

## XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO HỆ TURBINE PHÁT ĐIỆN GIÓ KHI XÉT ĐẾN CÁC THÀNH PHẦN NHIỀU BẤT ĐỊNH

BUILDING A SLIDE CONTROLLER FOR WIND GENERATOR TURBINE SYSTEM  
CONSIDERING DIFFERENT COMPONENTS

Ngày nhận bài: 27/7/2021, Ngày chấp nhận đăng: 14/9/2021, Phản biện: TS. Phạm Văn Hùng

### Tóm tắt:

*Bài báo trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển trượt cho hệ máy phát điện turbine gió khi tính đến nhiễu loạn gió. Các kết quả được khảo sát đánh giá bằng mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink cho thấy bộ điều khiển này đảm bảo được các yêu cầu chất lượng nguồn phát khi nối lưới, tối ưu hóa quá trình chuyển đổi năng lượng cho tuabin gió.*

**Từ khóa:** *Tuabin gió, điều khiển trượt, nối lưới.*

**Abstract –** *This paper presents the results of synthesizing the sliding controller for wind turbine generator system when taking into account wind disturbance. The survey results evaluated by simulation on Matlab-Simulink software show that this controller ensures the power quality requirements when connecting to the grid, optimizing the energy conversion process for wind turbines.*

**Keywords:** *Wind Turbine, Sliding mode control, grid connection.*

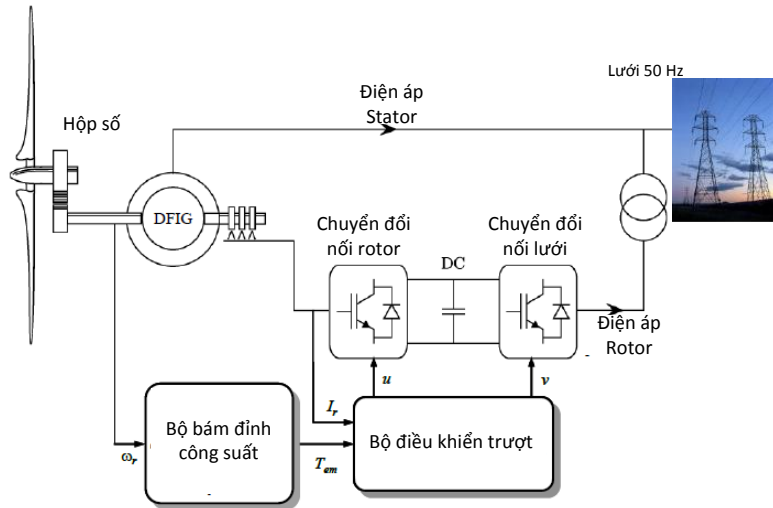
### 1. MỞ ĐẦU

Năng lượng gió là một trong những nguồn năng lượng tái tạo quan trọng, là năng lượng sạch, có mặt khắp nơi trên trái đất, tương đối rẻ hơn các nguồn năng lượng tái tạo khác và có thể được sản xuất và cung cấp điện cho các khu vực xa xôi nơi các lưới điện không nối tới được. Năng lượng gió (wind energy) là một trong những hướng nghiên cứu chính đang được các nhà nghiên cứu trên thế giới và trong nước quan tâm đến [3], [4]. Sự tham gia của máy điện gió đã cung cấp một lượng công suất đáng kể bên cạnh các máy phát cơ bản như nhiệt điện và thủy điện... [6]. Trong đó máy phát điện dị bộ nguồn kép (Doubly-fed induction generator-DFIG) được các hãng sản xuất tuabin gió sử dụng rộng rãi nhờ ưu thế: thiết bị điều khiển sử dụng van

bán dẫn công suất lớn được đặt ở phía rotor nên chỉ cần thiết kế với công suất khoảng 20÷30% công suất của máy phát, dẫn đến giá thành của hệ thống hạ xuống rất nhiều [2]. Mục tiêu điều khiển trong hệ phát điện gió là đạt được hiệu quả tối đa trong khai thác năng lượng gió, tức là phải bám được điểm công suất cực đại MPPT (maximum power point tracking). Bộ điều khiển trượt SMC (sliding mode control) đề xuất dùng điều khiển mô men xoắn nhằm đạt MPPT. Hơn nữa SMC có tính bền vững cao, có khả năng chống lại sự nhiễu loạn và bất định trong các thông số mô hình.

