

MỘT HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI MỚI ỨNG DỤNG BIẾN TẦN BA PHA BỐN KHÓA

PHẠM CÔNG DUY

Khoa Công nghệ Điện, Trường Đại học Công nghiệp Tp.HCM

Tác giả liên hệ: dph@iuh.edu.vn

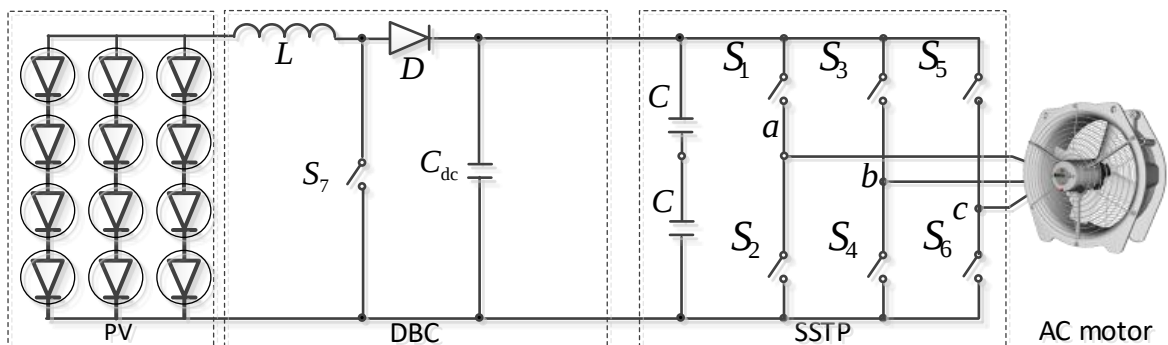
DOIs: <https://www.doi.org/10.46242/jstiuh.v78i6.5701>

Tóm tắt. Để giảm kích thước và chi phí của các hệ thống truyền động, bài báo đề xuất một hệ thống truyền động điện được cấp điện bởi quang điện mặt trời dựa vào công nghệ biến tần 3 pha 4 khóa áp dụng 2 bộ điều khiển dòng điện trễ. Đầu tiên, mô hình bộ chuyển đổi dc-dc tăng áp được đưa ra và thực thi điểm công suất cực đại bằng cách điều chỉnh tỷ lệ chu kỳ làm việc của bộ tăng áp bằng phương pháp độ dẫn gia tăng để trích xuất công suất tối ưu từ quang điện mặt trời thảo luận. Thứ hai, bộ điều khiển vector cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu có tải bơm được điều khiển theo công suất của quang điện mặt trời. Cuối cùng, hệ thống đề xuất được mô phỏng bởi phần mềm MATLAB/Simulink và đáp ứng điều khiển được xác thực thông qua kết quả mô phỏng.

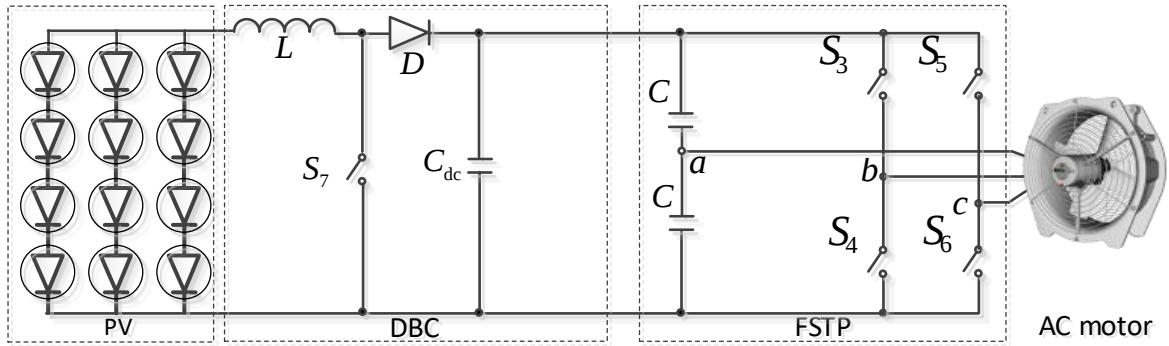
Từ khóa. Biến tần 3 pha 6 khóa (SSTP), Biến tần 3 pha 4 khóa (FSTP), biến tần, PV

1 GIỚI THIỆU

Trong số tất cả các nguồn năng lượng tái tạo, năng lượng mặt trời đã đạt được sự áp dụng phổ biến do hiệu quả về chi phí [1-3] và cũng là một trong những nguồn năng lượng hứa hẹn nhất cho việc phát điện công suất phân tán. Các tấm pin quang điện năng lượng mặt trời (PV) yêu cầu các kỹ thuật điều khiển để đảm bảo hoạt động với điểm công suất cực đại (MPPT). Kỹ thuật này đã được mô tả trong tài liệu kỹ thuật [4-10]. Trong [4], MPPT cho hệ thống PV sử dụng tìm kiếm Cuckoo với khả năng che bóng một phần. Trong [5-6], đánh giá và kiểm soát lưu trữ năng lượng PV dựa trên bộ điều khiển MPPT chế độ trượt được đề xuất. Trong [7], điều khiển phi tuyến dựa trên bước lùi cho MPPT trong hệ thống quang điện cũng được nghiên cứu. Trong [8], tối ưu hóa bộ điều khiển MPPT dựa trên mờ thông qua các kỹ thuật siêu thuật toán cho các hệ thống PV độc lập được đề xuất. Trong [9], điều khiển phản hồi đầu ra của các hệ thống PV không cảm biến, với MPPT được báo cáo. Trong [10], nghiên cứu so sánh về MPPT cho PV được đề xuất. Tiếp theo đó, bộ truyền động điện sử dụng PV giúp sử dụng năng lượng hiệu quả trong các khía cạnh tiết kiệm năng lượng [11] mà giải pháp này rất hữu ích cho hệ thống bơm nước dựa trên PV. Gần đây, nghiên cứu về hệ thống bơm nước dựa trên PV được thảo luận trong các công việc của [12-18]. Động cơ không đồng bộ 3 pha rotor lồng sóc được cấp điện từ PV với điều khiển vector [12], mô hình đồ thị liên kết [13], đặc tính ổn định và tạm thời của hệ thống bơm nước PV một cấp [14], mô hình tín hiệu nhỏ và điều khiển hệ thống bơm nước dựa trên PV [15], so sánh hiệu suất của bộ điều khiển cho các ứng dụng bơm nước bằng PV năng lượng mặt trời [16]. Trong [17], nghiên cứu và phân tích bộ truyền động động cơ không đồng bộ 3 pha tạo ra giải pháp năng lượng xanh hiệu suất cao với bộ ước tính thông minh cũng được nghiên cứu. Trong [18], đánh giá hiệu suất của bộ biến tần đa bậc dựa trên bộ điều khiển logic mờ cấp điện từ PV cho động cơ không đồng bộ 3 pha được nghiên cứu.



(a) Kiến trúc truyền động điện với biến tần SSTP



(b) Kiến trúc truyền động điện với biến tần FSTP

Hình 1: Kiến trúc hệ thống truyền động với PV

Đánh giá về sự phát triển của hệ thống bơm nước từ PV được thảo luận trong [19-20]. Đánh giá tổng quan về động cơ điện với PV cũng được báo cáo trong [21-22]. Ngoài ra, đánh giá tổng quan về hệ thống bơm nước năng lượng mặt trời, gió và gió lai-PV với góc độ kỹ thuật điện được nghiên cứu trong [23].

Thông thường, các hệ thống truyền động động cơ sử dụng cấu trúc biến tần 3 pha 6 công tắc (SSTP) được xem như là tiêu chuẩn của hệ thống truyền động điện [1-2]. Tuy nhiên, các cấu trúc này có nhược điểm về chi phí, độ phức tạp của bộ điều khiển, kích thước lớn. Một cách tiếp cận khác để khắc phục những nhược điểm trên là giảm số lượng khóa bán dẫn mà đã được tìm thấy qua công việc trong [24-25]. Tổng hợp các công trình nghiên cứu trước đây, bài báo đề xuất một hệ thống truyền động điện năng lượng mặt trời mới ứng dụng biến tần 3 pha 4 khóa mà có những đóng góp chính như sau:

- i) Một kiến trúc truyền động điện năng lượng mặt trời với biến tần 3 pha 4 khóa được đề xuất;
- ii) Phương pháp điều khiển vector cải tiến áp dụng cho điều khiển tốc độ PMSM ứng dụng quạt/bơm;
- iii) Đáp ứng điều khiển được chính minh qua kết quả mô phỏng.

