

MAXIMUM POWER POINT TRACKING CONTROL OF A WIND GENERATOR BASED ON PID CONTROLLER AND PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM

Ho Duc Loc, Huynh Chau Duy*

HUTECH University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 17/3/2025	This paper proposes a maximum power point tracking control method for a doubly-fed induction generator in a wind power system to optimize power generation. A PID controller is used to regulate the rotor current, thereby adjusting the electromagnetic torque of the doubly-fed induction generator to achieve maximum power output. To enhance control performance, a particle swarm optimization algorithm is applied to automatically determine the optimal parameters K_p , K_i , and K_d of the PID controller. Simulation results demonstrate that the proposed method enables significantly improved maximum power point tracking compared to a conventional PID controller, especially under rapidly and continuously varying wind speeds. The average maximum power point tracking error using the particle swarm optimization algorithm-optimized PID controller and the conventional PID controller is 0.83% and 7.1%, respectively. This demonstrates the effectiveness of combining the PID controller with the particle swarm optimization algorithm in controlling the maximum power point tracking of the doubly-fed induction generator, contributing to improved wind energy harvesting efficiency, as well as enhancing the stability and reliability of the wind turbine power system.
Revised: 26/5/2025	
Published: 26/5/2025	
KEYWORDS	
Power control	
Maximum power point	
Wind generator	
PID	
Particle swarm optimization algorithm	

ĐIỀU KHIỂN BẮM ĐIỂM CÔNG SUẤT CỰC ĐẠI CỦA MÁY PHÁT ĐIỆN GIÓ VỚI BỘ ĐIỀU CHỈNH PID VÀ THUẬT TOÁN TỐI ƯU HÓA BẦY ĐÀN

Hồ Đức Lộc, Huỳnh Châu Duy*

Trường Đại học Công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 17/3/2025	Bài báo này đề xuất một phương pháp điều khiển bám điểm công suất cực đại cho máy phát điện không đồng bộ nguồn kép trong hệ thống điện gió nhằm tối ưu hóa công suất phát. Bộ điều chỉnh PID được sử dụng để kiểm soát dòng điện rotor, từ đó điều chỉnh mô-men điện từ của máy phát điện nhằm đạt công suất tối đa. Đề cải thiện hiệu suất điều khiển, thuật toán tối ưu hóa bầy đàn được áp dụng để xác định các tham số tối ưu K_p , K_i và K_d của bộ điều chỉnh PID một cách tự động. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất giúp máy phát điện bám điểm công suất cực đại tốt hơn đáng kể bằng bộ điều chỉnh PID cùng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn so với PID thông thường, đặc biệt trong điều kiện tốc độ gió thay đổi liên tục và lớn. Sai số trung bình bám điểm công suất cực đại sử dụng bộ điều chỉnh PID với thuật toán tối ưu hóa bầy đàn và PID thông thường lần lượt là 0,83% và 7,1%. Điều này chứng minh hiệu quả của việc kết hợp bộ điều chỉnh PID với thuật toán tối ưu hóa bầy đàn trong điều khiển máy phát điện, góp phần nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng gió, cũng như tăng tính ổn định và độ tin cậy cho hệ thống điện tuabin gió.
Ngày hoàn thiện: 26/5/2025	
Ngày đăng: 26/5/2025	
TỪ KHÓA	
Điều khiển công suất	
Điểm công suất cực đại	
Máy phát điện gió	
PID	
Thuật toán tối ưu hóa bầy đàn	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12331>

* Corresponding author. Email: hc.duy@hutech.edu.vn

1. Giới thiệu

Nhiên liệu hóa thạch được sử dụng để sản xuất điện năng như than đá, dầu mỏ, khí tự nhiên đang cạn kiệt và sẽ không thể tái tạo trong thời gian ngắn. Để giải quyết vấn đề này, các nguồn năng lượng tái tạo như điện mặt trời, điện gió, thủy điện, điện thủy triều, điện sóng biển và điện sinh khối có thể thay thế và đảm bảo nguồn cung ổn định và lâu dài [1]. Năng lượng tái tạo giúp giảm lượng phát thải CO₂ đáng kể. Chi phí sản xuất năng lượng tái tạo đang giảm mạnh nhờ công nghệ phát triển. Trong số các nguồn năng lượng tái tạo, năng lượng gió ngày càng được sử dụng một cách phổ biến. Điều này khẳng định vai trò quan trọng của năng lượng gió trong cơ cấu nguồn năng lượng tái tạo nói riêng và cơ cấu nguồn của hệ thống điện nói chung.

