

# 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

## ENHANCING WIND ENERGY INVESTMENT EFFICIENCY IN THE ELECTRICITY MARKET THROUGH THE INTEGRATION OF POWER UNCERTAINTY WITH THERMAL POWER PLANT OPERATION

Dinh Ngọc Sang<sup>1</sup>, Trương Việt Anh<sup>1</sup>, Nguyễn Tùng Linh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh, Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Điện lực, Hà Nội, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: linhnt@epu.edu.vn

(Nhận bài / Received: 08/11/2023; Sửa bài / Revised: 24/01/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 26/01/2024)

**Tóm tắt** - Bài báo giới thiệu giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng từ sự bất ổn của điện gió, đặc biệt khi điện gió ngày càng phải tham gia vào thị trường điện. Sự không chính xác trong dự báo và biến đổi thời tiết đột ngột khiến cho công suất phát điện thực tế của các trang trại gió có thể chênh lệch lớn so với dự kiến, dẫn đến giảm doanh thu cho nhà đầu tư và tổn thất cho xã hội. Nhà đầu tư có thể phải chịu phạt do không cung cấp đủ điện theo cam kết hoặc bán điện dư ra với giá thấp. Nghiên cứu đề xuất kết hợp các nguồn điện, đặc biệt là sự tích hợp giữa điện gió và nhiệt điện, nhằm cân bằng công suất và giảm thiểu rủi ro phạt hoặc đền bù. Thực nghiệm trên mô hình hệ thống IEEE 30-nút cho thấy, việc kết hợp này mang lại lợi nhuận cao hơn so với khi các nhà máy điện hoạt động độc lập.

**Từ khóa** - Năng lượng điện gió; Thị trường điện; Không chắc chắn; Chiến lược đầu tư; Kế hoạch mở rộng nguồn điện

### 1. Giới thiệu

Trên toàn cầu, sự gia tăng của năng lượng tái tạo đang chứng kiến một sự tăng trưởng mạnh mẽ, đặc biệt qua sự mở rộng của các trang trại gió có quy mô từ trung bình đến lớn [2]. Trong khoảng thời gian 2017-2018, ngành này đã ghi nhận mức tăng trưởng ấn tượng, khoảng 10% hàng năm, một mức độ tăng trưởng chưa từng thấy và khó dự đoán trước [3]. Sau cuộc khủng hoảng năng lượng 2022 tại Châu Âu, sự phát triển của năng lượng tái tạo đã được đẩy mạnh hơn bao giờ hết, nhằm thay thế cho nguồn cung năng lượng khí đốt bị hạn chế. Các quốc gia toàn cầu đã quyết định đầu tư và tăng cường phát triển năng lượng tái tạo, trong đó năng lượng gió nắm giữ một vai trò trung tâm, để giảm thiểu sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch [4]. Sự gia tăng của tỷ lệ năng lượng từ gió cũng mang lại những lợi ích môi trường không thể phủ nhận [5, 6], và tham gia vào thị trường điện cạnh tranh nay đã trở thành một xu hướng ở châu Âu [7].

Ở Việt Nam, sự chấp thuận của quy hoạch phát triển điện lực quốc gia từ 2021 đến 2030 với tầm nhìn xa đến 2050 đã đặt nền móng vững chắc cho việc mở rộng cả nguồn điện và mạng lưới truyền tải, cũng như việc phát triển cấu trúc vận hành cho thị trường điện trong tương lai [8]. Với một chính sách phát triển năng lượng tái tạo được

**Abstract** - The paper presents a solution to mitigate the impact of the inherent uncertainty of wind power, especially as it increasingly participates in the electricity market. Inaccuracies in forecasting and sudden weather changes can lead to significant discrepancies between actual and predicted wind power output, resulting in revenue losses for investors and societal damage. Investors may face penalties for not delivering the promised power or must sell excess electricity at low prices. The study proposes the integration of power sources, particularly the coordination between wind and thermal power, to balance capacity and minimize the risk of penalties or compensations. Experiments on the IEEE 30-node system model demonstrate that this integration yields higher profits than independent power plant operations.

**Key words** - Wind Power; Electricity Market; Uncertain; Investment Strategy; Generation Expansion Plan

định hình rõ ràng, Việt Nam đã thiết lập mục tiêu phát triển năng lượng gió và năng lượng mặt trời như những ưu tiên chiến lược để tiến tới mục tiêu phát thải ròng bằng không vào năm 2050. Quy hoạch cũng kỳ vọng vào sự mở rộng không hạn chế của năng lượng gió cả ngoài khơi lẫn trong đất liền, với mục tiêu cụ thể là đến năm 2030, công suất năng lượng gió của Việt Nam sẽ vượt quá 28 GW và phấn đấu để đạt mức trên 100 GW vào năm 2050.

Một trong những hạn chế của năng lượng gió khi được kết hợp vào hệ thống thị trường điện theo thời gian thực là đặc tính không thể dự đoán trước của nó. Tính không ổn định này gây ra trở ngại không nhỏ cho việc hội nhập của năng lượng gió vào thị trường điện một cách công bằng và không giới hạn. Do đó, việc áp dụng chiến lược đấu thầu cạnh tranh và có kế hoạch được xem xét kỹ lưỡng là cần thiết để năng lượng gió có thể cạnh tranh ngang hàng với các loại năng lượng truyền thống trong thị trường điện cạnh tranh. Một số nghiên cứu đã được thực hiện để khám phá những tác động của năng lượng gió đối với hệ thống điện và các vấn đề phát sinh từ tính không ổn định của nó [9]. Đã có những giải pháp được đề xuất để giảm thiểu chi phí do sự mất cân đối năng lượng gây ra bằng cách tham gia vào thị trường [10], trong khi một số ý kiến khác lại cho rằng thị trường điện có thể hưởng

<sup>1</sup> Hochiminh City University of Technology and Education, Hochiminh, Vietnam (Dinh Ngọc Sang, Trương Việt Anh)

<sup>2</sup> Electric Power University, Hanoi, Vietnam (Nguyễn Tùng Linh)

lợi từ việc giảm giá và cân bằng lượng cung cấp nhờ vào sự linh hoạt của hệ thống [11].