Những phần chính của bài báo được tóm tắt như sau: Phần 2 đề xuất kiến trúc hệ thống truyền động năng lượng mặt trời. Hệ thống điều khiển được thảo luận trong Phần 3. Phần 4 đưa ra kết quả mô phỏng. Kết luận và hướng phát triển của bài báo được đưa ra trong Phần 5.

2 HỆ THỐNG PHẦN CỨNG ĐỀ XUẤT

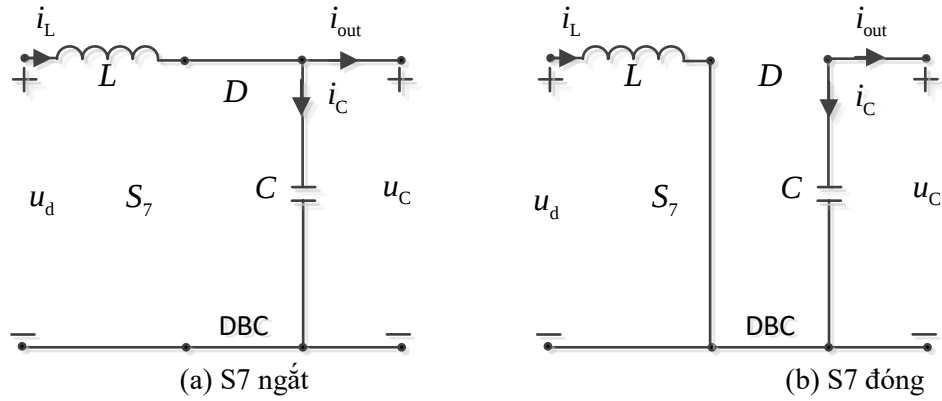
Một dạng chuẩn của một hệ thống truyền động điện năng lượng mặt trời được chỉ ra tại Hình 1a. Hệ thống này bao gồm bộ biến đổi DC-DC tăng áp (DBC), biến tần ba pha sáu khóa (SSTP) và động cơ điện xoay chiều. Điện áp và dòng điện từ những tấm pin năng lượng mặt trời (PV) cấp năng lượng điện cho DBC và điện áp đầu ra của bộ DBC là điện áp đầu vào của SSTP.

Tuy nhiên giải pháp truyền động điện của Hình 1a có giới hạn là giá thành cao và không gian chiếm chỗ lớn. Để khắc phục giới hạn này, một kiến trúc truyền động điện năng lượng mặt trời mới được đề xuất tại Hình 1b với giảm khóa bán dẫn, cụ thể là giảm hai khóa so với Hình 1a. Chi tiết của hệ thống này được miêu tả phía dưới.

2.1 PV

Pin mặt trời được chế tạo và vận hành theo đặc tính phi tuyến dòng điện-điện áp (I-V) và công suất-điện áp (P-V), những đặc tính phi tuyến này thay đổi theo bức xạ mặt trời và nhiệt độ hoạt động của tế bào quang điện. Phương trình toán học chung cho đặc tính đầu ra I-V của một tế bào quang điện đã được nghiên cứu trong suốt bốn thập kỷ [1].

2.2 DBC



Hình 2 Trạng thái đóng/ngắt của DBC

Dựa vào Hình 2a, phương trình điện áp của DBC đầu vào và dòng điện qua tụ điện C được biểu diễn

$$\begin{cases} u_d = L \frac{di_L}{dt} + u_C \\ C \frac{du_C}{dt} = i_L - i_{out} \end{cases} \quad (1)$$

Hệ phương trình (1) được viết lại

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = u_d - u_C \\ C \frac{du_C}{dt} = i_L - i_{out} \end{cases} \quad (2)$$

Hệ phương trình (2) được viết lại theo khóa bán dẫn S_7

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = 0.i_L + \frac{0-1}{L}u_C + \frac{u_d}{L} \\ \frac{du_C}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{i_{out}}{C} \end{cases} \quad (3)$$

Dựa vào Hình 2b, phương trình điện áp của DBC đầu vào và dòng điện qua tụ điện C được biểu diễn

$$\begin{cases} u_d = L \frac{di_L}{dt} \\ C \frac{du_C}{dt} = -i_{out} \end{cases} \quad (4)$$

Hệ phương trình (4) được viết lại theo khóa bán dẫn S_7 là như sau:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = 0.i_L + \frac{1-1}{L}u_C + \frac{u_d}{L} \\ \frac{du_C}{dt} = -\frac{i_{out}}{C} \end{cases} \quad (5)$$

Tổng quát

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{du_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{S_7 - 1}{L} \\ \frac{1 - S_7}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u_d + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix} i_{out} \quad (6)$$

Tổng hợp lại, từ hệ phương trình (3) và (5), mô hình toán học của bộ DBC được mô tả qua hệ phương trình (6). Hệ phương trình này có 2 biến đầu vào và 2 biến trạng thái cũng như phụ thuộc vào trạng thái đóng/ngắt của khóa bán dẫn S_7 .

2.3 FSTP

Hình 1b cũng chỉ ra sơ đồ mạch công suất của FSTP, pha a của động cơ xoay chiều 3 pha được nối điểm giữa của hai tụ điện, giải pháp này đã giảm hai khóa bán dẫn S_1 và S_2 so với SSTP.

Để việc phân tích đơn giản, giả sử FSTP có 4 khóa bán dẫn lý tưởng và khóa S_3 và S_5 được ký hiệu S_b và S_c tương ứng:

$$\begin{cases} S_b = S_3 \\ S_c = S_5 \end{cases} \quad (7)$$

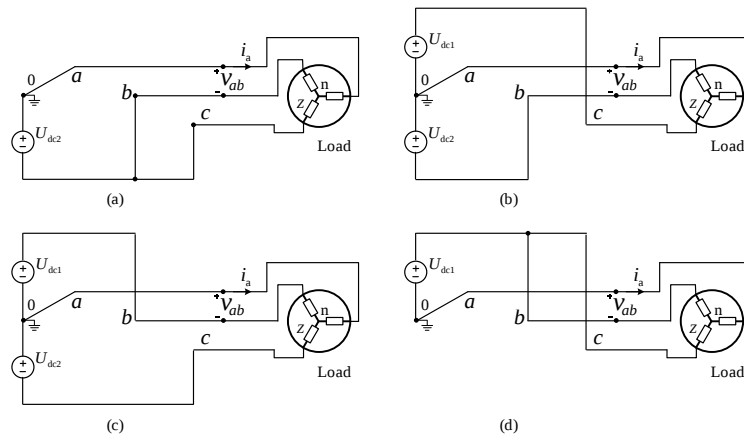
Điện áp cực của FSTP có thể được tính dựa vào khóa bán dẫn và hai điện áp một chiều U_{dc1}, U_{dc2}

$$\begin{cases} u_{ao} = 0 \\ u_{bo} = S_b U_{dc1} + (S_b - 1) U_{dc2} \\ u_{co} = S_c U_{dc1} + (S_c - 1) U_{dc2} \end{cases} \quad (8)$$

Giả sử tải cân bằng, điện áp pha được cho

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{2}{3} u_{ao} - \frac{1}{3} (u_{bo} + u_{co}) \\ u_{bn} = \frac{2}{3} u_{bo} - \frac{1}{3} (u_{co} + u_{ao}) \\ u_{cn} = \frac{2}{3} u_{co} - \frac{1}{3} (u_{ao} + u_{bo}) \end{cases} \quad (9)$$

Dựa vào hình 1b, FSTP có 4 trường hợp đóng/ngắt mà được miêu tả như Hình 2. Áp dụng định luật Kirchhoff áp cho mạch điện này có kết quả trạng thái đóng/ngắt và điện áp đầu ra của FSTP được liệt kê trong Bảng 1.