Năng lượng gió là dạng năng lượng tái tạo được tạo ra từ sự chuyển động của không khí trong khí quyển. Các tuabin gió chuyển đổi động năng của gió thành điện năng, giúp cung cấp năng lượng sạch và bền vững. Nguyên lý chuyển đổi năng lượng gió thành năng lượng điện được dựa trên việc gió làm quay cánh quạt của tuabin, cánh quạt truyền động đến trục chính mà được kết nối với máy phát điện, máy phát điện chuyển đổi cơ năng thành điện năng. Khi ấy, máy phát điện gió là một trong những thành phần chính có ảnh hưởng lớn đến năng lượng điện thu được. Trong đó, máy phát điện không đồng bộ nguồn kép (KĐBANK) ngày càng được sử dụng phổ biến trong hệ thống điện tuabin gió với các ưu điểm liên quan đến hiệu suất, chi phí và đặc biệt là khả năng cho phép điều chỉnh cả công suất tác dụng và công suất phản kháng. Máy phát điện KĐBANK nhận được nhiều quan tâm liên quan đến các nghiên cứu điều khiển tối ưu công suất như chiến lược điều khiển dòng điện từ hóa của máy phát điện KĐBANK [2], chiến lược điều khiển công suất cơ của máy phát điện KĐBANK [3], chiến lược điều khiển bộ biến đổi phía rotor để cực tiểu các tổn thất công suất của máy phát điện KĐBANK [4], chiến lược điều khiển trượt bậc hai tích phân để đạt được công suất lớn nhất [5], chiến lược điều khiển dự báo mô hình phân tán phân cấp [6], chiến lược điều khiển thích nghi theo mô hình tham chiếu [7], hay chiến lược sử dụng bộ điều khiển H_∞ [8]. Rõ ràng rằng phần lớn các chiến lược điều khiển có cấu trúc phức tạp. Điều này có thể ảnh hưởng đến độ tin cậy và tính bền vững của các kết quả đạt được. Vì vậy, bài báo này đề xuất chiến lược điều khiển bám điểm công suất nhằm tối ưu công suất tác dụng thông qua bộ điều chỉnh PID đơn giản và tin cậy. Thêm vào đó, bài báo cũng đề xuất việc sử dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn để xác định được các giá trị tối ưu của các hệ số điều chỉnh K_p, K_i và K_d trong bộ điều chỉnh PID. Thuật toán tối ưu hóa bầy đàn là một trong những thuật toán tối ưu hóa nhận được nhiều quan tâm và được sử dụng nhiều trong các ứng dụng tối ưu hóa vì các ưu điểm của nó so với các thuật toán tối ưu hóa khác liên quan đến tính đơn giản, tính dễ sử dụng và hiệu quả trong việc tìm kiếm một lời giải tối ưu [9] – [11].

Phần còn lại của bài báo được cấu trúc như sau: Phần 2 trình bày phương pháp nghiên cứu bao gồm mô hình toán của máy phát điện KĐBANK và đề xuất kỹ thuật điều khiển bám điểm công suất cực đại của máy phát điện KĐBANK. Phần 3 là kết quả nghiên cứu và thảo luận. Cuối cùng, phần 4 là kết luận để khẳng định tính hiệu quả của đề xuất điều khiển bám điểm công suất cực đại nhằm đạt công suất phát tối ưu của máy phát điện KĐBANK.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình toán của máy phát điện không đồng bộ nguồn kép

Máy phát điện KĐBANK là loại máy phát điện được sử dụng rộng rãi trong hệ thống điện gió. Máy phát điện KĐBANK có 2 cuộn dây. Cuộn dây stator được kết nối trực tiếp với lưới điện. Cuộn dây rotor được kết nối với lưới điện thông qua bộ biến đổi điện tử công suất hai phía.

