NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG BIẾN TẦN NỐI LƯỚI BẰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT VÀ BỘ LỌC LAI

IMPROVING THE QUALITY OF GRID-CONNECTED INVERTER BY SLIDING CONTROLLERS AND HYBRID FILTERS

Đặng Tiến Trung[1,*], Nguyễn Tuấn Hoàn[1]

DOI: https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.136

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả tổng hợp bộ điều trượt (SMC) cho hệ biến tần nối lưới (BTNL) có sử dụng bộ lọc lai, kết hợp giữa bộ lọc chủ động (APF) và bộ lọc bị động (PPF). Bộ điều khiển đã giúp giảm ảnh hưởng của tải phi tuyến và hiện tượng sóng hài đến tính ổn định của lưới điện. Chất lượng của bộ điều khiển và bộ lọc đề xuất được đánh giá thông qua kết quả mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink.

Từ khóa: *Biến tần nối lưới; điều khiển trượt; bộ lọc chủ động; phụ tải phi tuyến.*

ABSTRACT

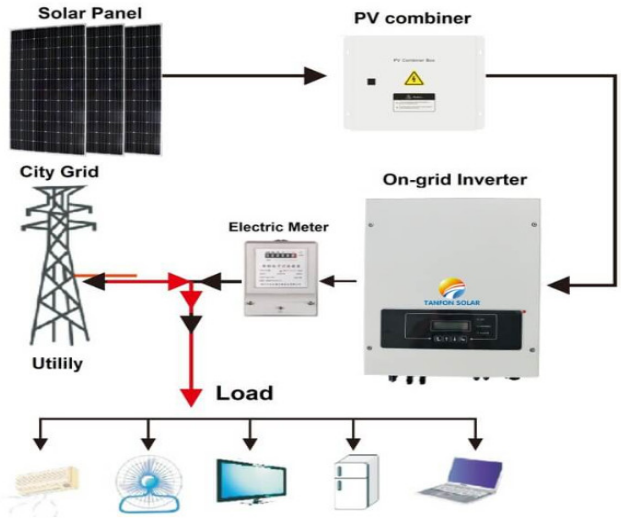
This paper presents the results of the synthesis of the sliding control unit (SMC) for the grid-connected inverter system using a hybrid filter, a combination of active power filter (APF) and passive power filter (PPF). The controller has helped to reduce the influence of nonlinear loads and harmonics on the stability of the grid. The quality of the proposed controller and filter is evaluated through simulation results using Matlab-Simulink software.

Keywords: *Grid-connected inverter; sliding mode control; active power filter; non-linear load.*

[1]Trường Đại học Điện lực
[*]Email: dangtientrung@gmail.com
Ngày nhận bài: 25/6/2023
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 30/7/2023
Ngày chấp nhận đăng: 25/8/2023

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, nhu cầu sử dụng điện đang ngày một tăng cao, thì vai trò của năng lượng tái tạo ngày càng quan trọng. Để sử dụng hiệu quả năng lượng mặt trời, người ta thường sử dụng bộ chuyển đổi quang điện kết hợp với bộ biến tần (BT) 2 tầng. Tầng đầu tiên thường là bộ biển đổi DC/DC tần số cao, có thể cách ly hoặc không, với vai trò dò điểm công suất cực đại (MPPT). Tầng thứ hai là một bộ DC/AC hai chiều, để ổn định điện áp DC cũng như đảm bảo quá trình trao đổi công suất với lưới điện một cách trơn tru. Cấu trúc này đặc biệt phù hợp với các ứng dụng PV áp mái trong phạm vi công suất dưới 5kW do kích thước nhỏ gọn, hiệu suất cao [1]. Để có thể nối lưới ổn định và an toàn thì một số tham số phải đáp ứng được yêu cầu nhất định như: tổng độ méo sóng hài dòng điện [2]. Bên cạnh đó dòng ra của biến tần hòa lưới thường được trộn với một lượng lớn sóng hài tần số cao sau khi điều chế, điều đó ảnh hưởng lớn đến chất lượng nguồn điện. Bộ lọc LCL, với những lợi thế rõ ràng như chi phí thấp và hiệu suất bộ lọc tốt hơn, thường được sử dụng để triệt tiêu sóng hài cao tần. Tuy nhiên, bộ lọc LCL thuộc về hệ thống bậc ba, có thể đưa ra các đỉnh cộng hưởng, dẫn đến sự mất ổn định của hệ thống [1]. Do đó, cần có phương pháp điều khiển và bộ lọc phù hợp để đảm bảo hệ thống ổn định và hiệu suất cao để chất lượng dòng điện lưới có thể đáp ứng các yêu cầu cụ thể.

