

# ĐIỀU KHIỂN FEED-FORWARD KẾT HỢP PI TUYẾN TÍNH CHO THIẾT BỊ ỔN ĐỊNH ĐIỆN ÁP TỰ ĐỘNG ĐỂ CẢI THIỆN CHẤT LƯỢNG ĐIỆN NĂNG

## COMBINED FEED-FORWARD AND LINEAR PI CONTROL METHOD FOR AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR TO IMPROVE POWER QUALITY

Lê Phương Hào\*, Nguyễn Thị Thắm

Trường Đại học Hồng Đức, Việt Nam<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: lephuonghao@hdu.edu.com

(Nhận bài / Received: 20/3/2024; Sửa bài / Revised: 25/6/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 24/9/2024)

**Tóm tắt** - Việc nâng cao chất lượng điện cho phụ tải hạ áp luôn được quan tâm nhằm đảm bảo chất lượng điện năng tốt nhất cho các phụ tải nói chung và các phụ tải đặc điện nói riêng. Bài báo này giới thiệu phương pháp điều khiển feed-forward kết hợp điều khiển PI tuyến tính áp dụng cho thiết bị ổn áp tự động điều chỉnh giá trị điện áp cung cấp cho phụ tải dân dụng. Mục đích của việc này là nâng cao hiệu quả sử dụng điện của các thiết bị điện hạ áp ở cấp điện áp 220V, quá trình điều chỉnh được thực hiện trong phạm vi điện áp đầu vào có giá trị thấp nhất là 170V, giá trị cao nhất là 290V. Kết quả giá trị điều chỉnh để cung cấp cho tải luôn được khống chế nằm trong phạm vi 210 đến 230V. Với giá trị này độ lệch điện áp luôn nằm trong phạm vi dưới 5%. Các kết quả mô phỏng trên matlab/simulink và thực nghiệm đã chứng minh được hiệu quả của thuật toán đề xuất cho mô hình thiết bị.

**Từ khóa** - Ổn áp điện tử; tự động điều chỉnh điện áp; điều khiển ổn áp điện tử

### 1. Đặt vấn đề

Hiện nay, nhu cầu dùng điện của mỗi hộ gia đình hiện nay cũng ngày một lớn làm gia tăng gánh nặng cho hệ thống cung cấp điện [1, 3]. Các phụ tải có xu hướng sử dụng điện không đồng đều ở các giờ cao điểm, dẫn đến tình trạng chập chờn điện áp. Ổn áp là một thiết bị được thiết kế để tự động duy trì điện áp đầu ra không đổi khi điện áp đầu vào thay đổi trong dải hoạt động cho phép [1, 2]. Các ổn áp hiện nay có chức năng bảo vệ quá tải, quá áp, tự động ngắt mạch như một thiết bị bảo vệ cho tải đầu ra. Ở Việt Nam sử dụng điện áp 220V – 50Hz. Tuy nhiên, do nhiều ảnh hưởng của các tải phi tuyến hoặc mất cân bằng điện áp các pha, nên các dải điện áp đầu vào thường bị dao động, và bị lệch khỏi giá trị 220V [3]. Dải điện áp đầu vào càng rộng thì thiết bị ổn áp càng công kênh và đắt tiền [2, 4]. Ngày nay, có nhiều thiết bị ổn áp đã được chế tạo và đưa vào sử dụng như: Ổn áp rơ le nhảy cấp (supvoter); Ổn áp sử dụng servo motor... [1]. Tuy nhiên các loại ổn áp này có nhiều nhược điểm chưa thể khắc phục được như: thời gian tác động nhanh chậm phụ thuộc nhiều vào sự chênh lệch điện áp đầu vào so với điện áp chuẩn do độ trễ của bộ chuyển mạch, điện áp đầu ra bị nhảy cấp, độ tin cậy thấp, điện áp đầu ra bị gián đoạn trong quá trình chuyển mạch, phát ra âm thanh khi hoạt động, cần bảo trì thường xuyên các tiếp điểm, đồng thời gây ra tổn hao điện năng [4, 6]. Để khắc phục nhược điểm của các thiết bị ổn áp, bài báo đề xuất cấu trúc ổn áp điện tử mới sử dụng bộ biến đổi (BBĐ) điện tử công suất có thời gian đáp ứng nhanh, thuật toán điều khiển tối ưu để giúp hệ thống hoạt

**Abstract** - Improving power quality for low-voltage loads is always of concern to ensure the best power quality for loads. This article introduces the feed-forward control method combined with linear PI control applied to voltage stabilizers that automatically adjust the voltage value supplied to residential loads. The purpose of this is to improve the efficiency of electricity use of low voltage electrical equipment at the 220V voltage level, the adjustment process is carried out within the input voltage range with the lowest value of 170V, and the highest value is 290V. As a result, the adjustment value to supply the load is always controlled within the range of 210 to 230V. With this value, the voltage deviation is always within the range of less than 5%. Simulation results on matlab/simulink and experiments have proven the effectiveness of the proposed algorithm for the device model.

