

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CÔNG SUẤT MÁY PHÁT ĐIỆN GIÓ NGUỒN KÉP SLIDING MODE POWER CONTROL FOR DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR

NGUYỄN VĂN HẢI^{1,a}, TRẦN THANH HÙNG^{2,b}

¹Đại học Sư phạm Kỹ Thuật Vĩnh Long

²Đại học Cần Thơ

Email: ^avanhaipcbaclicu@gmail.com, ^btthung@ctu.edu.vn

Nhận bài (received): 07/3/2022; Phản biện (revised): 30/3/2022; Chấp nhận (accepted): 08/4/2022

TÓM TẮT

Bộ điều khiển trượt công suất hiệu dụng và công suất phản kháng máy phát điện gió nguồn kép được đề xuất trong nghiên cứu này. Đây là loại máy điện ba pha không đồng bộ với cuộn dây rotor hở có thể được cấp điện bằng điện áp bên ngoài và được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực công suất cao. Bộ điều khiển trượt được thiết kế để đảm bảo công suất thực tế của máy phát điện nguồn kép bám theo công suất mong muốn trong thời gian hữu hạn và giảm hiện tượng dao động tần số cao quanh mặt trượt. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh bằng lý thuyết Lyapunov. Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất với độ vọt lố là 0(%), thời gian tăng của công suất hiệu dụng và công suất phản kháng đạt 0.0085(s) và 0.0051(s) tương ứng, thời gian xác lập là 0.0108(s) và 0.0126(s), sai số xác lập hội tụ về 0.

Từ khóa: Điều khiển trượt, chattering, công suất, DFIG, MATLAB/Simulink

ABSTRACT

An active and reactive power sliding mode control for a doubly fed induction generator (DFIG) is proposed in this paper. The DFIG is an asynchronous three-phase electrical machine with open rotor windings which can be fed by external voltages and widely used in high power fields. The sliding mode control is designed to ensure that the actual power of the DFIG follows the desired power in a finite time and reduces the chattering phenomenon around the sliding surface. The stability of the system is proven by Lyapunov's theory. Simulation results in MATLAB/Simulink show the effectiveness of the proposed controller without the overshoot is 0(%), the rising time of the active and reactive power achieves 0.0085(s) and 0.0051(s) respectively, the settling time is 0.0108(s) and 0.0126(s), and the setting error converges to 0.

Keywords: Sliding mode control, chattering, power, DFIG, MATLAB/Simulink

1. GIỚI THIỆU

Máy phát điện gió nguồn kép (DFIG) là máy điện ba pha không đồng bộ với cuộn

dây rotor hở có thể được cấp điện bằng điện áp bên ngoài và được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực công suất cao nhờ những

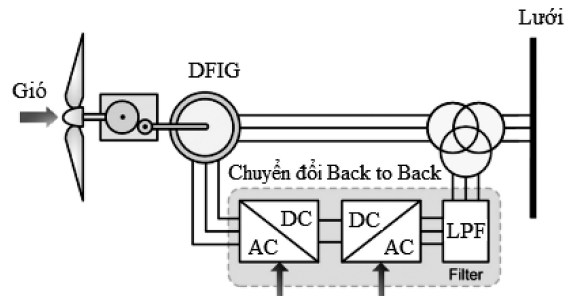
ưu điểm khác nhau của nó như: giảm kích thước của bộ chuyển đổi, hoạt động trong khoảng thay đổi tốc độ lớn và khả năng điều khiển độc lập giữa công suất hiệu dụng và phản kháng được tạo ra [1]. Hiện tại, có nhiều nghiên cứu đã được công bố với sự đa dạng trong việc điều khiển DFIG, tiêu biểu như: điều khiển trượt [1], tuyến tính hóa [2], điều khiển trượt với luật tiếp cận hàm mũ nhanh [3], điều khiển trượt mờ [4], điều khiển PID-GA MPPT cải tiến [5], điều khiển trượt thích nghi [6], điều khiển trượt bậc một và bậc cao [7], cải tiến điều khiển công suất trực tiếp [8], phân tích vector điều khiển [9], điều khiển trượt và thuật toán Super Twisting [10].

