

PHÂN TÍCH VẬT LÝ VỀ HỆ SỐ CÔNG SUẤT CỦA TUABIN GIÓ TRỤC NGANG

PHYSICAL ANALYSIS OF POWER COEFFICIENT IN HORIZONTAL-AXIS WIND TURBINE

Nguyễn Tuấn Anh¹, Nguyễn Hữu Đức^{2,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/huinh5804.2025.117>

TÓM TẮT

Với mục tiêu xây dựng nhiều nhà máy điện gió hơn trên toàn thế giới, cần phải hiểu tất cả các yếu tố vật lý đằng sau quá trình sản xuất điện gió. Điều thú vị nhất của quá trình này là hệ số công suất liên quan đến các đặc điểm thực tế của tuabin gió như một hàm số của công suất được tạo ra. Cho đến nay, hệ số công suất vẫn chưa có dạng chung mà được đưa vào dưới dạng các hàm toán học từ dữ liệu của nhà sản xuất đo được từ các tuabin gió phổ biến trên thế giới. Trong bài báo này, chúng tôi phát triển một phương pháp dựa trên phân tích vật lý để tính giải tích hệ số công suất chung cho nhiều hệ thống sản xuất điện gió của tuabin gió trục ngang (HAWT). Thay vì 12 tham số trong công thức mũ bán thực nghiệm, hệ số công suất chỉ sử dụng 5 tham số với từng ý nghĩa vật lý cụ thể. Chúng tôi cũng bổ sung thêm sự phụ thuộc của hệ số công suất vào các hệ số nâng và đẩy cũng như số lượng cánh của tuabin.

Từ khóa: Hệ số công suất, tuabin gió trục ngang, sản xuất điện gió.

ABSTRACT

With the goal of building more wind power plants worldwide, it is necessary to understand all the physics behind the wind power generation process. The most interesting aspect of this process is the power factor which relates the actual characteristics of the wind turbine as a function of the generated power. Until now, the power factor has not been given a general form but has been introduced as a mathematical function from manufacturer data measured from popular wind turbines around the world. In this paper, we develop a physically based method to analytically calculate the common power factor for a variety of wind power generation systems of horizontal axis wind turbines (HAWT). Instead of 12 parameters in the semi-empirical exponential formula, the power factor uses only 5 parameters with specific physical meanings. We also add the dependence of the power factor on the lift and thrust coefficients as well as the number of turbine blades.

Keywords: Power coefficient, horizontal-axis wind turbine, wind power generation.

¹Khoa Năng lượng mới, Trường Đại học Điện lực Hà Nội

²Khoa Điều khiển và tự động hóa, Trường Đại học Điện lực Hà Nội

*Email: ducnh@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 28/2/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/4/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/5/2025

1. GIỚI THIỆU

Nhu cầu điện toàn cầu ngày càng tăng dẫn đến suy thoái môi trường, biểu hiện bằng lượng khí thải carbon dioxide (CO₂) cao hơn và hiệu ứng nhà kính gia tăng [1, 2]. Sự phụ thuộc của con người vào nhiên liệu hóa thạch, hậu quả là “biến đổi khí hậu” và chi phí năng lượng ngày càng tăng đã thúc đẩy sự quan tâm đến các nguồn thay thế [3]. Các nguồn thay thế này là năng lượng tái tạo và hiện đã góp phần đa dạng hóa sản xuất năng lượng [4, 5] trong đó năng lượng gió và năng lượng mặt trời đang phổ biến hiện nay. Cùng với quá trình gia tăng các dự án điện gió trên thế giới, nhiều dự án đã được triển khai tại Việt Nam, hướng đến mục tiêu tuân thủ Nghị định thư Kyoto và giảm phát thải CO₂ xuống mức 0 vào năm 2050, thậm chí còn có nhiều động lực khác để phát triển các nguồn năng lượng thay thế này.

Mặc dù gió là nguồn năng lượng sạch và vô tận ở khắp mọi nơi trên thế giới, nhưng có những vùng mà nguồn tài nguyên này rất dồi dào. Do đó, việc hiểu được quá trình chuyển đổi năng lượng từ gió sang tua bin là điều cần thiết. Nhiều phương pháp thống kê toán học đã được đề xuất để tính toán mật độ năng lượng gió, tốc độ gió trung bình, công suất tuabin, công suất phát điện và hệ số tải của nó cho nhiều khu vực địa lý cụ thể [6]. Mặc dù điều này cho phép xác định các khu vực phù hợp để lắp đặt các trang trại gió có công suất mong muốn, nhưng nó không phải là phổ biến cho tất cả các loại tua bin gió trên thế giới. Bài báo này hy vọng sẽ tìm ra một quy tắc chung về công suất hữu ích cho tất cả các loại tuabin gió, từ đó đề xuất các thiết kế để xây dựng các tuabin gió mong muốn hoặc đóng góp vào các cuộc khảo sát và đánh giá hiệu quả của các tuabin gió hiện tại.

Quá trình chuyển đổi năng lượng gió thành điện bắt đầu bằng việc gió va chạm với các cánh tuabin, làm quay máy phát điện. Trên thực tế, gió có bản chất ngẫu nhiên, vì vậy các cánh tuabin hấp thụ năng lượng một cách tích

lũy, do đó năng lượng gió cũng là một hàm tích lũy. Sự tích lũy này cung cấp cho chúng ta một công suất hữu ích phù hợp để tạo ra điện. Tỷ số giữa công suất hữu ích mà tuabin nhận được và công suất của gió va chạm với các cánh là hệ số công suất (C_p). Hệ số này đã được Ủy ban Kỹ thuật Quốc tế (IEC) đánh giá là một trong những hệ số quan trọng nhất thể hiện mối quan hệ giữa công suất phát điện thực tế và năng lượng từ gió xung quanh truyền đến các cánh tuabin [7, 8]. Ngoài ra, do bản chất ngẫu nhiên của gió, biên độ điện áp và tần số do máy phát điện tạo ra thay đổi liên tục. Để điều chỉnh điện áp của máy phát điện của tuabin gió để đáp ứng các tải với các giá trị biên độ và tần số được chỉ định theo quy định của một quốc gia, một hệ thống điện tử được sử dụng để thực hiện chuyển đổi này [9, 10]. Từ đó, hệ số mô-men xoắn (C_t) được thêm vào để đánh giá khả năng phát điện của tuabin gió. Hai hệ số này là cần thiết để xác định hiệu quả sản xuất của một tua bin gió hoặc trang trại gió, cùng với các thông số khác như nhiễu loạn không khí, mật độ và nhiệt độ môi trường. Chúng cũng là các hệ số phân biệt một tua bin gió này với tua bin gió khác. Do đó, việc hiểu các đặc điểm của các thông số này giúp thiết kế và vận hành tua bin gió hiệu quả hơn. Nhiều dữ liệu thống kê từ nhiều nơi trên thế giới đã được sử dụng để phân tích tất cả các đặc tính của các thông số này [11, 12]. Hầu hết các số liệu thống kê này cung cấp các hàm toán học được sử dụng để biểu diễn hành vi của hệ số công suất theo hàm của tốc độ gió hữu ích và góc tác động của gió lên cánh quạt, do đó thiết lập các biểu thức chung để phân tích và so sánh tốt hơn.

