

Điều khiển bộ biến đổi bốn khóa bán dẫn giả lập đặc tính pin mặt trời sử dụng phương pháp tuyến tính hóa chính xác

Control of four-switch buck-boost converter based solar PV emulator using feedback linearization

Trần Vũ Trung, Vũ Hoàng Phương, Trần Trọng Minh

Trường ĐHBK Hà Nội

e-Mail: phuong.vuhoang@hust.edu.vn

Tóm tắt

Hiện nay, điều khiển hệ thống pin mặt trời đang nhận được sự quan tâm của nhiều nhóm nghiên cứu. Tuy nhiên, việc kiểm nghiệm một hệ thống pin mặt trời hiện đại, có công suất lớn trong phòng thí nghiệm gặp nhiều khó khăn vì cần không gian rộng, chi phí giá thành cao, cũng như khả năng tạo ra được điều kiện thời tiết đa dạng sát với thực tế là rất hạn chế. Do đó, việc xây dựng thiết bị giả lập các đặc tính I-V giống như của hệ thống pin mặt trời là rất cần thiết. Bài báo này trình bày một giải pháp điều khiển bộ biến đổi DC/DC có bốn khóa bán dẫn để giả lập pin mặt trời. Cấu trúc điều khiển được thiết kế theo phương pháp tuyến tính hóa chính xác phù hợp với đặc điểm phi tuyến của mô hình bộ biến đổi. Các kết quả mô phỏng chỉ ra hiệu quả của phương pháp điều khiển được đề xuất trong việc giả lập đặc tính pin mặt trời tương ứng với các điều kiện làm việc khác nhau.

Từ khóa: Giả lập đặc tính pin mặt trời, điều khiển bộ biến đổi bốn khóa bán dẫn, tuyến tính hóa chính xác.

Abstract

At the present, controlling of solar photovoltaic (PV) cell systems is getting attentions of many researchers. However, it is difficult to validate a high-power modern PV system in laboratory due to high cost and space requirement as well as poor ability to achieve various out-door weather conditions. Therefore, it is necessary to construct an emulator which is able to create voltage-current characteristics similar to PV modules. This paper presents a solution to control four-switch buck-boost converter (FSBB) based PV emulator. The control structure is designed using feedback linearization law which is appropriate to the nonlinearity of converter model. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: PV emulator, Four-switch buck-boost converter, Feedback linearization

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
s_1, s_2, s_3, s_4		Trạng thái logic van bán dẫn
d_1, d_2		Hệ số điều chế van Q_1, Q_3
$L_f g$		Đạo hàm Lie của hàm g dọc theo quỹ đạo f
E	V	Điện áp nguồn cấp
L	H	Điện cảm của cuộn dây

C	F	Điện dung của tụ
R	Ω	Điện trở tải
i_L	A	Dòng chảy qua cuộn dây
v_o	V	Điện áp đầu ra trên tụ
i_o	A	Dòng đầu ra
k_1, k_2		Hệ số khuếch đại của các khâu phản hồi trạng thái
T_s	s	Thời gian trích mẫu
f_{pwm}	Hz	Tần số điều chế van
X^*, \bar{X}		Giá trị đặt, giá trị cần của X

Chữ viết tắt

FSBB	Four-Switch Buck-Boost Converter
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PV	Photovoltaic
PWM	Pulse width modulation

1. Phần mở đầu

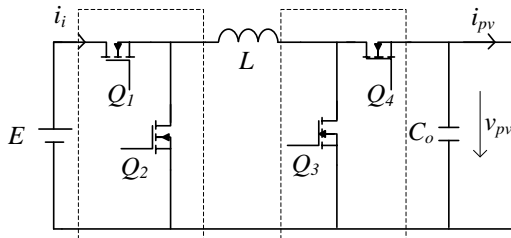
Một hệ thống phát điện sử dụng năng lượng mặt trời cơ bản gồm các tấm pin quang điện, bộ bám điểm công suất lớn nhất (MPPT), phần tử lưu trữ năng lượng và các bộ biến đổi công suất [1]. Việc kiểm tra hoạt động của thiết bị pin quang điện gặp nhiều khó khăn do công suất đầu ra phụ thuộc trực tiếp vào cường độ bức xạ và nhiệt độ của mặt trời, trong khi khó có thể tạo ra môi trường thời tiết đa dạng sát với thực tế. Nếu tạo ra được một thiết bị giả lập đặc tính I-V của pin quang điện, việc thiết kế và kiểm nghiệm đặc tính kỹ thuật của các bộ biến đổi (DC/DC hoặc DC/AC) hay thuật toán MPPT có thể được tiến hành một cách độc lập trong phòng thí nghiệm mà không cần phải sử dụng thiết bị quang điện trong môi trường thực tế. Điều này sẽ giúp tiết kiệm đáng kể chi phí nghiên cứu hệ thống pin mặt trời.

