

NGHIÊN CỨU, MÔ PHỎNG HỆ NGHỊCH LƯU NỐI LƯỚI 1 PHA SỬ DỤNG MATLAB SIMULINK CHO HỆ PIN MẶT TRỜI

RESEARCH AND SIMULATION OF A 1-PHASE GRID-CONNECTED INVERTER SYSTEM USING MATLAB SIMULINK FOR SOLAR SYSTEM

Trần Trường An^{1,*}, Đỗ Đức Anh¹,
Ngô Trí Thuyên¹, Đặng Quốc Du², Bùi Văn Huy³

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.053>

TÓM TẮT

Hiện nay, sự gia tăng giá nhiên liệu và các hạn chế nhằm giảm ô nhiễm môi trường đã mang lại nhiều cơ hội cho việc tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo. Bài báo này sẽ trình bày cấu trúc tích hợp các nguồn phát điện từ Pin mặt trời vào lưới. Bài báo tập trung nghiên cứu vào một phần tử rất quan trọng trong hệ thống nhiều nguồn năng lượng lai ghép, đó là phần điều khiển của bộ biến đổi nghịch lưu nối lưới 1 pha. Đây là một nội dung quan trọng, việc điều khiển để quá trình trao đổi năng lượng diễn ra ổn định và tin cậy sẽ quyết định đến độ ổn định toàn hệ thống. Các kết quả thiết kế và mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Matlab/Simulink.

Từ khóa: Pin mặt trời, nghịch lưu nối lưới, nguồn phân tán.

ABSTRACT

Today, the increase in fuel prices and restrictions to ensure the fight against environmental pollution have provided many opportunities for the integration of renewable energy sources. This paper will present some of the structures that integrate renewable energy sources of different nature into the grid, analyzing in detail the DC-Bus type coupling system. It is the control part of the 1-phase grid-connected inverse converter. This is an important content, the control for the energy exchange process to take place stably and reliably will determine the stability of the whole system. The design and simulation results were performed on Matlab and simulink software.

Keywords: Solar cells, grid-connected inverses, distributed sources.

¹Lớp ĐK&TĐH K14, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Khoa Điện, Trường Đại học Kinh tế Kỹ thuật Công nghiệp

³Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: trantruongan99999@gmail.com

Ngày nhận bài: 25/10/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 03/02/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/3/2023

KÍ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
T_s	s	Chu kỳ lấy mẫu
T_{sc}	s	Chu kỳ lấy mẫu bộ điều khiển
f	Hz	Tần số

I_{ref}	A	Dòng điện đặt
I_{sol}	A	Dòng điện 1 chiều tạo ra từ tấm pin mặt trời
V_{sol}	V	Điện áp 1 chiều tạo ra từ tấm pin mặt trời
V_a	V	Điện áp xoay chiều
I_a	A	Dòng điện xoay chiều
P_{dc}	W	Công suất dòng 1 chiều từ pin mặt trời
THD		Hệ số méo dạng
V_{ref}	V	Điện áp đặt
V_{dc}	V	Điện áp đầu ra bộ DC/DC

CHỮ VIẾT TẮT

PR	Proportional Resonant
MPPT	Maximum Power Point Tracker
P&O	Perturb and Observer
PWM	Pulse Width Modulation
PLL	Phase-Locked Loop

