

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PHẢN HỒI TRẠNG THÁI KẾT HỢP BỘ QUAN SÁT CHO BIẾN TẦN NỐI LƯỚI

STATUS FEEDBACK CONTROLLER DESIGN COMBINED OBSERVATION FOR GRID-CONNECTED INVERTER

Đặng Tiến Trung^{1,*}, Phạm Thị Thanh Đàm¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.072>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển phản hồi trạng thái kết hợp bộ quan sát cho hệ biến tần nối lưới (BTNL) sử dụng bộ lọc LCL. Kết quả của bài báo được đánh giá thông qua mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink cho thấy bộ điều khiển đã đạt được các yêu cầu chất lượng. Bộ quan sát giúp giảm số lượng cảm biến, giảm chi phí và độ phức tạp của biến tần.

Từ khóa: Biến tần nối lưới; điều khiển phản hồi trạng thái; bộ lọc LCL; quan sát trạng thái.

ABSTRACT

This paper presents the results of synthesizing the status feedback controller combined with the observer for the grid-connected inverter system using the LCL filter. The survey and evaluation results by simulation on Matlab-Simulink software show that this controller ensures the quality requirements. The observer reduces the number of sensors, reducing the cost and complexity of the inverter.

Keywords: Grid-connected inverter; state feedback control; LCL filter; state observer.

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

*Email: dangtientrung@gmail.com

Ngày nhận bài: 25/2/2023

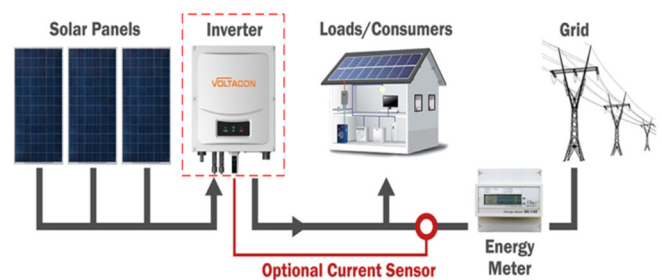
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/4/2023

Ngày chấp nhận đăng: 26/4/2023

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

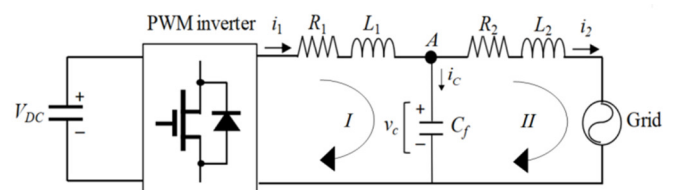
Ngày nay, các nguồn năng lượng tái tạo như điện gió và mặt trời, đang trở thành những lựa chọn thay thế đáng tin cậy cho nhiên liệu hóa thạch [1]. Để tích hợp hệ thống phát điện phân tán này vào lưới điện cần có BTNL. Trước đây, BTNL chỉ sử dụng bộ lọc loại L để triệt tiêu các sóng hài. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, bộ lọc kiểu LCL được sử dụng nhiều hơn, do kích thước vật lý nhỏ hơn và khả năng giảm sóng hài tốt hơn mặc dù điều khiển phức tạp [2, 3]. Để điều khiển các bộ BTNL, các bộ điều khiển tuyến tính, chẳng hạn như điều khiển tích phân tỷ lệ (PI), đã được sử dụng [4]. Để cải thiện hơn nữa hiệu suất của hệ thống biến tần, bộ điều khiển dòng điện H ∞ đã được trình bày [5]. Bài báo này đề xuất phương pháp thiết kế bộ điều khiển phản hồi trạng thái SFC (State Feedback Control) kết hợp bộ

quan sát trạng thái SO (State Observer) cho hệ một BTNL sử dụng bộ lọc LCL. Sơ đồ điều khiển được đề xuất bao gồm một bộ SFC và một bộ SO.