Để giải quyết những thách thức này, việc phát triển chiến lược đấu giá hiệu quả cho nguồn năng lượng gió dựa trên các mô hình xác suất có liên kết giữa năng lượng gió và năng lượng nhiệt điện được đề xuất trong bài báo này, làm tăng khả năng thực thi cho các nhà đầu tư năng lượng gió. Phương pháp này nhằm tăng cường độ tin cậy cho những nhà đầu tư và thị trường bằng cách cung cấp cái nhìn sâu sắc hơn về rủi ro doanh thu liên quan đến năng lượng gió. Các chủ sở hữu nhà máy gió có thể cải thiện hiệu suất tài chính và tối đa hóa lợi ích xã hội bằng cách áp dụng các chiến lược quản lý tiên tiến và tối ưu hóa quyết định đầu thầu.

Điều này được chứng minh qua việc sử dụng mô hình mạng IEEE 30-BUS để mô phỏng kịch bản năng lượng gió, cho thấy rằng sự không ổn định có thể được giảm thiểu đáng kể khi kết hợp năng lượng gió với nguồn năng lượng nhiệt điện. Kết quả này khuyến khích các chủ nhà máy điện gió mở rộng đầu tư, cải thiện hiệu quả kinh tế, và đóng góp vào sự phát triển bền vững của hành tinh.

## 2. Mô hình bài toán

Đầu tư một trang trại gió bao gồm các thành phần: (i) Turbine gió; (ii) Hệ thống lưới điện nội bộ kết nối các tua-bin; (iii) Đường dây và trạm biến áp để kết nối điện gió với lưới điện địa phương. Trong tài liệu này chỉ xét đến sự ảnh hưởng của kênh đầu tư turbine gió bởi giá trị đầu tư của nó là lớn nhất và sự biến động tốc độ gió tác động lên turbine gió.

### 2.1. Doanh thu điện gió trong thị trường điện

Không giống như các loại nguồn chủ động khác, các nhà máy điện gió nhận được hai thành phần doanh thu là doanh thu trực tiếp và doanh thu bất định, biểu diễn theo [11] như sau:

$$R_w(P_w) = \sum R_{w,i} = \sum [R_{ws,i}(P_{ws,i}) + R_{wu,i}(\Delta P_{w,i})] \quad (1)$$

Doanh thu trực tiếp  $R_{ws}$  được tạo ra từ việc bán điện theo lịch đấu thầu trực tiếp trên thị trường điện, sản lượng điện gió dự kiến trước. Đối với doanh thu bất định  $R_{wu}$  gồm hai thành phần: doanh thu bán năng lượng dư thừa ngoài dự đoán ban đầu và chi phí bồi thường (hoặc phạt) phát sinh do thiếu hụt năng lượng so với dự báo ban đầu.

$P_w$  là sản lượng điện bán ra theo thời gian thực;  $P_{ws,i}$  và  $\Delta P_{w,i} = P_{wav,i} - P_{ws,i}$  là công suất chào đấu thầu và mức chênh lệch giữa thực tế và chào thầu.

i) Doanh thu trực tiếp, theo [1] được tính,

$$R_{ws,i}(P_{ws,i}) = g_i P_{ws,i} \quad (2)$$

$g_i$  giá bán điện chào thầu của nguồn điện gió thứ  $i$  tương ứng với sản lượng  $P_{ws,i}$ .

Đối với các thị trường điện có nguồn nhiệt điện chi phối, diễn hình như thị trường điện Châu Âu, giá điện gió chào thầu trước đó thường được dự đoán dựa trên giá bán điện trung bình của các nguồn nhiệt điện khí [6]. Trong nghiên cứu này giá sử giá bán điện gió xác lập theo giá điện

trung bình của nhiệt điện trên thị trường điện,

$$C_{T0}(P_{TG}) = \sum_{i=1}^{N_{TG}} (a_i + b_i P_{TG,i} + c_i P_{TG,i}^2) \quad (3)$$

$$\lambda_{TG,i} = b_i + c_i P_{TG,i} \quad (4)$$

$$g = \frac{\sum_{i=1}^{N_{TG}} \lambda_{TG,i}}{P_{TG}} \quad (5)$$

$a_i$ ,  $b_i$ , và  $c_i$  là các hệ số tính thành phần chi phí phát điện của các nguồn nhiệt điện tương ứng với sản lượng nhiệt điện phát ra  $P_{TG,i} \cdot \lambda_{TG,i}$  và  $\lambda_{TG}$  là đơn giá giá sử của các nguồn nhiệt điện và trung bình giá của các nguồn nhiệt điện.

ii) Doanh thu bất định của điện gió

$$R_{wu,i}(\Delta P_{w,i}) = \begin{cases} R_{Rw,i}(\Delta P_{w,i}), & \text{nếu } P_{wav,i} \geq P_{ws,i} \\ C_{Pw,i}(\Delta P_{w,i}), & \text{nếu } P_{wav,i} \leq P_{ws,i} \end{cases} \quad (6)$$

$R_{Rw}$  là doanh thu bán điện dư thừa và  $C_{Pw}$  là chi phí bồi thường (hoặc phạt) của điện gió khi bị thiếu hụt sản lượng điện. Thành phần doanh thu và chi phí phí, theo [1]:

$$R_{Rw,i}(\Delta P_{w,i}) = k_{R,i} g_i (P_{wav,i} - P_{ws,i}) = k_{R,i} g_i \int_{P_{ws,i}}^{P_{wr,i}} (p_{w,i} - P_{ws,i}) f_w(p_{w,i}) dp_{w,i} \quad (7)$$

$$C_{Pw,i}(\Delta P_{w,i}) = k_{P,i} g_i (P_{wav,i} - P_{ws,i}) = k_{P,i} g_i \int_0^{P_{ws,i}} (p_{w,i} - P_{ws,i}) f_w(p_{w,i}) dp_{w,i} \quad (8)$$