Điều khiển trượt (SMC) đạt được khả năng điều khiển bền vững bằng cách thêm tín hiệu điều khiển không liên tục qua mặt trượt, thỏa mãn điều kiện trượt [11]. Tuy nhiên, đối với biên độ của luật điều khiển trượt nếu không được lựa chọn phù hợp sẽ gây ra hiện tượng dao động [12], [13]. Hiện tượng dao động do sự không hoàn hảo và chậm trễ thời gian trong chuyển mạch, do thiết bị truyền động hằng số thời gian nhỏ, các mạch công suất dễ bị quá nhiệt dẫn đến hư hỏng [13]. Để khắc phục nhược điểm này và cải thiện hiệu suất, nghiên cứu đề xuất kiểm chứng hiệu quả của bộ điều khiển trượt dựa vào hàm relay trong điều khiển DFIG tua – bin gió.

Bài báo được tổ chức gồm 5 phần : phần 2 trình bày mô hình toán học của DFIG, bộ điều khiển trượt công suất DFIG được trình bày trong phần 3, phần 4 trình bày các kết quả mô phỏng và đánh giá, kết luận là phần 5.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA DFIG

Cấu hình DFIG nối lưới sử dụng bộ chuyển đổi Back – to – Back dựa vào IGBT được điều khiển với PWM được trình bày như Hình 1 [7].



Hình 1. Cấu hình DFIG

Mô hình động học của DFIG trong khung $d-q$ được biểu diễn bởi các phương trình điện như (1), (2), (3) và (4) [7]:

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq}, \quad (1)$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd}, \quad (2)$$

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq}, \quad (3)$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd}, \quad (4)$$

trong đó: ω_s, ω_r là các vận tốc góc; R_s, R_r là điện trở stator và rotor; $I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq}$ là dòng điện stator và rotor trong khung tham chiếu $d-q$; $V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$ là điện áp stator và rotor trong khung tham chiếu $d-q$; $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ là từ thông stator và rotor trong khung tham chiếu $d-q$.

Tương tự, các phương trình từ tính như (5), (6), (7) và (8):

$$\varphi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd}, \quad (5)$$

$$\varphi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq}, \quad (6)$$

$$\varphi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd}, \quad (7)$$

$$\varphi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq}, \quad (8)$$

trong đó: L_s, L_m là điện cảm toàn phần của pha stator và rotor; L_m là hệ cảm lớn nhất của pha stator và rotor; $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ là từ thông stator và rotor trong khung tham chiếu $d-q$; $I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq}$ là dòng

điện stator và rotor trong khung tham chiếu $d-q$.

Momen xoắn điện từ được viết như hàm của từ thông stator và dòng điện rotor như (9):

$$T_{em} = p \frac{L_m}{L_s} (I_{rq} \varphi_{sd} - I_{rd} \varphi_{sq}), \quad (9)$$

trong đó: p là số đôi cực.

Để dễ điều khiển việc sản xuất điện bởi tua – bin gió, ta sẽ thực hiện điều khiển độc lập công suất hiệu dụng và phản kháng bằng định hướng từ thông stator như (10).

$$\varphi_{sd} = \varphi_s, \varphi_{sq} = 0. \quad (10)$$

Momen xoắn điện từ (9) được viết lại như (11):

$$T_{em} = -p \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \varphi_{sd}. \quad (11)$$

Bỏ qua điện trở của stator và hằng số từ thông stator, ta viết như (12):

$$\begin{cases} V_{sd} = 0, \\ V_{sq} = \omega_s \varphi_{sd} = V_s. \end{cases} \quad (12)$$

Đơn giản hóa (10) và (11), và thế vào (5) và (6), ta được dòng điện stator như (13) và (14):

$$I_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd}, \quad (13)$$

$$I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq}, \quad (14)$$

và biểu thức cho công suất stator như (15) và (16):

$$P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq}, \quad (15)$$

$$Q_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s}. \quad (16)$$

Để điều khiển máy chính xác, ta cần thiết lập mối quan hệ giữa dòng điện và điện áp rotor. Thay (13) và (14) vào (7) và (8), ta được (17) và (18):

$$\varphi_{rd} = \sigma L_r I_{rd} + \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s}, \quad (17)$$

$$\varphi_{rq} = \sigma L_r I_{rq}, \quad (18)$$

$$\text{với } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}.$$

Sử dụng (17) và (18) vào (3) và (4) ta được (19) và (20):

