

XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING THÍCH NGHI CHO HỆ TUABIN ĐIỆN GIÓ SỬ DỤNG MÁY PHÁT KHÔNG ĐỒNG BỘ NGUỒN KÉP

BUILDING AN ADAPTIVE BACKSTEPPING CONTROLLER FOR WIND TURBINES USING DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR-DFIG

Nguyễn Thị Thu Hiền^{1*}, Phùng Thị Thanh Mai¹,
Phạm Thị Thanh Đàm¹, Nguyễn Đức Duy¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/hu15804.2024.122>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một đóng góp mới trong lĩnh vực tối ưu hóa các kỹ thuật điều khiển hệ thống gió, đó là kết quả tổng hợp bộ điều khiển trượt backstepping cho hệ máy phát điện turbine gió sử dụng máy phát không đồng bộ nguồn kép. Bộ điều khiển tổng hợp đã nâng cao được chất lượng điện khi nối lưới. 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 article presents a new contribution in the field of optimization of wind system control techniques, which is the result of synthesizing a backstepping sliding controller for wind turbine generator systems using dual-source asynchronous generators. The integrated controller has improved power quality when connected to the grid. The results evaluated by simulation on Matlab-Simulink software show that this controller ensures generation quality requirements when connected to the grid, optimizing the energy conversion process for wind turbines.

Keywords: Wind turbine, sliding mode control, grid connection.

¹Trường Đại học Điện lực

*Email: hienmtt@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/02/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/4/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2024

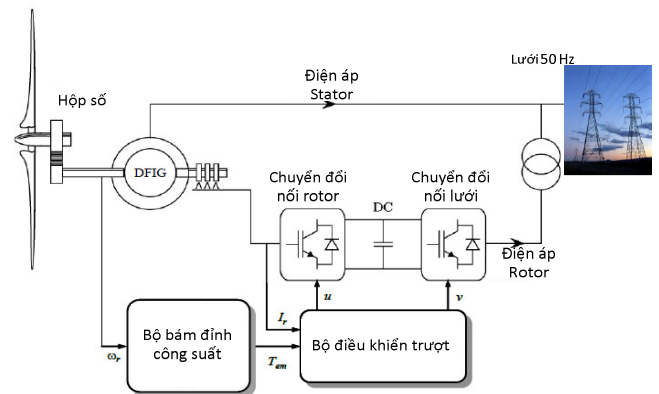
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Với mục đích đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng về năng lượng, những nguồn năng lượng sạch đã và đang được thế giới quan tâm nhiều hơn. Trong đó, năng lượng gió được xem là nguồn năng lượng sơ cấp vô hạn, với ưu điểm là dễ khai thác, công nghệ đơn giản, chi phí đầu tư và chi phí vận hành tương đối thấp; có thể cung cấp điện độc lập cho các khu vực xa xôi như hải đảo, biên giới. Ở Việt Nam, máy phát điện gió

hiện nay đang cung cấp một lượng công suất đáng kể bên cạnh các máy phát cơ bản như nhiệt điện và thủy điện... 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 [1, 5].

2. MÔ HÌNH CƠ HỆ

Xét một mô hình hệ thống điện tổng quát như hình 1 [2].



Hình 1. Mô hình máy phát điện gió

2.1. Mô hình turbine 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 [3]:

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

Trong đó, ρ là mật độ không khí, R là bán kính vòng quét của tuabin gió, v 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 λ và góc chúc ngóc β . Tỉ số vận tốc rìa λ là tỉ số giữa vận tốc tại đỉnh rìa cánh quạt của tuabin gió và vận tốc gió, được tính như sau [4]:

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

Trong đó, ω_r là vận tốc góc của rotor.
Công suất gió tác động vào cánh quạt:

$$P_w = \frac{\rho S V^3}{2} \quad (3)$$

Sinh momen xoắn làm quay turbine:

$$T_r = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V^2 C_Q(\lambda, \beta) \quad (4)$$

Công suất cơ chuyển đổi:

$$P_r = \omega_r \cdot T_r = \frac{\rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta)}{2} \quad (5)$$

2.2. Mô hình của máy phát không đồng bộ

Phương trình điện áp stato:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ u_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ u_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ u_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó: $u_s, u_r, i_s, i_r, \phi_s, \phi_r$ lần lượt là điện áp, dòng điện và từ thông của stato trong hai mặt phẳng d, q; R_s, R_r là điện trở thuần của cuộn dây stato và rotor; ω_s, ω_r là tốc độ quay của từ thông stato và rotor.

