

## MULTI-LEVEL INVERTER SINGLE PHASE DC/AC FOR PHOTOVOLTAIC (PV) APPLICATIONS

### THIẾT KẾ BỘ NGHỊCH LƯU ĐA MỨC MỘT PHA DC/AC ỨNG DỤNG LÀM BỘ CHUYỂN ĐỔI NGUỒN PIN NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

Ngô Viết Song

Trường Cao đẳng Công nghiệp Huế

**ABSTRACT:** *The Multi-level inverter requirements have been increased over time. Total Harmonic Distortion (THD) less than the transformer output voltage, less voltage gain between semiconductor valves, and low electromagnetic interference (EMI) are some of their beneficial features. Among all the multilevel topologies, the H-Bridge Layer Inverse U-Bridge (CHB: Cascade H-Bridge) is more scalable, feasible, and modular, so they are widely used. The CHB including full-sphere converters requires independent DC voltage sources that may be asymmetric. In this paper, the SPW M (Sine Pulse Width Modulation) full single-phase 7-H-ballast converter with optimal phase-transition modulation is introduced. It uses voltage control and genetic algorithms to reduce harmonics and THD under different working conditions: symmetrical and asymmetric. Matlab/Simulink simulation is used to measure, survey and evaluate inverse performance under different operating conditions.*

**Keywords:** Multi-level Inverters, cascade H full-bridge inverter, genetic algorithm, harmonic distortion, SPWM single phase.

**TÓM TẮT:** *Yêu cầu về bộ nghịch lưu đa mức đã được tăng lên theo thời gian. Tổng độ méo sóng hài THD (Total Harmonic Distortion) ít hơn của điện áp đầu ra bộ biến đổi, độ tăng điện áp ít hơn giữa các van bán dẫn và nhiễu điện từ thấp (EMI) là một số tính năng có lợi của chúng. Trong tất cả các cấu trúc liên kết đa mức, nghịch lưu nối tầng cầu H (CHB: Cascade H-Bridge) có khả năng mở rộng, tính khả thi và mô đun hóa cao hơn nên chúng được sử dụng rộng rãi. CHB bao gồm các bộ chuyển đổi cầu toàn phần yêu cầu nguồn điện áp DC độc lập có thể không đối xứng. Bài viết giới thiệu bộ nghịch lưu 7 mức cầu H một pha toàn phần SPWM (Sine Pulse Width Modulation) với điều chế chuyển pha tối ưu. Nó sử dụng điều khiển điện áp và thuật toán di truyền để làm giảm bớt sóng hài và THD trong các điều kiện làm việc khác nhau: đối xứng và bất đối xứng. Mô phỏng Matlab/Simulink được sử dụng để đo lường, khảo sát đánh giá hiệu suất nghịch lưu trong các điều kiện hoạt động khác nhau.*

**Từ khóa:** *Bộ chỉnh lưu đa mức, nghịch đối lưu tầng cầu H, thuật toán di truyền, độ méo sóng dài, một pha toàn phần SPWM.*

## 1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, do ảnh hưởng của phát khí thải từ việc đốt nhiên liệu hóa thạch, sự quan tâm đến các nguồn năng lượng tái tạo như hệ thống năng lượng mặt trời (Solar Energy) đã được lưu tâm ưu tiên. Một số quốc gia đã có chính sách

kích thích nhằm khuyến khích công dân và các ngành công nghiệp của họ sử dụng năng lượng xanh thay vì những nguồn năng lượng không thể tái tạo lại như than đá, dầu hỏa, xăng... Mặc dù, các hệ thống năng lượng mặt trời hứa hẹn để cung cấp năng lượng sạch, nhưng vẫn còn một