Với sự phát triển của các kỹ thuật điều khiển điện tử công suất hiện nay, việc giả lập đặc tính I-V của thiết bị PV là hoàn toàn khả thi. Vấn đề chính đặt ra là lựa chọn cấu trúc bộ biến đổi có hiệu suất cao nhất và phương pháp điều khiển đảm bảo áp đặt điện áp nhanh, chính xác [2, 3]. Hiện nay, bộ biến đổi FSBB với 4 khóa bán dẫn được điều khiển hoàn toàn nên có thể cấu hình nhiều trạng thái PWM để tăng hiệu suất, điện áp ra thay đổi được trong dải rộng và cùng đầu điện áp vào. Vì vậy, đây là cấu trúc mạch lực hợp lý để làm nhiệm vụ giả lập đặc tính I-V pin mặt trời.

Trong bài báo này, các tác giả sử dụng phương pháp tuyến tính hóa chính xác để thiết kế cấu trúc điều khiển phi tuyến cho bộ biến đổi FSBB làm nhiệm vụ giải lập đặc tính I-V của pin mặt trời. Đây là phương pháp tỏ ra phù hợp với đặc điểm phi tuyến của bộ biến đổi FSBB và là cách tiếp cận thiết kế khác so với phương pháp tuyến tính truyền thống [4, 5, 6, 7].

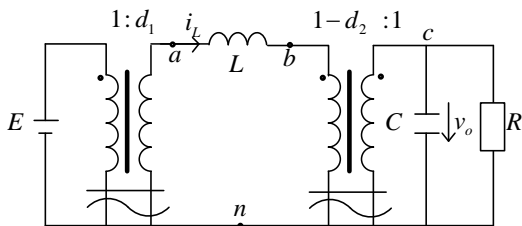
2. Mô hình hóa bộ biến đổi FSBB

Sơ đồ bộ biến đổi FSBB được chỉ ra trong H. 1,

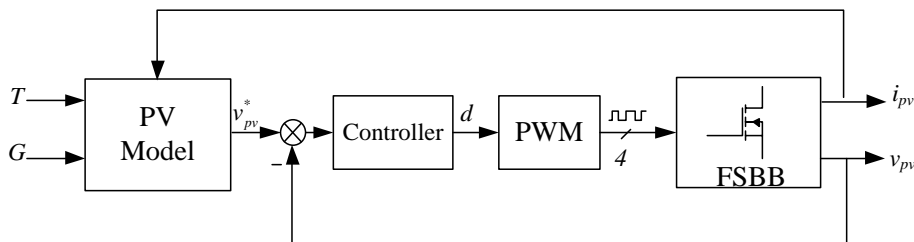


H. 1 Sơ đồ mạch lực bộ biến đổi FSBB.

Coi mỗi nhóm phân tử bán dẫn (Q_1, Q_2) và (Q_3, Q_4) như mạng điện 2 cửa và trạng thái logic $s_2 = \bar{s}_1, s_4 = \bar{s}_3$. Các van bán dẫn này được điều khiển theo phương pháp điều chế độ rộng xung PWM, trong đó d_1, d_2 lần lượt là hệ số điều chế cho cặp nhánh van (Q_1, Q_2) và (Q_3, Q_4).