**Key words** - Electronic voltage stabilizer; automatic voltage adjustment; electronic voltage stabilizer control

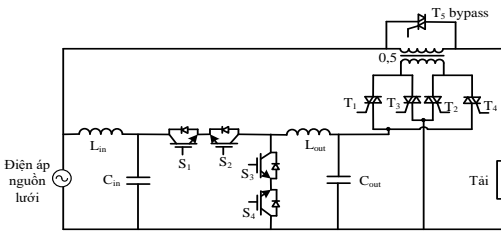
động với độ chính xác cao, thời gian ổn áp nhanh, hiệu suất sử dụng năng lượng tốt. Cấu tạo của thiết bị này gồm máy biến áp cách ly, BBĐ điện áp xoay chiều, mạch điều khiển. Về hoạt động, BBĐ điện tử công suất nhận điện áp từ lưới, sau đó biến đổi thành một điện áp có độ lớn phù hợp cùng pha với điện áp lưới, nhờ bộ điều khiển tác động để điều chỉnh góc pha cho phù hợp trong các trường hợp làm việc. Sau đó, lượng điện áp bù này được bổ sung vào điện áp nguồn thông qua một máy biến áp (MBA) được mắc nối tiếp với lưới, giúp đảm bảo điện áp đầu ra phía tải luôn ổn định trong ngưỡng cho phép. Tuy có thiết kế phức tạp hơn các loại ổn áp khác cùng công suất, nhưng không phải bảo dưỡng hao mòn, thời gian điều chỉnh nhanh ( $\leq 20\text{ms}$ ), tính ổn định và chính xác cao, không phát ra âm thanh khi hoạt động và ít tổn hao trên lõi sắt máy biến áp. Để đạt được những yêu cầu này, bài báo đề xuất thuật toán điều khiển feed-forward kết hợp điều khiển PI tuyến tính. Mục đích là nâng cao thời gian đáp ứng mà vẫn triệt tiêu được sai lệch tính để đạt được giá trị điều khiển như mong muốn. Trong đó, bộ điều khiển feed-forward có tác dụng làm cho hệ thống tác động nhanh và loại bỏ các nhiễu [7], còn bộ điều khiển PI có tác dụng triệt tiêu các sai lệch tính của tín hiệu thực so với tín hiệu mong muốn [8]. Từ những ưu việt của bộ ổn áp điện tử, trong bài báo này sẽ thiết kế cho bộ ổn áp 1 pha công suất 10kVA tần số 50Hz, điện áp ra 210-230VAC, dải đầu vào từ 150-290VAC. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm được trình bày trong phần 5 đã chứng minh được tính đúng đắn của thuật toán đề xuất.

<sup>1</sup> Hong Duc University, Viet Nam (Le Phuong Hao, Nguyen Thi Tham)

**2. Cấu tạo, hoạt động của ổn áp tự động**

**2.1. Cấu tạo thiết bị ổn áp tự động**

Mô hình ổn áp tự động được thể hiện như Hình 1, đây là mô hình BBD AC/AC có các thành phần để ổn định điện áp phía đầu ra. Cấu tạo đầy đủ của bộ ổn áp tự động sẽ kết hợp BBD AC-AC với mạch cầu H gồm 4 van triac để đảo pha điện áp bù trong trường hợp điện áp cao, sau đó qua máy biến áp cách ly để bù vào điện áp nguồn. Van Triac Bypass hoạt động khi điện áp nguồn ổn định thì hệ thống bù điện áp sẽ dừng hoạt động, van Bypass sẽ nối tắt điện áp nguồn ra tải khi thiết bị điện dùng trực tiếp nguồn từ lưới điện, giảm tổn thất trên các BBD và máy biến áp.

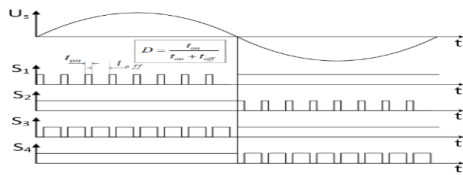


**Hình 1.** Sơ đồ nguyên lý bộ AC-AC

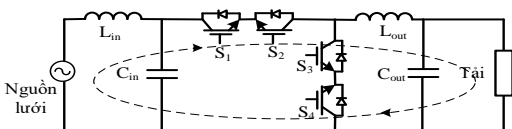
BBD điện áp xoay chiều AC/AC có thể coi là phần quan trọng nhất của ổn áp tự động, vì nó có nhiệm vụ tạo điện áp bù khi điện áp nguồn dao động. Sơ đồ này có cấu tạo đơn giản, tin cậy, hiệu suất cao, đặc biệt là không cần đồng bộ pha điện áp lưới, không cần tới khâu chỉnh lưu DC, chỉ tạo được điện áp đồng pha với điện áp nguồn. Máy biến áp cách ly nối tiếp với lưới, giúp đưa điện áp bù vào lưới. Mạch lọc LC:  $L_{in}$ ,  $C_{in}$  giúp dòng điện đầu vào có dạng hình sin, qua đó giảm thiểu sóng hài gây ra cho lưới điện. Cuộn cảm  $L_{out}$ , tụ điện  $C_{out}$  giúp biến đổi điện áp đầu ra bộ biến đổi AC-AC từ dạng băm xung thành dạng hình sin trước khi đưa vào máy biến áp làm giảm hao tổn máy biến áp.

**2.2. Nguyên lý hoạt động**

Các van bán dẫn IGBT của ổn áp tự động được điều khiển bởi các xung PWM thể hiện như Hình 2 để cho đầu ra có dạng sóng giống với dạng sóng đầu vào. Thực hiện bằng cách điều chỉnh hệ số điều chế D của xung PWM.