Hình 3 Trạng thái đóng/ngắt của FSTP

(a) $S_b = 0, S_c = 0$; (b) $S_b = 0, S_c = 1$; (c) $S_b = 1, S_c = 0$; (d) $S_b = 1, S_c = 1$

Bảng 1: Trạng thái đóng/ngắt và điện áp đầu ra của FSTP

$S_b \ S_c$	u_{an}	u_{bn}	u_{cn}
0 0	$\frac{2}{3}U_{dc2}$	$-\frac{1}{3}U_{dc2}$	$-\frac{1}{3}U_{dc2}$
0 1	$\frac{1}{3}(U_{dc2} - U_{dc1})$	$-\frac{1}{3}(2U_{dc2} + U_{dc1})$	$\frac{1}{3}(2U_{dc1} + U_{dc2})$
1 0	$\frac{1}{3}(U_{dc2} - U_{dc1})$	$\frac{1}{3}(2U_{dc1} + U_{dc2})$	$-\frac{1}{3}(2U_{dc2} + U_{dc1})$
1 1	$-\frac{2}{3}U_{dc1}$	$\frac{1}{3}U_{dc1}$	$\frac{1}{3}U_{dc1}$

Dựa vào Bảng 1, điện áp pha là hàm số của khóa bán dẫn S_b, S_c và điện áp một chiều U_{dc1}, U_{dc2}

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{U_{dc1}}{3}(-S_b - S_c) + \frac{U_{dc2}}{3}(2 - S_b - S_c) \\ u_{bn} = \frac{U_{dc1}}{3}(2S_b - S_c) + \frac{U_{dc2}}{3}(2S_b - S_c - 1) \\ u_{cn} = \frac{U_{dc1}}{3}(2S_c - S_b) + \frac{U_{dc2}}{3}(2S_c - S_b - 1) \end{cases} \quad (10)$$

Cho đơn giản mô hình hóa, giả sử điện áp trên hai tụ của FSTP là bằng nhau từ đó sẽ có phương trình

$$U_{dc1} = U_{dc2} = \frac{U_{dc}}{2} \quad (11)$$

Thế (11) vào (10), phương trình

$$\begin{cases} u_{as} = (1 - S_b - S_c) \frac{U_{dc}}{3} \\ u_{bs} = (4S_b - 2S_c - 1) \frac{U_{dc}}{6} \\ u_{cs} = (4S_c - 2S_b - 1) \frac{U_{dc}}{6} \end{cases} \quad (12)$$

3 HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN ĐỀ XUẤT

Hệ thống điều khiển được chia thành hai hệ thống điều khiển nhỏ hơn. Hệ thống điều khiển thứ nhất là điều khiển MPPT sử dụng giải thuật INC cải tiến. Hệ thống điều khiển thứ hai là điều khiển vector động cơ PMSM sử dụng hai bộ điều khiển trễ. Chi tiết của hai hệ thống này được đề cập phía bên dưới.

3.1 Điều khiển bộ biến đổi dc-dc tăng áp (DBC)

Nhiều phương pháp điều khiển mà có thể tìm thấy trong [4-10]. Để đơn giản cho việc điều khiển, MPPT được sử dụng trong bài báo này dựa trên thuật toán INC mà được áp dụng cho DBC để tạo ra chu kỳ làm việc. Nó được sử dụng để lấy toàn bộ công suất từ mảng năng lượng mặt trời, nhằm đạt được khả năng truyền công suất tối đa trong mọi điều kiện hoạt động, công suất tối đa từ tấm pin quang điện bằng cách đạt được khả năng truyền công suất tối đa dựa trên sự khác biệt về điều kiện hoạt động về bức xạ và nhiệt độ. Điểm công suất cao nhất của mô-đun quang điện là điện áp mà tại đó nó có thể tạo ra nhiều công suất nhất (hoặc điện áp công suất cực đại). Dòng điện và điện áp tại các đầu cuối của mảng quang điện được duy trì ở các giá trị liên quan đến khả năng cung cấp công suất tối đa. Tại điểm công suất cực đại, độ dốc của đường cong P-V bằng 0 được cho bởi phương trình (11)

$$\frac{dp_{pv}}{du_{pv}} = 0 \quad (13)$$

Phương trình trung gian để có điều kiện điểm công suất cực đại như sau:

$$\frac{dp_{pv}}{du_{pv}} = \frac{d(u_{pv}i_{pv})}{du_{pv}} \quad (14)$$

$$\frac{dp_{pv}}{du_{pv}} = \frac{u_{pv}\partial i_{pv}}{\partial u_{pv}} + \frac{i_{pv}\partial u_{pv}}{\partial u_{pv}} \quad (15)$$

$$\frac{dp_{pv}}{du_{pv}} = \frac{u_{pv}\partial i_{pv}}{\partial u_{pv}} + i_{pv} \quad (16)$$

Dựa vào phương trình (11) và (14), mối quan hệ giữa u_{pv} và i_{pv} để có điểm cực đại thỏa mãn phương trình (15)

$$\frac{di_{pv}}{du_{pv}} + \frac{i_{pv}}{u_{pv}} = 0 \quad (17)$$

Trong đó p_{pv} là công suất của PV, u_{pv} là điện áp của PV and i_{pv} là dòng điện của PV

Phương trình (15) được viết lại cho dễ hiểu hơn như sau:

$$\begin{cases} \frac{di_{pv}}{du_{pv}} + \frac{i_{pv}}{u_{pv}} > 0 \text{ with } u_{pv} < u_{MPPT} \\ \frac{di_{pv}}{du_{pv}} + \frac{i_{pv}}{u_{pv}} = 0 \text{ with } u_{pv} = u_{MPPT} \\ \frac{di_{pv}}{du_{pv}} + \frac{i_{pv}}{u_{pv}} < 0 \text{ with } u_{pv} > u_{MPPT} \end{cases} \quad (18)$$

Để thực thi MPPT, phương trình (16) được rời rạc như phương trình (17)

$$\begin{cases} \frac{\Delta i_{pv}}{\Delta u_{pv}} + \frac{i_{pv}}{u_{pv}} > 0 \text{ with } u_{pv} < u_{MPPT} \\ \frac{\Delta i_{pv}}{\Delta u_{pv}} + \frac{i_{pv}}{u_{pv}} = 0 \text{ with } u_{pv} = u_{MPPT} \\ \frac{\Delta i_{pv}}{\Delta u_{pv}} + \frac{i_{pv}}{u_{pv}} < 0 \text{ with } u_{pv} > u_{MPP} \end{cases} \quad (19)$$

Trong đó Δi_{pv} và Δu_{pv} là độ thay đổi của dòng điện và điện áp của PV.

3.2 Điều khiển FSTP

Hình 5 chỉ ra bộ điều khiển đề xuất với 4 khóa bán dẫn được miêu tả qua các phương trình như sau:

Tốc độ đặt được tính bởi phương trình (20)

$$\omega_{motor}^{ref} = k.p_{pv} \quad (20)$$

Trong đó k là hệ số tỷ lệ

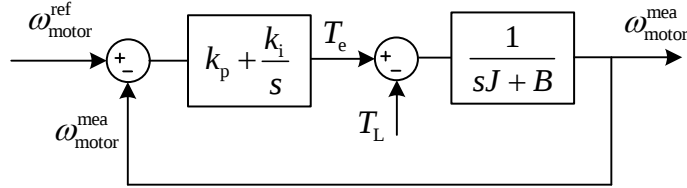
Dòng điện tham chiếu trục q được tính dựa vào phương trình của định luật chuyển động thứ hai của nhà vật lý người Anh, Newton

$$i_{qs}^{ref} = k_p (\omega_{motor}^{ref} - \omega_{motor}^{mea}) + \frac{k_i}{s} (\omega_{motor}^{ref} - \omega_{motor}^{mea}) \quad (21)$$

Trong đó k_p and k_i là hệ số tỷ lệ và tích phân của bộ điều khiển PI.

Các hệ số này được tìm dựa vào phương pháp thử sai, phương pháp Ziegler-Nichols, thuật toán tối ưu hóa, phân tích ổn định của hàm truyền. Trong bài báo này tham số của bộ điều khiển PI tốc độ được xác định dựa vào phân tích ổn định ứng dụng của hàm truyền.

Một hệ thống điều khiển tốc độ động cơ được chỉ ra trong Hình 4 [26] và T_e , T_L , J và B là mô-men điện từ, mô-men tải, mô-men quán tính của hệ thống, hệ số ma sát.



Hình 4 Hệ thống điều khiển tốc độ

Cho đơn giản phân tích, giả sử mô-men tải và hệ số ma sát đều bằng 0, hàm truyền của hệ thống có dạng như sau [26]:

$$G_\omega = \frac{(k_p + \frac{k_i}{s})(\frac{1}{sJ})}{1 + (k_p + \frac{k_i}{s})(\frac{1}{sJ})} \quad (22)$$

Rút ngắn phương trình (22) sẽ có dạng như phương trình (23)

$$G_\omega = \frac{sk_p + k_i}{s^2 J + sk_p + k_i} \quad (23)$$

Phương trình (23) là hàm truyền của hệ thống điều khiển tốc độ có mẫu số là phương trình bậc hai được biểu diễn dưới dạng phương trình như sau:

$$Js^2 + k_p s + k_i = 0 \quad (24)$$

Phương trình (24) có hai nghiệm và nghiệm thứ nhất

$$s_1 = \frac{-k_p - \sqrt{k_p^2 - 4Jk_i}}{2J} \quad (25)$$

Nghiệm thứ hai

$$s_2 = \frac{-k_p + \sqrt{k_p^2 - 4Jk_i}}{2J} \quad (26)$$

Dựa vào tiêu chuẩn ổn định Routh-Hurwitz của phương trình (24) như sau:

(i) Tất cả các hệ số của phương trình (24) phải dương tức tìm được điều kiện $k_p > 0$ và $k_i > 0$

(ii) Hai nghiệm của phương trình (24) có phần thực âm, phương trình (25) luôn có phần thực âm nên chỉ xét điều kiện phương trình (26) sẽ có hai trường hợp:

(ii.1) $k_p^2 - 4Jk_i > 0$ và $-k_p + \sqrt{k_p^2 - 4Jk_i} < 0$

(ii.2) $k_p^2 - 4Jk_i \leq 0$

Tổng kết lại cho hai trường hợp (i) và (ii), để hệ thống ổn định phải thỏa một trong hai điều kiện:

$$\begin{cases} k_p > 0 \\ k_i > 0 \\ k_p^2 > 4Jk_i \\ k_p > \sqrt{k_p^2 - 4Jk_i} \end{cases} \quad (27)$$

Hoặc

$$\begin{cases} k_p > 0 \\ k_i > 0 \\ k_p^2 \leq 4Jk_i \end{cases} \quad (28)$$

Để cho đơn giản điều khiển dòng điện tham chiếu i_{ds}^{ref} được đặt bằng 0

$$i_{ds}^{ref} = 0 \quad (29)$$

Sau đó, hai dòng điện thực b, c được tính dựa vào chuyển đổi hệ tọa độ Park ngược

$$\begin{cases} i_{bs}^{ref} = i_{qs}^{ref} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_{ds}^{ref} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{cs}^{ref} = i_{qs}^{ref} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) + i_{ds}^{ref} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (30)$$

Luật điều khiển của khóa S_b được dựa vào bộ điều khiển dòng trễ

$$S_b = S_3 = \begin{cases} 1, & i_{bs}^{ref} - i_{bs}^{mea} \geq h \\ 0, & i_{bs}^{ref} - i_{bs}^{mea} < h \end{cases} \quad (31)$$

Trong đó h là độ trễ

Luật điều khiển của S_4 được dựa vào khóa bán dẫn S_3 theo quy tắc đối nghịch như sau

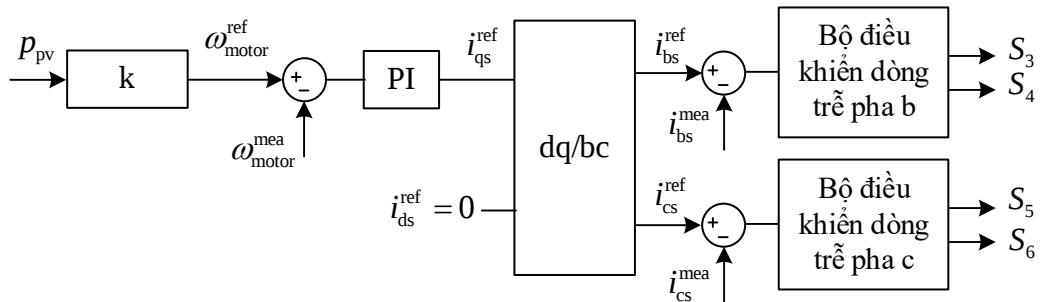
$$S_4 = 1 - S_3 \quad (32)$$

Khóa bán dẫn S_5 được điều khiển đóng/ngắt theo bộ điều khiển trễ

$$S_c = S_5 = \begin{cases} 1, & i_{cs}^{ref} - i_{cs}^{mea} \geq h \\ 0, & i_{cs}^{ref} - i_{cs}^{mea} < h \end{cases} \quad (33)$$

Tương tự, luật điều khiển của S_6 được dựa vào khóa bán dẫn S_5 theo quy tắc đối nghịch như sau

$$S_6 = 1 - S_5 \quad (34)$$



Hình 5 Hệ thống điều khiển động cơ xoay chiều 3 pha đề xuất

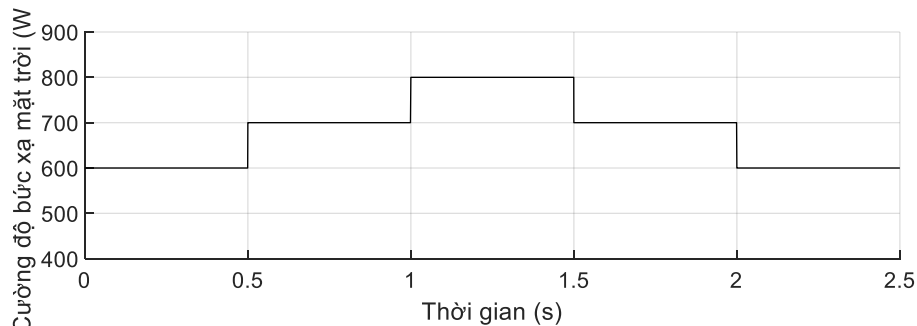
4 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Hệ thống PV bao gồm 4 mô-đun SST235-60P-BW PV của công ty China Sunergy (Nanjing) ghép nối tiếp và Δu_{pv} có giá trị bằng 0,01.

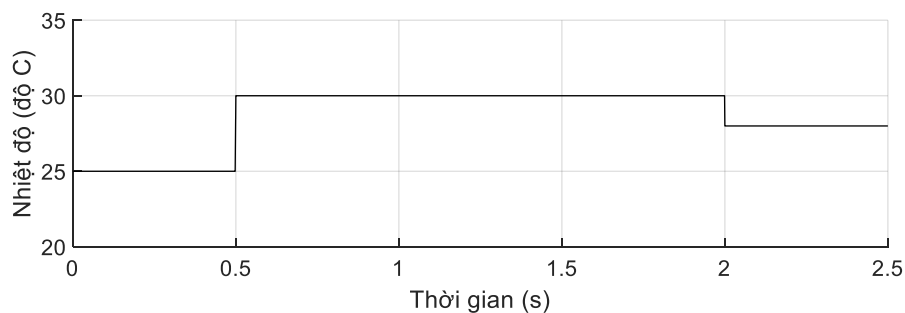
Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu có mã Anaheim Automation EMJ-04APA22 có công suất định mức là 400W, dòng điện định mức là 2,7A, tốc độ quay 3000 vòng/phút và mô-men quán tính $3,495e-5 \text{ kg.m}^2$

Tham số của bộ điều khiển tốc độ được chọn $k_p = \alpha_s J = 0,0044 \text{ N.m.s/rad}$; $k_i = \alpha_s^2 J = 0,5519 \text{ N.m/rad}$ với $\alpha_s = 125,66 \text{ N.s/(rad.kg.m)}$ [26,27] mà thỏa điều kiện của bất phương trình (28).

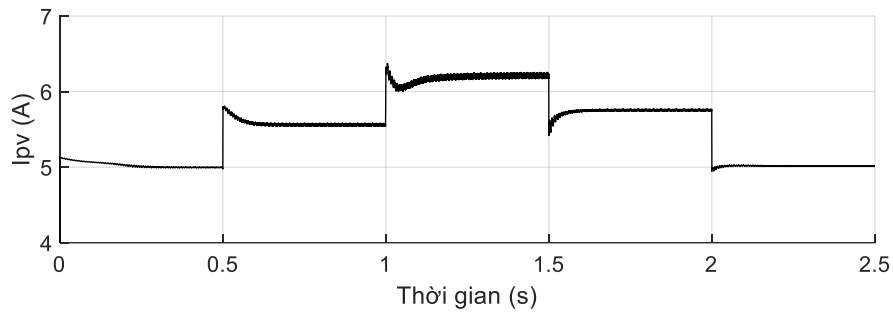
Hình 6 chỉ ra kết quả của đáp ứng hệ thống truyền động trong đó cường độ bức xạ mặt trời trong khoảng thời gian từ 0 đến 0,5 s có giá trị 600 W, trong khoảng thời gian 0,5 s đến 1,0 s cường độ bức xạ mặt trời tăng đến 700 W và cũng tăng 800 W trong khoảng thời gian 1,0 s đến 1,5 s, sau đó cường độ bức xạ mặt trời giảm đến 700 W trong khoảng thời gian 1,5 s đến 2 s và giảm đến 600 W khoảng thời gian 2,0 s đến 2,5 s mà được chỉ ra tại Hình 6a. Hình 6b chỉ ra nhiệt độ của môi trường xung quanh là 25 độ C trong khoảng thời gian 0 s đến 0,5 s, sau đó tăng đến giá trị 30 độ C trong khoảng thời gian 0,5 s đến 2,0 s và cũng trong khoảng thời gian 2,0 s đến 2,5 s nhiệt độ giảm xuống đến giá trị 28 độ C. Trong khoảng thời gian 1,0 s đến 1,5 s, cường độ dòng điện và công suất tạo ra từ PV có giá trị cao nhất nhưng trong Hình 6c và Hình 6d bởi vì cường độ bức xạ mặt trời và nhiệt độ của môi trường xung quanh có giá trị cao nhất. Điện áp đầu ra của bộ DBC như trong Hình 6f thay đổi theo tỷ số chu kỳ như trong Hình 6e và tăng áp mà cung cấp điện áp cho bộ biến tần. Khi công suất của PV tăng như Hình 6d thì tốc độ đặt của động cơ tăng theo và tốc độ trên trục của động cơ cũng tăng theo tương ứng và ngược lại mà thỏa mãn phương trình (20). Mô-men động cơ sinh ra cũng bằng với mô-men tải như trong Hình 6h. Dòng điện 3 pha động được chỉ ra trong Hình 6i mà giá trị của dòng điện thay đổi theo mô-men tải. Hình 6h cũng chỉ ra rằng dòng điện 3 pha của động cơ sinh ra là đối xứng và cân bằng mà điều này cũng chứng minh rằng phương pháp đề xuất hiệu quả. Để tăng tính ưu điểm của bộ điều khiển đề xuất, dòng điện 3 pha xác lập trong khoảng thời gian 1,3 s đến 1,4 s như Hình 6g và dòng điện 3 pha xác lập trong khoảng thời gian 2,4 s đến 2,5 s như Hình 6k đã được chỉ ra.



