

NGHIÊN CỨU GIẢM TỔNG MÉO DẠNG SÓNG HÀI CHO BỘ NGHỊCH LƯU MỘT PHA 5 BẬC KẸP TỤ BẰNG KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ SÓNG MANG

RESEARCH ON REDUCING TOTAL HARMONIC DISTORTION FOR A FIVE-LEVEL CAPACITOR CLAMPED SINGLE-PHASE INVERTER BY CARRIER MODULATION TECHNIQUE

HUỲNH THỊ TRÚC^{1*}, NGUYỄN VĂN NHỜ²

¹ Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

² Đại học Bách Khoa TP.HCM

E-mail*: truclongan072@gmail.com SĐT: 0976861893

Nhận bài (received): 07/3/2022; Phản biện (revised): 30/3/2022; Chấp nhận (accepted): 08/4/2022

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả khảo sát tổng méo dạng sóng hài trên bộ nghịch lưu một pha năm bậc kẹp tụ (FLC-5L) với tải R-L. Nội dung bài báo nghiên cứu các phương pháp điều khiển PWM và đánh giá so sánh chỉ số méo dạng sóng hài không mong muốn ở bộ nghịch lưu áp một pha kẹp tụ FLC-5L. Kỹ thuật điều chế sóng mang (PWM) được sử dụng trong nghiên cứu này đơn giản và dễ thực hiện. Các kỹ thuật điều khiển được mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink phiên bản 2021. Các kết quả nghiên cứu cho thấy ở chỉ số điều chế $m = 1$ và tần số sóng mang $f_c = 5\text{kHz}$ thì kỹ thuật điều khiển PS đề xuất đạt $\text{THD}_I = 1.68\%$ thấp hơn so với kỹ thuật điều khiển PD, POD APOD.

Từ khóa: Bộ nghịch lưu áp; kỹ thuật PWM; Tổng méo dạng sóng hài (THD); Nghịch lưu kẹp tụ năm bậc.

ABSTRACT

This paper presents the survey results on the total harmonic distortion on a five-level capacitor clamped single-phase inverter (FLC-5L) with a load using R-L. The article studies the PWM control methods and compares unwanted harmonic distortion in the FLC-5L capacitor clamped single-phase voltage inverter. Carrier modulation (PWM) technique is used in this study because it is simple and easy to implement. Control techniques are simulated and compared on Matlab/Simulink software version 2021. The research results show that at modulation index $m = 1$ and carrier frequency $f_c = 5\text{kHz}$, the proposed PS control technique achieves $\text{THD}_I = 1.68\%$ lower than that of PD, POD and APOD.

Keywords: Voltage inverter, PWM technique, Total Harmonic Distortion (THD), Five-level capacitor clamped inverter (FLC-5L).

1. GIỚI THIỆU

Bảng 1: Mô tả ký hiệu và chữ viết tắt.

Ký hiệu và chữ viết tắt	Mô tả
THD	Total Harmonic Distortion
NPC	Neutral Point Clamped Multilevel Inverter
PWM	Pulse Width Modulation
PD	In Phase Disposition
POD	Phase Opposition Disposition
APOD	Alternative Phase Opposition
PS	Phase Shift

Các bộ biến đổi công suất ngày nay được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp như: điều khiển các hệ truyền động, tạo bộ nguồn có khả năng cung cấp điện liên tục (UPS Uninter-ruptible Power Supplies) và nguồn cung cấp điện cho máy bay khi máy bay ở mặt đất (GPU Ground Power Unit) [3] [4].

Sóng hài luôn xuất hiện ở ngõ ra của các bộ biến đổi công suất và là sóng không mong muốn, làm quá tải đường dây và biến áp, làm tăng nhiệt độ hệ thống và gây nhiễu lên lưới điện [1][2]. Nếu không có sự kiểm soát, sóng hài có thể làm quá tải hệ thống, tăng công suất yêu cầu và làm ngưng hệ thống.