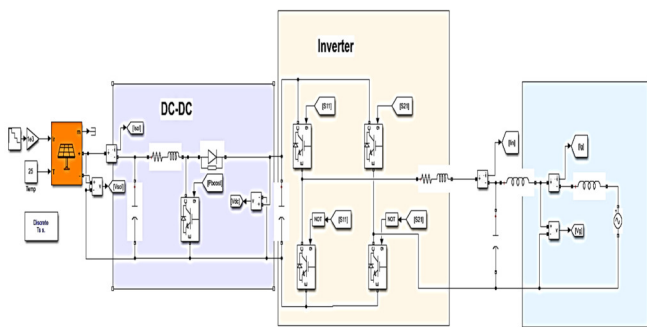
1. GIỚI THIỆU

Việt Nam là quốc gia nằm ở đới khí hậu nhiệt đới gió mùa, lượng bức xạ mặt trời hằng năm rất lớn do đó nhu cầu sử dụng năng lượng càng tăng trong công nghiệp và sinh hoạt. Để tận dụng nguồn bức xạ lớn đó các nhà máy điện mặt trời được xây dựng. Để khai thác được nguồn năng lượng này an toàn và hiệu quả cao thì việc nghiên cứu các tấm pin mặt trời (PV) và bộ nghịch lưu biến đổi điện áp là vấn đề cần được quan tâm. Trong bài báo này, nhóm tác giả sẽ tập trung xây dựng bộ điều khiển, mô phỏng hệ thống Pin mặt trời 1 pha nối lưới có thực thi thuật toán bám công suất cực đại P&O. Bộ điều khiển dòng điện được thực hiện theo thuật toán điều khiển cộng hưởng, các kết quả mô phỏng minh chứng được các giải pháp được đề xuất.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Tấm pin năng lượng mặt trời tạo ra điện áp 1 chiều DC, để kết nối với lưới thì cần qua bộ biến đổi điện áp DC-DC (DC Booster) và bộ nghịch lưu để chuyển đổi DC-AC (H

bridge inverter). Sơ đồ nguyên lý của hệ thống nối lưới như hình 1.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý của hệ thống nối lưới

2.1. Mô hình pin mặt trời

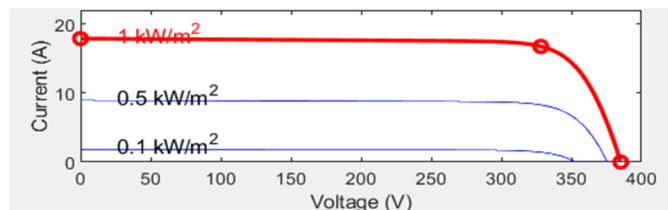
Pin mặt trời làm việc theo nguyên lý là biến đổi trực tiếp từ năng lượng bức xạ mặt trời thành điện năng nhờ hiệu ứng quang điện. Nó có ưu điểm gọn nhẹ, dễ lắp đặt bất kỳ nơi nào có ánh sáng mặt trời. Pin mặt trời được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như: hàng không vũ trụ, giao thông, sinh hoạt thay thế dần các nguồn năng lượng truyền thống [1].



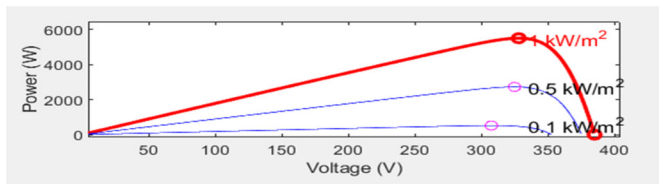
Hình 2. Mô hình pin mặt trời

Chọn module SunPower SPR-305E-WHT-D. Có các thông số như: độ bức xạ = 1000 (W/m²), nhiệt độ T = 25⁰C, dòng điện bão hòa: I₀ = 6,3073.10⁻¹² (A), dòng điện ngắn mạch I_{sc} = 5,96(A) [1-4].

Sử dụng phần mềm Matlab sẽ có được biểu đồ đường đặc tuyến I-V, P-V như thể hiện ở hình 3, 4.



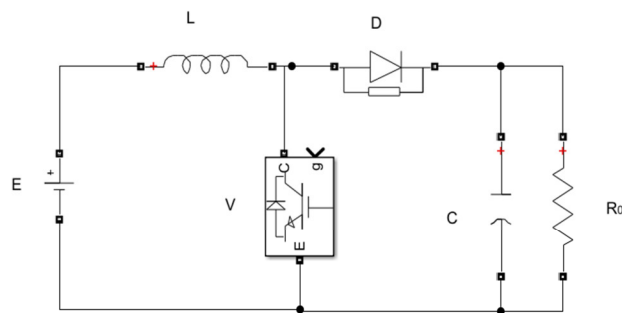
Hình 3. Đường đặc tuyến I-V của module pin mặt trời



Hình 4. Đường đặc tuyến P-V của module pin mặt trời

2.2. Bộ điều khiển DC-DC

Bộ biến đổi điện áp một chiều (DC Booster): vì điện áp ra của pin mặt trời là thấp nên ta cần dùng bộ chuyển đổi booster với mục đích nâng điện áp lên cao hơn so với điện áp đầu vào. Sơ đồ mạch nguyên lý của bộ DC Booster được thể hiện ở hình 5 [3].