Máy phát điện KĐBANK được mô tả bằng mô hình trong hệ tọa độ quay dq. Các phương trình mô tả [12], [13] bao gồm:

Phương trình điện áp stator:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \quad (1)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} - \omega_s \psi_{ds} \quad (2)$$

Phương trình điện áp rotor:

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_r \psi_{qr} \quad (3)$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_r \psi_{dr} \quad (4)$$

Trong đó: V_{ds} , V_{qs} , V_{dr} và V_{qr} : là điện áp stator và rotor theo trục dq; I_{ds} , I_{qs} , I_{dr} và I_{qr} : là dòng điện stator và rotor theo trục dq; ψ_{ds} , ψ_{qs} , ψ_{dr} , và ψ_{qr} : là từ thông stator và rotor; R_s và R_r : là điện trở stator và rotor; ω_s và ω_r : là tốc độ góc của từ trường stator và rotor.

Tốc độ rotor:

$$\omega_r = \frac{\lambda v_w}{R} \quad (5)$$

Trong đó: λ : là tỷ số vận tốc gió; v_w : là tốc độ gió; R : là bán kính cánh quạt.

Phương trình mô-men và động lực học rotor:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_{ds} I_{qs} - \psi_{qs} I_{ds}) \quad (6)$$

Trong đó: T_e : là mô-men điện từ của máy phát điện KĐBNK; p : là số đôi cực của máy phát điện KĐBNK; ψ_{ds} và ψ_{qs} : là từ thông dọc trục và ngang trục stator.

Tốc độ rotor, ω_r tuân theo phương trình động lực học:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - D\omega_r \quad (7)$$

Trong đó: J : là mô-men quán tính của rotor; T_m : là mô-men cơ từ tuabin gió; D : là hệ số ma sát.

2.2. Điều khiển bám điểm công suất cực đại của máy phát điện không đồng bộ nguồn kép

Dựa trên mô tả toán học của máy phát điện KĐBNK, công suất tác dụng, P và công suất phản kháng, Q của máy phát điện này được phép điều chỉnh bằng cách điều khiển dòng điện rotor, I_r .

Công suất của máy phát điện KĐBNK được tính như sau:

Công suất tác dụng:

$$P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (8)$$

Công suất phản kháng:

$$Q = V_{ds} I_{qs} - V_{qs} I_{ds} \quad (9)$$

Trong bài báo này, bộ điều chỉnh PID được sử dụng cho việc điều chỉnh dòng điện, I_{qr} để đạt được tốc độ góc của từ trường rotor tối ưu, $\omega_{r,tu}$.

Quá trình thực hiện bởi bộ điều chỉnh PID được thể hiện như sau:

$$I_{qr} = K_p e_\omega + K_i \int e_\omega dt + K_d \frac{de_\omega}{dt} \quad (10)$$

Trong đó: e_ω : là sai số giữa tốc độ rotor thực tế và tốc độ rotor tối ưu từ việc điều khiển bám điểm công suất cực đại; K_p , K_i và K_d : là các hệ số của bộ điều chỉnh PID.

Bộ điều chỉnh PID điều khiển I_{qr} ; từ đó, thay đổi mô-men điện từ, T_e của máy phát điện KĐBNK và dẫn đến thay đổi tốc độ rotor.

Rõ ràng rằng, trong quá trình sử dụng bộ điều chỉnh PID, việc chọn các hệ số K_p , K_i và K_d gặp nhiều khó khăn. Để khắc phục trở ngại này, bài báo đề xuất sử dụng một thuật toán tối ưu hóa để xác định giá trị tối ưu của các thông số của bộ điều chỉnh, $K_{p,tu}$, $K_{i,tu}$ và $K_{d,tu}$. Một trong các thuật toán tối ưu phổ biến hiện nay là thuật toán tối ưu hóa bầy đàn mà sẽ được chọn và áp dụng cho việc xác định này.