Bài báo này nghiên cứu về các kỹ thuật điều khiển nghịch lưu áp một pha FLC-5L [5]. Đây là cấu hình nghịch lưu dạng đa bậc giúp giảm chỉ số THD ở ngõ ra. Nghiên cứu này tiến hành so sánh các phương pháp điều khiển với tải R-L. Từ cơ sở nghiên cứu đề xuất phương pháp điều khiển tối ưu cho bộ nghịch lưu FLC-5L ở tần số sóng mang 5 kHz.

Cấu trúc bài báo được trình bày như sau: Trong phần 2 sẽ trình bày về nguyên lý hoạt động bộ nghịch lưu FLC-5L, phần

3 sẽ trình bày về kỹ thuật điều khiển sóng mang cho cấu hình FLC-5L, phần tiếp theo trình bày mô phỏng và phân tích kết quả mô phỏng và cuối cùng là phần kết luận của bài báo.

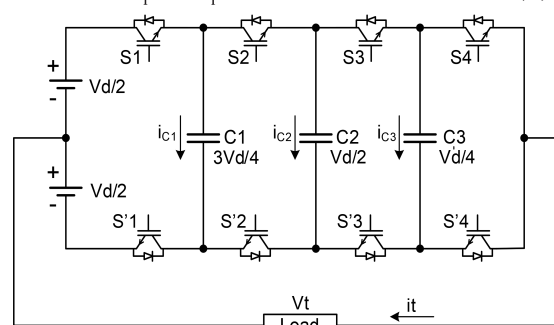
2. MÔ HÌNH TOÁN BỘ NGHỊCH LƯU MỘT PHA FLC-5L

2.1. Nguyên lý điều khiển bộ nghịch lưu một pha FLC-5L

Hình 1 mô tả sơ đồ bộ nghịch lưu một pha FLC-5L gồm có 8 khóa IGB S1, S2, S3, S4 và S'1, S'2, S'3, S'4. Điểm giữa của nguồn $V_d/2$ được nối vào 3 tụ kẹp C1, C2 và C3. Điện áp V_d có thể sử dụng nguồn cấp từ các pin điện, ắc quy, từ các nguồn chỉnh lưu diode riêng, hoặc từ các pin mặt trời. Dòng điện qua tụ điện 1 là i_{c1} , dòng điện qua tụ điện 2 là i_{c2} , dòng điện qua tụ điện 3 là i_{c3} . Điện áp trên tải là V_t và dòng điện trên tải là i_t .

Quy tắc đóng cắt linh kiện như sau:

$$S_i + S'_i = 1; i=1,2,3,4 \quad (1)$$



Hình 1: Sơ đồ cấu trúc FLC-5L.

Trong đó S_i là trạng thái của khóa IGBT_i; $S_i = 1$ nếu khóa ở trạng thái đóng, và $S_i = 0$ nếu khóa ở trạng thái ngắt.

Điện áp tải giữa hai điểm A và B được xác định như sau:

$$V_t = V_{AB} = -\frac{V_d}{2} + S_1 V_d + (S_2 - S_1) V_{c1} + (S_3 - S_2) V_{c2} + (S_4 - S_3) V_{c3} \quad (2)$$

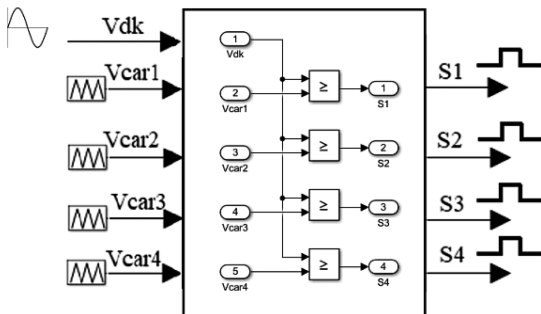
$$\begin{cases} i_{c1} = (S_1 - S_2) * i_{Load} \\ i_{c2} = (S_2 - S_3) * i_{Load} \\ i_{c3} = (S_3 - S_4) * i_{Load} \end{cases} \quad (3)$$

Từ phương trình (2) và (3) có thể tính được áp tải phụ thuộc vào trạng thái đóng ngắt của các khoá S1, S2, S3, S4 như ở bảng 2, với giả thuyết $V_{c1} = 3V_d/4$, $V_{c2} = V_d/2$, $V_{c3} = V_d/4$

2.2. Các kỹ thuật điều bộ nghịch lưu một pha cầu FLC-5L bằng PWM

a. Nguyên lý kỹ thuật điều rộng xung sóng mang (PWM)

Kỹ thuật điều chế động rộng xung sóng mang mô tả ở hình 2 gồm bốn sóng mang dạng tam giác so sánh với áp điều khiển V_{dk} để tạo các trạng thái đóng ngắt của các khóa S1, S2, S3, S4.