Hình 5. Mạch nguyên lý của bộ DC booster

Khi V dẫn:

$$L \frac{di_L}{dt} = E \tag{1}$$

Khi V khóa:

$$L \frac{di_L}{dt} = E - U_t \tag{2}$$

Giả thiết tụ C có giá trị đủ lớn, ta có:

$$0 \leq t \leq t_x : i_L = I_{min} + \frac{E}{L}t \tag{3}$$

$$t_x \leq t \leq T : i_L = I_{max} + \frac{E - U_t}{L}(t - t_x) \tag{4}$$

Giải tương tự như trên ta có:

$$U_t = \frac{T}{T - t_x} E = \frac{1}{1 - \delta} E \tag{5}$$

Sử dụng định luật Kirchoff ta có hệ phương trình mô tả sơ đồ mạch điện của bộ biến đổi boost converter.

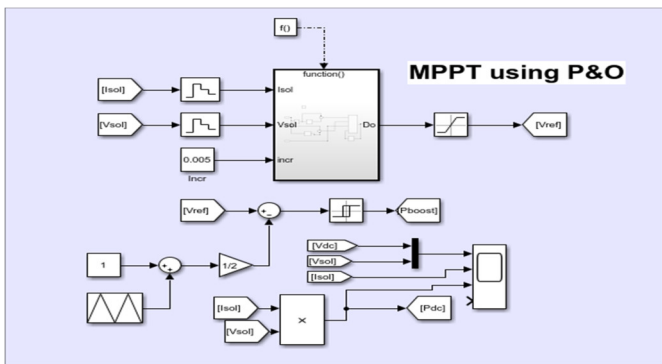
$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = \left(-\frac{R_c}{R + r_c} i_L - r_L i_L - \frac{R}{R + r_c} u_c + E \right) \\ C \frac{du_c}{dt} = \left(\frac{R}{R + r_c} i_L - \frac{1}{R + r_c} u_c \right) \\ u_o = \frac{R}{R + r_c} (u_c + r_c i_L) \end{cases} \tag{6}$$

Điểm làm việc cân bằng của bộ biến đổi boost được tính như sau:

$$\begin{cases} U_0 = U_c \\ U_c = (1-D)Rl_L \\ U_c = \frac{(E-r_Ll_L)}{(1-D)R+r_c} (R+r_c) \end{cases} \quad (7)$$

Do hệ số điều chế D làm việc ở chế độ xác lập $0 \leq D < 0$, theo hệ phương trình (7) bộ biến đổi boost converter mang đặc điểm bộ tăng áp.

Ngoài ra để nâng cao hiệu quả cho pin mặt trời cần thêm bộ điều khiển MPPT để điều khiển công suất tối ưu từ pin mặt trời. Bộ điều khiển này có tác dụng giúp hệ thống thu năng lượng từ pin mặt trời cao nhất. Để thực hiện được yêu cầu này nhóm tác giả sử dụng thuật toán P&O [5, 9]. với sơ đồ điều khiển được thể hiện ở hình 6, 7



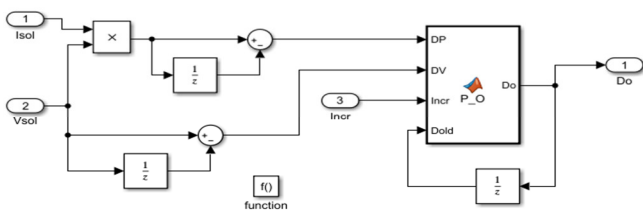
Hình 6. Sơ đồ điều khiển MPPT sử dụng thuật toán P&O

Từ công thức (5) ta có, điện áp đặt cho bộ boost có phương trình sau:

$$V_{ref} = \frac{1}{1-D} V_{sol}$$

là một hàm số phụ thuộc vào sự thay đổi của D (duty cycle D).

