

APPLICATION OF FUZZY LOGIC AND A QUASI-SLIDING MODE FOR A DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR

Ly Nhat Minh¹, Pham Thanh Tung^{2*}

¹Power Transmission Company 4, ²Vinh Long University of Technology Education

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 04/7/2024	This study proposes to combine fuzzy logic control with sliding mode control-based Quasi sliding mode (SMC-FL-Q) to independently control the power of a doubly fed induction generator (DFIG). This type of electric machine is highly efficient and is often used in wind turbines. Fuzzy control is the inspection, development and testing of systems based on fuzzy rules. Sliding mode control is a controller with a variable structure based on intermittent control signals that forces the system's state trajectory to approach the sliding surface. The proposed controller is designed to ensure that the actual powers of the DFIG follow the desired powers in a finite time and reduces the chattering phenomenon around the sliding surface. Lyapunov theory is used to check the stability of the system. Simulation results of the SMC-FL-Q controller applied to the DFIG system were compared to the adaptive fuzzy PI and Recurrent Type-II Fuzzy Neural Networks. The comparison results showed that the proposed controller was more effective without the overshoot, the steady-state converges to 0, the rising time, the settling time of the active and reactive power is 0.0021(s), 0.0031(s) and 0.0016(s), 0.0029(s), respectively.
Revised: 07/10/2024	
Published: 08/10/2024	
KEYWORDS	
Fuzzy logic	
Doubly fed induction generator	
Quasi-sliding mode	
Active power	
Reactive power	

ỨNG DỤNG LOGIC MỜ VÀ CHẾ ĐỘ TRƯỢT QUASI CHO MÁY PHÁT ĐIỆN GIÓ NGUỒN KÉP

Lý Nhật Minh¹, Phạm Thanh Tùng^{2*}

¹Công ty truyền tải điện 4, ²Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh Long

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 04/7/2024	Nghiên cứu này đề xuất kết hợp điều khiển logic mờ với điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi (SMC-FL-Q) để điều khiển độc lập công suất máy phát điện gió nguồn kép (DFIG). Đây là loại máy điện có hiệu quả cao và thường được sử dụng trong tua-bin gió. Điều khiển mờ là việc kiểm tra, phát triển và thử nghiệm các hệ thống dựa trên các quy tắc mờ. Điều khiển trượt là bộ điều khiển có cấu trúc thay đổi dựa trên tín hiệu điều khiển không liên tục buộc quỹ đạo trạng thái của hệ thống tiếp cận đến mặt trượt. Bộ điều khiển đề xuất 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 chattering quanh mặt trượt. Lý thuyết Lyapunov được sử dụng để kiểm tra tính ổn định của hệ thống. Các kết quả mô phỏng của bộ điều khiển SMC-FL-Q áp dụng cho hệ thống DFIG được so sánh với bộ điều khiển PI mờ thích nghi và nơ-ron mờ hồi quy loại 2. Các kết quả so sánh đã cho thấy bộ điều khiển đề xuất hiệu quả hơn với độ vọt lố là 0(%), sai số xác lập hội tụ về 0, thời gian tăng, thời gian xác lập của công suất tác dụng và phản kháng tương ứng là 0,0021(s), 0,0031(s) và 0,0016(s), 0,0029(s).
Ngày hoàn thiện: 07/10/2024	
Ngày đăng: 08/10/2024	
TỪ KHÓA	
Logic mờ	
Máy phát điện gió nguồn kép	
Chế độ trượt Quasi	
Công suất tác dụng	
Công suất phản kháng	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10707>

* Corresponding author. Email: tungpt@vlute.edu.vn

1. Giới thiệu

Hệ thống gió dựa trên máy phát điện gió nguồn kép (DFIG - Doubly Fed Induction Generator) đã trở thành một nguồn năng lượng rất quan trọng. DFIG là máy điện được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực công suất cao, nhờ những ưu điểm khác nhau như: giảm kích thước của bộ chuyển đổi, hoạt động trong khoảng thay đổi tốc độ lớn và khả năng điều khiển công suất độc lập [1].