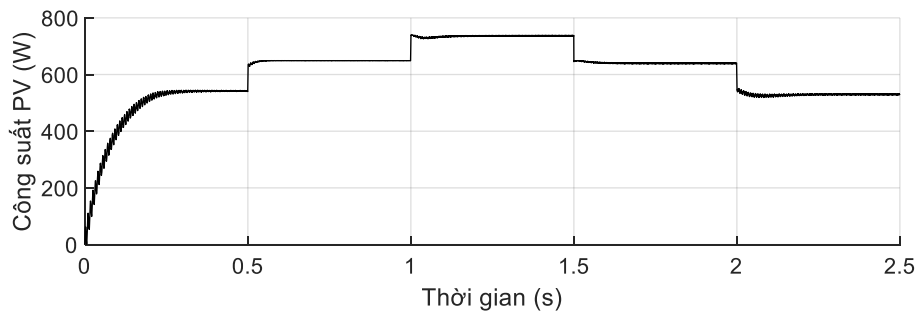
(a) Cường độ bức xạ mặt trời



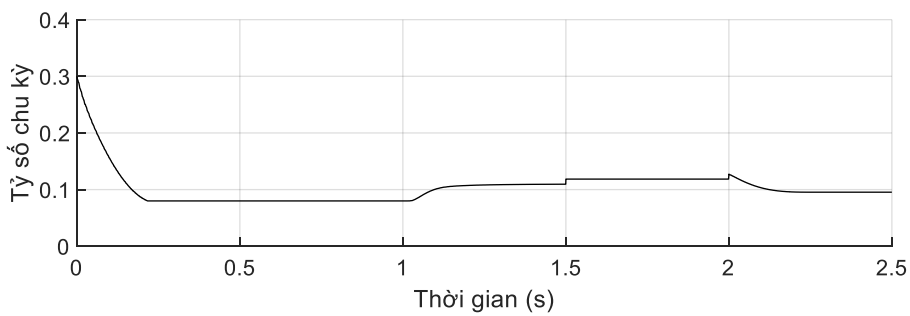
(b) Nhiệt độ



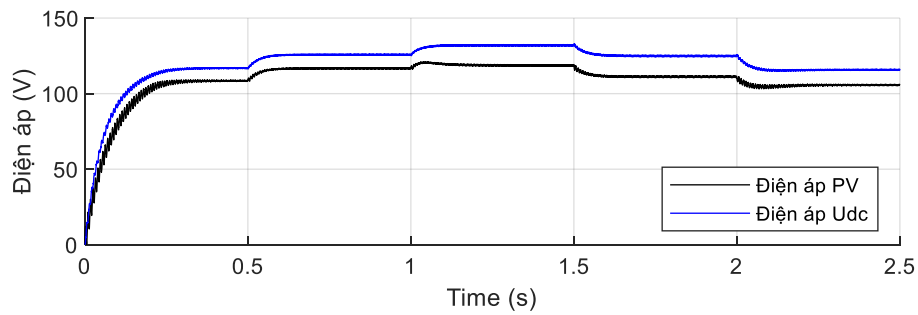
(c) Dòng điện của PV



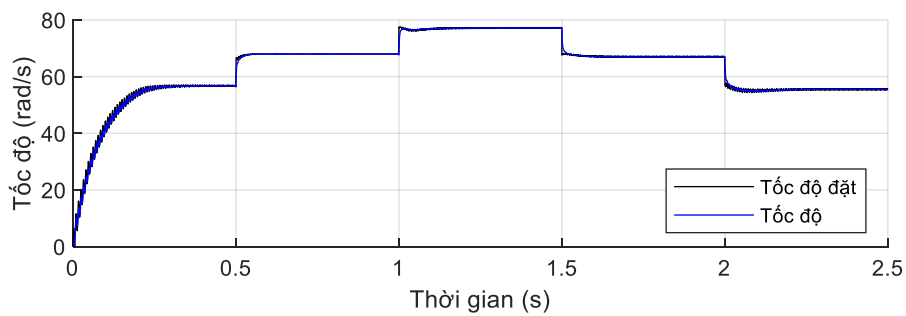
(d) Công suất của PV



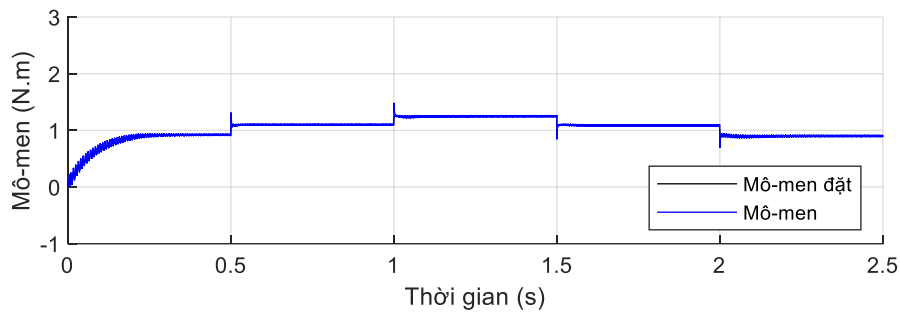
(e) Tỷ số chu kỳ



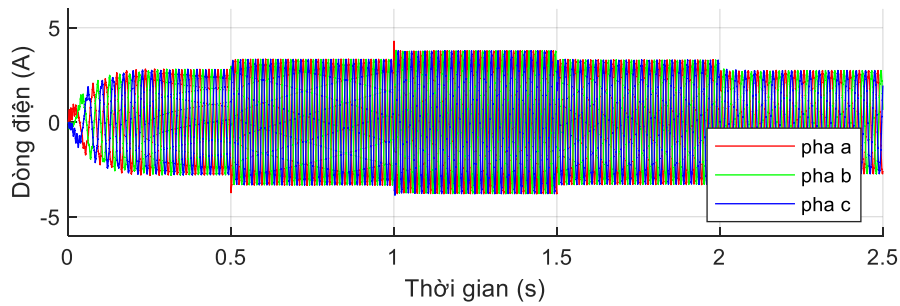
(f) Điện áp đầu vào và điện áp đầu ra của DBC



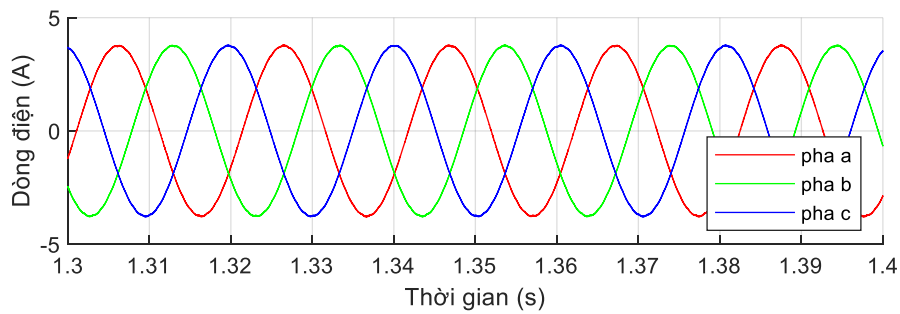
(g) Tốc độ đặt và tốc độ trên trục động cơ