số rào cản hạn chế để thương mại hóa chúng. Ví dụ: chi phí đầu tư ban đầu còn cao, điện áp đầu ra của các tấm Pin chuyển đổi năng lượng ánh sáng thành năng lượng điện PV (Photovoltaic) kết nối với lưới điện hoặc để chạy các thiết bị điện dân dụng còn thấp. Hơn nữa, để ngăn chặn hiệu ứng bóng râm và sự không phù hợp của bảng điều khiển để dò tìm họ các điểm công suất cực đại MPP (Maximum Power Points), do đó không thể đưa chúng vào [1, 2]. Mặc dù, bộ nghịch lưu hai hoặc ba mức được sử dụng trong các hệ thống PV được kết nối lưới điện hoặc vận hành độc lập, nhưng chúng gặp phải hai vấn đề chính: độ méo tổng sóng hài (THD) cao của dòng điện và ứng suất cao dv/dt của các van bán dẫn nghịch lưu. Nghịch lưu đa mức MLIs (Multi-level Inverters) thường được sử dụng trong các ứng dụng quang điện, chúng có dạng sóng đầu ra chất lượng cao, THD thấp, nhiễu điện từ thấp EMI (Electromagnetic Interference) và ứng suất điện áp thấp hơn các van bán dẫn. MLIs cũng đóng một vai trò quan trọng trong các ứng dụng cao áp và trung áp như máy phục hồi điện áp động DVR (Dynamic Voltage Restorer), xe điện và các thiết bị FACTS [2, 3].

Nói chung, có ba loại cấu trúc liên kết nghịch lưu đa mức bao gồm: kẹp diode, kẹp tụ điện và cầu H nối tầng (CHB: Cascaded H-bridge). Trong số đó, CHB thuận lợi hơn do tính khả thi, khả năng mở rộng và mô-đun hóa. Mỗi cấu hình CHB một pha sử dụng nghịch lưu cầu H ba mức một pha với nguồn điện áp DC độc lập. Dựa trên đầu ra của nguồn DC, CHB có thể đối xứng hoặc không đối xứng. Trong trường hợp các mô-đun PV, vì mỗi mô-đun có MPP riêng, điện áp đầu ra của nó có thể khác với các mô-đun khác và do đó nó cần điều khiển CHB không đối xứng.

Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện trên các bộ nghịch lưu đa mức một pha [4 - 10].

Trong [5] một cấu trúc liên kết đã được đề xuất cho nghịch lưu đa mức, trong đó các van bán dẫn được đặt nối tiếp với các nguồn và nó có một số phần tử. Trong [6], một cấu trúc khác đã được đề xuất cho các bộ nghịch lưu đa mức dựa trên các mô-đun đa mức. So với cấu trúc liên kết CHB, cấu trúc này đòi hỏi cùng một số nguồn điện áp nhưng để có được số mức bằng nhau ở đầu ra, cấu trúc liên kết này yêu cầu số lượng phần tử thấp hơn. Một trong những vấn đề quan trọng liên quan đến các MLI này là biên độ điện áp cho các thành phần hài. Trong [7], một cấu trúc mới đã được đề xuất cho các bộ nghịch lưu đa mức có chuyển mạch đối xứng và không đối xứng. Trong tài liệu tham khảo này, một mô hình mới đã được đề xuất cho nghịch lưu dựa trên mô hình chức năng chuyển mạch để tính toán các mối quan hệ phân tích của sóng hài đối với chuyển mạch không đối xứng. Một số cấu trúc mới khác đã được đề xuất trong [8 - 10] cho các bộ nghịch lưu đa mức có nguồn điện áp DC không đối xứng. Trong bài báo này, một nghịch lưu 7 mức một pha cầu toàn phần với điều chế độ rộng xung hình sin SPWM. Thuật toán điều chế chuyển pha được tối ưu hóa dựa trên thuật toán di truyền GA (Genetic Algorithm) và thuật toán điều khiển điện áp tự thích hợp cho điều kiện bất đối xứng được đưa ra để làm giảm sóng hài và giảm THD.

Kết quả mô phỏng được trình bày cho thấy hiệu suất của nghịch lưu đa mức được giới thiệu trong các điều kiện hoạt động khác nhau. Ngoài ra, một nguyên mẫu thử nghiệm cũng được xây dựng và kết quả thực tế được cung cấp để xác nhận phân tích lý thuyết.