H. 2 Mạch điện tương đương của bộ biến đổi FSBB với các tín hiệu trung bình.



H. 3 Cấu trúc điều khiển FSBB giải lập đặc tính pin mặt trời.

3.1. Mô hình trạng thái của bộ biến đổi

Đặt biến trạng thái $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T = [i_L \ v_o]^T$ và biến điều khiển $u = 1 - d$, (1) được viết lại:

$$\begin{cases} L \frac{dx_1}{dt} = -x_2 + E u + E \\ C \frac{dx_2}{dt} = u x_1 - \frac{x_2}{R} \end{cases} \quad (3)$$

Hệ (3) là một hệ affine:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f} \mathbf{x} + \mathbf{h} \mathbf{x} u \quad (4)$$

có các hàm $\mathbf{f} \mathbf{x}$, $\mathbf{h} \mathbf{x}$ được xác định như sau:

Để giảm tổn thất cho bộ biến đổi, người ta dùng phương pháp điều khiển đồng bộ [6], nghĩa là các hệ số điều chế $d_1 = d_2 = d$.

Từ mạch điện H. 2 viết được phương trình điện áp trên cuộn cảm lọc L và nút dòng điện tại điểm c:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = v_{an} - v_{bn} = dE - (1-d)v_o \\ C \frac{dv_o}{dt} = (1-d)i_L - i_o \end{cases} \quad (1)$$

3. Cấu trúc điều khiển FSBB giải lập đặc tính pin mặt trời

Nhiệm vụ đặt ra là tạo được điểm làm việc xác lập $i_o - v_o$ ở đầu ra bộ biến đổi FSBB nằm trên đường đặc tính I-V cho trước của một thiết bị PV thực tế. Ngoài ra, dòng i_o còn phụ thuộc vào điện áp v_o theo tính chất của tải, nói cách khác, điểm làm việc xác lập của bộ biến đổi là giao điểm của đường đặc tính I-V thiết bị PV cần giải lập với đường đặc tính của tải. Trong nghiên cứu bước đầu, đặc tính tải được đơn giản hóa bằng một đường tuyến tính, tải mang tính chất của một điện trở thuần R:

$$i_o = \frac{v_o}{R} \quad (2)$$

Cấu trúc điều khiển FSBB giải lập đặc tính pin mặt trời được chỉ ra trong H. 3. Mạch vòng điều khiển điện áp đầu ra FSBB được thiết lập với lượng đặt v_{pv}^* xác định từ cơ sở dữ liệu là họ đường đặc tính thực nghiệm của thiết bị PV ứng với các thông số đầu vào nhiệt độ $T (^{\circ}C)$ và cường độ bức xạ $G (W/m^2)$, kết hợp với phép đo phản hồi dòng điện.

$$\mathbf{f} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ -\frac{x_2}{RC} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{h} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} -\frac{x_2 + E}{L} \\ \frac{x_1}{C} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2. Cấu trúc điều khiển FSBB theo phương pháp tuyến tính hóa chính xác

Để áp dụng được phương pháp tuyến tính hóa chính xác cho đối tượng (3), hàm đầu ra $y = g \mathbf{x}$ cần có bậc tương đối bằng 2. Dựa vào phương trình $L_n g \mathbf{x} = 0$, hàm đầu ra mở rộng được chọn là:

$$y = g \mathbf{x} = \frac{1}{2} [Lx_1^2 + C x_2 + E^2] \quad (6)$$

Kiểm tra điều kiện bậc tương đối của mô hình thỏa mãn điều kiện tuyến tính hóa chính xác bằng cách xét đạo hàm Lie.

$$L_h g \mathbf{x} = \frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{h} \mathbf{x} = [Lx_1 \quad C x_2 + E] \begin{bmatrix} -x_2 + E \\ L \\ x_1 \\ C \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

$$L_{\tau} g \mathbf{x} = \frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f} \mathbf{x} = [Lx_1 \quad C x_2 + E] \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ -x_2 \\ RC \end{bmatrix} = Ex_1 - \frac{x_2 x_2 + E}{R} \quad (8)$$

$$L_h L_{\tau} g \mathbf{x} = \frac{\partial L_{\tau} g}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{h} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} E & -2x_2 + E \\ & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_2 + E \\ L \\ x_1 \\ C \end{bmatrix} = -\frac{E}{L} x_2 + E - \frac{2x_2 + E}{RC} x_1 \quad (9)$$