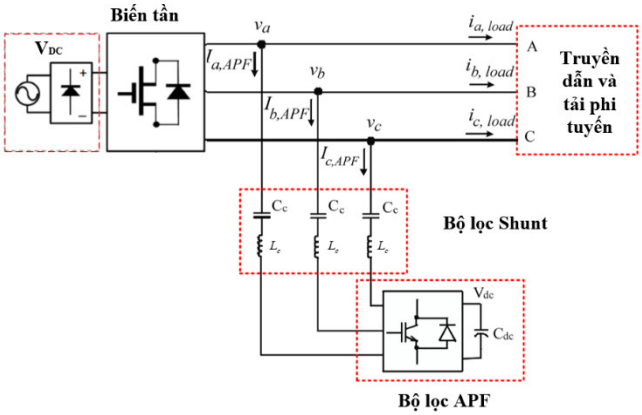


Hình 1. Sơ đồ bố trí BTNL ở trạm năng lượng tái tạo

Một số phương pháp điều khiển mới được đề xuất thông qua cải tiến phương pháp truyền thống như: Phương pháp điều khiển cộng hưởng tỷ lệ đã được áp dụng cho biến tần nối lưới trong [3]. Phương pháp điều khiển phản hồi trạng thái phi tuyến tính đã được đề xuất trong [4]. Tuy nhiên, các phương pháp này vẫn có nhược điểm đó là độ ổn định của hệ thống cũng như độ chính xác của điều khiển chưa bền vững. Bộ điều khiển trượt có sự hội tụ nhanh, bền vững đối với các nhiễu loạn bên ngoài và ổn định tốt; do đó phù hợp để điều khiển các hệ thống cấu trúc biến đổi như biến tần [5].

Trong bài báo, nhóm tác giả đề xuất một bộ lọc APF lai kết hợp bộ điều khiển SMC nhằm cải thiện hiệu quả của bộ lọc, ổn định điện áp nối lưới.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH HỆ BTNL



Hình 2. BTNL sử dụng bộ lọc lai

Trong đó: Chỉ số "abc" biểu thị các biến trong tọa độ ba pha; i_{APF} là dòng điện đi vào bộ lọc; i_{load} là dòng điện ra tải; V_{dc} là hiệu điện thế tụ điện; L_c, C_c lần lượt là điện cảm và tụ điện của bộ lọc Shunt; C_{dc} là điện dung của tụ lọc APF.

Phương trình cân bằng điện áp của bộ lọc lai:

$$\begin{aligned} L_c\frac{d(i_{AFP,d})}{dt} &= \omega L_c i_{AFP,d} - v_{cd} - u_d V_{dc} + v_{Ld} \\ L_c\frac{d(i_{AFP,q})}{dt} &= -\omega L_c i_{AFP,d} - v_{cq} - u_q V_{dc} + v_{Lq} \\ C_c\frac{d(v_{cd})}{dt} &= i_{AFP,d} + \omega C_c v_{cd} \\ C_c\frac{d(v_{cq})}{dt} &= i_{AFP,q} - \omega C_c v_{cq} \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó, $i_{AFP,d}$, $i_{AFP,q}$ là dòng bù hệ dq; v_{dc}, v_{cq} điện áp bộ lọc PPF.

