

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT SIÊU XOẪN PHI TUYẾN CHO BIẾN TẦN BA PHA NỐI LƯỚI SỬ DỤNG BỘ LỌC LCL

NONLINEAR SUPER-TWISTING SLIDING MODE CONTROL FOR A THREE-PHASE LCL-FILTERED GRID-CONNECTED INVERTER

Phùng Thị Thanh Mai¹, Lê Thị Mai Hương^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huivh5804.2026.041>

TÓM TẮT

Trong hệ thống phát điện phân tán, bộ biến tần nối lưới (grid-connected inverter) đóng vai trò trung gian giữa nguồn năng lượng tái tạo và lưới điện. Tuy nhiên, khi xuất hiện các yếu tố phi tuyến như dao động thông số của bộ lọc LCL, biến thiên trở kháng lưới hoặc méo sóng điện áp, các bộ điều khiển tuyến tính truyền thống (PI, PD, PID...) thường mất ổn định hoặc gây tăng méo hài dòng điện. Bài báo này trình bày một phương pháp điều khiển trượt phi tuyến kết hợp siêu xoắn tích phân cho bộ biến tần ba pha nối lưới với bộ lọc LCL. Thuật toán được xây dựng trong hệ tọa độ $\alpha\beta$ tĩnh, giúp giảm tải tính toán so với hệ dq. Mô phỏng và thực nghiệm cho thấy bộ điều khiển đạt được dòng điện có méo hài thấp ($< 2\%$), duy trì ổn định khi có biến động thông số và méo lưới.

Từ khóa: Điều khiển trượt, bộ lọc LCL, biến tần nối lưới, siêu xoắn, điều khiển phi tuyến.

ABSTRACT

In distributed generation systems, the grid-connected inverter (GCI) acts as an interface between renewable energy sources and the utility grid. However, in the presence of nonlinear factors such as parameter variations of the LCL filter, grid impedance fluctuations, or grid voltage distortion, conventional linear controllers (e.g., PI, PR, or Deadbeat) often become unstable or cause an increase in current total harmonic distortion (THD). This paper presents a nonlinear integral super-twisting sliding mode control (ST-SMC) strategy for a three-phase grid-connected inverter employing an LCL filter. The proposed control algorithm is designed in the stationary $\alpha\beta$ reference frame, which significantly reduces the computational burden compared to the synchronous dq frame. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed controller achieves low current harmonic distortion ($< 2\%$) and maintains robust stability under parameter variations and grid voltage distortions.

Keywords: Sliding mode control, LCL filter, Grid-connected inverter, Super-twisting, nonlinear control.

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện Lực

*Email: huongltm@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 08/01/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/3/2026

Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

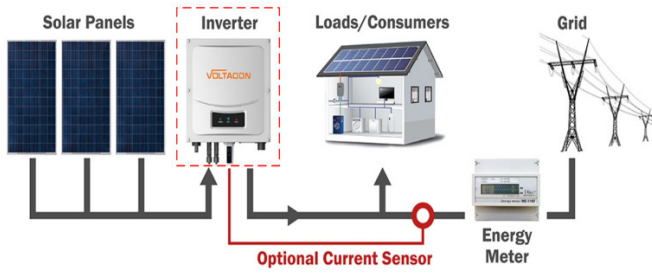
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển nhanh chóng của các nguồn năng lượng tái tạo như điện mặt trời và điện gió đã làm gia tăng vai trò của bộ biến tần nối lưới (grid-connected inverter - GCI) trong các hệ thống phát điện phân tán. Bộ biến tần không chỉ đảm nhiệm chức năng chuyển đổi năng lượng mà còn phải đảm bảo chất lượng điện năng, đáp ứng các tiêu chuẩn nghiêm ngặt về méo hài dòng điện, ổn định điện

áp và khả năng vận hành trong điều kiện lưới yếu hoặc bị méo dạng.