Rất nhiều nghiên cứu đã được công bố trong điều khiển DFIG, tiêu biểu như: điều khiển trượt [2] - [5], điều khiển trượt và cuộn chiếu [6], điều khiển dưới điều kiện lưới cân bằng [7], điều khiển trượt terminal thích nghi [8], điều khiển dựa trên kỹ thuật hồi tiếp [9], điều khiển bằng giải thuật di truyền [10], tuyến tính hóa [11], điều khiển trượt với luật tiếp cận hàm mũ nhanh [12], điều khiển trượt mờ [13], điều khiển PID-GA MPPT cải tiến [14], điều khiển trượt thích nghi [15], điều khiển trượt bậc một và bậc cao [16], cải tiến điều khiển công suất trực tiếp [17], phân tích vector điều khiển [18], điều khiển trượt và thuật toán Super Twisting [19].

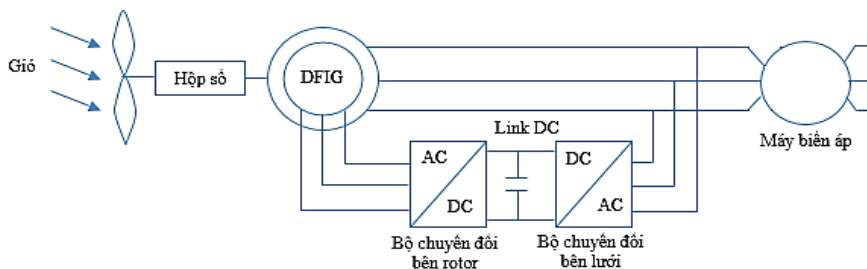
Điều khiển trượt (SMC) là bộ điều khiển có cấu trúc thay đổi dựa trên tín hiệu điều khiển không liên tục buộc quỹ đạo trạng thái của hệ thống tiếp cận đến mặt trượt. Kỹ thuật điều khiển này được biết đến bởi sự bền vững của nó chống lại sự phi tuyến, sự bất định của hệ thống và nhiễu ngoài [20]. Tuy nhiên, đối với biên độ của luật điều khiển trượt nếu không được lựa chọn phù hợp sẽ gây ra hiện tượng dao động [21], [22]. 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 [22]. Để khắc phục nhược điểm này, nghiên cứu đề xuất sử dụng chế độ trượt Quasi (thay vì sử dụng hàm signum). Bên cạnh đó, điều khiển mờ là việc kiểm tra, phát triển và thử nghiệm các hệ thống dựa trên các quy tắc mờ [23]. Về cơ bản, việc sử dụng điều khiển mờ cho một hệ thống dựa trên các quy tắc mà các quy tắc này dựa vào kinh nghiệm và kiến thức của con người. Nghiên cứu này đề xuất kết hợp điều khiển logic mờ với điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi để điều khiển độc lập công suất DFIG tua – bin gió với các kết quả mô phỏng được thực hiện trong MATLAB/Simulink.

Bài báo được tổ chức gồm 4 phần: phần 2 trình bày ứng dụng logic mờ và chế độ trượt Quasi trong điều khiển công suất DFIG, phần 3 trình bày các kết quả và thảo luận, kết luận là phần 4.

2. Ứng dụng logic mờ và chế độ trượt Quasi trong điều khiển công suất DFIG

2.1. Mô hình của DFIG

Cấu hình DFIG được trình bày như Hình 1 [24]. Mô hình động học của DFIG trong khung $d-q$ được biểu diễn như (1) - (4) [25]:



Hình 1. Cấu hình của DFIG tua-bin gió

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

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

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

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

Các phương trình từ thông như (5) - (8):

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

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

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

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

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, công suất tác dụng và phản kháng được điều khiển độc lập 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): $T_{em} = -p \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \varphi_{sd}$ (11)

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

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

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

Thay (13) và (14) vào (7) và (8), ta được (17) và (18):

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

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

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):

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

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

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

2.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi

Trong phần này, nghiên cứu sẽ tiến hành điều khiển công suất tác dụng và phản kháng stator của DFIG bám theo các giá trị tham chiếu sử dụng bộ điều khiển trượt dựa vào chế độ trượt Quasi.