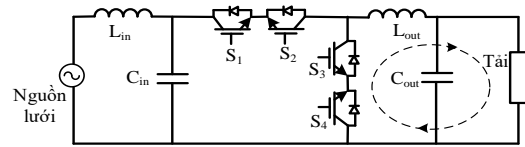
**Hình 2.** Giản đồ xung cấp cho các van IGBT



**Hình 3.** Mạch vòng dòng điện khi van S1-S2 dẫn

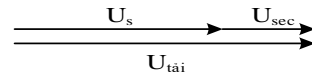
Trong nửa chu kỳ dương của lưới, van S2 luôn dẫn, xung điều chế PWM được cấp cho S1, S2 dẫn liên tục để giảm tổn hao dẫn của diode. Đồng thời, tín hiệu điều chế cấp cho van S4 là tín hiệu đảo pha của tín hiệu S1. Khi van S1 dẫn, dòng điện đi qua van S1-S2 qua  $L_{out}$  và đi vào tải là cuộn sơ cấp máy biến áp bù như trên Hình 3. Chu kỳ phát xung tiếp theo, van S1 khóa, do tính chất của cuộn cảm, dòng điện duy trì qua tải thông qua cặp van S3-S4.

Lúc này, van S3 dẫn, nên việc đóng ngắt dòng điện này được điều khiển bởi van S4. Van S3 được mở suốt chu kỳ để giảm tổn hao dẫn của diode. Dòng điện duy trì qua tải như Hình 4.



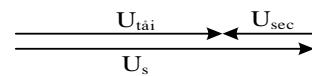
**Hình 4.** Mạch vòng dòng điện khi van S1-S2 dẫn

Tương tự như vậy đối với nửa chu kỳ âm của điện áp lưới. Điện áp ra tải được phép dao động trong khoảng 5% nên điện áp nguồn đầu vào từ 210-230VAC thì BBD AC-AC sẽ không hoạt động. Lúc này điện áp tải sẽ được nối trực tiếp với điện áp nguồn nhờ van Bypass T5. Khi điện áp nguồn thấp hoặc cao hơn điện áp cho phép thì BBD AC-AC sẽ tạo một điện áp tương ứng bằng cách điều chỉnh hệ số D của tín hiệu điều khiển PWM và qua máy biến áp để tạo ra điện áp bù cho tải. Hệ thống các Triac T1, T2, T3, T4 được sử dụng để thay đổi pha của điện áp bù. Bằng việc đóng cắt các cặp van triac, ta sẽ thay đổi được góc pha trên cuộn thứ cấp (cuộn bù) của máy biến áp. Do đó, bộ ổn áp có thể làm việc được trong cả trường hợp điện áp nguồn thấp hoặc cao hơn điện áp đặt. Khi điện áp nguồn  $U_s$  nhỏ hơn điện áp cho phép (150V-210V): T1 và T2 ở trạng thái đóng; T3 và T4 ở trạng thái mở; điện áp nguồn và điện áp bù cùng pha; Điện áp tải bằng điện áp nguồn cộng điện áp bù thêm là  $U_{sec}$  (Hình 5).



**Hình 5.** Vector điện áp nguồn và điện áp bù khi điện áp nguồn thấp

Khi điện áp nguồn lớn hơn điện áp cho phép (230V-290V): T1 và T2 ở trạng thái ngắt; T3 và T4 ở trạng thái đóng; điện áp nguồn  $U_s$  và điện áp bù  $U_{sec}$  ngược pha; điện áp tải bằng hiệu điện áp nguồn và điện áp bù như Hình 6.



**Hình 6.** Vector điện áp nguồn và điện áp bù khi điện áp nguồn cao

**Bảng 1.** Bảng tín hiệu đóng mở van IGBT và Triac

Mode	Pha	IGBT				Triac			
		S1	S2	S3	S4	T1	T3	T2	T4
Điện áp thấp	+	1	1	0	1	1	0	1	0
		0	1	1	1	1	0	1	0
	-	1	1	1	0	1	0	1	0
		1	0	1	1	1	0	1	0
Điện áp cao	+	1	1	0	1	0	1	0	1
		0	1	1	1	0	1	0	1
	-	1	1	1	0	0	1	0	1
		1	0	1	1	0	1	0	1

**3. Mô hình hệ thống ổn áp tự động**

Nhiệm vụ của bộ ổn áp tự động là tạo ra một điện áp xoay chiều phù hợp từ điện áp đầu vào  $U_s$  để bù vào điện áp nguồn, giúp điện áp phía đầu ra trên tải luôn duy trì ổn định trong dải điện áp cho phép. Giả sử điện áp nguồn đầu vào là hình sin và có phương trình:

$$U_s = U_{sm} \sin(\omega t) \quad (1)$$

Trong đó,  $U_{sm}$ ,  $\omega$  lần lượt là biên độ và tần số góc của điện áp đầu vào. Lý tưởng, ta coi thành phần sóng hài sinh ra sẽ được hấp thụ hoàn toàn bởi mạch lọc công suất LC phía đầu ra, khi đó điện áp bộ băm xung  $u_c$  chỉ còn lại thành phần sóng cơ bản:

$$U_c = DU_{sm} \sin(\omega t) = DU_s \quad (2)$$

Từ công thức (2), có thể thấy vector điện áp đầu ra của bộ ổn áp tự động cùng chiều với vector điện áp đầu vào. Vì vậy khi điện áp vào cao hơn điện áp đặt, ta cần đảo dấu vector điện áp bù. Điều này sẽ được thực hiện nhờ 4 Triac mắc thành cầu H và được điều khiển bởi giá trị điện áp đo được phía đầu vào.

Xét tại trường hợp điện áp nguồn  $U_s$  thấp hơn điện áp đặt  $U_n$ . Gọi tỉ số giữa điện áp nguồn với điện áp đặt là  $p = U_s/U_n$ . Khi hệ số điều chế là  $D$ , coi MBA và các van công suất là lý tưởng. Ta thu được phương trình điện áp bù sinh ra từ máy biến áp như phương trình (3).

$$U_{sec} = U_{pve} \frac{N_2}{N_1} = DU_s \frac{N_2}{N_1} \quad (3)$$

Với  $K_{BA} = N_2/N_1$  là tỉ số giữa cuộn dây sơ cấp và thứ cấp của MBA. Điện áp tải khi đó được viết như (4) [7].