Hình 1. Vị trí BTNL trong hệ năng lượng tái tạo

2. MÔ HÌNH TOÁN HỆ BTNL



Hình 2. BTNL kết hợp bộ lọc LCL

Trong đó: Chỉ số “qd” biểu thị các biến trên hệ quy chiếu đồng bộ, chỉ số “abc” biểu thị các biến trong tọa độ ba pha. i_2^d, i_2^q là dòng điện phía lưới; i_1^q, i_1^d là dòng điện biến tần; V_c^d, V_c^q hiệu điện thế tụ điện; R_1, R_2, L_1, L_2 lần lượt là điện trở và điện cảm của bộ lọc; C_f là điện dung của tụ lọc.

Phương trình cân bằng điện áp vòng I có:

$$V_i^{abc} = V_{R_1}^{abc} + V_{L_1}^{abc} + V_c^{abc} \tag{1}$$

Từ đó có:

$$V_i^{abc} = R_1 i_1^{abc} + L_1 \frac{di_1^{abc}}{dt} + V_c^{abc} \tag{2}$$

$$\Rightarrow \frac{di_1^{abc}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} i_1^{abc} - \frac{V_c^{abc}}{L_1} + \frac{V_i^{abc}}{L_1} \tag{3}$$

Phương trình cân bằng điện áp vòng II có:

$$V_c^{abc} = V_{R_2}^{abc} + V_{L_2}^{abc} + e_g^{abc} \tag{4}$$

Rút ra được:

$$V_c^{abc} = R_2 i_2^{abc} + L_2 \frac{di_2^{abc}}{dt} + e_g^{abc} \quad (5)$$

$$\Rightarrow \frac{di_2^{abc}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} i_2^{abc} + \frac{V_c^{abc}}{L_2} - \frac{e_g^{abc}}{L_2} \quad (6)$$

Dòng điện tại nút A:

$$i_1^{abc} = i_2^{abc} + i_c^{abc} \quad (7)$$

Hay

$$\Rightarrow \frac{dV_c^{abc}}{dt} = \frac{i_1^{abc}}{C_f} - \frac{i_2^{abc}}{C_f} \quad (8)$$

Từ phương trình cân bằng điện áp hệ tọa độ ba pha chuyển sang hệ dq có:

$$V_i^{abc} = V_{R_i}^{abc} + V_{L_i}^{abc} + V_C^{abc} \quad (9)$$

$$\Rightarrow V_i^{dq} = V_{R_i}^{dq} + V_{L_i}^{dq} + V_C^{dq}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_i^q = R_1 i_1^q - \omega L_1 i_1^d - L_1 \dot{i}_1^q + V_C^q \\ V_i^d = R_1 i_1^d - \omega L_1 i_1^q - L_1 \dot{i}_1^d + V_C^d \end{cases} \quad (10)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \dot{i}_1^q = -\frac{R_1}{L_1} i_1^q - \omega i_1^d - \frac{V_C^q}{L_1} + \frac{V_i^q}{L_1} \\ \dot{i}_1^d = -\frac{R_1}{L_1} i_1^d + \omega i_1^q - \frac{V_C^d}{L_1} + \frac{V_i^d}{L_1} \end{cases} \quad (11)$$

Tương tự với vòng II có:

$$V_c^{abc} = V_{R_2}^{abc} + V_{L_2}^{abc} + e_g^{abc} \quad (12)$$

$$\Rightarrow V_c^{dq} = V_{R_2}^{dq} + V_{L_2}^{dq} + e_g^{dq}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_c^q = R_2 i_2^q - \omega L_2 i_2^d - L_2 \dot{i}_2^q + e_g^q \\ V_c^d = R_2 i_2^d - \omega L_2 i_2^q - L_2 \dot{i}_2^d + e_g^d \end{cases} \quad (13)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \dot{i}_2^q = -\frac{R_2}{L_2} i_2^q - \omega i_2^d - \frac{e_g^q}{L_2} + \frac{V_c^q}{L_2} \\ \dot{i}_2^d = -\frac{R_2}{L_2} i_2^d + \omega i_2^q - \frac{e_g^d}{L_2} + \frac{V_c^d}{L_2} \end{cases} \quad (14)$$

