

THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG HỆ THỐNG ĐIỆN NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI KHÔNG NÓI LƯỚI

DESIGN AND SIMULATION OF STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM

Nguyễn Lê Hòa, Phạm Tiến Đạt, Đỗ Xuân Khải

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng;

nglehoa@dut.udn.vn, datpt0795@gmail.com, dokhai95@gmail.com

Tóm tắt - Trong bài báo này nhóm tác giả đề xuất thiết kế hệ thống điện năng lượng mặt trời không nối lưới. Hệ thống bao gồm tấm pin năng lượng mặt trời, bộ chuyển đổi boost kết hợp với thuật toán tìm điểm công suất cực đại và bộ chuyển đổi buck kết hợp với phương pháp sạc ắc quy. Trong đó, kỹ thuật điện dẫn gia tăng được sử dụng để cho phép hệ thống có thể tìm và bám điểm công suất cực đại khi cường độ bức xạ năng lượng mặt trời thay đổi. Đồng thời, ý tưởng về phương pháp sạc ắc quy bằng cách điều chỉnh dòng điện liên tục và phù hợp nhằm nâng cao tuổi thọ cho ắc quy cũng được đề xuất. Để đánh giá về tính khả thi của hệ thống thiết kế, phần mềm Matlab/Simulink được sử dụng để mô phỏng và đánh giá kết quả.

Từ khóa - hệ năng lượng mặt trời; mô hình tấm PV; tìm điểm công suất cực đại; sạc ắc quy; bộ chuyển đổi DC-DC.

1. Giới thiệu chung

Trong khi các nguồn điện hóa thạch hay thủy điện đang ngày một đổi mới với áp lực về môi trường thì việc phát triển các nguồn điện tái tạo, trong đó có năng lượng mặt trời đang thu hút được nhiều sự đầu tư của các chính phủ, các nhà nghiên cứu trên thế giới. Một hệ thống điện năng lượng mặt trời không nối lưới về cơ bản bao gồm: Hệ thống tấm pin năng lượng mặt trời (PV – photovoltaic) biến đổi trực tiếp ánh sáng mặt trời thành điện năng; Bộ chuyển đổi DC/DC; Hệ thống ắc quy lưu trữ điện năng.

Để nâng cao hiệu suất của việc chuyển đổi điện năng, một hệ thống điện năng lượng mặt trời phải được tích hợp bộ điều khiển bám điểm công suất cực đại (MPPT – Maximum Power Point Tracking). Hiện nay, các phương pháp điều khiển MPPT bao gồm:

- (1) Phương pháp phản hồi điện áp, phương pháp này sử dụng điện áp phản hồi từ tấm PV và so sánh với một điện áp tham chiếu cố định để tạo ra tín hiệu điều chỉnh duty cycle (D) của bộ chuyển đổi DC/DC [1]. Ưu điểm của phương pháp này là đơn giản, tuy nhiên nhược điểm lớn nhất của phương pháp này là không có khả năng bám điểm công suất cực đại (MPP) khi môi trường biến động như thay đổi cường độ bức xạ, nhiệt độ,...

- (2) Phương pháp nhiễu loạn và quan sát (P&O – Perturbation and Observer) hoạt động bằng cách tăng (hoặc giảm) một chu kỳ điện áp (hoặc dòng điện) đầu ra của tấm PV và so sánh công suất đầu ra tương ứng tại thời điểm $n+1$, $P(n+1)$, với công suất trước đó, $P(n)$. Nếu sự tăng (hoặc giảm) điện áp đầu ra dẫn tới làm tăng công suất ($\Delta P > 0$) thì giữ nguyên chiều hướng tăng (hoặc giảm) đó, nếu $\Delta P < 0$ thì thay đổi điện áp theo chiều ngược lại. Quá trình lặp lại cho đến khi đạt đến MPP (tức là $\Delta P = 0$) [2, 3]. Nhược điểm của phương pháp này là tạo ra sự dao động ngay cả khi đã đạt được MPP;

Abstract - In this paper, the authors present a method to design a stand-alone photovoltaic power system. The designed system includes a photovoltaic array system, a DC-DC boost converter with a maximum power point tracking algorithm, and a DC-DC buck converter plus a battery charger. The incremental conductance technique is proposed for tracking the maximum power point generated by the photovoltaic system. Also, the concept of current regulation method is presented for charging battery to increase the battery lifetime. In order to verify the effectiveness of the proposed method, simulations are carried out by using Matlab/Simulink software and then the results are analyzed.