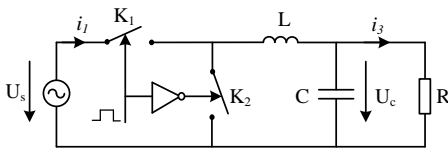
$$U_L = U_s + U_{sec} = pU_n + DpU_n \frac{N_2}{N_1} = pU_n (DK_{BA} + 1) \quad (4)$$

Tại điểm làm việc

$$U_L = U_n : \Rightarrow \begin{cases} D = \frac{1-p}{K_{BA}} \\ p = \frac{1}{1+DK_{BA}} \\ \frac{U_{sec}}{U_n} = \frac{DK_{BA}}{1+DK_{BA}} \end{cases} \quad (5)$$

Với  $K_{BA} = 0.5$ ,  $D_{max} = 1$ , ta có:  $U_{sec}/U_n = 1/3$ . Có thể thấy công suất MBA chỉ bằng 1/3 công suất lớn nhất của tải, lúc này MBA làm việc nặng nề nhất (hệ số  $D$  lớn nhất). Tương tự với trường hợp điện áp nguồn cao hơn điện áp đặt, bộ ổn áp có thể cho phép làm việc với dải điện áp tới 440V, công suất MBA lúc này sẽ phải làm việc lớn hơn 1/3 công suất của tải. Phương trình điện áp nguồn và điện áp đầu ra của BBD AC-AC được viết như (6).

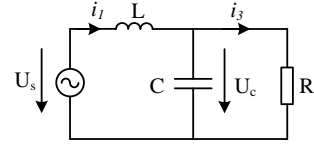
$$\begin{cases} U_s(t) = U_{sm} \sin(\omega t) \\ U_c(t) = U_{cm} \sin(\omega t) \end{cases} \quad (6)$$



Hình 7. Sơ đồ tương đương các van công suất

Ứng với chu kỳ dương của điện áp lưới, van S2 và van S3 luôn dẫn và ngược lại. Vì vậy trong sơ đồ thay thế tương đương, có thể coi cặp van S1-S2 tương đương khóa K1, cặp van S3-S4 tương đương khóa K2. Khóa K1 và K2 có trạng thái đóng/mở ngược nhau trong. Xét hai trạng thái của BBD với tải thuần trở R.

Trạng thái 1: Khóa K1 dẫn, K2 mở.

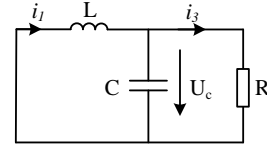


Hình 8. Sơ đồ tương đương trạng thái 1

Áp dụng định luật Kirchoff, ta được hệ phương:

$$\begin{cases} u_c(t) = Ri_3(t) \\ L \frac{di_1}{dt} = u_s(t) - u_c(t) \\ C \frac{du_c(t)}{dt} = i_1(t) - i_3(t) = i_1(t) - \frac{u_c(t)}{R} \end{cases} \quad (7)$$

Trạng thái 2: Khóa K1 mở, K2 dẫn.



Hình 9. Sơ đồ tương đương trạng thái 2

Áp dụng định luật Kirchoff, ta được:

$$\begin{cases} u_c(t) = Ri_3(t) \\ L \frac{di_1(t)}{dt} = u_s(t) - u_c(t) \\ C \frac{du_c(t)}{dt} = i_1(t) - i_3(t) = i_1(t) - \frac{u_c(t)}{R} \end{cases} \quad (8)$$

Do các khóa K1 và K2 hoạt động với các trạng thái ngược nhau, ta chọn hàm đóng cắt  $\{h=1; h=0\}$  ứng với K1 đóng và K1 mở. Hệ phương trình mô tả mạch như (9).

$$\begin{cases} L \frac{di_1(t)}{dt} = hu_s(t) - u_c(t) \\ C \frac{du_c(t)}{dt} = i_1(t) - \frac{u_c(t)}{R} \end{cases} \quad (9)$$

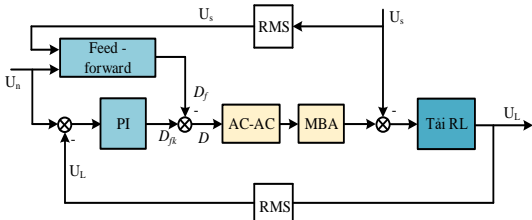
Trong một chu kỳ đóng cắt, tiến hành trung bình các biến, thêm các biến dao động nhỏ vào, ta thu được hệ phương trình với các biến dao động nhỏ, Laplace hóa, bỏ qua các dao động nhỏ bậc hai, trong một chu kỳ đóng cắt, ta coi điện áp nguồn  $u_{sm}$  không đổi. Ta thu được phương trình hàm truyền giữa điện áp đầu ra BBD và hệ số điều chế  $D$  như phương trình (10) [8].

$$G_{u,d}(s) = \frac{u_{cm}(s)}{d(s)} = \frac{U_{sm}}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (10)$$

#### 4. Điều khiển hệ thống ổn áp tự động

Trong quá trình điều khiển, do các khâu đo điện áp nguồn và tải có tính trễ, làm ảnh hưởng tới đáp ứng của bộ điều khiển PI chậm hơn. Do đó, để điện áp trên tải nhanh chóng trở về điểm làm việc an toàn, trong bài báo này sẽ đề xuất mô hình điều khiển kết hợp hai bộ điều khiển Feed-forward và bộ điều khiển PI làm việc cùng nhau. Bộ điều khiển Feed-forward có ưu điểm là phản ứng nhanh [7]. Tuy nhiên, bộ điều khiển này không có khả năng triệt tiêu sai lệch tĩnh do bản chất chỉ là bộ điều khiển truyền thẳng. Vậy

nên, bộ điều khiển Feedforward sẽ tồn tại sai lệch tính của điện áp trên tải. Và giá trị sai lệch tính sẽ được triệt tiêu bởi bộ điều khiển PI [8]. Do đó, hệ thống vừa tác động nhanh và triệt tiêu được sai lệch tính. Cấu trúc hệ thống điều khiển được thể hiện trên Hình 10.



