

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN CHO MÁY BIẾN ÁP ĐIỆN TỬ MỘT PHA

DESIGN THE CONTROLLER FOR SINGLE PHASE SOLID STATE

Bùi Văn Huy^{1,*}, Phạm Văn Minh¹, Quách Đức Cường¹,
Trịnh Trọng Chương¹, Nguyễn Văn Đoài¹, Duangpasert Ounheuan²

TÓM TẮT

Máy biến áp truyền thống là thiết bị làm việc theo nguyên lý cảm ứng điện từ, chúng có nhược điểm cơ bản là một thiết bị thụ động và không được thiết kế để làm việc với các phụ tải thay đổi nhanh đồng thời chúng chiếm diện tích lớn không phù hợp với những ứng dụng yêu cầu không gian hẹp. Trong những năm gần đây, một số nhà khoa học tập trung nghiên cứu cấu trúc máy biến áp điện tử (Solid State Transformers - SST). Bản chất cấu trúc này gồm các bộ biến đổi điện tử công suất và máy biến áp tần số cao, với cấu trúc mạch lực và phương pháp điều khiển thích hợp, máy biến áp điện tử sẽ hứa hẹn giải quyết được nhiều yêu cầu phức tạp của thực tiễn và tương lai mà máy biến áp truyền thống chưa giải quyết được. Nội dung bài báo này tập trung nghiên cứu vào việc phân tích cấu trúc, chức năng và tổng hợp bộ điều khiển cho hệ thống máy biến áp điện tử một pha. Phương pháp thiết kế bộ điều khiển sẽ được minh chứng bằng việc mô phỏng trên Matlab simulink. Những kết quả mô phỏng chứng minh được tính đúng đắn của phương pháp điều khiển đã thực hiện.

Từ khóa: Tự động hóa; máy biến áp điện tử; biến tần ma trận; máy biến áp tần số cao; lưới điện thông minh.

ABSTRACT

Traditional transformers are devices that work on the principle of electromagnetic induction, they have the basic drawback of being a passive device and are not designed to work with rapidly changing loads while they occupy large volume is not suitable for applications requiring small space. In recent years, a number of scientists have been focusing on the Solid State Transformers. The nature of this structure is composed of high-power electronic converters and high-frequency transformers, with appropriate circuit structure and control method, electronic transformers will promise to solve many complex requirements. Magazine of practical and future that traditional transformers have not yet solved. The content of this paper focuses on the analysis of structure, function and controller synthesis for a single-phase electronic transformer system. Controller design method will be demonstrated by simulation on Matlab simulink. The simulation results prove the correctness of the control method performed.

Keywords: Automation; solid state transformers; matrix converter; high frequency transformers; smart grid.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Học viện Phát triển giáo dục nghề nghiệp, Cộng hòa Dân chủ nhân dân Lào

*Email: huybv.ac@gmail.com

Ngày nhận bài: 05/11/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/12/2020

Ngày chấp nhận đăng: 26/02/2021

1. GIỚI THIỆU

Thông thường, máy biến áp gồm có một cuộn dây sơ cấp và một hay nhiều cuộn dây thứ cấp liên kết qua trường điện từ. Khi đưa nguồn điện xoay chiều vào cuộn sơ cấp, sẽ tạo ra trường điện từ. Theo định luật cảm ứng Faraday trường điện từ tạo ra dòng điện cảm ứng ở các cuộn thứ cấp. Máy biến áp truyền thống đã và đang là phần tử quan trọng trong việc truyền tải điện từ nơi sản xuất tới nơi tiêu thụ điện.

Ngày nay, mức độ tham ra của các nguồn năng lượng tái tạo vào lưới điện càng tăng về quy mô và chủng loại. Sự tham gia của các nguồn năng lượng này bổ sung nguồn năng lượng cần thiết do các nguồn năng lượng điện có nguồn gốc từ nhiên liệu hóa thạch ngày càng cạn kiệt và thủy điện đã khai thác hết. Mặt khác, sự tham gia của các nguồn năng lượng này đặt ra các yêu cầu cao hơn như: đảm bảo hệ số công suất, giảm sóng hài, bền vững với nhiễu loạn lưới, trao đổi công suất hai chiều tin cậy và kịp thời. Với những yêu cầu như vậy thì máy biến áp truyền thống rất khó đáp ứng được trong những lĩnh vực đặc thù. Một lý do khác cũng cần xem xét, một số ứng dụng đặc thù đòi hỏi biến đổi điện áp, công suất lớn nhưng đòi hỏi diện tích lắp đặt nhỏ gọn thì máy biến áp truyền thống cũng không thể đáp ứng được.