$k_{R,i}$  và  $k_{P,i}$  là các hệ số chênh lệch giá bán điện dư thừa và hệ số phạt đối với sản lượng điện thiếu hụt, so với giá chào bán điện gió theo kế hoạch trên thị trường điện. Hệ số phạt (hay bồi thường) là tỷ lệ giữa đơn giá điện gió bị bồi thường hoặc bị phạt so với đơn giá chào thầu điện gió trước đó. Chỉ xảy ra khi công suất gió thực tế không đạt được so với công suất chào thầu. Khi đó, chủ đầu tư điện gió phải mua điện giao ngay để bù cho khoản thiếu hụt, hoặc chấp nhận phạt hợp đồng nếu không mua điện đền bù.

### 2.2. Mô hình xác suất không ổn định của điện gió

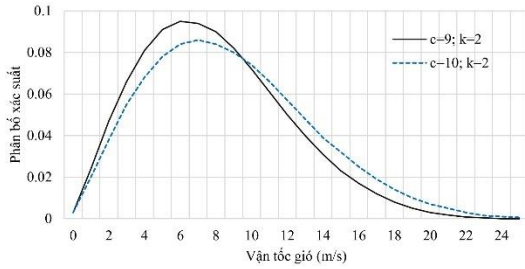
Một số nghiên cứu gần đây sử dụng phân bố xác suất Weibull hai tham số để đánh giá năng lượng gió [2]. Mô hình tần suất của tốc độ gió được viết như sau,

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (9)$$

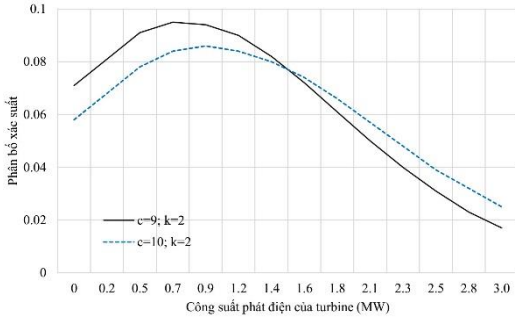
Các hệ số  $k$  và  $c$  gọi là hệ số hình dạng và hệ số tỷ lệ. Hình 1 dưới đây biểu diễn mô phỏng kết quả tần suất gió của một mô hình gió tương ứng  $c=9$ ;  $k=2$  và  $c=10$ ;  $k=2$ , Kết quả từ [3, 4, 5, 6]. Theo [1], Công suất điện gió theo tốc độ gió được mô tả như sau,

$$P_w(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \text{ và } v > v_{out} \\ P_{wr} \left(\frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}}\right), & v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_{wr}, & v_r < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (10)$$

$v_{in}$ ,  $v_r$  và  $v_{out}$  là tốc độ gió bắt đầu, trung bình và khép cánh của turbine gió;  $P_{wr}$  là công suất định mức tương ứng. Trên Hình 2 thể hiện phân bố xác suất công suất điện gió của turbine ở hai vị trí khác nhau: Gen 1 có  $c = 9\text{m/s}$ ;  $k = 2$  và Gen 2 có  $c = 10\text{m/s}$ ;  $k = 2$ . Thông số kỹ thuật cơ bản của turbine gió:  $P_{wr} = 3\text{MW}$ ;  $v_{in} = 3\text{m/s}$ ;  $v_r = 16\text{m/s}$  và  $v_{out} = 25\text{m/s}$ .



**Hình 1.** Phân bố xác suất Weibull tốc độ gió với cả mô hình  $c=9; k=2$  và  $c=10; k=2$



**Hình 2.** Phân bố xác suất công suất điện gió theo Weibull tại hai vị trí khác nhau

**2.3. Hàm mục tiêu của bài toán**

Mục tiêu chính được nêu ngay từ đầu của nghiên cứu này là tập trung vào hiệu quả tài chính của việc đầu tư vào năng lượng gió trong thị trường điện. Để một trang trại gió phát triển mạnh trên thị trường điện, việc tham gia vào quá trình đấu thầu giá bán điện và sản lượng điện là bắt buộc nhằm mục đích tối đa hóa doanh thu. Cũng đã trình bày, doanh thu được tạo ra từ điện gió gồm có doanh thu trực tiếp và doanh thu bất định. Hàm mục tiêu toán học cho các yêu cầu này thể hiện như sau:

$$\text{Cực đại } \{F = R_w(P_w)\} \tag{11}$$

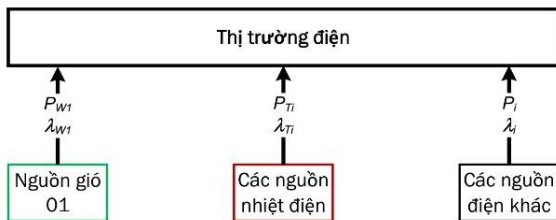
**2.4. Các kịch bản nghiên cứu**

(i) Kịch bản trang trại gió độc lập (GĐK): Kịch bản truyền thống này liên quan đến nhiều turbine gió trong một trang trại được đầu tư.

(ii) Kịch bản tích hợp nhiều trang trại gió (GLK): Trong kịch bản này, các trang trại gió khác nhau có thể cùng một chủ đầu tư hoặc các chủ khác nhau nhưng trong đó vận hành phối hợp để bù đắp cho nhau khi cần thiết.

(iii) Tích hợp trang trại điện gió và nguồn nhiệt điện (GNK): Có thể chủ một nguồn nhiệt điện đầu tư thêm trang trại điện gió, hoặc chủ các nguồn nhiệt điện và điện gió kết hợp điều hành bù đắp sản lượng khi cần thiết.