Key words - solar power system; PV array model; maximum power point tracking; battery charger; DC-DC converter.

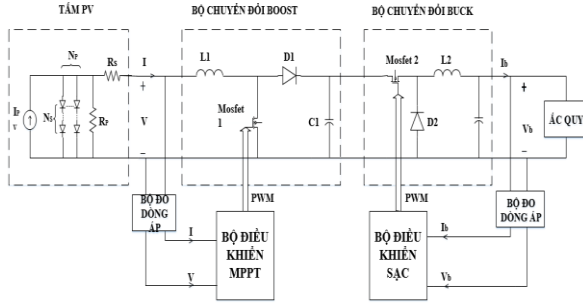
- (3) Phương pháp điện dẫn gia tăng (INC – Incremental Conductance) dò tìm MPP bằng cách dò tìm điểm ứng với $dP/dV = 0$ (tương ứng với $\Delta I/\Delta V = -I/V$) theo thuật toán tương tự như phương pháp P&O [4]. Ưu điểm của phương pháp này so sánh với 2 phương pháp trên là khả năng tìm được MPP ngay cả khi môi trường thay đổi (cường độ bức xạ, nhiệt độ, ...).

Ngoài ra, để giảm giá thành của hệ thống điện năng lượng mặt trời không nối lưới thì các phương pháp nạp/ xả ắc quy đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao trạng thái sạc (SOC – State of Charge), từ đó nâng cao tuổi thọ của ắc quy, giảm chi phí bảo dưỡng. Phương pháp sạc ắc quy phổ biến trong hệ thống PV là nối trực tiếp ngõ ra của tấm PV tới ắc quy, do đó ắc quy được cấp dòng cực đại từ tấm PV cho đến khi điện áp trên ắc quy đạt đến giới hạn trên thiết kế (overcharge limit) thì sẽ được ngắt kết nối khỏi tấm PV [5]. Cũng tương tự như phương pháp trên, nhưng khi điện áp trên ắc quy tăng đến một giá trị điện áp điều chỉnh thì hoặc duy trì điện áp ở giá trị đó [6] hoặc duy trì ở một giá trị điện áp thấp hơn để kết thúc quá trình nạp [7]. Nhược điểm của các phương pháp sạc này là giá trị điện áp trên thiết kế hay giá trị điện áp điều chỉnh không phải luôn tương ứng với điều kiện sạc đầy của ắc quy (100% SOC), do đó ắc quy sẽ vẫn ở trạng thái nạp thả nổi trong thời gian dài. Để khắc phục hạn chế trên, phương pháp nạp với dòng điện được liên tục giảm xuống mỗi khi điện áp ắc quy đạt đến giới hạn trên thiết kế cho đến khi ắc quy được sạc đầy [8].

Bài báo đề xuất một hệ thống điện năng lượng mặt trời không nối lưới, trong đó kết hợp phương pháp bám điểm công suất cực đại sử dụng kỹ thuật điện dẫn gia tăng INC để nâng cao hiệu suất biến đổi năng lượng và phương pháp sạc pin điều chỉnh dòng nạp để nâng cao chất lượng và tuổi thọ của ắc quy. Đồng thời, dẫn ra mô hình toán học cho toàn bộ hệ thống nhằm thuận tiện cho việc mô phỏng và đánh giá kết quả.

2. Hệ thống điện năng lượng mặt trời không nối lưới

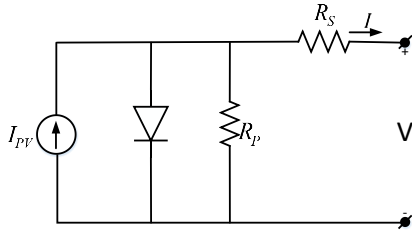
Hệ thống điện năng lượng mặt trời không nối lưới được đề xuất như trong Hình 1. Hệ thống này bao gồm các tấm pin năng lượng mặt trời, bộ chuyển đổi boost kết hợp với thuật toán MPPT, bộ chuyển đổi buck kết hợp với bộ điều khiển sạc và hệ thống ắc quy lưu trữ điện năng.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc của hệ thống điện năng lượng mặt trời đề xuất

2.1. Mô hình tấm PV

Sơ đồ mạch tương đương của tấm PV (gồm nhiều tế bào PV mắc nối tiếp và song song) được mô tả như trong Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ mạch tương đương của tấm PV

Phương trình đặc tính I-V của tấm PV được dẫn ra như sau [9].