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \left(\sigma L_r I_{rd} + \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s} \right) - (\omega_s - \omega_r) \sigma L_r I_{rq}, \quad (19)$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} (\sigma L_r I_{rq}) + (\omega_s - \omega_r) \left(\sigma L_r I_{rd} + \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s} \right). \quad (20)$$

Quan hệ giữa dòng điện và điện áp rotor được cho bởi (21) và (22):

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s \sigma L_r I_{rq}, \quad (21)$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s \sigma L_r I_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s}, \quad (22)$$

$$\text{với } g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \text{ là độ trượt.}$$

3. ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CÔNG SUẤT DFIG TUA – BIN GIÓ

Trong phần này, nghiên cứu tiến hành điều khiển trượt bám công suất hiệu dụng và công suất phản kháng của DFIG tua – bin gió sử dụng sai số tương ứng giữa công suất mong muốn và công suất thực tế như là mặt trượt.

3.1. Điều khiển công suất hiệu dụng

Mặt trượt trong điều khiển công suất hiệu dụng được định nghĩa như (23):

$$S_p = P_{sref} - P_s, \quad (23)$$

trong đó: P_{sref} là công suất hiệu dụng mong muốn, P_s là công suất hiệu dụng thực tế

Đạo hàm 2 vế của (23), ta được (24):

$$\dot{S}_p = \dot{P}_{sref} - \dot{P}_s. \quad (24)$$

Thế đạo hàm của (15) vào (24), ta được [13]:
(25):

$$\dot{S}_p = \dot{P}_{sref} + V_s \frac{L_m}{L_s} \dot{I}_{rq} \quad (25)$$

Với luật tiếp cận tốc độ hằng như (26)

$$V_{rq_smc} = \frac{\sigma L_r L_s}{V_s L_m} \left(-\dot{P}_{sref} - \frac{V_s L_m}{\sigma L_r L_s} \left[V_{rq} - R_r I_{rq} \right] - K_p \text{sign}(S_p) \right) \quad (27)$$

Để chứng minh tính ổn định, hàm Lyapunov được định nghĩa như (28):

$$V_p = \frac{1}{2} S_p^2 \quad (28)$$

Đạo hàm 2 vế của (28), ta được (29):

$$\dot{V}_p = S_p \dot{S}_p = -K_p S_p \text{sign}(S_p) = -K_p |S_p| < 0, \quad (29)$$

với $K_p > 0$ thì $\dot{V}_p \rightarrow 0$ với giá trị của K_p . Hệ thống sẽ ổn định theo Lyapunov. Lúc này, sai số $e(t)$ sẽ hội tụ về 0 dẫn theo $S_p(t) \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow 0$.

Luật điều khiển trượt (27) đảm bảo công suất hiệu dụng thực tế P_s của hệ thống DFIG bám theo công suất hiệu dụng tham chiếu P_{sref} trong thời gian hữu hạn.

3.2. Điều khiển công suất phản kháng

Mặt trượt trong điều khiển công suất

$$V_{rd_smc} = \frac{\sigma L_r L_s}{V_s L_m} \left(-\dot{Q}_{sref} - \frac{V_s L_m}{\sigma L_r L_s} \left[-R_r I_{rd} + g \omega_s \sigma L_r I_{rq} \right] - K_Q \text{sign}(S_Q) \right) \quad (34)$$

Để chứng minh tính ổn định, hàm Lyapunov được định nghĩa như (35):

$$V_Q = \frac{1}{2} S_Q^2 \quad (35)$$

Đạo hàm 2 vế của (35), ta được (36):

$$\dot{V}_Q = S_Q \dot{S}_Q = -K_Q S_Q \text{sign}(S_Q) = -K_Q |S_Q| < 0, \quad (36)$$

với $K_Q > 0$ thì $\dot{V}_Q \rightarrow 0$ với giá trị của K_Q . Hệ thống sẽ ổn định theo Lyapunov. Lúc này, sai số $e(t)$ sẽ hội tụ về 0 dẫn theo $S_Q(t) \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow 0$.

