


Parametric Design and Simulation of Control System for Automatic Voltage Stabilizer to Replace Manual Voltage Stabilizer in Low Voltage Power Grid

Hung Cuong Tran 
Thuyloi University, Vietnam

Corresponding author. Email: cuongth@tlu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 27/03/2024
Revised: 24/04/2024
Accepted: 26/08/2024
Published: 28/10/2024

KEYWORDS

Electronic voltage stabilizer;
Automatic voltage adjustment;
Electronic voltage stabilizer control;
Feed-forward;
Linear PI.

ABSTRACT

The voltage stabilizer has the function of stabilizing the voltage within allowable limits. Therefore, designing and building a control system to help this device operate automatically will overcome the disadvantages of Voltage stabilizers are adjusted manually. This article presents the detailed parameter design and simulation of a combined PI and feed-forward control algorithm for automatic voltage stabilizers used in low-voltage power networks. This allows the device to completely automatically adjust the voltage without human intervention, this is due to the built-in controllers in the voltage regulator and automation for the voltage regulation process. The design process is applied to the input grid voltage range ranging from 150V to 290V and to the output voltage range supplied to electrical equipment always ranging from 210V to 230V, corresponding to a maximum deviation of 5 % of rated voltage value of low voltage grid (220V). This always ensures that electrical equipment operates well when the grid voltage fluctuates in a wide range. The implementation process is demonstrated by simulation on matlab/simulink software and an experimental system with a capacity of 10kVA.

Thiết Kế Tham Số và Mô Phỏng Hệ Thống Điều Khiển cho Thiết Bị Ổn Áp Tự Động Ổn Định Điện Áp Thay Thế Ổn Áp Điều Chỉnh Thủ Công trong Lưới Điện Hạ Áp

Trần Hùng Cường 
Trường Đại học Thủy Lợi, Việt Nam

Tác giả liên hệ. Email: cuongth@tlu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 27/03/2024
Ngày hoàn thiện: 24/04/2024
Ngày chấp nhận đăng: 26/08/2024
Ngày đăng: 28/10/2024

TỪ KHÓA

Ổn áp điện tử;
Điều chỉnh điện áp;
Điều khiển ổn áp điện tử;
Feed-forward;
PI tuyến tính.

TÓM TẮT

Thiết bị ổn áp có chức năng ổn định điện áp trong giới hạn cho phép. Việc thiết kế và xây dựng hệ thống điều khiển giúp ổn áp hoạt động tự động sẽ khắc phục được các nhược điểm của thiết bị ổn áp điều chỉnh thủ công bằng tay. Bài báo này trình bày việc thiết kế thông số chi tiết và mô phỏng thuật toán điều khiển kết hợp PI và Feed-Forward cho thiết bị ổn áp tự động dùng trong mạng điện hạ áp. Việc này giúp cho thiết bị có thể hoàn toàn tự động điều chỉnh điện áp mà không cần tác động của con người, điều này có được là do các bộ điều khiển được tích hợp sẵn trong ổn áp và tự động hóa quá trình điều chỉnh điện áp. Quá trình thiết kế được áp dụng cho dải điện áp lưới đầu vào dao động trong khoảng 150V đến 290V và cho dải điện áp ra cung cấp cho thiết bị điện luôn nằm trong khoảng 210V đến 230V, tương ứng với độ lệch tối đa là 5% giá trị điện áp định mức của lưới điện hạ áp (220V). Điều này luôn đảm bảo cho thiết bị điện hoạt động tốt khi điện áp lưới dao động trong một phạm vi rộng. Quá trình thực hiện được chứng minh bằng việc mô phỏng trên phần mềm matlab/simulink và hệ thống thực nghiệm có công suất 10kVA.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2024.1561>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](#) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