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1)$$

Trong đó: I , V lần lượt là dòng điện và điện áp ngõ ra của tấm PV, I_{pv} là dòng điện sinh ra bởi nguồn sáng chiếu vào tấm PV (tỷ lệ với cường độ bức xạ), I_0 là dòng điện bão hòa ngược của đi-ốt, R_s và R_p là điện trở tương đương của N_s và N_p tế bào PV mắc nối tiếp và song song tương ứng, $V_t = N_s (kT/q)$ là điện áp nhiệt của N_s tế bào mắc nối tiếp ($k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K là hằng số Boltzmann, $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C là điện tích electron, T là nhiệt độ Kelvin của tiếp giáp p-n), và a là hằng số lý tưởng của đi-ốt.

Sự phụ thuộc của dòng quang điện I_{pv} vào cường độ bức xạ và nhiệt độ được xác định bởi phương trình sau:

$$I_{pv} = (I_0^n + k_i \Delta_T) \frac{G}{G^n} \quad (2)$$

trong đó, I_0^n là dòng quang điện ở điều kiện tiêu chuẩn (nhiệt độ là 25°C , cường độ bức xạ là 1.000 W/m^2), k_i là hệ số nhiệt độ của dòng ngắn mạch, $\Delta_T = T - T^n$ với T là nhiệt độ của tấm pin, T^n là nhiệt độ tiêu chuẩn theo đơn vị Kelvin (nghĩa là $T^n = 25 + 273 = 298\text{K}$), G là cường độ

bức xạ và $G^n = 1.000\text{W/m}^2$ là cường độ bức xạ tiêu chuẩn.

Dòng điện bão hòa ngược của đi-ốt I_0 phụ thuộc vào nhiệt độ theo biểu thức sau:

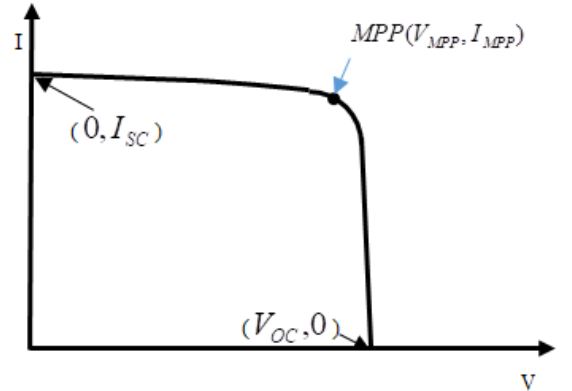
$$I_0 = I_0^n \left(\frac{T}{T^n} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T^n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

trong đó, E_g là năng lượng vùng cấm (bandgap energy) của chất bán dẫn, I_0^n là dòng điện bão hòa tiêu chuẩn của đi-ốt, được cho bởi công thức sau [9].

$$I_0^n = \frac{I_{sc}^n}{\exp\left(\frac{V_{oc}^n}{aV_t}\right) - 1}, \quad (4)$$

với I_{sc}^n và V_{oc}^n lần lượt là dòng điện ngắn mạch và điện áp hở mạch của tấm PV ở điều kiện tiêu chuẩn.

Từ (1) ta có thể xây dựng đường đặc tính I-V của tấm PV như trong Hình 3. Trong đó, có 3 điểm quan trọng trên đường đặc tính thể hiện tham số của tấm PV là: điểm ngắn mạch ($0, I_{sc}$), điểm hở mạch ($V_{oc}, 0$) và điểm công suất cực đại (V_{MPP}, I_{MPP}).



Hình 3. Đường đặc tính I-V của tấm PV

2.2. Thiết kế hệ thống MPPT

Để nâng cao hiệu suất của việc chuyển đổi năng lượng trong hệ thống điện năng lượng mặt trời thì hệ thống MPPT được thiết kế với mục đích bám MPP sinh ra bởi tấm PV ngay cả khi có sự thay đổi về môi trường (cường độ bức xạ, nhiệt độ) cũng như sự biến động của tải. Trong bài báo này, hệ thống MPPT đề xuất gồm bộ chuyển đổi DC-DC (bộ boost) kết hợp với giải thuật điều khiển MPPT được mô tả như trong Hình 1. Để có thể tìm và bám điểm công suất cực đại khi cường độ bức xạ năng lượng mặt trời thay đổi, phương pháp INC được sử dụng [4].