Trong các hệ thống GCI công suất vừa và lớn, bộ lọc LCL được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng suy giảm sóng hài cao và giảm kích thước phần tử thụ động. Tuy nhiên, đặc tính động học bậc cao của bộ lọc LCL làm phát sinh hiện tượng cộng hưởng, đặc biệt nhạy cảm với sự thay đổi tham số và biến thiên trở kháng lưới. Điều này có thể gây

mất ổn định hệ thống nếu không có chiến lược điều khiển phù hợp.



Hình 1. Vị trí biến tần trong hệ năng lượng tái tạo

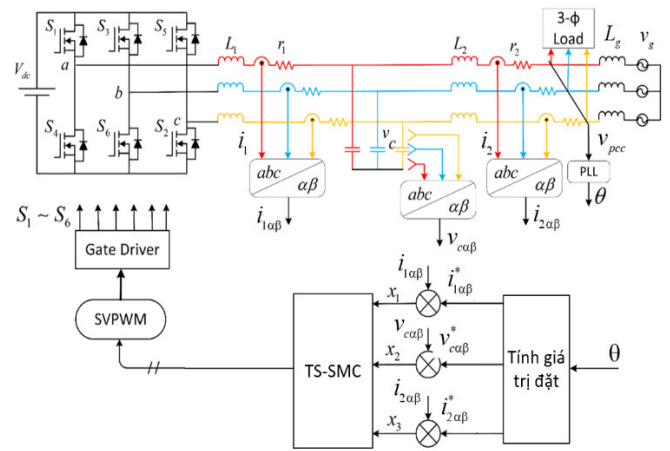
Các phương pháp điều khiển tuyến tính truyền thống như PI, PR hoặc điều khiển dự báo đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi. Tuy nhiên, các phương pháp này thường phụ thuộc mạnh vào mô hình chính xác của hệ thống và chỉ đảm bảo hiệu quả trong phạm vi hẹp của tham số. Khi hệ thống làm việc trong điều kiện lưới yếu, méo điện áp hoặc biến đổi tham số bộ lọc LCL, chất lượng dòng điện nối lưới có thể suy giảm đáng kể [1-3]. Để nâng cao tính bền vững của hệ thống, điều khiển trượt (Sliding Mode Control - SMC) đã được nghiên cứu như một giải pháp hiệu quả nhờ khả năng chống nhiễu, không nhạy với sai lệch tham số và đảm bảo ổn định toàn cục. Nhiều công trình gần đây đã ứng dụng SMC và các biến thể của nó cho biến tần nối lưới, bao gồm SMC kết hợp điều khiển dự đoán [1], SMC dạng terminal và non-singular nhằm cải thiện tốc độ hội tụ [2, 5]. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của SMC truyền thống là hiện tượng rung (chattering), gây tổn hao công suất và ảnh hưởng đến tuổi thọ linh kiện bán dẫn.

Nhằm khắc phục hạn chế trên, các thuật toán điều khiển trượt bậc cao, đặc biệt là điều khiển trượt siêu xoắn (Super-Twisting Sliding Mode Control - ST-SMC), đã được đề xuất. Các nghiên cứu gần đây cho thấy ST-SMC có khả năng loại bỏ hiện tượng rung, cải thiện chất lượng dòng điện và duy trì ổn định hệ thống ngay cả trong điều kiện lưới yếu hoặc méo điện áp nghiêm trọng [2, 5]. Bên cạnh đó, việc thiết kế bộ điều khiển trong hệ tọa độ $\alpha\beta$ tĩnh giúp giảm đáng kể khối lượng tính toán so với hệ dq, phù hợp với các bộ xử lý số công nghiệp.

Xuất phát từ các phân tích trên, bài báo này đề xuất một phương pháp điều khiển trượt siêu xoắn phi tuyến cho biến tần ba pha nối lưới sử dụng bộ lọc LCL. Bộ điều khiển được xây dựng trong hệ tọa độ $\alpha\beta$, đảm bảo tính ổn định tiệm cận của hệ thống theo tiêu chuẩn Lyapunov, đồng thời nâng cao khả năng bám dòng và suy giảm cộng hưởng của bộ lọc. Hiệu quả của phương pháp đề xuất được kiểm chứng thông qua mô phỏng trên

Matlab/Simulink trong các điều kiện biến thiên bức xạ, nhiễu ngoài và thay đổi tham số hệ thống.