**2.4.1. Kịch bản GĐK**



**Hình 3.** Kịch bản điện gió độc lập trong thị trường điện (GĐK)

Xác suất công suất điện một turbine gió được thể hiện như trên Hình 2, theo quy luật xác suất thì một trang trại

điện gió gồm nhiều turbine thì phân bố xác suất sẽ là tổ hợp của tất cả các turbine gió đơn lẻ. Và hai trạng thái gió thì phân bố xác suất được tổ hợp của từng trạng thái. Biểu thức tổ hợp như sau,

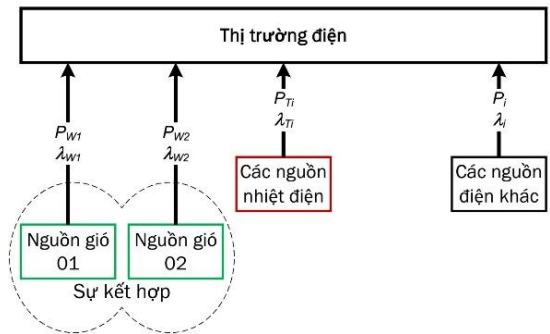
$$PDF_F(P_t) = \prod_{i=1}^{N_T} PDF_{T,i}(P_{t,i}) \tag{12}$$

$$P_F = \sum_{i=1}^{N_T} P_{t,i} \tag{13}$$

Trong đó,  $PDF_F$  và  $P_F$  lần lượt là phân bố xác suất và công suất điện của turbine gió (nếu tổ hợp các turbine) hoặc của trang trại gió (nếu tổ hợp các trang trại gió).

Khi đó doanh thi của điện gió được xác định bởi giá trị doanh thu trực tiếp khi chào đấu thầu và thành phần phạt (nếu có) khi sản lượng điện không đạt theo kế hoạch đấu thầu. Kết quả xác định theo các biểu thức (2), (6), và mục tiêu được xác lập theo biểu thức (11).

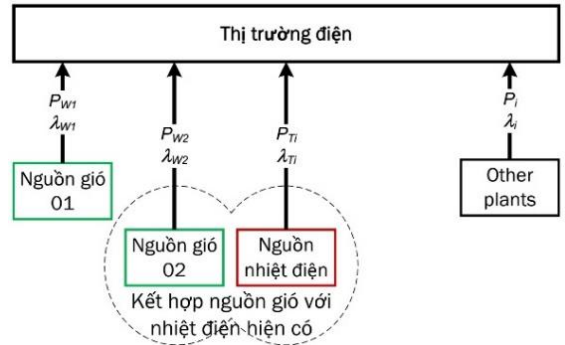
**2.4.2. Kịch bản GLK**



**Hình 4.** Kịch bản liên kết các điện gió trong thị trường (GLK)

Trong trường hợp các nguồn điện gió có tác động tương hỗ lẫn nhau trong quá trình vận hành, theo xác suất nguồn gió này có thể thiếu sẽ được bù đắp bởi nguồn gió khác dư thừa công suất. Điều này có thể dẫn đến một tổng thể giảm đi xác suất bồi thường hoặc phạt do thiếu hụt sản lượng điện khi đấu thầu trên thị trường điện.

**2.4.3. Kịch bản GNK**



**Hình 5.** Kịch bản liên kết điện gió với nhiệt điện trên thị trường (GNK)

$$R_{wu}(P_p) = \begin{cases} R_w(P_p), & \text{nếu } P_p \geq 0 \\ C_p(P_p), & \text{nếu } P_{TR} \geq -P_p > 0 \\ C_{Pw}(P_p), & \text{nếu } -P_p > P_{TR} \end{cases} \tag{14}$$

$$P_p = P_{Tav} - P_{TS} \text{ Khi } -P_p > P_{TR},$$

$$C_{Pw}(P_p) = C_{Pw}(\Delta P_p) + C_p(P_{TR})$$

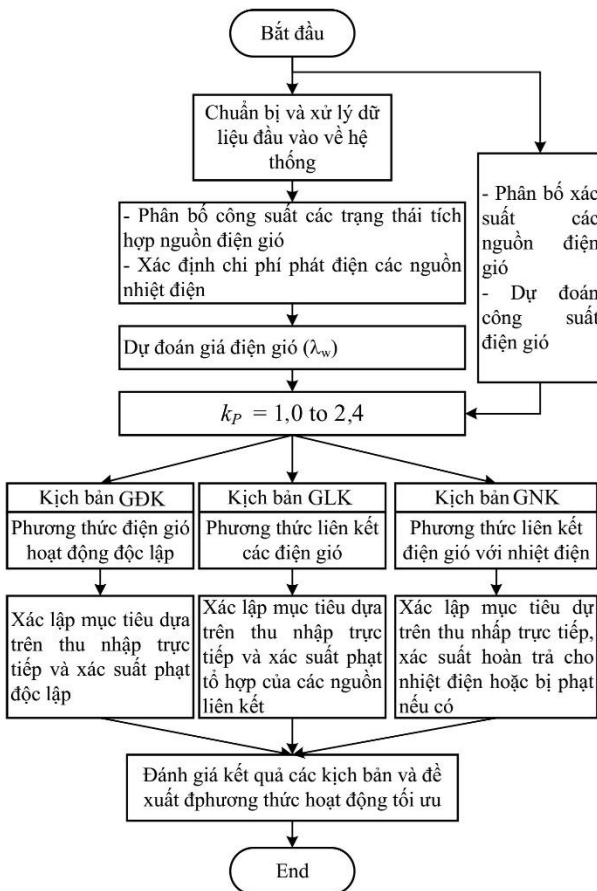
$$\Delta P_p = P_p - P_{TR}$$

Sự đóng góp của nguồn nhiệt điện trong tổ hợp gió và nhiệt điện tỏ ra hiệu quả nhiều hơn. Doanh thu theo biểu thức (6) được viết lại khi có sự tham gia của nguồn nhiệt điện như sau,

$P_p$  là lượng công suất chênh lệch giữa lượng điện bán ra thực tế so với kế hoạch đấu thầu đã chào cho thị trường điện trước đó;  $R_w$ ,  $C_p$  và  $C_{pw}$  là doanh thu bán điện dư thừa, chi phí trả cho nguồn nhiệt điện lượng công suất được nguồn nhiệt điện đổ bù cho thiếu hụt của điện gió, và chi phí phạt còn lại nếu vẫn còn xảy ra thiếu sản lượng điện sau khi nhiệt điện đã bù;  $P_{Tav}$  và  $P_{Ts}$  là để xác định lượng công suất dự phòng của nguồn nhiệt điện, lượng điện tối đa có thể bù đắp cho nguồn điện gió.