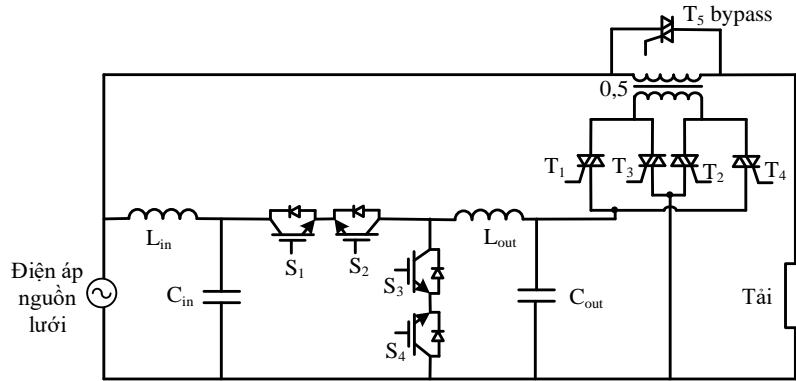
1. Giới thiệu

Mạng điện hạ áp tại Việt Nam được phát triển mạnh mẽ trong những năm gần đây do nhu cầu tiêu dùng điện của khách hàng tăng mạnh. Với việc sử dụng nhiều các thiết bị điện khác nhau, và nhu cầu khác nhau, đặc biệt ở giờ cao điểm gây nên áp lực lớn tới lưới điện, dẫn đến việc chập chờn điện áp diễn ra thường xuyên và liên tục, ảnh hưởng đến chất lượng điện năng [1], [2]. Để khắc phục được việc này, các thiết bị ổn áp là sự lựa chọn đầu tiên để giải quyết tức thì vấn đề điện áp nguồn dao động. Ổn áp là một thiết bị giúp duy trì điện áp đầu ra không đổi khi điện áp đầu vào thay đổi trong dải hoạt động cho phép [1], [3]. Ngày nay, có nhiều thiết bị ổn áp điều chỉnh thủ công bằng tay đã được chế tạo và đưa vào sử dụng như: Ổn áp rơ le nhảy cấp (supvolter); Ổn áp sử dụng servo motor... [4], [5]. Tuy nhiên, các thiết bị ổn áp này có nhiều nhược điểm như: thời gian phản ứng chậm do phụ thuộc vào sự vận hành của con người dẫn đến gián đoạn trong quá trình hoạt động, độ tin cậy không cao, cần được bảo trì thường xuyên và phát sinh chi phí, thường gây ra tiếng ồn và tổn hao trong lõi thép [6], [7]. Những nhược điểm này thường gây ra nhiều phiền toái trong việc sử dụng điện khi điện áp lưới có sự dao động. Để giải quyết các vấn đề này, bài báo này đề xuất mô hình ổn áp tự động điều chỉnh giá trị điện áp cấp cho tải mà không cần sự vận hành của con người. Quá trình tự động được thực hiện bởi hai bộ điều khiển là PI và feed-forward kết hợp với nhau mà ổn áp điều khiển bằng tay không có được. Sự khác biệt nổi bật của ổn áp tự động so với ổn áp điều khiển thủ công là bộ điều khiển Feed-Forward có chức năng làm cho ổn áp tác động nhanh và loại bỏ các nhiễu, còn bộ điều khiển PI tuyến tính sẽ giúp đưa giá trị điện áp cung cấp cho tải bằng với giá trị điện áp lưới với sai lệch trong giới hạn cho phép [8] – [11]. Việc này giúp cho ổn áp tự động đáp ứng được các yêu cầu đặt ra trong thực tế là vận hành thuận tiện và mang lại hiệu suất sử dụng năng lượng tốt. Thiết bị chính của ổn áp tự động là bộ biến đổi (BBĐ) AC-AC và mạch điều khiển. Khi điện áp lưới cao hơn và thấp hơn giá trị độ lệch cho phép của điện áp định mức thì hệ thống điều khiển sẽ lập tức tác động để đưa điện áp cung cấp ra tải có giá trị phù hợp với điện áp định mức. Tuy hệ thống có cấu tạo phức tạp nhưng mang lại những lợi ích vượt trội so với các ổn áp điều chỉnh thủ công như tính chính xác cao, độ tin cậy đảm bảo, thời gian tác động nhanh, không gây ra tổn hao và tiếng ồn. Nội dung của bài báo sẽ tập trung vào việc phân tích cấu trúc, hoạt động, tính toán thiết kế thông số mạch lực và hệ thống điều khiển. Phạm vi của mô hình được thực hiện cho bộ ổn áp 1 pha công suất 10kVA tần số 50Hz, điện áp ra 210-230VAC khi điện áp đầu vào từ 150-290VAC. Các kịch bản thực hiện được thực hiện với các tình huống giả định về dao động điện áp nguồn trong thực tế. 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.

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

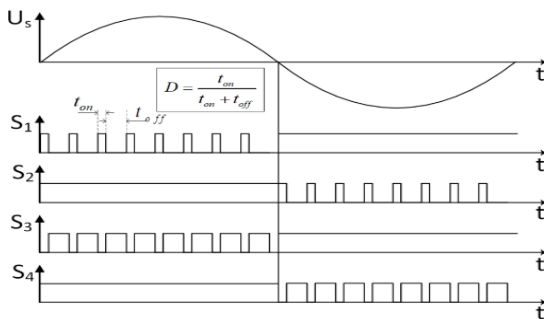
Cấu trúc của thiết bị ổn áp tự động được thể hiện như hình 1, gồm hai phần chính là BBĐ AC-AC (có các bộ lọc điện áp, 04 van IGBT) và máy biến áp (MBA). Trong đó BBĐ có chức năng biến đổi dòng điện xoay chiều sang xoay chiều để ổn định điện áp phía đầu ra và tạo điện áp bù khi điện áp nguồn dao động, MBA có tác dụng tạo ra giá trị điện áp phù hợp với yêu cầu hoạt động của tải. Tuy nhiên, việc tồn tại cùng lúc cả bộ biến đổi AC-AC và MBA sẽ làm tổn thất thiết bị tăng lên. Quá trình được thực hiện với mạch cầu H gồm 4 van TRIAC để đảo pha điện áp bù trong trường hợp điện áp cao, sau đó qua MBA 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 BBĐ và máy biến áp. Trong sơ đồ có hai 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 BĐ AC-AC từ dạng băm xung thành dạng hình sin trước khi đưa vào MBA và làm giảm hao tổn MBA. Ưu điểm của sơ đồ này là cấu tạo đơn giản, không cần khâu trung gian và khâu đồng bộ pha điện áp lưới, không cần tới khâu chỉnh lưu DC.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý bộ AC-AC

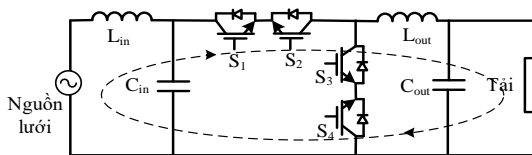
Khi hoạt động, các van bán dẫn IGBT được cấp xung từ bộ điều khiển thông qua phương pháp PWM với hệ số điều chế là D như hình 2 để tạo dạng sóng đầu ra giống với dạng sóng đầu vào. Ở nửa chu kỳ dương của lưới, van S_2 luôn dẫn, xung điều chế PWM được cấp cho S_1, S_2 dẫn liên tục. Đồng thời, tín hiệu điều chế cấp cho van S_4 là tín hiệu đảo pha của tín hiệu S_1 . Khi van S_1 dẫn, dòng điện đi qua van S_1-S_2 qua L_{out} và đi vào tải là cuộn sơ cấp MBA bù như trên hình 3. Chu kỳ phát xung tiếp theo, van S_1 khóa, do tính chất của cuộn cảm, dòng điện duy trì qua tải thông qua cặp van S_3-S_4 . Lúc này, van S_3 dẫn, nên việc đóng ngắt dòng điện này được điều khiển bởi van S_4 . Van S_3 được mở suốt chu kỳ. Dòng điện duy trì qua tải như hình 4. Tương tự như vậy đối với nửa chu kỳ âm của điện áp lưới. Quá trình này được thể hiện chi tiết bởi các trạng thái đóng mở van IGBT và TRIAC như bảng 1.