2.3. Thuật toán P&O



Hình 7. Sơ đồ mô phỏng thuật toán P&O

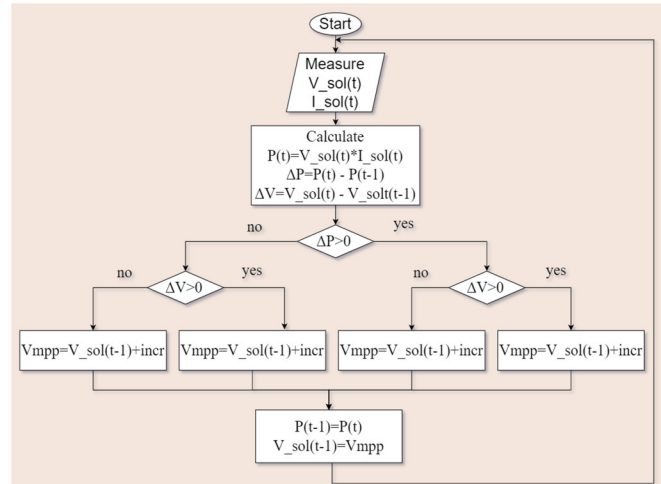
Lưu đồ P&O được thể hiện ở hình 8 [10-12]:

Dựa vào dòng điện $I_{sol}(t)$ và $V_{sol}(t)$ tại lần lấy thứ t để tính công suất $P_t = V_{sol}(t) * I_{sol}(t)$. Sau đó so sánh với công suất P_{t-1} lần đo trước đó $t-1$ $\Delta P = P_t - P_{t-1}$.

- Nếu công suất $P_t = P_{t-1}$ thì $V_{sol}(t) = V_{sol}(t-1)$, $I_{sol}(t) = I_{sol}(t-1)$.

- Nếu công suất $P_t > P_{t-1}$ thì $V_{sol}(t) > V_{sol}(t-1)$ được chia thành hai điều kiện sau: tăng xung kích I_{ncr} ngược lại thì giảm xung kích I_{ncr}

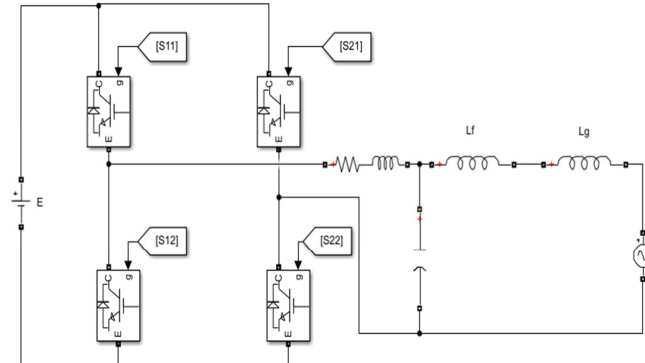
- Nếu công suất $P_t < P_{t-1}$ thì $V_{sol}(t) < V_{sol}(t-1)$ được chia thành hai điều kiện sau: giảm xung kích I_{ncr} và tăng xung kích I_{ncr}



Hình 8. Thuật toán P&O

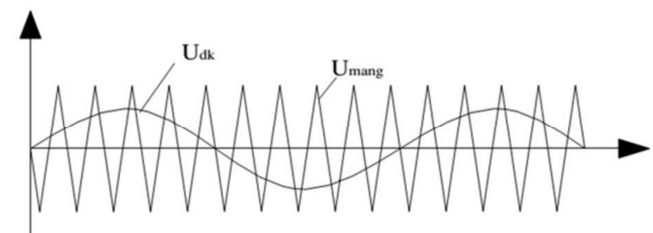
2.4. Bộ nghịch lưu DC-AC

Bộ nghịch lưu cầu H nhằm để biến đổi từ điện áp DC thành điện áp AC để hòa lưới nó có sơ đồ nguyên lý như hình 9 [3]. Cấu trúc bao gồm điện áp một chiều, 4 van bán dẫn IGBT, bộ lọc LC và tải. Bộ lọc LC tạo ra các sóng hài bằng và ngược pha với sóng hài phát sinh trong mạch nhằm triệt tiêu các thành phần sóng hài, tín hiệu bộ nghịch lưu là hình sin tương đối [13].



Hình 9. Sơ đồ nguyên lí mạch nghịch lưu cầu H

Để tạo ra điện áp xoay chiều ở đây ta sử dụng phương pháp điều chế sin (SPWM), ngoài ra ta còn sử dụng thêm một tín hiệu xung tam giác (V_{tri}) gọi là sóng mang được biểu diễn ở hình 10, nó dùng để so sánh với tín hiệu điều khiển hình sin.