Từ phương trình (7) đổi sang hệ tọa độ dq có:

$$i_1^{abcs} = i_2^{abcs} + i_c^{abcs} \Rightarrow i_1^{dqs} = i_2^{dqs} + i_c^{dqs} \quad (15)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{i}_1^{qs} = i_2^{qs} + \omega C_f V_c^{ds} + C_f \dot{V}_c^{qs} \\ \dot{i}_1^{ds} = i_2^{ds} - \omega C_f V_c^{qs} + C_f \dot{V}_c^{ds} \end{cases} \quad (16)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \dot{V}_c^{qs} = -\omega V_c^{ds} - \frac{i_2^{qs}}{C_f} + \frac{i_1^{qs}}{C_f} \\ \dot{V}_c^{ds} = \omega V_c^{qs} - \frac{i_2^{ds}}{C_f} + \frac{i_1^{ds}}{C_f} \end{cases} \quad (17)$$

Từ (11), (14), (17) có hệ phương trình toán học của biến tần như sau:

$$\begin{cases} \dot{i}_2^q = -\frac{R_2}{L_2} i_2^q - \omega i_2^d - \frac{e_g^q}{L_2} + \frac{V_c^q}{L_2} \\ \dot{i}_2^d = -\frac{R_2}{L_2} i_2^d + \omega i_2^q - \frac{e_g^d}{L_2} + \frac{V_c^d}{L_2} \\ \dot{i}_1^q = -\frac{R_1}{L_1} i_1^q - \omega i_1^d - \frac{V_C^q}{L_1} + \frac{V_i^q}{L_1} \\ \dot{i}_1^d = -\frac{R_1}{L_1} i_1^d + \omega i_1^q - \frac{V_C^d}{L_1} + \frac{V_i^d}{L_1} \\ \dot{V}_c^q = -\omega V_c^d - \frac{i_2^q}{C_f} + \frac{i_1^q}{C_f} \\ \dot{V}_c^d = \omega V_c^q - \frac{i_2^d}{C_f} + \frac{i_1^d}{C_f} \end{cases} \quad (18)$$

Đưa về dạng mô hình không gian trạng thái sau:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + De(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (19)$$

Trong đó:

$x = [i_2^q \ i_2^d \ i_1^q \ i_1^d \ v_c^q \ i_2^d]^T$ vector biến trạng thái;

$u = [V_i^q \ V_i^d]^T$ vector điện áp điều khiển

$e = [e^q \ e^d]^T$ điện áp lưới

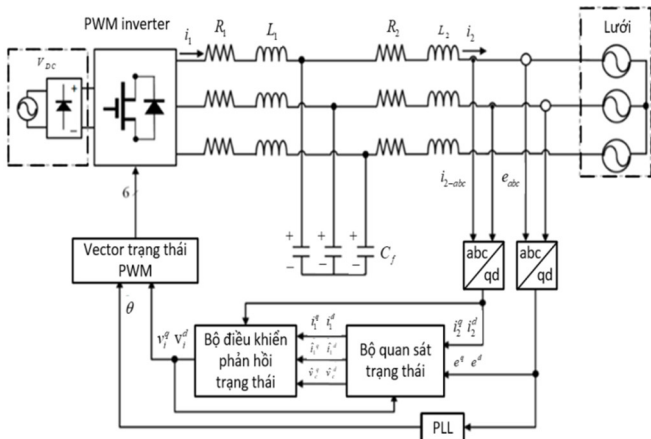
$$A = \begin{bmatrix} -R_2/L_2 & -\omega & 0 & 0 & 1/L_2 & 0 \\ \omega & -R_2/L_2 & 0 & 0 & 0 & 1/L_2 \\ -R_1/L_1 & 0 & 0 & -\omega & -1/L_1 & 0 \\ 0 & -R_1/L_1 & \omega & 0 & 0 & -R_1/L_1 \\ -1/C_f & 0 & 1/C_f & 0 & 0 & -\omega \\ 0 & -1/C_f & 0 & 1/C_f & \omega & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/L_1 & 0 \\ 0 & 1/L_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} -1/L_2 & 0 \\ 0 & -1/L_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3. BỘ ĐIỀU KHIỂN PHẢN HỒI TRẠNG THÁI KẾT HỢP BỘ QUAN SÁT