### 2.5. Lưu đồ thuật toán đề xuất

Tất cả các bước trong biểu đồ quy trình được hiển thị trong sơ đồ Hình 6,



Hình 6. Lưu đồ đánh giá các kịch bản đề xuất

Quá trình thực thi mô hình để đánh giá và đề xuất được tính toán và phân tích kết quả theo 4 bước như sau:

- Xây dựng cơ sở dữ liệu xác suất cho các turbine, tổ hợp cho các trang trại điện gió.
- Xây dựng dữ liệu vận hành hệ thống điện. Mô phỏng xác suất nguồn điện gió trong hệ thống điện và phân bổ công suất tối ưu của hệ thống để dự đoán công suất các nguồn điện và giá bán điện của họ.
- Mô hình doanh thu của các nguồn điện gió theo từng kịch bản, từ đó xác định vùng công suất điện gió tối ưu theo từng kịch bản.

- Đánh giá, lựa chọn mô hình và kết quả đấu thầu giá điện gió và lịch trình phát điện trên thị trường điện.

## 3. Mô phỏng và đánh giá

### 3.1. Dữ liệu và thông số mô hình

#### 3.1.1. Hệ thống điện IEEE 30 nút

Hệ thống IEEE 30 nút được chọn lựa để thử nghiệm các kịch bản theo mô hình đề xuất của bài báo này. Cấu hình hệ thống điện có 30 nút, 41 nhánh và 6 nguồn và các thông số lưới điện của nó được lấy từ tài liệu tham khảo [7, 8]. Hình lưới điện và các chi tiết khác của lưới điện chuẩn tham khảo tại [9]. Bốn nhà máy nhiệt điện được đặt tại các nút 1, 2, 8 và 13 có thông số như Bảng 1, và hai trang trại gió đã tại các nút 5 và 11 thông số theo Bảng 2. 25 turbine gió 3MW định mức tại nút 5 với tổng công suất là 75MW; và 20 turbine ở nút 11 tổng công suất là 60MW. Phân xác suất tốc độ gió tại hai địa điểm này dùng hai tham số Weibull và PDF tương ứng cho mỗi trang trại được trình bày trong Hình 1.

Bảng 1. Thông số nhà máy nhiệt điện

Nguồn	Nút	a	b	c
TG1	1	0	2	0,00375
TG2	2	0	1,75	0,0175
TG3	8	0	3,25	0,00834
TG4	13	0	3	0,025

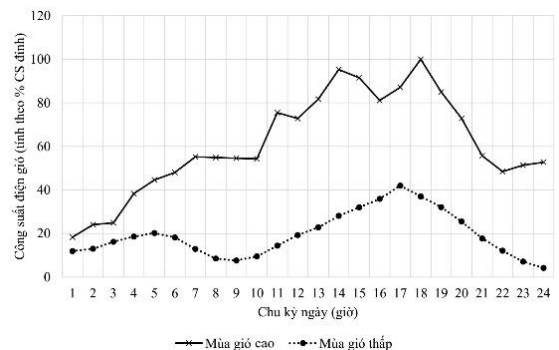
Bảng 2. Thông số nhà máy điện gió

Các nguồn điện gió				
Nút	Số turbine	Công suất định mức, $P_{wr}$ (MW)	Hệ số Weibull	Vận tốc trung bình, $M_{wbl}$
5	25	75	c=9, k=2	v=7,976m/s
11	20	60	c=10, k=2	v=8,862m/s

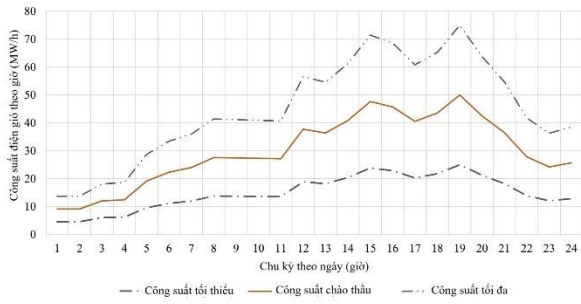
#### 3.1.2. Sản lượng điện của nguồn điện gió tại Nút 5

Về dự đoán sản lượng điện gió ngày giả sử tại hai địa điểm nguồn điện gió là như nhau, được chia thành hai mùa: mùa cao điểm (giả sử kéo dài sáu tháng) và mùa thấp điểm (giả sử sáu tháng còn lại), tham khảo từ [10] cho ở Hình 7.

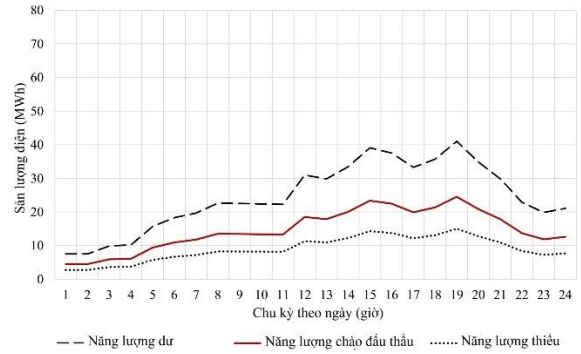
Một thị trường điện giả sử cho phép điện gió chào thầu với sai số 10%, Vùng suất công suất các thành phần được thể hiện trong biểu đồ Hình 8. Trong hình có thể hiện hai đường biên xác định xác suất công suất dư thừa (nét đứt hai chấm) và xác suất công suất thiếu hụt (nét đứt một chấm). Trên cơ sở này, sản lượng điện ngày cao điểm được cho ở Hình 9.