Do $L_h L_{\tau} g \mathbf{x} \neq 0$ nên hệ (3)&(7) có bậc tương đối bằng 2 trong toàn bộ không gian trạng thái. Do đó, tồn tại khâu chuyển hệ tọa độ trạng thái (10) làm cho đối tượng được mô tả theo (3)&(7) trở thành tuyến tính trên toàn bộ không gian trạng thái [8].

$$u = p \mathbf{x} + q \omega \quad (10)$$

Trong đó:

$$p \mathbf{x} = -\frac{L_{\tau} g \mathbf{x}}{L_h L_{\tau} g \mathbf{x}}; \quad q \mathbf{x} = \frac{1}{L_h L_{\tau} g \mathbf{x}} \quad (11)$$

$$L_{\tau}^2 g \mathbf{x} = \frac{\partial L_{\tau} g}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} E & -2x_2 + E \\ & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ -x_2 \\ RC \end{bmatrix} = \frac{E^2}{L} + \frac{2x_2 + E}{R^2 C} x_2$$

Theo [8], với khâu chuyển hệ tọa độ (10), hệ (3)&(7) trở thành tuyến tính trên toàn không gian trạng thái mới được mô tả như sau:

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = \mathbf{A}z + \mathbf{B}\omega = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \\ y = z_1 \end{cases} \quad (13)$$

Trong đó, mối quan hệ giữa trạng thái mới \mathbf{z} và trạng thái cũ \mathbf{x} là:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \mathbf{x} \\ L_{\tau} g \mathbf{x} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Phương trình (13) chỉ ra mối quan hệ giữa đầu ra y và đầu vào mới ω như dưới đây:

$$\ddot{y} = \omega \quad (15)$$

Đối tượng được mô tả bởi (15) không ổn định, cần thiết kế thêm bộ điều chỉnh tuyến tính để đầu ra y của hệ (13) bám theo lượng đặt cho trước ($y \rightarrow \bar{y}$, $z_2 = \dot{y} \rightarrow 0$). Luật điều khiển phản hồi trạng thái được xây dựng để đảm bảo đầu ra y và lượng đặt \bar{y} có quan hệ theo khâu dao động bậc hai.

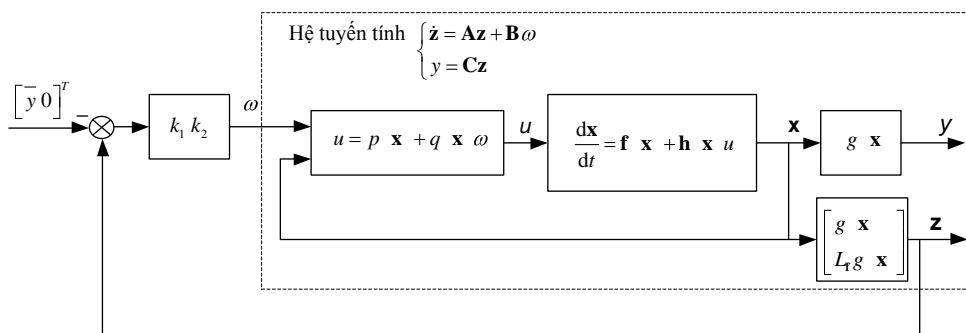
$$\frac{y}{\bar{y}} \frac{p}{p} = \frac{\omega_n^2}{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2} \quad (16)$$

Từ (15) và (16), đầu vào ω được xác định:

$$\omega = -2\xi\omega_n \dot{y} - \omega_n^2 y - \bar{y} = -k_2 z_2 - k_1 y - \bar{y} \quad (17)$$

Trong đó: ω_n - tần số dao động riêng, ξ - hệ số tắt dần của khâu dao động bậc hai.

Cấu trúc chi tiết mạch vòng điều khiển thiết kế theo phương pháp tuyến tính hóa chính xác được chỉ ra trong H. 4.