Với phương pháp INC, thì MPP được xác định như sau (Hình 5):

$$\begin{cases} dP/dV = 0, & \text{tại MPP} \\ dP/dV < 0, & \text{bên phải MPP} \\ dP/dV > 0, & \text{bên trái MPP} \end{cases} \quad (5)$$

Mặt khác, ta lại có:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (6)$$

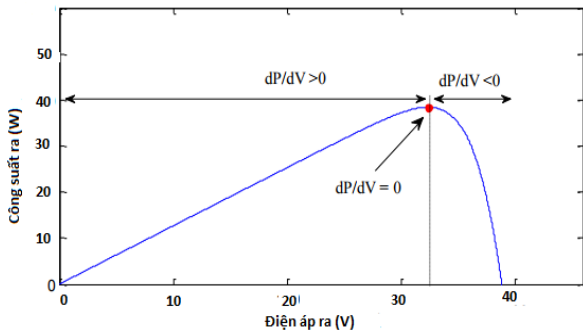
Nên từ điều kiện trong phương trình (5), ta suy ra

$$\begin{cases} \Delta I/\Delta V = -I/V, & \text{tại MPP} \\ \Delta I/\Delta V < -I/V, & \text{bên phải MPP} \\ \Delta I/\Delta V > -I/V, & \text{bên trái MPP} \end{cases} \quad (7)$$

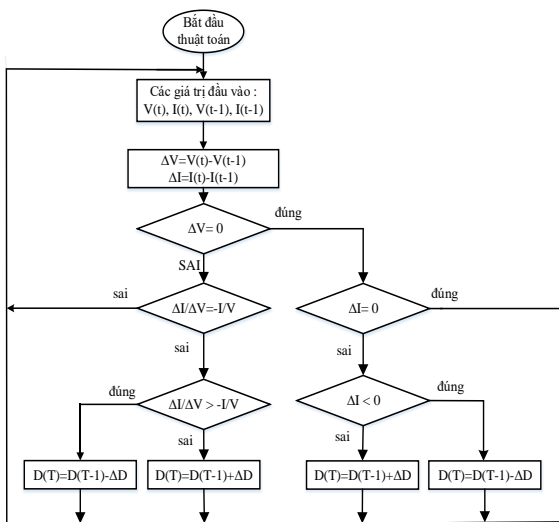
Lưu đồ thuật toán của phương pháp INC để tìm MPP được mô tả như trong Hình 5. Từ lưu đồ thuật toán, ta thấy MPP sẽ đạt được khi điện dẫn tức thời của tấm PV (I/V) bằng với điện dẫn gia tăng ($\Delta I/\Delta V$). Khi đã đạt được MPP thì hệ thống sẽ tiếp tục làm việc ở MPP cho đến khi phát hiện sự thay đổi của ΔI , tức là sự thay đổi của cường độ bức xạ (hay nhiệt độ). Khi đó, thuật toán sẽ tăng hoặc giảm điện áp theo quy luật (7) để nhanh chóng bám MPP mới. Việc thay đổi điện áp và dòng điện ra bộ boost (I_0, V_0) được thực hiện bằng cách điều chỉnh duty cycle D của xung kích mở MOSFET, theo quan hệ sau:

$$V_0 = \frac{V}{1-D}; \quad I_0 = I(1-D) \quad (8)$$

trong đó, V, I lần lượt là điện áp và dòng điện ra của tấm PV.



Hình 4. Đường đặc tính P-V và điểm công suất cực đại



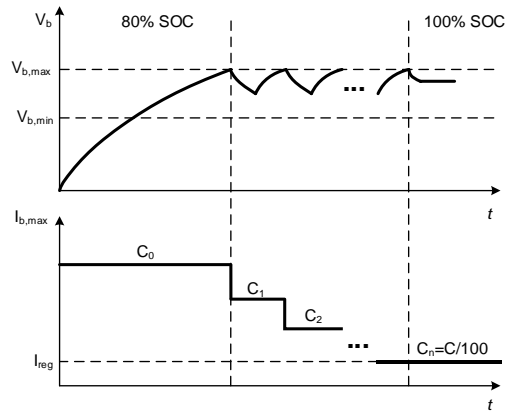
Hình 5. Lưu đồ thuật toán tìm MPP của phương pháp INC