$$\dot{S}_p = -K_p \text{sign}(S_p) \quad (26)$$

Luật điều khiển trượt cho công suất hiệu dụng với luật tiếp cận tốc độ hằng như (27):

phản kháng được định nghĩa như (30):

$$S_Q = Q_{sref} - Q_s \quad (30)$$

trong đó: Q_{sref} là công suất phản kháng mong muốn, Q_s là công suất phản kháng thực tế

Đạo hàm 2 vế của (30), ta được (31):

$$\dot{S}_Q = \dot{Q}_{sref} - \dot{Q}_s \quad (31)$$

Thế đạo hàm của (16) vào (31), ta được (32):

$$\dot{S}_Q = \dot{Q}_{sref} + V_s \frac{L_m}{L_s} \dot{I}_{rd} \quad (32)$$

Với luật tiếp cận tốc độ hằng như (33) [13]:

$$\dot{S}_Q = -K_Q \text{sign}(S_Q) \quad (33)$$

Vậy luật điều khiển trượt cho công suất phản kháng với luật tiếp cận tốc độ hằng như (34):

Luật điều khiển trượt (34) đảm bảo công suất phản kháng thực tế Q_s của hệ thống DFIG bám theo công suất tham chiếu Q_{sref} trong thời gian hữu hạn.

Luật điều khiển trượt (27) và (34) đảm bảo công suất hiệu dụng và công suất phản kháng thực tế của hệ thống DFIG tua - bin gió bám theo công suất hiệu dụng và công suất phản kháng tham chiếu trong thời gian hữu hạn. Tuy nhiên, các luật điều khiển trên sẽ gây ra hiện tượng dao động với tần số

cao ở tín hiệu điều khiển quanh quỹ đạo pha. Để khắc phục hiện tượng này, nghiên cứu sử dụng phương pháp điều khiển trượt dựa vào hàm relay [13] và kiểm nghiệm hiệu quả của

phương pháp này trong điều khiển công suất của hệ thống DFIG tua - bin gió như sau:

Luật điều khiển trượt công suất hiệu dụng với hàm relay như (37):

$$V_{rq_smc} = \frac{\sigma L_r L_s}{V_s L_m} \left(-\dot{P}_{sref} - \frac{V_s L_m}{\sigma L_r L_s} \left[-g \omega_s \sigma L_r I_{rd} - g \frac{L_m V_s}{L_s} \right] - K_p \frac{S_p}{|S_p| + \delta_p} \right). \quad (37)$$

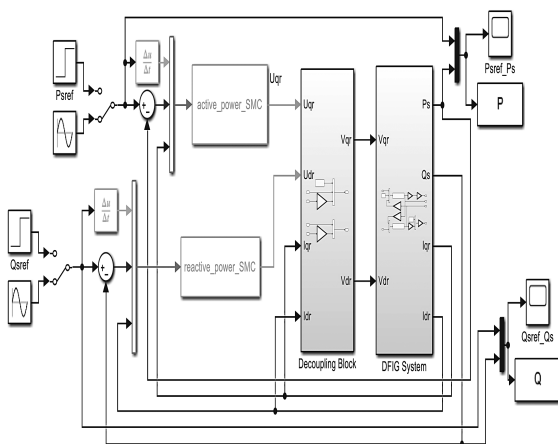
Luật điều khiển trượt công suất phản kháng với hàm relay như (38):

$$V_{rd_smc} = \frac{\sigma L_r L_s}{V_s L_m} \left(-\dot{Q}_{sref} - \frac{V_s L_m}{\sigma L_r L_s} \left[-R_r I_{rd} + g \omega_s \sigma L_r I_{rq} \right] - K_Q \frac{S_Q}{|S_Q| + \delta_Q} \right). \quad (38)$$

Việc thay thế hàm *signum* bằng hàm *relay* thì công suất hiệu dụng và công suất phản kháng thực tế của hệ thống DFIG tua - bin gió vẫn sẽ hội tụ về công suất hiệu dụng và công suất phản kháng mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số tiến về 0 và loại bỏ hiện tượng dao động quanh mặt trượt.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất được trình bày như Hình 2, các thông số của DFIG được trình bày như Bảng 1 và Bảng 2 trình bày các thông số của bộ điều khiển SMC hàm relay.