Hệ số công suất liên quan đến việc mô tả tốc độ gió tại một vị trí hoặc khu vực cụ thể. Hành vi này được phản ánh, ở một mức độ nhất định, trong công suất do máy phát tua bin gió (WTG) cung cấp [13-15]. Do bản chất ngẫu nhiên của gió, hệ số công suất không tuân theo chính xác bất kỳ phân phối thống kê nào đã biết [16, 17]. Do đó, hiện tại cách thông thường để mô tả tốc độ gió tại một vị trí cụ thể là thực hiện các phép đo "tại chỗ", có thể kéo dài trong vài năm. Dữ liệu của nhà sản xuất được sử dụng để phù hợp với các hàm toán học dự kiến gần như ở ba dạng: đa thức, hàm sin và e-mũ [18-25]. Tuy nhiên, đây không phải là phương pháp phổ biến cho tất cả các loại tua-bin, vì nó quá phức tạp và mất nhiều thời gian. Vì vậy, điều này dẫn đến việc áp dụng các hàm phân phối xác suất (PDF). Việc sử dụng các hàm này [26-29] hữu ích hoặc không thể tránh khỏi trong một số nghiên cứu, ví dụ, chuyên môn hóa các nguồn năng lượng gió [30], mô phỏng hành vi WTG [31], phát triển các phương pháp tiếp cận khớp địa điểm [32, 33],... Tuy nhiên, khó khăn nảy sinh trong việc

lựa chọn PDF tốt nhất phù hợp với phân phối tốc độ gió [26, 28]. Các bộ PDF thường được các nhà nghiên cứu sử dụng để nghiên cứu đặc điểm gió tại các địa điểm có gió là hàm Weibull và các phép nội suy của nó (Rayleigh và hàm e-mũ), có vẻ liên quan đến bản chất của gió trong một số điều kiện nhất định [16, 34].

Hàng trăm bài báo đã được viết về phân phối Weibull và ứng dụng của nó vào TWG, đã thu hút sự chú ý của các kỹ sư trong khoảng nửa thế kỷ nay. Hầu như phân phối Weibull được sử dụng toàn diện để phân định tiềm năng năng lượng gió tại một địa điểm đã định. Phân phối Weibull hai tham số là phân phối được sử dụng rộng rãi nhất và được chấp nhận do có phạm vi ứng dụng rộng, tính linh hoạt và tính hữu ích để mô tả sự xuất hiện của tốc độ gió cao. Phân phối Weibull ba tham số cũng đã được sử dụng trong một số nghiên cứu và có tính linh hoạt cao hơn phân phối Weibull hai tham số. Tuy nhiên, một số tác giả đã chỉ ra rằng không nên sử dụng phân phối Weibull theo cách tổng quát, vì nó không thể biểu diễn một số chế độ gió. Câu hỏi đặt ra là, các tham số của phân phối Weibull liên quan như thế nào đến sự tăng trưởng công suất, công suất đỉnh, công suất cắt và góc nghiêng cánh?

Một số lượng lớn các nghiên cứu đã được công bố trình bày việc sử dụng nhiều hàm mật độ xác suất khác nhau để mô tả phân phối tốc độ gió. Tuy nhiên, không có nghiên cứu nào có thể trả lời câu hỏi trên. Để có thể vượt qua câu hỏi này, chúng ta phải bắt đầu bằng phép nội suy đơn giản nhất của phân phối Weibull - phân phối e-mũ.

Ngoài tỷ số tốc độ đầu cánh và góc nghiêng của cánh còn có các thông số khác như hệ số lực cản (hoặc tỷ lệ lực nâng trên lực cản) và số cánh tuabin cũng có ảnh hưởng đến hệ số công suất. Sự ảnh hưởng của lực cản khí động học và số lượng cánh đã được Wilson và cộng sự tính toán [35]. Sự phù hợp của bổ chính này với dữ liệu chính xác đến 0,5% đối với tỷ lệ tốc độ đầu cánh từ 4 đến 20, tỷ lệ lực nâng trên lực cản (l/d) từ 25 đến vô cực và số cánh từ một đến ba. Vì thế bổ chính này được bổ sung vào hệ số công suất trong mô hình của chúng tôi để tăng tính tổng quát.

Bài báo này tập trung vào việc phân tích các tuabin trục ngang và ba cánh vì chúng là những loại phổ biến nhất. Bài báo được tổ chức như sau: Trước hết, nhóm tác giả xem xét các đặc điểm của tuabin gió để xác định các hệ số quan trọng nhất quyết định hoạt động của nó và cung cấp cho từng tuabin trong quá trình chuyển đổi năng lượng gió. Sau đó, chúng tôi xây dựng một mô hình phân tích vật lý được thiết lập dựa trên phân phối tích lũy

gió. Sau khi có được biểu thức giải tích của hệ số công suất, chúng tôi xác định các tham số vật lý trong biểu thức hệ số công suất này và so sánh chúng với các hàm thu được từ dữ liệu của nhà sản xuất của tám tuabin gió đã được đánh giá ở một số nơi phổ biến trên thế giới. Cuối cùng, đánh giá và kết luận về các kết quả khoa học của bài báo được đưa ra.

2. CÁC MÔ HÌNH THỬ NGHIỆM

Gió là chuyển động của không khí trong bầu khí quyển của Trái Đất và nó tạo ra năng lượng

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

trong đó, ρ là mật độ không khí, v là tốc độ gió, A là mặt cắt ngang hình tròn của diện tích quét được bao phủ bởi các cánh tuabin $A = \pi R^2$, và R là bán kính của rôto [36].

Cần lưu ý rằng công suất gió tăng theo lũy thừa bậc ba của tốc độ gió và do đó tốc độ gió là một trong những yếu tố quyết định khi muốn sử dụng năng lượng gió.

Có thể sử dụng năng lượng gió thông qua tua-bin gió để tạo ra điện, nhưng năng lượng tạo ra ít hơn nhiều so với năng lượng của luồng gió do tốc độ gió phía sau tua-bin không thể giảm xuống bằng không. Về mặt lý thuyết, có thể khai thác tối đa 59,3% năng lượng có trong gió (gọi là Định luật Betz, do Albert Betz phát hiện năm 1919 [37]. Giá trị của tỷ số giữa công suất khai thác từ gió và công suất gió được gọi là hệ số công suất (C_p). Do đó, công suất trong tua-bin (P_t) là:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2)$$

Hệ số công suất (C_p) phụ thuộc vào một số thông số, chẳng hạn như loại tuabin (trục ngang hoặc trục dọc), số lượng cánh (trong trường hợp trục ngang), tỷ lệ lực nâng trên lực cản (C_l/C_d), tốc độ cụ thể hoặc tỷ lệ tốc độ đầu cánh ($\lambda = R\omega/v$, trong đó ω là tốc độ quay của tua-bin) và góc nghiêng của cánh (θ) [38].