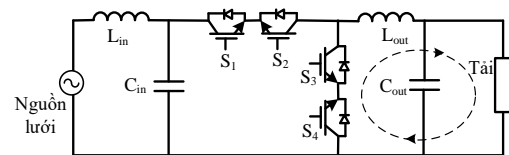
Hình 2. Giản đồ xung cấp cho các van IGBT

Bảng 1. Bảng tín hiệu đóng mở van IGBT và TRIAC

Mode	Pha	IGBT				Triac			
		S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	T ₁	T ₃	T ₂	T ₄
Điện áp thấp	+	1	1	0	1	1	0	1	0
	-	1	1	1	0	1	0	1	0
Điện áp cao	+	1	1	0	1	0	1	0	1
	-	1	1	1	0	0	1	0	1
		1	0	1	1	0	1	0	1

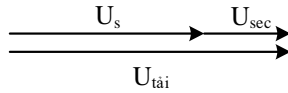


Hình 3. Mạch vòng dòng điện khi van S_1-S_2 dẫn

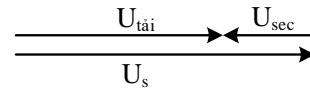


Hình 4. Mạch vòng dòng điện khi van S_3-S_4 dẫn

Điện áp ra tải được phép dao động trong khoảng 5% nên điện áp nguồn đầu vào từ 210-230VAC thì BĐ AC-AC sẽ không hoạt động. Lúc này điện áp tải sẽ được nối trực tiếp với điện áp nguồn nhờ van Bypass T_5 . Khi điện áp nguồn thấp hoặc cao hơn điện áp cho phép thì BĐ AC-AC sẽ tạo một điện áp tương ứng bằng cách điều chỉnh hệ số D của tín hiệu điều khiển PWM và qua MBA để tạo ra điện áp bù cho tải. Hệ thống các Triac T_1, T_2, T_3, T_4 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 MBA. Do đó, bộ ổn áp có thể làm việc được trong cả trường hợp điện áp nguồn thấp hoặc cao hơn điện áp đặt.



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



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

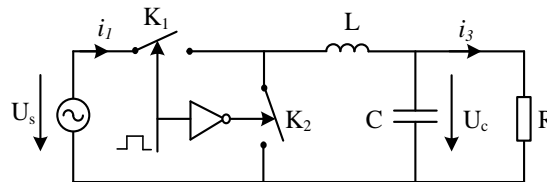
Khi điện áp nguồn nhỏ hơn điện áp cho phép (150V-210V): T_1 và T_2 ở trạng thái đóng; T_3 và T_4 ở trạng thái mở; điện áp nguồn và điện áp bù cùng pha; Điện áp tải bằng điện áp nguồn cộng điện áp bù thêm như hình 5. Khi điện áp nguồn lớn hơn điện áp cho phép (230V-290V): T_1 và T_2 ở trạng thái ngắt; T_3 và T_4 ở trạng thái đóng; điện áp nguồn và điện áp bù ngược pha; điện áp tải bằng hiệu điện áp nguồn và điện áp bù như hình 6.

3. Thiết kế thông số làm việc cho mô hình ổn áp tự động công suất 10KVA

3.1. Mô hình hoạt động của ổn áp tự động

Phương trình điện áp nguồn và điện áp đầu ra của BBD AC-AC như công thức (1).

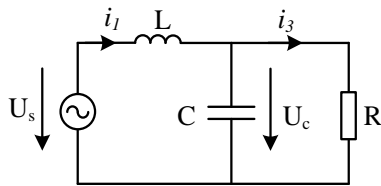
$$\begin{cases} U_s(t) = U_{sm} \sin(\omega t) \\ U_c(t) = U_{cm} \sin(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$



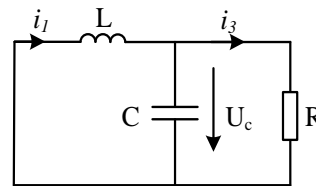
Hình 7. Sơ đồ tương đương các van công suất

Ứng với chu kỳ dương của điện áp lưới, van S_2 và van S_3 luôn dẫn và ngược lại. Vì vậy trong sơ đồ thay thế tương đương như hình 7, có thể coi cặp van S_1 - S_2 tương đương khóa K_1 , cặp van S_3 - S_4 tương đương khóa K_2 . Xét hai trạng thái của BBD với tải thuần trở R .

Trạng thái 1: Khóa K_1 dẫn, K_2 mở ta được sơ đồ tương đương như hình 8.



Hình 8. Sơ đồ tương đương trạng thái 1



Hình 9. Sơ đồ tương đương trạng thái 2

Áp dụng định luật Kirchoff, thu được hệ phương trình mô tả mạch như hệ phương trình (2).

$$\begin{cases} u_c(t) = Ri_3(t) \\ L \frac{di_1}{dt} = u_s(t) - u_c(t) \\ C \frac{du_c(t)}{dt} = i_1(t) - i_3(t) = i_1(t) - \frac{u_c(t)}{R} \end{cases} \quad (2)$$

Trạng thái 2: Khóa K_1 mở, K_2 dẫn, ta được sơ đồ tương đương như hình 9. Áp dụng định luật Kirchoff, thu được hệ phương trình (3).

$$\begin{cases} u_c(t) = Ri_3(t) \\ L \frac{di_1(t)}{dt} = -u_c(t) \\ C \frac{du_c(t)}{dt} = i_1(t) - i_3(t) = i_1(t) - \frac{u_c(t)}{R} \end{cases} \quad (3)$$

Do các khóa K_1 và K_2 hoạt động với các trạng thái ngược nhau, vì vậy ta chọn hàm đóng cắt $h=1$ khi K_1 dẫn; $h=0$ khi K_1 mở. Do đó hệ phương trình mô tả mạch được thể hiện như phương trình (4).

$$\begin{cases} L \frac{di_1(t)}{dt} = hu_s(t) - u_c(t) \\ C \frac{du_c(t)}{dt} = i_1(t) - \frac{u_c(t)}{R} \end{cases} \quad (4)$$

Trong một chu kỳ đóng cắt, tiến hành trung bình các biến, thêm các biến dao động nhỏ, và Laplace hóa thu được phương trình hàm truyền giữa điện áp đầu ra BBD và hệ số điều chế D như (5).

$$\Rightarrow G_{u,d}(s) = \frac{U_{sm}}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (5)$$

3.2. Tính chọn thông số máy biến áp

Do tần số PWM (f_s) lớn hơn nhiều lần tần số lưới (f_{Us}) nên tại một chu kỳ đóng cắt, coi điện áp nguồn U_s là không đổi. MBA được thiết kế khi làm việc tốt ở trạng thái tải nặng nề nhất. Đó là điện áp nguồn ở mức tới hạn và công suất tải là lớn nhất. Từ đó, tính được dòng điện chạy qua thứ cấp MBA như (6).

$$I_{sec} = I_{load} = \frac{S_{load}}{U_{load}} = \frac{10000}{220} = 45.5(A) \quad (6)$$

Điện áp bù tạo ra trên cuộn thứ cấp MBA: $U_{sec} = U_n - U_{min} = 220 - 150 = 70(V)$

Do đó, công suất MBA cần thiết kế: $S_{MBA} = 70 \times 45.5 = 3185(VA)$

Vì thiết kế MBA chịu được quá tải trong thời gian ngắn, chọn hệ số dự trữ công suất là $k = 1.1$. Do đó công suất MBA cần thiết kế là: $S_{MBA} = 3185 \times 1.1 = 3503(VA)$.