Từ thông stato:

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + L_m \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + L_m \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó: L_m là cuộn kháng từ hóa.

Công suất tác dụng và công suất phản kháng trên stato và rotor:

$$\begin{cases} P_s = u_{ds} \cdot i_{ds} + u_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s = u_{qs} \cdot i_{ds} - u_{ds} \cdot i_{qs} \\ P_r = u_{dr} \cdot i_{dr} + u_{qr} \cdot i_{qr} \\ Q_r = u_{qr} \cdot i_{dr} - u_{dr} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (8)$$

3. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT BACKSTEPPING

Bước 1: Tính dòng điện rotor

Đặt e_1, e_2 là biến sai lệch về công suất tác dụng và công suất phản kháng:

$$\begin{cases} e_1 = P_{sref} - P_s \\ e_2 = Q_{sref} - Q_s \end{cases} \quad (9)$$

Đạo hàm hai vế (9) có:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{P}_{sref} - \dot{P}_s \\ \dot{e}_2 = \dot{Q}_{sref} - \dot{Q}_s \end{cases} \quad (10)$$

Với

$$\begin{cases} \dot{P} = -\frac{v_s \cdot L_m \cdot i_{rq}}{L_s} \\ \dot{Q}_s = \frac{u_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{v_s \cdot L_m \cdot i_{rd}}{L_s} \\ i_{rd} = \frac{u_{rd}}{L_r \cdot \sigma} - \frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} \cdot i_{rd} + \omega_s \cdot i_{rq} \\ i_{rq} = \frac{u_{rq}}{L_r \cdot \sigma} - \frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} \cdot i_{rq} - \omega_r \cdot i_{rd} - \omega_r \cdot \frac{L_m \cdot u_s}{L_r \cdot L_s \cdot \sigma \cdot \omega_s} \end{cases} \quad (11)$$

Thay (11) vào (10) có:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{P}_{sref} + \frac{u_s \cdot L_m}{L_s} \left(\frac{u_{rq}}{L_r \cdot \sigma} - \frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} \cdot i_{rq} - \omega_r \cdot i_{rd} - \omega_r \cdot \frac{L_m \cdot u_s}{L_r \cdot L_s \cdot \sigma \cdot \omega_s} \right) \\ \dot{e}_2 = \dot{Q}_{sref} + \frac{u_s \cdot L_m}{L_s} \left(\frac{u_{rd}}{L_r \cdot \sigma} - \frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} \cdot i_{rd} + \omega_r \cdot i_{rq} \right) \end{cases} \quad (12)$$

Trong đó: $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (13)$$

Đạo hàm hai vế (13) kết hợp (12) có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 \\ &= e_1 \left[\dot{P}_{sref} + \frac{u_s \cdot L_m}{L_r \cdot \sigma \cdot L_s} \left(u_{rq} - R_r \cdot i_{rq} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot i_{rd} - g \cdot \frac{u_s \cdot L_m}{L_s} \right) \right] \\ &\quad + e_2 \left[\dot{Q}_{sref} + \frac{u_s \cdot L_m}{L_r \cdot \sigma \cdot L_s} (u_{rd} - R_r \cdot i_{rd} + L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot i_{rq}) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

Để hệ ổn định, thì theo tiêu chuẩn Lyapunov $\dot{V}_1 \leq 0$, do đó chọn:

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0 \quad (15)$$

Từ (14) và (15) có:

$$\begin{aligned} e_1 \left[\dot{P}_{sref} + \frac{u_s \cdot L_m}{L_r \cdot \sigma \cdot L_s} \left(u_{rq} - R_r \cdot i_{rq} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot i_{rd} - g \cdot \frac{u_s \cdot L_m}{L_s} \right) \right] \\ + e_2 \left[\dot{Q}_{sref} + \frac{u_s \cdot L_m}{L_r \cdot \sigma \cdot L_s} (u_{rd} - R_r \cdot i_{rd} + L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot i_{rq}) \right] = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \end{aligned} \quad (16)$$

Từ (16) đưa ra:

$$\begin{aligned} e_1 \left[\dot{P}_{sref} + \frac{u_s \cdot L_m}{L_r \cdot \sigma \cdot L_s} \left(u_{rq} - R_r \cdot i_{rq} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot i_{rd} - g \cdot \frac{u_s \cdot L_m}{L_s} \right) \right] &= -k_1 e_1^2 \\ e_2 \left[\dot{Q}_{sref} + \frac{u_s \cdot L_m}{L_r \cdot \sigma \cdot L_s} (u_{rd} - R_r \cdot i_{rd} + L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot i_{rq}) \right] &= -k_2 e_2^2 \end{aligned} \quad (17)$$