Trên thực tế, $C_p(\lambda, \omega)$ khác nhau tùy thuộc vào trường hợp cụ thể của tuabin gió thương mại. Thông thường, các nhà sản xuất đo lường và cung cấp dữ liệu trong đó các hành vi C_p được biểu diễn dưới dạng đồ thị. Sau đó, các đồ thị này được sử dụng để có được các phép tính gần đúng toán học (tức là bằng cách khớp với các hàm mong đợi). Các phép tính này được thực hiện bằng các phép tính gần đúng số tối ưu [39], hầu như được thể hiện thông qua ba dạng toán học:

- Các hàm đa thức
- Các hàm sin

• Các hàm e-mũ

Nghiên cứu [40] có một số bình luận về hệ số công suất của HAWT được lắp vào ba dạng trên. Việc lắp vào các dạng đa thức chỉ phụ thuộc vào λ , vì coi θ là hằng số và chúng thường được sử dụng trong các tua-bin gió công suất thấp, nơi θ không được kiểm soát. Ngoài ra, trong một số trường hợp, cần phải giới hạn λ để hệ số công suất khả thi và hợp lệ. Đối với các giá trị λ lớn hơn giới hạn, hệ số này không xảy ra trong các tuabin thực [41].

Việc lắp ghép dựa trên các hàm sin cũng có nhược điểm là cần giới hạn giá trị λ cho mỗi hệ số công suất. Ngoài ra, đối với các giá trị cao của cả λ và θ , một số hệ số công suất có vấn đề như giảm và tăng trở lại hoặc ngược lại, điều này không phù hợp với các tua-bin gió thực tế. Trong một số trường hợp khác, hệ số công suất có vẻ phù hợp hơn, nhưng chúng có xu hướng vô cực khi thay đổi cả λ và θ [42].

Đối với các hệ số theo hàm e-mũ, có sự đa dạng đáng kể, nhưng tất cả đều có cùng quy tắc bắt đầu từ 0 đối với $\lambda = 0$ và tăng dần và đạt đến điểm cực đại rồi giảm dần đến 0 tại λ lớn. Điều này không xảy ra trong hầu hết các trường hợp dữ liệu được lắp vào dạng đa thức hoặc sin. Hơn nữa, đối với các giá trị khác không của θ , giá trị cực đại của C_p giảm mạnh hơn khi θ lớn hơn, do đó đánh giá hiệu suất thực của tuabin. Hơn nữa, các hành vi quan sát được của các hệ số mô-men xoắn cũng phù hợp với thực tế [18-25].

Do đó, thông qua việc đánh giá ba loại hàm phân tích trên, tất cả các hệ số công suất được thể hiện dưới dạng hàm e-mũ đều phù hợp nhất với các tua-bin gió thực tế và được nhóm thành một phương trình tổng quát được thể hiện như tóm tắt trong [40]:

$$C_p(\lambda, \theta) = c_0 \left(\frac{c_1}{\lambda} - c_2 \theta - c_3 \theta \tilde{\lambda} \right) e^{-\frac{c_7}{\lambda}} + c_8 \lambda \quad (3)$$

trong đó

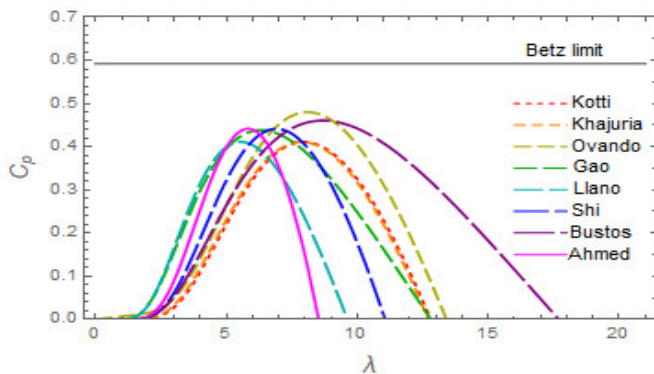
$$\frac{1}{\tilde{\lambda}} = \frac{1}{\lambda + c_9 \theta + c_{10}} - \frac{c_{11}}{1 + \theta^3} \quad (4)$$

và các tham số c_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 11$) của biểu thức này được xác định bởi các nghiên cứu [18 - 25] và chúng được hiển thị trong bảng 1.

Tám hệ số công suất này là các hàm phụ thuộc vào λ với $\theta = 0$ được thể hiện trong hình 1. Từ hình vẽ, chúng ta nhận ra rằng không có hệ số nào vượt quá giới hạn Betz. Tất cả các hệ số công suất đều có quy tắc chung là bắt đầu từ 0 và tăng cho đến khi đạt đến điểm cực đại rồi giảm xuống 0 tại λ lớn.

Bảng 1. Các tham số của hệ số lũy thừa trong các hàm mũ [40]

Refs.	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}
Kotti [18]	0,5	116	0	0,4	0	0	5	21	0	0,08	0	0,035
Khajuria [19]	0,5	116	0,4	0	0	0	5	21	0	0	0,088	0,035
Ovando [20]	0,518	116	0,4	0	0	0	5	21	0,007	0,08	0	0,035
Gao [21]	0,22	116	0,4	0	0	0	5	12,5	0	0,08	0	0,035
Llano [22]	0,5	72,5	0,4	0	0	0	5	13,13	0	0,08	0	0,035
Shi [23]	0,73	151	0,58	0	0,002	2,14	13,2	18,4	0	0,02	0	0,003
Bustos [24]	0,44	125	0,4	0	0	0	6,94	17,05	0	0,08	0	0,001
Ahmed [25]	1	110	0,4	0	0,002	2,2	9,6	18,4	0	0,02	0	0,03



Hình 1. Hệ số lũy thừa dựa trên hàm mũ [40]

Tất cả các hàm trên mô tả hệ số công suất của HAWT đều được điều chỉnh từ dữ liệu thực nghiệm. Mặc dù các kết quả này tốt cho các HAWT cụ thể đặc trưng cho một khu vực nhất định, nhưng chúng không mô tả tất cả các HAWT được lắp đặt trên toàn thế giới. Vì lý do này, vấn đề là làm thế nào để tìm ra một biểu thức chung cho tất cả các loại HAWT được lắp đặt và sẽ được lắp đặt ở bất kỳ đâu trên trái đất. Dưới đây, chúng ta sẽ cố gắng tìm hàm này dựa trên phân tích vật lý và tìm hiểu ý nghĩa của các tham số trong hàm.

3. MÔ HÌNH DỰA TRÊN PHÂN TÍCH VẬT LÝ

Dựa trên vật lý, công suất nhận được trong tuabin (P_t) có thể được biểu thị bằng cách sử dụng phân phối tích lũy theo hàm e-mũ cho tốc độ gió hữu ích v như sau:

$$P_t(v) = \int_0^v P_w(u)f(u)du \quad (5)$$

trong đó

$$P_w(u) = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (6)$$

là công suất gió mà

$$f(u) = \frac{1}{\zeta} e^{-\frac{u-\mu}{\zeta}} \quad (7)$$

là hàm mật độ xác suất e-mũ. Ở đây, ζ là hệ số tỷ lệ và μ là tham số vị trí.