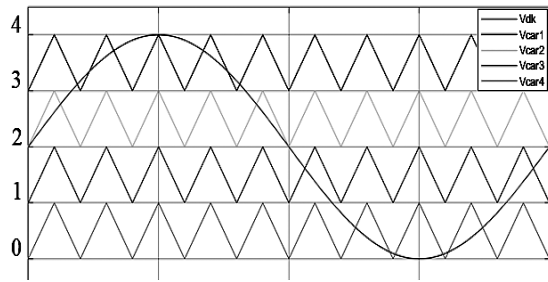
Hình 2: Sơ đồ kỹ thuật PWM

Trong đó V_{dk} hình sin với thành phần V_m và f lần lượt là biên độ và tần số.

b. Các kỹ thuật PWM cho bộ nghịch lưu FLC-5L.

• Kỹ thuật PD-PWM (Sóng mang đồng pha)

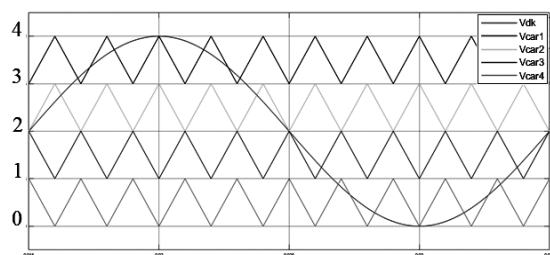
Kỹ thuật PD-PWM ở hình 3 dùng tín hiệu điều khiển V_{dk} so sánh với 4 sóng mang có cùng tần số, cùng pha nhau để so sánh với sóng điều khiển.



Hình 3: Dạng sóng mang dùng trong kỹ thuật điều khiển PD-PWM

Kỹ thuật này được xem là kỹ thuật truyền thống vì nó được sử dụng nhiều trong các nghiên cứu trong và ngoài nước.

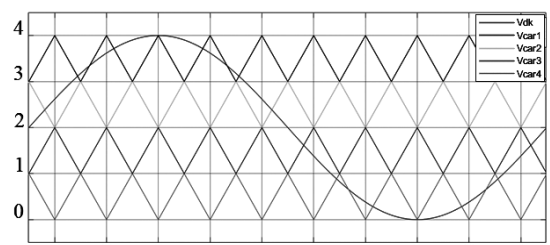
• Kỹ thuật POD-PWM (Sóng mang nửa chu kỳ dương và nửa chu kỳ âm của áp tải lệch pha 180°)



Hình 4: Dạng sóng mang dùng trong kỹ thuật điều khiển POD-PWM

Với kỹ thuật POD-PWM ở hình 4 dùng tín hiệu điều khiển V_{dk} so sánh với 4 sóng mang với hai sóng Vcar1, Vcar2 cùng tần số, cùng pha nhau và bố trí đối xứng với hai sóng Vcar3, Vcar4.

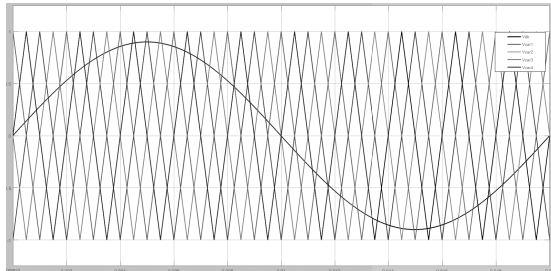
• Kỹ thuật APOD-PWM (Sóng mang tuần tự lệch pha 180°)



Hình 5: Dạng sóng mang dùng trong kỹ thuật điều khiển APOD-PWM

Với kỹ thuật APOD dùng tín hiệu V_{dk} so sánh với 4 sóng mang dạng tam giác V_{car1} , V_{car2} , V_{car3} , V_{car4} bố trí dịch pha 180° như hình 5.