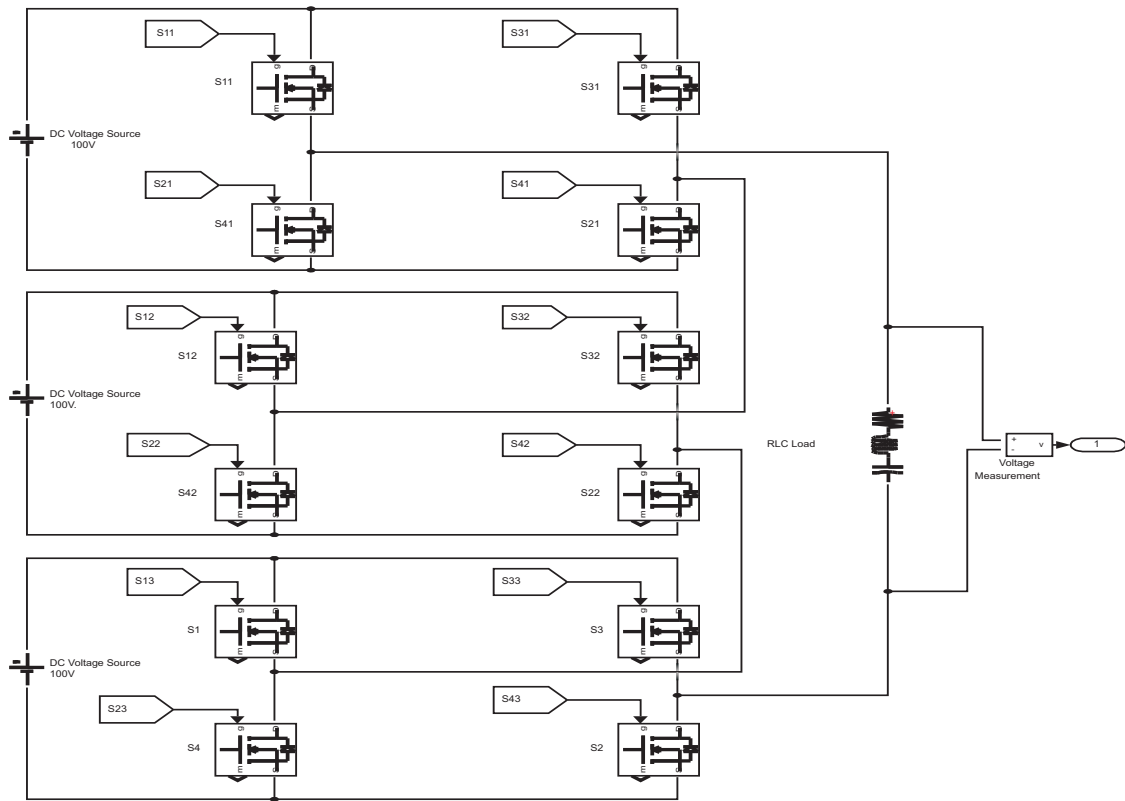
## **2. ĐỀ XUẤT NGHỊCH LƯU ĐA MỨC**

### **2.1. Khái niệm và hiệu suất**

Nghịch lưu đa mức một pha được thể hiện trong hình 1. Như được minh họa, nghịch lưu đa mức này là CHB 7 mức bao gồm ba khối nghịch lưu cầu H một pha được kết nối nối tiếp. Do

điện áp đầu ra của mỗi cầu H được cung cấp bởi mô đun PV với MPP độc lập thuật toán, bộ chuyển đổi nên được coi là một CHB không đối xứng, khối điều khiển tạo ra các xung tối ưu

điều khiển các van bán dẫn để giảm bớt các thành phần hài và THD của điện áp đầu ra nghịch lưu đa mức như được mô tả trong phần tiếp theo.



Hình 1. Bộ nghịch lưu cầu một pha toàn phần 7 mức

## 2.2. Khối điều khiển

Điện áp đầu ra trên mỗi chân cho một nghịch lưu theo tầng với các mức  $m$  (bao gồm 0) mỗi nửa pha là:

$$v_{an} = v_{a1} + v_{a2} + v_{a3} \text{ L } v_{am-1} \quad (1)$$

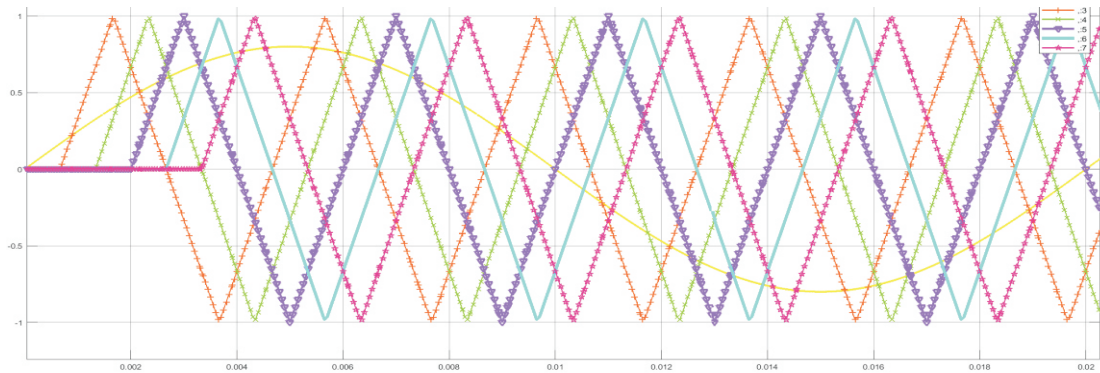
Do đối xứng của sóng bốn phần tư (quarter-wave) dọc theo trục  $x$ , cả hai hệ số Fourier  $A_o$  và  $A_n$  đều bằng không; do đó, điện áp pha của van bán dẫn tức thời là:

$$v_{an}(\omega t) = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \left[ \sum_{j=1}^{m-1} \cos(n\alpha_j) \right] \sin(n\omega t) \quad (2)$$

Các góc dẫn có thể được chọn sao cho THD của điện áp pha được giảm thiểu. Các góc này thường được chọn để hủy bỏ một số sóng hài tần số thấp hơn chiếm ưu thế. Do đó, người ta phải giải một tập các phương trình cho một chỉ số điều chế. Các phương trình này được giải quyết thông thường bằng phương pháp lặp như Newton-Raphson. Tuy nhiên, trong bài báo này, góc bước của các xung nghịch lưu đa mức được tối ưu hóa bằng cách sử dụng GA. Nói cách khác, các van bán dẫn được bật và tắt bằng cách sử dụng điều chế dịch pha (phase shift) ở tần số 20 kHz sao cho độ méo hài của điện áp

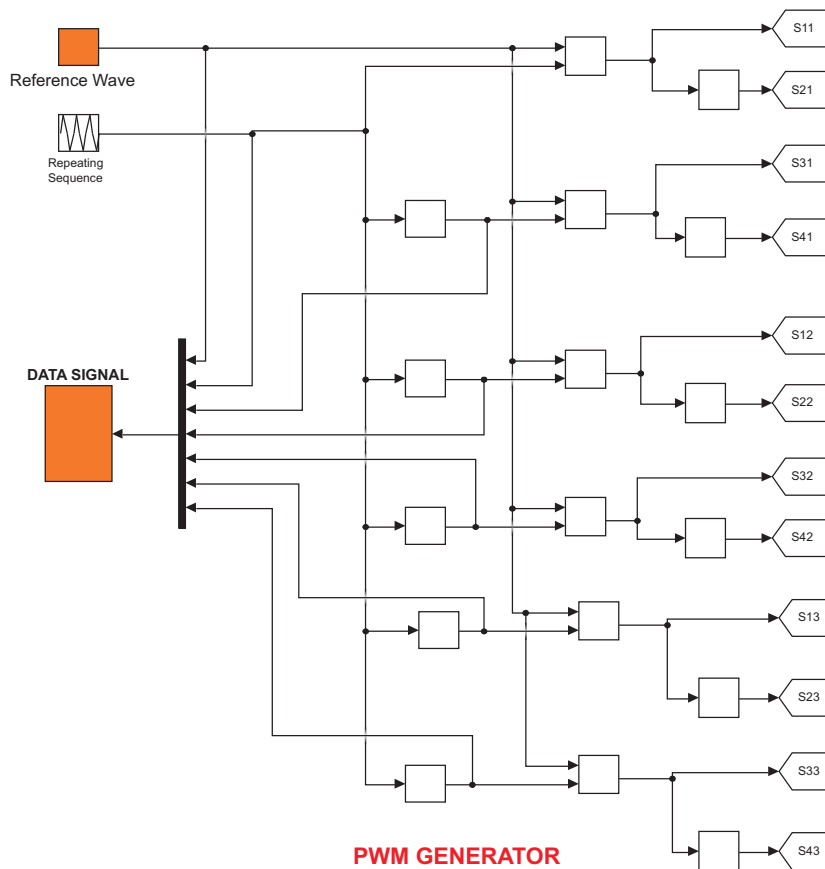
đầu ra giảm nhỏ. Trong phương pháp điều khiển được đề xuất, bộ điều khiển tạo ra các xung cần thiết cho các van bán dẫn với việc kết