Sơ đồ điều khiển trên hình 3 bao gồm một bộ SFC tích hợp và bộ SO. Bộ quan sát giúp ước lượng dòng điện và điện áp lưới. Điện áp lưới đo được cũng được sử dụng trong vòng khóa pha (PLL), để xác định góc pha của điện áp lưới. Các giá trị ước lượng của biến trạng thái được đưa tới bộ SFC để tạo luật điều khiển.



Hình 3. Sơ đồ bộ SFC kết hợp bộ quan sát cho BTNL có sử dụng bộ lọc LCL

Để có thể ứng dụng kỹ thuật số, mô hình thời gian liên tục của hệ thống biến tần được rời rạc hóa thành:

$$\begin{cases} x(k+1) = \mathbf{A}_d x(k) + \mathbf{B}_d u(k) + \mathbf{E}_d e(k) \\ y(k) = \mathbf{C}_d x(k) \end{cases} \quad (20)$$

Trong đó:

$$\mathbf{A}_d = e^{\mathbf{A}T}; \mathbf{B}_d = \mathbf{A}^{-1}(e^{\mathbf{A}T} - \mathbf{I})\mathbf{B}; \mathbf{C}_d = \mathbf{C}; \mathbf{E}_d = \mathbf{A}^{-1}(e^{\mathbf{A}T} - \mathbf{I})\mathbf{E};$$

Một trong những nhiệm vụ chính của bộ điều khiển là ổn định hệ thống biến tần, có thể thực hiện bằng cách sử dụng bộ điều chỉnh phản hồi trạng thái. Đầu vào điều khiển của bộ điều chỉnh phản hồi trạng thái có thể được biểu thị bằng:

$$u(k) = -Kx(k) \quad (21)$$

K là ma trận hệ số phản hồi nhận được bằng phương pháp áp đặt điểm cực.

Biến sai lệch đầu đầu vào có dạng:

$$x_e(t) = r(t) - y(t) = r - C_d x(t) \quad (22)$$

Trong đó: $r = [i_1^{q*} \quad i_2^{q*}]^T$ là vec tơ tín hiệu đặt.

Với bộ điều khiển phản hồi trong (21) yêu cầu phép đo cho tất cả các trạng thái của hệ thống. Tuy nhiên, yêu cầu này thường làm cho việc thiết kế hệ thống thêm tốn kém và phức tạp. Chính vì thế cần một bộ SO đầy đủ để ước lượng các biến trạng thái. Từ (20) có:

$$\hat{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \hat{x}(k) + \mathbf{B}_d u(k) + \mathbf{D}_d u(k) + \mathbf{G}(y(k) - \mathbf{C}_d \hat{x}(k)) \quad (23)$$

Sai lệch ước lượng:

$$\tilde{x}(k+1) = (\mathbf{A}_d - \mathbf{G}\mathbf{C}_d)\tilde{x}(k) \quad (24)$$

Để bộ SO ổn định, tất cả các giá trị riêng của phương trình (25) phải nằm trong đường tròn đơn vị:

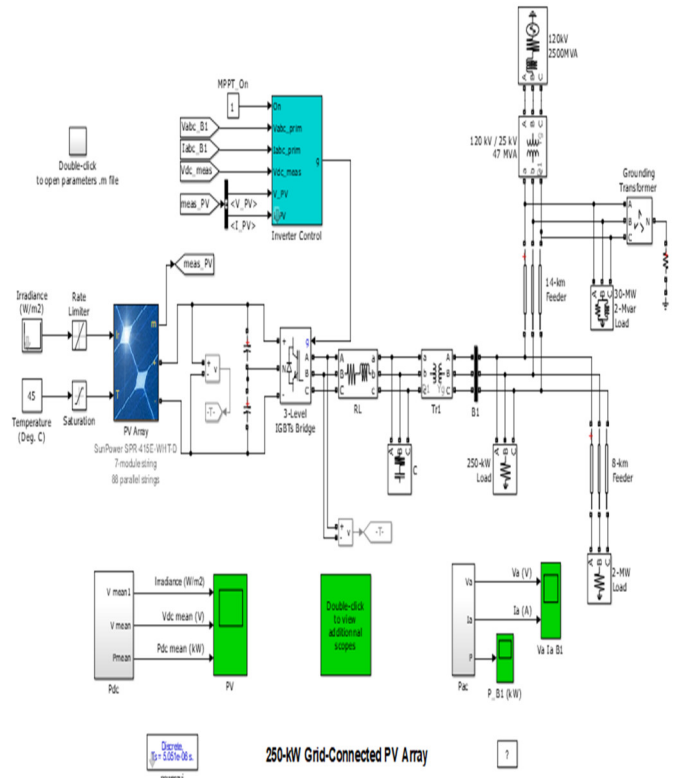
$$\det(\lambda \mathbf{I} - (\mathbf{A}_d - \mathbf{G}\mathbf{C}_d)) = 0 \quad (25)$$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Trong phần trên, bài báo đã xây dựng bộ SFC kết hợp bộ quan sát đầy đủ cho hệ BTNL. Mô hình mô phỏng được thực hiện trên Matlab/Simulink. Tham số mô phỏng như bảng 1.

Bảng 1. Tham số mô phỏng

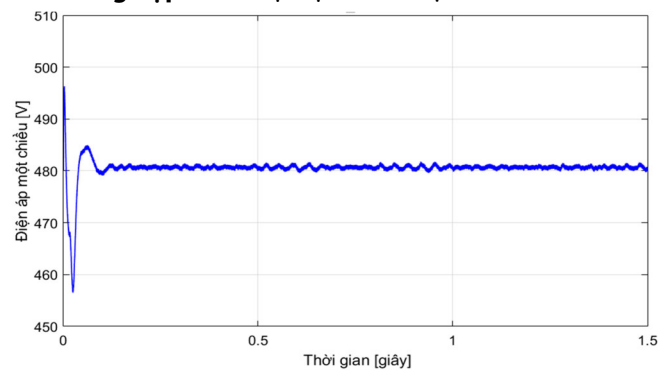
Ký hiệu	Tham số mô hình	Giá trị
E	Điện áp lưới	220V
F	Tần số lưới	50Hz
V_{DC}	Điện áp một chiều	420V
L_1	Điện cảm bộ lọc	1,2mH
L_2	Điện cảm bộ lọc	1,5mH
R_1, R_2	Điện trở bộ lọc	1,8Ω
C_f	Tụ lọc	5μF



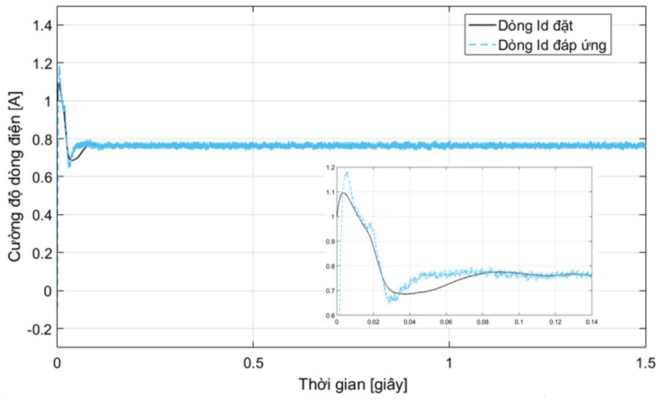
Hình 4. Mô hình mô phỏng sử dụng BTNL cho trạm phát điện mặt trời 250kW