• **Kỹ thuật PS-PWM (Sóng mang tuần tự lệch pha 90° , cùng biên độ)**



Hình 6: Dạng sóng mang dùng trong kỹ thuật điều khiển PS-PWM

Với kỹ thuật PS dùng 4 sóng mang dạng tam giác, cùng biên độ, bố trí dịch pha 90° như hình 6.

2.3. Chỉ tiêu đánh giá độ méo dạng sóng hài

Sử dụng chỉ tiêu về tổng méo dạng sóng hài (THD) để đánh giá chất lượng ngõ ra của bộ nghịch lưu FLC-5L. Thay đổi chỉ số điều chế m từ 0.1 đến 1 để phân tích THD của điện áp và dòng điện.

Đại lượng không sin tuần hoàn là tổng của tín hiệu hình sin ở tần số cơ bản và các tín hiệu hình sin có tần số là bội số nguyên lần của tần số cơ bản. Các tín hiệu hình sin có tần số là bội số nguyên lần của tần số cơ bản được gọi là các sóng hài. Chúng là nguyên nhân gây tổn hao trên lưới điện, bội số nguyên này được gọi là bậc sóng hài. Tổng các sóng hình sin, được biểu diễn theo công thức chuỗi fourier sau:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega_0 t) + B_n \sin(n\omega_0 t)]$$

$$= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sin(n\omega_0 t + \psi_n) \quad (4)$$

Với A_0 là thành phần một chiều $C_n \cdot \sin(n\omega_0 t + \psi_n)$ là sóng sin bậc n , $n=1$; $C_1 \cdot \sin(\omega_0 t + \psi_1)$ là sóng sin ở tần số cơ bản. Để đo độ méo sóng hài ta có thể sử dụng công thức tổng số méo dạng THD:

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}}{C_1} \quad (5)$$

Trong đó: C_1 là biên độ dòng điện/điện áp cơ bản.

C_n là biên độ dòng điện/điện áp sóng sin thứ n

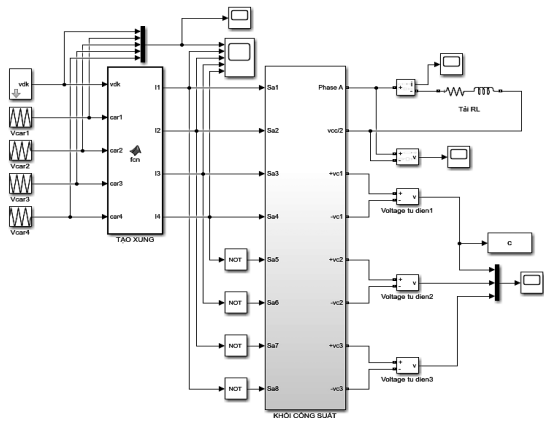
3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Với phần mềm MATLAB/Simulink có thể xây dựng mô hình và kiểm chứng hiệu quả các kỹ thuật PWM sử dụng để giảm THD% dòng điện và điện áp của bộ FLC-5L.

Bảng 2: Bảng tham số mô phỏng bộ nghịch lưu FLC-5L

Tham số	Giá trị
Công suất định mức	$P_{dm} = 3 \text{ KW}$
Điện áp định mức	$U_{dm} = 220 \text{ V}$
Điện áp DC	$V_d = 620 \text{ V}$
Điện trở phụ tải	$R = 15 \Omega$
Điện kháng phụ tải	$L = 20 \text{ mH}$
Điện dung tụ điện	$C = 1700 \mu\text{F}$
Tần số cơ bản ngõ ra	$f = 50 \text{ Hz}$
Tần số sóng mang	$f_c = 5 \text{ KHz}$