Phương trình (5) có ý nghĩa vật lý như sau: với tốc độ gió v cho trước và do đó là công suất gió P_w , công suất tuabin nhận được là năng lượng tích lũy tương ứng với phân phối đặc trưng. Phân phối chung nhất phù hợp với trường hợp này là phân phối Weibull [34]. Ở đây, chúng tôi sử dụng phép xấp xỉ đơn giản nhất của phân phối này - phân phối e-mũ.

Lấy tích phân (5) theo phương pháp giải tích, ta thu được:

$$P_t(v) = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (8)$$

trong đó

$$C_p = C_b e^{\frac{\mu}{\zeta}} \left[6 \frac{\zeta^3}{v^3} - e^{-\frac{v}{\zeta}} \left(1 + 3 \frac{\zeta}{v} + 6 \frac{\zeta^2}{v^2} + 6 \frac{\zeta^3}{v^3} \right) \right] \quad (9)$$

Ở đây, C_b là hiệu chỉnh do ảnh hưởng bởi số cánh và hệ số lực nâng và lực cản ($C_b \leq 1$).

Đặt $\zeta = v_t/\chi$, $v_t = \omega R$, χ là một tham số trung gian và $\mu = \bar{v}$, thì

$$\frac{\mu}{\zeta} = \frac{\chi}{\bar{v}} \quad (10a)$$

$$\frac{v}{\zeta} = \frac{\chi}{\bar{v}} \quad (10b)$$

Trong đó, $\lambda = v_t/v$, $\bar{\lambda} = v_t/\bar{v}$.

Đặt $\eta = \mu/\zeta$ và $y = v/\zeta$, sau đó thay vì các tham số μ , ζ (hoặc χ), và biến v chúng ta có một tham số mới η và một biến mới y . Như vậy, phương trình (9) trở thành

$$C_p = C_b e^{\eta} \left[\frac{6}{y^3} - e^{-y} \left(1 + \frac{3}{y} + \frac{6}{y^2} + \frac{6}{y^3} \right) \right] \quad (11)$$

So sánh với (3) và (4), chúng ta đi đến

$$y = \alpha \left(\frac{1}{\lambda + \gamma \theta} - \frac{\beta}{1 + \theta^3} \right) \quad (12)$$

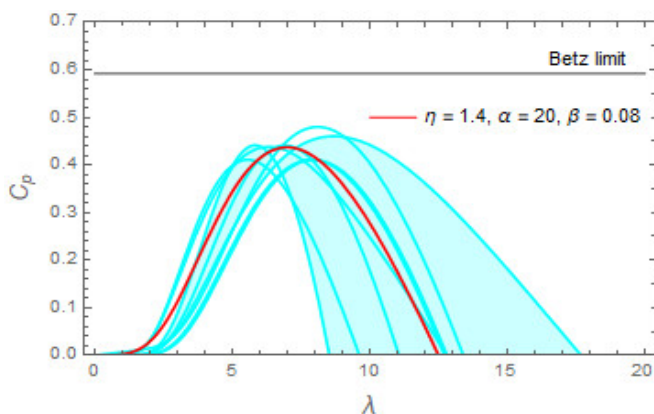
Theo mô hình khí động học, lực cản của cánh và tổn thất ở đầu cánh làm giảm hệ số công suất của tua-bin gió. Hệ số công suất tối đa có thể đạt được đối với tuabin có hình dạng cánh tối ưu nhưng số lượng cánh và lực cản khí

động học hữu hạn đã được [35] tính toán. Sự phù hợp của chúng với dữ liệu chính xác đến 0,5% đối với tỷ lệ tốc độ đầu cánh từ 4 đến 20, đối với tỷ lệ lực nâng trên lực cản (l/d) từ 25 đến vô cực, và số cánh (b) từ một đến ba:

$$C_b \approx \left[1 + \frac{1.32 + \left(\frac{\lambda-8}{20}\right)^2}{\lambda b^{2/3}} \right]^{-1} - \frac{\lambda}{d(1+2\lambda b)} \quad (13)$$

Phương trình (13) cho thấy rằng ở một tỷ lệ tốc độ đầu cánh nhất định, hệ số C_b tăng lên khi số lượng cánh tăng lên. Hầu hết các tua-bin gió sử dụng hai hoặc ba cánh, trong đó các tua-bin gió hai cánh sử dụng tỷ lệ tốc độ đầu cánh cao hơn các tua-bin gió ba cánh. Nếu không có lực cản, có rất ít sự khác biệt thực tế về C_b giữa các thiết kế hai và ba cánh thông thường. Tác động của tỷ lệ lực nâng trên lực cản đối với hệ số C_b cho rô-to ba cánh cho thấy C_b giảm đáng kể khi lực cản của cánh tăng lên. Có thể thấy rằng việc sử dụng cánh có tỷ lệ lực nâng trên lực cản cao rõ ràng có lợi cho nhà thiết kế cánh.

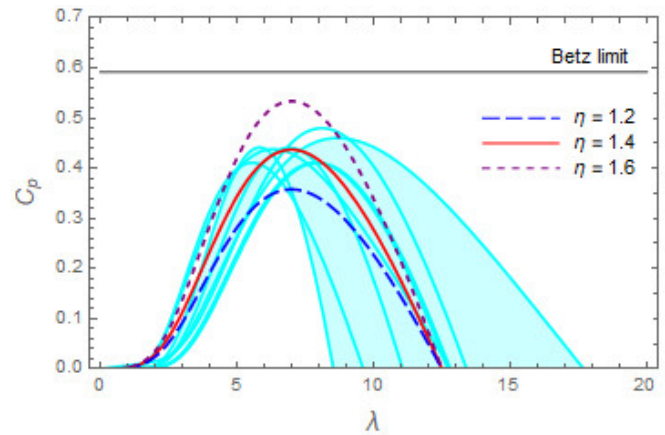
Như vậy, xuất phát từ ý tưởng rằng công suất tuabin được nhận từ quá trình tích lũy công suất gió, ta thu được (11) ở dạng tổng quát cho mọi loại HAWT. Để so sánh với biểu thức gần đúng (3) được gán với một số dữ liệu của nhà sản xuất, trước tiên ta sẽ tìm ra ý nghĩa của các tham số trong (11). Thật tiện lợi khi thay vì 12 tham số trong (3) và (4), mô hình của chúng tôi chỉ cần 4 tham số: η , α , β và γ như thể hiện trong các phương trình (11) và (12). Dưới đây chúng ta sẽ xem xét ý nghĩa của bốn tham số này. Trước tiên, hãy xét trường hợp $d = 0$, $b = 3$, $\theta = 0$ và chọn một bộ ba tham số η , α và β phù hợp trong vùng của tám mô hình bán thực nghiệm trên. Kết quả được thể hiện trong hình 2. Giữ nguyên ba tham số và thay đổi tham số còn lại, ta thu được các hình 3, 4, 5 (với $\theta = 0$).