Hình 2. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất với MATLAB/Simulink

Bảng 1. Các thông số của DFIG

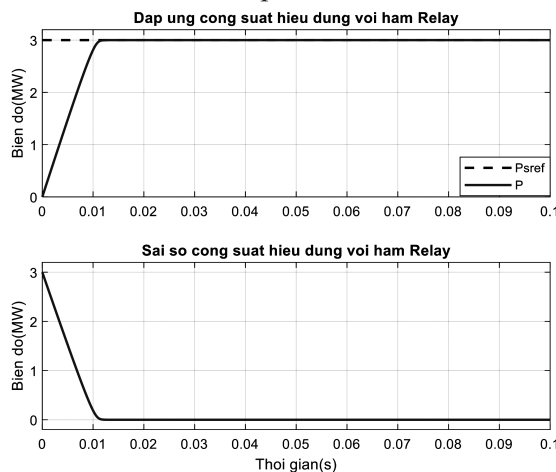
Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị	Đơn vị
P _n	Công suất tua – bin	3	MW
p	Số đôi cực	2	
G	Bộ dẫn động	90	
ρ	Khe hở không khí	1.225	Kg/m ³
M	Điện cảm từ hóa	0.0135	H
L _s	Cuộn dây stator	0.0137	H
L _r	Cuộn dây rotor	0.0136	H
R _r	Điện trở rotor	0.021	Ω
R _s	Điện trở stator	0.012	Ω
V _s	Điện áp stator	690	V
f	Tần số lưới	50	Hz
w _s	Vận tốc góc stator	320	rad/s
g	Hệ số trượt	0.02	

Bảng 2. Các thông số của bộ điều khiển SMC hàm relay

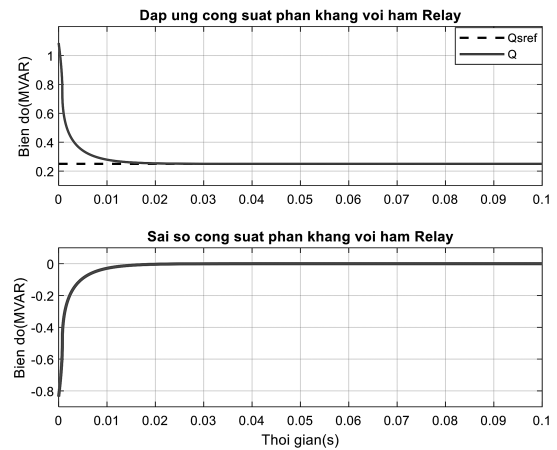
Công suất	K	δ
Công suất hiệu dụng	80	0.1
Công suất phản kháng	50	0.1

Đáp ứng nấc và sai số của công suất hiệu dụng, công suất phản kháng của DFIG tua – bin gió bộ điều khiển SMC với hàm relay được trình bày như Hình 3 và 4 tương

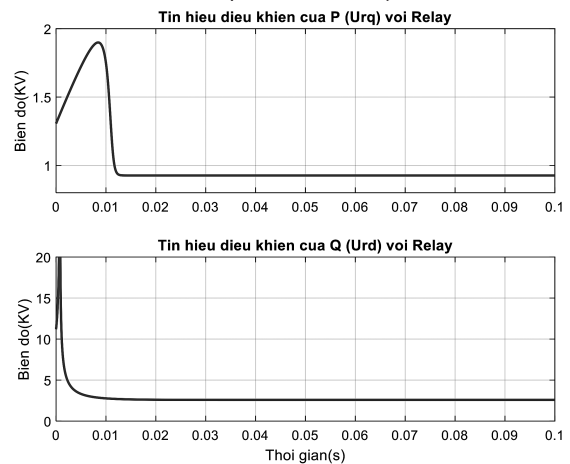
ứng. Công suất hiệu dụng và công suất phản kháng của DFIG ở Hình 3 và 4 hội tụ về công suất tham chiếu trong thời gian hữu hạn với sai số xác lập tiến về 0, thời gian tăng đạt 0.0085(s) đối với công suất hiệu dụng và công suất phản kháng là 0.0051(s), thời gian xác lập của công suất hiệu dụng và công suất phản kháng lần lượt là 0.0108(s) và 0.0126(s), không có độ vọt lố. Các chỉ tiêu chất lượng được trình bày như Bảng 3. Tín hiệu điều khiển với bộ SMC hàm relay được trình bày như Hình 5. Tín hiệu Hình 5 cho thấy hiện tượng chattering quanh mặt trượt đã được khắc phục.