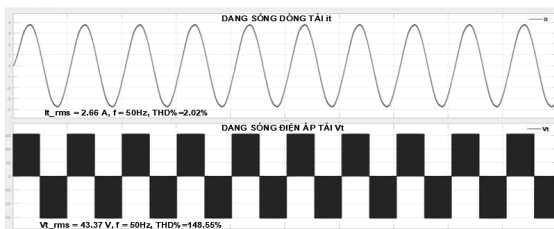
Mô hình bộ nghịch lưu FLC-5L được xây dựng như hình 7 như sau:



Hình 7: Mô hình bộ nghịch lưu FLC-5L trên phần mềm MATLAB/Simulink

Đồ thị điện áp tải và dòng điện tải cho hai giá trị chỉ số điều chế $m=0,2$ và $m=1$ như hình 8 và hình 9 như sau:

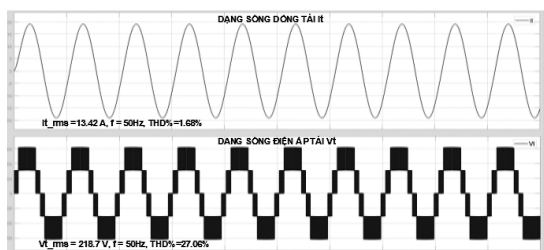
+ Ở chỉ số điều chế $m=0,2$:



Hình 8: Dạng sóng dòng điện và điện áp ở chỉ số điều chế $m=0,2$

Ở chỉ số điều chế $m=0,2$ dòng tải có giá trị hiệu dụng 2.66A, tần số 50Hz, độ méo dạng $THD_I\% = 2.02\%$. Điện áp tải có giá trị hiệu dụng 43.37V, tần số 50Hz, $THD_V\% = 148.55\%$.

+ Ở chỉ số điều chế $m = 1$:

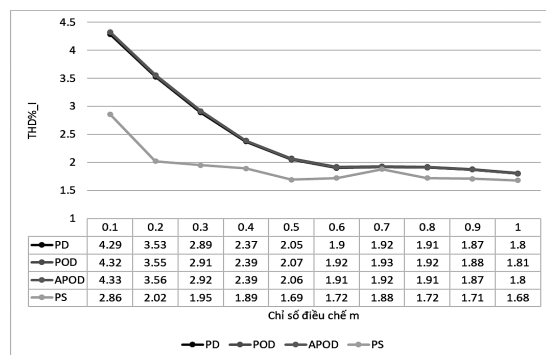


Hình 9: Dạng sóng dòng điện và điện áp ở chỉ số điều chế $m = 1$

Ở chỉ số điều chế $m = 1$ dòng tải có giá trị hiệu dụng 13.42A, tần số 50Hz, độ méo dạng $THD_I\% = 1.68\%$. Điện áp tải có giá trị hiệu dụng 218.7V, tần số 50Hz, $THD_V\% = 27.06\%$.

a) Tổng méo dạng hài dòng điện ($THD_I\%$)

Tổng méo dạng sóng hài dòng điện ở cấp hạ áp theo tiêu chuẩn ở Việt Nam hiện nay cho phép chỉ số $THD_I\% < 5\%$ (TT39-BCT)



Hình 10: Đường đặc tuyến $THD_I\%$ của bộ nghịch lưu FLC-5L

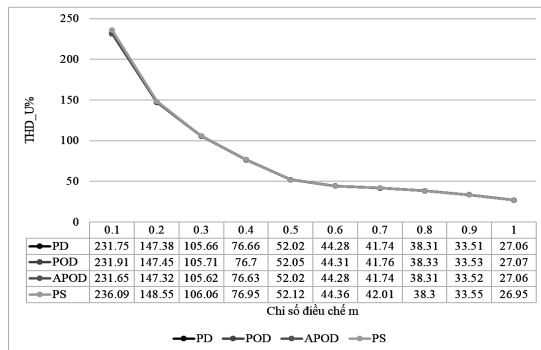
Hình 8 cho thấy với chỉ số điều chế trong khoảng $0.1 < m < 1$ thì cả ba kỹ thuật điều khiển PD, POD, APOD, PS đều có chỉ số $THD_I\% < 5\%$.

Ở chỉ số điều chế $m = 1$ thì $THD_I\%$ của kỹ thuật PD = 1.8%, POD = 1.81%, APOD = 1.8% và PS = 1.68%.