Phương trình dòng điện DC liên kết:

$$C_{dc}\frac{d(V_{dc})}{dt} = u_q i_{AFP,q} + u_d i_{AFP,d} \quad (2)$$

Đưa về phương trình trạng thái dạng:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}X = A(X) + B(X)u \\ Y = C(X) + D(X)u \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: $X = [i_{AFP,q}, i_{AFP,d}, v_{cd}, v_{cq}]^T; u = [u_d, u_q]^T$

$$A(X) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_c}(\omega L_c i_{AFP,d} - v_{Cd} - u_d V_{dc} + v_{Ld}) \\ \frac{1}{L_c}(-\omega L_c i_{AFP,d} - v_{Cq} - u_q V_{dc} + v_{Lq}) \\ \frac{1}{C_c}(i_{AFP,d} + \omega C_c v_{Cd}) \\ \frac{1}{C_c}(i_{AFP,q} - \omega C_c v_{Cq}) \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$B(X) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_c}(-V_{dc}) & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_c}(-V_{dc}) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{C_c}(i_{cd}) & \frac{1}{L_c}(i_{cq}) \end{bmatrix}$$

$$C(X) = \begin{bmatrix} i_{AFP,d} \\ i_{AFP,q} \end{bmatrix}; D(X) = 0$$

Tiến hành tuyến tính hóa hệ (3) theo ma trận Jacobean có:

$$\frac{d}{dt}X = A_L X + B_L u + H + h \quad (4)$$

$$\text{Với } A_L = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_1(X)}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial A_1(X)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial A_1(X)}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial A_1(X)}{\partial x_n} \end{bmatrix}; B_L = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_1(X)}{\partial u_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial A_1(X)}{\partial u_n} \end{bmatrix}$$

Trong đó, h là phần nhiễu tải và H tương ứng với phần ma trận không xác định của mô hình không gian trạng thái do tuyến tính hóa.

3. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN SMC

Gọi X_d là tín hiệu đặt, có phương trình sai lệch:

$$E = X - X_d \quad (5)$$

Theo (4), (5) có:

$$\frac{d}{dt}E = A_L E + B_L u - \frac{d}{dt}X + \Delta H + \Delta h \quad (6)$$

Để loại bỏ nhiễu hiệu quả đề xuất sử dụng trượt bậc cao với mặt trượt như sau:

$$s = k_1 E + k_2\int_0^t E dt \quad (7)$$

Với k_1, k_2 là hằng số dương. Đạo hàm hai vế của (7), kết hợp với (6) có:

$$\frac{d}{dt}s = k_1(A_L E + B_L u - \frac{d}{dt}X + A_L X_d + \Delta H + \Delta h) + k_2 E \quad (8)$$

Tiếp tục đạo hàm hai vế của (8) có:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2}s = &(k_1 A_L^2 + k_2 A_L) + k_1 A_L B_L u + (k_1 A_L^2 + k_2 A_L)E \\ &+ X_d - k_2\frac{d}{dt}X_d - k_1\frac{d^2}{dt^2}X_d + (k_1 A_L + k_2)(\Delta H + \Delta h) \\ &+ k_1\frac{d}{dt}(\Delta H + \Delta h) + k_1 B_L\frac{d}{dt}u \end{aligned} \quad (9)$$

Để thiết kế bộ SMC bậc 2, chọn mặt trượt bậc hai:

$$\vartheta = \gamma s + \frac{d}{dt}s \quad (10)$$

Trong đó: γ là hằng số dương.

Từ (8, 9, 10) có:

$$\begin{aligned}\dot{\vartheta} &= \gamma\frac{d}{dt}s + \frac{d^2}{dt^2}s \\ &= (k_1A_L^2 + k_2A_L + \gamma k_1A_L + \gamma k_2)E + (k_1A_LB_L + k_2B_L + \gamma k_1B_L)u \\ &\quad + (k_1A_L^2 + k_2A_L + \gamma k_1A_L)X_d - (\gamma k_1 + k_2)\frac{d}{dt}X_d - \frac{d^2}{dt^2}X_d \\ &\quad + k_1B_L\frac{d}{dt}u + (\gamma k_1A_L + \gamma k_2 + \gamma k_1)(\Delta H + \Delta h) \\ &\quad + k_1\frac{d}{dt}(\Delta H + \Delta h)\end{aligned} \quad (11)$$