**Hình 10.** Cấu trúc điều khiển cho ổn áp tự động

Hệ số điều chế D đưa vào BBD là  $D = D_f \pm D_{fk}$ .

Trong đó  $D$  là hệ số điều chế xung PWM được thể hiện như Hình 2.  $D_f$  được hình thành từ bộ điều khiển Feed-Forward,  $D_{fk}$  được tạo ra từ bộ điều khiển PI và được thể hiện trên Hình 10. Hệ số điều chế  $D$  sẽ quyết định độ rộng các xung để điều khiển các van của BBD AC-AC.

Khi điện áp nguồn  $U_s$  nhỏ hơn điện áp đặt  $U_n$ , điện áp trên tải  $U_L$  và hệ số điều chế  $D$  đưa vào BBD như (11).

$$\begin{cases} U_L = U_s + U_{sec} \\ D = D_f + D_{fk} \end{cases} \quad (11)$$

Khi điện áp  $U_s$  lớn hơn điện áp đặt, điện áp trên tải là:

$$U_L = U_s - U_{sec} \quad (12)$$

Nếu hệ số điều chế  $D$  đưa vào BBD giữ nguyên như trường hợp 1 sẽ dẫn tới tình trạng đáp ứng ngược của bộ điều khiển PI, do lúc này thành phần  $U_{sec}$  mang dấu âm. Do đó, công thức sẽ được điều chỉnh lại như (12).

$$\begin{cases} U_L = U_s - U_{sec} \\ D = D_f - D_{fk} \end{cases} \quad (13)$$

#### 4.1. Thiết kế bộ điều khiển Feed-Forward

Để điện áp đầu ra bằng điện áp đặt thì lượng điện áp cần bù thêm hoặc bớt đi như (14)

$$U_2 = U_{sec} = |U_s - U_n| \quad (14)$$

Với  $U_s$  và  $U_n$  lần lượt là điện áp hiệu dụng của nguồn đầu vào và điện áp đặt  $U_n$ . Với hệ số máy biến áp đã chọn là  $K_{BA} = 0.5$ , ta có điện áp yêu cầu đầu ra của bộ biến đổi AC-AC như (15).

$$U_c = \frac{1}{K_{BA}} U_{sec} = 2|U_s - U_n| \quad (15)$$

Từ các phương trình trên, ta tính được hệ số điều chế của bộ Feed-forward như (16).

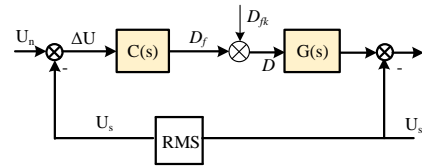
$$\begin{cases} U_c = D_f U_s \\ U_c = 2|U_s - U_n| \end{cases} \Rightarrow D_f = 2 \frac{|U_s - U_n|}{U_s} \quad (16)$$

#### 4.2. Thiết kế bộ điều khiển FeedBack

Hàm truyền hệ thống  $G(s)$  được thể hiện như công thức (10). Có thể thấy, trong thành phần tử số của  $G_s$  vẫn tồn tại một thành phần biên số là  $U_{sm}$  (điện áp nguồn hiệu dụng), tuy nhiên đại lượng này ta đã xác định được thông qua phép đo điện áp nguồn. Vì vậy, ta tách  $G_s$  ra thành 2 thành phần riêng biệt là:

$$\begin{cases} G_{s1} = U_{sm} \\ G_{s2} = \frac{1}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \end{cases}$$

Do đó, khi thiết kế bộ điều khiển ta chỉ cần thiết kế cho thành phần  $G_{s2}$ . Để đảm bảo hệ thống ổn định, ta cần thiết kế bộ điều khiển để đưa độ dự trữ pha của hệ thống về khoảng  $30^\circ$  đến  $60^\circ$ . Để đảm bảo đáp ứng của hệ thống là đủ nhanh, bỏ được ảnh hưởng bởi nhiễu. Do đó, tần số cắt mong muốn là  $f_c \leq 1/10f_s = 2000\text{Hz}$ . Đồng thời, không làm ảnh hưởng tới thành phần tần số cơ bản (50Hz) thì tần số cắt cần lớn hơn 10 lần tần số cơ bản là 500Hz. Kết hợp hai yếu tố trên, ta chỉnh định bộ điều khiển sao cho hệ thống đạt được độ dự trữ pha  $55^\circ$  tại tần số cắt 1kHz.



