

NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ SÓNG MANG NGHỊCH LƯU MỘT PHA CASCADED 5 BẬC

A STUDY OF CARRIER PULSE WIDTH MODULATION FOR SINGLE PHASE 5-LEVELS CASCADED INVERTER

Nguyễn Phước Lộc¹, Bùi Thanh Hiếu¹, Võ Quốc Thái¹,
Đào Thị Bé Dung¹, Nguyễn Văn Nhò²

¹ Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long, Việt Nam

² Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 6/4/2021, ngày phản biện đánh giá 17/4/2021, ngày chấp nhận đăng 13/8/2021.

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu so sánh các kỹ thuật điều chế độ rộng xung phương pháp sóng mang (CPWM). Trong đó hai kỹ thuật điều chế sóng mang đồng pha (PD PWM) và điều chế sóng mang dịch pha (PS PWM) áp dụng trên bộ nghịch lưu một pha cascaded 5 bậc (CHB Inverter). Chất lượng của thiết bị chuyển đổi được đánh giá dựa trên tổng độ méo dạng hài (THD%) dòng điện và điện áp ngõ ra của bộ nghịch lưu sẽ được khảo sát, phân tích, đánh giá và so sánh. Việc mô hình hóa và mô phỏng cho nghịch lưu một pha cascaded 5 bậc được thực hiện bởi phần mềm MATLAB/SIMULINK và kết quả mô phỏng sẽ được kiểm chứng bằng thực nghiệm trên mô hình phần cứng bộ nghịch lưu Cascaded 5 bậc xây dựng theo dạng module linh hoạt và điều khiển bằng vi điều khiển DSP 28379D.

Từ khóa: Tổng độ méo dạng hài (THD%); Điều chế độ rộng xung sóng mang (CPWM); Kỹ thuật PWM đồng pha (PD PWM); Kỹ thuật PWM dịch pha (PS PWM); bộ nghịch lưu cascaded (CHB_Inverter)

ABSTRACT

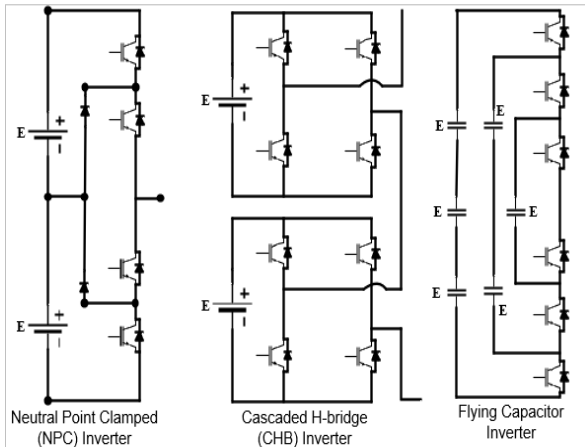
This paper studies and compares carrier-based pulse width modulation (CPWM) techniques. In which, two techniques of co-phase carrier modulation (PD PWM) and phase shift carrier modulation (PS PWM) are applied on a 5-levels cascaded single-phase inverter (CHB Inverter). The quality of the converter is evaluated based on the total harmonic distortion (THD%) output current and voltage of the inverter to be investigated, analyzed, evaluated, and compared. The modeling and simulation for the 5-levels cascaded single-phase inverter are done by MATLAB/SIMULINK software and the simulation results will be experimentally verified on the 5-levels Cascaded inverter hardware model built according to flexible module form and controlled by DSP 28379D microcontroller.

Keywords: Total harmonic distortion (THD%); carrier based pulse width modulation(CPWM); PWM technique in phase (PD PWM); phase-shift PWM technique (PS PWM);Cascaded inverter(CHB inverter).

1. GIỚI THIỆU

Bộ nghịch lưu đa bậc cascaded đầu tiên được đề xuất vào năm 1975. Các cầu H với nguồn DC cách ly được ghép nối tầng nhau để tạo điện áp ngõ ra nhiều bậc [1]. Bộ biến đổi này là cấu trúc đầu tiên của nghịch lưu đa

bậc. Sau đó, các bộ nghịch lưu đa bậc lần lượt được phát triển. Năm 1981, bộ nghịch lưu dạng diode kẹp (NPC) được đề xuất [2]. Năm 1992, nghịch lưu đa bậc dạng tụ kẹp được đề xuất. Sơ đồ một pha của các bộ nghịch lưu đa bậc được minh họa ở Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ của 3 dạng nghịch lưu đa bậc cơ bản

Bộ nghịch lưu dạng cascaded là bộ nghịch lưu gồm những module cầu H được ghép xếp tầng. Nó có ưu điểm hơn các bộ nghịch lưu khác là không cần diode hoặc tụ kẹp và có tính module nên dễ dàng thực hiện, tăng và giảm số bậc hoặc sửa chữa, thay thế một cách linh hoạt [3]. Tần số đóng ngắt trong mỗi module của dạng mạch này có thể giảm đi n lần và dv/dt cũng giảm đi như vậy. Điện áp đặt trên các linh kiện giảm đi $0.5n$ lần [4].