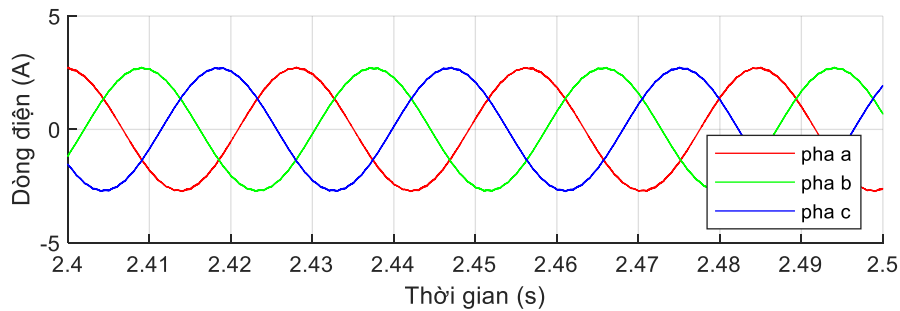
(h) Mô-men đặt và mô-men trên trục động cơ



(i) Dòng điện 3 pha



(g) Dòng điện 3 pha xác lập trong khoảng thời gian 1,3-1,4 s

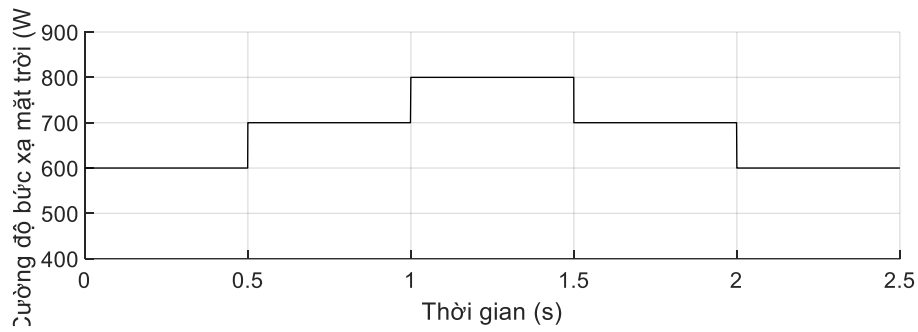


(k) Dòng điện 3 pha xác lập trong khoảng thời gian 2,4-2,5 s

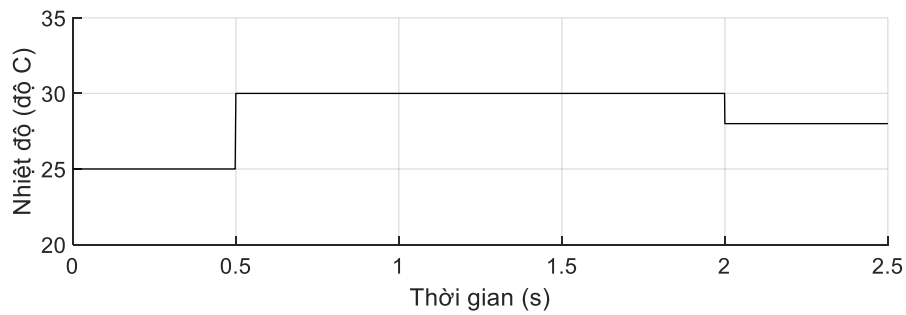
Hình 6: Đáp ứng truyền động điện đề xuất, (a) cường độ bức xạ mặt trời, (b) dòng điện của PV, (c) công suất của PV, (d) tỷ số chu kỳ, (e) điện áp đầu vào và điện áp đầu ra của DBC, (f) tốc độ đặt và tốc độ trên trục động cơ, (g) mô-men đặt và mô-men trên trục động cơ, (h) dòng điện 3 pha, (j) dòng điện 3 pha xác lập trong khoảng thời gian 1,3-1,4 s, (k) dòng điện 3 pha xác lập trong khoảng thời gian 2,4-2,5 s.

Để đánh giá đáp ứng của bộ điều khiển đề xuất, hệ thống điều khiển của biến tần 3 pha 6 khóa được mô phỏng cùng với điều kiện của biến tần 3 pha 4 khóa. Đáp ứng của biến tần 3 pha 6 khóa được chỉ ra tại Hình 7.

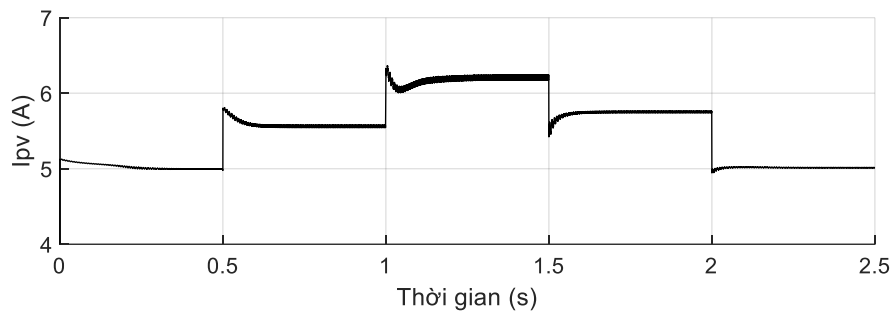
MỘT HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI MỚI ...