Hình 7. Biểu đồ công suất điện gió dự đoán ngày



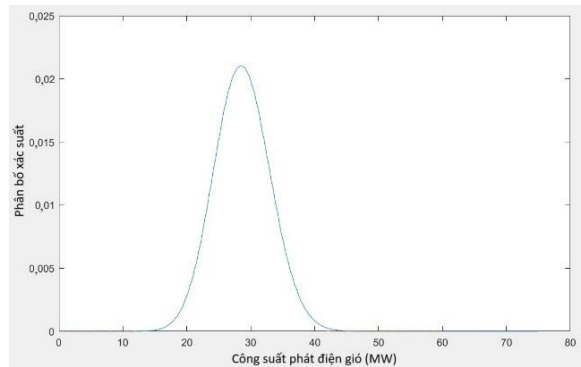
**Hình 8.** Biểu đồ xác suất công suất điện gió ngày cao điểm tại Nút 5



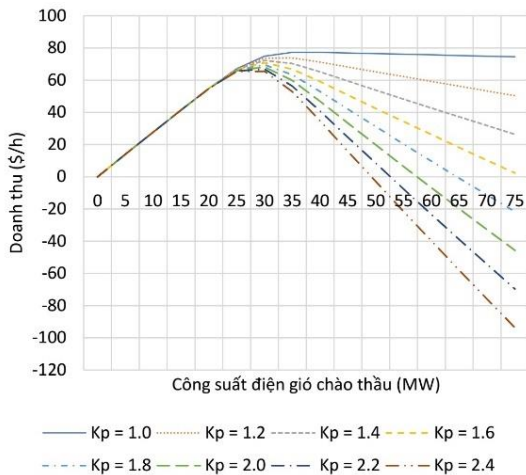
**Hình 9.** Biểu đồ xác suất sản lượng điện gió ngày cao điểm tại Nút 5

**3.2. Kịch bản GDK**

Doanh thu của một nguồn điện gió tại nút 5 được chọn khảo sát trong kịch bản này. Phân bố xác suất tổ hợp của 25 turbine gió trong trang trại tại nút 5 và doanh thu biến đổi theo mức phạt được cho tại Hình 10 và Hình 11.



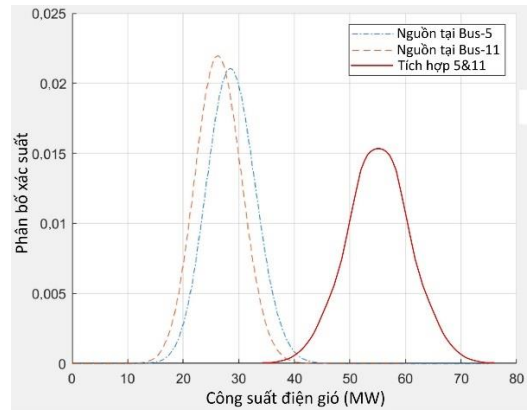
**Hình 10.** PDF trang trại gió nút 5



**Hình 11.** Doanh thu độc lập trang trại gió nút 5

Doanh thu được tạo ra bởi nguồn điện gió tại Nút 5 xác lập đỉnh trong khoảng từ 30MW đến 40MW đối với gần như tất cả mức phạt khác nhau.

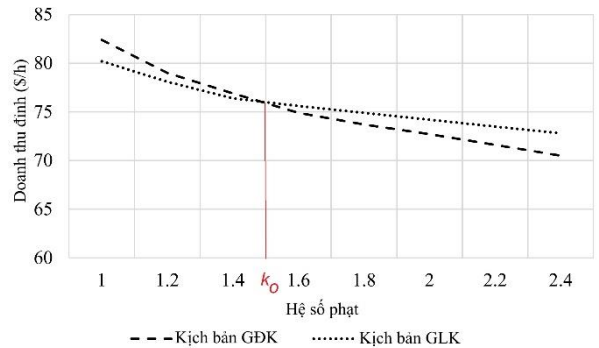
**3.3. Kịch bản GLK**



**Hình 12.** PDF từng trang trại gió nút 5, nút 11 và PDF tổ hợp

Khi các nguồn điện gió liên kết với nhau, trong kịch bản này xét hai nguồn điện gió tại nút 5 và 11, PDF của tổ hợp hai nguồn điện gió được xác định trên Hình 12. Hình dạng của đường cong là tương tự từng trang trại gió, nhưng có đỉnh thấp hơn một chút và độ dốc thoải hơn về hai phía so với xác suất gốc.

Đánh giá doanh thu của việc liên kết này, xét phân tích kết quả doanh thu của trang trại gió nằm ở nút 5 so với kịch bản trước đó, kịch bản gió độc lập, cho kết quả như mô tả trong Hình 13. Đúng như dự đoán, khi tỷ lệ bồi thường trong thị trường điện tăng, doanh thu ở tất cả các kịch bản đều giảm. Tuy nhiên, việc liên kết hai trang trại gió cho thấy doanh thu giảm vừa phải hơn do hiệu ứng bù trừ lẫn nhau giữa các trang trại.