2. MÔ HÌNH TOÁN



Hình 2. Sơ đồ đề xuất điều khiển biến tần

Trong đó: V_{dc} - điện áp đầu vào một chiều cấp cho biến tần; $i_{2\alpha\beta}$ - dòng điện nối lưới; v_{pcc} - điện áp tại điểm nối chung giữa hệ thống và lưới; v_g - điện áp lưới tại điểm đấu nối, được đồng bộ pha qua bộ PLL;

Phương trình động học trong hệ $\alpha\beta$ được mô tả như sau:

$$L_1 \frac{di_{1\alpha}}{dt} = v_{i\alpha} - r_1 i_{1\alpha} - v_{c\alpha} \tag{1}$$

$$L_1 \frac{di_{1\beta}}{dt} = v_{i\beta} - r_1 i_{1\beta} - v_{c\beta} \tag{2}$$

$$C \frac{dv_{c\alpha}}{dt} = i_{1\alpha} - i_{2\alpha} \tag{3}$$

$$C \frac{dv_{c\beta}}{dt} = i_{1\beta} - i_{2\beta} \tag{4}$$

$$L_2 \frac{di_{2\alpha}}{dt} = v_{c\alpha} - r_2 i_{2\alpha} - v_{g\alpha} \tag{5}$$

$$L_2 \frac{di_{2\beta}}{dt} = v_{c\beta} - r_2 i_{2\beta} - v_{g\beta} \tag{6}$$

Trong đó: L, C là giá trị cuộn cảm và tụ điện của bộ lọc, i_1 - dòng điện đầu ra biến tần, v_c - điện áp tụ điện, dòng điện và điện áp tham chiếu được tính như sau:

$$i_{2p}^* = I_2 \sin(\omega t + \theta) \tag{7}$$

$$v_{cp}^* = L_2 \frac{di_{2p}^*}{dt} + v_{pcc} + r_2 i_{2p}^* \tag{8}$$

$$i_{1p}^* = i_{2p}^* + C \frac{dv_{cp}^*}{dt} \tag{9}$$

Thay (7), (8) vào (9) có:

$$i_{lp}^* = I_2 \sin(\omega t + \theta) + CL_2 I_2 \omega^2 \sin(\omega t + \theta) + C\dot{v}_{pcc} + r_2 I_2 \omega \cos(\omega t + \theta) \tag{10}$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT SIÊU XOÃN

Hệ thống GC-VSI trong hệ tọa độ $\alpha\beta$; do đó, trong nghiên cứu này, chỉ thiết kế bộ điều khiển cho trục α , với trục β có thể được suy ra tương tự. Đặt các biến sai số sau:

$x_1 = i_1^* - i_1$; $x_2 = v_c^* - v_c$; $x_3 = i_2^* - i_2$; $x_4 = \int (i_2^* - i_2)$. Vi phân biến sai số có:

$$\dot{x}_1 = -\frac{r_1}{L_1}x_1 - \frac{1}{L_1}x_2 + \frac{1}{L_1}v_c^* - \frac{1}{L_1}v_i + \dot{i}_1^* + \frac{r_1}{L_1}i_1^* \tag{11}$$

$$\dot{x}_2 = \dot{v}_c^* - \dot{v}_c = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{C}x_3 \tag{12}$$

$$\dot{x}_3 = \dot{i}_2^* - \dot{i}_2 = \frac{1}{L_2}x_2 - \frac{r_2}{L_2}x_3 \tag{13}$$

$$\dot{x}_4 = \dot{i}_2^* - i_2 = x_3 \tag{14}$$

Chọn mặt trượt tổng hợp:

$$s = \gamma_1 x_1 + \gamma_2 x_2 + \gamma_3 x_3 + \lambda x_4 \tag{15}$$

Đạo hàm hai vế (15) có:

$$\dot{s} = \gamma_1 \dot{x}_1 + \gamma_2 \dot{x}_2 + \gamma_3 \dot{x}_3 + \lambda \dot{x}_4 \tag{16}$$

Trong đó: γ, λ là các hệ số dương giúp tăng tốc độ hội tụ của biến trạng thái.

