

# THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN BÙ NHIỀU THỤ ĐỘNG KẾT HỢP BỘ QUAN SÁT EHGO CHO BIẾN TẦN LƯỚI ĐIỆN SIÊU NHỎ

## DESIGN OF PASSIVE NOISE COMPENSATION CONTROLLER COMBINED WITH EHGO OBSERVER FOR MICRO GRID INVERTER

Nguyễn Thị Thu Hiền<sup>1,\*</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.362>

### TÓM TẮT

Bộ biến tần là thiết bị quan trọng để kết nối tải với nguồn điện siêu nhỏ. Tuy nhiên, do giá trị linh kiện thay đổi dẫn tới sự thay đổi tham số mô hình, kết hợp sai số đo lường, nhiễu loạn bên ngoài làm suy giảm hiệu suất của bộ biến tần và gây ra các vấn đề mất ổn định. Để giải quyết vấn đề này, bộ điều khiển phi tuyến loại bỏ nhiễu thụ động được đề xuất cho biến tần. Phương pháp đề xuất bộ quan sát trạng thái khuếch đại cao mở rộng để ước lượng nhiễu loạn bên ngoài, sự bất định về tham số mô hình, để bộ điều khiển bù khử, do đó đảm bảo tính ổn định toàn cục của bộ biến tần. 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; nguồn điện siêu nhỏ; quan sát trạng thái.*

### ABSTRACT

The inverter is an important device to connect the load to the micro power source. However, due to the change of component values, the change of model parameters, combined with measurement errors, external disturbances degrade the performance of the inverter and cause instability problems. To solve this problem, a passive noise-canceling nonlinear controller is proposed for the inverter. The proposed method of the extended high-gain state observer can online estimate the complex influencing factors such as external disturbances, model parameter uncertainties, so that the controller can compensate, thus ensuring the overall stability of the inverter. The results of the paper are evaluated through simulation on Matlab-Simulink software, showing that the controller has achieved the quality requirements. The observer helps to reduce the number of sensors, reduce the cost and complexity of the inverter.

**Keywords:** *Grid-connected inverter; state feedback control; micropower sources; state observer.*

<sup>1</sup>Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

\*Email: [hiennntt@epu.edu.vn](mailto:hiennntt@epu.edu.vn)

Ngày nhận bài: 15/9/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 30/10/2024

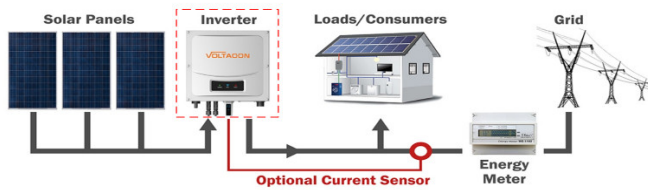
Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2024

### 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 đưa điện năng từ hệ thống phát điện phân tán này đến phụ tải cần có biến tần. Hiệu suất của biến tần sẽ tác động trực tiếp đến hiệu quả, tính ổn định và độ tin cậy của nguồn cung cấp điện [2]. Nhìn chung, việc kiểm soát, điều khiển biến tần là một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng, hỗ trợ cho việc triển khai thành công các hệ thống năng lượng tái tạo, góp phần vào tương lai năng lượng xanh, bền vững.

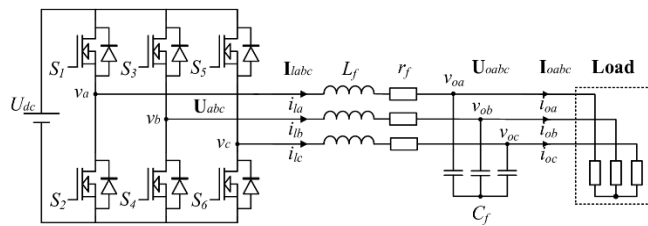
Biến tần thường sử dụng điều khiển vòng kép điện áp và dòng điện. Vòng ngoài được sử dụng để điều chỉnh điện áp đầu ra nhằm đảm bảo điện áp ổn định khi tải và điện áp đầu vào thay đổi, trong khi vòng dòng điện bên trong có nhiệm vụ cải thiện phản ứng động của biến tần [3]. Cho đến nay, điều khiển tích phân tỷ lệ (PI) thông thường đã được sử dụng rộng rãi làm bộ điều khiển cho biến tần. Tuy nhiên, bộ điều khiển PI dễ bị ảnh hưởng bởi các thay đổi tham số hệ thống và nhiễu loạn khác nhau [4]. Các nhà nghiên cứu đã đề xuất các kỹ thuật điều khiển tiên tiến để cải thiện hiệu suất tĩnh và động của biến tần và đảm bảo hoạt động ổn định trong mọi điều kiện vận hành. Gần đây, điều khiển thụ động (PBC - Passive Based Control) đã được đề xuất [5]. Ý tưởng cơ bản của PBC là năng lượng được lưu trữ trong bộ biến tần dưới dạng biến trạng thái và điều khiển năng