Biểu thức điều khiển ảo của I_{rq}, I_{rd} được xác định:

$$I_{rqref} = \frac{L_r \cdot \sigma \cdot L_s}{R_r \cdot u_s \cdot L_m} \left(\dot{P}_{sref} + k_1 e_1 + \frac{u_s \cdot L_m}{L_r \cdot \sigma \cdot L_s} \left(u_{rq} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{u_s \cdot L_m}{L_s} \right) \right) \quad (18)$$

$$I_{rdref} = \frac{L_r \cdot \sigma \cdot L_s}{R_r \cdot u_s \cdot L_m} \left(\dot{Q}_{sref} + k_2 e_2 + \frac{u_s \cdot L_m}{L_r \cdot \sigma \cdot L_s} \left(u_{rd} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rq} \right) \right)$$

Đây chính là lượng đặt cho bước tiếp theo

Bước 2: Tính điện áp rotor

Đặt e_3, e_4 là sai lệch dòng điện của rotor.

$$\begin{cases} e_3 = I_{rqref} - I_{rq} \\ e_4 = I_{rdref} - I_{rd} \end{cases} \quad (19)$$

Đạo hàm hai vế (19) và biến đổi có:

$$\dot{e}_3 = \dot{I}_{rqref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(u_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{u_s \cdot L_m}{L_s} \right) \quad (20)$$

$$\dot{e}_4 = \dot{I}_{rdref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(u_{rd} - R_r \cdot I_{rd} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rq} \right)$$

Chọn hàm Lyapunov có:

$$V_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} e_3^2 + \frac{1}{2} e_4^2 \quad (21)$$

Đạo hàm hai vế (21) kết hợp với (20) có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_3 \dot{e}_3 + e_4 \dot{e}_4 \\ &= \dot{V}_1 + e_3 \left[\dot{I}_{rqref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(u_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{u_s \cdot L_m}{L_s} \right) \right] \\ &\quad + e_4 \left[\dot{I}_{rdref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(u_{rd} - R_r \cdot I_{rd} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rq} \right) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

Để hệ thống ổn định thì \dot{V}_2 được chọn:

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 - k_4 e_4^2 \leq 0 \quad (23)$$

Kết hợp (23) và (24) có:

$$\begin{cases} e_3 \left[\dot{I}_{rqref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(u_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{L_m \cdot u_s}{L_s} \right) \right] = -k_3 e_3^2 \\ e_4 \left[\dot{I}_{rdref} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(u_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rq} \right) \right] = -k_4 e_4^2 \end{cases} \quad (24)$$

Từ (24) có:

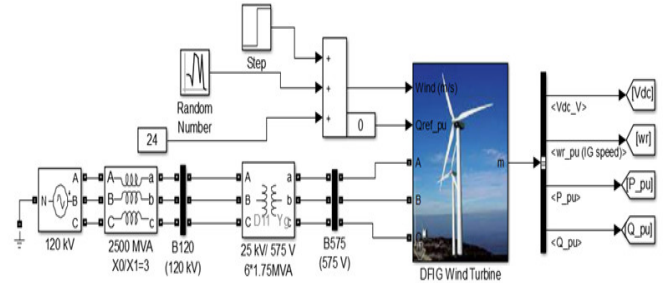
$$\begin{cases} u_{rd} = L_r \cdot \sigma \left[k_4 e_4 + \dot{I}_{rdref} + \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(R_r \cdot I_{rd} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rq} \right) \right] \\ u_{rq} = L_r \cdot \sigma \left[k_3 e_3 + \dot{I}_{rqref} + \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(R_r \cdot I_{rq} + L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{L_m \cdot u_s}{L_s} \right) \right] \end{cases} \quad (25)$$

Khi đó rút ra điện áp rotor theo hai trục d-q có dạng:

$$\begin{aligned} V_{rd} &= -\frac{L_r \cdot L_s \cdot \sigma}{M \cdot V} \cdot \dot{Q}_{sref} + R_r \cdot I_{rd} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rq} + \\ &L_r \cdot \sigma \left[k_4 e_4 + \dot{I}_{rdref} + \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(R_r \cdot I_{rd} - L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rq} \right) \right] \end{aligned} \quad (26)$$