Thay (11-14) vào (16) có:

$$\begin{aligned} \dot{s} = & \gamma_1 \left(\dot{i}_1^* - \frac{r_1}{L_1}x_1 - \frac{1}{L_1}x_2 + \frac{r_1}{L_1}i_1^* + \frac{1}{L_1}v_c^* - \frac{1}{L_1}v_i \right) \\ & + \gamma_2 \left(\frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{C}x_3 \right) + \gamma_3 \left(\frac{1}{L_2}x_2 - \frac{r_2}{L_2}x_3 \right) + \lambda x_3 \end{aligned} \tag{17}$$

Để hệ ổn định cần xét điều kiện Lyapunov, chọn hàm Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \tag{18}$$

Đạo hàm hai vế (18) có:

$$\dot{V} = s \cdot \dot{s} \tag{19}$$

Thay (17) vào (19) có:

$$\dot{V} = s \begin{bmatrix} \gamma_1 \dot{i}_1^* - \gamma_1 \frac{r_1}{L_1}x_1 - \gamma_1 \frac{1}{L_1}x_2 + \gamma_1 \frac{r_1}{L_1}i_1^* + \gamma_1 \frac{1}{L_1}v_c^* \\ -\gamma_1 \frac{1}{L_1}v_i + \gamma_2 \frac{1}{C}x_1 - \gamma_2 \frac{1}{C}x_3 + \gamma_3 \frac{1}{L_2}x_2 \\ -\gamma_3 \frac{r_2}{L_2}x_3 + \lambda x_3 \end{bmatrix} \tag{20}$$

Theo điều kiện ổn định Lyapunov thì $\dot{V} \leq 0$ do đó:

$$\begin{aligned} -k_1 |s|^\zeta \text{sign}(s) = & \gamma_1 \dot{i}_1^* - \gamma_1 \frac{r_1}{L_1}x_1 - \gamma_1 \frac{1}{L_1}x_2 + \gamma_1 \frac{r_1}{L_1}i_1^* \\ & + \gamma_1 \frac{1}{L_1}v_c^* - \gamma_1 \frac{1}{L_1}v_i + \gamma_2 \frac{1}{C}x_1 - \gamma_2 \frac{1}{C}x_3 \\ & + \gamma_3 \frac{1}{L_2}x_2 - \gamma_3 \frac{r_2}{L_2}x_3 + \lambda x_3 \end{aligned} \tag{21}$$

Trong đó: k_1 là hằng số thiết kế, $0 < \zeta < 1$.

Thay (21) vào (20) có:

$$\dot{V} = -s \cdot k_1 |s|^\zeta \text{sign}(s) \leq 0 \tag{22}$$

Từ (22) cho thấy bộ điều khiển được thiết kế là ổn định tiệm cận và đảm bảo hội tụ về không của tất cả các lỗi trong thời gian hữu hạn. Cũng theo (21) luật điều khiển được thiết kế, bao gồm hai thành phần:

$$u = u_{eq} + u_n \tag{23}$$

Với

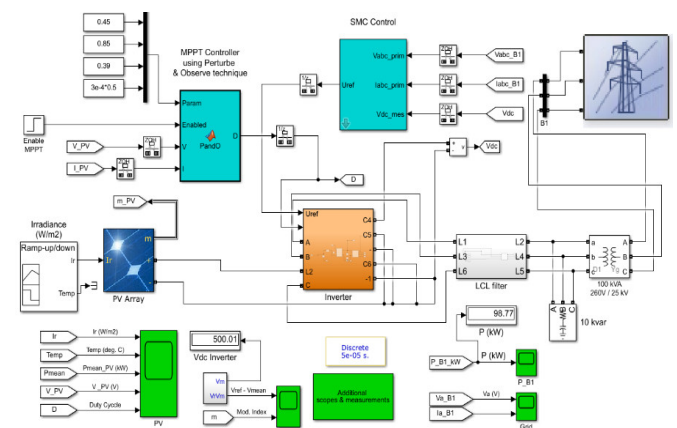
$$\begin{aligned} u_{eq} = & \frac{L_1}{\gamma_1} k_1 |s|^\zeta \text{sign}(s) + L_1 \dot{i}_1^* - r_1 x_1 - x_2 + r_1 i_1^* + v_c^* \\ & + \frac{L_1 \gamma_2}{C \gamma_1} x_1 - \frac{L_1 \gamma_2}{C \gamma_1} x_3 + \frac{L_1 \gamma_3}{L_2 \gamma_1} x_2 - \frac{L_1 \gamma_3}{L_2 \gamma_1} r_2 x_3 + \frac{L_1}{\gamma_1} \lambda x_3 \end{aligned} \tag{24}$$

$$u_n = -k_2 \sqrt{|s|} \text{sign}(s) - k_3 \int \text{sign}(s) dt \tag{25}$$

Như vậy luật điều khiển sau khi tổng hợp có dạng:

$$\begin{aligned} u = & \frac{L_1}{\gamma_1} k_1 |s|^\zeta \text{sign}(s) + L_1 \dot{i}_1^* - r_1 x_1 - x_2 + r_1 i_1^* + v_c^* \\ & + \frac{L_1 \gamma_2}{C \gamma_1} x_1 - \frac{L_1 \gamma_2}{C \gamma_1} x_3 + \frac{L_1 \gamma_3}{L_2 \gamma_1} x_2 - \frac{L_1 \gamma_3}{L_2 \gamma_1} r_2 x_3 \\ & + \frac{L_1}{\gamma_1} \lambda x_3 - k_2 \sqrt{|s|} \text{sign}(s) - k_3 \int \text{sign}(s) dt \end{aligned} \tag{26}$$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG



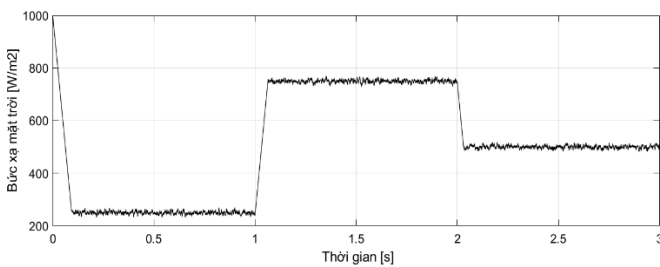
Hình 3. Mô hình mô phỏng điều khiển biến tần cho trạm phát điện mặt trời

Trong phần trên, bài báo đã xây dựng bộ điều khiển trượt cho hệ biến tần. Mô hình mô phỏng được thực hiện

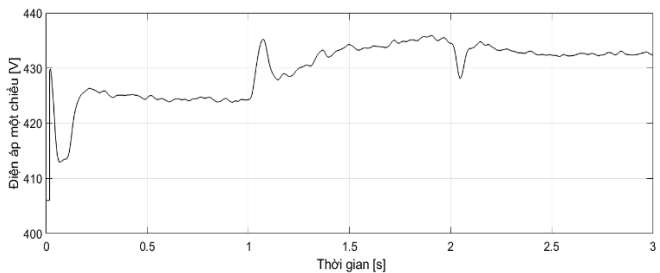
trên Matlab/Simulink. Tham số mô phỏng như sau: $r_1 = 0,5\Omega; r_2 = 0,1\Omega; C_f = 55\mu F; L_f = 2mH; \epsilon_1 = 50; \epsilon_2 = 50; \epsilon_3 = 10; \epsilon_4 = 20; \alpha_{11} = 5; \alpha_{12} = 10$.