Hình 3. Đáp ứng nấc và sai số của công suất hiệu dụng với bộ SMC hàm relay



Hình 4. Đáp ứng nấc và sai số công suất phản kháng với bộ SMC hàm relay



Hình 5. Tín hiệu điều khiển hàm nấc công suất bộ SMC hàm relay

Bảng 3. Các chỉ tiêu chất lượng với bộ SMC hàm relay

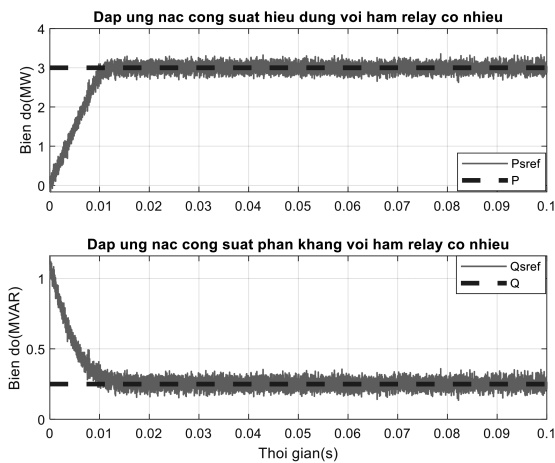
Chỉ tiêu chất lượng	Thời gian tăng (s)	Thời gian xác lập (s)	Độ vọt lố (%)	Sai số xác lập
Công suất hiệu dụng	0.0085	0.0108	0	0
Công suất phản kháng	0.0051	0.0126	0	0

Các hiệu suất khác nhau của bộ SMC hàm relay cho công suất hiệu dụng và công suất phản kháng với ngõ vào hàm nấc cũng được tính toán [14] và trình bày như Bảng 4.

Bảng 4. Các hiệu suất khác nhau của bộ SMC hàm relay với hàm nấc

Hiệu suất sai số	Công suất hiệu dụng	Công suất phản kháng
AAD	6.2166e-19	1.8206e-18
MSE	3.8650e-33	3.3149e-32
RMSE	6.2169e-17	1.8207e-16
MPE	-2.0722e-19	7.2823e-18
MAPE	2.0722e-19	7.2823e-18
MRE	2.0722e-17	7.2823e-16

Hình 6 trình bày đáp ứng nấc của công suất hiệu dụng và công suất phản kháng khi nhiễu ngoài (giả sử nhiễu cảm biến) tác động vào công suất ngõ ra của hệ thống của bộ SMC với hàm relay. Quan sát đáp ứng trên Hình 6 ta thấy rằng đáp ứng công suất thực tế vẫn bám theo công suất mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số hội tụ về 0.



Hình 6. Đáp ứng nấc của công suất hiệu dụng và công suất phản kháng bộ SMC hàm relay khi có nhiễu