Để đảm bảo BBD làm việc tốt, tạo ra điện áp bù đủ (70V) ngay cả khi điện áp nguồn vào thấp (150V) thì tỉ số MBA cần chọn có hệ số biến đổi điện áp: $K_{BA} \geq \frac{70}{150} = 0.467$

Chọn $K_{BA} = 0.5$ để dòng điện chảy qua các van công suất phía sơ cấp máy biến áp là nhỏ nhất, Điện áp cuộn sơ cấp cần thiết kế là: $u_{pri} = 2 \times 70 = 140(V)$

3.3. Tính toán chọn van Triac

Với cấu trúc 4 van TRIAC mắc thành cầu H để đảo dấu vector điện áp bù, điện áp đặt lên các van Triac này cần chịu đựng là điện áp lớn nhất mà BBD AC-AC tạo ra là 140V.

Từ đó ta cần chọn các van triac có điện áp chịu đựng lớn hơn giá trị $140\sqrt{2} = 197.98(V)$.

Dòng điện chảy qua các van TRIAC cũng chính là dòng điện chảy qua cuộn sơ cấp máy biến áp: $I_{Triacmax} = I_{pri} = 22.75(A)$.

Với van Bypass (TRIAC T_5), điện áp lớn nhất đặt trên van là điện áp làm việc lớn nhất của bộ ổn áp là 290V, dòng điện lớn nhất chảy qua van triac khi dẫn là: $I_{Triac5max} = I_{load} = 45.5(A)$

Điện áp chịu đựng cần chọn của van Triac 5: $U_{triac5} = 290\sqrt{2} = 410(V)$

Chọn hệ số dự trữ cho dòng điện và điện áp của Triac 5 là $k = 1.5$. Ta chọn được van phù hợp là 70TSP16, chịu dòng điện 70A, điện áp đánh thủng 1600V.

3.4. Chọn van IGBT

Điện áp thiết kế lớn nhất đặt lên các van IGBT: $U_{IGBT} = U_{smax} = 290\sqrt{2} = 410(V)$

Dòng điện lớn nhất chảy qua van IGBT cũng là dòng điện chảy qua cuộn sơ cấp MBA, do đó: $I_{IGBT} = \sqrt{2}I_{pri} = 22.75\sqrt{2}(A)$. Chọn độ đập mạch dòng điện max là 30%.

Dòng điện cần chịu đựng của IGBT: $I_{IGBTmax} = \sqrt{2}I_{pri} + \frac{\Delta I_L}{2} = 37(A)$

Chọn hệ số dự trữ dòng điện và điện áp cho IGBT là $k=1.5$, ta chọn được van IGBT 60N100 với dòng điện 60A, điện áp đánh thủng 1000V:

3.5. Tính toán mạch lọc đầu vào, đầu ra

Chọn tần số cắt $f_c = 5000Hz$ ta có: $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 5000Hz \Rightarrow LC = 1.0132 \times 10^{-9}$

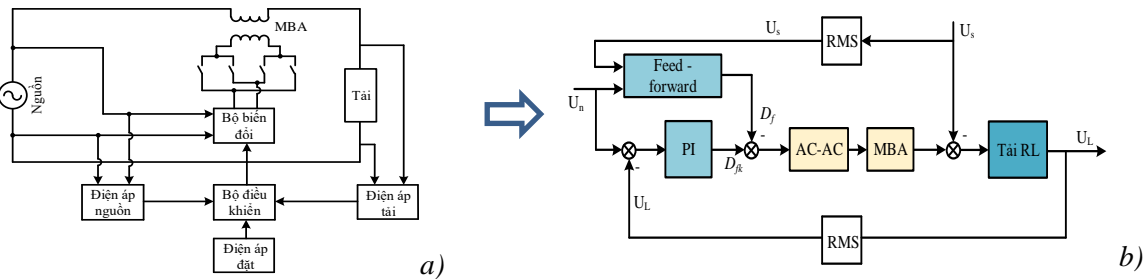
Với điều kiện sụt áp của thành phần điện áp cơ bản trên mạch lọc cần $<5\%$ ở chế độ làm việc đầy tải và điện áp thấp nhất (150V) thì $\Delta U_L < 5\% \times 150 = 7.5(V)$

Dòng điện qua cuộn cảm khi đó: $I_L = I_{pri} = 22.75(A) \Rightarrow Z_L < \frac{7.5}{22.75} = 0.33(\Omega)$, $L < \frac{0.33}{100\pi} = 1.05(mH)$

Ta chọn $L_{in} = 1mH/25A$, $C_{in} = 1\mu F/450V$.

Tính toán tương tự cho mạch lọc đầu ra chọn được $L_{out} = 1mH/25A$, $C_{out} = 10\mu F/450V$.