2.2.1. Điều khiển công suất tác dụng

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

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

trong đó: P_{sref} là công suất tác dụng mong muốn, P_s là công suất tác dụng thực tế của DFIG.

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 (25):

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

Luật điều khiển trượt cho công suất tác dụng với chế độ trượt Quasi như (26) [22]:

$$V_{rq_smc} = \frac{\sigma L_r L_s}{V_s L_m} \left(-\dot{P}_{sref} - \frac{V_s L_m}{\sigma L_r L_s} \left[-R_r I_{rq} - g \omega_s \sigma L_r I_{rd} - g \frac{L_m V_s}{L_s} \right] \right) - \frac{\sigma L_r L_s}{V_s L_m} K_p \frac{S_p}{|S_p| + \zeta_p} \quad (26)$$

Trong đó, $\zeta_p > 0$.

Để chứng minh tính ổn định, hàm Lyapunov được định nghĩa như (27):

$$V_p = \frac{1}{2} S_p^2 \quad (27)$$

Đạo hàm 2 vế của (27), ta được (28):

$$\dot{V}_p = S_p \dot{S}_p = -K_p \frac{S_p^2}{|S_p| + \zeta_p} < 0 \quad (28)$$

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 $e_p(t)$ sẽ hội tụ về 0 dẫn theo $S_p(t) \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$.

2.2.2. Điều khiển công suất phản kháng

Mặt trượt trong điều khiển công suất phản kháng được định nghĩa như (29):

$$S_Q = Q_{sref} - Q_s \quad (29)$$

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

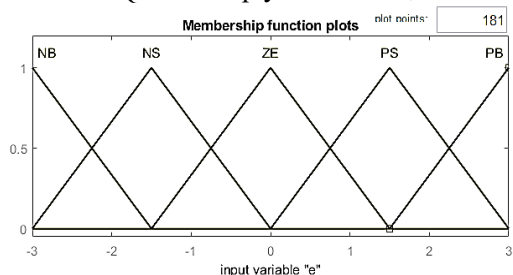
Tương tự, luật điều khiển trượt cho công suất phản kháng với chế độ trượt Quasi như (30):

$$V_{rd_smc} = \frac{\sigma L_r L_s}{V_s L_m} \left(-\dot{Q}_{sref} - \frac{V_s L_m}{\sigma L_r L_s} \left[-R_r I_{rd} + g \omega_s \sigma L_r I_{rq} \right] \right) - \frac{\sigma L_r L_s}{V_s L_m} K_Q \frac{S_Q}{|S_Q| + \zeta_Q}, \zeta_Q > 0. \quad (30)$$

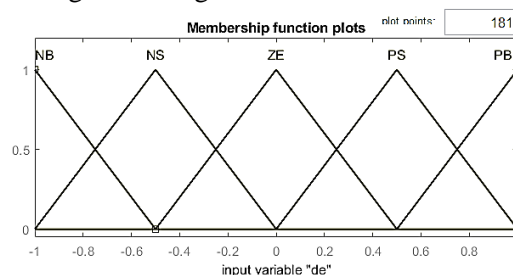
2.3. Logic mờ

Các hệ số K_p , K_Q trong (26) và (30) nếu được chọn với giá trị quá nhỏ sẽ làm cho thời gian tiếp cận mặt trượt quá dài, ngược lại sẽ gây ra hiện tượng chattering cho hệ thống. Nghiên cứu này sử dụng logic mờ để điều chỉnh giá trị K_p và K_Q . Sai số (e) và sự hay đổi của sai số (de) là 2 ngõ vào của hệ logic mờ. Hai ngõ vào này sử dụng các biến ngôn ngữ như sau: NB (âm lớn), NS