hợp dạng sóng hình sin tham chiếu với 6 sóng mang hình tam giác trong đó mỗi sóng có sự dịch pha  $60^\circ$  với các tín hiệu khác.



**Hình 2.** Sáu tín hiệu sóng mang hình tam giác dịch pha

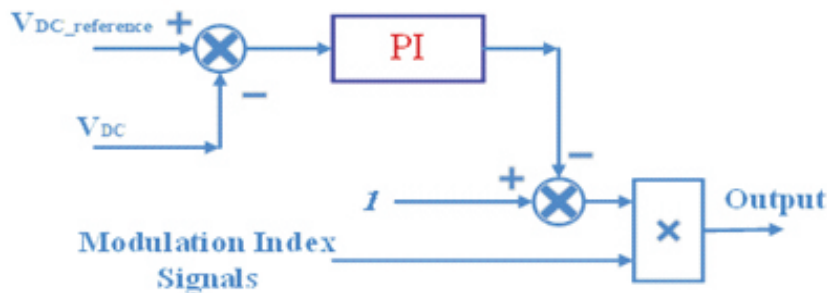
### 2.3. Điều khiển điện áp



**Hình 3.** Sơ đồ điều khiển các van IGBT

Lắp song song với mỗi mảng pin PV có một tụ điện để hấp thụ điện áp gợn sóng trên liên kết DC. Quan sát cho thấy khi chênh lệch điện áp giữa các liên kết DC là rất lớn, bộ điều khiển gặp khó khăn trong việc điều chỉnh và bắt bám theo điện áp MPP mong muốn trong bộ chuyển đổi CHB. Điều này thường xảy ra do năng lượng tuần hoàn bên trong hệ thống. Tụ điện liên kết DC được sạc khi nghịch lưu tắt và nó xả khi nghịch lưu đóng. Hơn nữa, việc tăng

chỉ số điều chế dẫn đến tăng thời gian tắt trong chu kỳ chuyển đổi nghịch lưu và ngược lại. Sử dụng hai điểm này, phương pháp bù sau được đề xuất để ngăn ngừa độ sai lệch vòng điều khiển điện áp. Hệ số hiệu chỉnh được tạo bởi khối hiệu chỉnh mất cân bằng điện áp. Sản phẩm có lỗi với chỉ số điều chế được sử dụng để hủy hiệu ứng điện tuần hoàn trên điện áp liên kết DC.



**Hình 4.** Sơ đồ điều khiển dung lượng điện áp

#### 2.4. Sơ đồ thuật toán di truyền

Thuật toán di truyền là một trong những phương pháp tính toán tiến hóa nổi tiếng nhất sử dụng các tìm kiếm heuristic để có được giải pháp tối ưu. Nó bắt chước quá trình tiến hóa tự nhiên. Ưu điểm vượt trội của GA đối với các thuật toán tối ưu hóa khác là nó không phụ thuộc vào thông tin độ dốc, do đó nó có thể giảm thiểu các hàm chi phí được xác định (tìm giải pháp tối ưu) mà không cần các thuật toán tối ưu hóa toán học phức tạp. Thuật toán chung sửa đổi một tập hợp các giải pháp riêng lẻ lặp đi lặp lại qua một số bước và kết hợp chúng lại với nhau để tạo ra thế hệ mới. Trải qua nhiều thế hệ,

dân số phát triển theo hướng giảm thiểu chức năng chi phí là mục tiêu của chúng tôi.

$$FitnessFunction = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{5,7} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^3 \cos(n.\alpha_k) \right)^2}}{\sum_{k=1}^3 \cos(n.\alpha_k)} \quad (3)$$

$$FV(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = -100 \frac{|V_5| - |V_7|}{V_1}$$

Bằng cách chọn góc chuyển đổi tối ưu sau năm mươi lần lặp và lưu chúng trong bảng tra cứu của bộ xử lý, bộ điều khiển có thể chạy nghịch lưu với mức giảm điều hòa và THD.