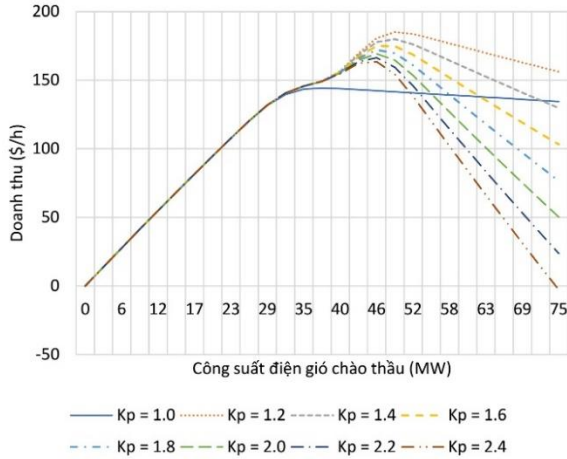
**Hình 13.** So sánh doanh thu hai kịch bản GDK và GLK theo tỷ số bồi thường

**3.4. Kịch bản GNK**

Giả sử nguồn nhiệt điện tại nút 1 liên kết với nguồn điện gió tại nút 5. Lượng công suất dự phòng của nguồn nút 1 xác định dựa vào phân bố công suất tối ưu trên hệ thống khi tất cả các nguồn tham gia. Kết quả doanh thu điện gió nút 5 được mô tả trên Hình 14.

Có một giá trị tỷ lệ phạt mà đường cong doanh thu không thay đổi so với kịch bản trước đó, đó là khi  $k=1,0$ . Còn lại, rõ ràng là hình dạng của đa số các đường cong thể hiện một sự gợn sóng về phía tăng trưởng doanh thu tại vị trí gần đỉnh. Khi giá trị đến bù vượt quá chi phí sản xuất của các nhà máy nhiệt điện, khi đó thay vì để phạt thì sử

dụng nguồn nhiệt điện để bù cho khoản công suất thiếu hụt, dẫn đến đỉnh dòng tiền tăng lên đáng kể. Ví dụ: khi  $k > 1,1$ , doanh thu tối đa sẽ tăng từ dưới 150 USD/h lên trên 180 USD/h. Tuy nhiên, có một điểm giống như các kịch bản trước đây, đó là tỷ lệ bồi thường cao hơn tương ứng sẽ dẫn đến việc giảm đỉnh doanh thu.

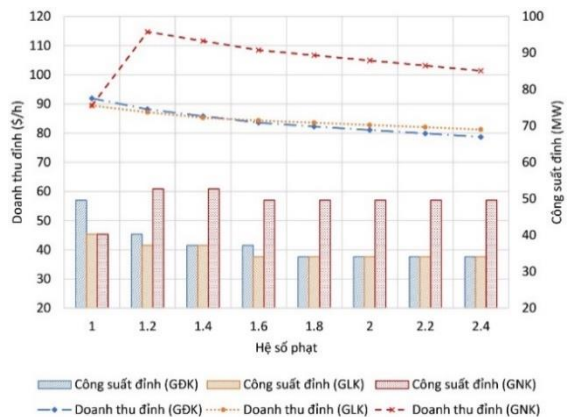


**Hình 14.** Doanh thu nguồn điện gió nút 5 khi có liên kết với nhiệt điện

Ngoài ra, tương ứng với đỉnh doanh thu tăng lên thì công suất đỉnh cũng tăng lên so với các kịch bản trước đây. Cụ thể, công suất đỉnh tăng từ khoảng 60 MW trong kịch bản GDK lên gần 90 MW trong kịch bản này. Đó là sự chắc chắn ngày càng cao bởi sự hỗ trợ của nguồn nhiệt điện, mà tác động của nó càng cao khi mức phạt càng lớn. Do đó, việc chào sản lượng điện gió cao hơn trên thị trường điện trong trường hợp này là lý do dẫn đến sự gia tăng doanh thu cực đại này.

**3.5. Nhận xét**

Một sự so sánh lợi ích của nhà đầu tư điện gió nút 5 từ ba kịch bản theo ba phương thức hoạt động giao dịch thương mại (GDK – hoạt động độc lập; GLK – liên kết giữa hai nguồn điện gió; và GNK – liên kết giữa điện gió và nguồn nhiệt điện). Kết quả doanh thu đỉnh của từng kịch bản biến đổi theo mức độ phạt (hay bồi thường khi thiếu hụt công suất phát điện) cho ở biểu đồ trên Hình 15.



**Hình 15.** So sánh tối ưu của các kịch bản theo tỷ số bồi thường

Với doanh thu đỉnh thể hiện bằng các đường, trên hình cho thấy cả ba kịch bản đều có doanh thu giảm đi khi mức độ phạt thiếu hụt công suất phát điện theo thời gian thực so với kế hoạch chào thầu tăng lên. Mức giảm dường như có

tỷ lệ giảm gần tương đồng nhau, nhưng trong đó có kịch bản liên kết giữa các nhà máy điện gió dường như tốc độ giảm thấp hơn. Điều này giúp cho kịch bản liên kết các điện gió này mang lại lợi nhuận cao hơn khi mức phạt tăng lên.

Trong khi đó, kịch bản liên kết điện gió với nguồn nhiệt điện cho doanh thu tăng cao hơn hẳn so với các kịch bản còn lại khi thị trường điện tồn tại hình thức phạt thiếu hụt công suất khi phát điện so với kế hoạch chào thầu. Như vậy, hiệu quả liên kết sử dụng công suất dự phòng của nhà máy nhiệt điện để bù đắp cho công suất thiếu hụt của điện gió khi cần thiết là đáng khích lệ và nên khai thác triệt để.

Về công suất chào thầu tối ưu của nguồn điện gió được khuyến khích làm sao để mang lại lợi ích lớn nhất cho chủ sở hữu điện gió đó. Trên biểu đồ Hình 15 là biểu đồ thanh đúng, cho thấy trong trường hợp tồn tại phạt, kịch bản liên kết gió với nguồn nhiệt điện có xu hướng khuyến khích chào công suất đỉnh cao hơn so với các kịch bản còn lại. Mức công suất cao hơn lên đến trên 10MW (tức trên 20% công suất định mức của nguồn điện gió). Điều này được lý giải là do chủ điện gió tin tưởng vào việc bù đắp của nguồn nhiệt điện trong liên doanh để chào công suất chắc chắn cao hơn, và như vậy lợi nhuận trực tiếp cho nguồn điện gió tăng lên đáng kể.