### 2. MÔ HÌNH CƠ HỆ

Xét một mô hình hệ thống điện tổng quát như hình 1 [1].



**Hình 1.** Mô hình máy phát điện gió

Khi gió đi xuyên qua vòng quét của của tuabin sẽ tạo ra các lực tác động vào tuabin. Các lực này bao gồm lực đẩy (tác động vào trụ và các cánh quạt) và mô men xoắn (làm quay rotor). Lực đẩy ( $F_T$ ), mô men xoắn ( $T_r$ ), và công suất cơ  $P_r$ :

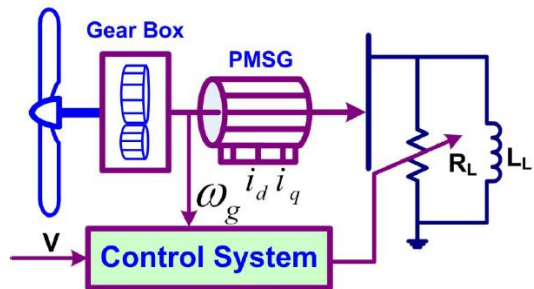
$$\begin{cases} F_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \nu^2 C_T(\lambda, \beta) \\ T_r = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \nu^2 C_Q(\lambda, \beta) \\ P_r = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \nu^2 C_P(\lambda, \beta) \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó  $\rho$  là mật độ không khí,  $R$  là bán kính vòng quét của tuabin gió,  $\nu$  là vận tốc gió,  $C_Q(\lambda, \beta)$  là hệ số mô men,  $C_P(\lambda, \beta)$  là hệ số công suất chuyển đổi. Cả mô men xoắn và công suất cơ chuyển đổi đều là hàm của tỉ số vận tốc rìa  $\lambda$  và góc chúc ngóc  $\beta$ . Tỉ số vận tốc rìa  $\lambda$  là tỉ số giữa vận tốc tại đỉnh rìa cánh quạt của tuabin gió và vận tốc gió, được tính như sau:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{\nu} \quad (2)$$

Trong đó  $\omega_r$  là vận tốc góc của rotor. Các hệ thống năng lượng gió độc lập thường bao gồm tuabin gió và các nguồn năng lượng tái tạo khác như pin ắc quy, máy phát diesel.v.v. Do đó việc điều

khiển cho các hệ thống năng lượng gió độc lập được chia thành nhiều vòng điều khiển để đảm bảo nguồn năng lượng được cung cấp ổn định và liên tục cho các tải cục bộ. Bài báo này chỉ quan tâm thiết kế bộ điều khiển để tối ưu hóa quá trình chuyển đổi năng lượng cho các tuabin gió nên chỉ mô hình hóa động học của tuabin gió, bộ truyền động và máy phát như hình sau:



**Hình 2.** Hệ chuyển đổi năng lượng gió độc lập

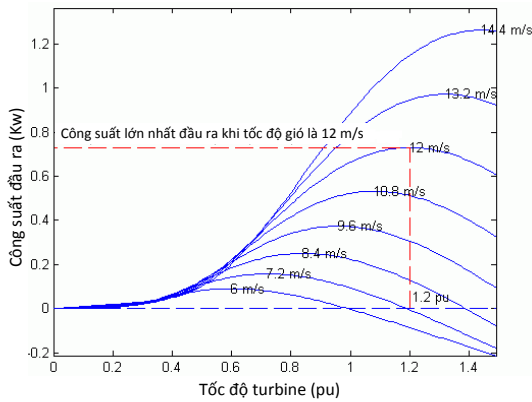
Loại máy phát được sử dụng phổ biến trong các hệ năng lượng gió độc lập là máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu PMSG (permanent magnet synchronous generator). Mô hình toán của máy phát PMSG trong hệ tọa độ  $d, q$  khi trục  $q$  được căn chỉnh với điện áp stato và điện trở stato bị bỏ qua [5]:

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \left( U_{rd} - R_r i_{rd} + s\omega_s \sigma L_r i_{rq} - \frac{T}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \right) \\ \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \left( U_{rq} - R_r i_{rq} + s\omega_s \sigma L_r i_{rd} - s\omega_s \frac{T}{L_s} \phi_{sd} \right) \\ T_{em} = -p \frac{T}{L_s} \phi_{sd} i_{rq} \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó  $i_{rd}, i_{rq}$  là dòng điện d, q của rotor;  $L_r, L_s$  là điện cảm của rotor, stator;  $R_r$  là điện trở của rotor;  $p$  là số cặp cực;  $\Phi_s$  là từ thông;  $\omega_s$  tốc độ góc đồng bộ;  $T_{em}$  là mô men điện từ của máy phát.

