán là 57 MVA và chọn chuẩn 63 MVA, dựa trên công suất đỉnh 75MW tại bus 5. Thiết kế tuân theo tiêu chuẩn IEC [101], với

kết quả biến thiên nhiệt và dòng tiền đầu tư được trình bày trong Hình 4.6 và Bảng 4.2. Kết quả cho thấy NPV dương, xác nhận hiệu quả đầu tư theo

Bảng 4.2. Dòng tiền dự án trong kịch bản 1

Năm	0	1	2	...	20
Dòng tiền (k€)	-58,140	4,271	4,271	4,271	4,271
NPV (k€)	2,562				



Hình 4.6. Biến thiên nhiệt độ máy biến thế ngày cao điểm

kịch bản TS với không phạt, nhưng có giá phạt thì NPV có thể biến động.

4.5.2.2. Kịch bản 2

Công suất ĐG bus 5 tăng mà không cần tăng máy biến áp vẫn đạt giới hạn truyền tải, kết quả cho Hình 4.7. Thiết kế ở đây hai giai đoạn: tối ưu toán học xác định công suất đỉnh mới 90 MW (+20%), và sau đó nâng công suất ĐG từ 57 MW lên 74 MW (+30%).

4.5.2.3. Kịch bản 3

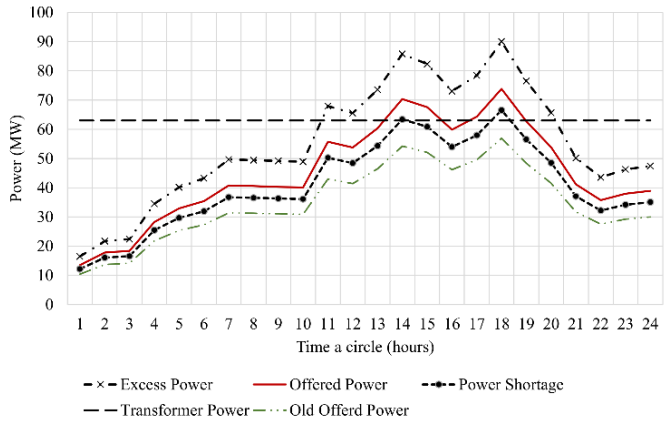
Hình 4.8. cho thấy ESS hoạt động liên tục trong ngày, chia thành hai giai đoạn chính: từ 11h sáng đến 9h tối ưu tiên sạc để tận dụng điện gió dư thừa, ngoài khung giờ này ưu tiên phát điện đáp ứng nhu cầu EMart. Kết quả xác định được ESS 10 MW-140

MWh, xả sâu 20%.

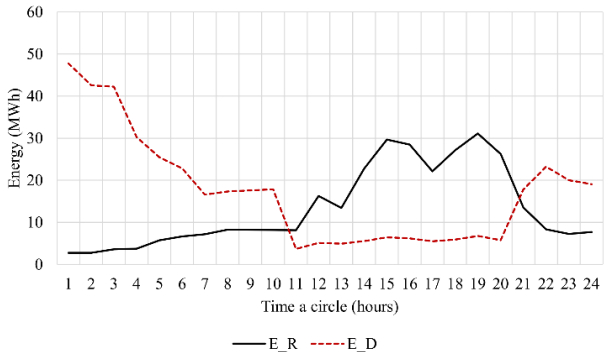
4.6. Nhận xét và đánh giá kết quả thực nghiệm

4.6.1. Xem xét khả năng thu hồi vốn NPV

Hình 4.9 cho thấy cả ba kịch bản đều có NPV > 0, chứng tỏ dự án khả thi. Kịch bản mở rộng điện gió tích hợp ESS mang lại doanh thu cao nhất và ít bị ảnh hưởng bởi biến động giá điện đền bù. Kịch bản mở rộng không