Hàm mục tiêu của bài toán này chính là hàm mục tiêu để đánh giá chất lượng của bộ điều chỉnh PID mà được thực hiện bằng cách tối thiểu hóa sai số giữa công suất thực tế và công suất tại điểm công suất cực đại. Khi ấy, hàm mục tiêu được biểu diễn như sau:

$$F = \int_0^T |P_{tu}(t) - P(t)| dt \quad (11)$$

Các ràng buộc của bài toán bao gồm:

$$K_{p,\min} \leq K_p \leq K_{p,\max} \quad (12)$$

$$K_{i,\min} \leq K_i \leq K_{i,\max} \quad (13)$$

$$K_{d,\min} \leq K_d \leq K_{d,\max} \quad (14)$$

Trong đó: $K_{p,\min}$, $K_{i,\min}$, and $K_{d,\min}$: là các giá trị cực tiểu của các hệ số K_p , K_i , và K_d ; $K_{p,\max}$, $K_{i,\max}$, and $K_{d,\max}$: là các giá trị cực đại của các hệ số K_p , K_i , và K_d .

Thuật toán tối ưu hóa bầy đàn là thuật toán được phát triển bởi Jame Kennedy và Russell Eberhart [9], được lấy cảm hứng từ hành vi di chuyển của đàn chim hoặc cá khi tìm kiếm thức ăn.

Thuật toán được mô tả bởi các phương trình cập nhật vận tốc và vị trí của một cá thể hay lời giải trong quần thể hay trong không gian lời giải [9] – [11].

Phương trình cập nhật vận tốc:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (p_{best,i} - x_i^t) + c_2 r_2 (g_{best} - x_i^t) \quad (15)$$

Phương trình cập nhật vị trí:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (16)$$

Trong đó: ω : là hệ số quán tính; c_1 và c_2 : là hệ số học tập; r_1 và r_2 : là hệ số ngẫu nhiên $\in [0, 1]$; x_i và v_i : là vị trí và vận tốc của cá thể thứ i .

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

Điều khiển bám điểm công suất cực đại của máy phát điện KĐBANK được thực hiện bằng bộ điều chỉnh PID. Trong đó, các hệ số của bộ điều chỉnh PID được xác định bằng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn. Các thông số của máy phát điện KĐBANK được trình bày trong Bảng 1 [14]. Giới hạn của các hệ số của bộ điều chỉnh PID được giới thiệu trong Bảng 2. Thuật toán tối ưu hóa bầy đàn được áp dụng để xác định các hệ số của bộ điều chỉnh PID. Các thông số của thuật toán tối ưu hóa bầy đàn được minh họa trong Bảng 3. Khi ấy, các thông số của bộ điều chỉnh PID đạt được bằng sử dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn trong thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 1. Thông số của máy phát điện KĐBANK

Thông số	Giá trị
Bán kính cánh quạt (m)	40
Hệ số vận tốc đầu cánh quạt tối ưu	8,1
Mật độ không khí (kg/m^3)	1,225
Hệ số công suất tối đa	0,48
Mô-men quán tính của rotor (kg.m^2)	0,015
Hệ số ma sát	0,002
Công suất định mức (MW)	1,5
Điện áp stator (V)	690
Tốc độ gió biến đổi (m/s)	0 – 20

Bảng 2. Giới hạn của các hệ số của bộ điều chỉnh PID

Hệ số	Giá trị cực tiểu	Giá trị cực đại
K_p	0,1	10
K_i	0,1	10
K_d	0,001	1

Bảng 3. Thông số của thuật toán tối ưu hóa bầy đàn

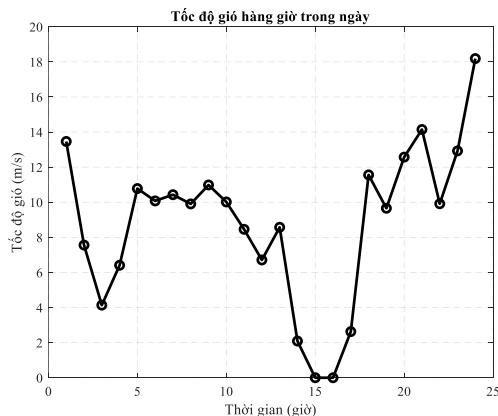
Thông số	Giá trị
Kích thước quần thể	50
Số vòng lặp tối đa	200
Hệ số quán tính	0,5
Hệ số học tập cá nhân	2
Hệ số học tập toàn cục	2