**Hình 11.** Cấu trúc bộ điều khiển FeedBack

#### 4.3. Thuật toán đo điện áp RMS

Các hệ số của hệ thống đều được tính toán dựa vào giá trị đo RMS của điện áp nguồn và đầu ra nên ta sử dụng công thức tính giá trị RMS được xác định như sau [8]:

$$\begin{aligned} \text{TrueRMS} &= \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n V_n^2}{n}} \\ &= \sqrt{\frac{\overline{RMS^2 \sin^2(\alpha_1)} + \overline{RMS^2 \sin^2(\alpha_2)} + \dots + \overline{RMS^2 \sin^2(\alpha_n)}}{n}} \\ &= \sqrt{\frac{n \cdot \overline{RMS^2} + \overline{RMS^2} \cdot [\cos(\alpha_1 - \alpha_x) \cos(\alpha_1 + \alpha_x) + \dots]}{n}} \\ &= \overline{RMS} \quad (\alpha_x - \alpha_1 \approx 90^\circ \rightarrow \cos(\alpha_1 - \alpha_x) \approx 0) \end{aligned}$$

Ta sẽ trích mẫu tín hiệu sin đầu vào với số mẫu chẵn, để có thể tạo ra các cặp tín hiệu như  $\alpha_1, \alpha_x$  để triệt tiêu thành phần cos và thu được giá trị RMS. Biểu thức tính giá trị RMS trên có ưu điểm là thời gian đáp ứng khá nhanh, khoảng một nửa chu kỳ điện áp lưới là ta có thể đo chính xác. Để đạt được ưu điểm trên, ta chọn tổng số mẫu cần lấy là ở nửa chu kỳ với tần số lấy mẫu bằng với tần số điều khiển. Trong quá trình hoạt động, tín hiệu đo cần cập nhật liên tục, ta dùng phương pháp trung bình trượt (nghĩa là xóa mẫu cũ nhất và cập nhật mẫu mới vào khung mẫu).

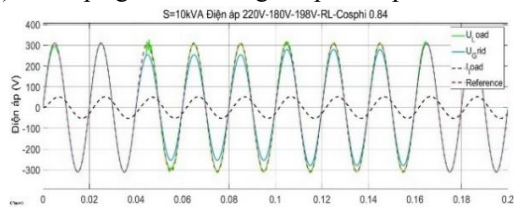
### 5. Mô phỏng và thực nghiệm hệ thống

#### 5.1. Mô phỏng hệ thống

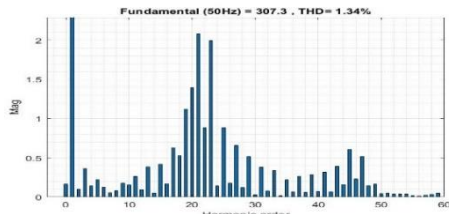
Để kiểm tra đáp ứng của bộ ổn áp tự động, hệ thống được thực hiện trên phần mềm matlab/simulink. Kịch bản mô phỏng được thực hiện với ba trường hợp điện áp lưới dao động trong thực tế với hệ thống mang tải (10kVA) áp dụng cho tải tải RL với  $\cos\phi = 0.86$ . Đồng thời thử nghiệm trong điều kiện điện áp dao động từ ngưỡng thấp nhất đến ngưỡng cao nhất trong dải hoạt động. Các trường hợp điện áp nguồn dao động được thử nghiệm. Cụ thể:



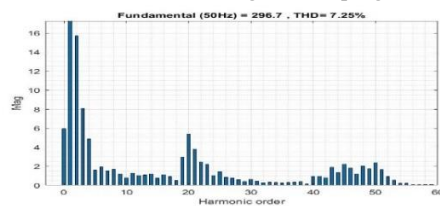
1) Điện áp nguồn dao động Thấp – Thấp tại 0,04s và 0,1s



Hình 12. Điện áp trên tải khi điện áp nguồn Thấp - Thấp

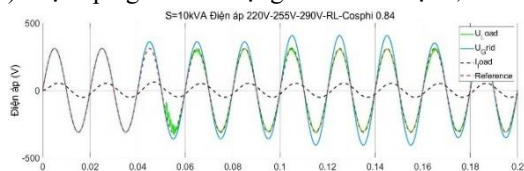


Hình 13. THD của hệ thống ở điện áp nguồn thấp

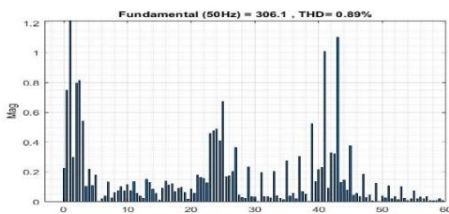


Hình 14. THD trong chu kỳ quá độ ở điện áp nguồn thấp

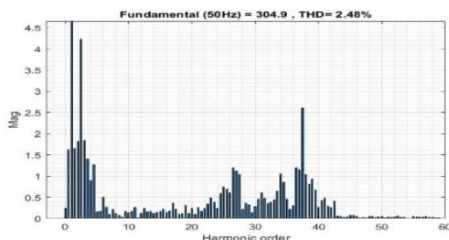
2) Điện áp nguồn dao động Cao – Cao tại 0,04s và 0,1s



Hình 15. Điện áp trên tải khi điện áp nguồn cao – cao

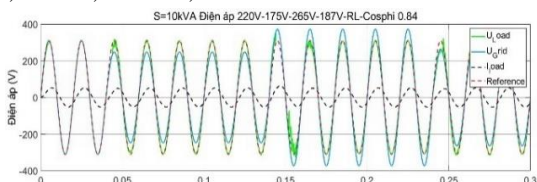


Hình 16. THD của hệ thống ở điện áp nguồn cao



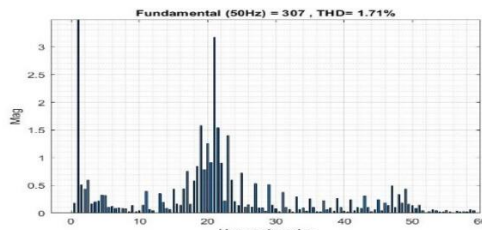
Hình 17. THD trong chu kỳ quá độ ở điện áp nguồn cao

3) Điện áp nguồn dao động Ổn định – thấp – cao – thấp tại 0,04s – 0,14s và 0,24s

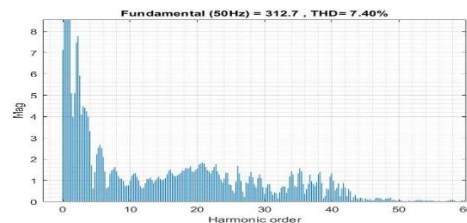


Hình 18. Điện áp trên tải khi điện áp nguồn thấp - cao - thấp

Các Hình 12, 15, 18 là hình dạng điện áp, dòng điện trên tải RL trong các kịch bản đã đề xuất. Ta thấy rằng, điện áp và dòng điện trên tải luôn có dạng hình sin chuẩn và bám tín hiệu đặt, sai lệch điện áp nằm trong dải cho phép 5%. Khi thay đổi giá trị điện áp nguồn, thì bộ điều khiển phản ứng nhanh đưa giá trị điện áp thực về giá trị cho phép đảm bảo tải hoạt động bình thường. Đáp ứng hệ thống dưới 1 chu kỳ lưới là 20ms đối với trường hợp giữ nguyên trạng thái bù hoặc trừ điện áp. Tuy nhiên, trong quá trình quá độ để chuyển trạng thái làm việc có xảy ra quá trình quá độ của máy biến áp, làm hệ thống bảo vệ quá dòng phải can thiệp, hệ thống bị trễ thêm 1/2 chu kỳ lưới, nhưng điện áp vẫn về vùng làm việc an toàn trong 1 chu kỳ. Điện áp đầu ra có dao động tại các điểm quá độ bởi hệ thống bảo vệ, tuy nhiên nó chỉ xảy ra thoáng qua, không ảnh hưởng nhiều đến hoạt động của tải và bộ ổn áp.



Hình 19. THD của hệ thống ở điện áp nguồn thấp - cao - thấp

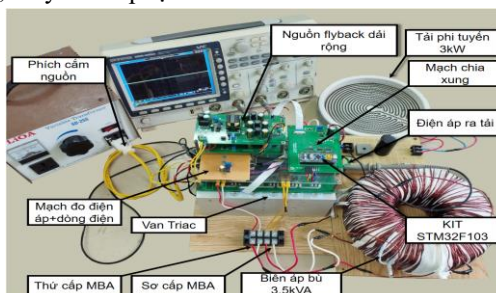


Hình 20. THD trong chu kỳ quá độ ở điện áp nguồn thấp - cao - thấp

Tỉ lệ sóng hài THD hơi cao trong quá trình quá độ (7,4%) nhưng chỉ diễn ra trong 1 chu kỳ lưới, ở trạng thái ổn định thì THD có giá trị tốt (<2%). Ta thấy khi điện áp nguồn dao động thì đáp ứng điện áp đầu ra cũng đều bám giá trị đặt trong khoảng một chu kỳ lưới (0,02s), sai lệch đều nằm trong khoảng cho phép của yêu cầu, tỉ lệ sóng hài THD không quá cao. Điều này chứng tỏ chất lượng bộ điều khiển khá tốt khi mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink.

5.2. Thực nghiệm hệ thống

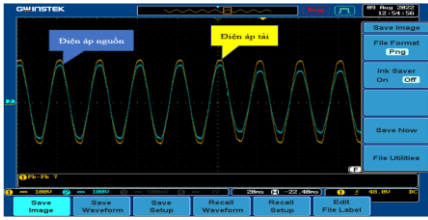
Mô hình thực nghiệm hệ thống bao gồm mạch lực với BBD AC-AC và cầu H Triac, mạch nguồn flyback cấp nguồn cho vi điều khiển và nguồn cho mạch driver các van công suất, mạch điều khiển dùng kit STM32F103C8T6, tản nhiệt, máy biến áp lực như Hình 21.



Hình 21. Mô hình thực nghiệm hệ thống với tải RL 10kVA  
Kịch bản thực nghiệm được thực hiện tương tự với các

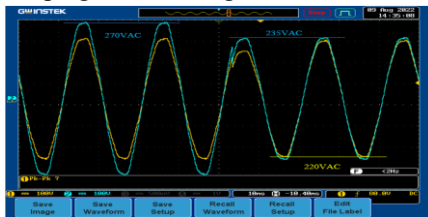
trường hợp mô phỏng ở trên với điều kiện ôn áp mang đây tải RL công suất 10kW.

#### 1) Điện áp nguồn dao động Thấp – Thấp



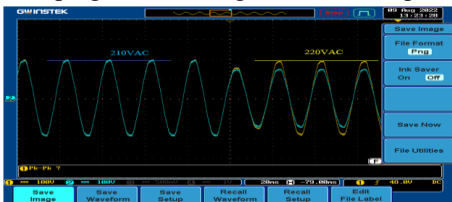
Hình 22. Điện áp tải khi điện áp nguồn Thấp – Thấp

#### 2) Điện áp nguồn dao động Cao – Cao



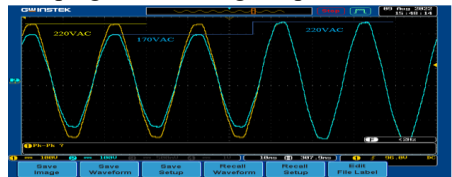
Hình 23. Điện áp tải khi điện áp nguồn Cao - Cao