Hình 4.7 Công suất ĐG Bus 5

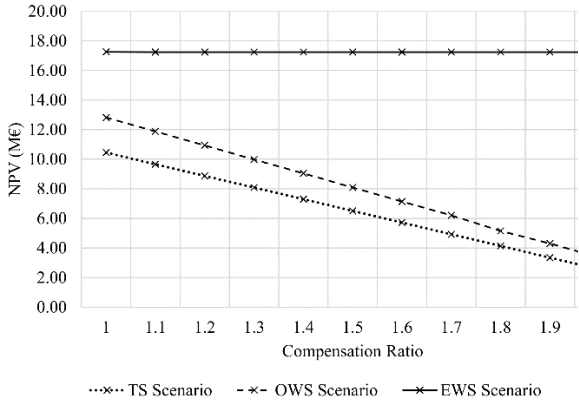


Hình 4.8 Giới hạn sạc và xả ESS

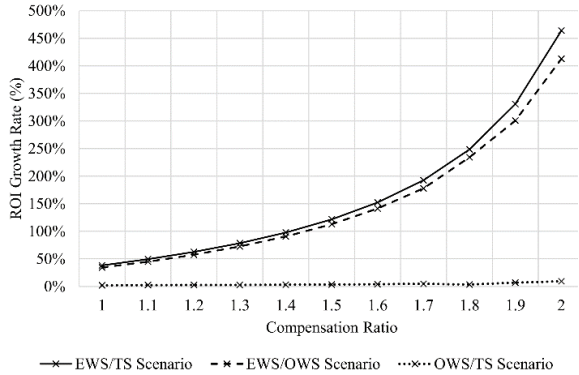
tăng trạm biến áp tăng lợi nhuận đáng kể. Khi có ESS, NPV tăng mạnh hơn nữa nhờ tận dụng điện dư và giảm phạt bởi thị trường.

4.6.2. Đánh giá suất hiệu quả đầu tư

Mở rộng ĐG kết hợp ESS tăng lợi ích hơn so với xây dự án tương đương, cả NPV và ROI cao hơn các kịch bản khác, Hình 4.9, 4.11 và Bảng 4.3. Tuy vậy, việc triển khai cần xem xét yếu tố bất định thực tế và các ràng buộc kỹ thuật để tránh phát sinh chi phí mở rộng hệ thống truyền tải.



Hình 4.9 Chỉ tiêu NPV các kịch bản



Hình 4.11 Hiệu quả trên giá vốn đầu tư ROI

Bảng 4.3. Đối chiếu chỉ tiêu các kịch bản

Kịch bản	1	2	3	4
Wind Power (MW)	75	90	90	75
Xét đến sự bất định	Yes	Yes	Yes	No
NPV (M€)	2.56	3.36	17.28	11.2
NPV/WP (k€/MW)	34.1	37.3	192	149.3
ROI (%)	4.4	4.8	24.8	19.2

CHƯƠNG 5: Kết Luận

5.1. Nội dung đạt được

5.1.1. Nghiên cứu tổng quan phát triển trang trại điện gió

Chương 1 tổng quan về nhu cầu phát triển năng lượng bền vững, thách thức điện gió do biến động và thị trường hóa gây tài chính rủi ro cần tối ưu vận hành và thúc đẩy phát triển. Từ tổng quan xây dựng 01 mục tiêu: nâng lợi nhuận điện gió trong thời kỳ phát triển mới (bất định và cạnh tranh trên thị trường điện); phát huy 02 nội dung cơ bản: xây dựng mô hình và phương pháp; triển khai thực hiện 03 trọng tâm: xây dựng mô hình bất định ĐG trong TTĐ, phát triển phương pháp lai để tối ưu mô hình ĐG, và tăng sử dụng ESS để tăng hiệu suất mở rộng ĐG.

5.1.2. Nghiên cứu xây dựng mô hình

Chương 2 nghiên cứu xây dựng mô hình xác suất bất định điện gió trên thị trường điện, đề xuất mô hình tích hợp điện gió với nhiệt điện và trữ năng nhằm tối ưu doanh thu cho chủ điện gió, đặc biệt trong bối cảnh cạnh tranh đấu thầu và tỷ lệ phạt cao. Kết quả cho thấy mô hình này tận dụng công suất dự phòng nhiệt điện, giảm thiểu rủi ro phạt, tăng sản lượng điện gió, thúc đẩy phát triển bền vững năng lượng tái tạo và mang lại lợi ích kinh tế - xã hội. Nghiên cứu đóng góp một bài báo Q1 và đề xuất mô hình phù hợp cho các Genco tại Việt Nam.

5.1.3. Nghiên cứu phương pháp lai tối ưu

Chương 3 nghiên cứu đề xuất các thuật toán lai LSTM-GA và LSTM-PSO, tích hợp trí tuệ nhân tạo với meta-heuristic, đạt hiệu quả cao hơn trong tối ưu hóa doanh thu điện gió, với tốc vòng lặp độ hội tụ nhanh hơn 40-60%, sai số giảm đáng kể, và tăng cường độ ổn định, cho phép nâng công suất chào thầu điện gió và lợi nhuận tài chính so với phương pháp truyền thống. Kết quả thực nghiệm trên mô hình tích hợp trong chương 2 khẳng định tính ưu việt của các thuật toán này, đồng thời đóng góp 02 công bố Q1, mở ra tiềm năng ứng dụng cho các bài toán phức tạp trong thị trường điện cạnh tranh.

5.1.4. Nghiên cứu tăng sử dụng ESS

Chương 4 nghiên cứu đề xuất mô hình đầu tư mở rộng trang trại điện gió tích hợp hệ thống lưu trữ năng kết hợp tối ưu vận hành máy biến áp, mang lại lợi nhuận

vượt trội so với dự án mới, nâng tỷ suất lợi nhuận đáng kể, đồng thời giảm chi phí hạ tầng, tác động môi trường và rủi ro từ biến động chính sách giá điện. Mô hình đảm bảo hiệu quả tài chính bền vững trong thị trường điện cạnh tranh, đóng góp 01 bài báo Q2, một đơn đăng ký sáng chế, và mở ra cơ hội phát triển nhanh cho ngành điện gió, đặc biệt phù hợp cho các genco ở Việt Nam.

5.1.5. Đối chiếu với mục tiêu nghiên cứu đặt ra

Ba trọng tâm để đạt được mục tiêu - tăng lợi nhuận điện gió trong điều kiện mới - đã hoàn thành trong nghiên cứu: xây dựng mô hình xác suất bất định điện gió và đề xuất mô hình nâng cao doanh thu trên thị trường điện; phát triển các thuật toán lai LSTM-GA và LSTM-PSO để giải quyết bài toán doanh thu; và tích hợp hệ thống lưu trữ năng lượng với vận hành tối ưu MBA để tăng hiệu quả đầu tư cho trang trại điện gió trong điều kiện thị trường cạnh tranh.

5.2. Tính mới và các đóng góp của nghiên cứu

Nghiên cứu này mang lại những đóng góp học thuật nổi bật, bao gồm:

(1) Phát triển các mô hình tối ưu hóa nhằm nâng cao hiệu quả đầu tư cho điện gió trong bối cảnh thị trường điện cạnh tranh, nơi các biến động bất định làm giảm lợi thế so với nguồn điện truyền thống ổn định hơn;

(2) Đề xuất một phương pháp tối ưu hóa tiên tiến, tích hợp trí tuệ nhân tạo vào cấu trúc thuật toán meta-heuristic truyền thống, giải quyết hiệu quả bài toán phức hợp liên quan đến xác suất biến động tốc độ gió và phản ứng thị trường;

(3) Giới thiệu mô hình ứng dụng hệ thống lưu trữ năng lượng để tăng cường lợi ích kinh tế cho các dự án điện gió mở rộng mà không phụ thuộc vào nâng cấp hệ thống truyền tải.

Ngoài ra, nghiên cứu đóng góp vào cộng đồng khoa học thông qua 03 bài báo Q1 (01 bài cho Chương 2, 02 bài cho Chương 3), 01 bài Q2 (Chương 4), 01 bài Q4, cùng các bài hội nghị và bài báo trong nước, thúc đẩy sự phát triển của nghiên cứu khoa học trong và ngoài nước.

5.3. Những khuyến nghị

Các hạn chế và khuyến nghị của được kết luận trong luận án.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Các bài báo đăng trên tạp chí ISI – Scopus

- N. S. Dinh, L. S. B. Dinh, V. A. Truong, “A novel hybrid algorithm: long short-term memory-genetic algorithm for optimizing uncertain revenue of wind farms in electricity markets,” *Neural Computing and Applications*, tập 37, trang 24345–24364, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-025-11582-y>
- V. A. Truong, N. S. Dinh, T. L. Duong, N. T. Le, C. D. Truong và L. T. Nguyen, “Hybrid LSTM-PSO optimization techniques for enhancing wind power bidding efficiency in electricity markets,” *Ain Shams Engineering Journal*, tập 16, số 2, p. 103285, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103285>
- V. A. Truong, N. S. Dinh và T. L. Duong, “Profit Maximization of Wind Power Plants in the Electricity Market Based on Linking Models Between Energy Sources,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, tập 49, số 8, p. 6275–6291, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08181-1>
- V. A. Truong, T. L. Nguyen và N. S. Dinh, “Controlling Output Power to Enhance the Investment Efficiency of Wind Farms by Maximizing the Capacity of Transmission Transformers and Integrating Energy Storage Systems,” *Engineering, Technology & Applied Science Research*, tập 14, số 4, p. 15751–15756, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.7688>
- N. S. Dinh và T. L. N. Viet Anh Truong, “Optimal Probability Distribution Models for Wind Speed Prediction: Strategies to Advance Wind Energy Development in Vietnam,” *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, tập 12, số 1, pp. 17-24, 2025. DOI: <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V12I1P103>

2. Các bài báo hội thảo khoa học quốc tế đăng tạp chí quốc tế có phản biện

- N. S. Dinh, T. L. Nguyen và V. A. Truong, “Enhancing Wind Power Profitability Through Integrated Clusters in the Electricity Market,” trong *2023 Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM)*, Hanoi, Vietnam, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/EEE-AM58328.2023.10395263>
- T. L. Nguyen, N. S. Dinh, V. A. Truong, T. L. Duong, H. D. Dao và A. T. Do, “Enhancing Total Transfer Capability via Optimal Location of Energy Storage

Systems Using a Hybrid Improved Min-Cut Algorithm and Genetic Algorithm,” trong *The International Conference on Engineering Research and Applications, ICERA 2022*. Lecture Notes in Networks and Systems, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22200-9_57

3. Các bài báo đăng kỷ yếu hội nghị quốc tế có phân biện

- X. L. Bui, N. S. Dinh và V. A. Truong, “Initiative for Integrating Wind and Thermal Power to Maximize Social Profit,” trong *Proceedings of 2024 7th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, Hochiminh, Vietnam, 2024.

4. Các bài báo đăng trên tạp chí khoa học trong nước thuộc danh mục hội đồng chức danh Nhà nước

- Đ. N. Sang, N. T. Linh và T. V. Anh, “Nâng cao hiệu quả thiết kế đầu tư mở rộng điện gió trong điều kiện cạnh tranh thị trường điện có xét đến tính bất định,” *TNU Journal of Science and Technology*, tập 229, số 14, pp. 280 - 288, 2024. DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11135>

- N. S. Dinh, V. A. Truong và T. L. Nguyen, “A robust hybrid algorithm AI and GA for optimizing wind power in electricity market,” *Journal of Military Science and Technology*, tập 99, pp. 24-34, 2024. DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.99.2024.24-34>

- Đ. N. Sang, T. V. Anh và N. T. Linh, “Tăng cường hiệu quả đầu tư điện gió trong thị trường điện thông qua kết hợp sự bất định của điện gió với vận hành nhà máy nhiệt điện,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, tập 22, số 2, pp. 81-87, 2024. <https://jst-ud.vn/jst-ud/article/view/8912>

- T. V. Anh, N. T. Linh và Đ. N. Sang, “Nghiên cứu ứng dụng phương pháp lai trong bài toán lựa chọn hợp lý vị trí và dung lượng hệ thống lưu trữ năng lượng trong hệ thống điện,” *Journal of Science & Technology, Trường ĐH Công nghiệp Hà Nội*, tập 59, số 3, pp. 3-10, 2023. DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.100>