4. Xây dựng cấu trúc điều khiển cho mô hình ổn áp tự động



Hình 10. a) Mô hình điều khiển; b) Cấu trúc điều khiển của ổn áp tự động 1 pha

Mô hình điều khiển của hệ thống được trình bày như hình 10a. Và cấu trúc điều khiển của ổn áp tự động 1 pha được trình bày như hình 10b, do các khâu đo điện áp nguồn và tải có tính trễ, làm ảnh hưởng tới đáp ứng của bộ điều khiển PI. Do đó, để điện áp trên tải nhanh chóng trở về điểm làm việc an toàn cho tải, trong bài báo này sẽ kết hợp hai bộ điều khiển Feed-forward và PI làm việc cùng nhau. Bộ điều khiển Feed-Forward có ưu điểm là phản ứng nhanh. 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 Feed-Forward sẽ tồn tại sai lệch tĩnh của điện áp trên tải. Giá trị sai lệch tĩnh này sẽ bị triệt tiêu bởi bộ điều khiển PI và khắc phục nhược điểm trên. Hệ số điều chế D đưa vào BBĐ: $D = D_f \pm D_{fk}$. 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 10b. Hệ số điều chế D sẽ quyết định độ rộng các xung để điều khiển các van của BBĐ AC-AC. Khi điện áp U_s nhỏ hơn điện áp đặt U_n , điện áp trên tải và hệ số điều chế D đưa vào BBĐ như (7).

$$\begin{cases} U_L = U_s + U_{sec} \\ D = D_f + D_{jk} \end{cases} \quad (7)$$

Khi điện áp U_s lớn hơn điện áp đặt, khi đó điện áp trên tải được viết như (8).

$$U_L = U_s - U_{sec} \quad (8)$$

Nếu hệ số điều chế D đưa vào BBĐ giữ nguyên sẽ dẫn tới tình trạng đáp ứng ngược của bộ điều khiển PI, lúc này thành phần U_{sec} mang dấu âm. Do đó công thức được điều chỉnh lại như (9).

$$\begin{cases} U_L = U_s - U_{sec} \\ D = D_f - D_{jk} \end{cases} \quad (9)$$

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 được thể hiện như (10).

$$U_2 = U_{sec} = |U_s - U_n| \quad (10)$$

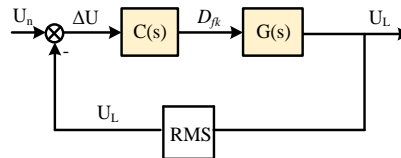
Với U_s và U_n lần lượt là điện áp hiệu dụng của nguồn đầu vào và điện áp đặt U_n . Với hệ số MBA đã $K_{BA} = 0.5$, ta có điện áp yêu cầu đầu ra của bộ biến đổi AC-AC như phương trình (11).

$$U_c = \frac{1}{K_{BA}} U_{sec} = 2|U_s - U_n| \quad (11)$$

Từ (11), (12) tính được hệ số điều chế của bộ *Feed-Forward* như phương trình (12).

$$\begin{cases} U_c = D_f U_s \\ U_c = 2|U_s - U_n| \end{cases} \Rightarrow D_f = 2 \frac{|U_s - U_n|}{U_s} \quad (12)$$

4.2. Thiết kế bộ điều khiển *FeedBack*



Hình 11. Cấu trúc bộ điều khiển *FeedBack*

Thay các giá trị LC đã tính toán ở phần 3.5, thu được hàm truyền giữa điện áp đầu ra BBĐ AC-AC với hệ số điều chế D như phương trình (13).

$$G_s = \frac{U_{sm}}{2 \times 10^{-8} s^2 + 4.132 \times 10^4 s + 2} \quad (13)$$

Thấy rằng, tử số của (13) tồn tại một thành phần biến số U_{sm} (điện áp nguồn hiệu dụng), 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 như phương trình (14).

$$\begin{cases} G_{s1} = U_{sm} \\ G_{s2} = \frac{1}{2 \times 10^{-8} s^2 + 4.132 \times 10^4 s + 2} \end{cases} \quad (14)$$

Sau quá trình tính toán ta chọn được bộ điều khiển:

$$C_s = \frac{0.8195s + 12890}{s}$$

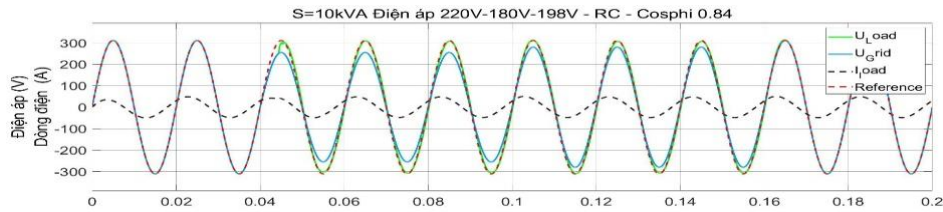
5. Mô phỏng và thực nghiệm hệ thống

5.1. Mô phỏng hệ thống

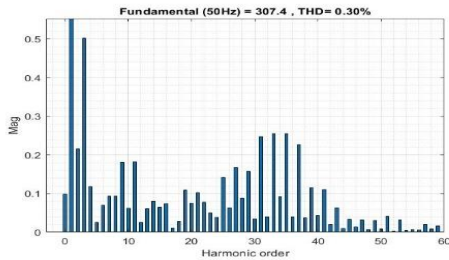
Khởi mạch đo là khởi chứa chương trình đo điện áp RMS cho nguồn và tải. Để kiểm tra đáp ứng của bộ ổn áp điện tử, ta thực hiện mô phỏng với kích bản hệ thống mang đầy tải (10kVA) trong hai trường hợp. Trường hợp 1: tải RC, $\cos\phi = 0,86$; trường hợp 2: Tải phi tuyến (chỉnh lưu cầu diode). Hoạt động của mô hình được thử nghiệm trong các điều kiện điện áp dao động mạnh nhất, từ ngưỡng thấp nhất đến ngưỡng cao nhất trong dải hoạt động.

5.1.1. Tải RC

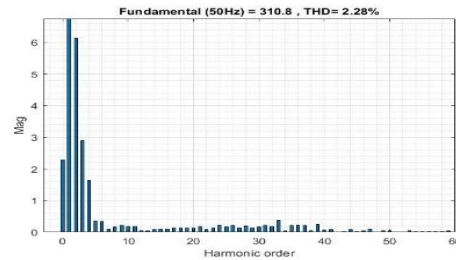
Kết quả mô phỏng khi điện áp nguồn dao động Thấp – Thấp tại 0.04s và 0.1s như hình 12.