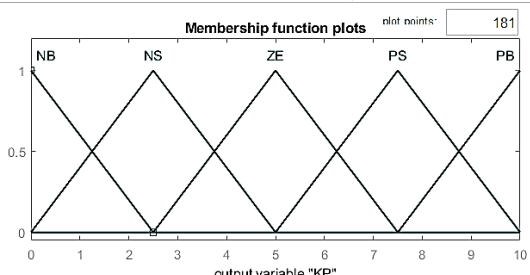
(âm nhỏ), ZE (zero), PS (dương nhỏ) và PB (dương lớn). Hàm liên thuộc của e , de , K_P và K_Q được trình bày như Hình 2, Hình 3, Hình 4 và Hình 5. Hình 6 và Hình 7 trình bày mặt đặc tính của K_P và K_Q với các quy tắc mờ được trình bày như Bảng 1 và Bảng 2.



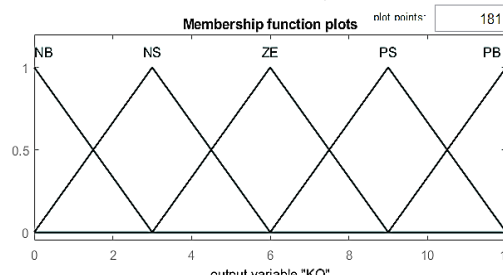
Hình 2. Hàm liên thuộc của e



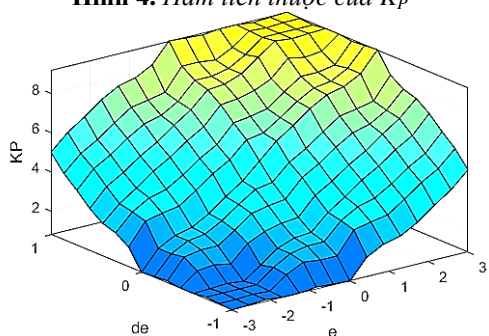
Hình 3. Hàm liên thuộc của de



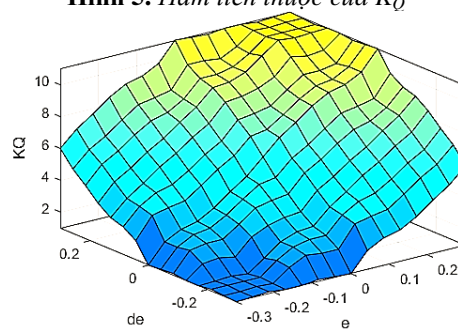
Hình 4. Hàm liên thuộc của K_P



Hình 5. Hàm liên thuộc của K_Q



Hình 6. Mặt đặc tính của K_P



Hình 7. Mặt đặc tính của K_Q

Bảng 1. Quy tắc mờ của K_P

K_P	de				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
e	ZE	NB	NS	ZE	PS
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

Bảng 2. Quy tắc mờ của K_Q

K_Q	de				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
e	ZE	NB	NS	ZE	PS
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