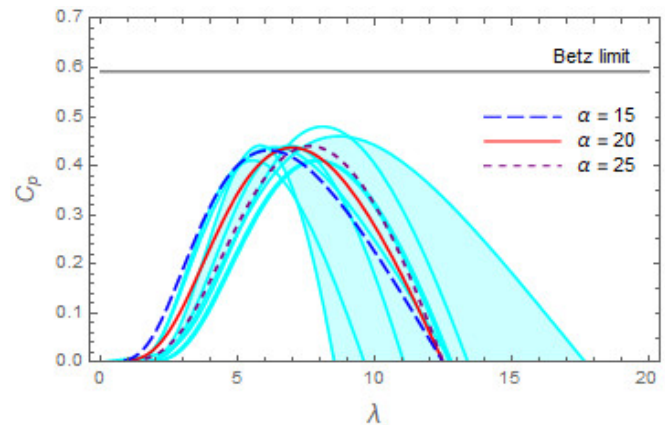
Hình 2. Hệ số công suất cho $\theta = 0$ dựa trên mô hình vật lý của chúng tôi (đường liên màu đỏ). Các đường màu lục lam và vùng tô bóng là các hàm mũ của [18 - 25]

Ba tham số η , α , β thể hiện rõ các tính chất vật lý của C_p cũng như công suất tuabin gió P_t . η liên quan đến độ

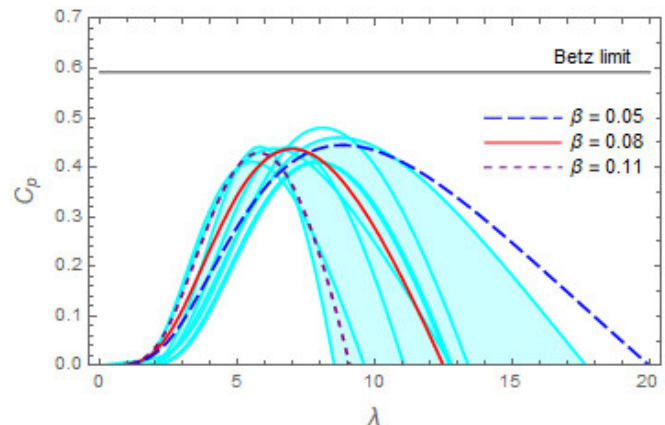
lớn của giá trị cực đại của C_p , tức là liên quan đến giá trị công suất cực đại của tuabin gió. α liên quan đến sự gia tăng của C_p cũng như công suất tuabin gió. Và β liên quan đến điểm cắt của công suất tuabin.



Hình 3. Hệ số công suất cho $\theta = 0$ dựa trên mô hình vật lý của chúng tôi khi η thay đổi. Khi η tăng, giá trị tối đa của C_p cũng tăng



Hình 4. Hệ số công suất cho $\theta = 0$ dựa trên mô hình vật lý của chúng tôi khi α thay đổi. Khi α tăng, độ dốc trong vùng λ nhỏ của C_p giảm



Hình 5. Hệ số công suất cho $\theta = 0$ dựa trên mô hình vật lý của chúng tôi khi β thay đổi. Khi β tăng, điểm ngắt của C_p giảm

So sánh với (3) và (4), ta thấy rằng

$$\alpha = c_7, \quad \beta = c_{11}, \quad \gamma = c_9, \quad e^\eta = c_0 c_6 \quad (14)$$

Do đó, tất cả các đường cong bán kính nghiệm thu được bởi [18-25] cũng có thể thu được từ (11) và (12) tương ứng với các tập tham số phù hợp của η , α , β và γ .

Bây giờ chúng ta xét đến sự thay đổi của C_p khi θ khác không. Nhận thấy rằng khi θ tăng, giá trị cực đại của C_p giảm cũng như điểm ngắt của C_p cũng giảm, do đó η và β cần được điều chỉnh như sau:

$$\eta \rightarrow \eta g(\theta) \quad (15a)$$

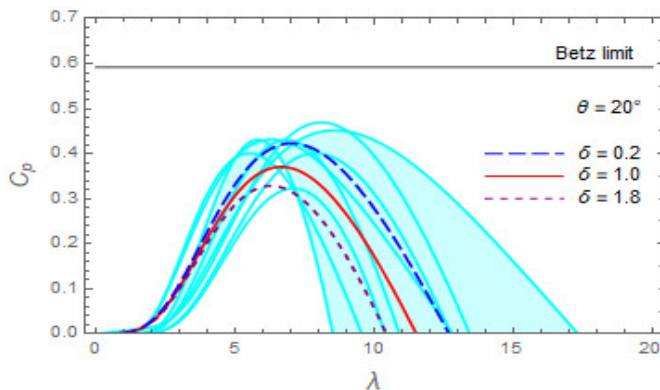
$$\beta \rightarrow \beta g^{-1}(\theta) \quad (15b)$$

trong đó, $g(\theta)$ là hàm hiệu chỉnh thỏa mãn điều kiện $g(\theta) = 1$ khi $\theta = 0$ và $g(\theta) < 1$ khi $\theta \neq 0$ (và g là hàm chẵn của θ).

So sánh với kết quả về sự phụ thuộc của C_p vào θ trong Ref. [40], chúng tôi suy ra hàm hiệu chỉnh $g(\theta)$ theo ansatz đơn giản nhất là:

$$g(\theta) = e^{-\delta\theta^2} \quad (16)$$

trong đó δ là một tham số mới đặc trưng cho ảnh hưởng của góc nghiêng của cánh lên công suất tua bin gió. Ảnh hưởng của tham số δ lên C_p được thể hiện trong hình 6.



Hình 6. Hệ số công suất cho $\theta = 20^\circ$ dựa trên mô hình vật lý của chúng tôi khi δ thay đổi. Khi δ tăng, giá trị cực đại và điểm ngắt của C_p giảm

Do đó, bằng cách yêu cầu giá trị cực đại và điểm ngắt của C_p giảm, tham số thứ năm δ được thêm vào. Lưu ý rằng ở đây tham số thứ tư γ không có bất kỳ đóng góp đáng kể nào, vì vậy trên thực tế chỉ có bốn tham số có ý nghĩa về mặt vật lý: η , α , β và δ .