Để hệ hội tụ về 0, đề xuất luật điều khiển sau:

$$u = -(k_1B_L)^{-1}\int_0^t \begin{Bmatrix}\{(k_1A_L^2 + k_2A_L + \gamma k_1A_L + \gamma k_2)E \\ +(k_1A_LB_L + k_2B_L + \gamma k_1B_L)u \\ +(k_1A_L^2 + k_2A_L + \gamma k_1A_L)X_d + m_1\vartheta \\ +m_2 sign(\vartheta)\end{Bmatrix} dt \quad (12)$$

Chứng minh:

Chọn hàm Lyapunov sau:

$$V = \frac{1}{2}\vartheta^2 \quad (13)$$

Đạo hàm 2 vế (13) kết hợp (11) có:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}V &= \vartheta\times\frac{d}{dt}\vartheta \\ &= \vartheta\{(k_1A_L^2 + k_2A_L + \gamma k_1A_L + \gamma k_2)E + (k_1A_LB_L + k_2B_L\gamma k_1B_L)u \\ &\quad + (k_1A_L^2 + k_2A_L + \gamma k_1A_L)X_d - (\gamma k_1 + k_2)\frac{d}{dt}X_d - \frac{d^2}{dt^2}X_d \\ &\quad + k_1B_L\frac{d}{dt}u + (\gamma k_1A_L + \gamma k_2 + \gamma k_1)(\Delta H + \Delta h) \\ &\quad + k_1\frac{d}{dt}(\Delta H + \Delta h)\}\end{aligned} \quad (14)$$

Từ (12) có:

$$\begin{aligned}\dot{u} &= -(k_1B_L)^{-1}\{(k_1A_L^2 + k_2A_L + \gamma k_1A_L + \gamma k_2)E \\ &\quad + (k_1A_LB_L + k_2B_L + \gamma k_1B_L)u \\ &\quad + (k_1A_L^2 + k_2A_L + \gamma k_1A_L)X_d + m_1\vartheta + m_2 sign(\vartheta)\}\end{aligned} \quad (15)$$

Thay (12) và (15) vào (14) có:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}V &= \vartheta\{-m_1\vartheta - m_2 sign(\vartheta) + (\gamma k_1A_L + \gamma k_2 + \gamma k_1)(\Delta H + \Delta h) \\ &\quad + k_1\frac{d}{dt}(\Delta H + \Delta h) - (\gamma k_1 + k_2)\frac{d}{dt}X_d - \frac{d^2}{dt^2}X_d\} \\ &= -m_1\vartheta^2 - m_2|\vartheta| + T.\vartheta\end{aligned} \quad (16)$$

Với $T = (\gamma k_1A_L + \gamma k_2 + \gamma k_1)(\Delta H + \Delta h) + k_1\frac{d}{dt}(\Delta H + \Delta h) - (\gamma k_1 + k_2)\frac{d}{dt}X_d - \frac{d^2}{dt^2}X_d$

Chọn

$m_1 > 0;$

$m_2 > (\gamma k_1A_L + \gamma k_2 + \gamma k_1)(\Delta H + \Delta h) + k_1\frac{d}{dt}(\Delta H + \Delta h) - (\gamma k_1 + k_2)\frac{d}{dt}X_d - \frac{d^2}{dt^2}X_d$

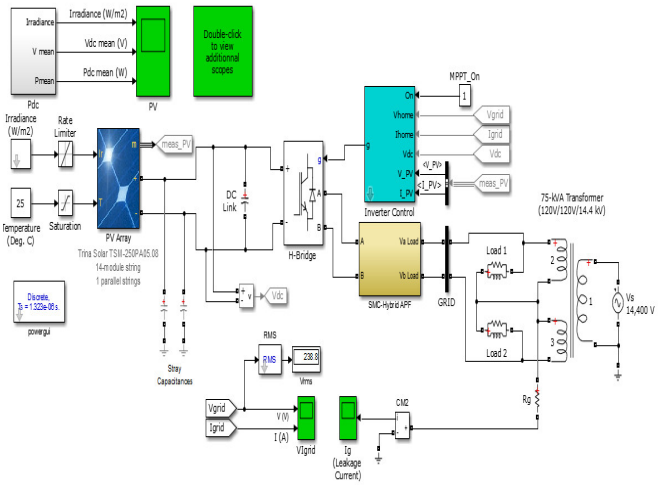
Khi đó $\frac{d}{dt}V < 0$, như vậy hệ ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Trong phần 3, các tác giả đã tổng hợp luật điều khiển SMC cho BTNL kết hợp bộ lọc APF lai. Mô phỏng kiểm chứng được thực hiện trên Matlab/Simulink như hình 3. Tham số hệ biến tần như bảng 1.

Bảng 1. Tham số hệ biến tần

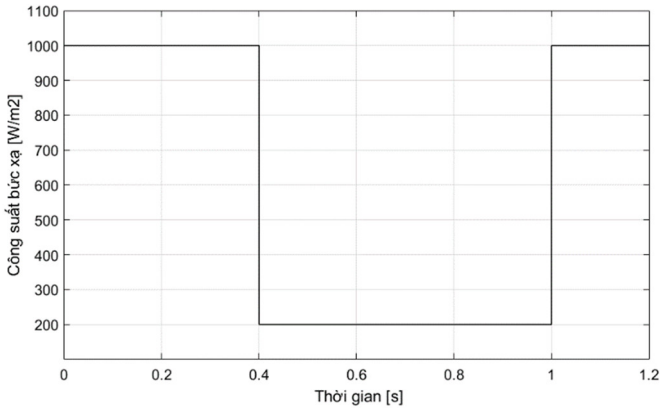
Ký hiệu	Tham số mô hình	Giá trị
E	Hiệu điện áp lưới	220V
f	Tần số điện áp lưới	50Hz
V_{DC}	Hiệu điện áp một chiều	420V
L_c	Điện cảm bộ lọc Shunt	1,4mH
C_c	Điện dung bộ lọc Shunt	220μF
R_1, R_2	Điện trở bộ lọc	1,8Ω
C_{dc}	Điện dung tụ lọc APF	4mF
Mosfet	Power switches	600V, 6A



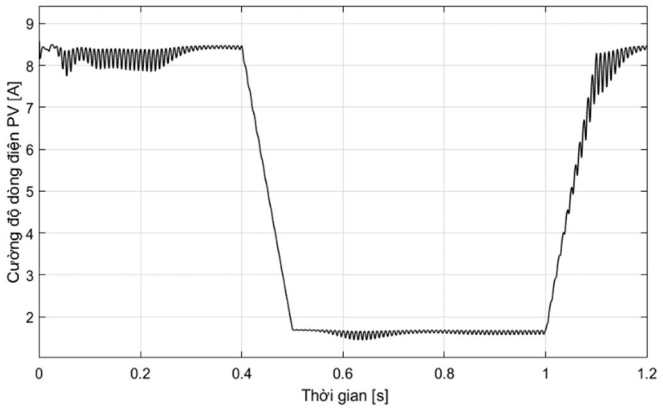
Hình 3. Mô phỏng trạm phát điện 75kVA sử dụng BTNL

Bộ chuyển đổi trong mô hình cách sử dụng cầu H được điều khiển bằng biến tần PWM với bộ lọc APF lai kết hợp bộ điều khiển SMC. Lưới điện được lập mô hình bằng cách sử dụng máy biến áp gắn trên cột điển hình và nguồn AC lý tưởng là 14,4kV. Cuộn dây thứ cấp 240V của máy biến áp được nối giữa và dây trung tính trung tâm được nối đất thông qua một điện trở nhỏ R_g, tải dân dụng 20kW.

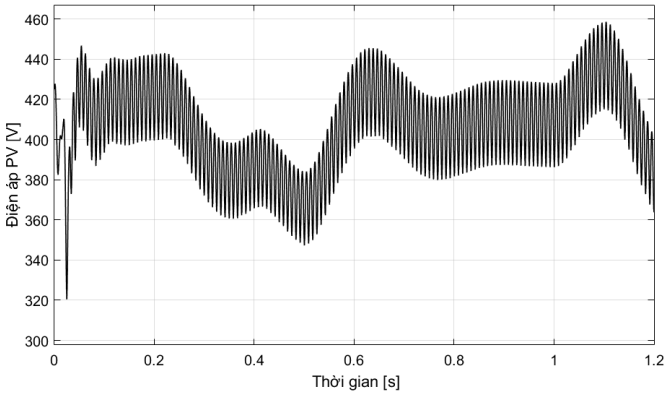
Trường hợp 1: Công suất bức xạ năng lượng mặt trời giảm từ 1000W/m² xuống 200W/m² tại thời điểm 0,4 giây. Các kết quả mô phỏng kiểm chứng trên Matlab/Simulink như được trình bày trên hình 4 ÷ 9.



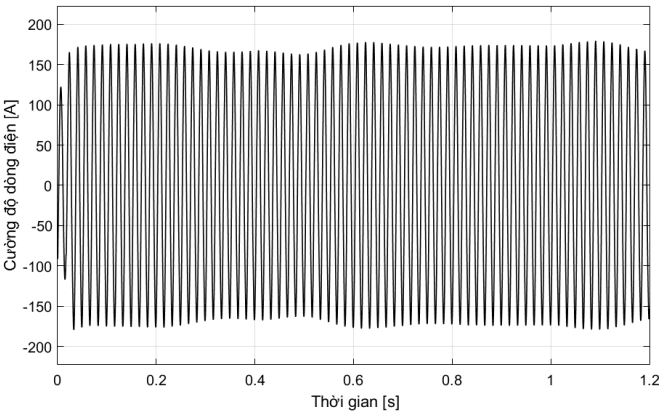
Hình 4. Công suất bức xạ năng lượng mặt trời



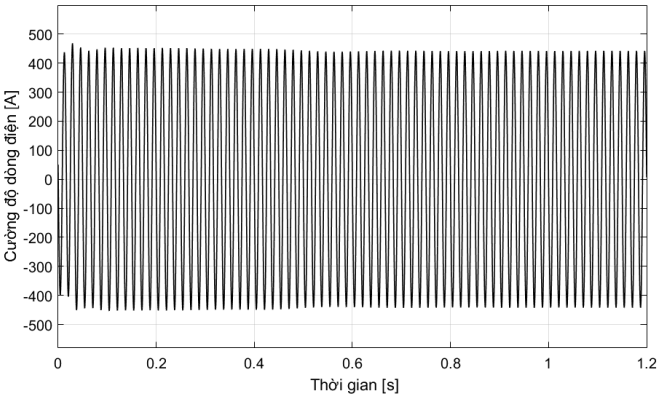
Hình 5. Dòng điện của PV



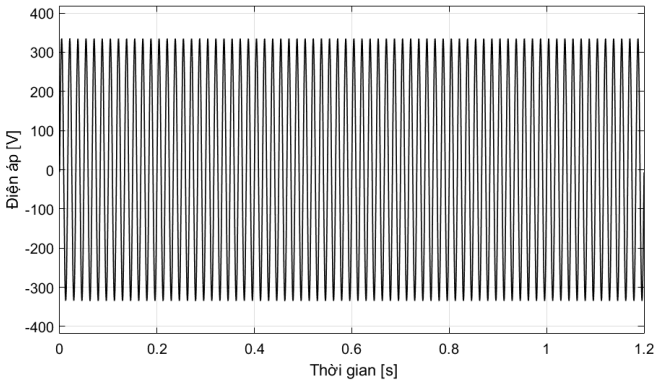
Hình 6. Điện áp đầu ra hệ pin năng lượng mặt trời