2.3. Thiết kế bộ điều khiển sạc ắc-quy

Như đã đề cập ở Phần 1, kỹ thuật sạc ắc quy đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao tuổi thọ, giảm thời gian sạc cho ắc quy. Đặc biệt, với hệ thống điện năng lượng mặt trời, việc vận chuyển tối đa năng lượng sinh ra bởi tấm PV (phụ thuộc vào cường độ bức xạ, nhiệt độ môi trường) tới ắc quy đồng thời đảm bảo ắc quy đạt 100% SOC trong thời gian ngắn là vấn đề cốt yếu của hệ thống điện năng lượng mặt trời không nổi lưới.

Trong bài báo này, kỹ thuật sạc ắc quy với dòng, áp liên

tục được điều chỉnh sẽ được áp dụng [8]. Ý tưởng của phương pháp điều khiển quá trình sạc này được mô tả như trong Hình 6. Quá trình nạp bắt đầu với dòng điện cực đại cho phép I_0 , thường I_0 được lựa chọn bằng $C/5$, trong đó C (Ah) là dung lượng của ắc quy, để bảo vệ ắc quy khỏi sự quá nhiệt. Khi đó, điện áp đo được trên ắc quy (V_b) sẽ tăng lên cho đến khi đạt đến ngưỡng giới hạn trên cho phép (overcharge limit) $V_{b,max}$, tại đó ắc quy sẽ đạt được khoảng 80% SOC. Dòng sạc cực đại sẽ được giảm xuống bằng I_1 , dẫn đến điện áp trên ắc quy giảm xuống rồi tăng lên, đạt giá trị ngưỡng $V_{b,max}$, khi đó tiếp tục giảm dòng sạc cực đại cho phép xuống I_2 . Quá trình được lặp lại cho đến khi dòng sạc cực đại cho phép bằng $I_n = C/100$ và khi điện áp ắc quy tăng đến ngưỡng giới hạn trên thì ắc quy sẽ đạt 100% SOC, nghĩa là ắc quy được nạp đầy. Dòng sạc sẽ được duy trì bằng $C/100$ để bù lại phân năng lượng tiêu thụ bởi mạch điều khiển (bộ chuyển đổi DC-DC, vi điều khiển) và quá trình tự xả của ắc quy. Như vậy, trong Hình 6, đồ thị dòng điện biểu diễn sự điều chỉnh dòng sạc cực đại cho phép. Tuy nhiên, giá trị dòng sạc thực tế có thể nhỏ hơn giá trị này vì phụ thuộc vào công suất sinh ra bởi tấm PV.



Hình 6. Ý tưởng phương pháp điều chỉnh quá trình sạc ắc quy

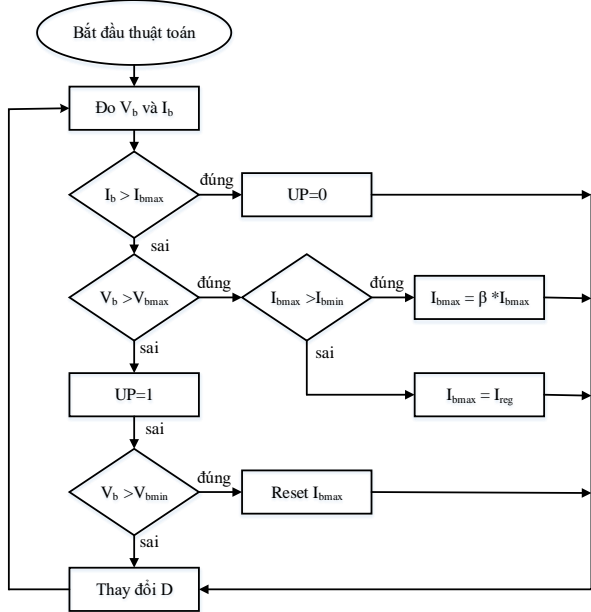
Sơ đồ cấu trúc của hệ thống sạc ắc quy được mô tả như trong Hình 1. Trong đó, bộ điều khiển sạc sẽ sử dụng giá trị dòng điện và điện áp trên ắc quy để tính toán duty cycle (D) kích mở MOFET của bộ buck, từ đó hiệu chỉnh được dòng và áp sạc cho ắc quy.

Trên cơ sở ý tưởng của phương pháp sạc được trình bày ở Hình 6, lưu đồ thuật toán của bộ điều khiển sạc được mô tả chi tiết như trong Hình 7. Thuật toán được tóm tắt như sau:

- Nếu dòng sạc lớn hơn dòng cực đại cho phép ($I_b > I_{b,max}$), nghĩa là tấm PV cung cấp công suất lớn hơn yêu cầu, do đó phải điều chỉnh duty cycle của bộ buck để giảm dòng sạc xuống (Mode 1).

- Ngược lại, nếu dòng sạc nhỏ hơn dòng cực đại cho phép ($I_b < I_{b,max}$) và điện áp ắc quy V_b đạt đến ngưỡng giới hạn trên $V_{b,max}$, thì phải giảm dòng sạc cực đại xuống β lần. Quá trình này được lặp lại cho đến khi dòng sạc cực đại đạt đến $C/100$, tương ứng với ắc quy đạt 100% SOC và dòng sạc được duy trì bởi $I_{reg} = C/100$.

- Nếu điện áp sạc nhỏ hơn điện áp ngưỡng giới hạn trên cho phép ($V_b < V_{b,max}$) và dòng sạc $I_b < I_{b,max}$, nghĩa là cần tối ưu hóa năng lượng vận chuyển từ tấm PV tới ắc quy, khi đó quá trình tìm MPP phải được thực hiện.



Hình 7. Lưu đồ thuật toán quá trình sạc ắc quy

3. Kết quả mô phỏng

3.1. Mô phỏng hệ thống MPPT

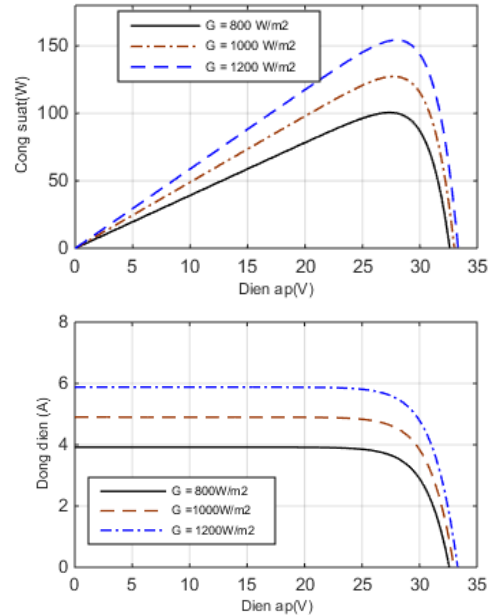
Để đánh giá hiệu quả của hệ thống MPPT và bộ điều khiển sạc ắc quy đề xuất, mô hình của hệ thống điện năng lượng mặt trời không nối lưới (Hình 1) và các thuật toán điều khiển tìm MPP (Hình 5) và điều khiển sạc (Hình 7) sẽ được thực hiện trên phần mềm Matlab/Simulink. Thông số của tấm PV và của ắc quy sử dụng trong bài báo được liệt kê như trong Bảng 1.

Bảng 1. Tham số mô phỏng của hệ thống

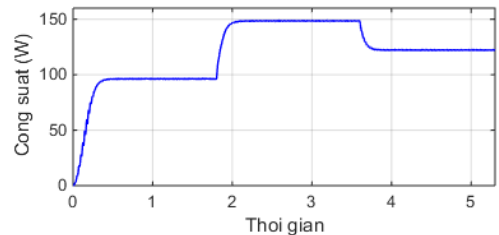
Thiết bị	Tham số	Giá trị
Tấm PV	I_{SC}	4,9A
	V_{OC}	33V
	I_{MPP}	4,4A
	V_{MPP}	26V
	N_s	54
	N_p	1
	k_i	0,003A/°C
	E_g	1,12V
	R_s	0,001Ω
	R_p	900Ω
Ắc quy	V_{bmax}	13,6V
	V_{bmin}	12V
	I_{bmax}	8A
	I_{bmin}	1A

Đặc tính P-V và I-V của tấm PV ở các cường độ bức xạ khác nhau ($G = 800 \text{ W/m}^2$; 1.000 W/m^2 ; 1.200 W/m^2) được thể hiện như trong Hình 8, trong đó nhiệt độ môi trường được giả thiết là không đổi và bằng 25°C . Từ đặc tính P-V ta thấy rằng khi thay đổi cường độ bức xạ thì công suất ngõ ra của tấm PV cũng thay đổi với điểm công suất cực đại được thể hiện rõ như trong Hình 8. Hình 9 thể hiện công suất ngõ ra của bộ biến đổi boost với thuật toán tìm MPP bằng phương pháp INC đề xuất khi thay đổi cường độ bức xạ từ 800 W/m^2 lên 1.200 W/m^2 và sau đó giảm xuống