Trong những năm gần đây, một số nhà khoa học trong và ngoài nước tập trung nghiên cứu cấu trúc máy biến áp mới (Solid State Transformers - SST), một số tác giả trong nước gọi tên là máy biến áp thể rắn, tuy nhiên rõ ràng việc dịch như vậy chưa thể hiện rõ bản chất của SST, trong bài báo này tác giả gọi tên thiết bị là máy biến áp điện tử.

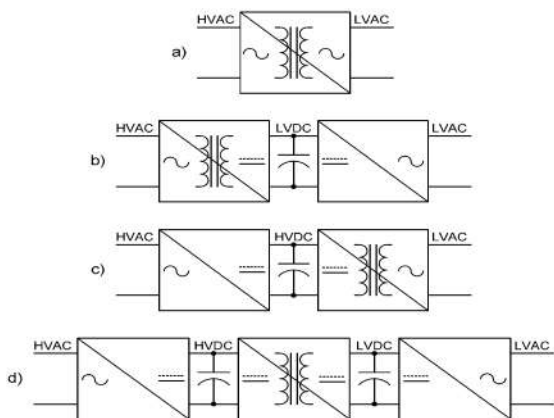
Bản chất cấu trúc máy biến áp điện tử gồm các bộ biến đổi điện tử công suất và máy biến áp tần số cao, với cấu trúc mạch lực và phương pháp điều khiển thích hợp, máy biến áp điện tử sẽ hứa hẹn giải quyết được nhiều yêu cầu phức tạp của thực tiễn và tương lai.

Nội dung của bài báo này đề cập tổng quan về các cấu hình máy biến áp điện tử 1 pha, đề xuất một cấu hình máy biến áp điện tử một pha cũng như những thuật toán điều chế và điều khiển hệ thống đã đề xuất. Những thuật toán điều chế và điều khiển được kiểm chứng bằng cách mô phỏng trên Matlab/Simulinks.

2. NỘI DUNG CHÍNH

2.1. Tổng quan về máy biến áp điện tử 1 pha

Hiện nay có rất nhiều cấu hình máy biến áp điện tử xây dựng trên nền tảng các van bán dẫn được đề cập trong rất nhiều tài liệu như [1, 2, 3]. Các cấu hình này ngoài chức năng biến đổi điện áp thì một số cấu hình có thể trao đổi được công suất hai chiều.



Hình 1. Một số cấu hình máy biến áp điện tử [1]

Cấu trúc máy biến áp điện tử đều bao gồm một khâu cách ly bằng máy biến áp tần số cao, có thể được phân loại theo kiểu sơ đồ khối như hình 1 gồm 4 loại chính:

Cấu hình một khối như hình 1a không có khâu một chiều trung gian, đây là khâu biến đổi trực tiếp AC/AC; Cấu hình gồm 2 khối có khâu một chiều điện áp thấp như hình 1b; Cấu hình gồm hai khối với khâu trung gian một chiều điện áp cao như hình 1c; Cấu hình gồm 3 khối với hai khâu một chiều trung gian (một khâu điện áp cao và một khâu điện áp thấp) như hình 1d.

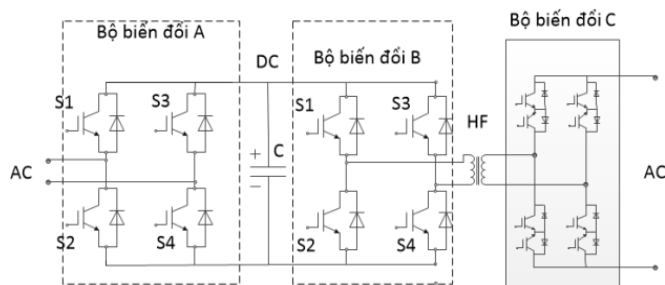
Như phân tích ở trên, về cơ bản máy biến áp điện tử gồm máy biến áp tần số cao và các bộ biến đổi điện tử công suất. Như hình 2, rõ ràng cùng công suất 5-kVA, nhưng tần số làm việc khác nhau dẫn đến kích thước máy biến áp cũng thay đổi đáng kể làm các máy biến áp điện tử có kích thước nhỏ gọn hơn, phù hợp cho những lĩnh vực đặc thù cần vị trí lắp đặt nhỏ gọn như trong [1, 2, 3].