**4. Kết luận**

Dự báo chính xác công suất sản xuất của các trang trại gió là một thách thức quan trọng khi tham gia đấu thầu cung cấp điện trong thị trường điện. Việc cắt giảm gần đây các chính sách thúc đẩy phát triển điện gió đã làm tăng thêm những khó khăn mà các chủ trang trại gió phải đối mặt, dẫn đến đầu tư vào các dự án điện gió bị chậm lại, đặc biệt các quốc gia đang phát triển như Việt Nam.

Nghiên cứu này giới thiệu một phương pháp đánh giá và các kịch bản mô hình vận hành liên kết các nhà máy điện, trong đó chủ yếu kết hợp các trang trại gió với nhà máy nhiệt điện nhằm mang lại hiệu quả đầu tư cho cả chủ sở hữu điện gió và phúc lợi xã hội toàn diện hơn trong thị trường điện.

Kết quả khảo sát và thử nghiệm đã cung cấp cái nhìn sâu sắc hơn, tính ưu việt hơn đối với kịch bản thứ ba, kịch bản liên kết giữa điện gió với nhà máy nhiệt điện hiện có. Trong liên kết này, lợi nhuận đỉnh cho các trang trại gió đạt được khi mức phạt của thị trường điện càng tăng cao, đặc biệt khi hệ số bồi thường vượt quá 1,5 thì doanh thu cao hơn kịch bản kế cần ít nhất 10% và lên đến hơn 25% so với kịch bản truyền thống, nguồn gió hoạt động độc lập. Những phát hiện này nhấn mạnh trong mọi hình thức sở hữu hoặc liên kết nguồn điện gió với nguồn nhiệt điện sẽ nâng cao tính chắc chắn của năng lượng gió và mang lại nhiều lợi ích đáng kể hơn trong thị trường điện cạnh tranh, mà các nhà hoạch định chiến lược, các nhà tài phiệt, và cả các nhà quản lý cũng cần quan tâm khai thác.

Ngoài ra, việc chào công suất điện gió cao hơn hẳn so với các kịch bản còn lại, sự liên kết giữa điện gió và nguồn nhiệt điện đã mang lại hiệu quả sử dụng năng lượng tái tạo cao lên đáng kể, giúp khai thác tối đa nguồn năng lượng tái tạo và giúp phát triển bền vững hơn cho lĩnh vực năng lượng tái tạo theo đúng mục tiêu và xu hướng của toàn thế giới.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] REN21 Secretariat, "Renewables 2021 - Global status report", International Energy Agency (IEA), Paris, France, 2021.
- [2] D. Cao *et al.*, "Bidding strategy for trading wind energy and purchasing reserve of wind power producer – A DRL based approach", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 117, pp. 105648, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105648>
- [3] T. J. Hammons, "Integrating renewable energy sources into European grids", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 30, no. 8, pp. 462-475, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2008.04.010>
- [4] N. Wang, J. Li, W. Hu, B. Zhang, Q. Huang and Z. Chen, "Optimal reactive power dispatch of a full-scale converter based wind farm considering loss minimization", *Renewable Energy*, vol. 139, pp. 292-301, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.037>
- [5] J. Li, N. Wang, D. Zhou, W. Hu, Q. Huang, Z. Chen and F. Blaabjerg, "Optimal reactive power dispatch of permanent magnet synchronous generator-based wind farm considering levelised production cost minimisation", *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1-12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.014>
- [6] European Commission, "Energy Prices and Costs in Europe: Report from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions", Brussels, 2020.
- [7] Energy Institute, "The Planning for Vietnam's Power Development for the Period 2021-2030, with a Vision to 2050 (Power Development Plan VIII)", Hanoi, 2023.
- [8] P. Shinde and M. Amelin, "A Literature Review of Intraday Electricity Markets and Prices", *IEEE Milan PowerTech*, 2019, pp. 18938508. doi: 10.1109/PTC.2019.8810752
- [9] H. Holttinen, "Handling of wind power forecast errors in the Nordic power market", *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 2006, pp. 9475028. doi: 10.1109/PMAPS.2006.360288
- [10] J. Dobschinski *et al.*, "The potential of advanced shortest-term forecasts and dynamic prediction intervals for reducing the wind power induced reserve requirements", *Scientific Proceedings of the European Wind Power Conference*, 2010, p. 177-182.
- [11] 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. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.071>
- [12] P. Wais, "A review of Weibull functions in wind sector", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 1099-1107, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.014>
- [13] R. Roy and H. T. Jadhav, "Optimal power flow solution of power system incorporating stochastic wind power using Gbest guided artificial bee colony algorithm", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 562-578, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.010>
- [14] A. Panda and M. Tripathy, "Optimal power flow solution of wind integrated power system using modified bacteria foraging algorithm", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54, pp. 306-314, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.07.018>
- [15] A. Panda and M. Tripathy, "Security constrained optimal power flow solution of wind-thermal generation system using modified bacteria foraging algorithm", *Energy*, vol. 93, no. 1, pp. 816-827, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.083>
- [16] L. Shi, C. Wang, L. Yao, Y. Ni and M. Bazargan, "Optimal Power Flow Solution Incorporating Wind Power", *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 233-241, 2012. doi:10.1109/JSYST.2011.2162896
- [17] O. Alsac and B. Stott, "Optimal Load Flow with Steady-State Security", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol: PAS-93, no. 3, pp. 745-751, 1974. doi: 10.1109/TPAS.1974.293972
- [18] R. Ferrero, S. Shahidehpour and V. Ramesh, "Transaction analysis in deregulated power systems using game theory", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 1340-1347, 1997. doi:10.1109/59.630479
- [19] R. Christie, "Power Systems Test Case Archive", August 1993. [Online]. Available: [https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm). [Accessed: 10 September 2023].