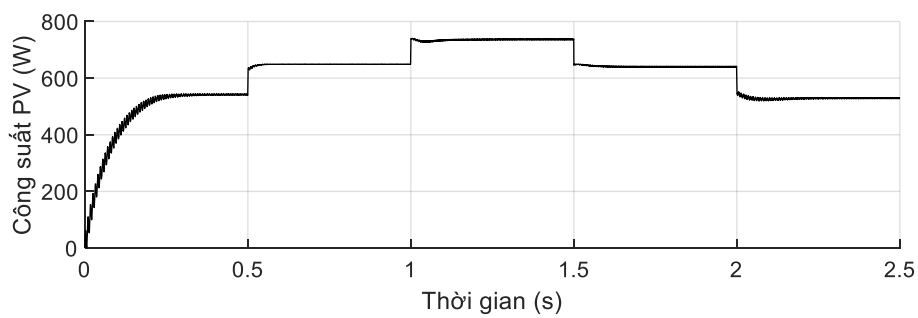
(a) Cường độ bức xạ mặt trời



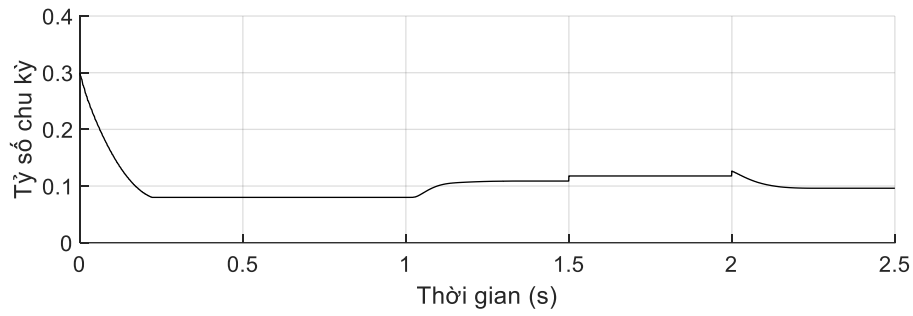
(b) Nhiệt độ



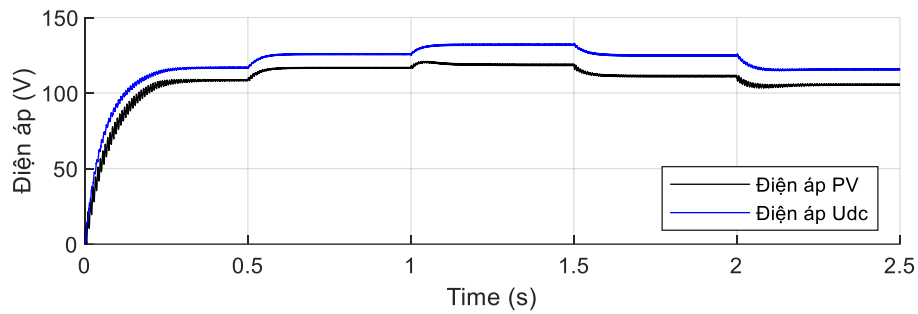
(c) Dòng điện của PV



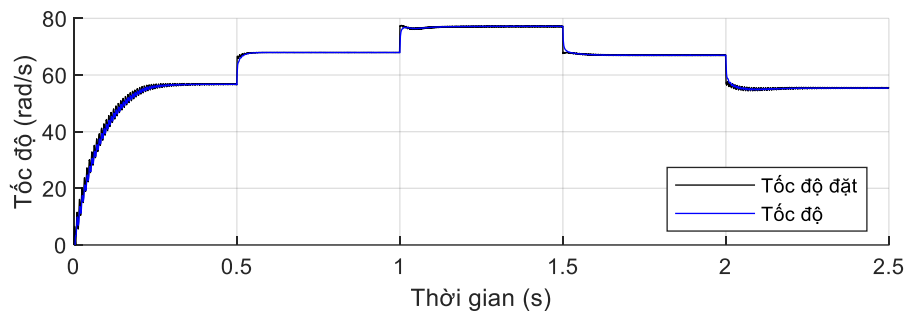
(d) Công suất của PV



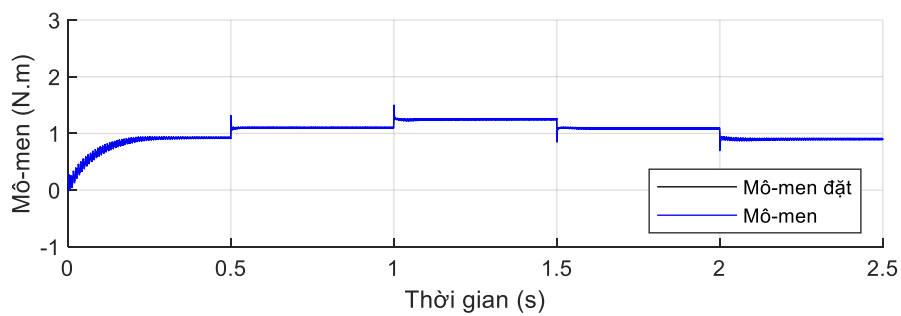
(e) Tỷ số chu kỳ



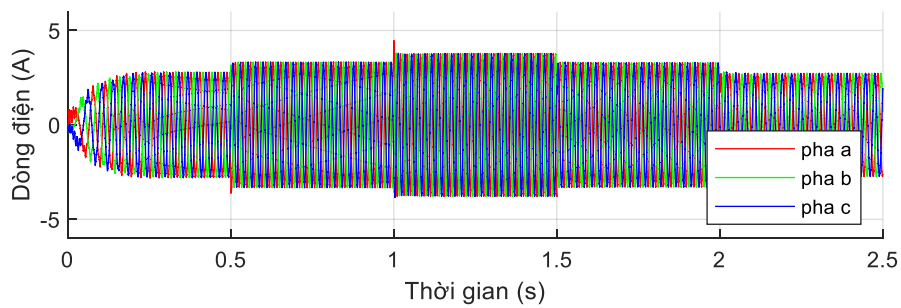
(f) Điện áp đầu vào và điện áp đầu ra của DBC



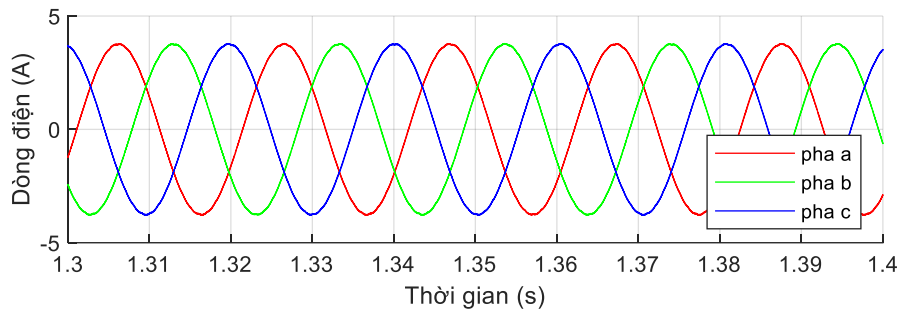
(g) Tốc độ đặt và tốc độ trên trục động cơ



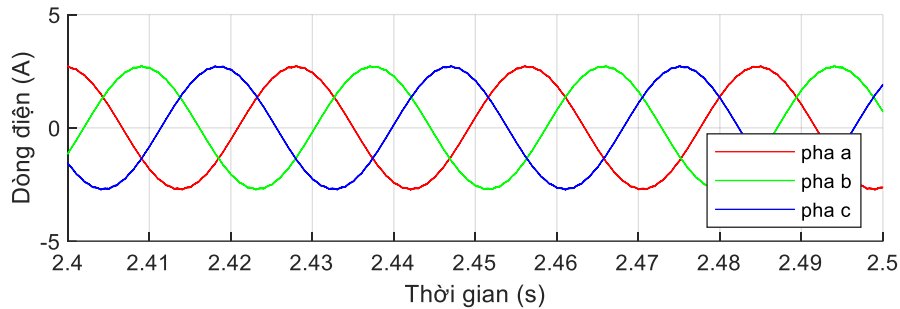
(h) Mô-men đặt và mô-men trên trục động cơ



(i) Dòng điện 3 pha



(g) Dòng điện 3 pha xác lập trong khoảng thời gian 1,3-1,4 s



(k) Dòng điện 3 pha xác lập trong khoảng thời gian 2,4-2,5 s

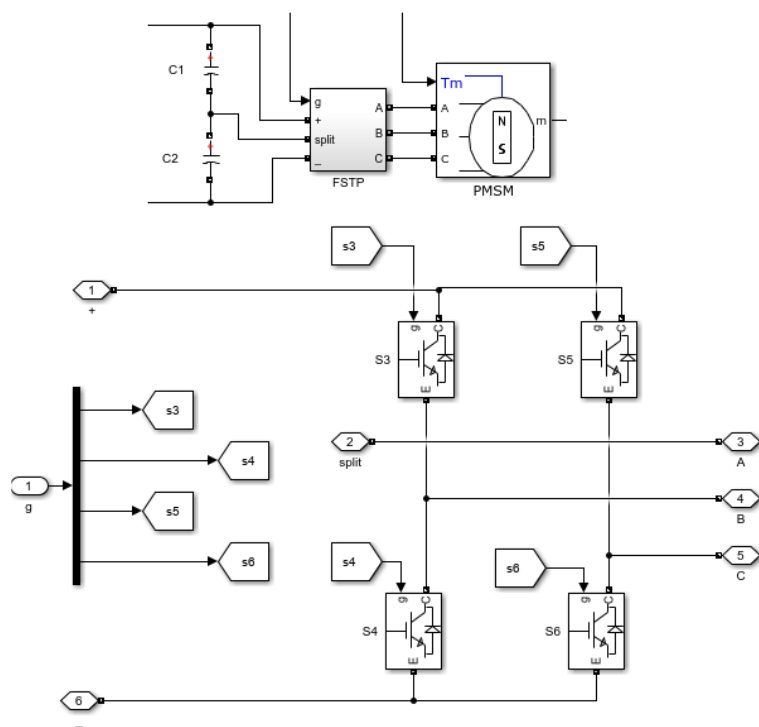
Hình 7: Đáp ứng truyền động điện 6 khóa, (a) cường độ bức xạ mặt trời, (b) dòng điện của PV, (c) công suất của PV, (d) tỷ số chu kỳ, (e) điện áp đầu vào và điện áp đầu ra của DBC, (f) tốc độ đặt và tốc độ trên trục động cơ, (g) mô-men đặt và mô-men trên trục động cơ, (h) dòng điện 3 pha, (j) dòng điện 3 pha xác lập trong khoảng thời gian 1,3-1,4 s, (k) dòng điện 3 pha xác lập trong khoảng thời gian 2,4-2,5 s.

Dựa vào Hình 6 và Hình 7, đáp ứng của bộ điều khiển với biến tần 3 pha 4 khóa tương tự như biến tần 3 pha 6 pha.