Qua các đáp ứng được trình bày ở trên đã chứng tỏ sự phù hợp, tính bền vững của

bộ điều khiển SMC trong ứng dụng điều khiển trực tiếp công suất hiệu dụng và công suất phản kháng hệ thống DFIG bám theo công suất mong muốn trong thời gian hữu hạn.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã thiết kế bộ điều khiển trượt công suất hiệu dụng và công suất phản kháng máy phát điện không đồng bộ nguồn kép trong hệ thống tua – bin gió dựa vào hàm relay. Bộ điều khiển trượt được thiết kế đã đảm bảo công suất thực tế của DFIG bám theo công suất mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số tiến về 0 và giảm hiện tượng chattering quanh mặt trượt. Đồng thời, bộ điều khiển đề xuất cũng được khảo sát với trường hợp nhiễu ngoài tác động vào ngõ ra của hệ thống. Các kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả và sự bền vững của bộ điều khiển đề xuất trong điều khiển bám công suất DFIG. Trong thời gian tới, nghiên cứu sẽ ứng dụng các giải thuật điều khiển thông minh để nâng cao hiệu suất điều khiển và kết hợp hệ thống với lưới điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Allam, Mohamed & Djeriri, Youcef & Mesai Ahmed, Hamza (2019), “*Sliding mode control of a doubly fed induction generator for wind energy conversion systems*”, International Symposium On Technology Sustainable Industry Development (ISTSID’19), pp. 1 – 7.
- [2]. Bayat, M., & Torun, Y. (2017), “*Modeling and Linearization of DFIG Based Wind Turbine*”, European Scientific Journal, Vol. 13, No. 10, pp. 158 - 168.
- [3]. Xiong, Linyun & Li, Penghan & Li, Hao & Wang, Jie. (2017), “*Sliding Mode Control of DFIG Wind Turbines with a Fast Exponential Reaching Law*”, Energies, Vol. 10, pp. 1 – 19.
- [4]. Benmezziane, Meriem & Zebirate, Soraya & Abdelkader, Chaker & Boudjema, Z. (2019), “*Fuzzy sliding mode control of doubly-fed induction generator driven by wind turbine*”, International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), Vol. 10, No. 3, pp. 1592 – 1602.

- [5]. Said AZZOUZ, Sabir MESSALTI, Abdelghani HARRAG (2019), “*Innovative PID-GA MPPT Controller for Extraction of Maximum Power from Variable Wind Turbine*”, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, Vol. 1, pp. 115 - 120.
- [6]. Othmane Zamzoum, Youness El Mourabit, Mustapha Errouha, Aziz Derouich, Abdelaziz El Ghzizal (2019), “*Active and Reactive Power Control of Wind Turbine based on Doubly Fed Induction Generator using Adaptive Sliding Mode Approach*”, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 10, No. 2, pp. 397 – 406.
- [7]. Larbi Djilali, Edgar N. Sanchez & Mohammed Belkheiri (2020), “*First and High Order Sliding Mode Control of a DFIG-Based Wind Turbine*”, Electric Power Components and Systems, Electric Power Components and Systems, Vol. 48, pp. 105 – 116.
- [8]. S. Gao, H. Zhao, Y. Gui, D. Zhou and F. Blaabjerg (2021), “*An Improved Direct Power Control for Doubly Fed Induction Generator*”, in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 36, No. 4, pp. 4672-4685.
- [9]. Zghayer, Talib & H. Numan, Ali & Hussein, Ghasaq (2020), “*Analysis of Vector Controlled Variable Speed DFIG for Wind Turbines*”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 765, pp. 1 – 21.
- [10]. Kelkoul, B., & Boumediene, A. (2020), “*Stability analysis and study between Classical Sliding Mode Control (SMC) and Super Twisting Algorithm (STA) for Doubly Fed Induction Generator (DFIG) under Wind turbine*”, Energy, Vol. 214, pp. 1 – 32.
- [11]. Lin, Chien-Hong & Hsiao, Fu-Yuen (2020), “*Proportional-Integral Sliding Mode Control with an Application in the Balance Control of a Two-Wheel Vehicle System*”, Applied Sciences, Vol. 10, pp. 1 – 27.
- [12]. C B Kadu, C B & Khandekar, A. & Patil, Chetankumar (2018), “*Design of sliding mode controller with PI sliding surface for robust regulation and tracking of process control systems*”, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 140, No. 9, pp. 1 – 11.
- [13]. Jinkun Liu (2017), “*Sliding Mode Control Using MATLAB*”, Elsevier Science.
- [14]. Mukherjee, Indrajit & Routroy, Srikanta (2012), “*Comparing the performance of neural networks developed by using Levenberg-Marquardt and Quasi-Newton with the gradient descent algorithm for modelling a multiple response grinding process*”, Expert Syst. Appl, Vol. 39, No. 3, pp. 2397-2407.

Thông tin phản biện: TS. Nguyễn Xuân Vinh; TS. Phạm Thanh Tùng