Bộ chuyển đổi được mô hình hóa bằng cách sử dụng cầu IGBT 3 cấp được điều khiển bằng biến tần PWM với bộ lọc LCL. Máy biến áp ba pha 250-kVA 250V/25kV được sử dụng để kết nối biến tần với lưới phân phối điện năng.

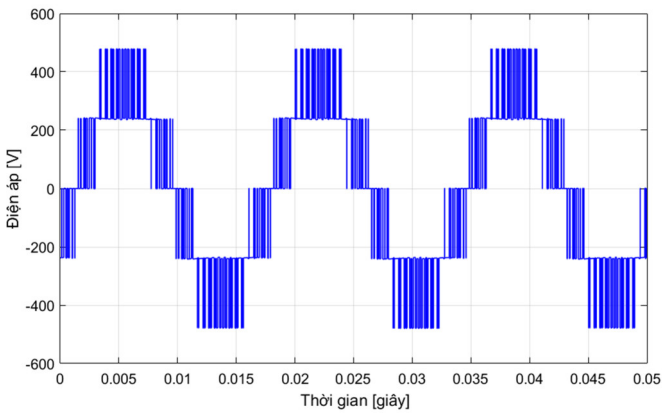
Trường hợp 1: Bức xạ mặt trời ổn định là 800W/m²



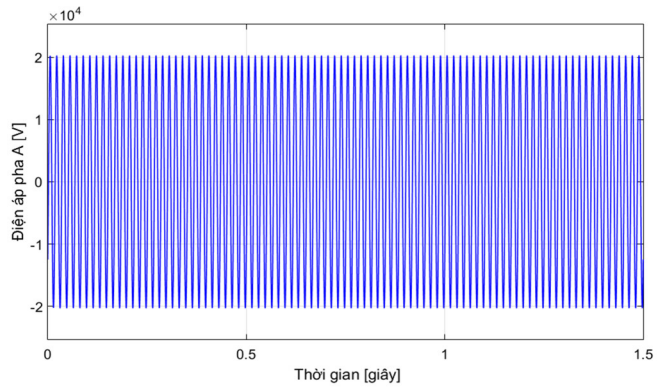
Hình 5. Điện áp đầu ra của hệ pin mặt trời



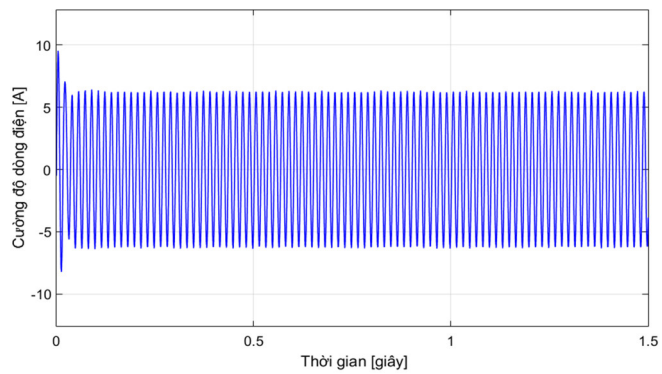
Hình 6. Dòng điện i_d đặt và đáp ứng đầu ra



Hình 7. Điện áp đầu ra của biến tần

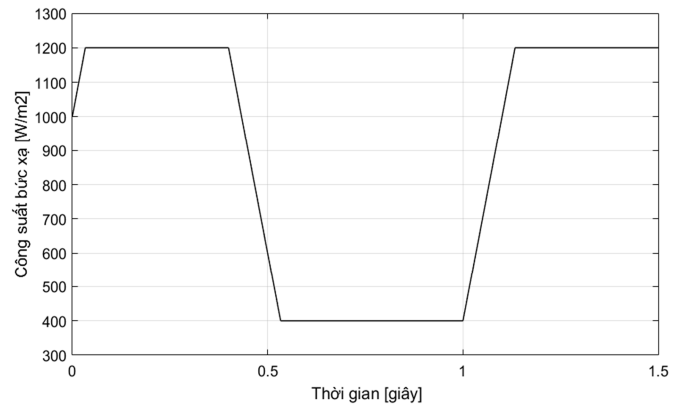


Hình 8. Điện áp pha A sau máy biến áp

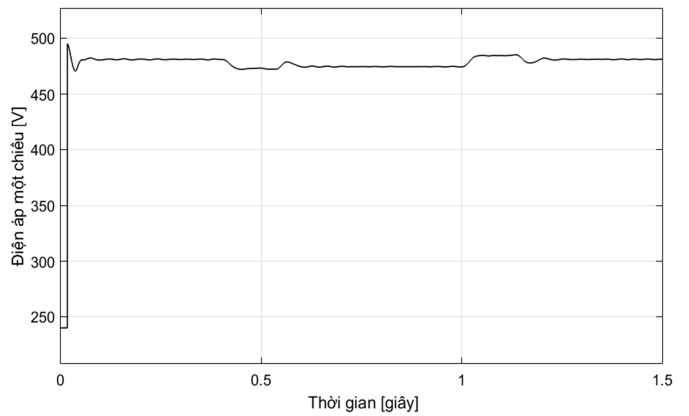


Hình 9. Cường độ dòng điện pha A sau máy biến áp

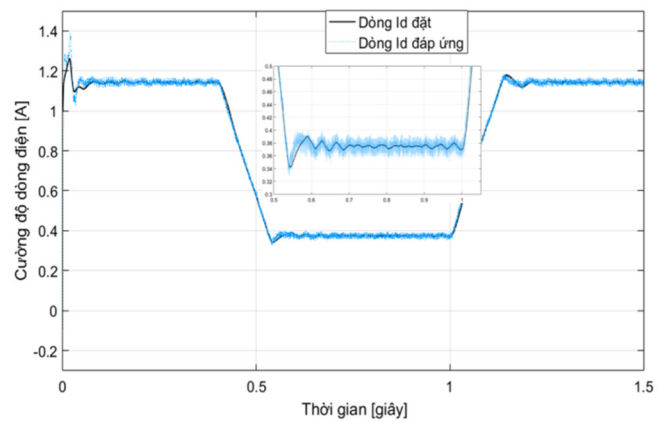
Trường hợp 2: Công suất bức xạ ánh sáng mặt trời giảm từ 1200W/m^2 xuống 400W/m^2 tại thời điểm 0,4 giây.