Hình 12. Đáp ứng hệ thống khi điện áp nguồn thấp – thấp tải RC

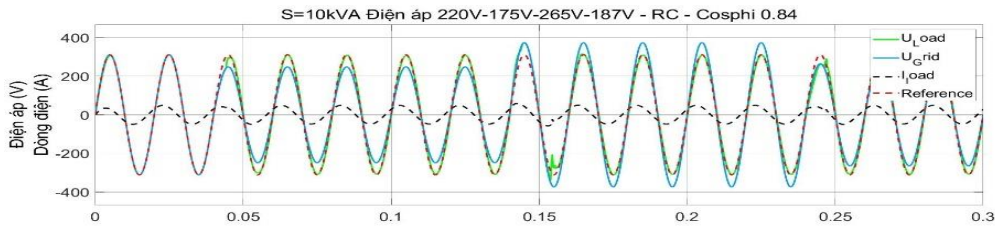


Hình 13. THD điện áp đầu ra khi điện áp nguồn thấp - thấp

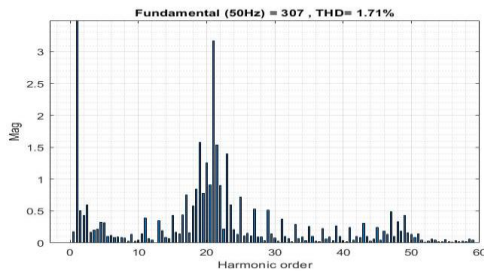


Hình 14. THD điện áp đầu ra khi điện áp nguồn thấp - thấp trong 1 chu kỳ quá độ

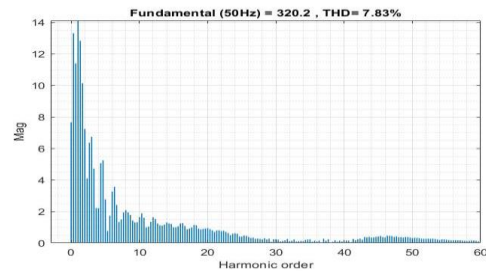
Kết quả mô phỏng khi điện áp nguồn dao động Ổn định - Thấp – Cao – Thấp như hình 15.



Hình 15. Đáp ứng hệ thống khi điện áp nguồn ổn định - thấp - cao - thấp tải RC



Hình 16. THD điện áp đầu ra khi điện áp nguồn ổn định - thấp - cao - thấp

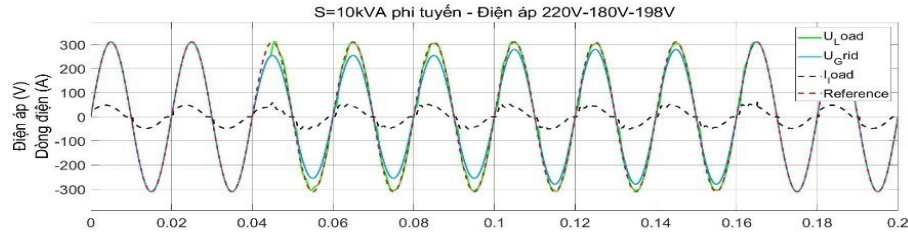


Hình 17. THD điện áp đầu ra khi điện áp nguồn ổn định - thấp - cao - thấp trong 1 chu kỳ quá độ

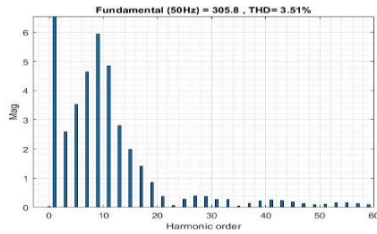
Các hình 12 và 15 là kết quả mô phỏng với tải RC khi điện áp nguồn dao động. Kết quả cho thấy rằng bộ điều khiển tác động nhanh để đưa điện áp trên tải về giá trị ổn định mong muốn với thời gian dưới 1 chu kỳ lưới đúng theo yêu cầu thiết kế ban đầu. Giá trị sai lệch điện áp nằm trong dải cho phép 5%, dạng điện áp khá bám tín hiệu đặt. Điện áp quá độ đầu ra bị dao động, tuy nhiên chỉ xảy ra nhanh trong 1 chu kỳ lưới. Kết quả đánh giá THD ở các hình 13, 14, 16 và 17 cho thấy trong các kịch bản tỉ lệ sóng hài THD thấp khi thiết bị làm việc ổn định (dưới 6,5%) và trong chu kỳ quá độ (dưới 15%).

5.1.2. Tải phi tuyến (chỉnh lưu cầu diode và tụ điện)

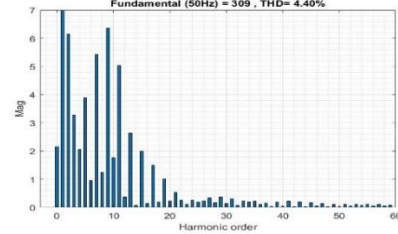
Kết quả mô phỏng khi điện áp nguồn dao động Thấp – Thấp tại 0.04s và 0.1s như hình 18.



Hình 18. Đáp ứng hệ thống khi điện áp nguồn thấp - thấp tải phi tuyến

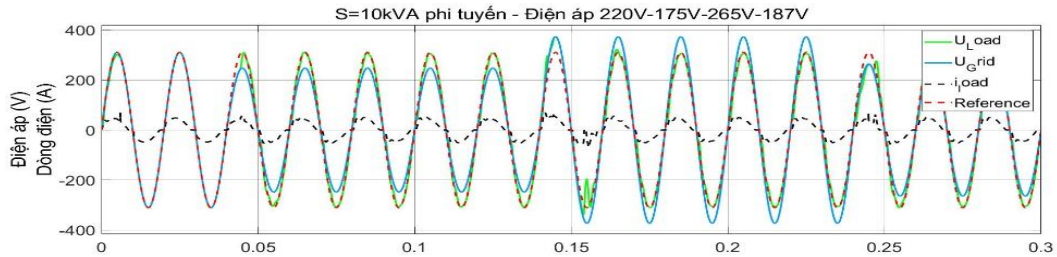


Hình 19. THD điện áp đầu ra khi điện áp nguồn thấp - thấp tải phi tuyến

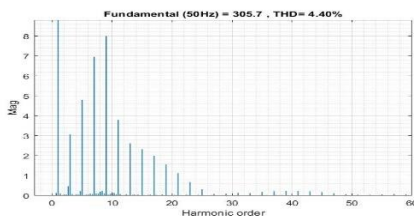


Hình 20. THD điện áp đầu ra khi điện áp nguồn thấp - thấp tải phi tuyến trong 1 chu kỳ quá độ