Hình 7. Cường độ dòng điện vào bộ lọc

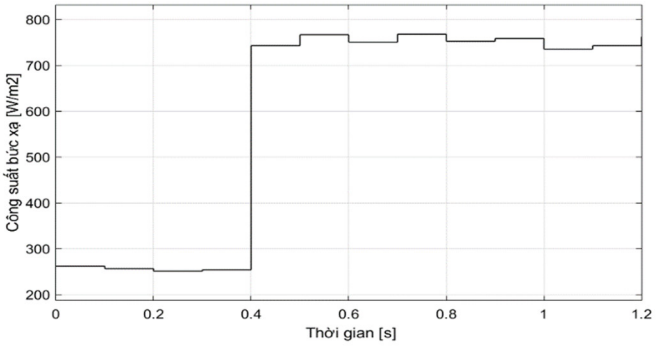


Hình 8. Cường độ dòng điện nối lưới

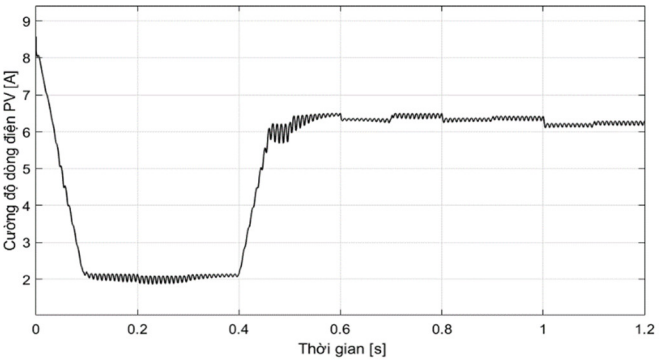


Hình 9. Điện áp pha A nối lưới

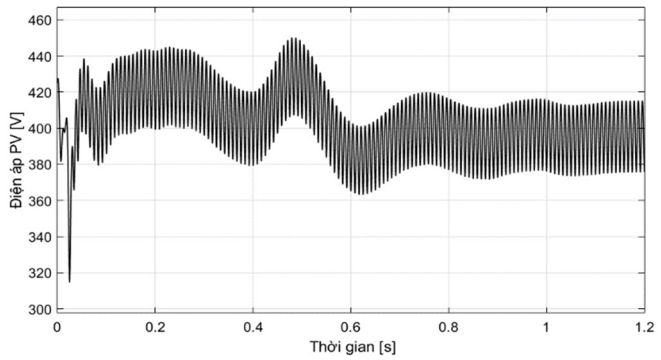
Trường hợp 2: Công suất bức xạ ánh sáng mặt trời tại thời điểm 0,4s tăng từ 250W/m^2 lên 750W/m^2 kết hợp nhiễu ngẫu nhiên 100W/m^2. Các kết quả mô phỏng kiểm chứng trên Matlab/Simulink như được trình bày trên hình 10 ÷ 15.



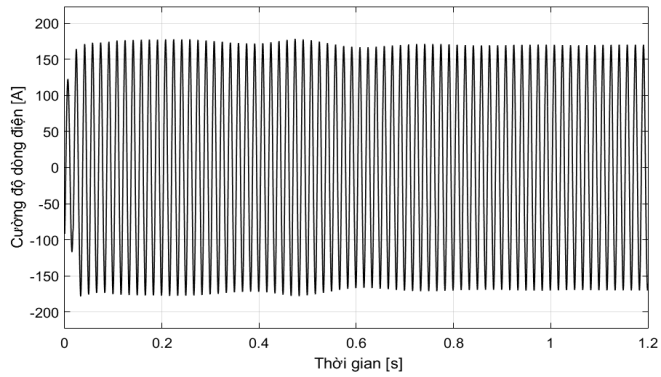
Hình 10. Công suất bức xạ năng lượng mặt trời