Trong bài báo này, các tác giả sẽ so sánh tổng độ méo dạng hài (THD%) của bộ nghịch lưu một pha cascaded 5 bậc với các phương pháp điều chế sóng mang [5]. Các kỹ thuật điều chế độ rộng xung đa sóng mang (CPWM) gồm bố trí các sóng mang đồng pha (PD PWM), và dịch pha (PS PWM) tương tự như [6] sẽ được so sánh và đánh giá.

Chất lượng của các phương pháp điều khiển PWM đối với BNL áp 1 pha 5 bậc cascade sẽ được đánh giá, và so sánh thông qua thông số độ méo dạng dòng điện ngõ ra (THD%)

Các phần chính trong bài báo này gồm:

- Kỹ thuật điều chế độ rộng xung sóng mang (CPWM) trên cấu trúc cascaded 5 bậc.
- Phân tích mô phỏng, thực nghiệm kiểm chứng các kỹ thuật sóng mang trên bộ nghịch lưu.
- So sánh các phương pháp điều khiển.

2. CẤU TRÚC BỘ NGHỊCH LƯU CASCADE 5 BẬC

Bộ nghịch lưu trong hình 2 có thể tạo ra một điện áp pha với năm bậc điện áp. Khi các khóa S_{1A} , S_{2A} , S_{3A} , và S_{4A} cùng đóng điện áp ngõ ra của cầu 2 cầu $V_{H1}=V_{H2}=E$, và kết quả điện áp pha bộ nghịch lưu $V_{AG}=V_{H1}+V_{H2}=2E$. Giá trị điện áp nghịch lưu V_{AG} theo trạng thái các khóa S_{1A} , S_{2A} , S_{3A} , S_{4A} được mô tả đầy đủ trên bảng 1.

Tổng độ méo dạng hài THD% (Total Harmonic Distortion), được tính theo:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{j \neq 1} I_{(j)}^2}}{I_{(1)}} \quad (1)$$

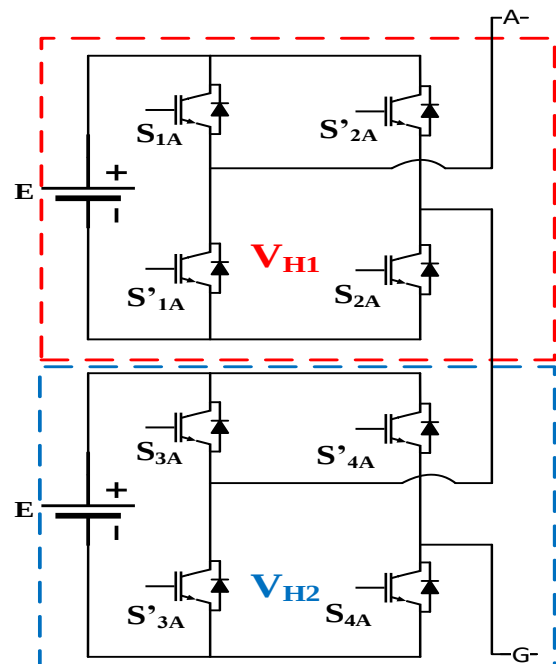
Độ méo dạng trong trường hợp dòng điện không chứa thành phần DC được tính theo hệ thức sau:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{\infty} I_{(j)}^2}}{I_{(1)}} = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2}}{I_{(1)}} \quad (2)$$

Trong đó:

$I_{(j)}$: trị hiệu dụng sóng hài bậc j , $j \geq 2$.

$I_{(1)}$: trị hiệu dụng thành phần hài cơ bản của dòng điện.



Hình 2. Cấu trúc bộ nghịch lưu cascaded 1 pha

Bảng 1. Trạng thái chuyển mạch bộ nghịch lưu một pha cascaded 5 bậc

Điện áp pha (V_{AG})	Trạng thái các khóa				Điện áp cầu H thứ nhất (V_{H1})	Điện áp cầu H thứ hai (V_{H2})
	S_{1A}	S_{2A}	S_{3A}	S_{4A}		
-2E	0	0	0	0	-E	-E
-E	1	0	0	0	0	-E
	0	1	0	0	0	-E
	0	0	1	0	-E	0
	0	0	0	1	-E	0
0	1	1	0	0	E	-E
	1	0	1	0	0	0
	1	0	0	1	0	0
	0	1	1	0	0	0
	0	1	0	1	0	0
	0	0	1	1	-E	E
E	1	1	1	0	E	0
	1	1	0	1	E	0
	1	0	1	1	0	E
	0	1	1	1	0	E
2E	1	1	1	1	E	E

3. KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ ĐỘ RỘNG XUNG SÓNG MANG (CPWM)

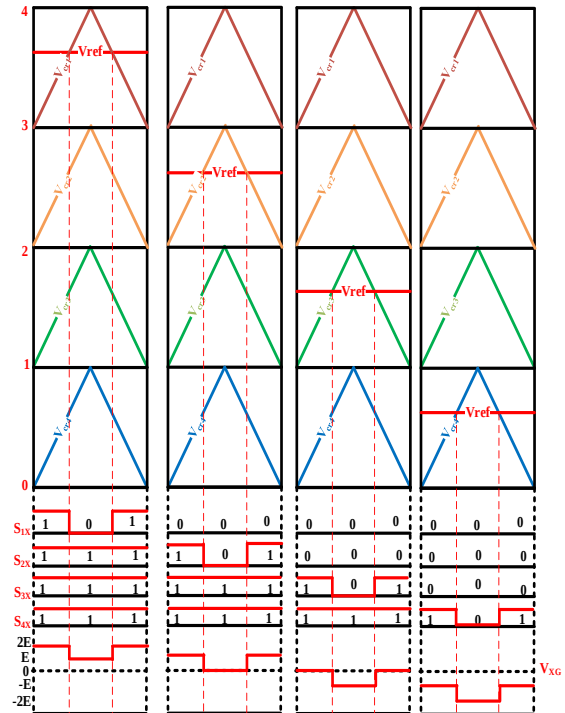
Trong phương pháp này để tạo giản đồ kích đóng các linh kiện trong cùng một nhánh của bộ nghịch lưu, phải sử dụng một số sóng mang dạng tam giác và một tín hiệu điều khiển dạng sin được trình bày trong [7]. Đối với bộ nghịch lưu đa bậc (n), số sóng mang được sử dụng là (n-1).

Các kỹ thuật điều khiển trên trong bài báo này các tác giả sẽ trình bày và so sánh trên hai kỹ thuật điều khiển sóng mang là điều chế độ rộng xung 4 sóng mang đồng pha (PD PWM), và điều chế độ rộng xung dịch pha (PS PWM).

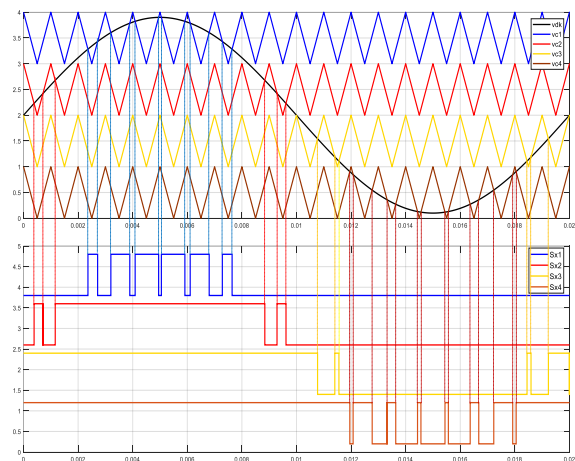
3.1 Bố trí sóng mang đồng pha (PDPWM)

Như hình 4 các sóng mang được bố trí trong các khoảng $3 < V_{c1} < 4$, $2 < V_{c2} < 3$,

$1 < V_{c3} < 2$, $0 < V_{c4} < 1$ và được so sánh với một điện áp điều khiển (V_{ref}). Từ đó các xung PWM được tạo ra có trạng thái mức cao khi tín hiệu điện áp tham chiếu lớn hơn tín hiệu sóng mang. Đối với bộ nghịch lưu cascaded 5 bậc, nguyên lý tất cả 4 sóng mang đều cùng pha như hình 3 và được trình bày như hình 4.



Hình 3. Giản đồ xung kích với các giá trị khác nhau của áp điều khiển.



Hình 4. Quá trình tạo xung kích theo phương pháp PD_PWM.

3.2 Bố trí sóng mang dịch pha (PS_PWM)

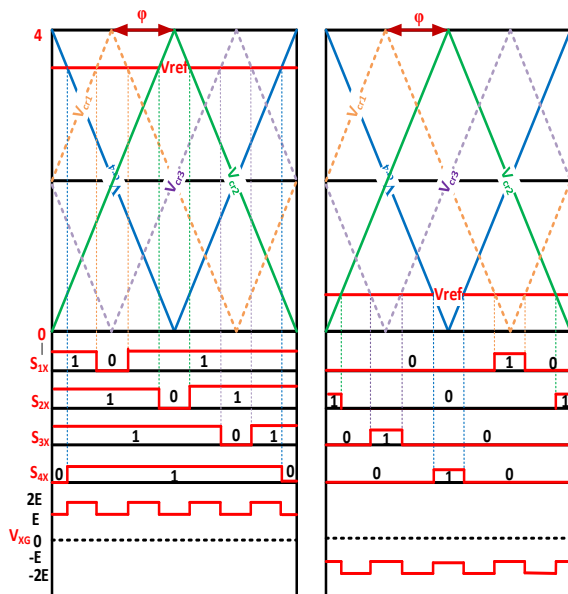
Trong phương pháp này, các sóng tam giác sẽ bị lệch pha φ bởi một góc pha nhất

định giữa các sóng mang liên kề. Góc pha φ có thể được tính theo công thức (7).

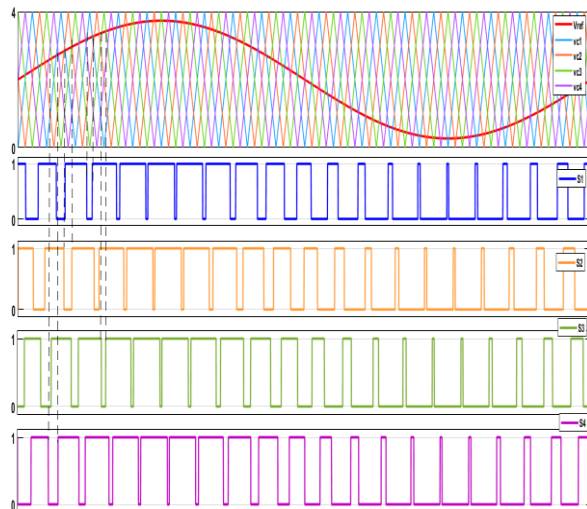
$$\varphi = \frac{360^\circ}{n-1} \quad (1)$$

Trong đó: n là số bậc của bộ nghịch lưu.

Phương pháp dịch pha 4 sóng mang của bộ nghịch lưu cascaded 5 bậc sử dụng. Hai sóng mang liên kề sẽ lệch nhau 90° được mô tả trong hình 5, trong đó tín hiệu của một điện áp tham chiếu (V_{ref}) được so sánh với 4 tín hiệu sóng mang tam giác lệch pha tạo xung cho bộ nghịch lưu 5 bậc như hình 6.

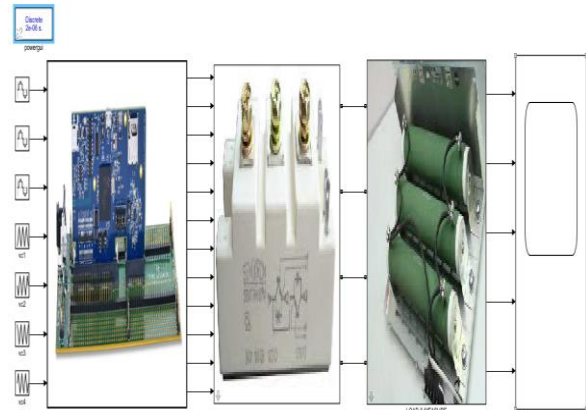


Hình 5. Nguyên lý đóng ngắt sử dụng kỹ thuật PS PWM.



Hình 6. Quá trình tạo xung kích theo phương pháp PS_PWM.

4. MÔ PHỎNG KỸ THUẬT PWM CHO BNL CASCADE 5 BẬC



Hình 7. Sơ đồ mô phỏng BNL 5 bậc.

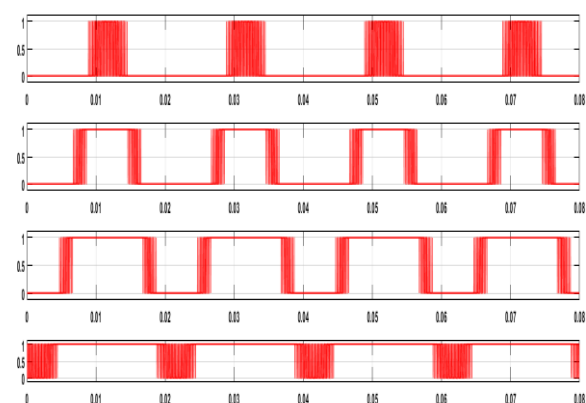
Trong phần này phần mềm MATLAB được sử dụng để mô phỏng các kỹ thuật điều chế sóng mang cho BNL cascaded 5 bậc. Sơ đồ mô phỏng được mô tả trên hình 7.

Bảng 2. Thông số mô phỏng

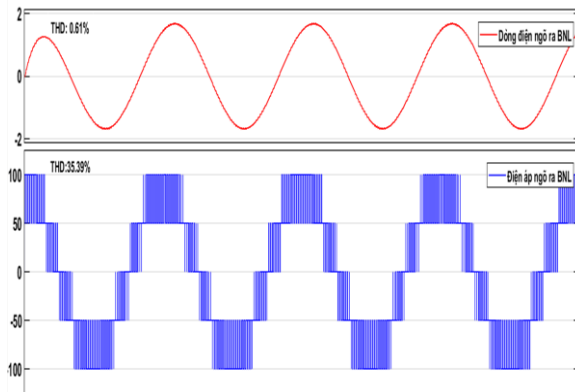
Tên gọi	Đơn vị	Độ lớn
Điện áp nguồn DC	V	50
Điện trở tải	Ω	45
Cuộn cảm	H	0.08
Tần số sóng mang	kHz	5
Thời gian lấy mẫu	μs	2
Tần số cơ bản	Hz	50

4.1 Mô phỏng phương pháp PD_PWM

Dạng tín hiệu chuyển mạch trên các khóa IGBT sử dụng kỹ thuật PD PWM thu được kết quả mô phỏng trên MATLAB như sau:



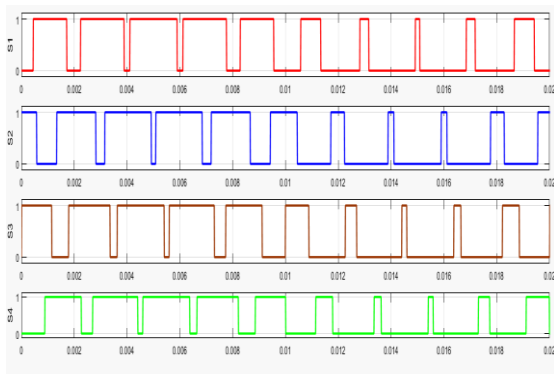
Hình 8. Dạng xung kích PD_PWM



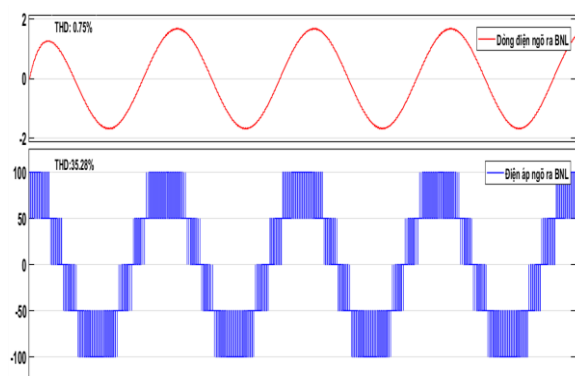
Hình 9. Dòng điện và điện áp ngõ ra PD PWM

4.2 Mô phỏng phương pháp PS_PWM

Tín hiệu của các khóa công suất S_1 , S_2 , S_3 , S_4 khi áp dụng phương pháp PS PWM được trình bày như hình 10:

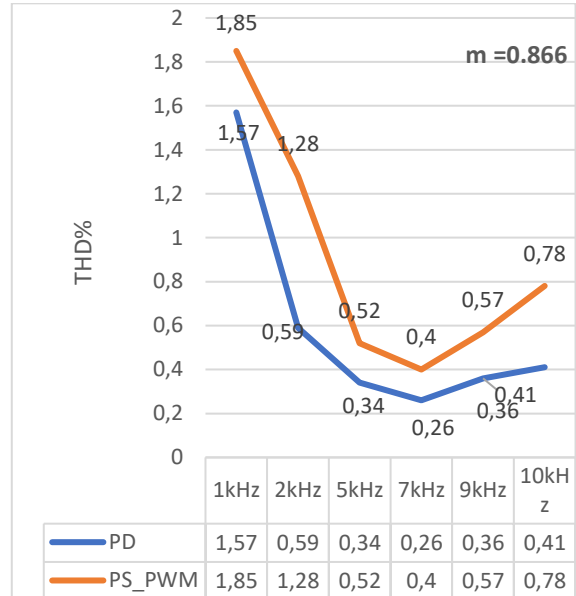


Hình 10. Dạng xung kích kỹ thuật PS PWM



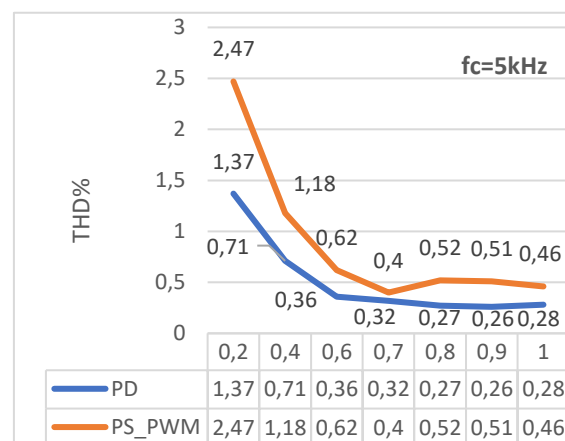
Hình 11. Dòng điện và điện áp ngõ ra PS PWM

Kết quả và phân tích độ méo dạng dòng điện THDI theo tần số sóng mang khi $m=0.866$ được bố trí trên hình 12. Ở đây, tần số sóng mang được chọn thay đổi trong phạm vi 1kHz-10kHz.



Hình 12. Đánh giá THD% khi thay đổi tần số sóng mang f_c

Từ hình 12 cho thấy độ méo dạng dòng điện giảm, khi f_c thay đổi trong phạm vi (1kHz,7kHz) và tăng trong phạm vi (7kHz,10kHz). Độ méo dạng của phương pháp PD_PWM luôn nhỏ hơn so với phương pháp PS_PWM. Chẳng hạn khi $f_c=2$ kHz, THDI của phương pháp PD_PWM là 0.59% thấp hơn giá trị của phương pháp PS_PWM là 1.28%. Giá trị THDI nhỏ nhất của hai phương pháp xảy ra khi $f_c = 7$ kHz, lúc đó THDI của phương pháp PD_PWM là 0.26% và phương pháp PS_PWM là 0.57%.



Hình 13. Đánh giá THD% khi thay đổi chỉ số điều chế m

Kết quả và phân tích độ méo dạng dòng điện THDI theo chỉ số điều chế khi $f_c = 5$ kHz được bố trí trên hình 13. Ở đây, chỉ số

điều chế (m) được chọn thay đổi trong phạm vi 1-10.

Từ hình 13 cho thấy độ méo dạng dòng điện giảm, khi m thay đổi trong phạm vi (0.2,0.8) và thay đổi không đáng kể trong phạm vi (0.8,1). Độ méo dạng của phương pháp PD_PWM luôn nhỏ hơn so với phương pháp PS_PWM. Chẳng hạn khi $m=0.4$, THD_I của phương pháp PD_PWM là 0.71% thấp hơn giá trị của phương pháp PS_PWM là 1.18%. Giá trị THD_I nhỏ nhất của hai phương pháp xảy ra khi $m=0.8$, lúc đó THD_I của phương pháp PD_PWM là 0.27% và phương pháp PS_PWM là 0.52%.

5. THỰC NGHIỆM BNL CASCADED 5 BẬC

Mô hình được thực nghiệm lập trình trên vi điều khiển DSP TMS320F28379D với các kỹ thuật điều chế sóng mang.



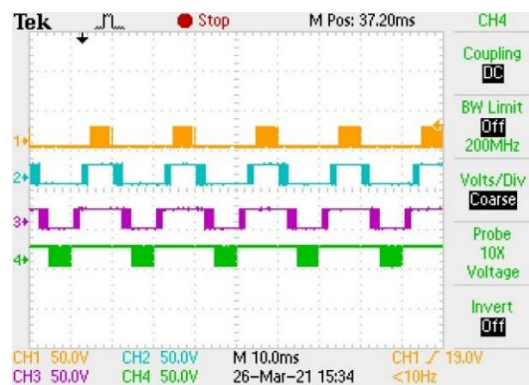
Hình 14. Mô hình thực nghiệm bộ nghịch lưu cascaded 5 bậc

Các số liệu của mô hình thực nghiệm được trình bày trong bảng 3

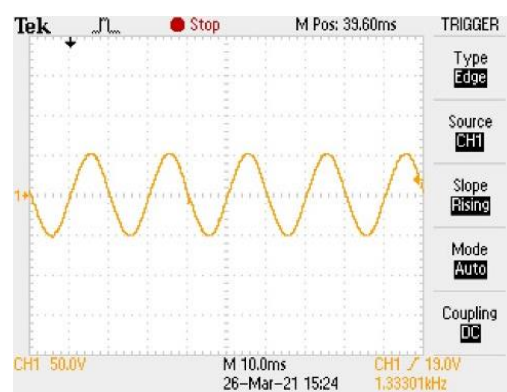
Bảng 3. Thông số mô phỏng thực nghiệm

Đại lượng	Giá trị
Chỉ số điều chế (m)	0.866
Tần số sóng mang (fc)	5kHz
Tải R	45Ω
Tải L	80mH
Tần số áp ra	50Hz
Điện áp trên 1 nguồn DC	50V

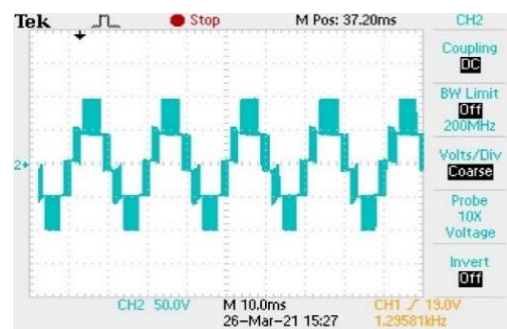
5.1 Thực nghiệm kỹ thuật PD_PWM



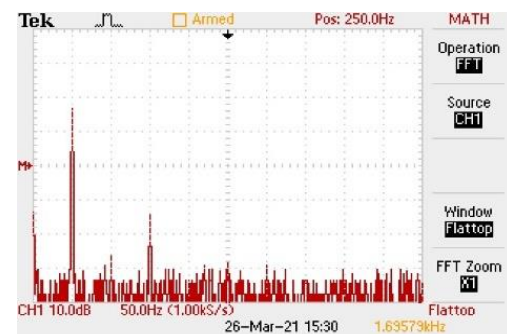
Hình 15. Dạng xung kỹ thuật PD_PWM



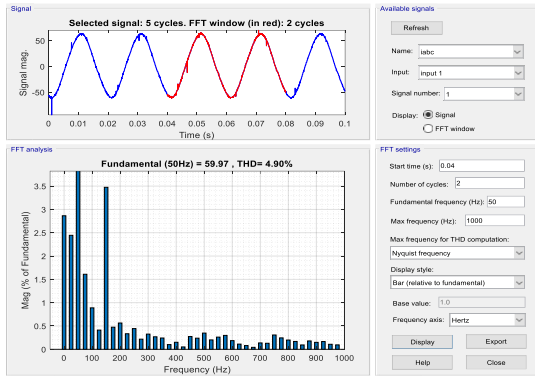
Hình 16. Dòng điện ngõ ra sử dụng kỹ thuật PD PWM



Hình 17. Điện áp ngõ ra sử dụng kỹ thuật PD PWM



Hình 18. Phân tích phổ hài dòng sử dụng kỹ thuật PD PWM



Hình 19. Phân tích FFT hài dòng ngõ ra sử dụng kỹ thuật PD PWM

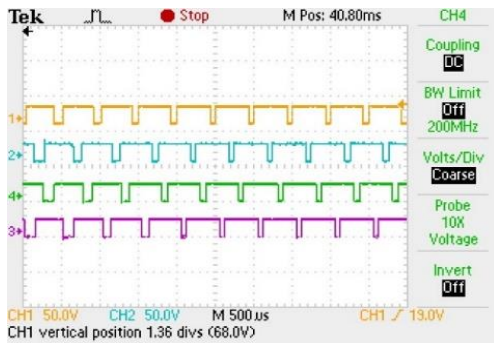
Phân tích kết quả:

Hình 15 cho thấy xung kích trên các khóa IGBT có dạng sóng tương tự như kết quả mô phỏng ở hình 8.

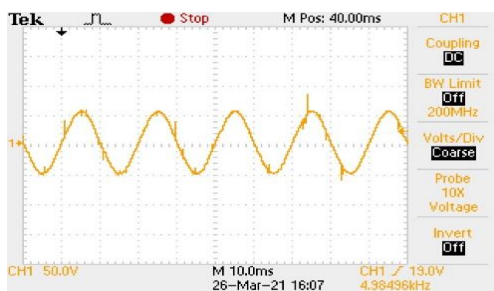
Dòng điện và điện áp ngõ ra của bộ nghịch lưu ở hình 16, 17 giống như kết quả đã mô phỏng trên hình 9.

Phân tích FFT ở hình 18,19 với chỉ số điều chế $m=0.866$, tần số sóng mang $f_c=5\text{kHz}$ tổng độ méo dạng hài dòng điện ngõ ra THD% là 4.9% đạt chỉ tiêu chất lượng theo [8].

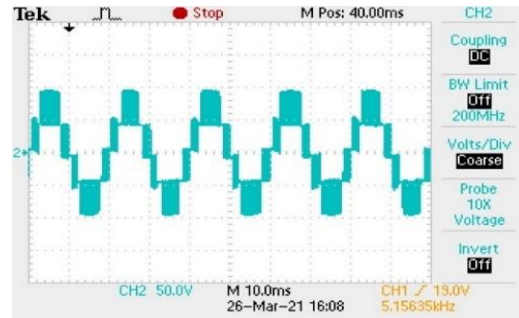
5.2 Thực nghiệm kỹ thuật bố trí sóng mang dịch pha (PS_PWM).



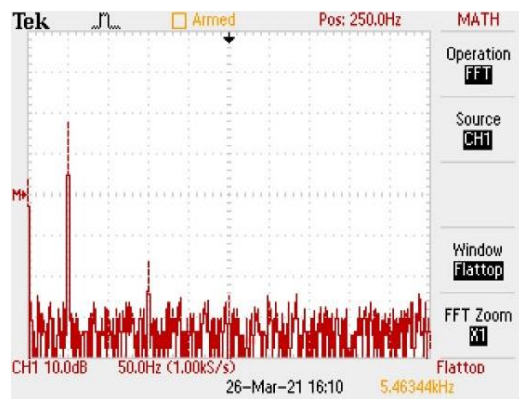
Hình 20. Dạng xung kích kỹ thuật PS PWM



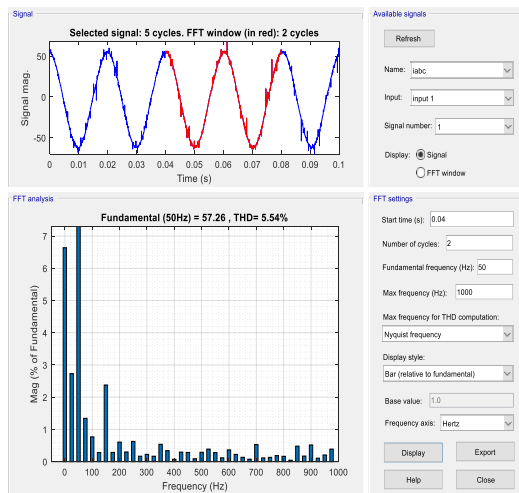
Hình 21. Dòng điện ngõ ra sử dụng kỹ thuật PS PWM



Hình 22. Điện áp ngõ ra sử dụng kỹ thuật PS PWM



Hình 23. Phân tích phổ hài dòng ngõ ra sử dụng kỹ thuật PS PWM



Hình 24. Phân tích FFT tổng hài dòng ngõ ra sử dụng kỹ thuật PS_PWM

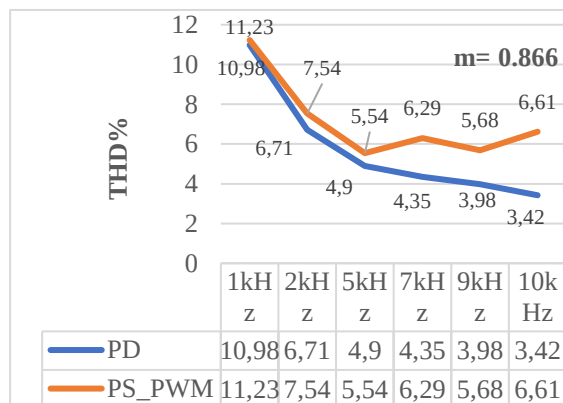
Phân tích kết quả:

Hình 20 xung kích trên các khóa IGBT có dạng sóng tương tự như kết quả mô phỏng ở hình 10.

Dòng điện và điện áp ngõ ra của bộ nghịch lưu ở hình 21, 22 giống như kết quả đã mô phỏng trên hình 11.

Phân tích FFT ở hình 23, 24 với chỉ số điều chế $m=0.866$, tần số sóng mang $f_c=5\text{kHz}$ tổng độ méo dạng hài dòng điện ngõ ra THD% là 5.54%.

Phân tích thực nghiệm THD% cho phương pháp PD PWM, PS_PWM theo chỉ số điều chế $m=0.866$, tần số sóng mang thay đổi từ $2\text{kHz} < f_c < 5\text{kHz}$.

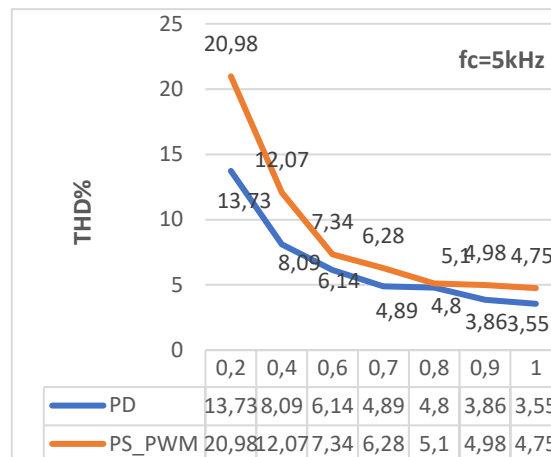


Hình 25. Đánh giá thực nghiệm THD% khi thay đổi tần số sóng mang

Từ hình 25, thấy được giá trị THD% dòng điện giảm dần khi tần số sóng mang tăng. Phương pháp PD-PWM có THD% nhỏ hơn so với phương pháp PS-PWM trong toàn vùng khảo sát $1\text{kHz} < f_c < 10\text{kHz}$. Ví dụ, ở giá trị $f_c=2\text{kHz}$, thì THD% của phương pháp PD là 6.71%, trong khi của PS-PWM là 7.54%. Với chỉ số m lớn, $f_c=5\text{kHz}$ thì THD% của phương pháp PS-PWM là 5.54% và giảm xuống còn 4.9% khi áp dụng phương pháp PD-PWM.

Từ hình 26, thấy được giá trị THD% dòng điện tải giảm dần khi chỉ số điều chế tăng. Phương pháp PD-PWM có THD% nhỏ hơn so với phương pháp PS_PWM trong toàn vùng khảo sát $0.2 < m < 0.9$.

Cụ thể ở giá trị $m=0.2$, thì THD% của phương pháp PD_PWM là 13.73%, trong khi của PS-PWM là 20.98%. Với chỉ số m lớn, $m=0.8$ thì THD% của phương pháp PS-PWM là 5.1% và giảm xuống còn 4.98% khi áp dụng phương pháp PD-PWM.



Hình 26. Đánh giá thực nghiệm THD% khi thay đổi chỉ số điều chế

6. KẾT LUẬN

Bài báo này tập trung phân tích các kỹ thuật điều chế độ rộng xung sóng mang (CPWM) áp dụng vào cấu trúc bộ nghịch lưu một pha cascaded 5 bậc sử dụng tải tuyến tính RL.

Kết quả mô phỏng dòng tải ngõ ra của bộ nghịch lưu cho các kỹ thuật điều chế sóng mang PD PWM, PS PWM cho thấy tổng độ méo dạng hài (THD%) giảm dần khi tăng dần tần số sóng mang (f_c) và chỉ số điều chế (m).

Trong đó kỹ thuật điều chế PD PWM cho kết quả THD% tốt hơn. Kết quả mô phỏng cũng được kiểm chứng bằng thực nghiệm và cho kết quả phù hợp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. V. Nhờ, (2002), “Giáo trình điện tử công suất 1,” Nhà xuất bản ĐHQG Tp.HCM, p. 289.
- [2] M. Hammami, G. Rizzoli, R. Mandrioli, and G. Grandi, (2018), “Capacitors voltage switching ripple in three-phase three-level neutral point clamped inverters with self-balancing carrier-based modulation,” *Energies*, vol. 11, no. 12.
- [3] P. M. Lingom, J. Song-Manguelle, J. M. Nyobe-Yome, D. L. Mon-Nzongo, T. Jin, and M. L. Doumbia, (2019), “A single-carrier PWM method for multilevel converters,” 2019.

- [4] B. Wu,(2005), “High-Power Converters and ac Drives,” *High-Power Convert. ac Drives*, pp. 1–332.
- [5] N. T. Quach, S. H. Chae, J. H. Ahn, and E. H. Kim,(2018), “Harmonic analysis of a modular multilevel converter using double fourier series,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 298–306.
- [6] A. Al Hadi, X. Fu, W. Waithaka, R. Challoo, and S. Li,(2019), “Comparison and Simulation of the Level-Shifted and Phase-Shifted Modulation for a Five-Level Converter for Integration of Renewable Sources,” *Clemson Univ. Power Syst. Conf. PSC 2018*, pp. 1–6.
- [7] N. Chellammal, S. Dash, and P. Palanivel,(2011), “Performance analysis of multi carrier based pulse width modulated three phase cascaded H-bridge multilevel inverter,” *J. Electr. Eng.*, vol. 11, no. 2.
- [8] BCT,(2019), “Tiêu chuẩn Chất Lượng Điện Năng,” vol. 30, no. TT-BCT, pp. 1–14.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Nguyễn Phước Lộc

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

Email: locnp@vlute.edu.vn