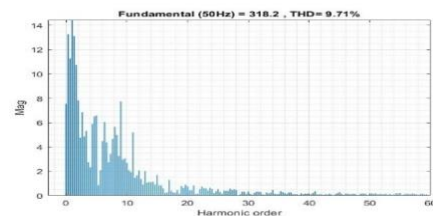
Kết quả mô phỏng khi điện áp nguồn dao động Ổn định - Thấp – Cao – Thấp



Hình 21. Đáp ứng hệ thống khi điện áp nguồn ổn định - thấp - cao – thấp tải phi tuyến



Hình 22. THD điện áp đầu ra khi điện áp nguồn ổn định - thấp - cao - thấp tải phi tuyến



Hình 23. THD điện áp đầu ra khi điện áp nguồn ổn định - thấp - cao - thấp tải phi tuyến trong 1 chu kỳ quá độ

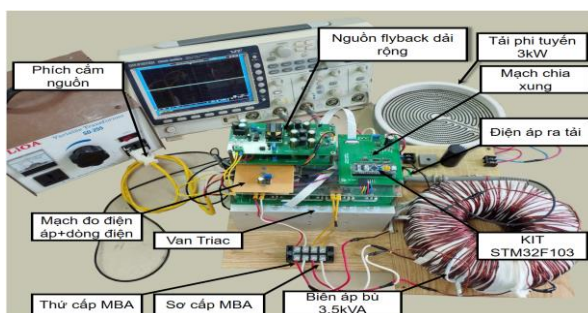
Các hình 18 và 21 là kết quả mô phỏng với tải phi tuyến khi điện áp nguồn dao động. Tương tự như trường hợp tải RC, kết quả cho thấy rằng bộ điều khiển tác động nhanh để đưa điện áp trên tải về giá trị

ổn định mong muốn với thời gian dưới 1 chu kỳ lưới. Giá trị sai lệch điện áp nằm trong dải cho phép $\pm 5\%$, dạng điện áp khá bám tín hiệu đặt.

Đối với các trường hợp có sự quá độ của máy biến áp, thời gian đáp ứng chậm hơn (khoảng 1.5 chu kỳ), tuy nhiên chỉ sau 1 chu kỳ, điện áp đã nằm trong ngưỡng tiêu chuẩn $\pm 5\%$. Kết quả đánh giá THD ở các hình 19, 20, 22, 23 cho thấy trong các kịch bản tỉ lệ sóng hài THD thấp khi thiết bị làm việc ổn định (dưới 6,5%) và trong chu kỳ quá độ (dưới 15%), có thể chấp nhận được với tải phi tuyến. Quy định về sóng hài điện áp tại khoản 2, Điều 7 Thông tư 39/2015/TT-BCT ngày 18/11/2015 của Bộ Công Thương quy định “Với cấp Trung và Hạ áp, tổng độ biến dạng sóng hài không được vượt quá 6,5% với phụ tải chất lượng cao, và không vượt quá 15% với phụ tải không yêu cầu chất lượng cao”. Các kết quả của bài báo đều thu được các trị số THD dưới 6,5%. Chỉ riêng trường hợp quá độ như hình 17 và hình 23. Tuy nhiên chỉ số là chỉ xảy ra trong 1 chu kỳ quá độ và lập tức trở về trạng thái thường

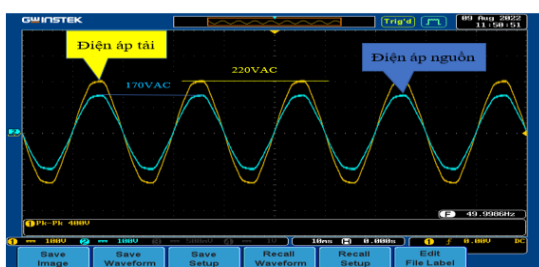
5.2. Kết quả thực nghiệm hệ thống

Mô hình thực nghiệm hệ thống sử dụng mạch điều khiển dùng kit STM32F103C8T6 như hình 24. Khi thiết kế mô hình thực nghiệm, hệ thống cũng được kiểm tra đáp ứng với các trường hợp điện áp nguồn dao động của lưới. Ta kiểm tra với điều kiện ổn áp mạng đầy tải với tải RC và tải phi tuyến với công suất 10kW trong trạng thái hoạt động ổn định của hệ thống.

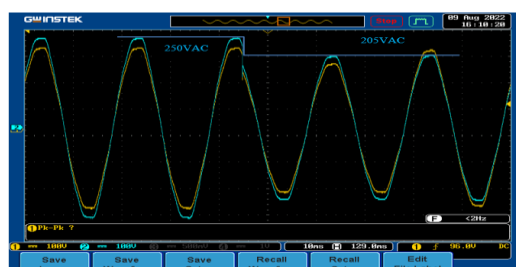


Hình 24. Mô hình thực nghiệm 10kVA

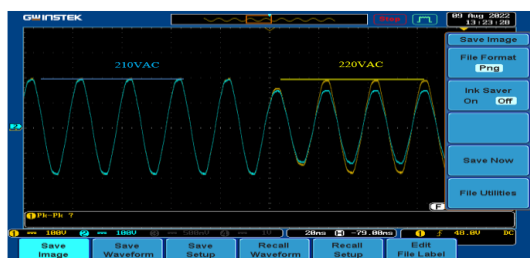
5.2.1. Kết quả với tải RC



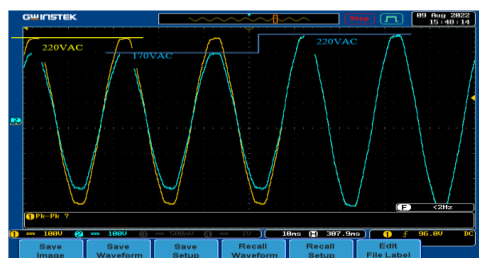
Hình 25. Điện áp tải khi nguồn thấp – thấp



Hình 26. Điện áp tải khi nguồn cao - thấp



Hình 27. Điện áp tải khi nguồn ổn định – thấp



Hình 28. Điện áp tải khi nguồn thấp - ổn định

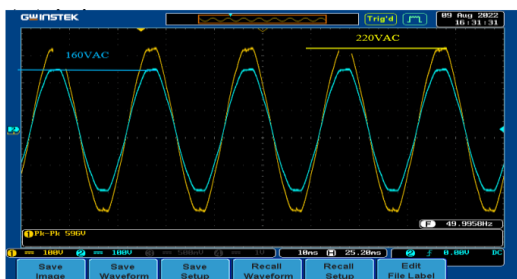
Từ hình 25 đến hình 28 là kết quả thực nghiệm hệ thống nối tải RC trong các trường hợp điện áp nguồn lưới không ổn định. Các kết quả cho thấy thời gian đáp ứng của hệ thống nhanh với khoảng một

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. Nhìn chung, trong các trường hợp các giá trị thực bám giá trị đặt đã thể hiện được những ưu điểm của thuật toán đề xuất trong thực tế.

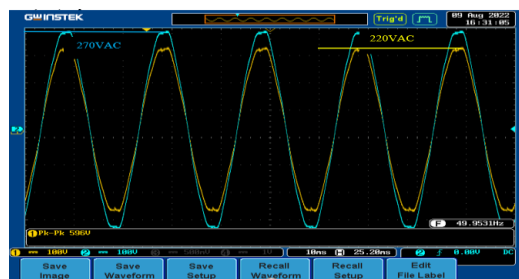
5.2.2. Kết quả với tải phi tuyến

Hình 29 và hình 30 là kết quả thực nghiệm hệ thống nối tải phi tuyến trong các trường hợp điện áp nguồn lưới không ổn định. Tương tự như trong trường hợp hệ thống nối tải RC, các kết quả cho thấy thời gian đáp ứng của hệ thống nhanh. Đối với các trường hợp không có sự thay đổi trạng thái của các van triac phía cầu H, tốc độ đảm bảo nhỏ hơn 1 chu kỳ. Đối với trường hợp có sự thay đổi trạng thái của các van triac phía cầu H, thì tốc độ đáp ứng của hệ thống chậm hơn, nhưng vẫn đảm bảo nhỏ hơn 1.5 chu kỳ lưới.

Từ các kết quả mô phỏng nói trên, có thể thấy rằng các tham số thiết kế là khâu trung gian để đáp ứng yêu cầu của điện áp trên tải luôn ổn định dựa vào các điện áp nguồn thay đổi. Thiết kế các linh kiện trong ổn áp tự động giúp cho ổn áp hoạt động tốt mà không ảnh hưởng đến tuổi thọ của các linh kiện, còn thiết kế thông số bộ điều khiển để dòng điện và điện áp đầu ra hoạt động trong phạm vi cho phép khi có dao động điện áp nguồn. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm đều cho thấy giá trị điện áp trên tải luôn ổn định, mặc dù điện áp nguồn cao hoặc thấp hơn với kịch bản mô phỏng đề xuất. Điều này chứng tỏ quá trình tính toán tham số của linh kiện đã phù hợp với thiết bị ổn áp tự động này. Đối với các hệ thống có yêu cầu về giá trị điện áp và công suất khác, cũng có thể thiết kế hoàn toàn tương tự để có được kết quả mong muốn.



Hình 29. Điện áp tải với tải phi tuyến ở điện áp nguồn thấp 160V



Hình 30. Điện áp tải với tải phi tuyến ở điện áp nguồn cao 270V

6. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu về mô hình và cách thiết kế tham số của thiết bị ổn áp tự động, đồng thời cũng nêu rõ quá trình làm việc của hệ thống ổn áp tự động. Quá trình thực hiện được kiểm chứng bằng mô hình thiết bị làm việc ở mạng điện hạ áp có điện áp định mức là 220VAC. Các kịch bản thực hiện trên mô phỏng và thực nghiệm đều được xây dựng trên quá trình dao động khác nhau của điện áp lưới giống như trong thực tế. Qua kiểm tra với các tải khác nhau, hệ thống đã cơ bản đáp ứng tốt các yêu cầu đặt ra. Các cơ sở lý thuyết, cấu trúc hoạt động nêu ra đã kiểm chứng chính xác thông qua các hình ảnh kết quả, điều này đã thể hiện được chất lượng điều khiển tốt, các giá trị điện áp ổn định, sai số trong dải giới hạn cho phép, thời gian đáp ứng nhanh trong một chu kỳ điện áp lưới.

Xung đột lợi ích


Tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Nan, T. H. Jun, L. J. Yu, Y. Chen, C. W. Wei, and A. X. 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] H. Chamandoust, A. Hashemi, and S. Bahramara, "Energy management of a smart autonomous electrical grid with a hydrogen storage system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 34, pp. 17608-17626, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.174.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] R. Nasrollahi, and M. F. 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, pp. 107-113, Jan. 2022.
- [7] 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.
- [8] F. M. Ibanez, F. M. J. 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.
- [9] 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.
- [10] M. Khaleel, M. R. Adzman, S. M. Zali, and M. M. Graisa, "A review of fuel cell to distribution network interface using D-FACTS: technical challenges and interconnection trends," *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 10, no. 5, pp. 319-332, 2021, doi: 10.18178/ijeetc.10.5.319-332.
- [11] H. M. A. Ahmed, A. S. A. Awad, M. H. Ahmed, and M. M. A. Salama, "Mitigating voltage-sag and voltage-deviation problems in distribution networks using battery energy storage systems," *Electr. Power Syst. Res.*, doi: 10.1016/j.epr.2020.106294.



Tran Hung Cuong graduated with a PhD in Control and Automation from Hanoi University of Science and Technology, Vietnam in 2020. Currently, he is a lecturer at Thuy Loi University, Vietnam and he is a research member of the Lab. Power electronics and electric drives at Hanoi University of Science and Technology. He specializes in research and control of power electronic converters for high-capacity, high-voltage power conversion applications, distributed generation sources connected to the grid, HVDC systems, and public electric drive systems. high power, powertrain systems in electric cars, power electronics applications in industry. Email: cuongth@tlu.edu.vn. ORCID:  <https://orcid.org/0009-0005-2812-7374>