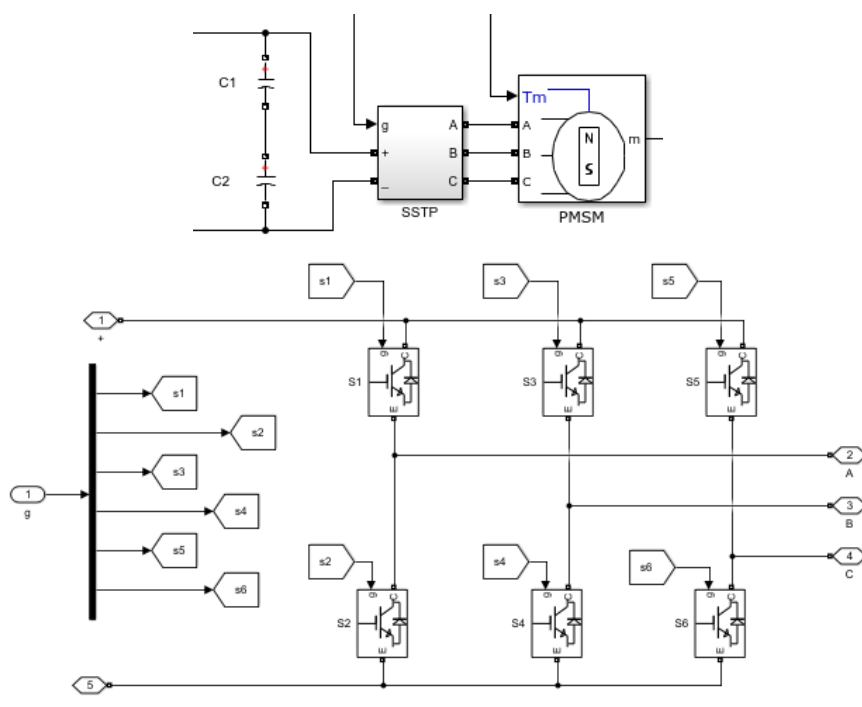
5 KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất một hệ thống truyền động mới cho các ứng dụng quạt thông gió hay bơm tưới ứng dụng cho nhà kính sử dụng năng lượng mặt trời. Hệ thống đề xuất đã được áp dụng thành công cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu được vận hành trong chế độ điều khiển tốc độ dựa vào công suất phát ra của PV. Đáp ứng tốc độ, mô-men và dòng điện đạt kết quả quá độ và xác lập tốt nhưng đáp ứng của dòng điện của biến tần 3 pha 6 khóa. Ưu điểm của giải pháp đề xuất so với giải pháp truyền thống là giảm 2 khóa bán dẫn và giảm 1 cảm biến dòng điện pha. Ngoài ra, giải pháp này cũng có thể được mở rộng cho các ứng dụng nuôi tôm công nghệ cao kiểm soát oxy hòa tan trong nước. Công trình tiếp theo là đánh giá thực nghiệm của hệ thống truyền động được đề xuất.

PHỤ LỤC



Hình A.1 Biến tần 3 pha 4 khóa nối với động cơ



Hình A.2 Biến tần 3 pha 6 khóa nối với động cơ

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Mukund R. Patel, Omid Beik, “Wind and Solar Power Systems Design, Analysis, and Operation”, 3rd Edition, CRC Press, 2021.
- [2] Pranoy Roy, JiangBiao He, Tiefu Zhao, Yash Veer Singh, “Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review”, *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, Vol. 3, pp. 81 – 104, January 2022.
- [3] Arezki Fekik, Malek Ghanes and Hakim Denoun, “Power Electronics Converters and their Control for Renewable Energy Applications”, Academic Press, 2023.
- [4] Jubaer Ahmed, Zainal Salam, “A Maximum Power Point Tracking (MPPT) for PV system using Cuckoo Search with partial shading capability”, *Applied Energy*, Vol. 119, pp. 118-130, April 2014.
- [5] Hanane Yatimi, Elhassan Aroudam, “Assessment and control of a photovoltaic energy storage system based on the robust sliding mode MPPT controller”, *Solar Energy*, Vol. 139, pp. 557-568, Dec. 2016.
- [6] Karim Dahech, Moez Allouche, Tarak Damak, Fernando Tadeo, “Backstepping sliding mode control for maximum power point tracking of a photovoltaic system”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 143, pp. 182-188, Feb. 2017.
- [7] Naghmash, Hammad Armghan, Iftikhar Ahmad, Ammar Armghan, Saud Khan, Muhammad Arsalan, “Backstepping based non-linear control for maximum power point tracking in photovoltaic system”, *Solar Energy*, Vol. 159, pp. 134-141, Jan.2018.
- [8] Shahriar Farajdadian, S.M.Hassan Hosseini, “Optimization of fuzzy-based MPPT controller via metaheuristic techniques for stand-alone PV systems”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 47, pp. 25457-25472, Oct. 2019.
- [9] Mohamed Stitou, Abderrahim El Fadili, Fatima Zahra Chaoui, Fouad Giri, “Output feedback control of sensorless photovoltaic systems, with maximum power point tracking”, *Control Engineering Practice*, Vol. 84, pp. 1-12, Mar. 2019.
- [10] B. Subudhi, R. Pradhan, “A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 4, No. 1, pp. 89 – 98, Jan. 2013.
- [11] Bimal Bose, “Power Electronics and Motor Drives Advances and Trends”, 2nd Edition, Academic Press, 2020.
- [12] M. Arrouf, N. Bouguechal, “Vector control of an induction motor fed by a photovoltaic generator”, *Applied Energy*, Vol. 74, No. 1–2, pp. 159-167, Jan.–Feb. 2003.
- [13] D. Mezghanni, R. Andoulsi, A. Mami, G. Dauphin-Tanguy, “Bond graph modelling of a photovoltaic system feeding an induction motor-pump”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 15, No. 10, pp 1224-1238, Nov. 2007.
- [14] Periasamy Packiam, N. K. Jain, I. P. Singh, “Steady and transient characteristics of a single stage PV water pumping system”, *Energy Systems*, Vol. 6, No. 2, pp.173, 2015.
- [15] Arun Ghosh, Siva Ganesh Malla, Chandrasekhar Narayan Bhende, “Small-signal modelling and control of photovoltaic based water pumping system”, *ISA Transactions*, Vol. 57, pp. 382-389, July 2015.
- [16] K. Yadav, O.S. Sastry, R. Wandhare, N. Sheth, M. Kumar, B. Bora, R. Singh, Renu, A. Kumar, “Performance comparison of controllers for solar PV water pumping applications”, *Solor Energy*, Vol. 119, pp. 195-202, 2015.
- [17] A. Chitra, S. Himavathi, Investigation and analysis of high-performance green energy induction motor drive with intelligent estimator, *Renewable Energy*, Vol. 87, Part 2, pp. 965-976, Mar. 2016.
- [18] S. Chandrasekaran, S. Durairaj, S. Padmavathi, “A Performance evaluation of a fuzzy logic controller-based Photovoltaic-fed multi-level inverter for a three-phase induction motor”, *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 358, No. 15, pp. 7394-7412, Oct. 2021.
- [19] Packiam Periasamy, N.K. Jain, I.P. Singh, “A review on development of photovoltaic water pumping system”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, pp.918-925, Mar. 2015.
- [20] Vimal Chand Sontake, Vilas R. Kalamkar, “Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, pp. 1038-1067, June 2016.
- [21] A. Narendra, N. Venkataramana Naik, Anup Kumar Panda, Nishit Tiwary, “A Comprehensive Review of PV Driven Electrical Motors”, *Solar Energy*, Vol. 195, pp. 278-303, Jan. 2020.
- [22] Waleed M. Hamanah, Aboubakr Salem, M. A. Abido, Abdulaziz M. Qwbaiban, Thomas G. Habetler, “Solar Power Tower Drives: A Comprehensive Survey”, *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 83964 – 83982, Mar. 2021.
- [23] Sachin Angadi, Udaykumar R Yaragatti, Yellasiri Suresh, Angadi B Raju, “Comprehensive review on solar, wind and hybrid wind-PV water pumping systems-an electrical engineering perspective”, *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, Vol. 6, No. 1, pp. 1 – 19, Mar. 2021.
- [24] B.A. Welchko, T.A. Lipo, T.M. Jahns, S.E. Schulz, “Fault tolerant three-phase AC motor drive topologies: a comparison of features, cost, and limitations”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, No. 4, pp. 1108 – 1116, July 2004.

- [25] Hossein Valiyan Holagh, Tooraj Abbasian Najafabadi, Hossein Safamehr, “An adaptive, observer-based switching method for B4 inverters feeding three-phase induction motors”, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 171-182, 2020.
- [26] Marko Hinkkanen, Lennart Harnefors, and Jarno Kukkola, “Fundamentals of Electric Machine Drives”, Zenodo, 2024.
- [27] L. Harnefors, K. Pietilainen, L. Gertmar, “Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 1, pp. 161 – 168, Feb. 2001

A NEW SOLAR DRIVE SYSTEM APPLIED TO FOUR-SWITCH THREE-PHASE INVERTERS

PHAM CONG DUY

Dept. of Electrical Engineering Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City

Corresponding author: dph@iuh.edu.vn

Abstract. To reduce the size and cost of the electric drive systems, this paper proposes an electric drive system which is supplied by solar photovoltaics based on a 3-phase 4-switch inverter technology applying 2 hysteresis current controllers. Firstly, the boost dc–dc converter model is proposed and the maximum power point is enforced by adjusting the duty cycle ratio of the boost converter using the incremental conductance method to extract the optimal power from the solar photovoltaics discussed in detail. Secondly, the vector controller for the permanent magnet synchronous motor with pump load is controlled based on power output of the solar photovoltaics. Finally, the proposed system is simulated by MATLAB/Simulink software and the control response is verified through the simulation results.

Keywords. Six-switch three-phase (SSTP) inverter, four-switch three-phase inverter (FSTP), solar inverter, PV.

Ngày gửi bài: 17/3/2025

Ngày chấp nhận đăng: 04/6/2025