#### 3) Điện áp nguồn dao động Ổn định - Thấp



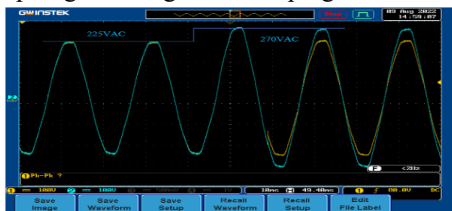
Hình 24. Điện áp tải khi điện áp nguồn Ổn định – Thấp

#### 4) Điện áp nguồn dao động Thấp - Ổn định



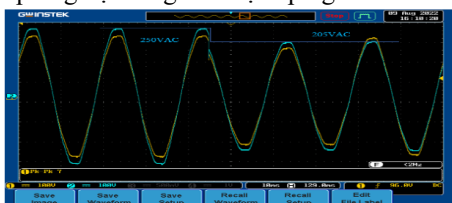
Hình 25. Điện áp tải khi điện áp nguồn Thấp - Ổn định

#### 5) Đáp ứng hệ thống khi điện áp nguồn Ổn định – Cao



Hình 26. Điện áp tải khi điện áp nguồn Ổn định - Cao

#### 6) Đáp ứng hệ thống khi điện áp nguồn Cao – Thấp



Hình 27. Điện áp tải khi điện áp nguồn Cao – Cao

Từ Hình 22 đến Hình 27 là kết quả thực nghiệm của hệ thống trong các chế độ điện áp nguồn có sự thay đổi ngoài

phạm vi cho phép. Các kết quả mô phỏng cho thấy, thời gian đáp ứng của hệ thống khá nhanh, khoảng một nửa chu kỳ lưới, một số trường hợp có sự thay đổi trạng thái của các van triac phía cầu H, đáp ứng hệ thống chậm hơn (1-1,5 chu kỳ lưới) do phải chờ các van triac khóa hoàn toàn. Tuy nhiên, đáp ứng hệ thống vẫn khá tốt theo yêu cầu đặt ra, điện áp không méo hoặc xuất hiện các điểm bất thường. Quá trình kiểm tra với các loại tải khác nhau, hệ thống đã cơ bản đáp ứng tốt các yêu cầu đặt ra. Chất lượng điện áp tốt, ổn định, sai số trong dải giới hạn cho phép.

## 6. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu về cấu trúc và mô hình của thiết bị ôn áp tự động, trên cơ sở đó bài báo đã thực hiện phân tích chế độ làm việc và nguyên lý điều khiển của hệ thống. Với yêu cầu đặt ra của bộ ôn áp điện tử là ổn định điện áp tải tại 220VAC. Thông qua quá trình tính toán, thiết kế bộ điều khiển và tiến hành mô phỏng, thực nghiệm hệ thống. Các kết quả đã cho thấy thời gian đáp ứng đã đạt được theo yêu cầu đề ra. Bộ biến đổi điện áp AC-AC đã hoạt động đúng như theo phân tích lý thuyết. Hệ thống ôn áp đã hoạt động theo đúng nguyên lý đặt ra đó là ổn định được điện áp cung cấp cho tải trong khi điện áp đầu vào bị dao động.

**Lời cảm ơn:** Bài báo này là kết quả nghiên cứu từ đề tài NCKH cấp cơ sở (mã số: ĐT - 2023 - 17) của Trường Đại học Hồng Đức.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Nan, T. Hou-jun, L. Jian-yu, Y. Chen, C. Wei-wei, and A. Xiao-yu, "Dynamic Voltage Regulator based on PWM AC Chopper Converter: Topology and Control", *WSEAS Transactions on Systems*, vol. 9, no. 5, pp. 539-548, 2010.
- [2] T. B. Soeiro, C. A. Petry, J. C. d. S. Fagundes, and I. Barbi, "Direct AC-AC Converters Using Commercial Power Modules Applied to Voltage Restorers", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 278-288, 2011.
- [3] F. M. Serra, L. M. Fernández, O. D. Montoya, W. G. González, and J. C. Hernández, "Nonlinear voltage control for three-phase DC-AC converters in hybrid systems: an application of the PI-PBC method", *Electronics*, vol. 9, no. 5, p. 847, 2020.
- [4] T. A. Naidu, S. R. Arya, and T. H. M. El-Fouly, "Comparative performance of dynamic voltage restorer using adaptive control algorithms with optimized error regulator gains", *Int. Trans. Elect. Energy Syst., early access, article no: e12696*, 2020, <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12696>.
- [5] R. Nasrollahi, M. Asadi, and M. Farhadi-Kangarlu, "Sliding mode control of a dynamic voltage restorer based on PWM AC chopper in three-phase three-wire systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 134, no. 4, 2022, Pages 107-113.
- [6] B. Ferdi, C. Benachaiba, S. Dib, and R. Dehini, "Adaptive PI Control of Dynamic Voltage Restorer Using Fuzzy Logic", *Journal of Electrical Engineering: Theory & Application*, vol. 1, no. 3, pp. 165-173, 2010.
- [7] F. M. Ibanez, F. M. Joshua Eletu, and J. M. Echeve, "Input Voltage Feedforward Control Technique for DC/DC Converters to Avoid Instability in DC Grids", *February 2021, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 99, no. 6, pp. 234-241, 2021.
- [8] P. Gambôa, J. F. Silva, and S. F. Pinto, "Input-Output Linearization and PI controllers for AC-AC matrix converter based Dynamic Voltage Restorers with Flywheel Energy Storage: a comparison", *Electric Power Systems*, vol. 169, no.8, pp. 214-228, April 2019.