

EXPERIMENTAL MULTI-LEVEL CONVERTER MMC WITH PS-PWM MODULATION USING SAME PHASE AND SAME FREQUENCY CARRIERS

Tran Hung Cuong

Thuyloi University

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	13/11/2024	PWM is a modulation method commonly applied in multi-level converters due to its simple implementation and effectiveness in certain cases. The process of applying and verifying PWM modulation for MMC multi-level converters is a big challenge due to the complexity of MMC power circuit construction techniques. This paper presents the process of analyzing, implementing, applying PS-PWM modulation and simulation and experimental results of PS-PWM modulation for MMC to demonstrate the operation process when MMC converts power from DC to AC. The process is carried out from analyzing the operation of MMC applying PS-PWM modulation method, followed by performing system simulation, evaluating simulation results. Finally, building an experimental MMC system applying PS-PWM modulation based on FPGA microcontroller to demonstrate the operation results compared to theory. The results showed that MMC works well under experimental conditions similar to theory and simulation. This is the basis for developing projects related to MMC.
Revised:	29/11/2024	
Published:	30/11/2024	
KEYWORDS		
Modular multilevel converter		
Sub-module		
Phase shift - PWM		
Level shift - PWM		
Experimental MMC converter		

THỰC NGHIỆM BỘ BIẾN ĐỔI ĐA MỨC MMC VỚI ĐIỀU CHẾ PS-PWM SỬ DỤNG CÁC SÓNG MANG CÙNG PHA CÙNG TẦN SỐ CÙNG BIÊN ĐỘ

Trần Hùng Cường

Trường Đại học Thủy Lợi

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 13/11/2024	PWM là phương pháp điều chế được áp dụng phổ biến trong các bộ biến đổi đa mức do có cách thực hiện đơn giản và hiệu quả trong một số trường hợp nhất định. Quá trình áp dụng và kiểm chứng điều chế PWM cho bộ biến đổi đa mức MMC là một thách thức lớn do sự phức tạp của kỹ thuật xây dựng mạch lực MMC. Bài báo này trình bày quá trình phân tích, triển khai, áp dụng điều chế PS-PWM và kết quả mô phỏng, thực nghiệm của điều chế PS-PWM cho MMC nhằm chứng minh quá trình hoạt động khi MMC chuyển đổi điện năng từ phía DC sang phía AC. Quá trình được thực hiện từ việc phân tích hoạt động của MMC được áp dụng phương pháp điều chế PS-PWM, tiếp theo là thực hiện mô phỏng hệ thống, đánh giá kết quả mô phỏng. Cuối cùng là xây dựng hệ thống thực nghiệm MMC được áp dụng điều chế PS-PWM dựa trên vi điều khiển FPGA để chứng minh kết quả hoạt động so với lý thuyết. Các kết quả đã cho thấy MMC hoạt động tốt với điều kiện thực nghiệm tương đồng với lý thuyết và mô phỏng. Đây là cơ sở để có thể phát triển các dự án liên quan đến MMC.
Ngày hoàn thiện: 29/11/2024	
Ngày đăng: 30/11/2024	
TỪ KHÓA	
Bộ biến đổi đa mức MMC	
Mô đun con	
Điều chế dịch pha PWM	
Điều chế dịch mức PWM	
Thực nghiệm bộ biến đổi MMC	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11550>

Email: cuongth@tlu.edu.vn

<http://jst.tnu.edu.vn>

362

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

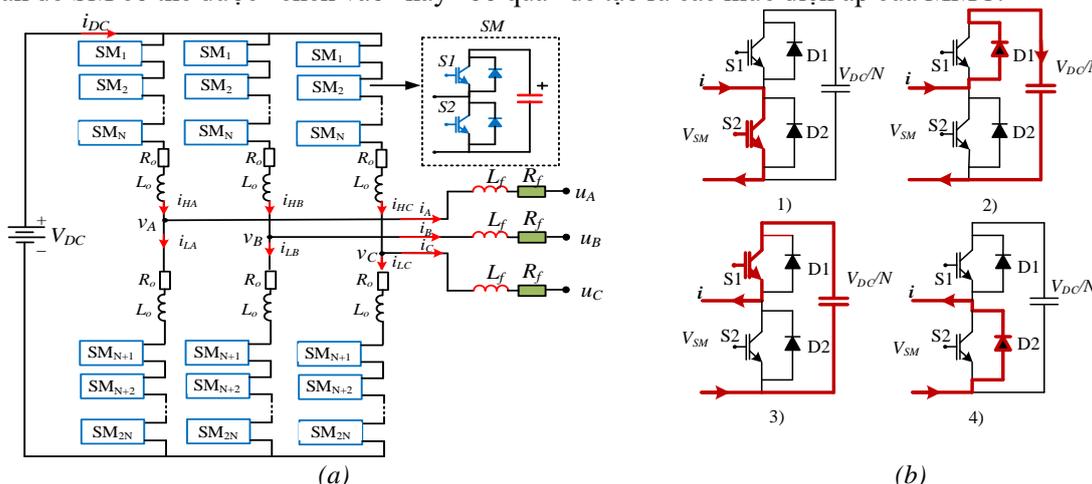
Trong những năm gần đây, bộ biến đổi (BBĐ) MMC (Modular multilevel Converter) là sự lựa chọn phù hợp cho các hệ thống biến đổi năng lượng có dải công suất từ trung áp đến cao áp [1]. MMC thường được sử dụng trong các hệ thống biến đổi điện năng AC/DC hoặc DC/AC. Các hệ thống điển hình trong ứng dụng MMC có thể kể đến như kết nối hệ thống pin năng lượng mặt trời hoặc năng lượng gió với lưới điện, các hệ thống truyền động điện cỡ trung áp [2]. Sự lựa chọn MMC để áp dụng cho các hệ thống này là do có nhiều ưu điểm vượt trội hơn so với các BBĐ đa mức cầu H nối tầng (CHB -Cascaded H Bridge), Đi ốt kẹp (NPC-Neutral Point Converter) như: Có cấu trúc linh hoạt ở dạng mô đun, dễ dàng thực hiện ở cấp điện áp cao, dễ dàng trong việc thay thế và sửa chữa, dễ dàng áp dụng các thuật toán điều chế và điều khiển khi MMC có số mức lớn [3]. MMC được cấu tạo từ các SM (Sub-Module) mắc nối tiếp trên hai nhánh van, quá trình đóng cắt của SM sẽ tạo ra được điện áp xoay chiều hoặc một chiều ở đầu ra tùy thuộc vào cách thức và mục tiêu biến đổi năng lượng. Cấu trúc MMC có thể mắc nối tiếp số lượng lớn các SM một cách đơn giản, nên MMC có thể cho ra chất lượng điện năng tốt với chỉ số về tổng độ méo sóng hài (THD - Total Harmonic Distortion) nhỏ mà không cần đến các bộ lọc phía đầu ra [4]. Để thực hiện được quá trình truyền dẫn năng lượng một cách mềm mại, thì các phương pháp điều chế cho MMC là một khâu rất quan trọng nhằm tạo ra được tổ hợp xung đóng cắt hợp lý để đảm bảo các van bán dẫn hoạt động ổn định và lâu dài [5]. Một số phương pháp điều chế thường được áp dụng cho MMC như: Điều chế độ rộng xung (PWM-Pulse Width Modulation), điều chế véc tơ không gian (SVM-Space Vector Modulation), điều chế mức sóng gần (NLM-Nearest Level Modulation). Mỗi phương pháp điều chế thường có những ưu điểm riêng biệt khi áp dụng cho MMC. Cụ thể, điều chế NLM phù hợp để áp dụng cho hệ thống MMC với số SM trên mỗi nhánh là lớn để tạo ra chất lượng điện áp và dòng điện ổn định. Nhược điểm của phương pháp này là không áp dụng được cho MMC có số mức thấp vì khi đó độ méo sóng hài và chỉ số THD của dòng điện và điện áp rất lớn, ngoài ra phương pháp này còn phải kết hợp với khâu cân bằng điện áp trên tụ điện, việc này sẽ làm hệ thống trở nên phức tạp và đòi hỏi kỹ thuật thực hiện cao do phải trang bị thêm nhiều thiết bị đo điện áp trên các tụ điện [6]. Điều chế SVM cũng có ưu điểm tương tự như phương pháp điều chế NLM đó là có thể áp dụng được cho MMC với số lượng lớn các SM và cho chất lượng điện năng với THD rất thấp, tuy nhiên phương pháp này có cách thực hiện rất phức tạp và đòi hỏi quá trình tính toán lớn [7]. Phương pháp này cũng có nhược điểm tương tự phương pháp điều chế NLM đó là cần thêm khâu cân bằng điện áp trên các tụ điện khiến hệ thống MMC trở nên phức tạp hơn. Đối với phương pháp điều chế PWM áp dụng cho MMC thì có ưu điểm đó là phù hợp cho MMC có số mức thấp và trung bình và có cách thực hiện đơn giản hơn phương pháp NLM và SVM. Điều chế PWM có nhiều kỹ thuật thực hiện như: PS-PWM, LS-PWM, trong mỗi phương pháp PWM đã nêu, lại có một số kỹ thuật riêng biệt, các kỹ thuật này sẽ được bài báo phân tích và làm rõ. Trong quá trình phân tích đã cho thấy rằng, kỹ thuật PS-PWM có một ưu điểm vượt trội đó là không cần đến khâu cân bằng điện áp trên các tụ điện, nghĩa là không cần các cảm biến đo điện áp tụ điện, vấn đề này làm cho MMC hệ thống mạch lực của MMC trở nên gọn nhẹ hơn và hoạt động đơn giản hơn, đây là một lợi thế về giá thành sản phẩm và kỹ thuật thực hiện mà vẫn đảm bảo MMC hoạt động tốt trong phạm vi của nó. Tuy nhiên phương pháp này có nhược điểm đó là tạo ra tần số đóng cắt van lớn vì vậy không thể áp dụng cho MMC có số mức lớn [8]. Chính vì những ưu điểm của điều chế PWM nên nó vẫn thường được sử dụng để áp dụng cho MMC có số mức trung bình và thấp để phù hợp chuyển đổi điện áp cỡ trung áp trở xuống cho các hệ thống truyền động điện động cơ hoặc các hệ thống năng lượng tái tạo cỡ trung áp. Từ các cơ sở phân tích trên, bài báo này sẽ trình bày về kỹ thuật thực hiện các phương pháp điều chế PWM áp dụng cho MMC để làm rõ những ưu điểm của PS-PWM khi áp dụng cho MMC so với các phương pháp PWM khác. Từ đó giới thiệu và triển khai hệ thống thực nghiệm MMC sử dụng vi điều khiển FPGA (Field Programmable Gate Array) để có thể thực hiện thành công kỹ thuật điều chế PS-PWM cho MMC. Đây là một hình thức tiếp cận mới mẻ về kỹ thuật để thực hiện điều chế cho MMC ở Việt Nam để

đưa MMC vào các dự án nghiên cứu thực tế trong tương lai. Các kết quả thực hiện sẽ được trình bày và phân tích đánh giá cho bộ biến đổi MMC ba pha với 12SM trên mỗi pha.

2. Cấu trúc và hoạt động của MMC dựa trên phương pháp điều chế PS-PWM

2.1. Cấu trúc và nguyên lý hoạt động của bộ biến đổi MMC

Bộ biến đổi MMC ba pha nối tải R-L có cấu trúc như Hình 1a. Mỗi pha của MMC gồm có hai nhánh van được mắc nối tiếp hàng loạt các SM với nhau. Điện áp một chiều V_{DC} được lấy từ hệ thống pin mặt trời hoặc hệ thống siêu tụ công suất lớn. Điện áp phía đầu ra xoay chiều được lấy ở điểm giữa của hai nhánh trên mỗi pha. Các điện trở R_o , L_o tồn tại trong mỗi nhánh có tác dụng ngăn chặn dòng ngắn mạch phía bên ngoài vào các nhánh của MMC, điều này giúp MMC có thể hoạt động tốt hơn trong các trường hợp sự cố thoáng qua ở mức cho phép. Ngoài ra hai phần tử này còn có tác dụng đảm bảo cho các tụ điện nạp điện tốt hơn khi MMC làm việc để bật tắt các SM [9]. Khi MMC làm việc mỗi SM chịu một mức điện áp là V_{DC}/N (N là số SM trên mỗi nhánh pha), do đó khi số SM tăng lên thì khả năng chịu điện áp của mỗi SM càng nhỏ, đây là một lợi thế của MMC khi áp dụng cho hệ thống điện áp cao. Lúc này điện áp xoay chiều trên mỗi pha thay đổi từng bước trong phạm vi của $V_{DC}/2$ đến $-V_{DC}/2$. Có nhiều loại cấu trúc của SM để áp dụng cho MMC [4]. Tuy nhiên cấu trúc thường được sử dụng là SM dạng nửa cầu H với các chế độ làm việc như Hình 1b và bảng trạng thái 1. Trong Bảng 1, thể hiện 4 trạng thái đóng cắt các van để SM có thể được “chèn vào” hay “bỏ qua” để tạo ra các mức điện áp của MMC.



Hình 1. (a) Cấu trúc bộ biến đổi MMC nối tải R-L và (b) Trạng thái đóng cắt của S1 và S2

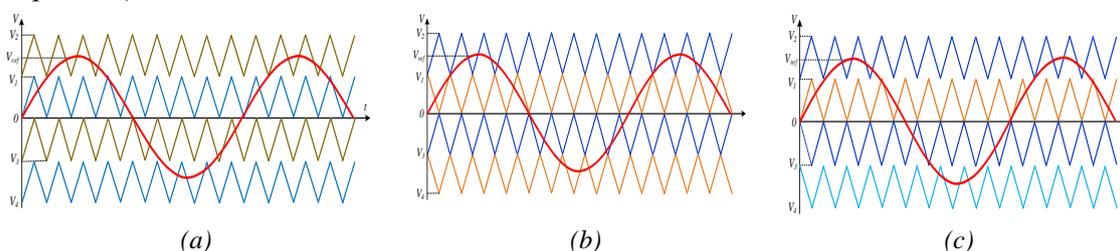
Bảng 1. Điện áp ngõ ra của SM

STT	Trạng thái van		Điện áp ra	Chiều dòng điện	Trạng thái tụ
	S1	S2			
1	0	1	0	+	Nối tắt
2	1	0	V_C	+	Nạp
3	1	0	V_C	-	Xả
4	0	1	0	-	Nối tắt

Trong MMC, các tụ điện không đóng vai trò tích điện cho các nguồn điện chính mà được tích điện để phục vụ cho một mức điện áp có giá trị bằng V_{DC}/N . Khi tất cả các tụ điện đã được tích điện, quá trình bật tắt các SM được thực hiện bởi hàng loạt các tín hiệu logic từ khâu điều chế. Tổng số SM được bật trong một chu kỳ trích mẫu là N tại mọi thời điểm, vì thế khâu điều chế phải được tính toán số lượng xung phù hợp để có được các tín hiệu logic đóng cắt van nhằm thực hiện cho nhiệm vụ này. Quá trình này sẽ tạo ra điện áp xoay chiều V_{AC} luôn dao động trong khoảng $-V_{DC}/2$ đến $+V_{DC}/2$ với mỗi bước điện áp là V_{DC}/N .

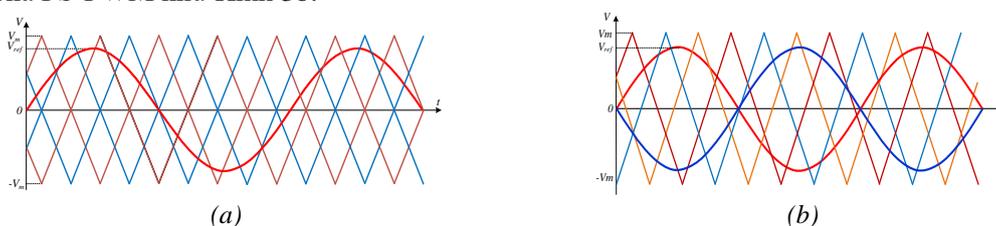
2.2. Phương pháp điều chế PS-PWM cho bộ biến đổi MMC

Kỹ thuật điều chế PWM cho các bộ biến đổi nghịch lưu dựa trên việc sử dụng điện áp điều khiển dạng sin (sóng điều khiển) so sánh với sóng mang tam giác. Khi sóng sin lớn hơn sóng mang thì ta được xung PWM ở mức cao, ngược lại khi sóng sin nhỏ hơn sóng mang thì xung PWM ở mức thấp. Kết quả so sánh được dùng để điều khiển linh kiện chuyển mạch. Khi áp dụng điều chế PWM cho MMC, dựa vào quá trình sắp xếp tập hợp các sóng mang tam giác để so sánh sóng với sin sẽ cho ra các phương pháp điều chế PWM khác nhau, cụ thể: Khi các sóng mang có pha như nhau (đồng pha) được xếp chồng lên nhau để so sánh với một sóng sin chuẩn ta được phương pháp điều chế dịch mức LS-PWM (Level Shift-PWM) kiểu IPD (In Phase Disposition) như Hình 2a. Khi các sóng mang răng cưa cạnh nhau được đặt lệch pha nhau 180° và được xếp chồng lên nhau để so sánh với một sóng sin chuẩn ta được phương pháp điều chế dịch mức LS-PWM kiểu APOD (Alternative Phase Opposite Disposition) như Hình 2b. Khi các sóng mang răng cưa xếp trên mức 0 lệch 180° so với các răng cưa đối xứng ở dưới mức và được xếp chồng lên nhau để so sánh với một sóng sin chuẩn ta được phương pháp điều chế dịch mức LS-PWM kiểu POD (Phase Opposite Disposition) như Hình 2c.



Hình 2. Phương pháp điều chế LS-PWM: (a) IPD; (b) APOD; (c) POD

Khi sử dụng các sóng mang răng cưa cùng pha cùng tần số cùng biên độ và lệch pha nhau 180° để so sánh với một sóng sin chuẩn ta được phương pháp điều chế dịch pha PS-PWM (Phase shift -PWM) như Hình 3a. Khi sử dụng các sóng mang răng cưa để so sánh với hai sóng sin chuẩn cùng tần số cùng biên độ nhưng ngược pha nhau 180° ta được phương pháp điều chế dịch pha PS-PWM như Hình 3b.



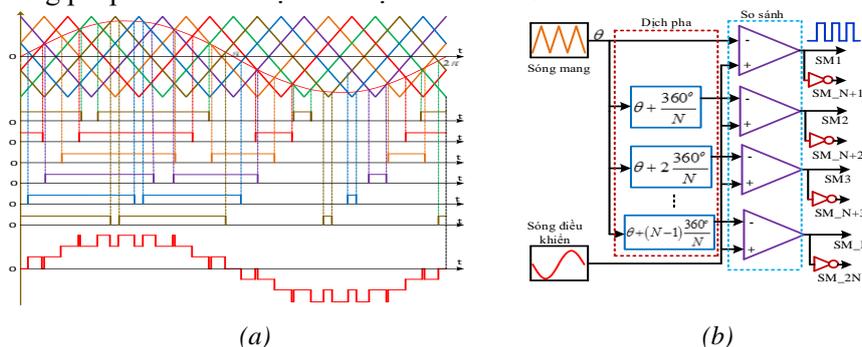
Hình 3. Điều chế sóng mang dịch pha PS-PWM: (a) sử dụng hai sóng mang ngược pha 180° ; (b) sử dụng hai sóng sin ngược pha 180°

Theo tài liệu [9], trong các phương pháp điều chế PWM nói trên thì phương pháp PS-PWM sử dụng các sóng mang răng cưa cùng pha cùng tần số cùng biên độ và lệch pha nhau 180° để so sánh với một sóng sin chuẩn là phương pháp đạt hiệu quả cao nhất về chất lượng điện năng phía xoay chiều, phương pháp này cho chỉ số THD của dòng điện nhỏ và đặc biệt là không cần sử dụng tới thuật toán cân bằng điện áp tụ điện như các phương pháp PWM khác. Chính vì vậy, trong bài báo này sẽ thực hiện mô phỏng và thực nghiệm phương pháp PS-PWM có các sóng mang răng cưa lệch nhau 180° để áp dụng cho bộ biến đổi đa mức MMC. Tín hiệu đóng cắt chuyển mạch van của PS-PWM được thực hiện bằng cách so sánh các điện áp đặt với các sóng mang theo công thức (1).

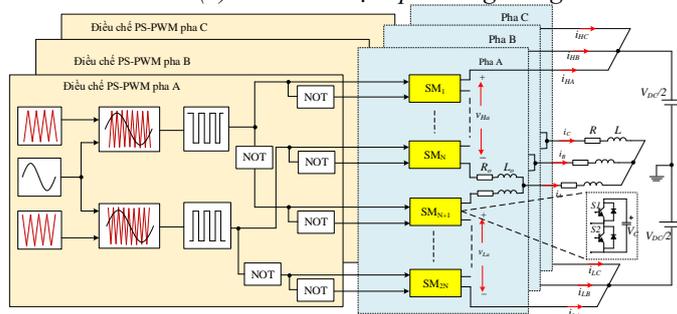
$$v = \begin{cases} V_{DC} & \text{khi } -v_{ref} < v_m < v_{ref} \\ -V_{DC} & \text{khi } v_{ref} < v_m < -v_{ref} \end{cases} \quad (1)$$

Phương pháp điều chế PS-PWM bằng cách sử dụng một sóng sin chuẩn so sánh với các sóng mang tam giác ngược pha nhau 180° có kỹ thuật thực hiện như Hình 5a. Cách tạo tín hiệu trong Hình 4a được thể hiện ở Hình 4b.

Khi áp dụng PS-PWM cho MMC thì số sóng răng cưa được chọn bằng với số SM trên mỗi pha MMC để đạt được số mức đầu ra theo đúng nguyên lý, mỗi sóng răng cưa này được đặt lệch pha nhau $180^\circ/N$ (với N là số SM được chèn vào trong mỗi chu kỳ làm việc) chu kỳ răng cưa, mục đích của việc này là giảm được các sóng hài bậc hai của điện áp ra và đạt được hiệu suất chuyển đổi tốt nhất [9]. Như vậy, số răng cưa tăng lên gấp đôi, mỗi răng cưa lại có một sóng mang ngược pha với nó. Theo phương pháp dịch pha mỗi SM đều làm việc như nhau trong toàn dải điều chế nên điện áp V_{DC} được sử dụng như nhau. Vì vậy trong chế độ nghịch lưu nói chung không cần thực hiện thuật điều khiển cân bằng điện áp trên các tụ một chiều [9]. Cấu trúc MMC sử dụng phương pháp PSPWM được thể hiện như Hình 5.



Hình 4. Kỹ thuật điều chế PS-PWM cho MMC: (a) nguyên lý tạo xung và (b) cách thức dịch pha sóng mang

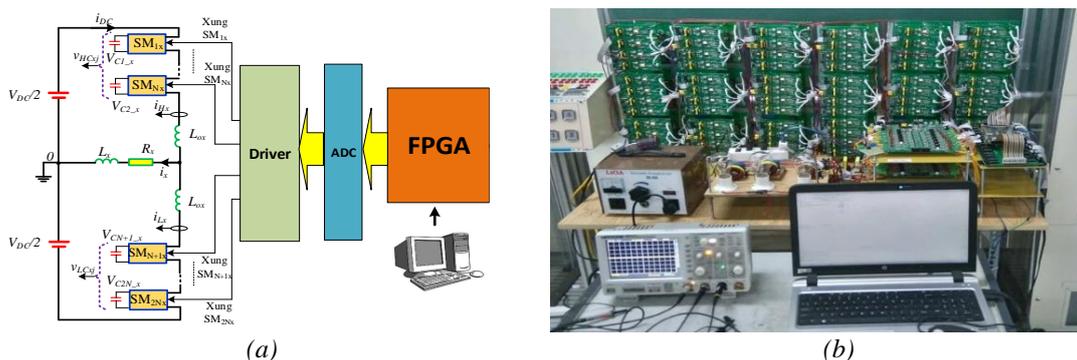


Hình 5. Cấu trúc phương pháp điều chế PSPWM cho BBD MMC

3. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm

3.1. Cấu trúc hệ thống thực nghiệm với phương pháp điều chế PWM dựa trên FPGA

Cấu trúc hệ thống thực nghiệm được xây dựng dựa trên bộ biến đổi MMC với 12 SM trên mỗi pha và được mô tả bởi sơ đồ như Hình 6a. Trong đó: BBD MMC là cấu trúc chính để biến đổi năng lượng từ một chiều sang xoay chiều; khi sử dụng phương pháp điều chế PS-PWM đã loại bỏ được khâu cân bằng điện áp trên các tụ điện, vì vậy các giá trị điện áp tụ điện và dòng điện các nhánh không cần thực hiện khâu đo, việc này đã giảm đáng kể khối lượng thực thi hệ thống mô hình thực nghiệm. Các dòng DSP hiện tại trên thị trường có số lượng cổng tín hiệu vào/ra không thể đáp ứng yêu cầu kết nối tín hiệu vào/ra của MMC. Vì vậy, trong bài báo này tác giả đã sử dụng Kit FPGA AX306 Xilinx để làm công cụ chính cho bộ điều khiển. Các thuật toán điều chế, phát xung, tạo sóng sin, sóng mang được thực hiện trong thiết bị này thông qua việc thiết lập các mạch logic và chip có thể lập trình được để thực hiện các thuật toán điều chế. Các thông số tính toán áp dụng cho BBD MMC thực tế với 6 SM trên mỗi nhánh, nguồn điện áp 400 V_{DC} được trình bày như Bảng 2.

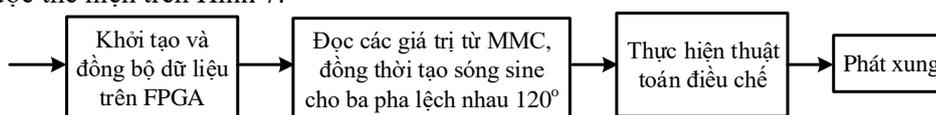


Hình 6. (a) Sơ đồ cấu trúc hệ thống thực nghiệm một pha của BĐĐ MMC và (b) Mô hình tổng thể hệ thống thực nghiệm bộ biến đổi MMC

Bảng 2. Thông số thực nghiệm BĐĐ MMC

STT	Thông số thực nghiệm BĐĐ MMC	Ký hiệu	Giá trị
1	Điện trở tải	R	0,1 Ω
2	Điện cảm tải	L	0,21.10 ⁻³ H
3	Điện trở nhánh	R_o	0,1 Ω
4	Điện cảm nhánh	L_o	24.10 ⁻⁶ H
5	Điện áp một chiều	V_{DC}	400V
6	Số SM trên mỗi nhánh	N	6 SM
7	Điện áp trên tụ	V_C	67V
8	Tần số cơ bản	f	50Hz
9	Tần số điều chế PWM	f_{mPWM}	500Hz
10	Hệ số điều chế	m	0.9

Mạch driver có mục đích phát xung điều khiển cho van IGBT của các SM. Đồng thời, khuếch đại xung đóng mở van IGBT, phát hiện quá dòng trên van, bảo vệ van và cách ly van với phần mạch lực. Mạch đệm ADC có nhiệm vụ tránh trùng dẫn giữa 2 van trên IGBT kép và là phân tử trung gian liên kết giữa FPGA với các tín hiệu đo về qua ADC. Tuần tự làm việc lập trình trên FPGA được thể hiện trên Hình 7.



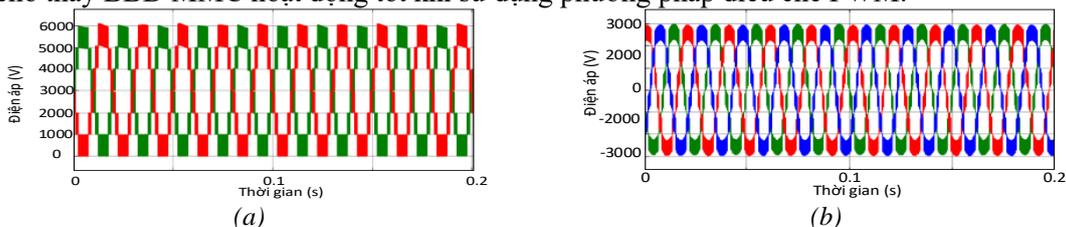
Hình 7. Sơ đồ mô tả tuần tự lập trình trên FPGA

Đầu tiên, cần khởi tạo 1 tín hiệu để khởi tạo và đồng bộ tất cả các tín hiệu trên FPGA (ở đây chọn là tín hiệu reset, tín hiệu này được gán đến phím Reset trên FPGA). Sau đó, tiến hành giao tiếp giữa FPGA và ADC để đọc lần lượt các giá trị cần thiết từ MMC. Đồng thời tạo sóng sin 3 pha lệch nhau 120° từ core DDS trên FPGA. Sau khi đọc hết được giá trị điện áp và tụ điện trên các pha ta tạo 1 tín hiệu start để tiến hành sắp xếp giá trị điện áp các tụ trên nhánh của pha tương ứng dựa trên thuật toán cân bằng điện áp tụ điện, đồng thời xác định số SM được chèn vào trên nhánh đó theo thuật toán PWM và phát xung tương ứng cho MMC. Sơ đồ tổng thể hệ thống thực nghiệm BĐĐ MMC gồm 6SM trên mỗi nhánh được trình bày như Hình 6b.

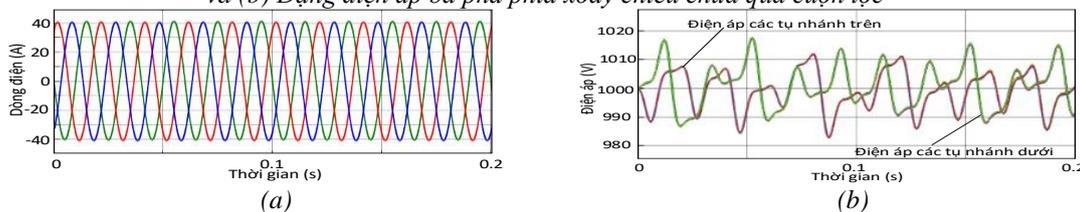
3.2. Kết quả mô phỏng điều chế PS-PWM cho MMC

Từ Hình 8 đến Hình 10 là các kết quả mô phỏng BĐĐ MMC khi áp dụng phương pháp điều chế PS-PWM. Kết quả mô phỏng trong khoảng từ thời điểm BĐĐ bắt đầu làm việc đến thời điểm 0,2s. Kết quả hình 8a cho thấy điện áp mỗi nhánh của BĐĐ có dạng bậc thang với 7 mức điện áp, hình 8b cho thấy điện áp đầu ra của MMC chưa qua bộ lọc có dạng bậc thang 7 mức tám quỹ đạo sin. Hình 9a là kết quả dòng điện đầu ra MMC phía xoay chiều chưa qua lọc tín hiệu và cho

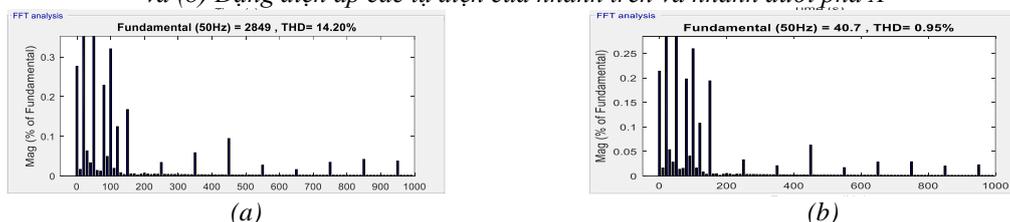
thấy dòng điện có dạng hình sin, khi phân tích Fourier cho dòng điện và điện áp ở Hình 10 cho thấy rằng, ở chế độ xác lập chỉ số THD của dòng điện là 0,95% và của điện áp là 14,2%. Kết quả cho thấy rằng, THD của dòng điện đã đảm bảo được chỉ tiêu chất lượng sóng hài cho phép, THD của điện áp có giá trị lớn và không đáp ứng được chỉ tiêu về chất lượng sóng hài, nguyên nhân chủ yếu của giá trị này là số mức điện áp chưa đủ lớn để dạng điện áp ra của BBD để mỗi bậc điện áp có giá trị đủ nhỏ. Hình 9b là hình dạng của điện áp các tụ điện trong pha A. Thấy rằng điện áp tụ điện luôn được cân bằng và dao động quanh giá trị 1000V, biên độ dao động lớn nhất khi bộ biến đổi hoạt động ổn định là 13V tương ứng với 1,3% giá trị định mức. Các kết quả này đã cho thấy BBD MMC hoạt động tốt khi sử dụng phương pháp điều chế PWM.



Hình 8. (a) Điện áp nhánh trên và nhánh dưới pha A của MMC và (b) Dạng điện áp ba pha phía xoay chiều chưa qua cuộn lọc

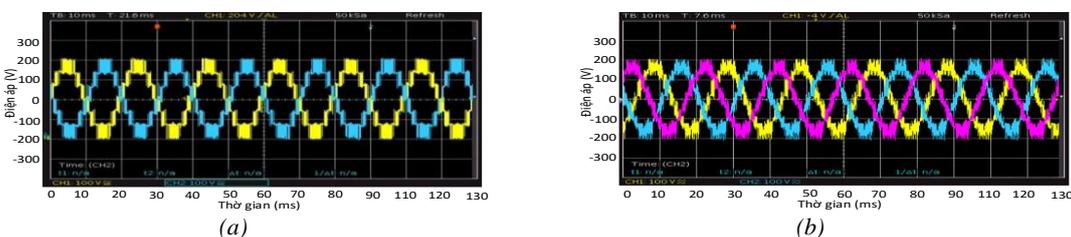


Hình 9. (a) Dòng điện ba pha phía xoay chiều cung cấp cho tải và (b) Dạng điện áp các tụ điện của nhánh trên và nhánh dưới pha A



Hình 10. Kết quả phân tích Fourier: (a) điện áp đầu ra pha A và (b) dòng điện đầu ra pha A

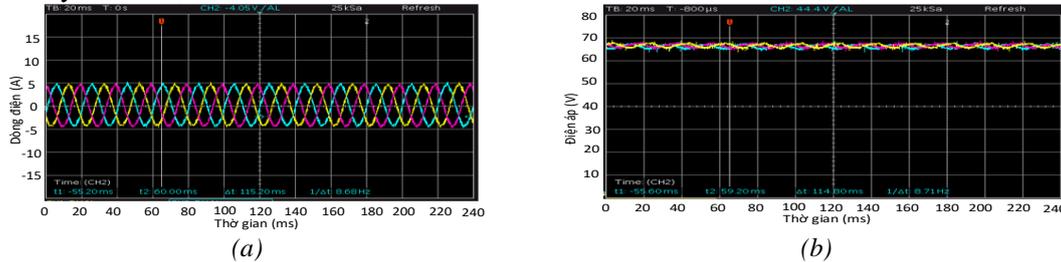
3.3. Kết quả thực nghiệm điều chế PS-PWM cho MMC



Hình 11. (a) Hình dạng điện áp nhánh trên và nhánh dưới pha A và (b) Hình dạng điện áp trên tải xoay chiều của pha A, B, C

Hình 11 và Hình 12 là kết quả thực nghiệm của MMC sử dụng phương pháp điều chế PS-PWM. Hình 11a là điện áp của nhánh trên và nhánh dưới Pha A cho thấy điện áp mỗi nhánh của BBD có dạng bậc thang với 7 mức điện áp. Hình 11b là điện áp xoay chiều đầu ra của các pha A, B, C cho thấy các mức được thực hiện rõ ràng, quá điện áp sinh ra khi các khoá chuyển mạch là không đáng kể đã chứng tỏ được tính chính xác của quá trình điều chế PWM cho khi thực nghiệm so với các kết quả mô phỏng đạt được. Dòng điện đầu ra trên tải các pha A, B, C được

thể hiện như Hình 12a, kết quả cho thấy dòng điện có dạng sin đáp ứng so với yêu cầu của quá trình điều chế. Hình 12b là kết quả điện áp tụ trên các SM1, SM3, SM5 của pha A. Hình ảnh cho thấy biên độ dao động các tụ điện là 2V tương ứng với 3% giá trị định mức và đây là kết quả phù hợp với yêu cầu đặt ra.



Hình 12. (a) Hình dạng dòng điện trên tải xoay chiều của pha A, B, C
và (b) Hình dạng điện áp trên tụ điện của SM1 pha A, B, C

4. Kết luận

Bài báo này đã trình bày phương pháp điều chế PS-PWM cho MMC, quá trình được thực hiện từ phân tích ưu nhược điểm của PWM, sau đó phân tích hoạt động của MMC dựa trên phương pháp điều chế PS-PWM. Tiếp theo là trình bày hệ thống thực nghiệm BBD MMC và kiểm chứng bằng mô phỏng và thực nghiệm. Mục đích chính của việc này kiểm chứng kết quả mô phỏng so với kết quả thực nghiệm. Hệ thống được thực hiện mô phỏng bằng phần mềm Matlab/Simulink và thực nghiệm dựa trên vi xử lý FPFA AX309 Xilinx với 80 chân I/O với tải R-L. Các kết quả thu được cho thấy quá trình mô phỏng và thực nghiệm đều làm cho BBD MMC luôn hoạt động ổn định. Kết quả thực nghiệm đầu ra phía xoay chiều đúng với các phân tích lý thuyết và mô phỏng đã thực hiện, cụ thể: dòng điện đầu ra phía xoay chiều của ba phương pháp có dạng sin, điện áp đầu ra có dạng bậc thang đảm bảo số mức yêu cầu của mỗi phương pháp điều chế, các tụ điện hoạt động ổn định và cân bằng. Các kết quả này đã chứng minh MMC có khả năng hoạt động ổn định đáp ứng các yêu cầu đặt ra của BBD đa mức.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. Pou, M. A. Perez, and R. P. Aguilera, "Modular multilevel converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 3, pp. 2204-2206, Mar. 2019.
- [2] G. P. Adam, I. Abdelsalam, J. E. Fletcher, G. M. Burt, D. Holliday, and S. J. Finney, "New efficient submodule for a modular multilevel converter in multiterminal HVDC networks," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 4258-4278, Jun. 2017.
- [3] Y. Yuan, H. Zhang, Y. Wu, T. Zhu, and H. Ding, "Bayesian learning-based model predictive vibration control for thin-walled workpiece machining processes," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 509-520, 2017.
- [4] D. Iannuzzi, L. Piegari, and P. Tricoli, "A novel PV-modular multilevel converter for building integrated photovoltaics," *Proc. 8th Int. Conf. Exhib. Ecological Veh. Renewable Energies*, 2013, pp. 1-7.
- [5] L. Popova, J. Pyrhonen, K. Ma, and F. Blaabjerg, "Device Loading of Modular Multilevel Converter MMC in Wind Power Application," *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE-ASIA)*, May 18-21, 2014, pp. 548-554.
- [6] F. Deng and Z. Chen, "Voltage-Balancing Method for Modular Multilevel Converters Switched at Grid Frequency," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 2835-2847, May 2015.
- [7] Y. Deng and R. G. Harley, "Space-vector versus nearest-level pulse width modulation for multilevel converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 6, pp. 2962-2974, Jun. 2015.
- [8] H. Chen and H. Zhao, "Review on pulse-width modulation strategies for common-mode voltage reduction in three-phase voltage-source inverters," *IET Power Electronics*, vol. 9, no. 14, pp. 2611-2620, 2016.
- [9] H. T. Tran, V. N. Nguyen, and D. K. Pham, "IPD, POD and APOD Multi-carrier PWM Techniques for Five-Level Nested Neutral Point Clamped Inverter," (in Vietnamese), *Journal of Measurement, Control, and Automation*, vol. 5, pp. 1-11, January 2024.