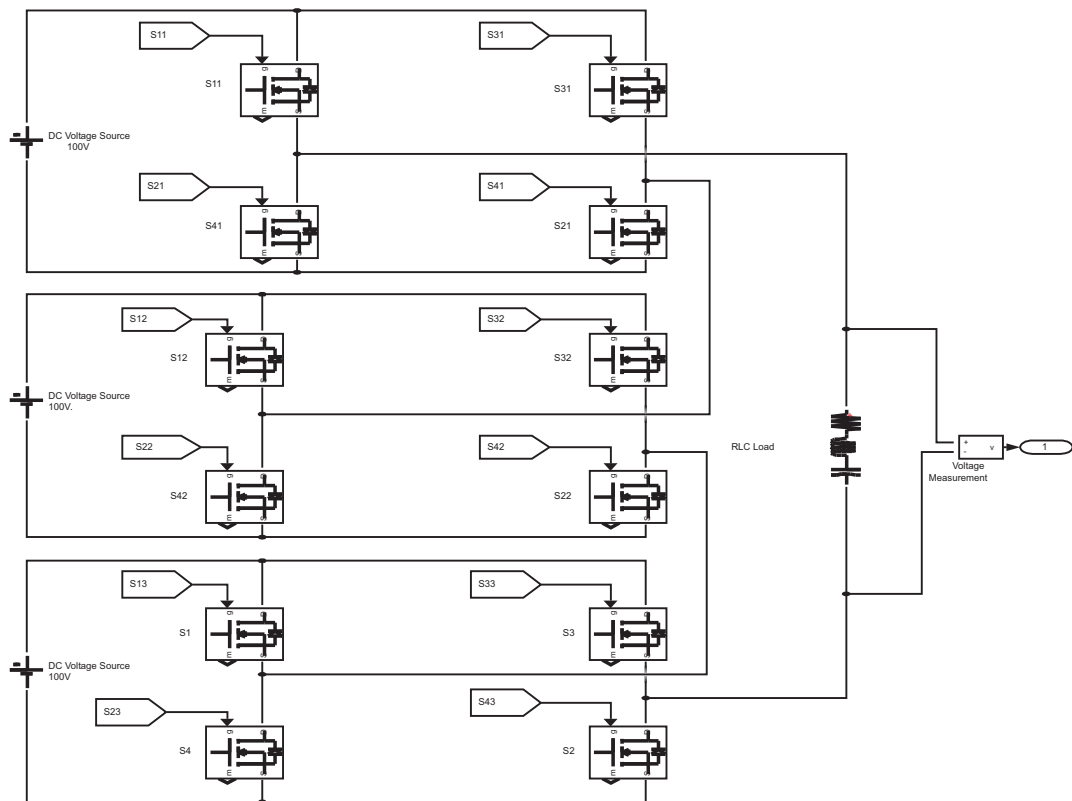
**Bảng 1.** Góc điều chế

Góc điều chế	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	THD (%)
0.1	7.32	12.23	24.51	17.51
0.2	9.53	18.32	37.38	13.51
0.5	24.67	44.56	54.15	11.25
0.9	36.87	54.45	62.32	9.92

Trong phương pháp điều khiển được đề xuất, chúng tôi phát triển góc của các xung đa mức và tính toán hàm chi phí có thể là tổng méo hài (THD) hoặc biên độ của các sóng hài có ý nghĩa cụ thể như hình 8. Trường hợp tiến hành góc của mỗi khối H, bảng 1 cho thấy góc chuyển đổi và THD của các xung đa mức dựa trên các chỉ số điều chế khác nhau đạt được bằng công cụ GA của MATLAB.