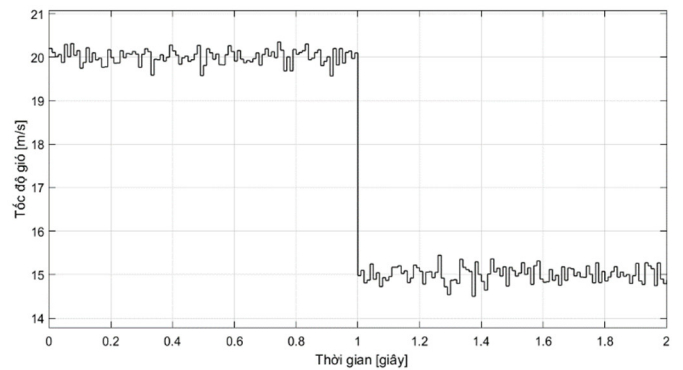
$$\begin{aligned} V_{rq} &= -\frac{L_r \cdot L_s \cdot \sigma}{M \cdot V} \cdot \dot{P}_{sref} + R_r \cdot I_{rq} + L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rd} + M \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s \cdot \omega_s} + \\ &L_r \cdot \sigma \left[k_3 e_3 + \dot{I}_{rqref} + \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \left(R_r \cdot I_{rq} + L_r \cdot \sigma \cdot \omega_r \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) \right] \end{aligned} \quad (27)$$

4. MÔ PHỎNG

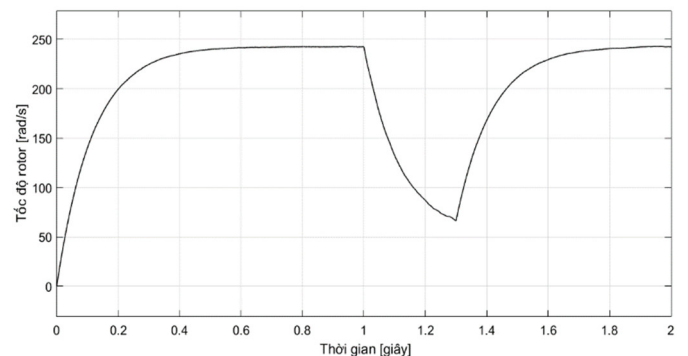


Hình 2. Mô hình mô phỏng hệ thống phát điện gió

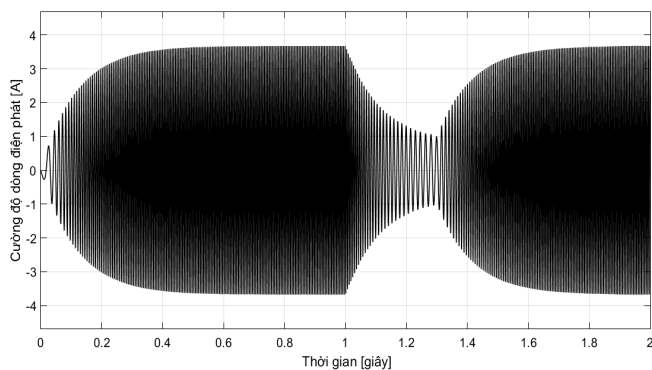
Một máy phát điện gió 4kW được kết nối với hệ thống phân phối 25kV xuất điện cho lưới 120kV thông qua một trung chuyển 30km, 25kV. Turbine gió sử dụng máy phát điện không đồng bộ nguồn kép. Cuộn dây stato được nối trực tiếp với lưới 50Hz. Bộ điều khiển backstepping cho phép khai thác năng lượng tối đa từ gió khi tốc độ gió thấp bằng cách tối ưu hóa tốc độ turbine, đồng thời giảm thiểu ứng suất cơ học lên turbine khi gió giật. Thông số máy phát như sau: $R_s = 0,023\Omega$; $R_r = 0,016\Omega$; $L_s = 0,18H$; $L_r = 0,16H$; $p = 3$; công suất $P = 14kW$; tần số $f = 50Hz$. Tiến hành mô phỏng trong thời gian 2 giây cho trường hợp tốc độ gió đang từ 20m/s giảm xuống 10m/s tại thời điểm 1 giây kết hợp với nhiễu động gió ngẫu nhiên 0,2m/s.