Bảng 4. Thông số bộ điều chỉnh PID

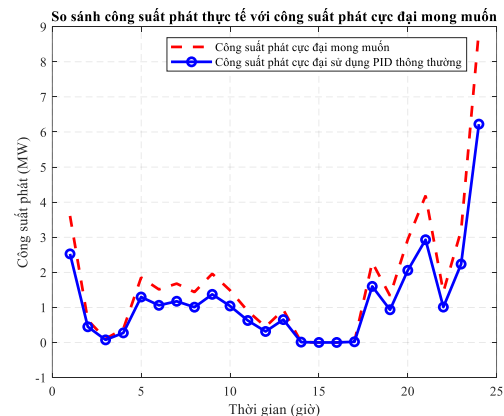
Hệ số	PID thông thường	PID sử dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn
K_p	1	2,2
K_i	0,8	1,5
K_d	0,05	0,1

Tốc độ gió hàng giờ trong ngày được giả sử thay đổi và biểu diễn như Hình 1. Khi ấy, công suất phát tối ưu sử dụng bộ điều chỉnh PID thông thường và PID với thuật toán tối ưu hóa bầy đàn được thể hiện trong Hình 2 và Hình 3 mà lần lượt được so sánh với đặc tuyến của tập hợp các điểm công suất cực đại của máy phát điện KĐBNK. Sai số trung bình bám điểm công suất cực đại sử dụng bộ điều chỉnh PID thông thường và PID với thuật toán tối ưu hóa bầy đàn lần lượt là 7,1% và 0,83%. So sánh này cũng được minh họa ở Hình 4 cho thấy hiệu quả của đề xuất bằng cách sử dụng bộ điều chỉnh PID với thuật toán tối ưu hóa bầy đàn cho việc xác định các hệ số của bộ điều chỉnh.

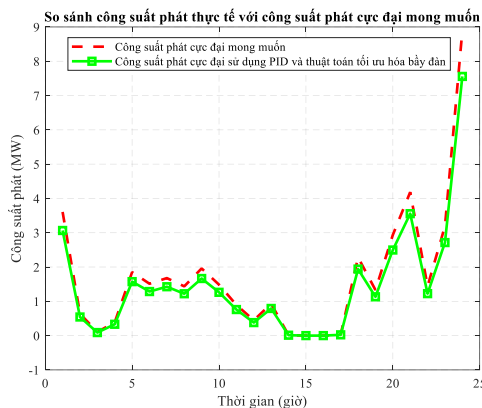
Bằng việc sử dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn, các hệ số điều chỉnh tối ưu của bộ điều chỉnh PID đạt được lần lượt là $K_p = 2,2$; $K_i = 1,5$ và $K_d = 0,1$ đã giúp cải thiện đáng kể khả năng bám điểm công suất cực đại của máy phát điện KĐBNK, đặc biệt trong điều kiện tốc độ gió thay đổi liên tục và lớn từ 0 – 20 (m/s) trong 24 giờ.



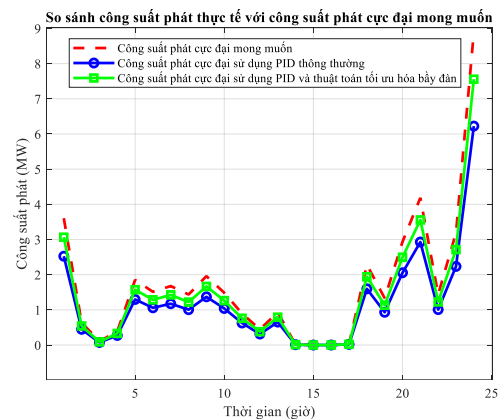
Hình 1. Tốc độ gió hàng giờ trong ngày



Hình 2. Công suất phát tối ưu sử dụng bộ điều chỉnh PID thông thường



Hình 3. Công suất phát tối ưu sử dụng bộ điều chỉnh PID với thuật toán tối ưu hóa bầy đàn



Hình 4. So sánh công suất phát tối ưu sử dụng bộ điều chỉnh PID thông thường và PID với thuật toán tối ưu hóa bầy đàn