### 3. XÂY DỰNG BỘ QUAN SÁT MÔ MEN XOẮN.

Mô men tham chiếu của khối tám đỉnh công suất phải giải quyết vấn đề là tối đa hóa công suất thu được bằng cách theo dõi  $T_{opt}$  mô men xoắn tối ưu.



**Hình 3.** Công suất đầu ra ứng với tốc độ gió

Vùng hoạt động tối ưu của turbine là vùng không bị giới hạn bởi tốc độ tuy nhiên, hệ thống có phi tuyến tính. Vì vậy cần xây dựng bộ điều khiển sao cho kiểm soát là tối ưu hóa thu năng lượng gió và giảm thiểu tác động phi tuyến [5].

Theo [2] có phương trình truyền động của rotor turbine:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - K\omega - T_{em} \quad (4)$$

Trong đó T là mô men do gió sinh ra [1]:

$$T = \frac{1}{2} \pi \rho R^3 C_q(\lambda) v^2$$

Suy ra:

$$\dot{\omega} = \frac{T}{J} - \frac{K\omega}{J} - \frac{T_{em}}{J} \quad (5)$$

Theo đó có hệ phương trình trạng thái:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 - \frac{K}{J} x_1 - \frac{T_{em}}{J} \\ \dot{x}_2 = f t \end{cases} \quad (6)$$

Với  $x_1 = \omega; x_2 = \frac{T}{J}$ ;  $f t$  là đạo hàm của  $x_2$  thời gian.

Theo [7] bộ quan sát HGO (high gain observer) mô men và tốc độ có phương trình:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \varphi \hat{x}, u - \theta \Delta_\theta^{-1} S^{-1} C^T C \hat{x} - x \quad (7)$$

Trong đó:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}; \Delta_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/\theta \end{bmatrix}; S = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Từ đầu ra của bộ quan sát có thể xác định giá trị mô men  $\hat{T} = J \hat{x}_2$ .

### 4. ĐIỀU KHIỂN TỐC BIN ĐIỆN GIÓ TRÊN CƠ SỞ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

Mục tiêu điều khiển của bộ điều khiển là tối ưu hóa công suất đầu ra và giảm dao động momen xoắn [2,5].

Công suất phản kháng được biểu thị như sau:

$$Q_s = \frac{U_s \phi_s}{L_s} - \frac{U_s M}{L_s} I_{rd} \quad (8)$$

Khi công suất phản kháng bằng 0 ta có:

$$\phi_s = \frac{U_s}{\omega_s} \quad (9)$$

$$\text{Do đó: } I_{rd\_ref} = \frac{U_s}{\omega_s M} \quad (10)$$

Đặt các biến sai số dòng điện phản ứng và mô men xoắn:

$$\begin{cases} e_{I_{rd}} = I_{rd} - I_{rd\_ref} \\ e_{T_{opt}} = T_{opt} - \hat{T} \end{cases} \quad (11)$$

Qua biến đổi có:

$$\begin{cases} \dot{e}_{I_{rd}} = \frac{1}{\sigma L_r} \left( U_{rd} - R_r I_{rd} + g\omega_s L_r \sigma I_{rq} - \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \right) - \dot{I}_{rd\_ref} \\ \dot{e}_{T_{opt}} = -p \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_s \begin{pmatrix} U_{rq} - R_r I_{rq} - g\omega_s L_r \sigma I_{rd} \\ -g\omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{sd} \end{pmatrix} - \dot{\hat{T}} \end{cases} \quad (12)$$

Đặt hai hàm  $F_1$  và  $F_2$  như sau:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{\sigma L_r} \left( g\omega_s L_r \sigma I_{rq} - \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \right) - \dot{I}_{rd\_ref} \\ F_2 = -p \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_s \left( -g\omega_s L_r \sigma I_{rd} - g\omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{sd} \right) - \dot{\hat{T}} \end{cases} \quad (13)$$

Đạo hàm bậc 2 biểu thức (12) có:

$$\begin{cases} \ddot{e}_{I_{rd}} = \frac{1}{\sigma L_r} \ddot{U}_{rd} + \dot{F}_1 - \frac{1}{\sigma L_r} R_r \dot{I}_{rd} \\ \ddot{e}_{T_{opt}} = -p \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_s \ddot{U}_{rq} + \dot{F}_2 + p \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_s R_s \dot{I}_{rq} \end{cases} \quad (14)$$

Xây dựng bộ điều khiển trượt cho hệ máy phát điện điện gió có dạng:

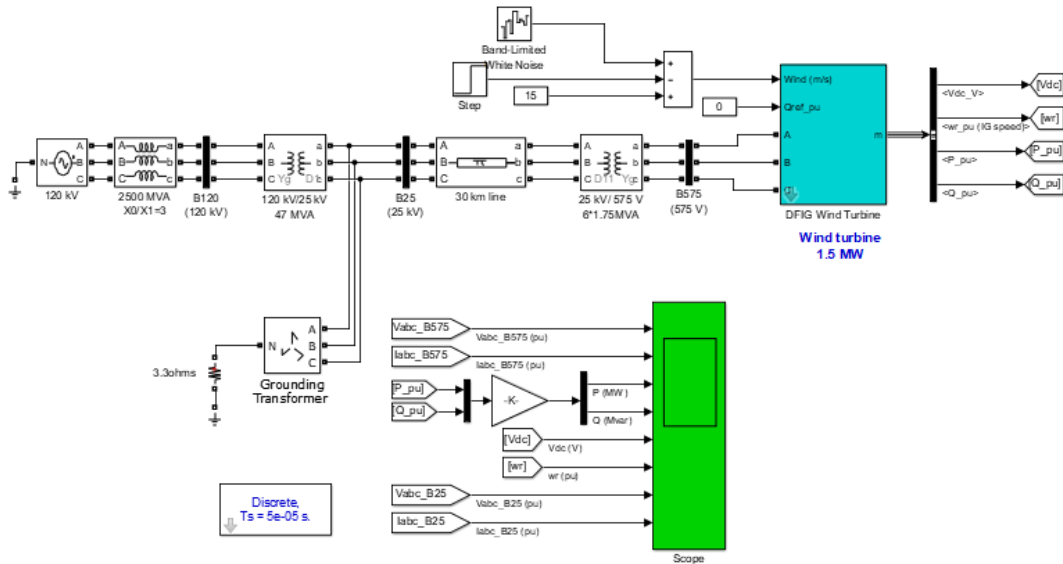
$$\begin{cases} U_{rq} = y_1 + B_1 \left| e_{T_{opt}} \right|^{\frac{1}{2}} Sgn(e_{T_{opt}}) + \frac{1}{\sigma L_r} R_r I_{rd} \\ \dot{y}_1 = B_2 Sgn(e_{T_{opt}}) \\ U_{rd} = y_2 + B_2 \left| e_{I_{rd}} \right|^{\frac{1}{2}} Sgn(e_{I_{rd}}) - p \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_s R_r I_{rq} \\ \dot{y}_2 = -B_4 Sgn(e_{I_{rd}}) \end{cases} \quad (15)$$

Trong đó các hằng số  $B_1, B_2, B_3, B_4$  thỏa mãn điều kiện sau:

$$\begin{cases} |\dot{F}_1| < \Phi_1 \\ B_1 > p \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_s \Phi_1, B_2^2 \geq \frac{4\Phi_1(B_1 + \Phi_1)}{\sigma^2 L_r^2 (B_1 - \Phi_1)} \\ |\dot{F}_2| < \Phi_2 \\ B_3 > \frac{\Phi_2}{\sigma L_r}, B_4^2 \geq \frac{4\Phi_2(B_3 + \Phi_2)}{\sigma^2 L_r^2 (B_3 - \Phi_2)} \end{cases} \quad (16)$$

Với bộ điều khiển trên thì luôn đảm bảo  $I_{rd\_ref} = I_{rd}; T_{opt} = \hat{T}$  trong thời gian hữu hạn.

### 3. MÔ PHỎNG



**Hình 4.** Mô hình mô phỏng hệ thống phát điện gió

Một máy phát điện gió 1,5 MW được kết nối với hệ thống phân phối 25 kV xuất điện cho lưới 120 kV thông qua một trung chuyển 30 km, 25 kV. Tuabin gió sử dụng máy phát điện cảm ứng được cấp nguồn

kép (DFIG) bao gồm máy phát điện cảm ứng rôto dây quấn và bộ chuyển đổi PWM dựa trên IGBT AC / DC / AC.

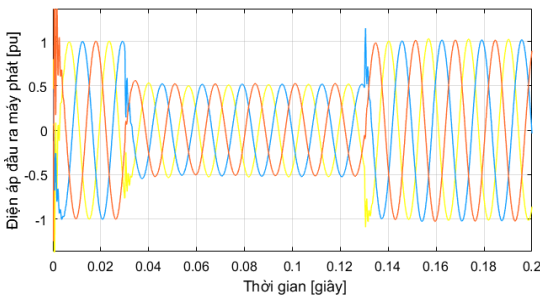
Cuộn dây stato được nối trực tiếp với lưới 60 Hz trong khi rôto được cấp nguồn

ở tần số thay đổi thông qua bộ chuyển đổi AC/DC/AC. Bộ điều khiển trượt cho phép khai thác năng lượng tối đa từ gió cho tốc độ gió thấp bằng cách tối ưu hóa tốc độ tuabin, đồng thời giảm thiểu ứng suất cơ học lên tuabin khi gió giật. Trong mô phỏng, tốc độ gió được duy trì không đổi ở 15 m/s. Thông số máy phát như sau:

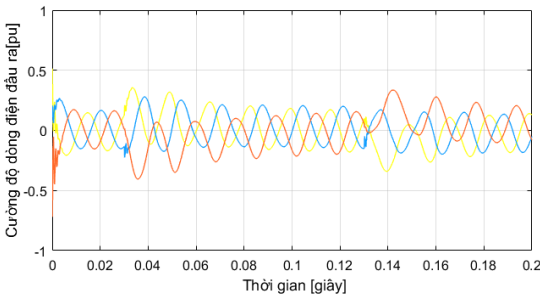
$$R_s = 0.023\Omega; R_r = 0.016\Omega; L_s = 0.18H; L_r = 0.16H$$

$$; p = 3; \text{ công suất } P = 1.5 \text{ MW}; \text{ tần số } f = 60\text{Hz} .$$

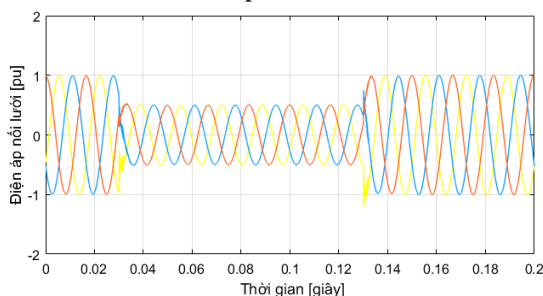
Tiến hành mô phỏng cho trường hợp tốc độ gió giảm đi 5 m/s tại thời điểm 0.03 giây.



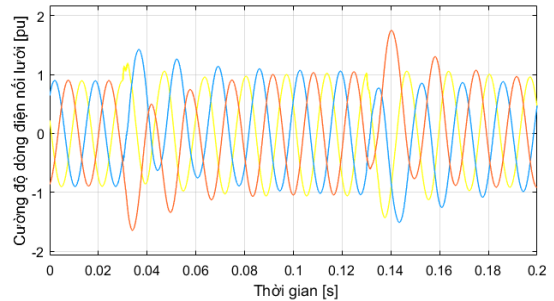
**Hình 5.** Điện áp đầu ra máy phát



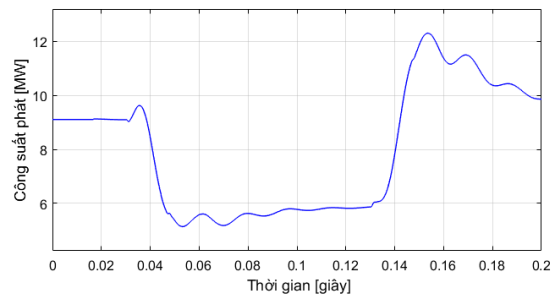
**Hình 6.** Cường độ dòng điện đầu ra máy phát