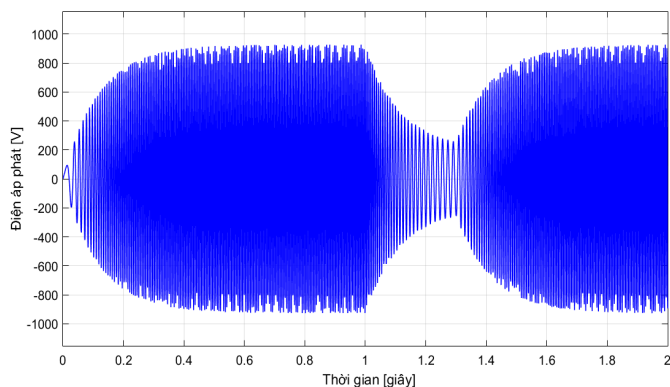
Hình 3. Tốc độ gió thay đổi



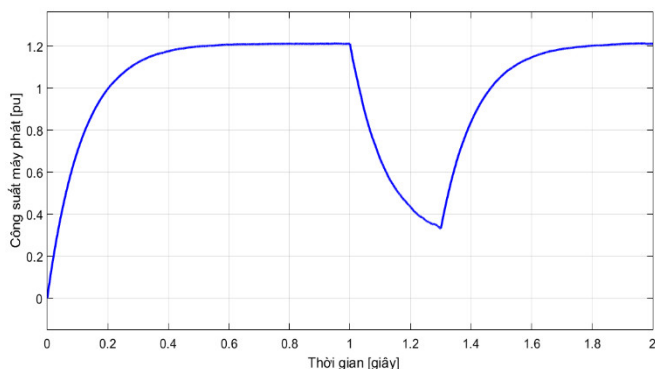
Hình 4. Tốc độ rotor máy phát



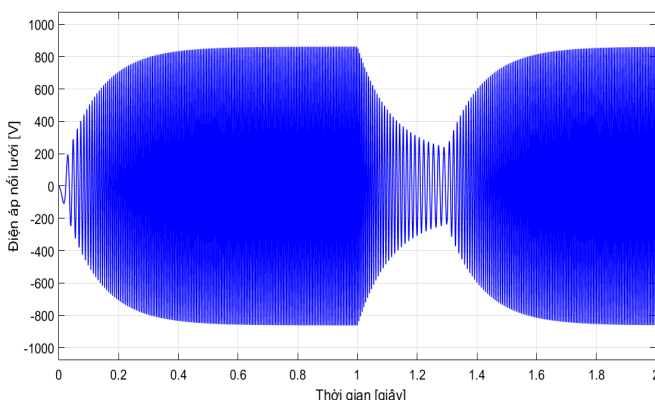
Hình 5. Cường độ dòng điện máy phát I_a



Hình 6. Điện áp máy phát u_a



Hình 7. Công suất máy phát



Hình 8. Điện áp nối lưới

Khi tốc độ gió giảm, tốc độ turbine giảm theo làm cho công suất máy phát giảm 66%, lúc này góc nghiêng trục

turbine thay đổi để ổn định công suất phát. Cường độ dòng điện, điện áp và công suất máy phát nhanh chóng ổn định trở lại sau khi có phản ứng với việc giảm tốc độ gió, thời gian quá độ nhỏ 0.6 giây. Với nhiễu động gió, điện áp máy phát có dao động. Tuy nhiên công suất máy phát không dao động, điện áp nối lưới có biên độ và tần số ổn định.

Nhận xét:

Từ các kết quả mô phỏng thấy rằng bộ điều khiển Backstepping 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 thay đổi tốc độ gió, công suất phát giảm nhưng nhanh chóng ổn định.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển Backstepping 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 mô phỏng cho thấy khi tốc độ gió thay đổi, công suất và điện áp phát luôn giữ được ổn định, đảm bảo các yêu cầu khi nối lưới. So với các kết quả của các công bố trước đây [2, 5], cho thấy, bộ điều khiển 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]. Bossouf B., et al., "DSPACE-based implementation for observer backstepping power control of DFIG wind turbine," *IET Electr. Power Appl.*, 14(12), 2395-2403, 2020.

[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)*, 12, 1, 393~403, 2021.

[3]. Pan L., Shao C., "Wind energy conversion systems analysis of PMSG on offshore wind turbine using improved SMC and Extended State Observer," *Renew. Energy* 161, 149-161, 2020.

[4]. Liu J., Zhou F., Zhao C., Wang Z., Aguirre-Hernandez B., "A PI-type sliding mode controller design for PMSG-based wind turbine," *Complexity*, 2019.

[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.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Thi Thu Hien, Phung Thi Thanh Mai, Pham Thi Thanh Dam, Nguyen Duc Duy
Electric Power University, Vietnam