Mô hình mô phỏng sử dụng 14 mô-đun Trina Solar TSM-250 được kết nối nối tiếp. Xây dựng mô hình biến tần nối lưới, sử dụng bộ điều khiển thụ động kết hợp bộ quan sát nhiễu EHG0.

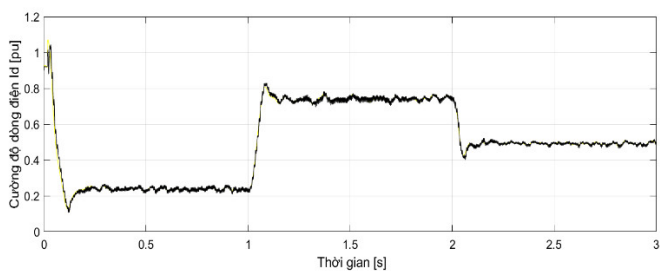
Cường độ bức xạ năng lượng mặt trời ban đầu đặt là $250W/m^2$ và nhiệt độ $25^{\circ}C$. Tại $t = 1$ giây, độ rọi mặt trời tăng từ $250W/m^2$ lên $750W/m^2$ và đến 2 giây giảm xuống $500W/m^2$. Ngoài ra, đầu vào còn có nhiễu ngẫu nhiên với biên độ 30, tần số lấy mẫu 0,01 giây. Kết quả mô phỏng như thể hiện trong hình 4 ÷ 9.



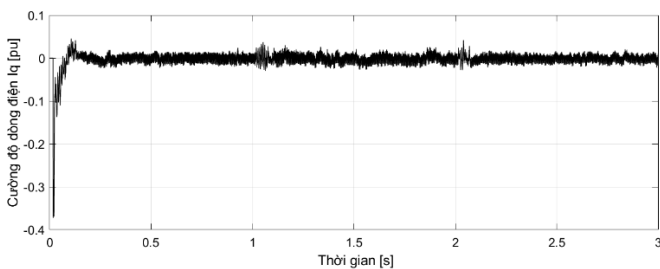
Hình 4. Bức xạ mặt trời



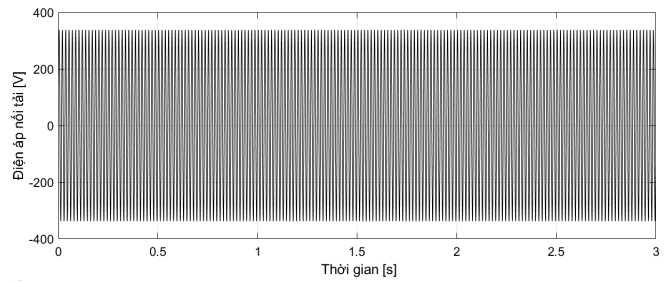
Hình 5. Điện áp đầu ra của hệ pin mặt trời



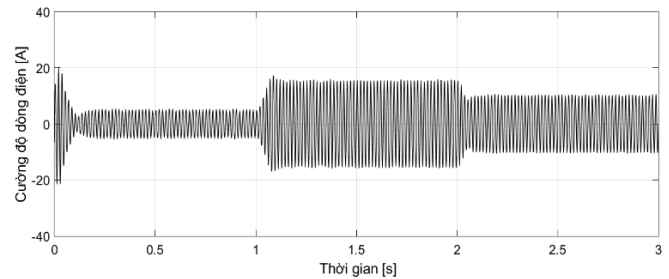
Hình 6. Cường độ dòng điện i_d của biến tần



Hình 7. Cường độ dòng điện i_q của biến tần



Hình 8. Điện áp pha A sau biến tần



Hình 9. Cường độ dòng điện pha A sau biến tần

Nhận xét:

Từ các kết quả mô phỏng thu được có thể nhận thấy rằng bộ điều khiển trượt phi tuyến siêu xoắn tích phân đề xuất cho biến tần ba pha nối lưới sử dụng bộ lọc LCL hoạt động hiệu quả và ổn định. Dòng điện đầu ra của biến tần bám sát giá trị tham chiếu trong toàn bộ quá trình vận hành, ngay cả khi xuất hiện sự thay đổi đột ngột của cường độ bức xạ mặt trời và nhiễu ngẫu nhiên từ môi trường. Điện áp và dòng điện phía lưới được duy trì ổn định, dạng sóng gần hình sin và có độ méo hài thấp, cho thấy khả năng suy giảm dao động cộng hưởng của bộ lọc LCL là rất tốt. Đặc biệt, bộ điều khiển thể hiện tính bền vững cao trước sự biến thiên tham số hệ thống và méo điện áp lưới, khắc phục được hạn chế của các bộ điều khiển tuyến tính truyền thống. Ngoài ra, việc xây dựng thuật toán điều khiển trong hệ tọa độ $\alpha\beta$ giúp giảm đáng kể khối lượng tính toán so với hệ dq, góp phần nâng cao khả năng triển khai trên các bộ xử lý số trong thực tế. Hiện tượng rung (chattering) đặc trưng của điều khiển trượt truyền thống cũng được hạn chế rõ rệt nhờ sử dụng thuật toán siêu xoắn tích phân.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt phi tuyến siêu xoắn tích phân cho biến tần ba pha nối lưới sử dụng bộ lọc LCL. Mô hình toán học của hệ thống được xây dựng trong hệ tọa độ $\alpha\beta$, trên cơ sở đó luật điều khiển được tổng hợp và chứng minh tính ổn định tiệm cận bằng tiêu chuẩn Lyapunov. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển đề xuất đảm bảo chất lượng dòng điện nối lưới với độ méo hài thấp, khả năng

đáp ứng nhanh và duy trì ổn định ngay cả khi hệ thống chịu ảnh hưởng của nhiễu ngoài và sự thay đổi tham số. So với các phương pháp điều khiển tuyến tính, giải pháp này thể hiện ưu thế rõ rệt về tính bền vững và độ tin cậy. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp điều khiển đề xuất có tiềm năng ứng dụng thực tế cao trong các hệ thống phát điện phân tán sử dụng nguồn năng lượng tái tạo như điện mặt trời và điện gió. Trong các nghiên cứu tiếp theo, hướng phát triển có thể tập trung vào triển khai thực nghiệm trên phần cứng công suất và tối ưu tham số điều khiển nhằm nâng cao hơn nữa hiệu suất hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Aly, D. I. Abdeen, A. M. Abdel-Ghany, S. M. Dabour, "Sliding-mode-based finite control set model predictive control for LCL-filtered grid-connected inverters," in *Proc. IEEE International Conference on Power Electronics and Applications (ICPEA)*, 1-6, 2024.
- [2]. M. Al-Saffar, Y. Li, F. Blaabjerg, "Non-singular double integral terminal sliding mode control for a three-phase grid-connected inverter with LCL filter under weak grid conditions," *Electronics*, 14, 14, 2894, 2025.
- [3]. Hosseinzadeh N., Aziz A., Mahmud A., Gargoom A., Rabbani M., "Voltage stability of power systems with renewable energy inverter based generators: A review," *Electronics*, 10, 115, 2021.
- [4]. Li Y., Meng K., Dong Z. Y., Zhang W., "Sliding frame work for inverter based micro grid control," *IEEE Trans. Power Syst.*, 35, 1657-1660, 2020.
- [5]. J. Zhao, W. Wu, H. Wang, F. Blaabjerg, "Fast non-singular terminal sliding-mode-based voltage-power coordinated control strategy for grid-connected inverters," *Electric Power Systems Research*, 233, 110412, 2025.

AUTHORS INFORMATION

Phung Thi Thanh Mai, Le Thi Mai Huong

Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University, Vietnam