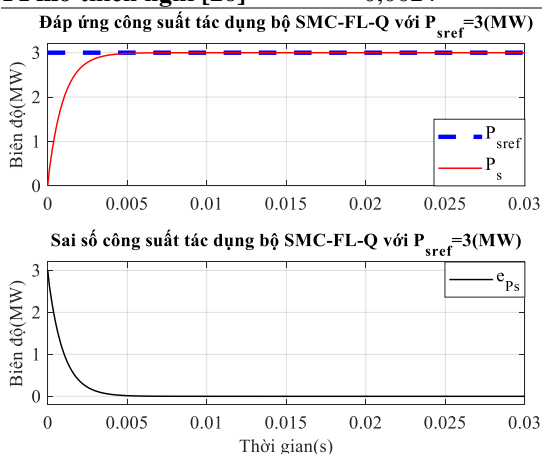
3. Kết quả và thảo luận

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển SMC-FL-Q áp dụng cho DFIG được thực hiện trong MATLAB/Simulink với các thông số của DFIG như sau: $P_n = 3(MW)$, $p = 2$, $G = 90$, $\rho = 1,225(kg / m^3)$, $L_m = 0,0135(H)$, $L_s = 0,0137(H)$, $L_r = 0,0136(H)$, $R_r = 0,021(\Omega)$, $R_s = 0,012(\Omega)$, $V_s = 690(V)$, $f = 50(Hz)$, $g = 0,02$ và $\omega_s = 320(rad / s)$. Các thông số của bộ điều khiển SMC-FL-Q là $\zeta_p = 0,5$, $\zeta_Q = 0,1$.

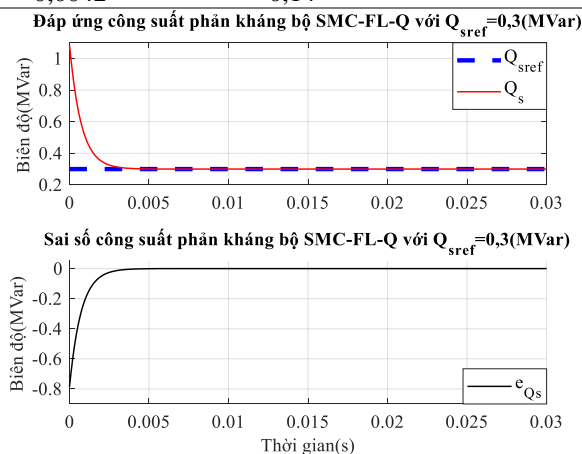
Hình 8 trình bày đáp ứng và sai số của công suất tác dụng (P_s) với bộ điều khiển SMC-FL-Q khi $P_{sref}=3(MW)$ và công suất phản kháng (Q_s) khi $Q_{sref}=0,3(MVar)$ như Hình 9. Đáp ứng thực tế của P_s và Q_s hội tụ về P_{sref} và Q_{sref} với các chỉ tiêu chất lượng đạt được hiệu quả hơn bộ điều khiển mờ mờ hồi quy loại 2 (RT2FNN) [24] và PI mờ thích nghi [26] như Bảng 3.

Bảng 3. Các chỉ tiêu chất lượng đạt được của bộ điều khiển SMC-FL-Q

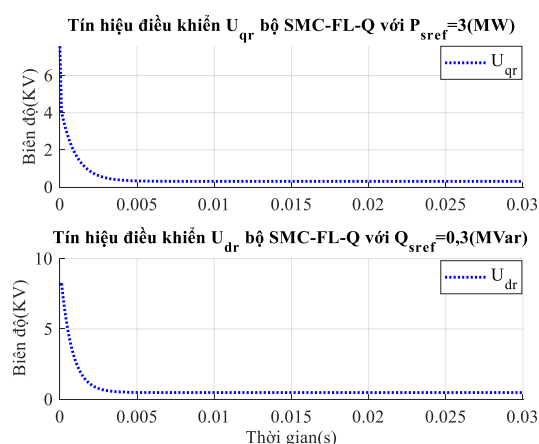
Chỉ tiêu chất lượng	Thời gian tăng (s)	Thời gian xác lập (s)	Độ vọt lố (%)	Sai số xác lập
Công suất tác dụng				
SMC-FL-Q	0,0021	0,0031	0	0
RT2FNN [24]	-	1,7	0,32	-
PI mờ thích nghi [26]	0,0024	0,0042	0,01	-
Công suất phản kháng				
SMC-FL-Q	0,0016	0,0029	0	0
RT2FNN [24]	-	1,0	-	-
PI mờ thích nghi [26]	0,0024	0,0042	0,14	-