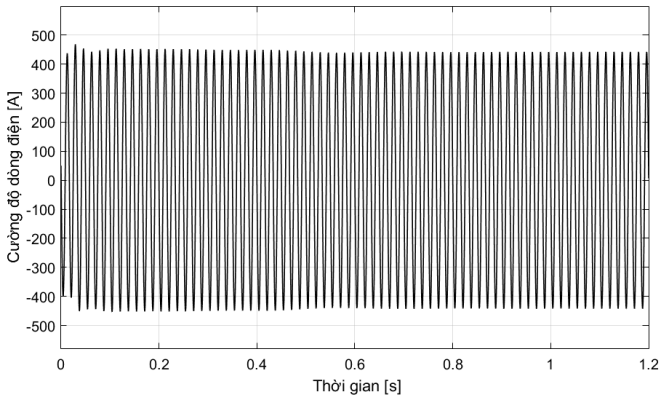
Hình 11. Dòng điện của PV



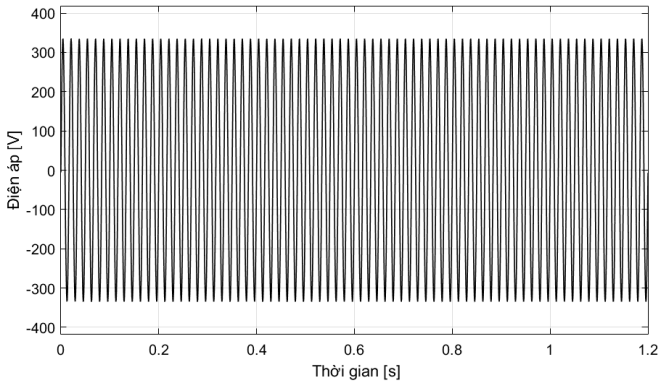
Hình 12. Điện áp đầu ra hệ pin năng lượng mặt trời



Hình 13. Cường độ dòng điện vào bộ lọc



Hình 14. Cường độ dòng điện nối lưới



Hình 15. Điện áp pha A nối lưới

Nhận xét:

Kết quả sau khi mô phỏng cho thấy, bộ SMC kết hợp bộ lọc APF lai đã giúp BTNL đạt được các yêu cầu đặt ra. Khi công suất bức xạ mặt trời thay đổi, có nhiễu, dòng điện đầu vào bộ lọc không ổn định với sai lệch 11% song đáp ứng đầu ra nối lưới vẫn giữ ổn định, sai lệch 0,2%.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã mô hình hóa hệ BTNL sử dụng bộ lọc APF lai, trên cơ sở đó đề xuất luật điều khiển SMC. Kết quả sau khi khảo sát cho thấy hệ biến tần đảm bảo được yêu cầu chất lượng khi nối lưới, có thể ứng dụng trong việc hòa đồng bộ cho các trạm nguồn điện tái tạo hiện có.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. I. Sulaeman, V. Vega-Garita, G. R. C. Mouli, N. Narayan, L. RamirezElizondo, P. Bauer, 2016. *Comparison of PV-battery architectures for residential applications*. 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Leuven, pp. 1-7.

[2]. M. Tsili, S. Papathanassiou, 2009. *A review of grid code technical requirements for wind farms*. in IET Renewable Power Generation, vol. 3, no. 3, pp. 308-332.

[3]. A. Angermann, M. Aicher, D. Schroder, 1999. *Time-optimal tension control forprocessing plants with continuous moving webs.* Proc. 35th Annual Meeting-IEEE Industry Applications Society, Rome.

[4]. C. Dirscherl, C.M. Hackl, K. Schechner, 2015. *Pole-placement based nonlinear state-feedback control of theDC-link voltage in grid-connected voltage source power converters: A preliminary study.* Proc. IEEE International Conference on Control Applications, Sydney, Australia, pp.207-14.

[5]. Y. Feng, F. Han, X. Yu, 2014. *Chattering free full-order sliding-mode control*. Automatica, vol.50, no.4, pp.1310-4.

[6]. Baoquan Liu, Hua Guo, et al., 2017. *Analysis and Design of a Passively Damping LCL Filter in Three-Phase Converters.* Transactions of China Electrotechnical Society, vol. 32, no. 2, pp. 195-205.

AUTHORS INFORMATION

Dang Tien Trung, Nguyen Tuan Hoan

Electric Power University, Hanoi, Vietnam