lượng của bộ biến tần bằng cách bổ sung giảm chấn để đạt được mục đích điều khiển. PBC đơn giản, bền vững trước các thay đổi tham số và nhiễu bên ngoài, có ý nghĩa vật lý rõ ràng và có thể làm cho bộ biến tần ổn định toàn cục trong mọi điều kiện. Trong bài báo này, một bộ PBC cho bộ biến tần độc lập được đề xuất, tích hợp một bộ quan sát trạng thái hệ số khuếch đại cao mở rộng (EHGO - Extended High Gain state Observer). Bộ quan sát EHGO thực hiện ước lượng và loại bỏ các yếu tố ảnh hưởng của nhiễu và sự bất định của tham số mô hình, từ đó đảm bảo tính ổn định của bộ biến tần.



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

## 2. MÔ HÌNH TOÁN



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý biến tần

Trong đó: Chỉ số "abc" biểu thị các biến trong tọa độ ba pha;  $C_f, L_f$  là điện dung và điện cảm của bộ lọc;  $U_{oabc}, I_{oabc}$  là điện áp và dòng điện đầu ra biến tần.

Phương trình trạng thái của biến tần trong hệ tọa độ abc được viết:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{abc}}{dt} + r_f i_{abc} + U_{oabc} = U_{abc} \\ C_f \frac{dU_{oabc}}{dt} + I_{oabc} - I_{abc} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:  $I_{abc} = (i_a \ i_b \ i_c)^T$ ;  $U_{abc} = (v_a \ v_b \ v_c)^T$ ;  $U_{oabc} = (v_{oa} \ v_{ob} \ v_{oc})^T$ ;  $r_f$  là điện trở bộ lọc.

Chuyển (1) về hệ tọa độ quay dq có:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_d}{dt} + r_f i_d - \omega L_f i_q + v_{od} = v_d \\ L_f \frac{di_q}{dt} + r_f i_q - \omega L_f i_d + v_{oq} = v_q \\ C_f \frac{dv_{od}}{dt} + i_{od} - \omega C_f v_{oq} - i_d = 0 \\ C_f \frac{dv_{oq}}{dt} + i_{oq} + \omega C_f v_{od} - i_q = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Do ảnh hưởng của điều kiện làm việc và môi trường, các thông số bộ lọc của biến tần có thể thay đổi và sai số của cảm biến điện áp, dòng điện nên có thể đưa mô hình động của biến tần về dạng:

$$\begin{cases} L_f \dot{i}_d = -r_f i_d + \omega L_f i_q + (v_d - v_{od}) + L_f d_{ld} \\ L_f \dot{i}_q = -r_f i_q + \omega L_f i_d + (v_q - v_{oq}) + L_f d_{lq} \\ C_f \dot{v}_{od} = \omega C_f v_{oq} + (i_d - i_{od}) + C_f d_{od} \\ C_f \dot{v}_{oq} = \omega C_f v_{od} + (i_q - i_{oq}) + C_f d_{oq} \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó:  $d_{ld}, d_{lq}, d_{od}, d_{oq}$  là giá trị nhiễu do các ảnh hưởng nêu trên.