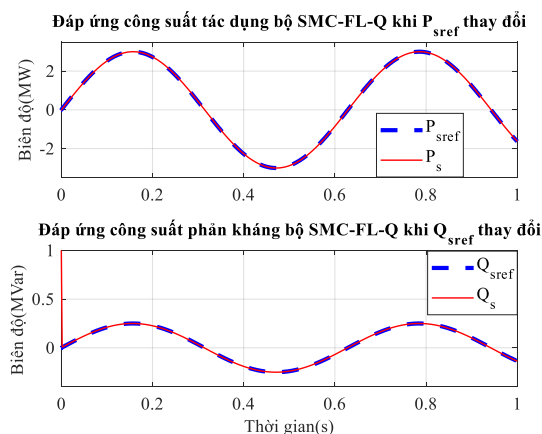
Hình 8. Đáp ứng và sai số công suất tác dụng bộ SMC-FL-Q



Hình 9. Đáp ứng và sai số công suất phản kháng bộ SMC-FL-Q



Hình 10. Tín hiệu điều khiển bộ SMC-FL-Q



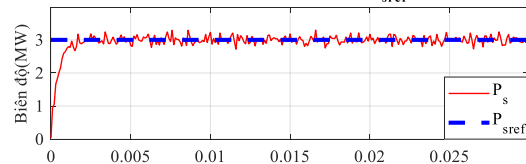
Hình 11. Đáp ứng công suất tác dụng và phản kháng bộ SMC-FL-Q với *since*

Các hiệu suất sai số AAD, MSE, RMSE, MPE, MAPE, MRE đạt được của bộ điều khiển SMC-FL-Q đối với P_s là $1,4754e-18$; $6,5520e-34$; $2,5597e-17$; $-4,9179e-19$; $4,9179e-19$; $4,9179e-17$ và Q_s là $1,4754e-18$; $6,5520e-34$; $2,5597e-17$; $5,9015e-18$; $5,9015e-18$; $5,9015e-16$.

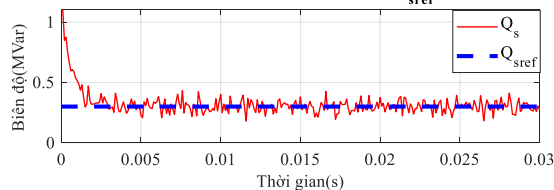
Tín hiệu điều khiển cho công suất tác dụng (U_{gr}) và phản kháng (U_{dr}) với bộ điều khiển đề xuất được thể hiện như Hình 10. Hiện tượng chattering đã được khắc phục với bộ điều khiển

SMC-FL-Q áp dụng cho hệ thống DFIG trong nghiên cứu này. Đáp ứng công suất tác dụng (P_s) và phản kháng (Q_s) của DFIG với bộ điều khiển SMC-FL-Q khi ngõ vào since vẫn hội tụ về P_{sref} và Q_{sref} với sai số tiến về 0 được trình bày như Hình 11. Đáp ứng P_s và Q_s bộ SMC-FL-Q với ngõ vào $P_{sref} = 3(MW)$, $Q_{sref} = 0,3(MVar)$ và since khi có nhiễu tác động ở ngõ ra của DFIG như Hình 12 và Hình 13. Đáp ứng công suất thực tế của DFIG vẫn hội tụ về ngõ vào tham chiếu.

Đáp ứng công suất tác dụng bộ SMC-FL-Q khi $P_{sref} = 3(MW)$ khi có nhiễu

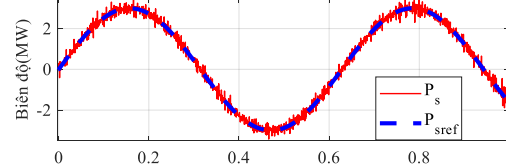


Đáp ứng công suất phản kháng bộ SMC-FL-Q khi $Q_{sref} = 0,3(MVar)$ có nhiễu

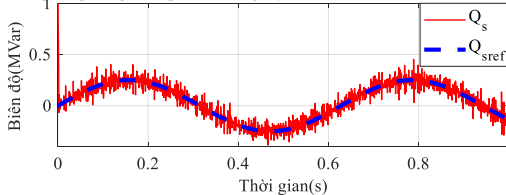


Hình 12. Đáp ứng công suất tác dụng và phản kháng bộ SMC-FL-Q với $P_{sref} = 3(MW)$ và $Q_{sref} = 0,3(MVar)$ khi có nhiễu