### 3. CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Trong phần này, hiệu suất của hệ thống điều khiển mờ được nghiên cứu bằng các kết quả mô phỏng MATLAB. Các đặc điểm của hệ thống nghiên cứu được trình bày trong Bảng 2. Các hệ số của bộ điều khiển PI được sử dụng để bù công suất tuần hoàn thu được là  $K_p = 0.95$  và  $K_i = 11.05$ . Hình 5 cho thấy sơ đồ của nghịch lưu 7 mức với điều chế chuyển pha.



**Hình 5.** Sơ đồ của nghịch lưu 7 mức với điều chế chuyển pha

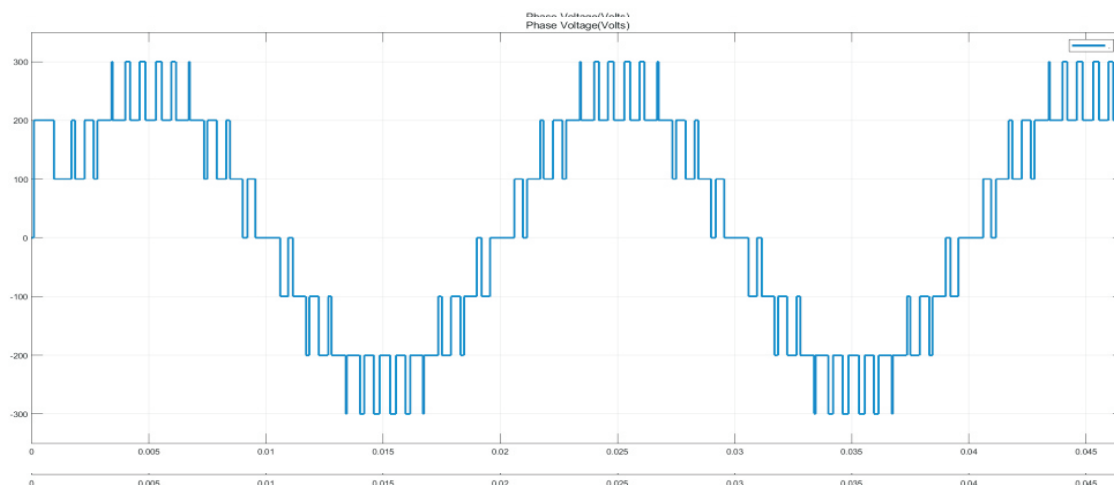
**Bảng 2.** Các thông số của hệ thống

Các biến	Giá trị	Đơn vị
Điện dung lọc đầu vào	480	uF
Điện cảm của lọc đầu ra	220	uH
Tần số lưới điện	50	Hz
Điện áp hiệu dụng của lưới điện	110	V
Tần số chuyển mạch	20	kHz
Công suất	540	W

Nghịch lưu đa mức được đánh giá theo hai điều kiện khác nhau, điều kiện hoạt động bình thường trong đó tất cả các bảng PV nhận được cùng một bức xạ (khối H có cùng nguồn điện áp DC) và điều kiện không đối xứng trong đó các bảng PV nhận được bức xạ khác nhau ((khối H có khác nhau nguồn điện áp một chiều).

### 3.1. Điều kiện hoạt động bình thường

Đường cong điện áp-công suất cho thấy công suất tối đa như nhau cho tất cả các mảng PV được mô phỏng dưới bức xạ  $1000 \text{ W/m}^2$ . Vì vậy, chúng tạo ra các điện áp DC giống nhau. Sau 4,5 giây, công suất đầu ra của mảng đạt công suất tối đa, do đó điện áp tham chiếu được giữ không đổi.

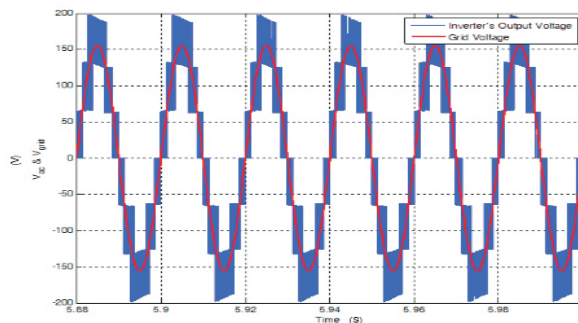


**Hình 6.** Dạng sóng sau khi điều chế nghịch lưu 7 mức với điều chế chuyển pha

Một sự khác biệt nhỏ giữa điện áp của liên kết DC và giá trị tham chiếu của nó là do sử dụng xấp xỉ trong tính toán của bộ điều khiển liên kết DC. Điện áp ngõ ra một pha của nghịch lưu được thể hiện trong hình 8 THD hiện tại trong điều kiện này là 3,58%.