Từ đây, hàm tổng quát của hệ số công suất là:

$$C_p = C_b e^{\eta g(\theta)} \left[\frac{6}{y^3} - e^{-y} \left(1 + \frac{3}{y} + \frac{6}{y^2} + \frac{6}{y^3} \right) \right] \quad (17)$$

trong đó, C_b được cho bởi (13) và

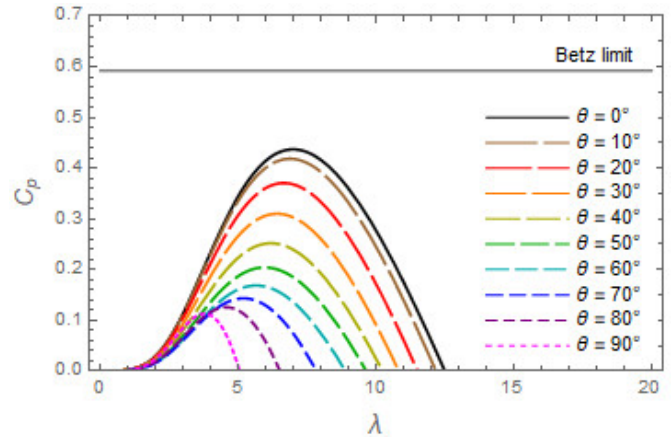
$$y = \alpha \left(\frac{1}{\lambda + \gamma\theta} - \frac{\beta g^{-1}(\theta)}{1 + \theta^3} \right) \quad (18)$$

với giả thiết

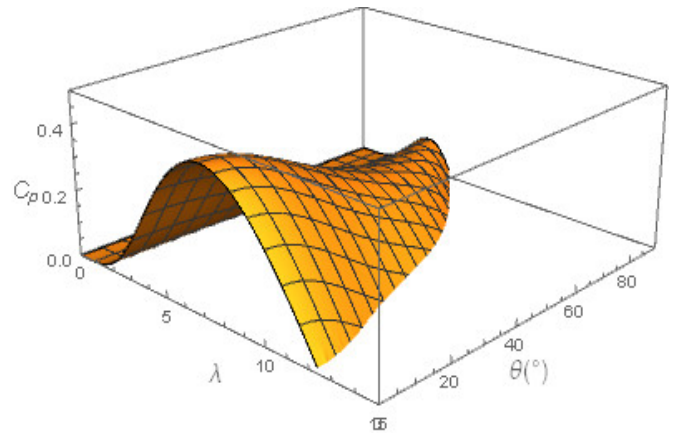
$$g(\theta) = e^{-\delta\theta^2} \quad (19)$$

Tại đây, bốn tham số vật lý α , η , β và δ lần lượt mô tả các thay đổi của độ lớn công suất, đỉnh công suất, điểm cắt công suất và góc nghiêng của cánh.

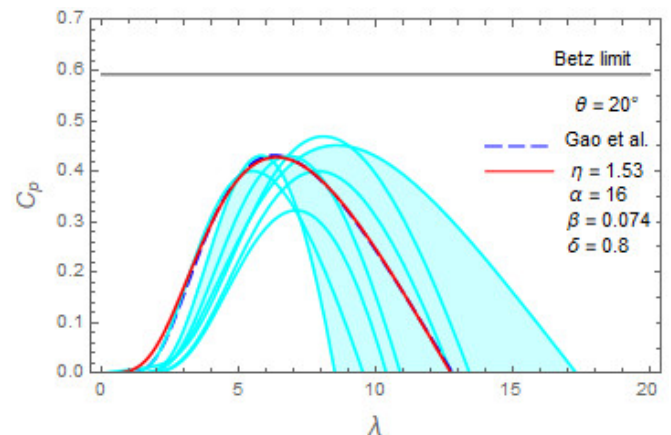
Biến thiên của C_p theo λ và θ với η và β mới trong (15) sử dụng $g(\theta)$ trong (16) với việc chọn $\delta = 1$ được thể hiện trong hình 7 và 8.



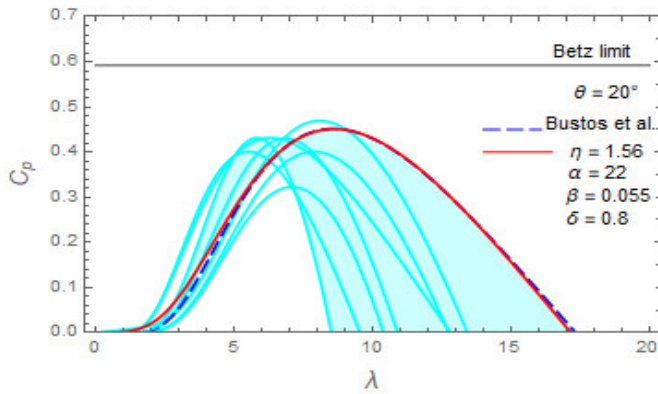
Hình 7. Hệ số công suất cho $\theta \neq 0$ dựa trên mô hình vật lý của chúng tôi khi thay đổi với $\delta = 1$. Khi θ tăng, giá trị cực đại và điểm ngắt của C_p giảm



Hình 8. Hệ số công suất C_p phụ thuộc vào λ và θ dựa trên mô hình vật lý của chúng tôi cho trường hợp $\delta = 1$



Hình 9. Hệ số công suất C_p thay đổi theo λ tại $\theta = 20^\circ$ dựa trên mô hình vật lý của chúng tôi được khớp với Gao và cộng sự [21]



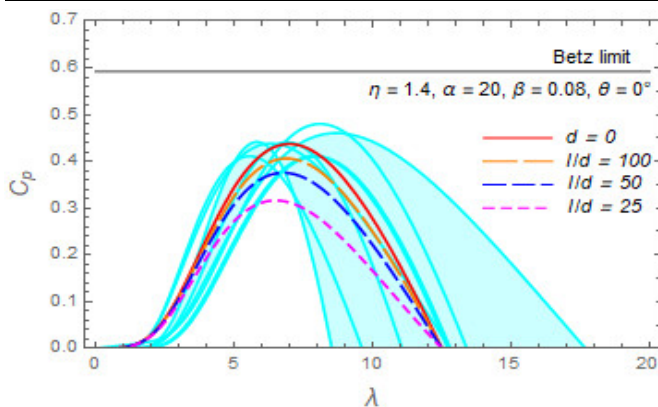
Hình 10. Hệ số công suất C_p thay đổi theo λ tại $\theta = 20^\circ$ dựa trên mô hình vật lý của chúng tôi được khớp với Bustos và cộng sự [24]

Tiếp theo, bằng cách điều chỉnh năm tham số η , α , β , γ và δ này, chúng ta có thể thu được bất kỳ dạng hàm nào của C_p . Ví dụ, các hàm mũ của Gao và cộng sự [21] và Bustos và cộng sự [24] có thể thu được từ hàm phân tích của chúng ta tương ứng với các tập tham số được thể hiện trong hình 9 và 10.

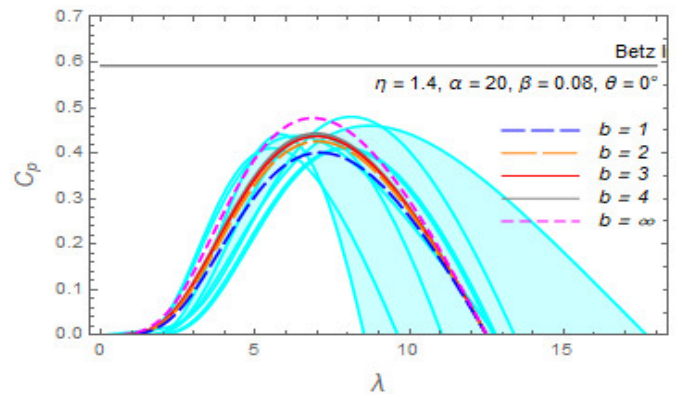
Bảng 2 tóm tắt bốn tham số η , α , β và γ thu được từ các hàm phân tích của chúng tôi trong trường hợp $\delta = 1$ để thu được các hàm thực nghiệm như nghiên cứu [18 - 25].

Bảng 2. Các tham số của hệ số công suất trong các hàm của chúng tôi tại $\delta = 1$ được khớp với các hàm của [18 - 24]

Refs.	η	α	β	γ
Kotti [18]	1,32	27,5	0,078	0,08
Khajuria [19]	1,33	26,5	0,078	0,08
Ovando [20]	1,48	26,5	0,075	0,08
Gao [21]	1,41	15,5	0,078	0,08
Llano [22]	1,36	16,5	0,104	0,08
Shi [23]	1,41	23,2	0,090	0,08
Bustos [24]	1,44	22,0	0,057	0,08
Ahmed [25]	1,42	23,0	0,117	0,08



Hình 11. Hệ số công suất C_p thay đổi theo λ tại các giá trị khác nhau của l/d ứng với số cánh $b = 3$. Hình vẽ chỉ ra hệ số công suất giảm đi khi l/d giảm



Hình 12. Hệ số công suất C_p thay đổi theo λ tại các giá trị khác nhau của số cánh b ứng với trường hợp $d = 0$. Hình vẽ chỉ ra hệ số công suất tăng lên khi số cánh tăng

Cuối cùng chúng ta khảo sát sự phụ thuộc của hệ số công suất C_p vào tỷ lệ lực nâng trên lực cản (l/d) và số cánh tua bin (b). Hình 11 và 12 tương ứng cho thấy sự phụ thuộc của hệ số công suất vào tỷ lệ lực nâng trên lực cản và số cánh tua bin. Các hình này chỉ ra rằng, khi (l/d) và số cánh tua bin tăng lên thì hệ số công suất cũng tăng. Cụ thể là khi lực cản tăng lên thì hệ số công suất bị suy giảm. Đối với số cánh là 2 hay 3 hoặc 4 thì hệ số công suất không khác nhau nhiều.

4. KẾT LUẬN

Việc tính toán WTG là phần quan trọng nhất trong danh mục các dự án trang trại gió sẽ giúp ngành công nghiệp hiểu cách tích hợp đáng tin cậy lượng lớn năng lượng gió vào hoạt động của hệ thống, cũng như nâng cao năng lực cho phép các hệ thống lắp đặt điện gió mới này chủ động cải thiện chất lượng lưới điện. Để quyết định có nên đầu tư vào một nhà máy điện gió đã lên kế hoạch hay không, cần có sự hỗ trợ của dữ liệu tốc độ gió của khu vực đó. Thông thường, phân phối gió của khu vực đó được đo trong nhiều năm. Vì tốc độ gió là một yếu tố biến đổi nên dự kiến sẽ phù hợp với phân phối xác suất. Điều này sẽ giảm thời gian đo lường và giúp đánh giá dự án nhanh hơn.

Trong nghiên cứu này, bằng cách sử dụng hàm phân phối tích lũy theo hàm e-mũ, một mô hình vật lý được suy ra cho công suất của tuabin gió, đặc biệt là hàm hệ số công suất được tìm thấy bằng kết quả tính toán phân tích. Thay vì 12 tham số không có ý nghĩa vật lý trong hệ số công suất được lắp dưới dạng hàm e-mũ theo dữ liệu của nhà sản xuất, hàm phân tích này chỉ có 5 tham số đặc trưng cho các đặc tính của công suất tuabin gió thực tế, chẳng hạn như sự tăng trưởng công suất, đỉnh công suất, điểm ngắt và góc nghiêng của cánh.

Tóm lại, nghiên cứu của chúng tôi đã thu được những kết quả chính sau đây:

1. Một biểu thức phân tích cho hệ số công suất chung cho tất cả các tuabin gió trục ngang được suy ra không phải bằng cách khớp dữ liệu của nhà sản xuất mà bằng cách sử dụng phân phối e-mũ, biến thể đơn giản nhất của phân phối Weibull.

2. Số lượng các tham số chính trong hệ số công suất chỉ có bốn và chúng có ý nghĩa vật lý tương ứng với sự tăng trưởng công suất, đỉnh công suất, điểm ngắt công suất và góc nghiêng của cánh.

3. Sự ảnh hưởng của các hệ số lực nâng và lực cản, cũng như số lượng cánh tua bin lên hệ số công suất, từ đó ảnh hưởng lên công suất phát điện cũng được khảo sát. Đặc biệt số cánh 2, 3, hay 4 không cho thay đổi đáng kể hệ số công suất. Về mặt tối ưu cho thiết kế, số cánh chọn là 3 hợp lý hơn cả vì vừa đảm bảo tính cân bằng động học lại vừa giảm chi phí sản xuất.

Trong bài báo, chúng tôi đã sử dụng phân phối tích lũy e-mũ, để mở rộng nó, chúng tôi có thể sử dụng một hàm phân phối tổng quát hơn, chẳng hạn như phân phối Weibull:

$$f(u) = \frac{\kappa}{\zeta} \left(\frac{u-\mu}{\zeta} \right)^{\kappa-1} e^{-\left(\frac{u-\mu}{\zeta} \right)^{\kappa}}.$$

Với hàm phân phối Weibull, có một tham số cấu hình bổ sung κ . Ý nghĩa của tham số này có thể được sử dụng để điều chỉnh chính xác công suất tuabin gió. Hàm hệ số công suất với các tham số cấu hình bổ sung có thể là một nghiên cứu triển vọng cho chúng tôi trong tương lai.