Đáp ứng công suất tác dụng bộ SMC-FL-Q với since khi có nhiễu



Đáp ứng công suất phản kháng bộ SMC-FL-Q với since khi có nhiễu



Hình 13. Đáp ứng công suất tác dụng và phản kháng bộ SMC-FL-Q với since khi có nhiễu

4. Kết luận

Bộ điều khiển SMC-FL-Q đã được thiết kế và áp dụng cho hệ thống DFIG trong nghiên cứu này. Bộ điều khiển đề xuất được thiết kế để đảm bảo công suất tác dụng và phản kháng thực tế của DFIG bám theo công suất mong muốn trong thời gian hữu hạn và giảm hiện tượng dao động tần số cao (chattering) quanh mặt trượt. Các kết quả mô phỏng trong MATLAB/Simulink cho thấy rằng các chất lượng đạt được của bộ điều khiển đề xuất hiệu quả hơn so với bộ điều khiển RT2FNN và PI mờ thích nghi với độ vọt lố là 0(%), sai số xác lập hội tụ về 0, thời gian tăng, thời gian xác lập của công suất tác dụng và công suất phản kháng tương ứng là 0,0021(s), 0,0031(s) và 0,0016(s), 0,0029(s). Trong thời gian tới, nghiên cứu sẽ tiếp tục khảo sát các dạng mặt trượt khác nhau như PI cải tiến, PID, mặt trượt bậc phân số hoặc sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo để loại bỏ hiện tượng chattering trong điều khiển trượt DFIG.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] K. Boulaam and A. Boukhelifa, "Fuzzy sliding mode control of DFIG power for a wind conversion system," in *2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, Antalya, Turkey: IEEE, Sep. 2014, pp. 353-358.
- [2] M. Allam, D. Youcef, and H. M. Ahmed, "Sliding mode control of a doubly fed induction generator for wind energy conversion systems," *International Symposium on Technology Sustainable Industry Development*, Feb. 2019, pp. 1-7.
- [3] S. Kouadria, Y. Messlem, and E. M. Berkouk, "Sliding mode control of the active and reactive power of DFIG for variable-speed wind energy conversion system," in *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Marrakech: IEEE, Dec. 2015, pp. 1-8.
- [4] O. Belghazi, R. Douiri, and M. Cherkaoui, "Power control of a wind energy based on a DFIG by sliding mode approach and pitch angle optimal control by genetic algorithm," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 74, no. 2, pp. 78-85, 2016.
- [5] S. Sharma, J. P. Mishra, and S. Datta, "Sliding mode power control of a DFIG based variable speed wind energy conversion system," in *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, New Delhi, India: IEEE, Dec. 2015, pp. 1-6.