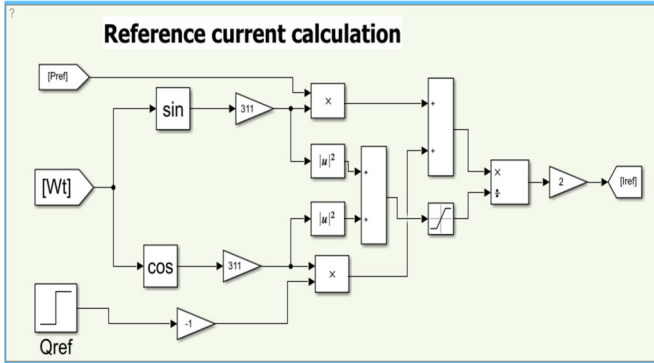


Hình 10. Điều chế SPWM 1 pha

Tìm các giá trị xung kích để cấp vào IGBT trong mạch cầu H.

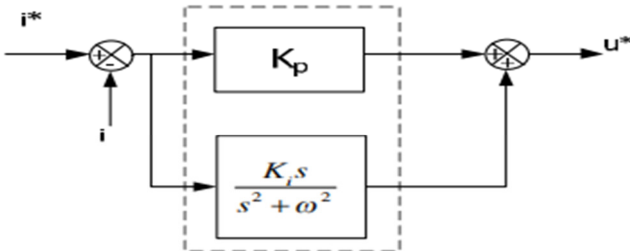
Tính giá trị đặt I_{ref} ta có công thức sau đây:

$$I_{ref} = 2 \cdot \frac{P_{ref} \cdot V_a - Q_{ref} \cdot V_\beta}{V_a^2 + V_\beta^2}$$



Hình 11. Mạch mô phỏng giá trị dòng điện đặt

Vòng điều khiển công suất phản kháng và giống như trình bày ở [7]. Điểm khác so với [8] là sử dụng bộ cộng hưởng. Bộ điều khiển cộng hưởng (Proportional Resonant-PR) được sử dụng rộng rãi trong bộ điều chỉnh dòng cho các hệ thống bám lưới [8], các hệ số K_p, K_i là hệ số tỉ lệ và hệ số tích phân của bộ điều khiển PR. Cấu trúc cơ bản của bộ điều khiển PR được chỉ ra như hình 12.



Hình 12. Cấu trúc bộ điều khiển cộng hưởng [8]

Các công thức tính bộ cộng hưởng[6]:

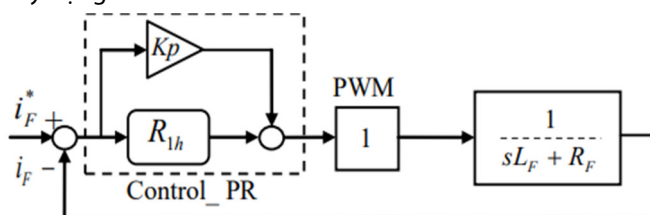
$$G_c(s) = K_p + K_i \frac{s}{s^2 + \omega^2} = K_p + K_i \frac{s}{s^2 + h^2 \omega_1^2} = K_p + R_h$$

Với $\omega = h\omega_1$. Trong đó:

ω_1 là tần số cơ bản của dòng điện.

h : bậc của sóng điều hòa, lấy sóng cơ bản $h = 1$.

Hệ số K_i dùng để xác định khả năng chọn lọc của bộ lọc, khi K_i nhỏ thì tạo ra dải tần hẹp, khi K_i lớn thì tạo ra dải tần rộng. Để tính toán tham số bộ điều khiển cộng hưởng ta xây dựng mô hình cấu trúc như hình 13.



Hình 13. Mô hình điều khiển một pha của bộ nghịch lưu nối lưới

Tải của bộ biến đổi được mô hình hóa bởi hàm truyền:

$$G_L(s) = \frac{I_F(s)}{U_{inv}(s)} = \frac{1}{sL_F + R_F}$$

Trong đó, L_F, R_F là điện kháng và điện trở của tải.