## 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN BÙ NHIỄU THỤ ĐỘNG

Đưa hệ phương trình (3) về dạng:

$$A\dot{x} + Bx + Rx = u + \varepsilon \quad (4)$$

Trong đó:

$$A = \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_f \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_f & 1 & 0 \\ \omega L_f & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & -\omega C_f \\ 0 & -1 & \omega C_f & 0 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} L_f d_{ld} \\ L_f d_{lq} \\ -i_{od} + C_f d_{od} \\ -i_{oq} + C_f d_{oq} \end{bmatrix}$$

Với A là ma trận xác định dương, B là ma trận đối xứng nghịch, C là ma trận xác định dương đối xứng, u là vectơ điều khiển đầu vào,  $\varepsilon$  là nhiễu.

Theo phương trình (2) có:

$$\frac{d}{dt} \left[ (L_f i_d^2 + L_f i_q^2) + (C_f v_{od}^2 + C_f v_{oq}^2) \right] = (v_d i_d + v_q i_q) - (r_f i_d^2 + r_f i_q^2 + v_{od} i_{od} + v_{oq} i_{oq}) \quad (5)$$

Đặt  $H = (L_f i_d^2 + L_f i_q^2) + (C_f v_{od}^2 + C_f v_{oq}^2)$  khi đó:

$$\dot{H} = x^T A \dot{x} = x^T (u - Bx - Rx) = x^T u - x^T R x \quad (6)$$

Biến trạng thái tham chiếu là:  $x^* = (i_d^* \ i_q^* \ v_{od}^* \ v_{oq}^*)^T$

Sai số vectơ trạng thái có dạng  $x_e = x - x^*$ , từ phương trình (4) có:

$$A(\dot{x}^* + \dot{x}_e) + B(x^* + x_e) + R(x^* + x_e) = u + \varepsilon \quad (7)$$

Biến đổi phương trình (7) có:

$$A\dot{x}_e + Bx_e + Rx_e = u + \varepsilon - Ax^* - Bx^* - Rx^* \quad (8)$$

Để biến tần ổn định, cần lượng thêm lượng ma trận giảm chấn  $C_d$ .

$$R_d = \text{diag}(r_1 \quad r_1 \quad r_2 \quad r_2) \quad (9)$$

Ma trận trở kháng mới được tính:

$$R' = R + R_d \quad (10)$$

Dựa trên phân tích trên, mô hình hệ thống trở thành:

$$A\dot{x}_e + Bx_e + R'x_e = u + \varepsilon - Ax^* - Bx^* - R_d x_e \quad (11)$$

Từ đó luật điều khiển thụ động được đề xuất như sau:

$$u = -\varepsilon + Ax^* + Bx^* + R'x_e - R_d x_e \quad (12)$$

Luật điều khiển trên hệ trục tọa độ dq có dạng:

$$\begin{cases} \dot{v}_d = -L_f \dot{d}_{ld} + L_f \dot{i}_{ld}^* - \omega L_f i_{ld}^* + v_{od}^* + r_f \dot{i}_{ld}^* - r_1 (i_{ld} - i_{ld}^*) \\ \dot{v}_q = -L_f \dot{d}_{lq} + L_f \dot{i}_{lq}^* - \omega L_f i_{lq}^* + v_{oq}^* + r_f \dot{i}_{lq}^* - r_1 (i_{lq} - i_{lq}^*) \\ \dot{i}_{ld}^* = i_{od} - C_f \dot{d}_{od} + C_f \dot{v}_{od}^* - \omega C_f v_{oq}^* - r_2 (v_{od} - v_{od}^*) \\ \dot{i}_{lq}^* = i_{oq} - C_f \dot{d}_{oq} + C_f \dot{v}_{oq}^* - \omega C_f v_{od}^* - r_2 (v_{oq} - v_{oq}^*) \end{cases} \quad (13)$$

Đối với bộ biến tần, xét hàm Lyapunov như sau:

$$V(e) = \frac{1}{2} e^T A e \quad (14)$$

Trong đó: A là ma trận xác định dương,  $\forall \varepsilon > 0$  với  $\forall e \neq 0$ .

Đạo hàm hai vế (14) kết hợp với (4) ta có:

$$\dot{V}(e) = e^T A \dot{e} = e^T (\psi - Be - Re) = -e^T Re < 0 \quad (15)$$

Từ (15) có thể khẳng định hệ ổn định toàn cục.

#### 4. BỘ QUAN SÁT HIGH GAIN MỞ RỘNG

Trong (13) độ chính xác của mô hình hệ thống phụ thuộc các thành phần bất định  $d_{ld}$ ,  $d_{lq}$ ,  $d_{od}$ ,  $d_{oq}$ . Tuy nhiên các thành phần này rất khó xác định bằng phương pháp đo lường, vì vậy đề xuất sử dụng bộ quan sát EHGO để ước lượng thành phần này. Sau đây trình bày việc ước lượng  $d_{ld}$ , các thành phần khác được tiến hành tương tự.

Sai số của bộ quan sát có dạng:

$$\eta = [\eta_1, \eta_2, \eta_3]^T = \left[ i_{ld} - \hat{i}_{ld}, (d_{ld} - \hat{d}_{ld}) / \varepsilon_1, (\dot{d}_{ld} - \hat{\dot{d}}_{ld}) / \varepsilon_1^2 \right]^T \quad (16)$$

Kết hợp hệ phương trình (16) có bộ quan sát EHGO sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{i}}_{ld} = -r_f \hat{i}_{ld} / L_f + \omega \hat{i}_{lq} + (v_d - v_{od}) / L_f + \varepsilon_1 \alpha_{11} (i_{ld} - \hat{i}_{ld}) + \hat{d}_{ld} \\ \dot{\hat{d}}_{ld} = \varepsilon_1^2 \alpha_{12} (i_{ld} - \hat{i}_{ld}) + \hat{\dot{d}}_{ld} \end{cases} \quad (17)$$

Tương tự, EHGO với ba biến trạng thái khác như sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{i}}_{lq} = -r_f \hat{i}_{lq} / L_f - \omega \hat{i}_{ld} + (v_q - v_{oq}) / L_f + \varepsilon_2 \alpha_{21} (i_{lq} - \hat{i}_{lq}) + \hat{d}_{lq} \\ \dot{\hat{d}}_{lq} = \varepsilon_2^2 \alpha_{22} (i_{lq} - \hat{i}_{lq}) + \hat{\dot{d}}_{lq} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{v}}_{od} = \omega v_{oq} + (i_{ld} - i_{od}) / C_f + \varepsilon_3 \alpha_{31} (v_{od} - \hat{v}_{od}) + \hat{d}_{od} \\ \dot{\hat{d}}_{od} = \varepsilon_3^2 \alpha_{32} (v_{od} - \hat{v}_{od}) + \hat{\dot{d}}_{od} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{v}}_{oq} = \omega v_{od} + (i_{lq} - i_{oq}) / C_f + \varepsilon_4 \alpha_{41} (v_{oq} - \hat{v}_{oq}) + \hat{d}_{oq} \\ \dot{\hat{d}}_{oq} = \varepsilon_4^2 \alpha_{42} (v_{oq} - \hat{v}_{oq}) + \hat{\dot{d}}_{oq} \end{cases} \quad (20)$$

Trong đó:  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  là hệ số khuếch đại của bộ quan sát, các hệ số này lớn hơn 1.  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  là các hệ số quan sát thỏa mãn định thức Hurwitz.

Chứng minh tích ổn định của EHGO: Để đơn giản, phân tích ổn định của EHGO được đưa ra trong phương trình (17). Giả sử rằng nhiễu loạn liên tục bậc hai này có thể phân biệt được và đạo hàm bị chặn:

$$\max \{ \sup | \dot{d}_{ld} |, \sup | \ddot{d}_{ld} | \} \leq D_{ld} \quad (21)$$

Trong đó,  $D_{ld}$  là số thực dương

Chọn hàm Lyapunov với P là ma trận xác định dương:

$$V_e = \eta^T P \eta \quad (22)$$

Đạo hàm 2 vế (22) có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_e &= \eta^T P \dot{\eta} + \dot{\eta}^T P \eta \\ &= \varepsilon_1 \eta^T (PM + M^T P) \eta + (\eta^T PN + N^T P \eta) \dot{d}_{ld} \\ &= -\varepsilon_1 \|\eta\|^2 + 2\eta^T P N \dot{d}_{ld} \\ &\leq -\varepsilon \|\eta\|^2 + 2\varphi_1 \|\eta\| \leq -(\varepsilon_1 - 1) \|\eta\|^2 + \varphi_1^2 \end{aligned}$$

Trong đó:  $M = \begin{bmatrix} -\alpha_{11} & 1 \\ -\alpha_{12} & 0 \end{bmatrix}$  là ma trận Hurwitz;

$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/\varepsilon_1^2 \end{bmatrix}$ ;  $\varphi_1 = D_{ld} \sqrt{\lambda_1} / \varepsilon_1^2$ ;  $\lambda_1$  là giá trị riêng lớn nhất của ma trận  $P^T P$ .

$$\text{Có } \|\eta\|^2 \geq W e / \sqrt{\lambda_1} > 0; \varphi_1^2 = \frac{D_{ld}^2 \lambda_1}{\varepsilon_1^4} \leq 0,5(\varepsilon_1 - 1) \delta_1 / \sqrt{\lambda_1}$$

do đó:

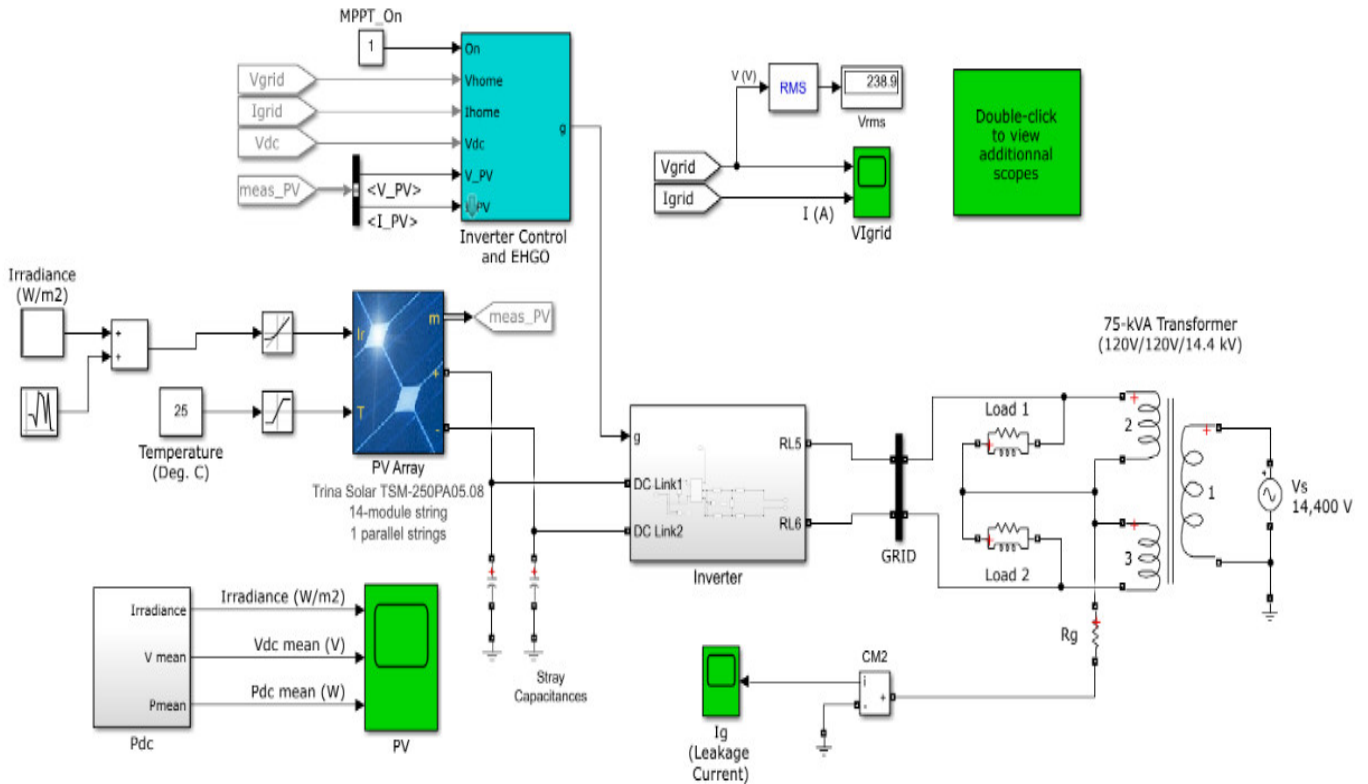
$$\begin{aligned} \dot{V}_e &\leq -(\varepsilon_1 - 1) V_e / \sqrt{\lambda_1} + \varphi_1^2 \\ &\leq -(\varepsilon_1 - 1) \delta_1 / \sqrt{\lambda_1} + \varphi_1^2 \\ &\leq -(\varepsilon_1 - 1) \delta_1 / \sqrt{\lambda_1} + 0,5(\varepsilon_1 - 1) \delta_1 / \sqrt{\lambda_1} \\ &= -0,5(\varepsilon_1 - 1) \delta_1 / \sqrt{\lambda_1} < 0 \end{aligned}$$

Như vậy, bộ quan sát đảm bảo hội tụ.

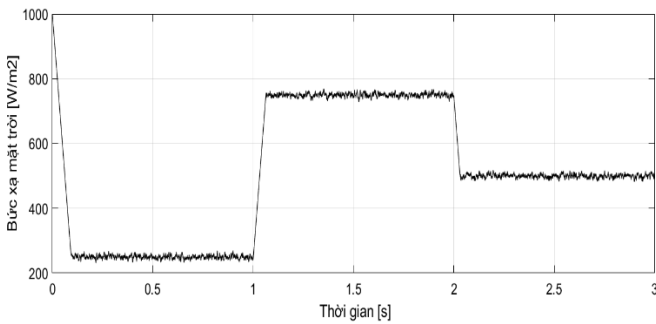
#### 5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Trong phần trên, bài báo đã xây dựng bộ điều khiển thụ động kết hợp bộ quan sát EHGO cho hệ biến tần. Mô hình mô phỏng được thực hiện trên Matlab/Simulink. Tham số mô phỏng như sau:  $r_1 = 0,5\Omega$ ;  $r_2 = 0,1\Omega$ ;  $C_f = 55\mu F$ ;  $L_f = 2mH$ ;  $\varepsilon_1 = 50$ ;  $\varepsilon_2 = 50$ ;  $\varepsilon_3 = 10$ ;  $\alpha_1 = 5$ ;  $\varepsilon_{12} = 10$ .

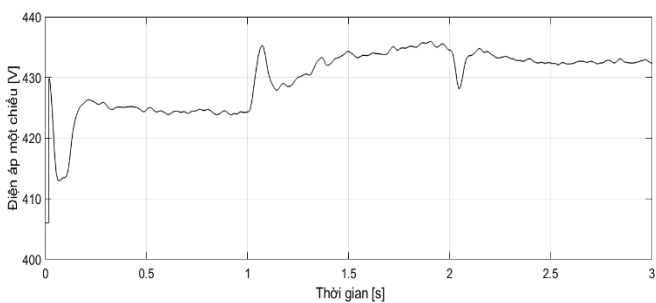
Mô hình mô phỏng sử dụng 14 mô-đun Trina Solar TSM-250 được kết nối nối tiếp. Xây dựng mô hình biến tần nối lưới, sử dụng bộ điều khiển thụ động kết hợp bộ quan sát nhiễu EHGO như thể hiện trên hình 3.



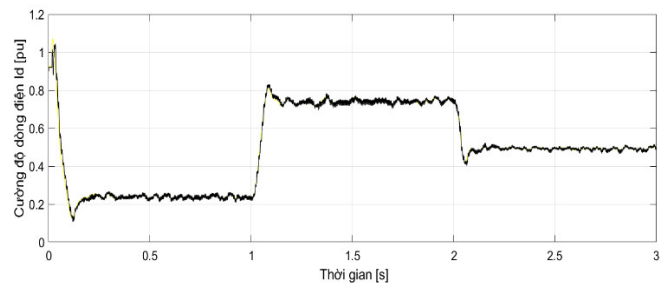
Hình 3. Mô hình mô phỏng điều khiển biến tần cho trạm phát điện mặt trời  
Cường độ bức xạ năng lượng mặt trời ban đầu đặt là  $250\text{W/m}^2$  và nhiệt độ  $25^\circ\text{C}$ . Tại  $t = 1$  giây, độ rọi mặt trời tăng từ  $250\text{W/m}^2$  lên  $750\text{W/m}^2$  và đến 2 giây giảm xuống  $500\text{W/m}^2$ . 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 trên hình 4 ÷ 9.