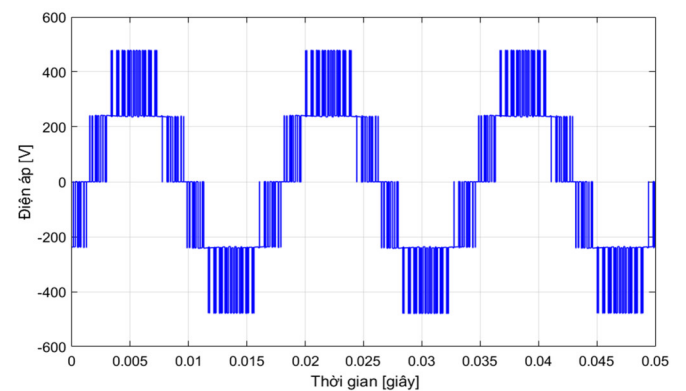
Hình 10. Công suất bức xạ mặt trời



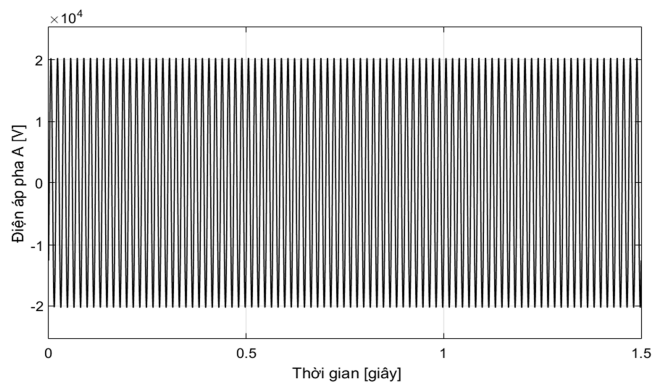
Hình 11. Điện áp đầu ra hệ pin mặt trời



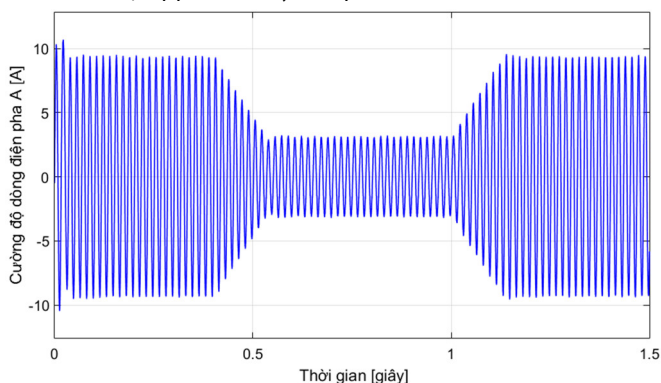
Hình 12. Dòng điện i_d đặt và dòng đáp ứng của biến tần



Hình 13. Điện áp đầu ra của biến tần



Hình 14. Điện áp pha A sau máy biến áp



Hình 15. Cường độ dòng điện pha A sau máy biến áp

Nhận xét:

Từ các kết quả mô phỏng từ hình 5 ÷ 15, thấy rằng bộ SFC kết hợp bộ quan sát đã cho kết quả tốt, đáp ứng đầu ra bám sát tín hiệu đặt (hình 5, 11) với sai số xác lập là 0,02; độ quá chỉnh 16%. Khi thay đổi cường độ bức xạ ánh sáng mặt trời, điện áp đầu ra biến tần và điện áp nối lưới được duy trì ổn định; cường độ dòng điện thay đổi theo tín hiệu đặt.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp bộ SFC kết hợp bộ quan sát đầy đủ cho hệ BTNL. Kết quả thu được cho thấy bộ điều khiển đảm bảo được yêu cầu chất lượng cho hệ biến tần, có thể ứng dụng trong việc hòa lưới nguồn năng lượng tái tạo như điện gió và mặt trời.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. L. Hassaine, E. Olias, J. Quintero, M. Haddadi, 2009. *Digital power factor control and reactive power regulation for grid-connected photovoltaic inverter*. Renewable Energy 34, 1, 315-321

[2]. Hassaine L., Olias E., Quintero J., Barrado A., 2008. *Digital control based on the shifting phase for grid connected photovoltaic inverter*. Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE, pp.945-951.

[3]. Byunggyu Yu, Youngseok Jung, Junghun So, Hyemi Hwang, Gwonjong Yu, 2006. *A Robust Anti-islanding Method for Grid-Connected Photovoltaic Inverter*. Photovoltaic Energy Conversion, the 2006 IEEE 4th World Conference, vol. 2, 2242-2245.

[4]. S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, F. Blaabjerg, 2005. *A review of singlephase grid-connected inverters for photovoltaic modules*. in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306.

[5]. Jin W., Li Y., Sun G., Bu L., 2017. *H ∞ repetitive control based on active damping with reduced computation delay for LCL-type grid-connected inverters*. Energies, 10, 586.

AUTHORS INFORMATION

Dang Tien Trung, Pham Thi Thanh Dam

Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University