

THIẾT KẾ GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN PID THÍCH NGHI CHO BỘ NGUỒN MỘT CHIỀU DÒNG - ÁP TÍCH HỢP

THE DESIGN OF THE ADAPTIVE PID CONTROLLER FOR A DC CURRENT -VOLTAGE SUPPLY

Kiểu Xuân Thực, Quách Đức Cường*

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu vấn đề thiết kế một bộ nguồn một chiều tích hợp hai chức năng nguồn dòng và nguồn áp trên cùng một thiết bị. Hệ thống được thiết kế sử dụng mạch giảm áp một chiều điều khiển bởi giải thuật điều khiển PID thích nghi để đảm bảo tính ổn định khi tải thay đổi và đồng thời cho phép nâng cao chất lượng động, chất lượng tĩnh so với giải thuật điều khiển PID truyền thống. Kết quả mô phỏng đã minh chứng khả năng điều khiển với chất lượng vượt trội của cấu trúc và giải thuật đề xuất.

Từ khóa: Mạch giảm áp một chiều; PID thích nghi; nguồn dòng; nguồn áp.

ABSTRACT

This paper introduces the problem of designing a DC power supply with both current and voltage source functions. The system uses an adaptive PID control algorithm to ensure stability with large changes of load and improvement of control quality. Simulation results demonstrate the outstanding control abilities as well as control qualities of the proposed solution.

Keywords: DC-DC BUCK converter; Adaptive PID; current source; voltage source.

Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: quachcuong304@gmail.com

Ngày nhận bài: 25/01/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/6/2020

Ngày chấp nhận đăng: 23/12/2020

KÝ HIỆU

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

Adap-PID	Bộ điều khiển PID thích nghi
SISO	Hệ thống một đầu vào, một đầu ra
DC	Điện một chiều

1. GIỚI THIỆU

Nguồn một chiều sử dụng mạch giảm áp một chiều (DC/DC buck converter) được sử dụng khá phổ biến trong lĩnh vực công nghiệp và dân dụng vì chúng có kích thước

nhỏ gọn, công suất lớn và chất lượng cao [1, 2-4]. Tùy thuộc điện áp hay dòng điện cần được ổn định hoặc điều chỉnh được, ta có hai loại nguồn một chiều là nguồn áp và nguồn dòng. Tuy nhiên trong thực tế có những trường hợp cần có bộ nguồn một chiều có cả hai chức năng của nguồn áp và của nguồn dòng. Ví dụ thiết bị sạc acqy: giai đoạn đầu sạc ở chế độ ổn dòng, khi acqy đầy khoảng 90% thiết bị chuyển sang làm việc ở chế độ sạc ổn áp sau đó sạc ở chế độ bù. Khi đó, một bộ điều khiển PID có tham số cố định sẽ không hiệu quả trong quá trình điều khiển và khống chế mạch công suất. Ngoài ra, nếu như tải thay đổi, mô hình toán học của hệ thống cũng thay đổi cũng sẽ ảnh hưởng đến đáp ứng của hệ. Mặc dù về mặt lý thuyết với bộ PID có tham số cố định, sai số tĩnh của hệ vẫn sẽ tiệm cận 0. 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 giảm áp một chiều. Trong bài báo này chúng tôi đề xuất một giải pháp sử dụng bộ điều khiển PID thích nghi (Adap-PID) hướng tới hai mục tiêu chính:

- Điều khiển mạch giảm áp một chiều làm việc ở hai chế độ: nguồn áp và nguồn dòng.
- Điều khiển ổn định và 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 rời rạc trên phần mềm Matlab&Simulink đã thể hiện được ưu điểm của giải thuật Adap-PID khi điều khiển mạch giảm áp một chiều với tải biến động và hoạt động trong cả hai chế độ nguồn áp, nguồn dòng.

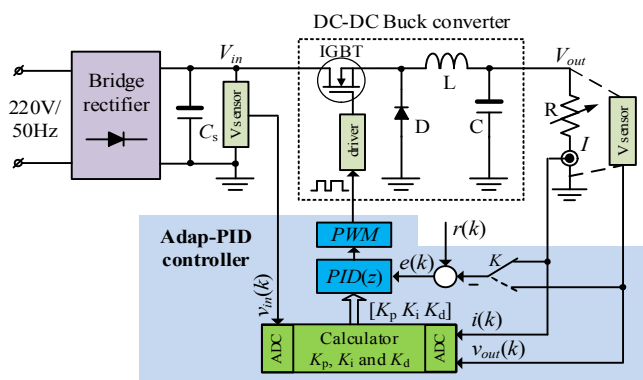
Bài báo trình bày theo trình tự sau: phần 2 thiết lập mô hình hệ thống, phần 3 thiết kế giải thuật điều khiển Adap-PID, phần 4 mô phỏng hệ thống và cuối cùng kết luận sẽ được đưa ra trong phần 5.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG MẠCH GIẢM ÁP MỘT CHIỀU

2.1. Hệ thống điều khiển mạch giảm áp một chiều

Mô hình hệ thống bao gồm mạch giảm áp một chiều, bộ điều khiển Adap-PID được cập nhật tham số thông qua khâu tính toán online các tham số K_p , K_i và K_d . Tham số K_p , K_i và K_d được tính qua thông số mạch điện và giá trị các tín

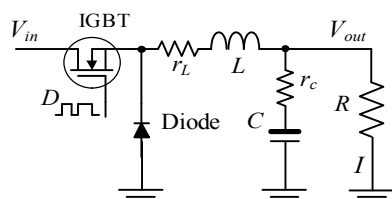
hiệu điện áp, dòng điện V_{in} , V_{out} I trong mạch (hình 1). Hệ làm việc ở chế độ nguồn dòng/nguồn áp thông qua khóa chuyển đổi K. Tham số điện trở R có thể thay đổi được để tạo ra các tình huống thử nghiệm mạch có tham số mô hình biến đổi.



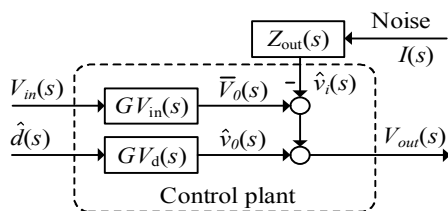
Hình 1. Mô hình thử nghiệm giải thuật Adap-PID cho mạch giảm áp một chiều

Quá trình hoạt động của mạch, đặc biệt ở trạng thái dòng điện lớn, điện áp cao thì điện áp đầu vào sẽ biến động (do tụ lọc C_s không đủ lớn) đồng thời nếu như tải thay đổi đột ngột (mô hình hệ thống thay đổi) thì các đáp ứng đầu ra $v_{out}(k)$, $i(k)$ sẽ bị ảnh hưởng. Sai số tĩnh và khả năng ổn định nhanh của hệ bị suy giảm. Cấu trúc Adap-PID trên hình 1 được kỳ vọng sẽ có khả năng nâng cao chất lượng động, chất lượng tĩnh khi hệ hoạt động ở trạng thái nguồn dòng/nguồn áp trong điều kiện nguồn V_{in} và tải R không ổn định.

2.2. Mô hình toán học của đối tượng điều khiển



Hình 2. Mạch giảm áp một chiều



Hình 3. Sơ đồ khối mạch giảm áp một chiều

Mô hình của mạch giảm áp một chiều xét trong chế độ dòng điện liên tục được mô tả trên hình 2 và 3. Chúng được coi là hệ SISO và hàm truyền đạt được xác định như sau [1, 2, 5, 6]:

$$GV_d(s) = \frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{d}(s)} = V_{in} \times \frac{r_c Cs + 1}{LC \left(\frac{r_c + R}{r_l + R} \right) s^2 + \left(r_c C + \frac{r_l RC}{r_l + R} + \frac{L}{r_l + R} \right) s + 1} \tag{1}$$

$$GV_{in}(s) = \frac{\bar{V}_0(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\bar{D}R}{r_l + R} \times \frac{r_c Cs + 1}{LC \left(\frac{r_c + R}{r_l + R} \right) s^2 + \left(r_c C + \frac{r_l RC}{r_l + R} + \frac{L}{r_l + R} \right) s + 1} \tag{2}$$

$$Z_{out}(s) = \frac{\hat{v}_i(s)}{I(s)} = \frac{r_c R}{r_c + R} \times \frac{(LCs + r_l C)(LCs + L/r_c)}{LCs^2 + \left(r_l C + \frac{r_l RC}{r_c + R} + \frac{L}{r_c + R} \right) s + \frac{r_l + R}{r_c + R}} \tag{3}$$

Tín hiệu điều chế cho mạch:

$$D = \bar{D} + \hat{d} \tag{4}$$

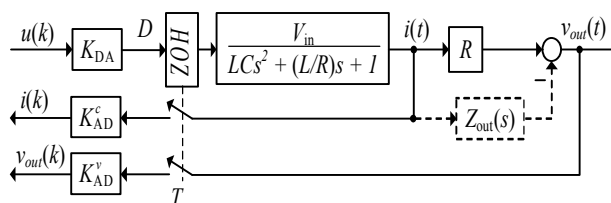
Trong đó: D, R, r_c , C, r_l , L và V_{in} lần lượt là độ rộng điều chế van IGBT, điện trở tải, điện trở tụ, điện dung tụ, điện trở cuộn cảm, điện cảm và điện áp đầu vào. Có thể thấy mô hình hệ thống phụ thuộc các tham số khó xác định chính xác như: điện trở tụ điện r_c , điện cảm L và các tham số biến động theo trạng thái làm việc của hệ như: độ rộng điều chế D, điện trở tải R và thậm chí cả điện áp nguồn cấp V_{in} . Các giá trị $\hat{v}_0(s)$, $\bar{V}_0(s)$ và $\hat{v}_i(s)$ lần lượt đóng vai trò là các thành phần dao động nhỏ, thành phần xác lập và nhiễu (phụ thuộc tải) trong mạch. Nếu coi: 1) điện trở tụ điện và điện trở cuộn cảm là vô cùng bé ($r_c \approx 0$, $r_l \approx 0$); 2) ảnh hưởng của dòng điện tải lên đáp ứng điện áp đầu ra được xem là nhiễu; 3) chỉ xét vai trò của $\hat{v}_0(s)$ và $\bar{V}_0(s)$ trong quá trình điều khiển; 4) V_{in} đóng vai trò của một tham số biến động trong hệ, từ đó hợp nhất hóa (1) và (2) thì hàm truyền đạt của hệ ở chế độ nguồn áp có dạng (5).

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{D(s)} \approx V_{in} \times \frac{R}{RLCs^2 + Ls + R} \tag{5}$$

Nếu xét ở chế độ nguồn dòng thì hàm truyền đạt có dạng (6).

$$G(s) = \frac{I(s)}{D(s)} \approx V_{in} \times \frac{1}{RLCs^2 + Ls + R} \tag{6}$$

Từ (5) và (6) có thể thấy mô hình nguồn áp và mô hình nguồn dòng trong trường hợp tải thuần trở có đặc tính động học như nhau. Tuy nhiên hệ số khuếch đại vòng hở của chúng là khác nhau. Từ (5), (6) mô tả hệ thống rút gọn dưới dạng lượng tử hóa nhằm mục đích thiết kế hệ thống dưới dạng xử lý rời rạc/xử lý số, ta có mô hình đối tượng như trên hình 4.



Hình 4. Sơ đồ mô hình đối tượng điều khiển trong hệ thống điều khiển số

3. THIẾT KẾ GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN PID THÍCH NGHI

Bộ điều khiển PID thiết kế theo phương pháp triệt tiêu mẫu áp dụng cho đối tượng có dạng (5) và (6) được xác định theo (7).

$$PID(s) = K \left(\frac{L}{R} + \frac{1}{s} + LCs \right) \tag{7}$$

Mô tả (7) dưới dạng rời rạc với chu kỳ lấy mẫu T:

$$PID(z) = K \left(\frac{L}{R} + \frac{Tz+1}{2z-1} + LC \frac{z-1}{Tz} \right) \tag{8}$$

Hệ số khuếch đại K được xác định theo lượng thời gian xác lập t_s và hệ số khuếch đại vòng hở của đối tượng điều khiển.

$$K = \begin{cases} 3 / (t_s V_{in} K_{AD}^V K_{DA}) & ; \text{voltage source} \\ 3R / (t_s V_{in} K_{AD}^C K_{DA}) & ; \text{current source} \end{cases} \tag{9}$$

Nếu hệ thống có mô hình chính xác, tải không biến đổi theo thời gian ($R = \text{const}$) thì hoàn toàn có thể xác định được tham số bộ điều khiển PID để hệ ổn định và có chất lượng động, chất lượng tĩnh mong muốn. Tuy nhiên trong thực tế nhiều trường hợp tải biến động, nguồn cũng không cố định (chế độ nguồn áp, chế độ nguồn dòng) do vậy những bộ điều khiển PID truyền thống có thể không đạt được chất lượng động và chất lượng tĩnh theo yêu cầu. Để giải quyết tình huống trên, có thể sử dụng mạng tính toán online các tham số K, R thông qua giá trị điện áp vào $v_{in}(k)$, điện áp ra $v_{out}(k)$ và dòng điện tải $i(k)$ để cập nhật cho bộ điều khiển PID như trong (10).

$$K(k) = \begin{cases} 3 / (t_s v_{in}(k) K_{AD}^V K_{DA}) & ; \text{voltage source} \\ 3R / (t_s v_{in}(k) K_{AD}^C K_{DA}) & ; \text{current source} \end{cases} \tag{10}$$

$$R(k) = v_{out}(k) / i(k) = (K_{AD}^C v_{out}(k)) / (K_{AD}^V i(k))$$

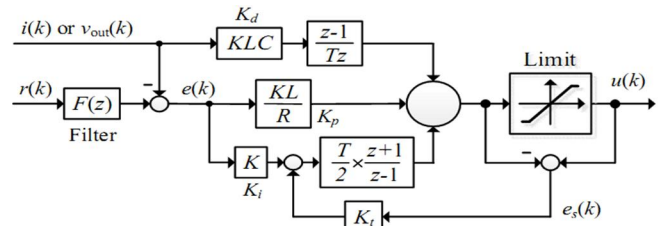
Từ (8), (9) và (10) có được tham số bộ Adap-PID cập nhật trong miền rời rạc với chu kỳ T như trong (11):

$$PID^*(z) = \begin{cases} \frac{3}{t_s v_{in}(k) K_{AD}^V K_{DA}} \left(\frac{Li(k)}{v_{out}(k)} + \frac{Tz+1}{2z-1} + LC \frac{z-1}{Tz} \right) & ; \text{voltage source} \\ \frac{3v_{out}(k)}{t_s v_{in}(k) i(k) K_{AD}^C K_{DA}} \left(\frac{Li(k)}{v_{out}(k)} + \frac{Tz+1}{2z-1} + LC \frac{z-1}{Tz} \right) & ; \text{current source} \end{cases} \tag{11}$$

Đối với các nguồn điện, lượng quá điều chỉnh của đáp ứng ra (dòng điện hoặc điện áp) cần được giám sát và có cơ chế khống chế tham số này đảm bảo an toàn thiết bị. Trong trường hợp này sử dụng các giải pháp như khởi động mềm

và sử dụng cấu trúc PID có chức năng anti-windup để hạn chế lượng quá điều chỉnh (hình 5). Hệ số phản hồi K_i trong sơ đồ PID có chức năng anti-windup được xác định thông qua (12).

$$K_i(k) = \sqrt{\frac{K_i}{K_d}} = \sqrt{\frac{R(k)}{L}} = \sqrt{\frac{v_{out}(k)}{Li(k)}} \tag{12}$$



Hình 5. Bộ điều khiển PID có chức năng Anti-Windup

4. MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

Hệ thống được mô phỏng dưới dạng mô hình vật lý với cấu trúc điều khiển số để kết quả mô phỏng tiệm cận với kết quả trên hệ thống thực tế, qua đó phục vụ tốt công tác thiết kế và hiệu chỉnh hệ thống thực. Mô hình mô phỏng thể hiện trên hình 6, 7 và 8. Tham số của hệ thống như sau:

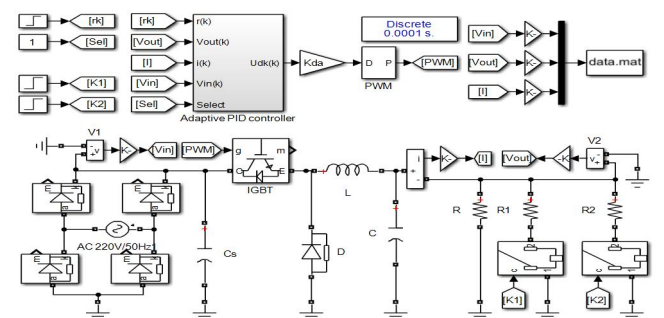
- Mạch động lực: nguồn điện AC 220V/50Hz; tụ lọc nguồn $C_s = 4.700\mu F$; điện cảm $L = 10 \text{ mH}$; tụ điện $C = 1.880 \mu F$; giá trị điện trở tải R thay đổi tùy thuộc vào các trường hợp mô phỏng.

- Mạch điều khiển: thời gian lấy mẫu $T = 0,0001s$; thời gian xác lập được thiết kế $t_s = 0,01s$; tần số băm xung $f_{pwm} = 40kHz$; bộ lọc khởi động mềm là khâu quán tính bậc 1 có hằng số thời gian là $0,02s$;

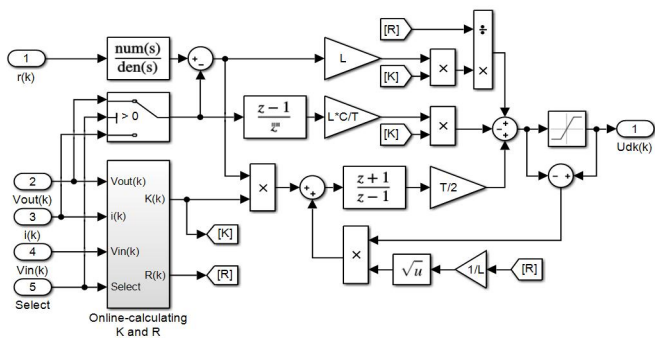
- Hệ số lượng tử hóa của các khâu ADC/DAC có độ phân giải 12-bit: đối với khâu dòng điện $K_{AD}^C = 4095/20$; khâu điện áp $K_{AD}^V = 4095/350$; khâu điều chế độ rộng xung 12-bit $K_{DA} = 1/4095$

- Quá trình mô phỏng sẽ so sánh kết quả điều khiển trúc giải thuật điều khiển Adap-PID được đề xuất và đáp ứng của hệ có tham số PID cố định. Tham số bộ PID được xác định ứng với trường hợp tải $R = 25\Omega$ và $V_{in} = 310V$. Từ (7), (8) và (9) có tham số bộ điều khiển PID như trong (13):

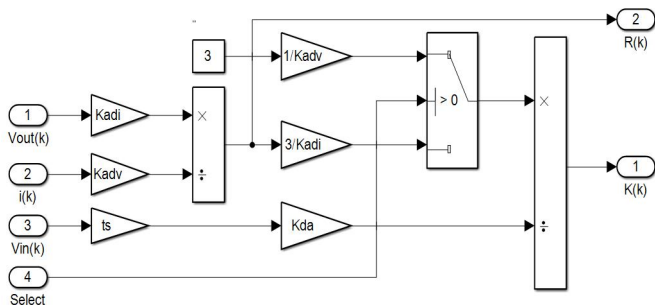
$$PID(z) = \begin{cases} \frac{63,83 - 127,47z^{-1} + 63,68z^{-2}}{1 - z^{-1}} & ; \text{voltage source} \\ \frac{1595,75 - 3186,75z^{-1} + 1592,00z^{-2}}{1 - z^{-1}} & ; \text{current source} \end{cases} \tag{13}$$



Hình 6. Sơ đồ mô phỏng hệ thống điều khiển mạch giảm áp một chiều

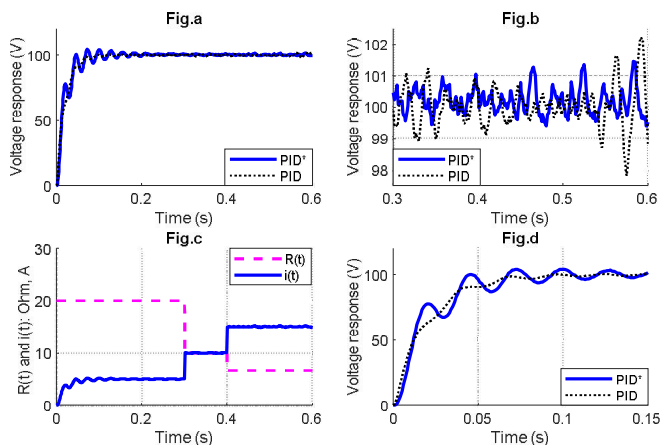


Hình 7. Bộ điều khiển thích nghi PID cho hệ thống tích hợp nguồn dòng/áp

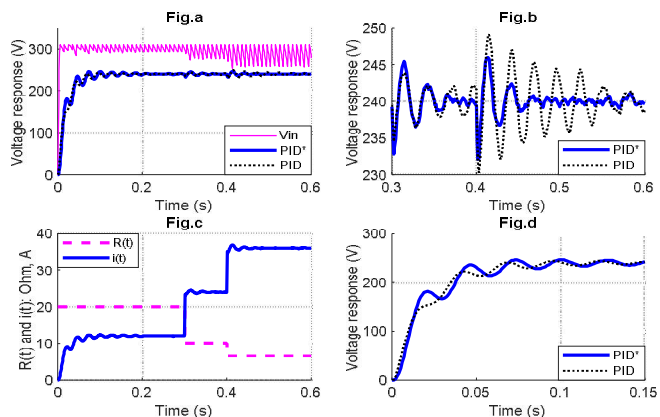


Hình 8. Mạng tính toán online hệ số khuếch đại K của đối tượng và điện trở tải

4.1. Mô phỏng hệ thống ở chế độ nguồn áp



Hình 9. Đáp ứng của hệ thống khi điều khiển tại điện áp 100V

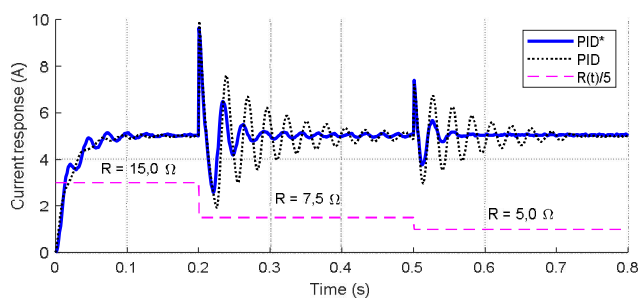


Hình 10. Đáp ứng của hệ thống khi điều khiển tại điện áp 240V

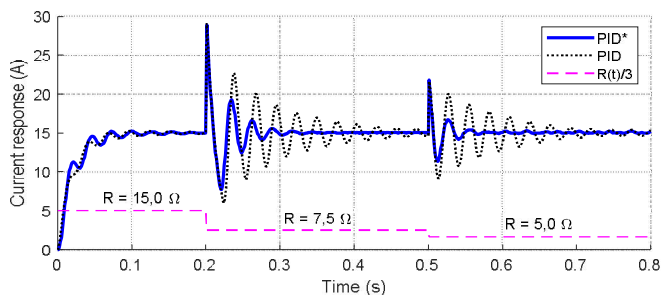
Hình 9 và 10 là kết quả mô phỏng hệ thống làm việc ở chế độ nguồn áp khi điện trở tải thay đổi theo 3 mức: 20Ω (từ 0 đến 0,3s); 10Ω (từ 0,3 đến 0,4s) và 6,67Ω (từ 0,4 đến 0,6s) như trên hình 9c và 10c.

Có thể nhận thấy trong chế độ điều khiển điện áp, đáp ứng quá độ của hệ đạt lượng quá điều chỉnh 3%, thời gian quá độ 0,1s (hình 9d và 10d). Quá trình quá độ khi tải thay đổi của hệ Adap-PID tốt hơn so với hệ PID thông thường: i) thời gian xác lập của hệ Adap-PID đạt 0,1s so với hệ PID thông thường là 0,6s; ii) sai số ở trạng thái xác lập của hệ Adap-PID là 1V so với 3V của hệ PID thông thường (hình 9b và 10b). Trên hình 10 cho thấy khi hệ làm việc ở điện áp cao, dòng điện lớn (từ 0,4 đến 0,6s) do dung lượng tụ C_s không đủ lớn dẫn tới điện áp vào V_{in} thay đổi khá mạnh và làm thay đổi hệ số khuếch đại vòng hở của hệ. Trong tình huống này phản ứng của hệ Adap-PID khá tốt (hình 10b), sai số tính nhỏ và khoảng thời gian biến động được rút ngắn.

4.2. Mô phỏng hệ thống ở chế độ nguồn dòng



Hình 11. Đáp ứng của hệ khi điều khiển ở chế độ dòng điện 5A



Hình 12. Đáp ứng của hệ khi điều khiển ở chế độ dòng điện 15A

Mô phỏng nguồn dòng được thực hiện khi tải thay đổi theo 3 mức 15,0Ω (từ 0 đến 0,2s), 7,5Ω (từ 0,2 đến 0,5s) và 5,0Ω (từ 0,5 đến 0,8s). Kết quả điều khiển đáp ứng dòng điện ở mức 5A và 15A thể hiện trên hình 11 và 12.

Kết quả mô phỏng cho thấy ở cả miền dòng điện thấp lẫn dòng điện cao, hệ thống có chất lượng động tốt, thời gian xác lập ngắn, mức độ dao động ít khi tải biến động. Đồng thời đảm bảo sai số tĩnh tiệm cận 0 trong khoảng thời gian 0,1s.

5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Bài báo đã trình bày đề xuất một giải thuật Adap-PID cho mô hình mạch giảm áp một chiều làm việc trong hai chế độ nguồn dòng và nguồn áp. Kết quả mô phỏng trong điều kiện tải thay đổi, điện áp nguồn biến động cho thấy điện áp/dòng điện đầu ra vẫn bám theo tín hiệu yêu cầu.

So sánh giải pháp Adap-PID và PID truyền thống (tham số cố định) cho thấy hệ điều khiển theo cấu trúc Adap-PID có chất lượng động, chất lượng tĩnh tốt hơn hẳn (hình 9b, 10b, 11 và 12). Đặc biệt tại các điểm chuyển đổi giá trị tải quá trình động của hệ với cấu trúc Adap-PID hội tụ nhanh với mức độ dao động thấp. Như vậy khả năng điều khiển tích hợp nguồn dòng, nguồn áp trên một mạch giảm áp một chiều của bộ Adap-PID là khả thi. Bước tiếp theo của nghiên cứu này là hướng tới phát triển hệ thống điều khiển điện áp/dòng điện mạch giảm áp một chiều có tốc độ phản ứng nhanh và sai số tĩnh nhỏ.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin chân thành gửi lời cảm ơn Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã hỗ trợ trong quá trình nghiên cứu.

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, 2018. *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

Kieu Xuan Thuc, Quach Duc Cuong

Hanoi University of Industry