- [6] A. Boualouch, A. Essadki, T. Nasser, A. Boukhriss, and A. Frigui, "Power Control of DFIG In Weccs Using Backstipping And Sliding Mode Controller," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, no. 6, pp. 612-618, 2015.
- [7] C. Mehdipour, A. Hajizadeh, and I. Mehdipour, "Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under balanced network conditions," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, pp. 560-569, 2016.
- [8] R. K. Patnaik, P. K. Dash, and K. Mahapatra, "Adaptive terminal sliding mode power control of DFIG based wind energy conversion system for stability enhancement: DFIG Power Control," *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 750-782, 2016.
- [9] G. S. Kaloi, J. Wang, and M. H. Baloch, "Active and reactive power control of the doubly fed induction generator based on wind energy conversion system," *Energy Reports*, vol. 2, pp. 194-200, 2016.
- [10] F. Chamani and M. Satkin, "Simulation and Control of Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Used in Wind Turbines by Using Genetic Algorithm," *MAS*, vol. 10, no. 8, pp. 1-11, 2016.
- [11] M. Bayat and Y. Torun, "Modeling and Linearization of DFIG Based Wind Turbine," *European Scientific Journal*, vol. 13, no. 10, pp. 158-168, 2017.
- [12] X. Linyun, L. Penghan, L. Hao, and W. Jie, "Sliding Mode Control of DFIG Wind Turbines with a Fast Exponential Reaching Law," *Energies*, vol. 10, no. 11, pp. 1-19, 2017.
- [13] M. Benmeziane, S. Zebirate, A. Chaker, and Z. Boudjema, "Fuzzy sliding mode control of doubly-fed induction generator driven by wind turbine," *IJPEDS*, vol. 10, no. 3, pp. 1592-1602, 2019.
- [14] S. Azzouz, "Innovative PID-GA MPPT Controller for Extraction of Maximum Power from Variable Wind Turbine," *Electrotechnical Review*, vol. 1, no. 8, pp. 117-122, 2019.
- [15] O. Zamzoum, Y. El, M. Errouha, A. Derouich, and A. El, "Active and Reactive Power Control of Wind Turbine based on Doubly Fed Induction Generator using Adaptive Sliding Mode Approach," *Ijacs*, vol. 10, no. 2, pp. 397-406, 2019.
- [16] L. Djilali, E. N. Sanchez, and M. Belkheiri, "First and High Order Sliding Mode Control of a DFIG-Based Wind Turbine," *Electric Power Components and Systems*, vol. 48, no. 1-2, pp. 105-116, 2020.
- [17] S. Gao, H. Zhao, Y. Gui, D. Zhou, and F. Blaabjerg, "An Improved Direct Power Control for Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 4, pp. 4672-4685, 2021.
- [18] T. Z. Farge, A. H. Numan, and G. M. Hussein, "Analysis of Vector Controlled Variable Speed DFIG for Wind Turbines," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 765, no. 1, pp. 1-21, 2020.
- [19] B. Kelkoul and A. Boumediene, "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, 2021.
- [20] H. Choja, A. Derouich, S. E. Chehaidia, O. Zamzoum, M. Taoussi, and H. Elouatouat, "Integral sliding mode control for DFIG based WECS with MPPT based on artificial neural network under a real wind profile," *Energy Reports*, vol. 7, no. 2021, pp. 4809-4824, 2021.
- [21] C. B. Kadu, A. A. Khandekar, and C. Y. Patil, "Design of Sliding Mode Controller with Proportional Integral 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, 2018.
- [22] Jinkun Liu, *Sliding Mode Control Using MATLAB*. Elsevier Science, 2017.
- [23] E. O. Zouggar, S. Chaouch, D. O. Abdeslam, and A. L. Abdelhamid, "Sliding Control with Fuzzy Type-2 Controller of Wind Energy System Based on Doubly Fed Induction Generator," *I2M*, vol. 18, no. 2, pp. 137-146, 2019.
- [24] J. Tavoosi *et al.*, "A machine learning approach for active/reactive power control of grid-connected doubly-fed induction generators," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 1-10, 2022.
- [25] L. Djilali, E. N. Sanchez, and M. Belkheiri, "First and High Order Sliding Mode Control of a DFIG-Based Wind Turbine," *Electric Power Components and Systems*, vol. 48, no. 1-2, pp. 105-116, 2020.
- [26] S. Louarem, D. E. C. Belkhiat, T. Bouktir, and S. Belkhiat, "An Efficient Active and Reactive Power Control of DFIG for a Wind Power Generator," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 9, no. 5, pp. 4775-4782, 2019.