Hình 2. Kích thước giữa máy biến áp tần số cao và máy biến áp tần số thông thường [2]

2.2. Cấu trúc SST 1 pha

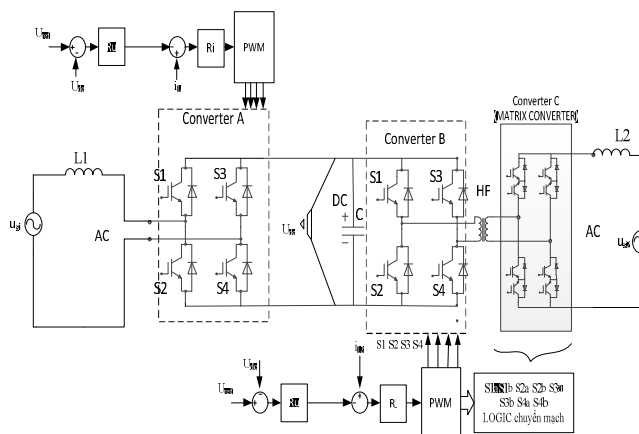
Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất cấu hình máy biến áp điện tử 1 pha có cấu trúc mạch lực của bộ biến đổi AC-DC-AC-AC cho trên hình 3, bao gồm hai cầu H (Bộ biến đổi A, B) và một bộ biến tần ma trận một pha (bộ biến đổi C).



Hình 3. Cấu trúc mạch lực MBA điện tử 1 pha

Trong cấu trúc như hình 3, điện áp trên tụ một chiều đóng vai trò là khâu trung gian trao đổi công suất giữa bộ biến đổi A và bộ biến đổi B, C. Bộ biến đổi A thực chất là bộ chỉnh lưu tích cực, bộ biến đổi B và C thực chất là bộ biến đổi DC-AC-AC với khâu AC-AC điều chế kiểu biến tần ma trận đã được giới thiệu trong [4], như vậy tụ điện đóng vai trò như khâu một chiều trung gian DC-link. Đầu vào AC của bộ biến đổi A thường được nối với lưới điện lớn còn đầu ra của bộ biến đổi C thường được nối với nguồn điện phân tán có công suất nhỏ (nguồn điện xoay chiều có nguồn gốc từ pin mặt trời hoặc sức gió). Thông qua bộ biến đổi, công suất của các nguồn phát phân tán này có thể trao đổi qua lại với nguồn lưới.

Cấu trúc điều khiển hệ thống máy biến áp điện tử 1 pha như hình 4.



Hình 4. Cấu trúc điều khiển cho MBA điện tử 1 pha

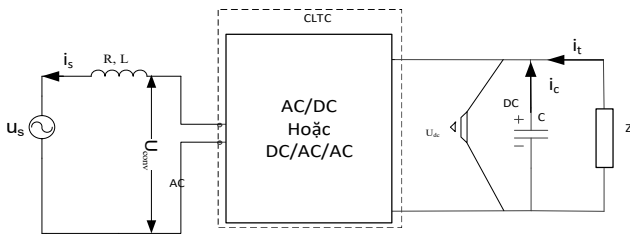
2.3. Xây dựng mô hình toán học cho hệ thống

Xét về mặt trao đổi năng lượng cả hai bộ biến đổi đều có dạng chỉnh lưu tích cực như hình 5, trong đó Z coi như tổng trở tương đương của phía còn lại của hệ thống, R và L là điện trở và điện cảm của cuộn cảm nối nguồn với bộ biến đổi, i_s là dòng điện bộ biến đổi trao đổi với lưới, i_c là dòng điện từ phía tải tương đương truyền vào bộ biến đổi. Ta có các phương trình mô tả hệ như (1).

$$R \cdot i_s + L \frac{di_s}{dt} = u_{conv} - u_s \tag{1}$$

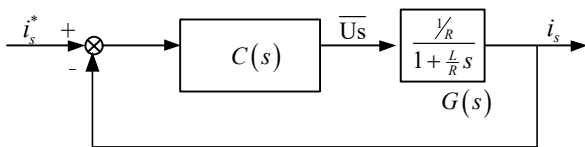
Từ (1) ta có (2).