Hàm truyền đạt hệ hở của bộ điều khiển:

$$G_{PRh}(s)G_L(s) = (K_{ph} + K_{ih} \frac{s}{s^2 + h^2 \omega_1^2}) \frac{1}{sL_F + R_F}$$

Hàm truyền vòng kín dòng điện:

$$\frac{G_{PRh}(s)G_L(s)}{1 + G_{PRh}(s)G_L(s)}$$

$$G_{PR}(j\omega) = \frac{i(s)}{i^*(s)} = \frac{K_{ph}s^2 + K_{ih}s + K_{ph}\omega_1^2}{L_F s^3 + (K_{ph} + R_F)s^2 + (K_{ih} + \omega_1^2 L_F)s + K_{ph}\omega_1^2 + R_F \omega_1^2}$$

$$|G_{PR}(j\omega)| = \frac{\sqrt{(K_{ih}\omega)^2 + K_{ph}^2(\omega_1^2 + \omega^2)^2}}{\sqrt{(K_{ih} + L_F(\omega_1^2 - \omega^2))^2 \omega^2 + (K_{ph} + R_F)^2(\omega_1^2 - \omega^2)^2}}$$

$$\angle G_{PR}(j\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{K_{ih}\omega}{K_{ph}(\omega_1^2 - \omega^2)} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{(L(\omega_1^2 - \omega^2) + K_{ih})\omega}{(K_{ph} + R)(\omega_1^2 - \omega^2)} \right]$$

Xác định hệ số K_{ph} thông qua tần số cắt f_c mà tại đó độ khuếch đại 0dB. Nếu các số hạng không được xét thì $K_{ih} = 0$. Khi đó:

$$|G_{PR}(j\omega)| = \frac{K_p}{\sqrt{(L_F\omega)^2 + (K_p - R_F)^2}}$$

Nếu một băng thông dự kiến đầu ω_{ib} được đưa ra thì hệ số K_{ph} được xác định như sau:

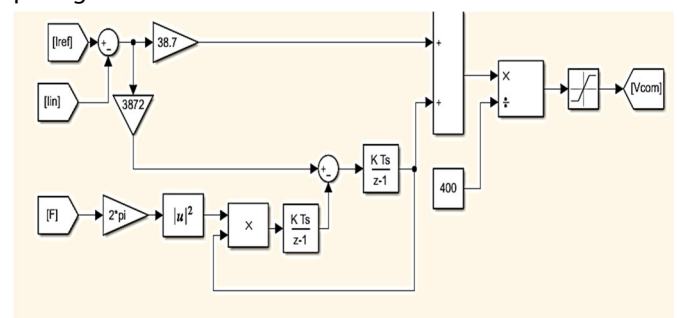
$$K_{ph} = R_F + \sqrt{(L_F\omega_{ib})^2 + 2R_F^2}$$

Hệ số tích phân K_{ih} được xác định thông qua tần số cộng hưởng $h\omega_1$, nếu tần số thông dự kiến cuối ω_{fb} được quyết định thì hệ số K_{ih} được xác định như sau:

$$K_{ih} = \frac{\omega_{fb}^2 - \omega_1^2}{\omega_{fb}} (\sqrt{(R_F - K_p)^2 + 2(L_F\omega_{fb})^2} - 2K_{ph}^2 - L_F\omega_{fb})$$

Để xác định các thông tin về biên độ mà góc pha của điện áp lưới cung cấp cho bộ cộng hưởng, ta dùng vòng khóa pha PLL.

Dựa vào các công thức trên ta tính được hệ số $K_p = 38,7$, $K_i = 3872$ để điều khiển cho bộ cộng hưởng được mô phỏng như hình 14.



Hình 14. Mô phỏng bộ cộng hưởng

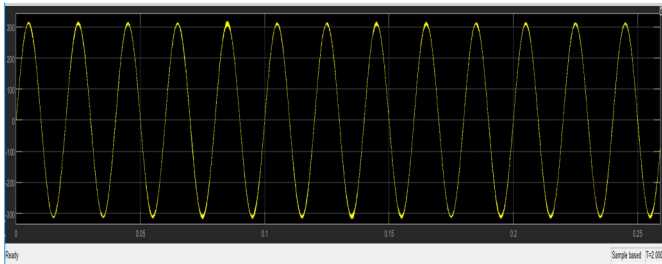
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Mô phỏng hệ thống điện mặt trời nối lưới 1 pha 220VAC, tần số $f = 50\text{Hz}$ hình 15 với chu kỳ lấy mẫu $T_s = 2e-6$ (s), chu kỳ lấy mẫu bộ điều khiển $T_{sc} = 1e-4$ (s). Hệ thống nghiên cứu bao gồm 30 pin mặt trời PV có các thông số như bảng 1.