Từ hình 8 có thể thấy bộ nghịch lưu FLC-5L ở các chỉ số điều chế từ $m=0.1 \div 1$ thì kỹ thuật PD, POD và APOD có kết quả $THD_I\%$ tương đồng, kỹ thuật PS cho kết quả $THD_I\%$ thấp hơn.

b) Khảo sát tổng méo dạng hài áp ($THD_U\%$)

Tổng méo dạng sóng hài điện áp được khảo sát với kỹ thuật PD, POD, APOD và PS được thể hiện như hình 9 như sau:



Hình 11: Đường đặc tuyến THD_U% của bộ nghịch lưu FLC-5L

Hình 9 cho thấy với chỉ số điều chế trong khoảng $0.1 < m < 0.5$ thì THD_U% kỹ thuật điều khiển PS cao hơn kỹ thuật PD, POD, APOD. Khi chỉ số điều chế $0.6 < m < 1$ thì THD_U% kỹ thuật điều khiển PS thấp hơn kỹ thuật PD, POD, APOD

Ở chỉ số điều chế $m = 0.1 \div 1$ thì THD_U% của, kỹ thuật PS có giá trị cao hơn kỹ thuật PD, POD kỹ thuật APOD.

Ở chỉ số điều chế $m = 1$ thì THD_U% của, kỹ thuật PS có giá trị thấp nhất, giá trị

lần lượt là: Kỹ thuật PS = 27.95%, kỹ thuật POD = 27.07%, kỹ thuật PD = 27.06% và kỹ thuật APOD = 27.06%.

Có thể thấy bộ nghịch lưu FLC-5L khi ở chỉ số điều chế thấp thì sử dụng kỹ thuật APOD và PD sẽ giảm THD_U% hơn so với kỹ thuật POD và PS.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu dùng phần mềm Matlab/Simulink để mô phỏng, so sánh các kỹ thuật điều khiển bộ nghịch lưu FLC-5L bằng kỹ thuật PWM.

Kết quả cho thấy kỹ thuật PWM rất dễ thực hiện, phạm vi điều chế rộng. với chỉ số điều chế $0.1 < m < 1$ cả ba kỹ thuật PD, POD, APOD, PS đều đạt tiêu chí về chất lượng THD_I% theo tiêu chuẩn điện lực trong nước.

Nghiên cứu cho thấy ở chỉ số điều chế $m = 1$ và tần số sóng mang $f_c = 5\text{kHz}$ thì kỹ thuật điều khiển PS đạt THD_I% tối ưu nhất nhưng THD_U% lại cao nhất

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] W. Cao, K. Liu, S. Wang, H. Kang, D. Fan, and J. Zhao, "Harmonic stability analysis for multi-parallel inverter-based grid-connected renewable power system using global admittance," *Energies*, Vol. 12, No. 14, 2019.
- [2] A. S. O. Ogunjuyigbe, T. R. Ayodele, V. E. Idika, and O. Ojo, "Effect of lamp technologies on the power quality of electrical distribution network," *Proc. - 2017 IEEE PES-IAS PowerAfrica Conf. Harnessing Energy, Inf. Commun. Technol. Afford. Electrification, PowerAfrica 2017*, No. October 2019, pp. 159–163, 2017.
- [3] C. Buccella, M. G. Cimatorini, M. Tinari, and C. Cecati, "Seven-level cascaded inverters for Uninterruptible Power Supply (UPS) applications," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2019-Octob, pp. 1549–1554, 2019.
- [4] H. Zhu, Y. Li, Z. Li, and P. Wang, "Design and performance analysis of high power static 400-Hz supply," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, pp. 7–10, 2009.
- [5] N. R. Rode, S. R. Gaigowal, A. A. Dutta, and P. A. Meshram, "Multilevel inverter based PV-STATCOM," *2018 3rd IEEE Int. Conf. Recent Trends Electron. Inf. Commun. Technol. RTEICT 2018 - Proc.*, pp. 2173–2177, 2018.

Thông tin phản biện: TS. Nguyễn Xuân Vinh; TS. Nguyễn Văn Minh