4. Kết luận

Bài báo đã đề xuất một phương pháp điều khiển bám điểm công suất cực đại cho máy phát điện KĐBNK sử dụng bộ điều chỉnh PID kết hợp với thuật toán tối ưu hóa bầy đàn. Phương pháp này giúp tối ưu hóa việc điều chỉnh dòng điện rotor nhằm đạt công suất phát tối đa của hệ thống điện tuabin gió. Các kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng việc sử dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn để xác định các tham số tối ưu của bộ điều chỉnh PID giúp cải thiện đáng kể hiệu suất bám điểm công suất cực đại so với bộ điều chỉnh PID thông thường. Sai số bám điểm công suất

giảm đáng kể, cho thấy phương pháp đề xuất giúp nâng cao hiệu suất khai thác năng lượng gió. Hơn nữa, phương pháp này không chỉ cải thiện độ chính xác trong điều khiển công suất mà còn góp phần tăng tính ổn định và tin cậy cho hệ thống điện tuabin gió. Trong tương lai, nghiên cứu có thể được mở rộng bằng cách thử nghiệm các thuật toán tối ưu hóa khác và áp dụng mô hình điều khiển nâng cao để tiếp tục nâng cao hiệu suất hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] D. C. Huynh, L. D. Ho, and M. W. Dunnigan, "Optimization of economic environmental and social benefits for integrated energy systems," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 1196-1212, 2021.
- [2] S. Gupta and A. Shukla, "Optimal control strategies for loss minimization of wind turbine driven DFIG," *International Conference on Power System Technology*, China, 2021, pp. 1-6.
- [3] D. C. Huynh, K. H. Nguyen, and M. W. Dunnigan, "Development of maximum power point tracking for doubly-fed induction generators in wind energy conversion systems," *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering, Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, vol. 632, pp. 669-679, 2019.
- [4] S. Puchalapalli and B. Singh, "Optimal RSC control for loss reduction in wind turbine driven DFIG-Grid system," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, U.S.A., 2020, pp. 187-192.
- [5] R. K. Kumar and J. Choudhary, "Optimal power extraction of doubly fed induction generator (DFIG) with novel 2nd order integral sliding mode control (SMC) using super twisting algorithm," *IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies*, U.K., 2023, pp. 542-547.
- [6] J. Deng, Y. Song, Y. Gong, and W. Chen, "Hierarchical distributed MPC for optimal active power control of DFIG wind farms," *IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia*, China, 2020, pp. 376-381.
- [7] H. Hamdi, A. Marii, C. B. Regaya, and A. Zaafouri, "A robust approach to an adaptive gain sliding mode controller based on MRAC of a wind power conversion system based on a DFIG," *International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, Malta, 2024, pp. 169-174.
- [8] A. Baltag, G. Livint, A. G. Baci, and S. Bellarbi, "Design of H_∞ robust controllers for wind turbines based on DFIG," *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, Romania, 2022, pp. 621-626.
- [9] A. G. Gad, "Particle swarm optimization algorithm and its applications: A systematic review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, pp. 2531-2561, 2022.
- [10] D. C. Huynh and M. W. Dunnigan, "Parameter estimation of an induction machine using advanced particle swarm optimization algorithms," *IET Journal of Electric Power Applications*, vol. 4, no. 9, pp. 748-760, 2010.
- [11] D. C. Huynh and M. W. Dunnigan, "Advanced particle swarm optimization algorithms for parameter estimation of a single-phase induction machine," *International Journal of Modelling, Identification and Control*, vol. 15, no. 4, pp. 227-240, 2012.
- [12] D. K. Bhutto, J. A. Ansari, S. S. H. Bukhari, and F. A. Chachar, "Wind energy conversion systems (WECS) generators: A review," *International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies*, Pakistan, 2019, pp. 325-330.
- [13] L. Qi and Z. Zhu, "Doubly fed induction generator-based wind power generation: advanced controls and applications," *International Conference on Electrical Engineering and Intelligent Control*, Singapore, 2024, pp. 241-246.
- [14] General Electric, *GE 1.5sle wind turbine product datasheet*, GE Renewable Energy, 2009.