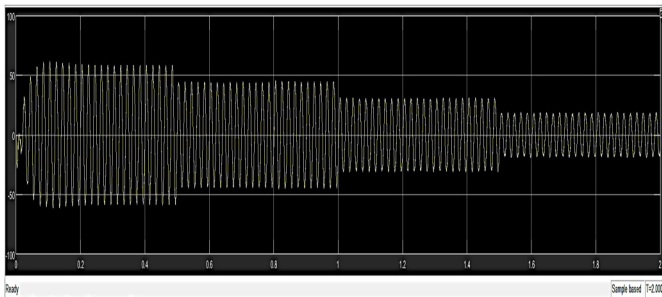
Bảng 1. Các thông số mô phỏng của PV

Thông số tấm pin mặt trời	
PV module	SunPowerSPR-305E-WHT-D
Công suất cực đại mỗi tấm pin	305,226W
Điện áp hở mạch V_{oc}	64,2V
Dòng điện ngắn mạch I_{sc}	5,96A
Điện áp tại điểm công suất cực đại V_{mp}	54,7V
Dòng điện tại điểm công suất cực đại I_{mp}	5,58A
Cấu hình mạng PV	5 chuỗi mắc song song, 6 tấm pin trên 1 chuỗi
Công suất cực đại dàn pin tạo ra	9156.8 W

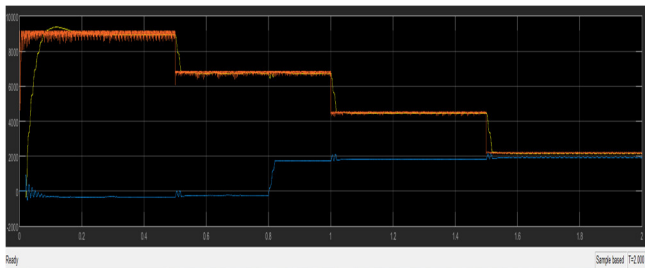
Bộ biến đổi DC-DC là bộ tăng áp, bộ nghịch lưu cầu H sử dụng IGBT. Kết quả mô phỏng điện áp xoay chiều ngõ ra V_g có dạng tín hiệu thu được như hình 15, dòng điện xoay chiều ngõ ra I_g có dạng tín hiệu thu được như hình 16, công suất ngõ ra so với P_{dc} như hình 17.



Hình 15. Dạng sóng điện áp xoay chiều và độ lớn



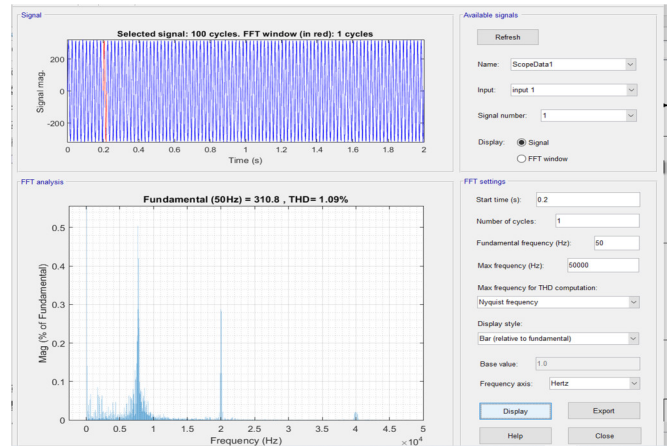
Hình 16. Dạng sóng dòng điện lưới



Hình 17. Sự thay đổi của các công suất

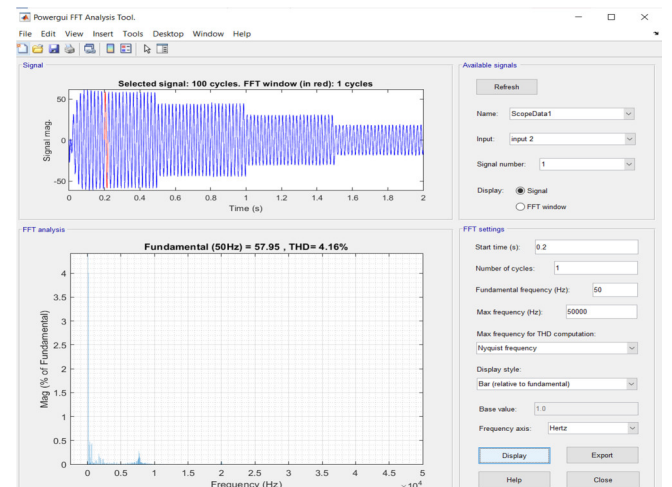
Công suất P bám sát với công suất đặt P_{dc} . Công suất P luôn nhỏ hơn công suất đặt P_{dc} do các tổn hao công suất trên mạch, hiệu suất luôn nhỏ hơn 1. Khi bức xạ thay đổi công suất đặt P_{dc} thay đổi thì công suất P lưới cũng thay đổi. Công suất phản kháng Q lưới bằng 0 và tăng lên ở thời điểm $t = 0,8s$ do Q_{ref} đặt thời gian bắt đầu là 0,8s.