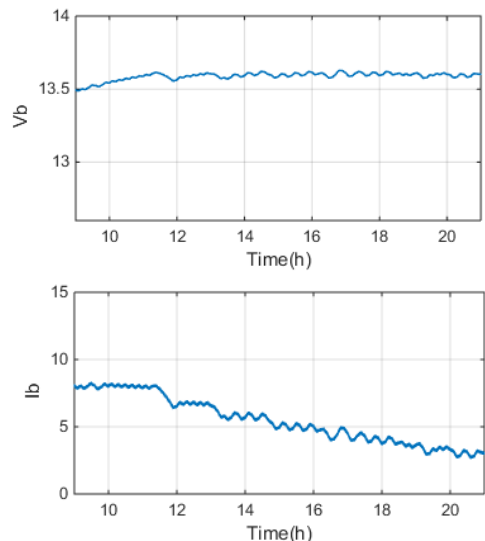
thành 1.000 W/m^2 . Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán INC có khả năng tìm và bám điểm công suất cực đại trong khoảng thời gian ngắn. Ngoài ra, có thể thấy từ Hình 9, mỗi khi đạt được điểm công suất cực đại, thì hệ thống sẽ làm việc tại điểm công suất cực đại mà không có sự dao động giống như đối với phương pháp P&O.



Hình 8. Đặc tính P-V và đặc tính I-V của tấm PV ở các cường độ bức xạ khác nhau



Hình 9. Công suất ngõ ra của bộ biến đổi boost với thuật toán INC tương ứng với sự thay đổi của cường độ bức xạ



Hình 10. Điện áp và dòng điện của ắc quy trong quá trình sạc với SOC >80%

Hình 10 thể hiện sự thay đổi của dòng sạc và điện áp sạc ắc quy trong quá trình sạc với SOC > 80%. Từ kết quả mô phỏng ta thấy, trong quá trình sạc khi SOC > 80% thì dòng sạc cực đại liên tục được điều chỉnh giảm xuống mỗi khi điện áp sạc đạt đến ngưỡng giới hạn trên là 13,6 V.

4. Kết luận

Bài báo đề xuất hệ thống năng lượng mặt trời không nối lưới, trong đó phương pháp tìm điểm công suất cực đại bằng kỹ thuật điện dẫn gia tăng cùng với phương pháp sạc ắc quy với dòng sạc liên tục được điều chỉnh, được đề xuất nhằm nâng cao tuổi thọ của ắc quy. Kết quả mô phỏng bằng Matlab/Simulink cho thấy hiệu quả của các phương pháp được đề xuất.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số: T2017-02-97.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Kadri, J.P. Gaubert, and G. Champenois, "An improved maximum power point tracking for photovoltaic grid-connected inverter based on photovoltaic grid-connected inverter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 1, 2011, pp. 66-75.
- [2] E.Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N.C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 16, No. 1, 2001, pp. 46-54.
- [3] Q. Mei, M. Shan, L. Liu, and J.M. Guerrero, "A novel improved variable step-size incremental-resistance MPPT method for PV systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 6, 2011, pp. 2427-2434.
- [4] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmospheric conditions", *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 142, No. 1, 1995, pp. 59-64.
- [5] T. Yamazaki and K. I. Muramoto, "An advanced solar charging and battery discharge controller unit", *Renewable Energy*, Vol. 15, No. 1-4, 1998, pp. 606-609.
- [6] S. Harrington and J. Dunlop, "Battery charger controller characteristics in photovoltaic system", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 7, No. 8, 1992, pp. 15-21.
- [7] J.N. Ross, T. Markvart, and W. He, "Modelling battery charge regulation for a stand-alone photovoltaic system", *Solar Energy*, Vol. 69, No. 3, 2000, pp. 181-190.
- [8] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications", *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, Vol. 151, No. 2, 2004, pp. 191-197.
- [9] M.G. Villalva, J.R. Gazoli, and E.R. Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 5, 2009, pp. 1198-1208.

(BBT nhận bài: 06/12/2017, hoàn tất thủ tục phản biện: 02/01/2018)