**Hình 7.** Điện áp khi nối lưới

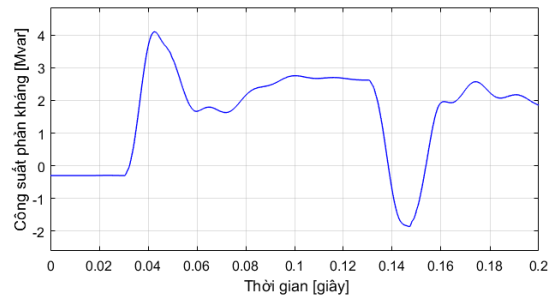


**Hình 8.** Cường độ dòng điện khi nối lưới

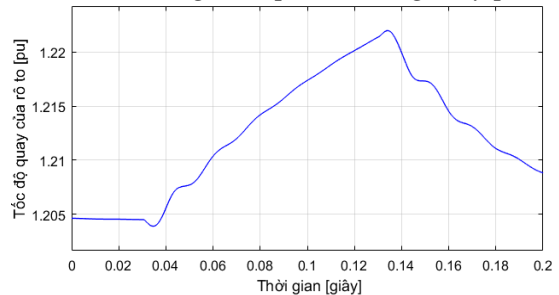


**Hình 9.** Công suất máy phát

Công suất phản kháng máy phát khi tốc độ gió giảm



**Hình 10.** Công suất phản kháng máy phát



**Hình 11.** Tốc độ của rotor máy phát

**Nhận xét:**

Từ các kết quả mô phỏng thấy rằng bộ điều khiển trượt cho chất lượng điều khiển tốt. Trong điều kiện turbine gió chịu ảnh hưởng của các yếu tố phi tuyến

hệ thống vẫn đảm bảo được độ ổn định điện áp và dòng điện khi nối lưới. Khi giảm đôi tốc độ gió, công suất phát giảm 30% nhưng nhanh chóng ổn định trong thời gian 0.17 giây.

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp BDK trượt cho hệ máy phát điện turbine gió. Phần trình bày được bắt đầu từ việc xây dựng mô hình cơ hệ, tìm luật điều

khiển, xây dựng mô hình mô phỏng, kiểm nghiệm bằng phần mềm Matlab-Simulink. Qua kiểm tra và so sánh với các kết quả của các công bố trước đây [2-6] cho thấy BDK đã nâng cao được chất lượng của hệ phát điện turbine gió thông qua các tiêu chí đánh giá, đó là: tính bền vững với nhiễu loạn của gió, đảm bảo khả năng ổn định tần số, điện áp, dòng điện khi nối lưới.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Ahmed G. Abo-Khalil, Saeed Alyami, Khairy Sayed and Ayman Alhejji, *Dynamic Modeling of Wind Turbines Based on Estimated Wind Speed under Turbulent Conditions*, Energies 2019, 12, 1907; doi:10.3390/en12101907.
- [2]. Nada Zine Laabidine, Afrae Errarhout, Chakib El Bakkali, Karim Mohammed, Badre Bossoufi, *Sliding mode control design of wind power generation system based on permanent magnet synchronous generator*, International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol. 12, No. 1, Mar 2021, pp. 393~403.
- [3]. Yan Zhang, Zhengfan Liu, Zhong Yang, and Haifei Si, *Robust Control of Wind Turbines by Using Singular Perturbation Method and Linear Parameter Varying Model*, Journal of Control Science and Engineering, Volume 2016, Article ID 2830736.
- [4]. M. A. Chowdhury, N. Hosseinzadeh and W. Shen, *Effects of wind speed variations and machine inertia constants on variable speed wind turbine dynamics*, Journal of Electrical Engineering, 2011.
- [5]. Jacob Hostettler & Xin Wang, *Sliding mode control of a permanent magnet synchronous generator for variable speed wind energy conversion systems*, Systems Science & Control Engineering, 2020.
- [6]. N V Zubova and V D Rudykh, *Optimization of power output for a wind turbine using methods of artificial intelligence*, International Scientific and Technical Conference "Energy Systems", Oct. 2019.
- [7]. Khalil, *High-Gain Observers in Nonlinear Feedback Control*, in Proc. International Conference on Control, Automation and System, Seoul, Korea, 2008, pp. 10-16.

### Giới thiệu tác giả:



Tác giả Đặng Tiến Trung nhận bằng tốt nghiệp đại học chuyên ngành kỹ sư điện - tự động hóa tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004, bảo vệ luận án Tiến sĩ năm 2019 tại Học viện Kỹ thuật quân sự. Tác giả hiện là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện- Trường Đại học Điện lực.  
Lĩnh vực nghiên cứu: Ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ thống điện.