Để đánh giá chất lượng dòng điện, điện áp nối lưới ta sử dụng công cụ FFT ở khối Powergui. Để đo độ méo sóng hài ta cài đặt thời gian bắt đầu là 0,2, tần số $f = 50\text{Hz}$, tần số lớn nhất $f_{max} = 50\text{kHz}$ như hình 18.



Hình 18. Đo độ méo sóng hài trên điện áp nối lưới

Tỉ lệ sóng hài trên điện áp nối lưới đo được là $\text{THD} = 1,09\%$.



Hình 19. Độ méo sóng hài trên dòng điện nối lưới

Độ méo sóng hài trong dòng điện là $\text{THD} = 4,16\%$ như hình 19.

4. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Bài báo cáo về nghiên cứu, tổng hợp bộ điều khiển nghịch lưu nối lưới 1 pha và mô phỏng sử dụng matlab simulink cho hệ lai ghép kiểu DC bus. Trọng tâm của bài là bộ điều khiển nối lưới 1 pha dựa trên giải thuật P&O để tối ưu công suất ngõ ra của hệ thống và kết hợp bộ điều khiển cộng hưởng để đồng bộ với lưới điện. Từ kết quả mô phỏng cho thấy điện áp và dòng điện đầu ra đều đáp ứng yêu cầu về dạng sóng, biên độ và độ méo THD dưới quy định 5%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Dang Dinh Thong, 2008. *Pin mặt trời và ứng dụng*. Science and Technics Publishing House, Hanoi.
- [2]. Nguyen Phung Quang, 2006. *Matlab và Simulink*. Science and Technics Publishing House, Hanoi.
- [3]. Nguyen Van Nho, 2002. *Giao trình Điện tử công suất 1*. Vietnam National University Ho Chi Minh City Press.
- [4]. G Stapleton, S Neill, 2012. *Grid connected solar electric systems*. Taylor & Francis, pp. 42-55.
- [5]. V. Salas, E.O., A. Barrado, A. Lazaro, 2006. *Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-alone Photovoltaic Systems*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1555–1578.
- [6]. Tran Duy Trinh, Tran Trong Minh, 2011. *Designing controllers for current control loop of grid-connected in terms of voltage unbalance*. VCCA.
- [7]. Bui Van Huy, Tran Trong Minh, Nguyen Van Lien, 2015. *New technique of Capacitor voltage balancing for STATCOM system based on the Multilevel cascaded H-bridge Inverter*. Journal of Science & Technology, 107.
- [8]. Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Marco Liserre, Adrian V. Timbus, 2006. *Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 53, No. 5.
- [9]. D. Hohm, M. Ropp, 2003. *Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms*. Prog. Photovoltaics Res. App. Vol.11, 47-62.
- [10]. O. Bingol, A. Altinta, Y. Oner, 2006. *Microcontroller based solar-tracking system and its implementation*. Journal of Engineering Sciences, vol. 12, 243-248.
- [11]. Askan K. *Maximum power point tracker for PV array*. 2006-2007.
- [12]. Mei Shan Ngan, Chee Wei Tan, 2011. *A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand alone Photovoltaic Systems*. 2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC).
- [13]. M. Adouane, M. Haddadi, A. Malek, M. Hadjiat, 2009. *Etude et conception d'un onduleur monophasé autonome géré par microcontrôleur PIC 16F876A*. Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4, 543 –550.

AUTHORS INFORMATION

**Tran Truong An¹, Do Duc Anh¹, Ngo Tri Thuyen¹,
Dang Quoc Du², Bui Van Huy³**

¹Class ĐK&TĐH K14, Hanoi University of Industry

²Faculty of Electrical Engineering, University of Economics - Technology for Industries

³Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry