

THIẾT KẾ HỆ ĐIỀU KHIỂN BỘ TĂNG ÁP DC ĐA MỨC

THE DESIGN OF THE DC-DC MULTILEVEL BOOST CONVERTER

Quách Đức Cường^{1*}, Kiều Xuân Thực¹,
Bùi Văn Huy¹, Nguyễn Lương Thành¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.138>

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu vấn đề thiết kế một bộ nguồn tăng áp DC/DC 3 mức ứng dụng trong các hệ năng lượng mặt trời. Bộ nguồn được thiết kế sử dụng mạch tăng áp không cách ly một chiều điều khiển bởi giải thuật phản hồi trạng thái có bổ sung thành phần tích phân. Cấu trúc này đảm bảo tính ổn định của hệ và sai số xác lập ở trạng thái trung bình tiệm cận 0 khi tải thay đổi rộng. Kết quả mô phỏng đã minh chứng khả năng điều khiển của giải thuật.

Từ khóa: Mạch tăng áp một chiều đa mức, PWM, điều khiển phản hồi trạng thái.

ABSTRACT

This paper presents an approach of the designing of the DC-DC multilevel boost converter (three level) which is used for solar energy systems. The converter is designed based on non-isolated boost converter structure and state-feedback controller with integral action. This structure ensures the steady state error of the system is asymptotically stable to zero when the load changes in large-scale. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: DC-DC multilevel boost converter, PWM, state feedback control.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: quachcuong304@gmail.com

Ngày nhận bài: 15/3/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/7/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/8/2023

GIẢI THÍCH

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
d		Độ rộng của xung điều chế IGBT
V_{in}	V	Điện áp vào
V_{out}	V	Điện áp ra

CHỮ VIẾT TẮT

DC/DC	Chuyển đổi nguồn một chiều
IGBT	Van bán dẫn công suất IGBT

1. GIỚI THIỆU

Mạch tăng áp một chiều (DC/DC boost converter) được sử dụng nhiều trong thực tiễn. Đặc biệt trong các hệ thống năng lượng mặt trời, bộ DC/DC boost đóng vai trò vừa ổn định điện áp một chiều, vừa thực hiện điều khiển tối ưu công suất phát điện của tấm pin. Với cấu trúc tăng áp một mức

truyền thống, khi công suất, điện áp của tấm pin ở mức thấp thì hệ số tăng áp của mạch phải rất lớn. Điều đó sẽ dẫn đến hai tình huống bất lợi: 1) hiệu suất biến đổi của mạch thấp; 2) van bán dẫn trong mạch DC/DC boost làm việc với độ rộng xung điều chế khá lớn gây mất an toàn và tin cậy. Để khắc phục vấn đề này, có thể sử dụng cấu trúc mạch tăng áp đa mức. Mạch tăng áp đa mức là đối tượng phi tuyến tính, tham số mô hình phụ thuộc vào giá trị tải. Trong phạm vi tải nhỏ, đáp ứng điện áp tại đầu ra của mạch dễ biến động mạnh và tiến tới mức điện áp cao gây nguy hiểm cho người và thiết bị. Thông thường chúng ta có thể sử dụng cấu trúc điều khiển PID truyền thống áp dụng để điều khiển đối tượng mạch DC/DC boost. Mặc dù về mặt lý thuyết sai số tĩnh của hệ thống sử dụng bộ PID với tham số cố định vẫn sẽ tiệm cận 0 khi thời gian đủ lớn. Tuy nhiên, chất lượng động của hệ trong giai đoạn biến động về tải khó có thể kiểm soát và duy trì tốt [2, 3]. Để khắc phục vấn đề trên đã có khá nhiều giải pháp sử dụng nguyên lý điều khiển hiện đại, thông minh như: điều khiển mờ/neural, điều khiển bền vững, điều khiển thích nghi... để điều khiển mạch tăng áp một chiều đa mức. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một giải pháp điều khiển phản hồi trạng thái kết hợp với khâu tích phân hướng tới hai mục tiêu chính:

- Điều khiển mạch tăng áp một chiều đa mức làm việc ổn định khi đầu vào ở dải điện áp thấp (mạch có hệ số khuếch đại cao).

- Nâng cao chất lượng động, chất lượng tĩnh khi tải của hệ thống không ổn định.

Kết quả điều khiển được kiểm chứng qua mô hình mô phỏng vật lý trên phần mềm Matlab&Simulink đã thể hiện được ưu điểm của giải thuật khi điều khiển mạch tăng áp một chiều đa mức với tải biến động.

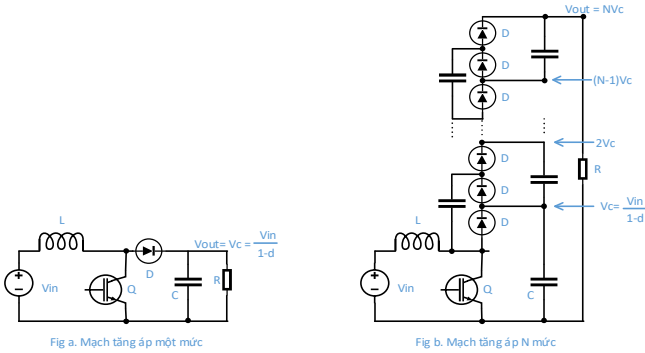
Bài báo được bố cục như sau: phần 2 thiết lập mô hình hệ thống, phần 3 thiết kế giải thuật điều khiển, phần 4 mô phỏng hệ thống và cuối cùng kết luận sẽ được đưa ra trong phần 5.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG MẠCH TĂNG ÁP MỘT CHIỀU ĐA MỨC

2.1. Mạch tăng áp một chiều đa mức

Mô hình hệ thống bao gồm mạch tăng áp một chiều thể hiện trên hình 1. Đối với mạch tăng áp N mức (hình 1b) các

tụ điện trong mạch đều bằng nhau. Mạch có $2N-1$ diode và $2N-1$ tụ C.



Hình 1. Mô hình mạch tăng áp DC/DC một mức và đa mức

Nguyên tắc hoạt động của mạch được nghiên cứu trong [6, 7] và đã được chỉ ra trong [9]. Đây là mạch được sử dụng để cấp nguồn cho bộ chuyển đổi đa mức có diode kẹp cung cấp có khả năng tự cân bằng điện áp một chiều liên kết. Trong bài báo này chúng tôi khảo sát đối tượng mạch tăng áp đa mức dưới mô hình không gian trạng thái với đầu vào là tín hiệu điều chế độ rộng xung d và đầu ra là điện áp V_{out} . Mô hình mạch được coi là lý tưởng (bỏ qua điện trở trên cuộn cảm và tụ điện, điện áp rơi trên các van bán dẫn bằng 0, tần số điều chế được xem là đủ lớn).

2.2. Mô hình toán học của đối tượng điều khiển

Mô hình của mạch tăng áp DC N mức trong chế độ xác lập tương tự như mô hình của mạch tăng áp DC một mức truyền thống. Giá trị điện áp trung bình của đầu ra được tính bởi (1).

$$V_{out} = \frac{N}{1-d} V_{in} \tag{1}$$

Trong đó: V_{in} , V_{out} , N và d lần lượt là điện áp đầu vào, điện áp đầu ra, số mức tăng áp của mạch và độ rộng điều chế van bán dẫn IGBT.

Dòng điện trung bình đầu ra tính theo (2).

$$I_{out} = \frac{1-d}{N} I_{in} \tag{2}$$

Mô hình động học trung bình của mạch tăng áp đa mức với các biến trạng thái là dòng điện trên cuộn cảm (I_{in}) và điện áp tại đầu ra (V_{out}) viết dưới dạng (3) hoặc (4).

$$\begin{cases} L \frac{dI_{in}}{dt} = -(1-d)V_{out} + NV_{in} \\ C \frac{dV_{out}}{dt} = (1-d)I_{in} - \frac{N}{R}V_{out} \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{in}}{dt} \\ \frac{dV_{out}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{N}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{in} \\ V_{out} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{out}}{L} & \frac{N}{L} \\ -\frac{1}{C}I_{in} & -0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ V_{in} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Từ (4) có thể nhận thấy đây là đối tượng phi tuyến tính. Thực hiện tuyến tính hóa hệ thống quanh điểm làm việc xác lập, khi đó tín hiệu điều khiển tính theo (5). Trong đó \bar{d}

và \hat{d} lần lượt là giá trị điều chế xác lập và giá trị điều chế dao động quanh điểm xác lập (hay còn gọi là tín hiệu nhỏ).

$$d = \bar{d} + \hat{d} \tag{5}$$

Mô hình xác lập tại điểm tuyến tính hóa được tính bởi (6).

$$\begin{cases} \bar{d} = \frac{V_{out} - NV_{in}}{V_{out}} \\ \bar{I}_{in} = \frac{N}{1-\bar{d}} \bar{I}_{out} \end{cases} \tag{6}$$

Từ (3), (4), (5) và (6) thu được mô hình tín hiệu nhỏ (7).

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{I}_{in}}{dt} \\ \frac{d\hat{V}_{out}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-\bar{d}}{L} \\ \frac{1-\bar{d}}{C} & -\frac{N}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{in} \\ \hat{V}_{out} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{out}}{L} & \frac{N}{L} \\ -\frac{I_{in}}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d} \\ \hat{V}_{in} \end{bmatrix} \tag{7}$$

Trong trường hợp nguồn cấp là lý tưởng ($\hat{V}_{in} = 0$) hoặc xem sự biến động của nguồn vào là nhiễu, khi đó mô hình tín hiệu nhỏ của mạch tăng áp đa mức có dạng (8) và (9).

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{I}_{in}}{dt} \\ \frac{d\hat{V}_{out}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ 0 & -\frac{1-\bar{d}}{L} \\ \frac{1-\bar{d}}{C} & -\frac{N}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{in} \\ \hat{V}_{out} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \frac{V_{out}}{L} & \frac{N}{L} \\ -\frac{I_{in}}{C} & 0 \end{bmatrix} \hat{d} \tag{8}$$

$$y(t) = \hat{V}_{out}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{in} \\ \hat{V}_{out} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{d} \tag{9}$$

3. THIẾT KẾ GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN PHẢN HỒI TRẠNG THÁI

Để triệt tiêu sai số tĩnh trong mô hình tín hiệu nhỏ sử dụng cấu trúc phản hồi trạng thái có thành phần tích phân. Khi đó mô hình tín hiệu nhỏ có dạng (10) và (11).

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{x}_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ x_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{d}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \tag{10}$$

$$y(t) = \hat{V}_{out}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ x_N(t) \end{bmatrix} \tag{11}$$

Giá trị điều khiển thành phần tín hiệu nhỏ.

$$\hat{d}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) - K_i x_N(t) = -[\mathbf{K} \quad K_i] \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ x_N(t) \end{bmatrix} \tag{12}$$

Từ (10) và (12), rút ra phương trình (13).

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{x}_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & \mathbf{BK}_i \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ x_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \tag{13}$$

Vector phản hồi xác định theo

$$\mathbf{K}^* = [0 \quad 0 \quad 1] \mathbf{Q}_C^{-1} \Delta_K (\mathbf{F}) \tag{14}$$

Trong đó

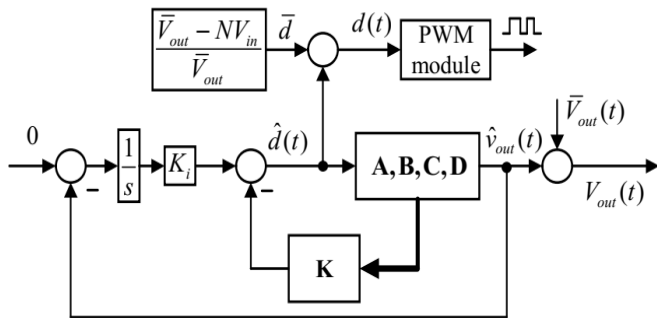
\mathbf{Q}_C^T là ma trận điều khiển được của hệ (1).

$$Q_c = [G \quad FG \quad F^2G]$$

Đa thức $\Delta_K(F)$

$$\Delta_K(F) = F^3 + a_1F^2 + a_2F + a_3I$$

Với a_i là hệ số của đa thức đặc trưng mong muốn, các hệ số trên phụ thuộc vào chất lượng động yêu cầu. Cấu trúc điều khiển phản hồi trạng thái của mạch tăng áp đa mức thể hiện trên hình 2. Chú ý rằng giá trị đặt của thành phần tín hiệu nhỏ bằng 0 nhằm mục đích điều khiển thành phần tín hiệu nhỏ về 0.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc hệ thống

4. MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

Hệ thống được mô phỏng dưới dạng mô hình vật lý với cấu trúc điều khiển số, qua đó phục vụ tốt công tác thiết kế và hiệu chỉnh hệ thống thực. Mô hình mô phỏng thể hiện trên hình 3 và 4. Tham số của hệ thống như sau:

- Cấu trúc mạch tăng áp DC 3 mức ($N = 3$).
- Mạch động lực: nguồn điện vào $V_{in} = 50V$; điện cảm $L = 5mH$; tụ điện $C = 100\mu F$; giá trị điện trở tải $R = 50\Omega$.
- Mạch điều khiển: thời gian lấy mẫu $T = 0,0001s$; thời gian xác lập được thiết kế $t_s = 0,2s$; lượng quá điều chỉnh $POT = 10\%$; tần số băm xung $f_{pwm} = 32kHz$.
- Tham số hệ thống xác lập khi điều khiển ở điện áp đầu ra $V_{out} = 300V$ với tải $R = 50\Omega$:

$$\begin{cases} \bar{d} = \frac{\bar{V}_{out} - N\bar{V}_{in}}{\bar{V}_{out}} = \frac{300 - 3 \times 50}{300} = 0,5 \\ \bar{I}_n = \frac{N}{1 - \bar{d}} \bar{I}_{out} = \frac{3}{1 - 0,5} \times \frac{300}{50} = 36A \end{cases} \quad (15)$$

Các ma trận mô tả hệ thống tuyến tính quanh điểm làm việc có giá trị:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -100 \\ 5000 & -600 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 60000 \\ -360000 \end{bmatrix}; C = [0 \quad 1]; D = 0 \quad (16)$$

4.1. Sơ đồ hệ thống và tham số bộ điều khiển

Từ yêu cầu chất lượng $t_s = 0,2s$ và $POT = 10\%$ có được cặp nghiệm trội là $s_{1,2} = -15 \pm i20,46$. Lựa chọn nghiệm thứ ba $s_3 = -60$, khi đó đa thức đặc tính mong muốn có dạng (17):

$$M(s) = s^3 + 90s^2 + 2443,6s + 38616 \quad (17)$$

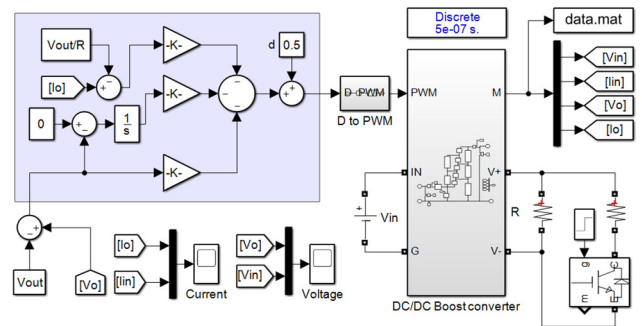
Ma trận trạng thái F và ma trận đầu vào G

$$F = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-\bar{d}}{L} & 0 \\ \frac{1-\bar{d}}{C} & -\frac{N}{RC} & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -100 & 0 \\ 5000 & -600 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (18)$$

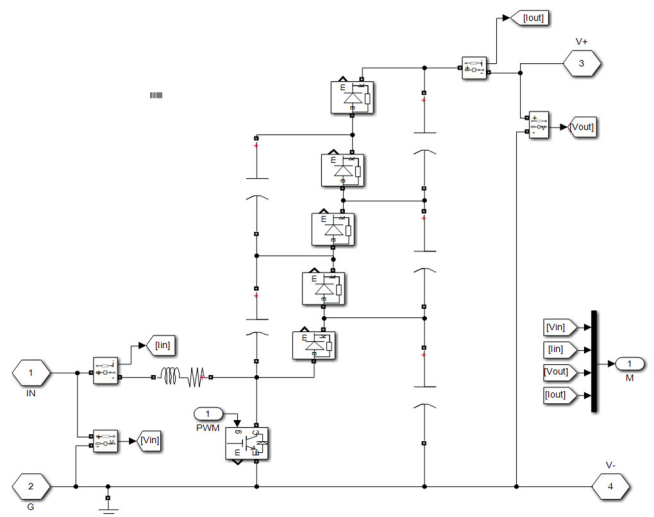
$$G = \begin{bmatrix} \frac{\bar{V}_{out}}{L} \\ -\frac{\bar{I}_n}{C} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 60000 \\ -360000 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Tính được vector phản hồi trạng thái có giá trị :

$$K = [K_1 \quad K_2 \quad K_3] = [-0,0076 \quad 0,0002 \quad -0,0001] \quad (19)$$



Hình 3. Hệ thống điều khiển mạch tăng áp một chiều với bộ phản hồi trạng thái



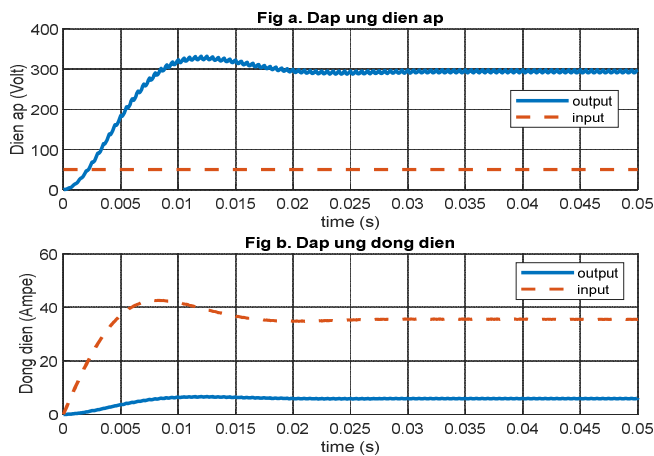
Hình 4. Mạch tăng áp DC ba mức

4.2. Mô phỏng hệ thống

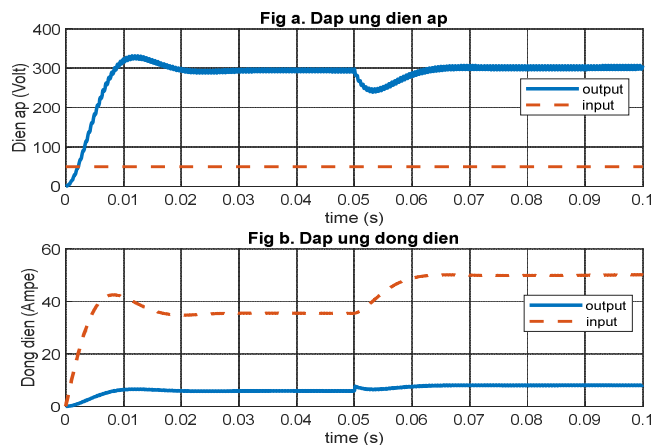
a) Khảo sát chế độ động

Hình 5 là kết quả mô phỏng hệ thống làm việc khi điện áp đặt là 300V, tải điện trở $R = 50\Omega$. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ ổn định với lượng quá điều chỉnh 15%, thời gian quá độ 0,017s. Giá trị điện áp trung bình bằng 300V. Giá trị điều khiển $d = 0,5$. Có thể thấy, với cấu trúc tăng áp đa mức

có thể nâng cao hệ số khuếch đại điện áp đầu ra, trong khi độ rộng điều chế nhỏ. Điều này cho phép ứng dụng mạch trong các hệ năng lượng mặt trời khi nguồn áp của các cell xuống mức thấp.



Hình 5. Đáp ứng của hệ thống khi điều khiển tại điện áp 300 V



Hình 6. Đáp ứng của hệ thống khi tải thay đổi đột ngột

b) Khảo sát chế độ động khi tải thay đổi

Hình 6 mô tả phản ứng của hệ thống khi tải thay đổi. Tại thời điểm tải R chuyển đột ngột từ 50Ω xuống 37,5Ω thì: 1) tính ổn định của hệ thống được bảo toàn; 2) giá trị trung bình xác lập không đổi; 3) tuy nhiên khi tải tăng quá lớn thì tín hiệu nhiễu tại đầu ra cũng tăng mạnh. Nguyên nhân xuất phát từ việc bộ điều khiển phản hồi trạng thái chỉ được tính toán dựa trên tuyến tính hóa quanh điểm làm việc. Chính vì vậy khi tải thay đổi dẫn đến thành phần tín hiệu nhiễu biến động. Để khắc phục nhược điểm này, cần dùng đến các giải thuật điều khiển thích nghi, fuzzy, neural... nhận dạng tham số hệ thống để cập nhật thông số bộ điều khiển online đảm bảo cho hệ có chất lượng động và chất lượng tĩnh tốt hơn.

5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Bài báo đã đề xuất một giải thuật điều khiển phản hồi trạng thái với khâu tích phân áp dụng điều khiển mô hình mạch tăng áp DC đa mức (3 mức). Kết quả mô phỏng trong điều kiện tải thay đổi hệ ổn định, khả năng tăng áp với hệ số

khuếch đại cao. Tuy nhiên hệ mới làm việc tốt ở trạng thái tải ổn định. Quá trình thay đổi tải sẽ ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng động, chất lượng tĩnh của mạch. Bước tiếp theo của nghiên cứu này là hướng tới phát triển một hệ thống nhận dạng online tham số tải, nguồn vào, giá trị đặt để thiết kế hệ thống hệ thống điều khiển thích nghi trên nền tảng cấu trúc điều khiển phản hồi trạng thái có khâu tích phân nhằm nâng cao chất lượng động và chất lượng tĩnh của mạch tăng áp đa mức.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Zina Elhajji, Khadija Dehri, Ziyad Bouchama, Ahmed Said Nouri, Najib Essounbouli, 2018. *Input-Output Discrete Integral Sliding Mode Controller for DC-DC Buck Converter*. 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD).

[2]. Reza Ilka, S. Asghar Gholamian, Behrouz Rezaie, Alireza Rezaie, 2012. *Fuzzy Control Design for a DC-DC Buck Converter based on Recursive Least Square Algorithm*. International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA) Vo2, No.6.

[3]. S. A, Emami, M. Bayati Poudeh, S. Eshtehardiha, M. Moradiyan, 2008. *An Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for DC-DC Converter*. International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Korea.

[4]. Neal Zhang, Daniel Li, 2019. *Loop Response Considerations in Peak Current Mode Buck Converter Design*. SLVAE09A - July 2018.

[5]. Ricky Yang, 20180 *Modeling and Control for a Current-Mode Buck Converter with a Secondary LC Filter*. Analog Dialogue 52-10.

[6]. Vishnu Dev, 2015. *Modelling and Adaptive control of a DC-DC Buck converter*. Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela.

AUTHORS INFORMATION

Quach Duc Cuong, Kieu Xuan Thuc, Bui Van Huy, Nguyen Luong Thanh
Hanoi University of Industry, Vietnam