$$i_s = \frac{u_{conv} - u_s}{R + Ls} = \frac{\bar{u}_s}{R + Ls} \tag{2}$$



Hình 5. Sơ đồ hệ chỉnh lưu tích cực

Trong trạng thái các nguồn điện xoay chiều đã ổn định thì việc điều khiển dòng điện bơm vào lưới sẽ được thực hiện thông qua điện áp nghịch lưu bộ biến đổi \$u_{conv}\$. Cấu trúc mạch vòng điều khiển cho như hình 6.



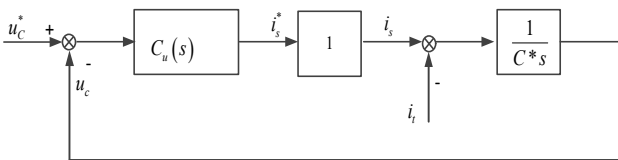
Hình 6. Cấu trúc vòng điều khiển dòng điện

Giả sử bộ điều khiển dòng điện đã hoạt động ổn định thì hàm truyền vòng kín của bộ điều khiển dòng điện sắp xỉ là 1.

Ta có phương trình (3).

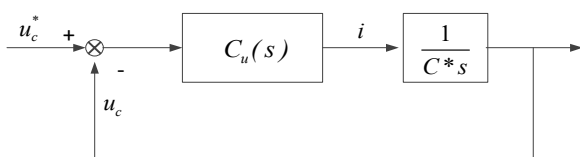
$$u_c = \frac{1}{jC\omega} * i_c = \frac{1}{jC\omega} * (i_s - i_t) \tag{3}$$

Hay: $u_c = \frac{1}{Cs} * (i_s - i_t) \tag{4}$



Hình 7. Cấu trúc điều khiển điện áp trên tụ C

Coi \$i_t\$ là nhiễu, cấu trúc bộ điều khiển điện áp \$u_c\$ sẽ như hình 8.



Hình 8. Cấu trúc bộ điều khiển cộng hưởng cho điện áp trên tụ \$U_c\$ rút gọn

Trong đó: \$C_u(s)\$ là bộ điều khiển điện áp một chiều và \$C\$ là tụ điện một chiều trung gian.

2.4. Tổng hợp bộ điều khiển cộng hưởng cho các mạch vòng điều khiển

Bộ điều khiển cộng hưởng được ứng dụng phổ biến trong các bộ biến đổi nối lưới, nguyên lý tổng hợp bộ điều khiển cộng hưởng đã được nhiều tài liệu trình bày (chẳng hạn [6]). Trong bài báo này, nhóm tác giả sẽ áp dụng luật điều khiển cộng hưởng để tổng hợp các vòng điều khiển cho máy biến áp điện tử 1 pha.

Đối với các bộ nghịch lưu nguồn áp, lượng đặt dòng điện đối với bộ điều khiển dòng điện vòng trong hay lượng đặt điện áp đối với bộ điều khiển điện áp vòng ngoài luôn thay đổi, nếu sử dụng cấu trúc điều khiển PI thì luôn tồn tại sai lệch tĩnh. Vì vậy, nhóm tác giả sử dụng cấu trúc bộ điều khiển cộng hưởng PR để giải quyết vấn đề này. Cấu trúc bộ điều chỉnh PR có dạng như (5).

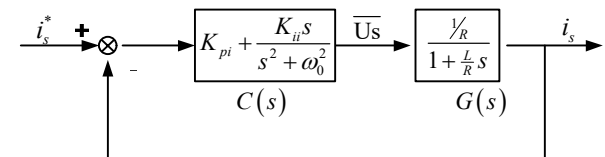
$$G_{PRh}(s) = K_{ph} + K_{lh} \frac{s}{s^2 + h^2 \omega_1^2} \tag{5}$$

Trong đó, \$K_{ph}\$ và \$K_{lh}\$ là hệ số tỷ lệ và hệ số tích phân của bộ điều khiển PR.

Nếu chọn \$h = 1\$ tức là bộ điều khiển cộng hưởng ở tần số cơ bản thì cấu trúc bộ điều khiển PR sẽ trở thành (6):

$$G_{PRh}(s) = K_{ph} + K_{lh} \frac{s}{s^2 + \omega_1^2} \tag{6}$$

Bộ điều chỉnh dòng cộng hưởng PR có cấu trúc cụ thể như hình 9.



Hình 9. Cấu trúc bộ điều khiển cộng hưởng dòng

Trong đó :

- Sóng hài bậc \$h = 1 \Rightarrow\$ Cộng hưởng tại tần số cơ bản, \$C(s)\$ là hàm truyền bộ điều chỉnh dòng PR và \$G(s)\$ là hàm truyền của đối tượng bộ điều chỉnh dòng điện.

- \$i_s^*\$ là giá trị đặt của dòng điện.
- \$i_s\$ là giá trị thực tế đầu ra của dòng tải.
- \$\omega_0\$ là tần số cơ bản của dòng điện.
- \$R\$ và \$L\$ là điện trở, điện cảm nối tiếp đầu vào bộ biến đổi.
- \$K_{pi}\$, \$K_{hi}\$ là các tham số bộ điều khiển cần tính.

Hàm truyền vòng kín của mô hình như (7):

$$G_{PR}(s) = \frac{i_s}{i_s^*} = \frac{K_{pi}s^2 + K_{hi}s + K_{pi}\omega_0^2}{Ls^3 + (R + K_{pi})s^2 + (K_{hi} + \omega_0^2 L)s + K_{pi}\omega_0^2 + \omega_0^2 R} \tag{7}$$

Thay \$s = j\omega\$ vào (7) và tính ta được (8):

$$|G_{PR}(s)| = \frac{\sqrt{K_{hi}^2 \omega^2 + K_{pi}^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2}}{\sqrt{[K_{hi} + L(\omega_0^2 - \omega^2)]^2 + (R + K_{pi})^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \tag{8}$$

Cho \$K_{hi} = 0\$ biểu thức (8) được viết lại như (9):

$$|T_{PR}(j\omega)| = \frac{\sqrt{K_{pi}^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2}}{\sqrt{L(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (R + K_{pi})^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \tag{9}$$

Nếu tần số góc ban đầu \$\omega_{lb}\$ được xác định thì \$K_{pi}\$ được xác định như sau để có hệ số suy giảm -3db hay

$$|T_{PR}(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}} \tag{10}$$

Thay (10) vào (9) và giải phương trình ta được:

$$K_{pi} = R + \sqrt{2R^2 + (L\omega_{ib})^2} \tag{11}$$

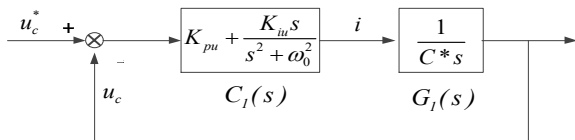
(ω_{ib} là tần số góc ban đầu).

Xét cả khâu tích phân. Tính K_{ii}

Giải phương trình (10) với ẩn K_{ii} , trong khi K_{pi} đã biết ta có (12).

$$K_{ii} = \frac{(\omega_{fb}^2 - \omega_0^2)}{\omega_{fb}} \cdot \sqrt{(R + K_{pi})^2 + 2 \cdot (L\omega_{fb})^2 - 2K_{pi}^2 - L\omega_{fb}} \tag{12}$$

Như phân tích ở trên, bộ điều khiển cộng hưởng mạch vòng điện áp cho như (7).



Hình 10. Cấu trúc bộ điều khiển cộng hưởng cho điện áp trên tụ u_c

Trong đó:

- $C_1(s)$ là hàm truyền bộ điều chỉnh áp PR.
- $G_1(s)$ là hàm truyền tương đương của vòng kín bộ điều khiển dòng điện và tải.
- u_c^* là giá trị đặt của điện áp trên tụ điện.
- u_c là giá trị thực tế điện áp trên tụ điện.
- C là điện dung của tụ điện.
- K_{pu}, K_{iu} là các hệ số cần tính.

Ta có hàm truyền vòng kín của hệ thống:

$$T_{PR}(s) = \frac{u_c}{u_c^*} = \frac{K_{pu}s^2 + K_{iu}s + K_{pu}\omega_0^2}{Cs^3 + K_{pu}s^2 + (K_{iu} + \omega_0^2 C)s + K_{pu}\omega_0^2} \tag{13}$$

Thay $s = j\omega$ vào (13) và tính ta được:

$$|T_{PR}(s)| = \frac{\sqrt{K_p^2 \omega^2 + K_p^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2}}{\sqrt{[K_i + C(\omega_0^2 - \omega^2)]^2 + K_p^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \tag{14}$$

Giả sử chỉ có khâu tỉ lệ và bỏ qua khâu tích phân.

Xét $K_{iu} = 0$ tính K_{pu} . Thay $K_{iu} = 0$ vào (14) và giải phương

trình $|T_{PR}(s)| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ ta được:

$$K_{pu} = \sqrt{(C\omega_{ib})^2} = C\omega_{ib} \tag{15}$$

Với: ω_{ib} là tần số góc ban đầu

Xét cả khâu tích phân. Tính K_{iu}

Giải phương trình với ẩn K_{iu} , trong khi P_{pu} đã biết ta được.

$$K_{iu} = \frac{(\omega_{fb}^2 - \omega_0^2)}{\omega_{fb}} \cdot (\sqrt{K_{pu}^2 + 2 \cdot (C\omega_{fb})^2} - 2K_{pu}^2 - C\omega_{fb}) \tag{16}$$

Trong đó, ω_{fb} là tần số góc cuối.

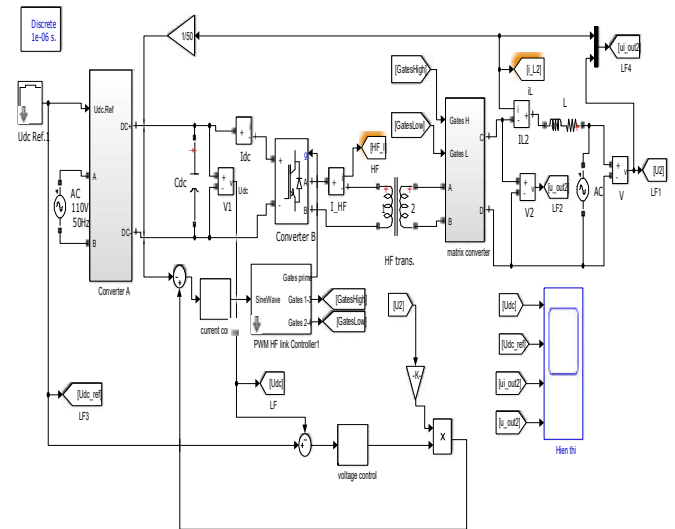
3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ BÀN LUẬN

Trên cơ sở phân tích và tổng hợp bộ điều khiển như ở mục 2, nhóm tác giả xây dựng mô hình mô phỏng máy biến áp điện tử 1 pha với các thông số cụ thể như bảng 1.

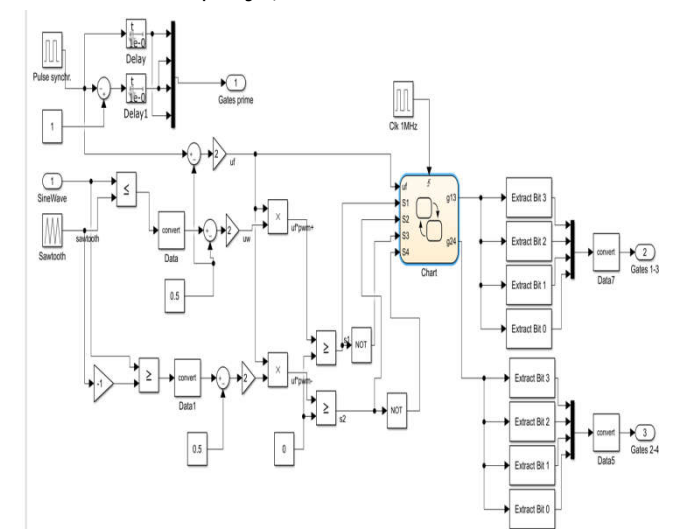
Hình 11 thể hiện sơ đồ mô phỏng máy biến áp điện tử 1 pha, hình 12 mô tả khâu chuyển mạch.

Bảng 1. Tham số mô phỏng hệ thống

STT	Tham số	Giá trị	Đơn vị
1	L_1	4,5e-3	H
2	R_1	0,01	Ω
3	L_2	7,5e-3	H
4	R_2	0,01	Ω
5	C	0,001	F
6	U_c^*	200	V
7	ω_0	100 π	rad
8	Điện áp cổng 1	110 $\sqrt{2} \sin(\omega t)$	V
9	Điện áp cổng 2	220 $\sqrt{2} \sin(\omega t)$	V
10	ω_{fb}	2.450 π	rad
11	ω_{fb}	2.550 π	rad

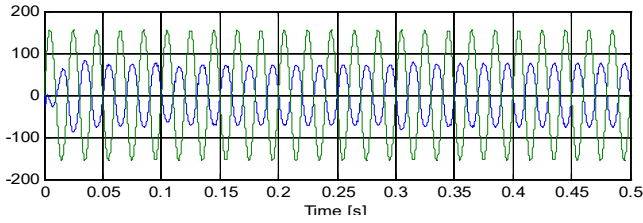


Hình 11. Sơ đồ mô phỏng hệ SST

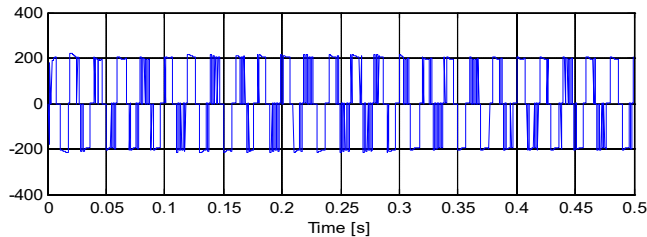


Hình 12. Sơ đồ mô phỏng khâu chuyển mạch

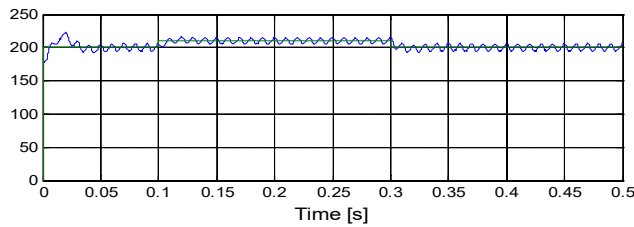
Kết quả mô phỏng như hình 13 ÷ 19 cho thấy, dạng dòng điện đi qua các cổng có dạng sin và có thể hiệu chỉnh hệ số công suất, công suất có thể trao đổi hai chiều giữa phía AC và DC, điện áp một chiều trung gian được giữ bám với giá trị đặt chúng tỏ vấn đề trao đổi công suất được đảm bảo.



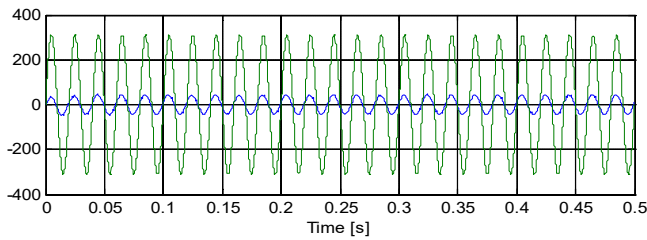
Hình 13. Dòng điện qua cuộn cảm và điện áp nguồn cổng 1



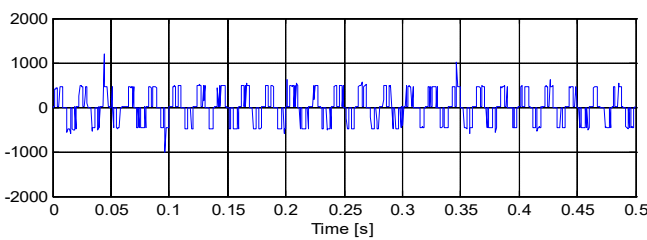
Hình 14. Điện áp tại đầu vào bộ biến đổi A



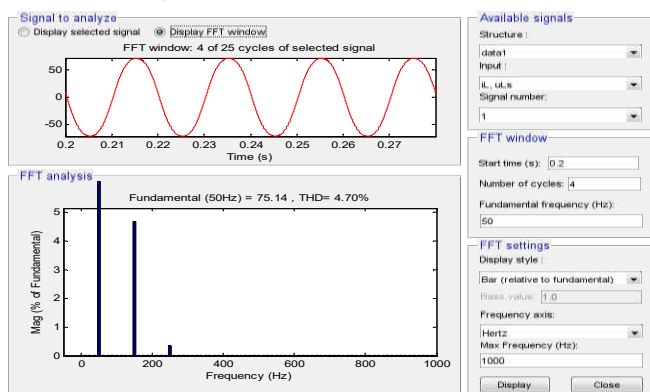
Hình 15. Điện áp đặt và điện áp thực tế của khâu DC_link



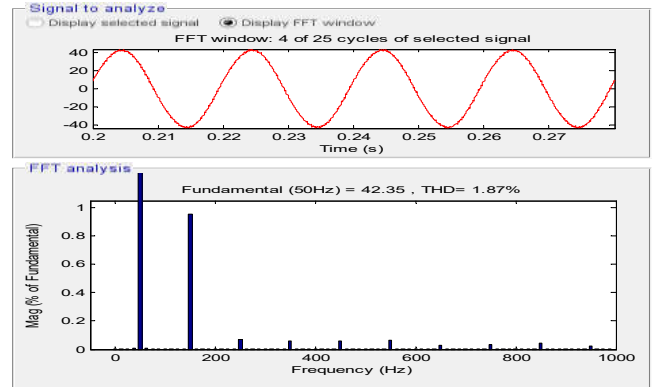
Hình 16. Dạng dòng điện qua cuộn cảm và điện áp nguồn cổng 2



Hình 17. Điện áp đầu vào bộ biến đổi C



Hình 18. Phân tích sóng hài dòng điện cổng 1 (0,2- 0,28s)



Hình 19. Phân tích sóng hài dòng điện ở cổng 2 (0,2- 0,28s)

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu việc điều khiển máy biến áp điện tử một pha xây dựng trên cơ sở bộ AC-DC-AC-AC có khâu trung gian tần số cao. Việc tổng hợp bộ điều khiển dòng điện và điện áp theo kết hợp sử dụng phương pháp điều chế và phương án chuyển mạch theo kiểu biến tần ma trận đã đảm bảo khả năng tạo ra dòng phía xoay chiều có dạng sin, công suất có thể trao đổi hai chiều giữa hai phía máy biến áp. Tuy nhiên, những nghiên cứu này mới kiểm chứng bằng mô phỏng, cần tiếp tục nghiên cứu và thử nghiệm trên các mô hình thực tế.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã hỗ trợ nghiên cứu thông qua đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường năm 2019, mã số: 33-2019-RD/HĐ-ĐHCN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Falcones, X. Mao, R. Ayyanar, 2010. *Topology Comparison for Solid State Transformer Implementation*. Power and Energy Society General Meeting, IEEE 2010.
- [2]. Aumkar Borgaonkar, 2015. *Solid State Transformers: A Review of Technology and Applications*. Research.
- [3]. Xu She, Alex Huang, 2013. *Solid State Transformer in the Future Smart Electrical System*. 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting.
- [4]. Bùi Văn Huy, Nguyễn Văn Liên, Trần Trọng Minh, Vũ Hoàng Phương, 2014. *Bộ biến đổi DC-AC-AC qua khâu trung gian tần số cao có khả năng trao đổi công suất hai chiều*. Hội nghị toàn quốc lần thứ 7 về Cơ Điện tử - VCM-2014 (trang 136 -142).
- [5]. Bùi Văn Huy, Nguyễn Văn Liên, Trần Trọng Minh, Vũ Hoàng Phương, Trần Đình Thoại, 2015. *Thực nghiệm bộ nghịch lưu DC-AC-AC với khâu trung gian tần số cao có khả năng trao đổi công suất hai chiều*. Hội nghị toàn quốc lần thứ 2 về Điều khiển và Tự động hoá - VCCA 2015 tháng 11/2015 (trang 197-203).
- [6]. Bùi Văn Huy, Trần Trọng Minh, Nguyễn Văn Liên, 2014. *Điều khiển dòng công suất hai chiều qua bộ biến đổi AC-DC-AC đa bậc nối tầng với khâu trung gian tần số cao*. Chuyên san điều khiển tự động hóa Số 11- Tháng 12/2014 ISSN 1859-0551 (trang 24-31).

AUTHORS INFORMATION

Bui Van Huy¹, Pham Van Minh¹, Quach Duc Cuong¹, Trinh Trong Chuong¹, Nguyen Van Doai¹, Duangpasert Ounheuan²

¹Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry

²Vocational Education Development Institute, Lao