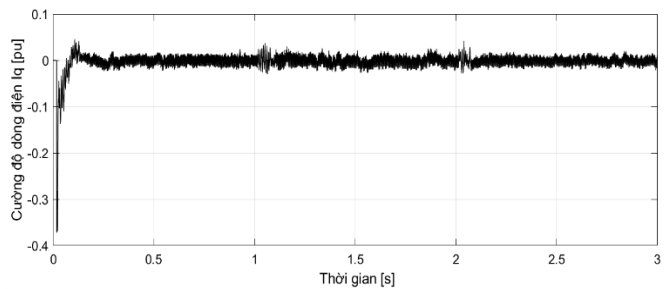
Hình 4. Bức xạ mặt trời



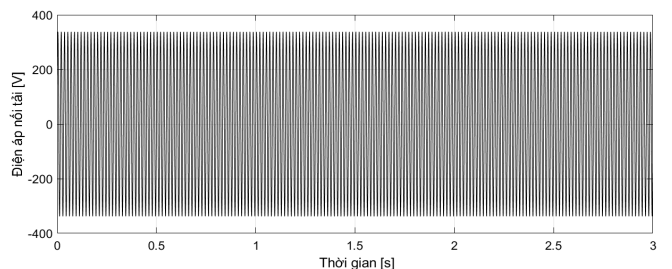
Hình 5. Điện áp đầu ra của hệ pin mặt trời



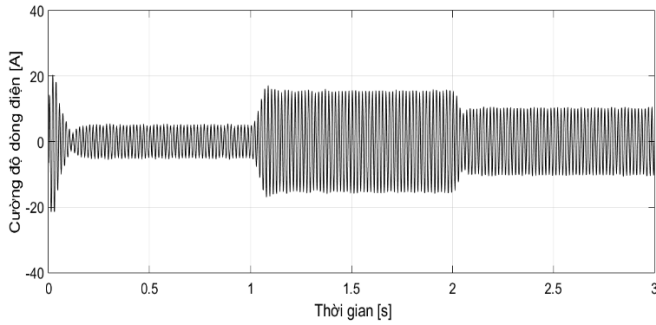
Hình 6. Cường độ dòng điện  $i_d$  của biến tần



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 thấy rằng, bộ điều khiển PBC kết hợp bộ quan sát EHGO đã cho kết quả tốt, đáp ứng đầu ra bám sát tín hiệu đặt (hình 5). Khi thay đổi cường độ bức xạ ánh sáng mặt trời kết hợp nhiễu ngoài tác động, điện áp đầu ra biến tần và điện áp nối lưới vẫn được duy trì ổn định; cường độ dòng điện thay đổi theo tín hiệu đặt.

## 6. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển PBC kết hợp bộ quan sát nhiễu EHGO cho hệ biến tần. Kết quả thu được cho thấy bộ điều khiển và bộ quan sát đảm bảo được yêu cầu chất lượng cho hệ biến tần, có thể ứng dụng trong việc nối tải, 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, "Digital power factor control and reactive power regulation for grid-connected photovoltaic inverter," *Renewable Energy*, 34, 1, 315-321, 2009.
- [2]. Hassaine L., Olias E., Quintero J., Barrado A., "Digital control based on the shifting phase for grid connected photovoltaic inverter", in *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Austin, TX, USA, 945-951, 2008. doi: 10.1109/APEC.2008.4522835.
- [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]. Zhao J., Wu W., Gao N., Wang H., Chung H. S. H., Blaabjerg F., "Combining passivity-based control with active damping to improve stability of LCL filtered grid-connected voltage source inverter," in *Proceedings of the 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, Shenzhen, China, 2018.

## AUTHOR INFORMATION

**Nguyen Thi Thu Hien**

Electric Power University, Vietnam