H. 4 Cấu trúc điều khiển FSBB theo phương pháp tuyến tính hóa chính xác.

Từ các mục tiêu điều khiển đạt được với bộ điều khiển tuyến tính hóa chính xác là $y \rightarrow \bar{y}$, $z_2 \rightarrow 0$, lượng đặt cho đầu ra \bar{y} được xác định từ điện áp mong muốn $\bar{x}_2 = v_{pv}^*$:

$$\bar{y} = r v_{pv}^* = \frac{1}{2} v_{pv}^* + E^2 \left[L \left(\frac{v_{pv}^*}{E \cdot R} \right)^2 + C \right] \quad (18)$$

Nếu $z_2 \rightarrow 0$, $y \rightarrow \bar{y}$ thì $y = r x_2 \rightarrow \bar{y} = r v_{pv}^*$.

Để thấy hàm r_v đồng biến khi $v > 0$, nên cũng có

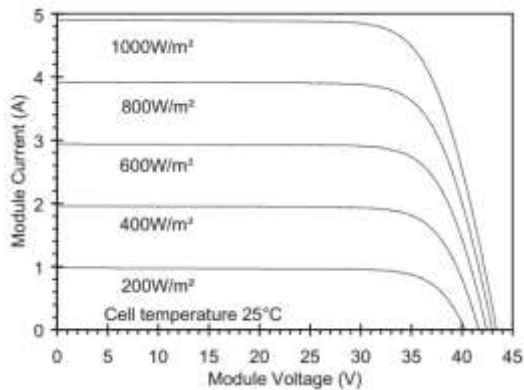
$x_2 \rightarrow v_{pv}^*$, đồng thời $x_1 \rightarrow \frac{v_{pv}^* v_{pv}^* + E}{E \cdot R}$. Vậy luật điều khiển (10) đảm bảo hệ (3) ổn định (biến trạng thái xác lập tại điểm làm việc mong muốn).

4. Kết quả mô phỏng

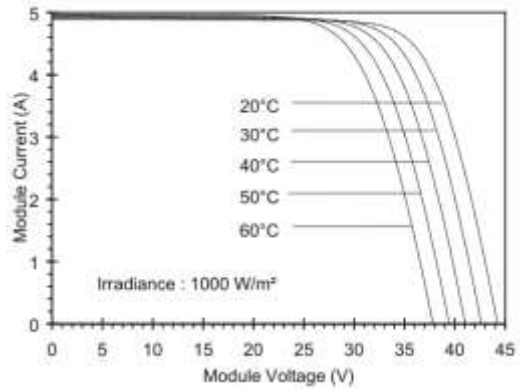
Trong thiết kế này, các thông số của mô hình và bộ điều khiển được lựa chọn như sau:

$$\begin{aligned} E &= 24V; & L &= 0.7mH; & C &= 560\mu F; \\ T_s &= 200\mu s; & f_{pwm} &= 20kHz; \\ \xi &= 0.7; & k_1 &= 10^6; & k_2 &= 1400. \end{aligned}$$

Đường đặc tính mẫu được tạo ra dựa trên thông số của một thiết bị PV cụ thể, ở đây chọn SQ160.



(a)

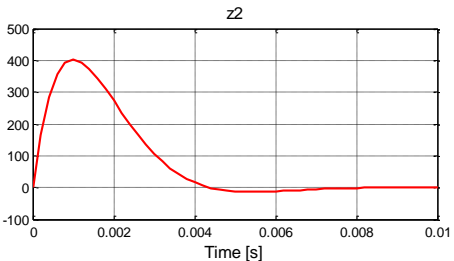
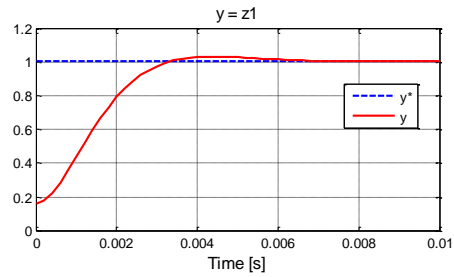


(b)

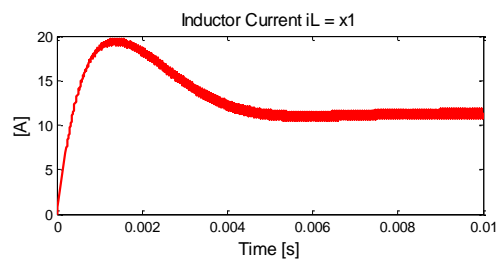
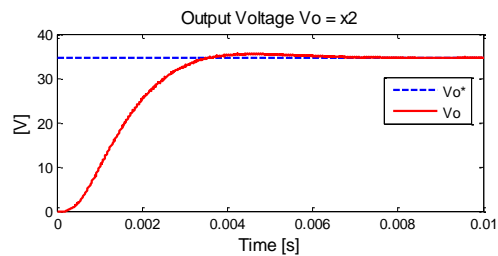
H. 5 Họ đường đặc tính I-V của pin quang điện SQ160 được cung cấp bởi nhà sản xuất [9]:
(a) Theo cường độ bức xạ (G)
(b) Theo nhiệt độ (T)

Xây dựng đường đặc tính tại điều kiện kiểm tra tiêu chuẩn ($G = 1000 \text{ W/m}^2$; $T = 25^\circ\text{C}$):

Với điện trở tải $R = 7.5\Omega$, điểm điện áp làm việc cần tạo ra là $v_{pv}^* = 34.66\text{V}$. Kết quả mô phỏng thể hiện trên H. 6 cho thấy giá trị của hàm đầu ra mở rộng y được dẫn dắt theo quỹ đạo đường quán tính bậc hai (16) như tính toán, với quá điều chỉnh nhỏ và thời gian xác lập nhanh, nhờ đó mà các biến trạng thái của đối tượng (3) là dòng điện qua cuộn cảm $x_1 = i_L$ và điện áp đầu ra trên tụ $x_2 = v_o$ đều được điều khiển ổn định tại các giá trị xác lập mong muốn.

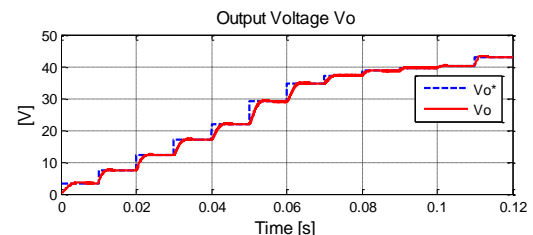
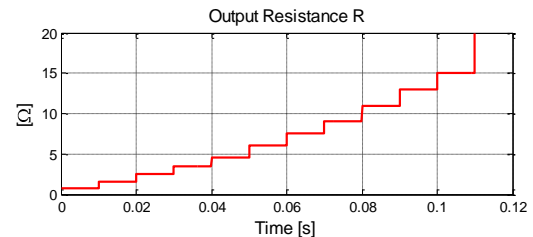


H. 6 Biến trạng thái của hệ tuyến tính (13)

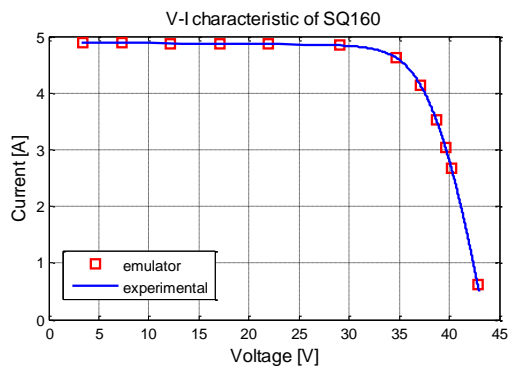


H. 7 Biến trạng thái của đối tượng gốc (3)

Thay đổi R nhận thêm 11 giá trị khác, ta đều thu được các đáp ứng điện áp đầu ra nhanh, chính xác (H. 8). Các điểm làm việc đều nằm trên đường đặc tính thực nghiệm của pin quang điện SQ160 (H. 9).



H. 8 Đáp ứng điện áp và dòng điện khi thay đổi R



H. 9 Kết quả mô phỏng thiết bị giả lập đặc tính I-V của pin SQ160 tại điều kiện tiêu chuẩn ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$) bằng bộ biến đổi FSBB

5. Kết luận

Giả lập đặc tính pin quang điện bằng các bộ biến đổi công suất là giải pháp khả thi và cần thiết giúp tiết kiệm chi phí nghiên cứu các hệ năng lượng mặt trời. Thuật toán điều khiển tuyến tính hóa chính xác cho bộ biến đổi bốn van bán dẫn giả lập đặc tính pin mặt trời được đề xuất và kiểm nghiệm bằng mô phỏng số. Những kết quả đạt được cho thấy hiệu quả của phương pháp, tạo cơ sở bước đầu cho công việc triển khai thực nghiệm.

Bài báo này nằm trong đề tài nghiên cứu cấp trường T2015-056 tại Viện Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Tài liệu tham khảo

- [1] Bhardwaj M., Subharmanya B. (2013), *PV Inverter Design Using Solar Explorer Kit*, SPRABR4A, Texas Instruments.
- [2] C. Roncero-Clemente, E. Romero-Cadaval, V. M. Minambres, M. A. Guerrero-Martinez, J. Gallardo-Lozano (2013), *PV Array Emulator for Testing Commercial PV Inverters*, ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA, ISSN 1392-1215, VOL. 19, NO. 10, 2013
- [3] Hayrettin CAN (2013), *Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink*, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences.
- [4] Jaw-Kuen Shiaun, Chun-Jen Cheng (2010), *Design of a non-inverting synchronous buck-boost DC/DC power converter with moderate power level*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 26, Issue 3, pp. 263–267.
- [5] Sahu B., Rincon-Mora G.A. (2004) *A low voltage, dynamic, noninverting, synchronous buck-boost converter for portable applications*, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 19, Issue 2, pp. 443–452.
- [6] Wei C. L., Chen C. H., Wu K. C., Ko I. T. (2012), *Design of an Average-Current-Mode Noninverting Buck-Boost DC-DC Converter With Reduced Switching and Conduction*

Losses, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, Iss. 12, pp. 4934–4943.

- [7] Orellana M., Petibon S., Estibals B., Alonso C. (2010) *Four Switch Buck-Boost Converter for Photovoltaic DC-DC Power Applications*, IECON 2010 – 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.
- [8] Nguyễn Doãn Phước (2012), *Phân tích và Điều khiển hệ phi tuyến*, NXB Bách Khoa, Hà Nội.
- [9] http://www.solarcellsales.com/techinfo/docs/SheIISQ160-PC_US.pdf



Trần Vũ Trung tốt nghiệp ĐH Bách Khoa Hà Nội chương trình đào tạo Kỹ sư tài năng ngành Điều khiển tự động vào tháng 6/2015. Từ tháng 9/2013 đến nay, tham gia thực tập và nghiên cứu khoa học tại Viện Kỹ thuật Điều khiển & Tự động hóa (ICEA-HUST). Các lĩnh vực nghiên cứu: hệ thống điều khiển số, điều khiển truyền động điện, điều khiển điện tử công suất, điều khiển dự báo cho các loại máy điện.



Vũ Hoàng Phương sinh năm 1983. Anh nhận bằng kỹ sư năm 2006, Thạc sỹ năm 2008 chuyên ngành Tự động hóa XNCN, Tiến sĩ năm 2014 chuyên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa Trường đại học Bách khoa Hà Nội (ĐHBKHN). Hiện tại, anh là giảng viên Bộ môn Tự động hóa Công nghiệp – Viện Điện và cộng tác viên của Viện kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa – ĐHBKHN. Lĩnh vực nghiên cứu: điều khiển điện tử công suất, ứng dụng điện tử công suất cho nguồn phát phân tán, bộ biến đổi DC-DC hiệu suất cao, lọc tích cực,...

Trần Trọng Minh sinh năm 1960. Từ năm 1978÷1983 học tại đại học Bách khoa Bacu (Liên Xô cũ). Nhận bằng M.S tại AIT-Thái Lan năm 1997, bằng Tiến sỹ chuyên ngành Tự động hóa XNCN trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (ĐHBKHN) năm 2008. Từ năm 1984, công tác tại bộ môn Tự động hóa Công nghiệp – Viện Điện – ĐHBKHN. Lĩnh vực nghiên cứu: điều khiển điện tử công suất, bộ biến đổi công suất lớn, biến tần ma trận, ứng dụng điện tử công suất trong lưới điện thông minh, bộ biến đổi DC-DC hiệu suất cao, lọc tích cực,...