

ENHANCING INVESTMENT EFFICIENCY IN WIND FARM EXPANSION UNDER MARKET COMPETITION WITH CONSIDERATION OF UNCERTAINTY**Dinh Ngọc Sang^{1,2}, Nguyen Tung Linh³, Truong Viet Anh^{1*}**¹Hochiminh City University of Technology and Education²University of Architecture Hochiminh City³Electric Power University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 18/9/2024	This paper examines the enhancement of investment efficiency in the expansion of existing wind power plants (WPP). The proposed approach addresses the challenges associated with diminishing incentive policies for renewable energy, while also aiming to mitigate the impact of wind speed variability and increase competitiveness as wind power penetrates the electricity market. To tackle these issues, the study optimizes key financial investment indicators and conducts a comparative analysis between wind farm expansion scenarios and conventional design approaches. In this optimization framework, a comprehensive design model is developed to enhance the efficiency of the transmission transformer system (TTS), accounting for the uncertainties in wind power generation. Furthermore, the integration of energy storage systems (ESS) is optimized to store surplus electricity with low utilization value, thereby maximizing the potential value of wind power output sold in the electricity market. Experimental results demonstrate the potential for a significant increase in the net present value, with the proposed scenario offering a 5.64-fold improvement, from 2.56 to 17.28 million euros. Additionally, the return on investment (ROI) is shown to increase 5.51 times, from 4.4% to 24.8%.
Revised: 26/11/2024	
Published: 26/11/2024	

KEYWORDS

Wind power
Electricity market
Energy storage systems
Generation expansion plan
Uncertainty

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**Dinh Ngọc Sang^{1,2}, Nguyễn Tùng Linh³, Trương Việt Anh^{1*}**¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh²Trường Đại học Kiến trúc Thành phố Hồ Chí Minh³Trường Đại học Điện lực

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 18/9/2024	Bài báo này nghiên cứu nâng cao hiệu quả đầu tư mở rộng các trang trại điện gió (WPP) hiện hữu. Đề xuất này nhằm cải thiện các thách thức cố hữu trong thời đại ngày càng giảm chính sách ưu đãi cho loại hình năng lượng này. Hơn nữa còn chủ động giảm thiểu ảnh hưởng của tính bất định tốc độ gió kèm với tăng sức cạnh tranh khi nguồn điện gió tham gia vào thị trường điện. Để giải quyết các vấn đề đó, nghiên cứu tối ưu các chỉ tiêu đầu tư tài chính và đánh giá so sánh giữa các kịch bản mở rộng trang trại điện gió với kịch bản thiết kế truyền thống. Trong bài toán tối ưu đó, mô hình thiết kế chuyên sâu để nâng hiệu suất vận hành máy biến áp truyền tải (TTS) xét đến xác suất bất định công suất phát điện gió. Hơn thế nữa, công suất nguồn trữ năng (ESS) được xác định và xây dựng tích hợp để trữ điện dư có giá trị sử dụng thấp và nâng giá trị khai thác tối ưu sản lượng điện gió bán trên thị trường điện. Kết quả thử nghiệm đề xuất đã chỉ ra tiềm năng của hoàn vốn đầu tư tăng lên tới 5,64 lần cho kịch bản đề xuất, từ 2,56 lên 17,28 triệu Euro; và lợi tức đầu tư (ROI) cũng tăng 5,51 lần, từ 4,4% lên 24,8%.
Ngày hoàn thiện: 26/11/2024	
Ngày đăng: 26/11/2024	

TỪ KHÓA

Nguồn điện gió
Thị trường điện
Nguồn trữ năng
Quy hoạch mở rộng nguồn
Bất định

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11135>

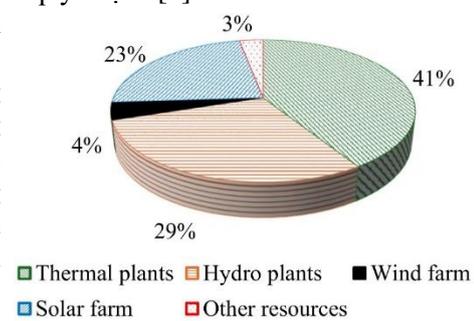
* Corresponding author. Email: anhtv@hcmute.edu.vn

1. Giới thiệu

1.1. Tổng quan

Cam kết cắt giảm đến zero khí thải nhà kính vào năm 2050 của Chính phủ Việt Nam tại hội nghị Công ước khung của Liên hợp quốc về biến đổi khí hậu lần 26 (COP26), cũng như mục tiêu giảm 45% lượng khí thải của các bên tham gia COP27 là chính sách hành động mạnh mẽ theo xu hướng phát triển bền vững tất yếu trên toàn thế giới [1]. Trong đó, năng lượng gió nổi lên như một lĩnh vực chủ đạo, đang có sự tăng trưởng đáng kể và thu hút đầu tư đáng kể điện gió ở nhiều nước đã và đang phát triển [2]. Chính sách giá FIT ưu đãi cho loại nguồn điện này trong suốt hơn 20 năm kể từ những năm đầu thế kỷ 21 là một ví dụ điển hình tại Việt Nam [3]. Cụ thể hơn, những năm cuối thập niên 2010s và đầu thập niên 2020s đã chứng kiến các dự án điện gió đầu tiên vào lưới điện quốc gia của Việt Nam. Trên 3.000 MW điện gió trên bờ đã được đóng điện vận hành tính đến năm 2022, chiếm khoảng 4% trong cơ cấu nguồn điện cả nước như Hình 1 [4], và dự kiến tăng lên đến 27.880 MW (chiếm khoảng 18,5% nguồn điện) vào năm 2030 theo quy hoạch [5].

Các nghiên cứu giảm thiểu ảnh hưởng bất định điện gió được đặt ra. Các mô hình tích hợp tối ưu kết hợp lợi ích của nhiều bên liên quan từ các lĩnh vực năng lượng khác nhau, nhằm mục đích tăng cường lợi ích thương mại của các nguồn năng lượng gió trong khuôn khổ thị trường điện trong tài liệu [6]. Bên cạnh đó, một hướng nghiên cứu nổi bật gần đây đã xuất hiện để nâng cao hiệu quả của các trang trại gió bằng cách đánh giá công suất máy biến áp, như kết hợp máy biến áp với biến tần để tối ưu hóa chuyển đổi năng lượng gió [7], [8]; mô hình vận hành của máy biến áp phân tán [9]. Chuyên sâu hơn trong nghiên cứu cải tiến máy biến áp truyền tải [10]; khảo sát động lực nhiệt của máy biến áp chi tiết trong tài liệu tham khảo [11].



Hình 1. Cơ cấu nguồn điện Việt Nam năm 2022 [4]

1.2. Định hướng nghiên cứu

Vấn đề thách thức lớn đối với phát triển điện gió là ngày càng giảm chính sách ưu đãi của chính phủ trong khi phải kiểm soát tính bất định cùng với tham gia vào thị trường điện cạnh tranh, điều này ảnh hưởng lớn đến chi phí và lợi nhuận của nhà đầu tư điện gió [12]. Vì vậy các nghiên cứu nâng hiệu quả đầu tư điện gió trong thị trường điện có xét đến xác suất bất định tốc độ gió. Nghiên cứu tích hợp rộng rãi năng lượng gió vào các hệ thống điện gây ra những trở ngại to lớn cho các nhà điều hành hệ thống và nhà sản xuất điện gió [13]. Nghiên cứu chênh lệch tốc độ gió dự báo sản lượng điện gió theo thời gian thực cho thị trường điện [14]. Nghiên cứu dự báo tốc độ gió chính xác hơn [15] và kết hợp ESS để tăng cường độ tin cậy của việc phát điện gió [16]; cũng như việc tái sử dụng sản lượng điện gió dư thừa và vận hành phối hợp thông minh trên thị trường điện [17], [18]; và hơn thế nữa là nghiên cứu phân bố công suất tối ưu trên hệ thống điện có đóng góp của nguồn điện gió như [19].

Một hướng nghiên cứu gần đây tập trung vào vai trò của máy biến áp trong các trang trại gió, do ảnh hưởng đến không chỉ chi phí mà còn cơ hội đầu tư, đặc biệt khi quá trình xây dựng hệ thống đầu nối điện gió gặp nhiều trở ngại ở các vùng sâu xa. Việc giải phóng mặt bằng và lắp đặt đường dây, trạm biến áp truyền tải thường phức tạp, nên tối ưu hóa máy biến áp trong thiết kế trang trại gió trở thành xu hướng nổi bật. Các tài liệu nghiên cứu [10], [20] khai thác máy biến áp động để nâng cao hiệu quả truyền tải điện gió nói chung và trang trại gió ngoài khơi nêu tại [21]. Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây chưa xem xét đầy đủ tác động của sự bất định trong tốc độ gió khi tích hợp vào thị trường điện, dẫn đến tình trạng vận hành máy biến áp quá tải hoặc non tải do biến động khó lường. Hơn nữa, sự không ổn định của điện gió cũng gây khó khăn trong thị trường cạnh tranh,

với nguy cơ bị phạt nếu thiếu hụt công suất hoặc bán với giá rẻ khi dư thừa. Giải pháp tích hợp hệ thống ESS với trang trại gió và máy biến áp giúp giảm thiểu thiệt hại, cân bằng lưu trữ điện dư thừa và bán khi giá cao hoặc khi thiếu hụt công suất.

1.3. Đóng góp

Đối với các trang trại điện gió trước đây thường thiết kế dựa trên dự đoán tốc độ gió như đã nêu trên, máy biến áp truyền tải đầu nối được chọn lựa theo các tiêu chuẩn có thể non tải trong phần lớn thời gian do sự bất định của vận tốc gió. Nghiên cứu này nhằm mở rộng trang trại điện gió mà không phải đầu tư thêm hệ thống truyền tải đầu nối, một bộ phận cản trở lớn đến quyết định đầu tư trang trại điện gió mới như đã nêu trên. Đạt được của nghiên cứu sẽ mang đến hiệu quả đầu tư mở rộng thuận lợi hàng loạt các trang trại điện gió đang vận hành, khai thác nâng khả năng vận hành các trạm biến áp truyền tải hiện hữu. Các đóng góp chính của bài báo gồm:

- Đề xuất hướng tiếp cận mới nâng hiệu quả đầu tư của các trang trại gió khi mở rộng chúng mà vẫn duy trì công suất trạm biến áp và đường dây truyền tải đầu nối điện gió.
- Kết hợp xác suất biến động tốc độ gió trong bài toán chọn lựa máy biến áp truyền tải để nâng tính khả thi và tối ưu vận hành máy biến áp.
- Tích hợp nguồn trữ năng trong mô hình thống nhất Điện gió – ESS – MBA. Theo đó, nâng hiệu quả đầu tư dựa vào tối ưu hóa sản lượng điện bán ra thị trường điện của mô hình.

2. Phương pháp luận

Để đánh giá bài toán nâng hiệu quả đầu tư mở rộng trang trại điện gió, ba kịch bản tương quan được xem xét như sau: kịch bản TS, đầu tư vào nhà máy điện gió thông thường; kịch bản OWS, mở rộng nhà máy điện gió; và kịch bản EWS mở rộng điện gió kết hợp ESS.

2.1. Hàm mục tiêu

Chỉ số hiệu quả đầu tư được xem xét gồm NPV theo biểu thức sau:

$$\max NPV = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+IRR)^i} - C_{II} \quad (1)$$

Hiệu quả đầu tư được đánh giá bởi NPV. Trong nghiên cứu này, vòng đời dự án là 20 năm được trích dẫn [11]. Lãi suất được biểu thị bằng IRR và được thể hiện dưới dạng phần trăm.

$$C_{II} = C_{tw} + C_{tr} + C_{ESS} \quad (2)$$

$$CF_i = BF_i - Cost_i + Cer_i \quad (3)$$

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

Dòng tiền theo năm i được ký hiệu CF_i ; $Cost_i$ là chi phí; C_{tw} , C_{tr} , và C_{ESS} là vốn đầu tư điện gió, máy biến áp truyền tải, và ESS; $C_{tur,i}^{O\&M}$, $C_{tr,i}^{O\&M}$, và $C_{ESS,i}^{O\&M}$ là các chi phí vận hành và bảo trì thiết bị; P_t^{wav} là công suất vận hành điện gió. Đối với thu nhập chứng nhận khí thải, Cer , được xác định theo năm và tham khảo Thụy Điển là 0,305 [€/MWh] của năm 2019, tham khảo [8].

2.2. Mô hình hóa nguồn điện gió khi tham gia thị trường điện

Dòng thu nhập được xác định theo:

$$BF = \sum_{t=1}^T R_{ws}(P_t^{ws}) + \sum_{t=1}^T R_{wu}(\Delta P_t^w) \quad (5)$$

Thành phần đầu của biểu thức, R_{ws} , biểu diễn doanh thu trực tiếp thu được từ việc bán điện dựa trên các hợp đồng đấu thầu trong thị trường điện, tính theo giá chào và sản lượng sau khi khớp lệnh.

Thành phần thứ hai gọi là doanh thu bất định, R_{wu} , là thu nhập không chắc chắn so với công suất chào thầu, nó bao gồm doanh thu bán điện dư R_{RW} và chi phí đền bù thiếu điện gió so với giá trị chào thầu C_{Pw} , các biểu thức tính toán theo [6],

$$R_{wu} = \begin{cases} \sum_{t=1}^T R_{RW}(\Delta P_t^w), & \text{if } \Delta P_t^w \geq 0 \\ \sum_{t=1}^T C_{Pw}(\Delta P_t^w), & \text{if } \Delta P_t^w < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Chênh lệch đơn giá bán điện dư và phạt thiếu điện thể hiện qua các hệ số tỷ lệ k_R , k_P . Dư điện là khi tốc độ gió tăng vượt so với dự đoán dẫn đến công suất phát điện gió cao hơn công suất

chào thầu. Khi đó, phần công suất dư được chào bán theo thời gian thực với giá thường thấp. Ngược lại, khi tốc độ gió thấp hơn dự đoán, công suất phát điện gió hiện nhiên thấp hơn công suất chào thầu. Chủ đầu tư buộc phải mua điện từ các nguồn chủ động khác để bù vào lượng công suất bị thiếu hụt với giá mua điện giao ngay cao hơn nhiều. Trong trường hợp không thể mua được điện, chủ đầu tư sẽ bị phạt hợp đồng với giá rất cao. Tham số xác suất bất định của tốc độ gió làm cơ sở xác định xác suất dư hoặc thiếu công suất điện gió, nghiên cứu này sử dụng hàm Weibull hai tham số [22], [23].

2.3. Mô hình hóa nguồn trữ năng

Trong nghiên cứu này giả sử sử dụng công nghệ pin lithium-ion để thử nghiệm [24], [25]. Mức hiệu suất tương đối ổn định lớn hơn 80%. Chi phí đầu tư ban đầu khoảng 100-200 €/kWh và chi phí O&M khoảng 1-3% [26], [27]. Doanh thu và chi phí được xác định như sau:

$$C_{ESS} = RI_{ESS} \cdot E_{ESS} \tag{7}$$

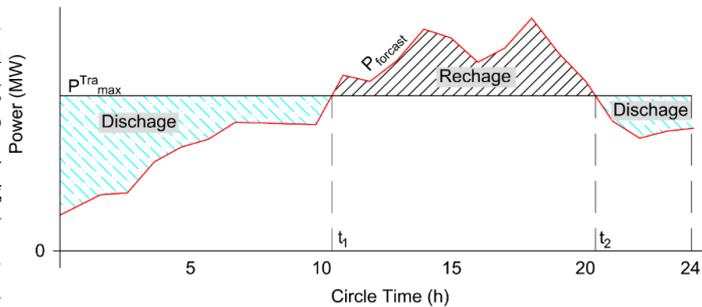
$$Rev_{ESS} = \sum_{t=1}^T (\lambda_{D,t} \cdot E_{D,t}) - \sum_{t=1}^T (\lambda_{R,t} \cdot E_{R,t}) \tag{8}$$

$$Cost_{ESS} = C_{ESS}^{O\&M} \tag{8}$$

$\lambda_{D,t}$ và $\lambda_{R,t}$ là giá bán và giá mua điện, sản lượng bán $E_{D,t}$ và mua $E_{R,t}$. Theo sự phối hợp vận hành ESS và TTS, việc thiết lập năng lượng sạc và xả của ESS cân bằng bởi hai quá trình: (i) Năng lượng trực tiếp: Tính toán mức năng lượng dư và thiếu hụt bằng cách khảo sát giới hạn công suất truyền tải của máy biến áp theo dự đoán công suất phát điện gió. Khi dư điện gió thì sạc, thiếu thì xả. (ii) Năng lượng không chắc chắn: Xác suất bất định điện gió là căn cứ xác định lượng công suất điện gió dư và thiếu so với chào thầu trên thị trường điện.

2.3.1. Tính toán năng lượng trực tiếp

Ví dụ trên Hình 2 cho thấy khi giới hạn công suất truyền tải máy biến áp tăng thì quá trình sạc năng lượng giảm (diện tích Recharge trên sơ đồ giảm), và năng lượng xả bán điện của ESS tăng lên. Trong khi đó, lượng năng lượng truyền tải vượt quá hay dưới giới hạn TTS phụ thuộc vào hai yếu tố, công suất phát điện gió và giới hạn truyền tải máy biến áp.



Hình 2. Quá trình sạc và xả của ESS trong một ngày

Trong trường hợp công suất định mức máy biến áp cố định, giới hạn công suất của nó phụ thuộc vào trạng thái và điều kiện vận hành máy biến áp. Hai thành phần năng lượng điện sạc E_R^D và xả E_D^D của ESS được xác định như sau:

$$E_R^D = \int_{t_1}^{t_2} (P_{forecast}(t) - P_{max}^{Tra}) dt \tag{9}$$

$$E_D^D = \int_0^{t_1} (P_{max}^{Tra} - P_{forecast}(t)) dt + \int_{t_2}^{24} (P_{max}^{Tra} - P_{forecast}(t)) dt \tag{10}$$

2.3.2. Năng lượng không chắc chắn

Phụ thuộc hai giá trị ngẫu nhiên: vận tốc gió bất định, khi thời tiết thay đổi đột ngột dẫn đến công suất gió đầu ra vượt quá giới hạn gây ra quá tải máy biến áp; và xác suất công suất phát điện vượt quá các giá trị chào thầu, dẫn đến thừa năng lượng trên thị trường điện.

$$E_R^U = \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{P_{max}^{Tra}}^{P^{wr}} (p_t^w - P_{max}^{Tra}) \cdot f_w(p_t^w) \cdot dp_t^w \right) dt + \int_{t_0}^{t_1} \left(\int_{P_{forecast}}^{P^{wr}} (p_t^w - P_{forecast}) \cdot f_w(p_t^w) \cdot dp_t^w \right) dt \tag{11}$$

$$E_D^U = \int_{t_0}^{t_1} \left(\int_{P_{forecast}}^{P^{wr}} (p_t^w - P_{forecast}) \cdot f_w(p_t^w) \cdot dp_t^w \right) dt \tag{12}$$

$(t_0 - t_1)$ và $(t_1 - t_2)$ là thời gian công suất gió dưới hoặc vượt giới hạn của máy biến áp.

2.4. Mô hình hóa máy biến áp truyền tải (TTS)

Theo tài liệu [10], chi phí trạm biến áp truyền tải C_{tr} có thể xác định bằng biểu thức:

$$C_{tr} = RI_{tr} \cdot P_{tr}^r \quad (13)$$

Trong đó, RI_{tr} là suất đầu tư và P_{tr}^r là công suất định mức máy biến áp, giá trị này được thiết kế theo tiêu chuẩn IEC [25].

2.4.1. Giới hạn truyền tải đối đa

$$I_t^2 \cdot S_{size} \geq P_t^{wav} \quad (14)$$

S_{size} là công suất biểu kiến TTS. Đây là điều kiện vận hành ổn định theo tiêu chuẩn IEC.

2.4.2. Giới hạn nhiệt độ vận hành

$$\theta_t^{hst} \leq \theta_t^{hst,max} \quad (15)$$

$$\theta_t^{top} \leq \theta_t^{top,max} \quad (16)$$

θ_t^{hst} là nhiệt độ điểm nóng nhất cuộn dây và θ_t^{top} là nhiệt độ bề mặt dầu cách điện. Các giá trị này được xác định theo phương trình phi tuyến theo tiêu chuẩn IEC [25].

2.4.3. Giới hạn tuổi thọ máy biến áp

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

$$LOL \leq \frac{\text{Transformer's Lifetime}}{\text{Wind Farm's Lifetime}} \cdot 8760 \quad (18)$$

Tuổi thọ của máy biến áp LOL , và V là tốc độ già hóa hàng năm của máy biến áp phụ thuộc loại cách điện và được tham khảo theo tài liệu [25].

3. Thử nghiệm và Thảo luận

3.1. Dữ liệu ban đầu

3.1.1. Hệ thống điện chuẩn IEEE 30-Bus

Trong nghiên cứu này thử nghiệm trên hệ thống điện chuẩn IEEE 30-bus [28], có 41 nhánh và 6 nguồn điện, dữ liệu chi tiết tham khảo tại [23], [29]. Trong đó có hai nguồn điện được thay thế bởi trang trại điện gió tại bus 5 và 11. Thông số điện gió tham khảo tài liệu [23].

3.1.2. Nguồn điện gió

Đầu tư tài chính nguồn điện gió tham khảo [10], suất đầu tư 750.000 €/MW tương ứng với tuổi thọ 20 năm, chi phí O&M là 1,5%. Biểu đồ công suất phát điện gió ngày được dự đoán theo hai mùa cao điểm và thấp điểm được tham khảo trong tài liệu [30].

Phân bố xác suất bất định tốc độ gió tham khảo [22], sau khi tính toán năng lượng phát điện như đề cập tài liệu [6], sản lượng điện gió được chia ba thành phần: năng lượng dự đoán và được chào thầu cung cấp (OE hoặc OP), năng lượng xác suất vượt dự đoán (EE hoặc EP) và thấp hơn dự đoán (ES hoặc PS).

3.1.3. ESS

Có nhiều công nghệ lưu trữ đã và đang được sử dụng trong thương mại như các loại pin, siêu tụ điện, thủy điện tích năng, khí nén, ..., trong đó pin vẫn là loại tiện lợi phổ biến trong kết hợp năng lượng tái tạo [24], nên chọn loại pin Lithium-ion để thí nghiệm, chi tiết như sau:

- Tuổi thọ tối thiểu 10 năm.
- Suất đầu tư là 200 €/kWh và chi phí vận hành 3% tham khảo [27].
- Công suất mỗi Block 1MW.
- Hiệu suất lưu trữ 90%.

3.1.4. TTS

- Suất đầu tư 30.000€/MVA và chi phí vận hành 3% tham khảo [10].

- Máy biến thế loại cách điện dầu OF, các tham số theo [25].
- Tỷ số tổn hao: $R = 6$
- Mức chênh lệch nhiệt độ cuộn dây và lớp dầu trên cùng: $\Delta\theta_{or} = 49K$
- Mức gia tăng nhiệt độ từ điểm nóng nhất cuộn dây đến điểm nóng nhất của dầu: $\Delta\theta_{hr} = 29K$
- Hằng số thời gian cuộn dây: $\tau_w = 7$ phút
- Hằng số thời gian dầu: $\tau_o = 90$ phút
- Nhiệt độ môi trường $25,6^\circ C$

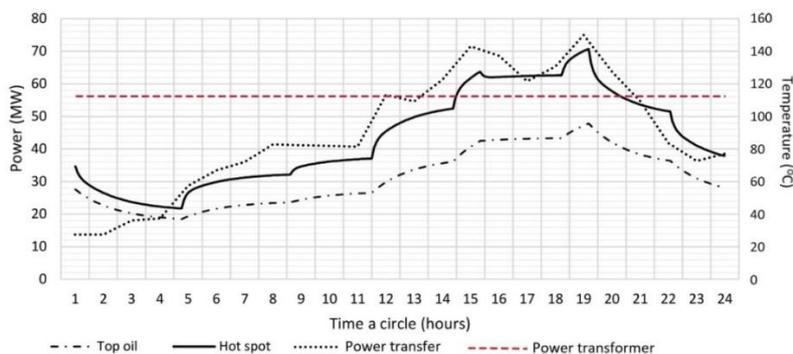
3.2 Kết quả thử nghiệm

3.2.1. Giá bán điện thị trường

Giá sử nguồn nhiệt điện chi phối nên giá bán điện trung bình nguồn nhiệt điện và có kết quả đã tính trong tài liệu [6]. Theo đó, giá chào bán điện trung bình thay đổi trong khoảng 26-31,7€/MW.

3.2.2. Kịch bản TS

Thiết kế chọn công suất máy biến áp truyền tải theo dữ liệu ban đầu nguồn điện gió tại bus 5 có công suất đỉnh 75MW. Quy trình thiết kế theo tiêu chuẩn IEC [25] với các điều kiện ràng buộc vận hành máy biến thế, trong đó biểu đồ biến thiên nhiệt máy biến thế có kết quả như Hình 3. Kết quả công suất vận hành tối ưu của máy biến áp được xác định là 57 MVA và được chọn 63 MVA. Dòng tiền quá trình đầu tư dự án tính được trong trường hợp này như Bảng 1.



Hình 3. Biến thiên nhiệt độ máy biến thế ngày cao điểm

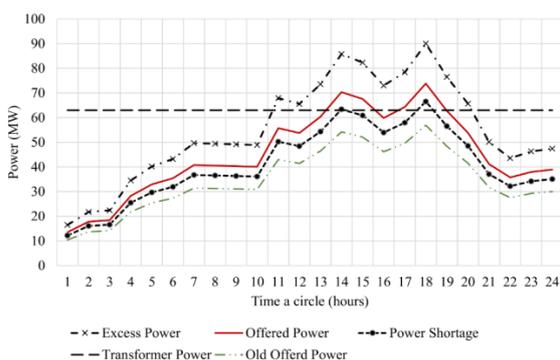
Bảng 1. Dòng tiền dự án trong kịch bản TS

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

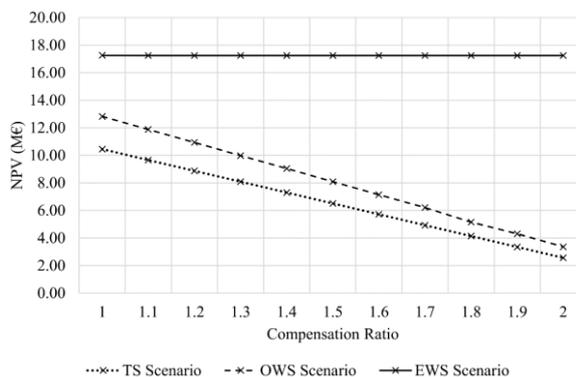
Các kết quả này với giả sử giá điện không đổi qua các năm, và giảm một nửa với giá bán điện vượt đấu thầu, giá phạt thiếu điện sẽ tăng gấp đôi. Kết quả NPV dương cho thấy tính khả thi của dự án như một khoản đầu tư theo thiết kế truyền thống của kịch bản TS. Tuy nhiên khi giá phạt thay đổi thì NPV thay đổi theo.

3.2.3. Kịch bản OWS

Công suất trang trại điện gió tại bus 5 được mở rộng trong khi máy biến áp truyền tải và đường dây truyền tải không thay đổi. Mức tăng lên tối đa đạt đến khả năng giới hạn truyền tải của máy biến thế. Hai bước thiết kế được thực hiện. *Bước 1:* Sử dụng phương pháp tối ưu toán học trình bày tại [25] để xác định công suất đỉnh mới của điện gió dựa vào biến đổi nhiệt độ và điều kiện vận hành máy biến áp theo tiêu chuẩn IEC. Kết quả đạt được thể hiện trong Hình 4 tương ứng với công suất đỉnh điện gió mới là 90 MW, tăng 20% so với kịch bản TS trước đây. Sự gia tăng này dẫn đến tăng công suất đấu thầu cực đại, từ khoảng 57 MW lên 74 MW, tức tăng gần 30%. Tuy nhiên, hai khoảng thời gian trong ngày mà công suất gió vượt quá công suất định mức của máy biến áp cần đánh giá. *Bước 2:* NPV được xác định tương tự kịch bản TS nhưng dựa trên dữ liệu mở rộng trang trại gió.



Hình 4. Biến đổi công suất điện gió ngày cao điểm với kịch bản OWS



Hình 5. So sánh biến đổi NPV các kịch bản

3.2.4. Kịch bản EWS

Tích hợp ESS trong kịch bản OWS để khai thác năng lượng gió dư thừa khi cần thiết. Với công suất gió đỉnh 90MW và máy biến áp 63MVA, năng lượng sạc và xả tối ưu cho chế độ trực tiếp và bất định. Có thể chia thành hai khoảng thời gian chính. Khoảng thời gian từ 11 giờ sáng đến 9 giờ tối ưu tiên sạc do năng lượng gió dư thừa. Trong khoảng thời gian còn lại ưu tiên phát cung cấp điện cho thị trường điện khi cần thiết. Kết quả được tổng hợp theo các tham số tính toán như sau:

- $E_R^D=24$ MWh; $E_R^U=214+7=221$ MWh; $E_D^D=319$ MWh; $E_D^U=97$ MWh.

- Khả năng sạc $E_R=245$ MWh; Công suất sạc $P_{ERmin}=10,2$ MW.

- Khả năng xả $E_D=416$ MWh; Công suất phát cực đại $P_{EDmax}=46,5$ MW và trung bình $P_{EDmean}=17,3$ MW.

- ESS có công suất 10 MW và năng lượng lưu trữ 140 MWh, với loại xả sâu đến 20%.

3.3. Thảo luận

Hình 5 mô tả kết quả NPV biến đổi theo tỷ lệ phạt thiếu hụt công suất điện gió cả ba kịch bản. Nổi bật nhất là cả ba kịch bản đều mang lại giá trị NPV dương chứng tỏ tính khả thi về mặt tài chính của các dự án đầu tư. Trong khi đó, kịch bản mở rộng điện gió kèm ESS thể hiện tiềm năng doanh thu cao nhất cho các nhà đầu tư điện gió, và đặc biệt hơn, NPV của kịch bản này ít bị ảnh hưởng bởi hệ số đền bù. Ngược lại, NPV kịch bản TS giảm đột ngột đến hơn 75% khi tỷ lệ phạt tăng cho thấy bất kỳ thay đổi nào trong chính sách giá điện ảnh hưởng lớn hiệu quả đầu tư.

Xét về trình tự các kịch bản, NPV tăng dần từ TS, OWS và đến EWS. Như vậy, các kịch bản mở rộng trang trại điện gió mang lại hiệu quả đầu tư cao hơn đầu tư xây dựng mới. Cụ thể hơn, trong kịch bản EWS, NPV tăng đột biến 65,1% khi hệ số bồi thường bằng 0 và lên đến 573% khi hệ số đó bằng 2. Ba lợi ích có thể được lý giải cho nguyên nhân này: thứ nhất, sản lượng điện gió dư thừa vượt chào thầu được giữ lại để bán với giá cao hơn; thứ hai, giảm thiểu bồi thường do xác suất thiếu hụt công suất điện gió trên thị trường điện; và cuối cùng, chênh lệch giá giữa mua sạc và bán điện của ESS mang lại lợi ích thiết thực.

Để đánh giá khách quan hơn, một so sánh với kịch bản đã được nghiên cứu và công bố trong tài liệu [10], thể hiện một trường hợp tương tự mà trong đó các nhà nghiên cứu tối ưu trạm biến áp 63 MVA cải tiến chế độ làm mát được trang bị để nâng cao hiệu quả truyền tải điện gió. Kết quả các chỉ tiêu được đối chiếu trong Bảng 2.

Bảng 2. So sánh các chỉ tiêu của kịch bản tham khảo tài liệu [10]

Kịch bản	EWS	[10]
Công suất đỉnh trang trại gió (MW)	90	75
Bao gồm bất định vận tốc gió	Có	Không
NPV (M€)	17,28	11,2
NPV/P (k€/MW)	192	149,3

Các chỉ số của kịch bản EWS đề xuất trong nghiên cứu này cải thiện đáng kể so kịch bản [10]. Đặc biệt là cả NPV và ROI trong kịch bản EWS đều tăng vượt mức 54% và 29% tương ứng. Điều đó chứng tỏ kết quả đề xuất mở rộng trang trại điện gió kết hợp xây dựng nguồn ESS đạt hiệu quả đầu tư đáng được xem xét. Tuy nhiên rủi ro biến động thị trường điện có thể tác động đến các chỉ số nhưng ảnh hưởng đến tất cả các kịch bản là như nhau, ngoài ra các chỉ số gần như ít bị thay đổi theo mức phạt (như thể hiện trên Hình 5) cho thấy kịch bản EWS là hiệu quả hơn như đã đánh giá.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã chỉ ra một chọn lựa đáng được quan tâm trong lĩnh vực đầu tư trang trại gió, theo đó cần khám phá khả năng mở rộng của các trang trại hiện có được chứng minh mang lại lợi nhuận đầu tư cao hơn đáng kể, trước khi quyết định đầu tư một trang trại gió mới. Điều này đặc biệt hữu ích trong thời đại cắt giảm ưu đãi và cạnh tranh trên thị trường điện. Khẳng định này được thực nghiệm minh chứng với kết quả phương án đầu tư mở rộng trang trại điện gió kết hợp xây dựng nguồn trữ năng bằng bài toán tối ưu các chỉ số đầu tư tài chính NPV và ROI. Cụ thể số liệu cho thấy sự gia tăng đáng kể về lợi tức đầu tư từ 4,4% trong kịch bản thiết kế truyền thống lên 24,8% trong kịch bản mở rộng trang trại điện gió kết hợp ESS. Tuy có thể những rủi ro vận hành ESS do chưa hoàn thiện công nghệ trữ năng như hiện nay, nhưng xu hướng phát triển công nghệ trong tương lai có thể cải thiện khiếm khuyết, rõ ràng giảm giá thành và tăng hiệu suất trữ năng so với loại pin trong thử nghiệm như đề cập trong bài [24], điều đó có thể mang đến hiệu suất cao hơn nữa.

Cuối cùng, kết quả cho thấy vấn đề đặc biệt trong nghiên cứu này lợi ích độc đáo là minh chứng cho phương án thiết kế mở rộng trang trại gió mà không cần tăng thêm trạm biến áp và đường dây truyền tải điện để đầu nối. Và từ đó giảm đáng kể chi phí tài chính và nhân công để đánh giá môi trường nơi xây dựng trạm và đường dây truyền tải. Loại bỏ sự cần thiết phải giải phóng mặt bằng và bồi thường cho các trạm biến áp và đường dây truyền tải mới không được khuyến khích. Hơn thế nữa, nghiên cứu cho thấy chỉ tiêu lợi ích đầu tư kịch bản đề xuất mang đến hiệu quả mà gần như ít bị ảnh hưởng bởi các thay đổi chính sách ưu đãi về giá bán điện trong các điều kiện thị trường điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. Em-Udom and N. Jaisumroum, "SDT Smart Hybrid Streetlight Pole Design Utilizing Renewable Energy for a Smart City in Thailand," *Smart Grids and Sustainable Energy*, vol. 16, no. 8, pp. 1-11, 2023.
- [2] B. A. B. Mohamed, "Principle Parameters and Environmental Impacts that Affect the Performance of Wind Turbine: An Overview," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, pp. 7891-7909, 2022.
- [3] Vietnam Energy Institute, "Vietnam's National Electricity Development Plan for the Period 2021-2030, Vision to 2050," Hanoi, Vietnam, 2023.
- [4] Vietnam Prime Minister, *Plan 262/QĐ-TTg: Implementing Vietnam's National Electricity Development Plan for the period 2021-2030, vision to 2050*, Hanoi, 2024.
- [5] Vietnam Prime Minister, *Decision 500/QĐ-TTg: Approving the Vietnam's National Electricity Development Plan for the Period 2021-2030, Vision to 2050*, Hanoi, 2023.
- [6] V. A. Truong, N. S. Dinh, and 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*, vol. 48, no. 8, pp. 6275-6291, 2023.
- [7] C. Dhanamjayulu, P. Sanjeevikumar, and S. Muyeen, "A structural overview on transformer and transformer-less multi level inverters for renewable energy applications," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 10299-10333, 2022.
- [8] A. V. Truong, L. T. Nguyen, and S. N. 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*, vol. 14, no. 4, pp. 15751-15756, 2024.
- [9] O. D. A. Rocha, K. Morozovska, T. Laneryd, O. Ivarsson, C. Ahlrot, and P. Hilber, "Dynamic rating assists cost-effective expansion of wind farms by utilizing the hidden capacity of transformers," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 123, 2020, Art. no. 106188.

- [10] A. M. Gomez, K. Morozovska, T. Laneryd, and P. Hilber, "Optimal sizing of the wind farm and wind farm transformer using MILP and dynamic transformer rating," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 107645, no. 136, 2022, Art. no. 107645.
- [11] M. Fantauzzi, D. Lauria, F. Mottola, and D. Proto, "Estimating Wind Farm Transformers Rating through Lifetime Characterization Based on Stochastic Modeling of Wind Power," *Energies*, vol. 14, no. 1498, pp. 1-16, 2021.
- [12] T. Cai, M. D. K. Chen, and T. Gong, "Methods of participating power spot market bidding and settlement for renewable energy systems," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 7764-7772, 2022.
- [13] K. Sharma, A. Gupta, and R. Bhakar, "Wind Power Scenario Generation Considering Spatiotemporal Correlations: A Distribution Free Hybrid VARMA-Copula Approach," *Smart Grids and Sustainable Energy*, vol. 8, no. 17, pp. 1-18, 2023.
- [14] P. Spodniak, K. Ollikka, and S. Honkapuro, "The impact of wind power and electricity demand on the relevance of different short-term electricity markets: The Nordic case," *Applied Energy*, vol. 283, 2021, Art. no. 116063.
- [15] H. Wang, N. Zhang, E. Du, J. Yan, S. Han, and Y. Liu, "A comprehensive review for wind, solar, and electrical load forecasting methods," *Global Energy Interconnection*, vol. 5, no. 1, pp. 9-30, 2022.
- [16] T. Zuo, Y. Zhang, X. Xie, K. Meng, Z. Tong, Z. Y. Dong, and Y. Jia, "A Review of Optimization Technologies for Large-scale Wind Farm Planning with Practical and Prospective Concerns," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 19, no. 7, pp. 1-14, 2022.
- [17] L. Al-Ghussain, A. D. Ahmad, A. M. Abubaker, and M. A. Mohamed, "An integrated photovoltaic/wind/biomass and hybrid energy storage systems towards 100% renewable energy microgrids in university campuses," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, 2021, Art. no. 101273.
- [18] M. A. Mohamed, T. Jin, and W. Su, "An effective stochastic framework for smart coordinated operation of wind park and energy storage unit," *Applied Energy*, vol. 272, 2020, Art. no. 115228.
- [19] T. T. Nguyen, H. D. Nguyen, and M. Q. Duong, "Optimal Power Flow Solutions for Power System Considering Electric Market and Renewable Energy," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 5, 2023, Art. no. 3330.
- [20] L. Dawson and A. M. Knight, "Investigating the impact of a dynamic thermal rating on wind farm integration," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 17, pp. 2449-2457, 2023.
- [21] S. H. H. Kazmi, T. Laneryd, K. Giannikas, S. F. Ahrenfeldt, T. S. Sørensen, and J. Holbøll, "Cost optimized dynamic design of offshore windfarm transformers with reliability and contingency considerations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 128, 2021, Art. no. 106684.
- [22] P. Wais, "A review of Weibull functions in wind sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 1099-1107, 2017.
- [23] P. P. Biswas, P. N. Suganthan, and G. A. J. Amaratunga, "Optimal power flow solutions incorporating stochastic wind and solar power," *Energy Conversion and Management*, vol. 148, pp. 1194-1207, 2017.
- [24] M. Hannan, S. Wali, P. Ker, M. A. Rahman, M. Mansor, V. K. Ramachandaramurthy, K. Muttaqi, T. Mahlia, and Z. Dong, "Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues," *Journal of Energy Storage*, vol. 42, 2021, Art. no. 103023.
- [25] The International Electrotechnical Commission (IEC), *International Standards: Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers*, IEC 60076-7, The International Electrotechnical Commission (IEC), 2018.
- [26] M. M. Rahman, A. O. Oni, E. Gemechu, and A. Kumar, "Assessment of energy storage technologies: A review," *Energy Conversion and Management*, vol. 223, 2020, Art. no. 113295.
- [27] K. Mongird, V. V. Viswanathan, P. J. Balducci, M. J. E. Alam, V. Fotedar, V. S. Koritarov, and B. Hadjerioua, "Energy Storage Technology and Cost Characterization Report," U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 2019.
- [28] L. T. Seguro, J. V. Seguro, and T. W. Lambert, "Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 85, pp. 75-84, 2000.
- [29] D. Z. Ray and E. M.-S. Carlos, "MATPOWER Test Cases," 24 January 2018. [Online]. Available: https://matpower.org/docs/ref/matpower5.0/case_ieee30.html. [Accessed July 25, 2023].
- [30] D. Cao, W. Hu, X. Xu, T. Dragičević, Q. Huang, Z. Liu, Z. Chen, and F. Blabjerg, "Bidding strategy for trading wind energy and purchasing reserve of wind power producer – A DRL based approach," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 117, 2020, Art. no. 105648.