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi xin cảm ơn các đồng nghiệp tại Khoa Năng lượng mới, trường Đại học Điện lực vì những đóng góp và thảo luận có giá trị của họ liên quan đến các nghiên cứu của chúng tôi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Qadir S.A., et al., "Incentives and strategies for financing the renewable energy transition: A review," *Energy Reports*, 7, 3590, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.041>.
- [2]. Liu Y., Dong K., Jiang Q., "Assessing energy vulnerability and its impact on carbon missions: A global case," *Energy Economics*, 119, 106557, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106557>.
- [3]. Al-Shetwi A.Q., "Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges," *Science of the Total Environment*, 822, 153645, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153645>.
- [4]. Androniceanu A., Sabie O.M., "Overview of green energy as a real strategic option for sustainable development," *Energies*, 15(22), 8573, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15228573>.
- [5]. Chudy-Laskowska K., Pisula T., "An Analysis of the Use of Energy from Conventional Fossil Fuels and Green Renewable Energy in the Context of the European Union's Planned Energy Transformation," *Energies*, 15(19), 7369, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15197369>.
- [6]. Li M., et al., "A wind speed forecasting model based on multi-objective algorithm and interpretability learning," *Energy*, 269, 126778, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126778>.
- [7]. IEC 61400-12-1:2005: Wind Turbines - Part 12-1: Power Performance, Measurements of Electricity Producing Wind Turbines. IEC: Geneva, Switzerland.
- [8]. Xia Y., Ahmed K.H., Williams B.W., "Wind Turbine Power Coefficient Analysis of a new maximum power point tracking technique," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(3), 1122-1132, 2013. <https://doi.org/10.1109/tie.2012.2206332>.
- [9]. Mayilsamy G., et al., "A review of state estimation techniques for Grid-Connected PMSG-Based wind turbine Systems," *Energies*, 16(2), 634, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16020634>.
- [10]. Rekioua D., *Wind power electric systems, Green energy and technology*. Springer-Verlag London, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6425-8>.
- [11]. Hwangbo H., Johnson A., Ding Y., "A production economics analysis for quantifying the efficiency of wind turbines," *Wind Energy*, 20(9), 1501, 2017. <https://doi.org/10.1002/we.2105>.
- [12]. Niu B., et al., "Evaluation of alternative power production efficiency metrics for offshore wind turbines and farms," *Renewable Energy*, 128, 81, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.050>.
- [13]. Carrillo C., et al., "Power fluctuations in an isolated wind plant," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(1), 217, 2004. <https://doi.org/10.1109/tec.2003.822369>.
- [14]. Pidre J.C., Carrillo C.J., Lorenzo A.E.F., "Probabilistic model for mechanical power fluctuations in asynchronous wind parks," *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(2), 761, 2003. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2003.811201>.
- [15]. Carrillo C., Díaz-Dorado E., "PSCAD/ EMTDC-Based Modeling and Flicker Estimation for Wind Turbines," in *Proceedings of the European Wind energy Conference (EWEC '09)*, Marseille, France, 2009.
- [16]. Tuller S., Brett A., "The characteristics of wind velocity that favor the fitting of a Weibull distribution in wind speed analysis," *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 124, 1984.
- [17]. Rocha P.A.C., et al., "Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil," *Applied Energy*, 89(1), 395, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.003>.
- [18]. Kotti R., Janakiraman S., Shireen W., "Adaptive sensorless Maximum Power Point Tracking control for PMSG Wind Energy Conversion Systems.

Paper P1-41," in *Proceedings of the IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Santander, Spain, 1-8, 2014.

[19]. Khajuria S., Kaur J., "Implementation of pitch control of wind turbine using Simulink (Matlab)," *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology*, 1, 196–200, 2015.

[20]. Ovando R.I., Aguayo J., Cotorogea M., "Emulation of a low power wind turbine with a DC motor in Matlab/Simulink," in *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Orlando, FL, USA, 2017.

[21]. Gao F., Xu D.P., Lv Y.G., "Hybrid automaton modeling and global control of wind turbine generator," in *Proceedings of the 7th International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Kunming, China, 2008.

[22]. Llano D., Tatlow M., McMahon R., "Control algorithms for permanent magnet generators evaluated on a wind turbine emulator testing," in *Proceedings of the 7th IET International Conference on Power Electronics*, Manchester, UK, 2014

[23]. Shi G., et al., "Generalized average model of DC wind turbine with consideration of electromechanical transients," in *Proceedings of the IECON 39th Annual Conference of the IEEE*, Vienna, Austria, 2013.

[24]. Bustos G., et al., "Comparison of fixed speed wind turbines models: A case study," in *Proceedings of the IECON 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, Canada, 961–966, 2012.

[25]. Ahmed D., Karim F., Ahmad A., "Design and modeling of low-speed axial flux permanent magnet generator for wind based micro-generation systems," in *Proceedings of the International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering (iCREATE)*, Islamabad, Pakistan, 51-57, 2014.

[26]. Carta J.A., Ramírez P., Velázquez S., "A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 933, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.05.005>.

[27]. Usta I., Kantar Y.M., "Analysis of some flexible families of distributions for estimation of wind speed distributions," *Applied Energy*, 89(1), 355–367, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.045>.

[28]. Celik, A.N., Makkawi A., Muneer T., "Critical evaluation of wind speed frequency distribution functions," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2(1), 2010. <https://doi.org/10.1063/1.3294127>.

[29]. Burton T., et al., *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, 2011. <https://doi.org/10.1002/9781119992714>.

[30]. WasP, *The Wind Atlas Analysis and Application Program* [online], 2024. Available at: <http://www.wasp.dk>.

[31]. Feijoo A.E., Cidras J., Dornelas J.L.G., "Wind speed simulation in wind farms for steady-state security assessment of electrical power systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(4), 1582, 1999. <https://doi.org/10.1109/60.815109>.

[32]. Huang S.J., Wan H.H., "Enhancement of matching turbine generators with wind regime using Capacity Factor Curves strategy," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(2), 551, 2009. <https://doi.org/10.1109/tec.2009.2016153>.

[33]. Hu S.Y., Cheng J.H., "Performance evaluation of pairing between sites and wind turbines," *Renewable Energy*, 32(11), 1934, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.07.003>.

[34]. Edwards P.J., Hurst R.B., "Level-crossing statistics of the horizontal wind speed in the planetary surface boundary layer," *Chaos*, 11(3), 611, 2001. <https://doi.org/10.1063/1.1379310>.

[35]. Wilson R. E., Lissaman P. B. S., Walker S. N., *Aerodynamic Performance of Wind Turbines*. Energy Research and Development Administration, ERDA/NSF/04014-76/1, 1976.

[36]. Wiser R., et al., *The Future of Wind Energy, Part 3* [online], 2016. Available at: https://emp.lbl.gov/sites/default/files/news/future_of_wind_energy_iii.pdf.

[37]. Betz A., "The maximum of the theoretically possible exploitation of wind by means of a wind motor," *Wind Engineering*, 37(4), 441, 2013. <https://doi.org/10.1260/0309-524x.37.4.441>.

[38]. Hau E., Von Renouard H., *Wind turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd edn. Springer Berlin, Heidelberg, 2006. <https://doi.org/10.1007/3-540-29284-5>.

[39]. Nouira I., Khedher A., Bouallegue A., "A Contribution to the Design and the Installation of an Universal Platform of a Wind Emulator Using a DC Motor," *International Journal of Renewable Energy Research*, 2, 797–804, 2012.

[40]. Castillo O.C., et al., "Comparison of power coefficients in wind turbines considering the tip speed ratio and blade pitch angle," *Energies*, 16(6), 2774, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16062774>.

[41]. Arifujaman M., Iqbal M., Quaicoe J.E., "Maximum Power Extraction from a Small Wind Turbine Emulator using a DC-DC Converter Controlled by a Microcontroller," in *International Conference on Electrical and Computer Engineering*, Dhaka, Bangladesh, 213-216, 2006.

[42]. Merahi F., Mekhilef S., Berkouk E.M., "DC-Voltage regulation of a five levels neutral point clamped cascaded for wind energy conversion system," in *4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Hiroshima, Japan, 2014.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Tuan Anh¹, Nguyen Huu Duc²

¹Faculty of New Energy, Electric Power University, Vietnam

²Faculty of Control Engineering and Automation, Electric Power University, Vietnam