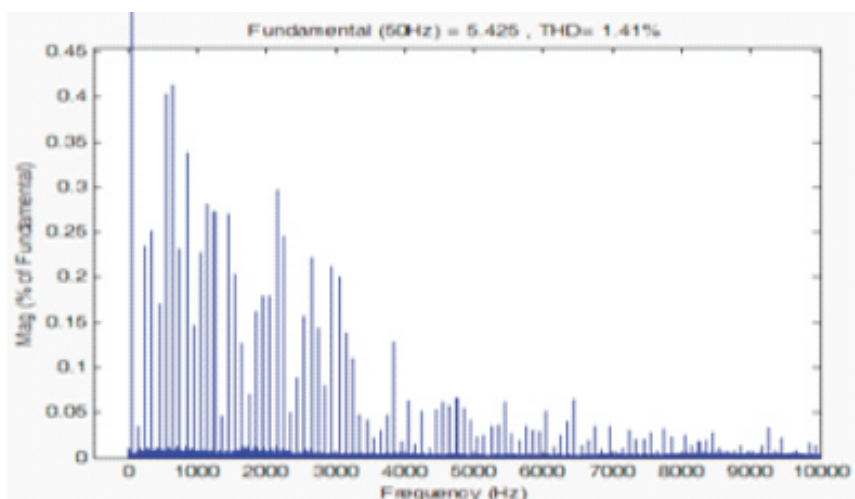
### 3.2. Điều kiện hoạt động không đối xứng

Trong thí nghiệm này, công suất tối đa của mảng thứ nhất, thứ hai và thứ ba lần lượt là 104,7 W; 141,2W và 160,5W, tương ứng với các bức xạ  $G1 = 600$ ,  $G2 = 800$  &  $G3 = 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ . Điện áp đầu ra của nghịch lưu trong thí nghiệm này cũng có 7 mức và nó hoàn toàn cùng pha với điện áp mạng.



**Hình 7.** Điện áp đầu ra của nghịch lưu và điện áp mạng ổn định trong điều kiện hoạt động không đối xứng ( $G1 = 600$ ,  $G2 = 800$ ,  $G3 = 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ )





**Hình 8.** Thành phần hài của dòng điện đầu ra của nghịch lưu trong điều kiện hoạt động không đối xứng ( $G1 = 600$ ,  $G2 = 800$ ,  $G3 = 1000(W/m^2)$ )

Hình 8 cho thấy thiết lập thử nghiệm và điện áp đầu ra và dạng sóng hiện tại của nó. Dạng sóng điện áp đầu ra cùng với phân tích sóng hài của nó được minh họa trong Hình 9. Các thành phần sóng hài của dạng sóng đầu ra được chỉ định trong Hình 10. Đối với điều kiện không đối xứng, Hình 11 và Hình 12 cho thấy điện áp đầu ra và dạng sóng hiện tại và thành phần hài của dạng sóng đầu ra tương ứng. THD của dòng điện đầu ra là 1,51%. Mặc dù THD này cao hơn giá trị thu được trong kết quả mô phỏng nhưng nó vẫn đáp ứng các tiêu chuẩn ISIRI 11859 cho THD hiện tại, điều này cho

thấy mức dưới 5% là chấp nhận được.

#### V. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một nghịch lưu 7 mức một pha toàn cầu SPWM đã được giới thiệu. CHB đề xuất sử dụng GA để tìm góc dẫn tối ưu của xung để giảm sóng hài và THD. Ngoài ra, bộ điều khiển đề xuất sử dụng điều khiển điện áp điện dung phù hợp cho điều kiện không đối xứng để loại bỏ công suất tuần hoàn trong hệ thống. Kết quả mô phỏng MATLAB và dSPACE DS1104 với một nguyên mẫu thử nghiệm đã được triển khai và kết quả thực tế đã xác nhận hiệu suất của bộ chuyển đổi trong thực tế.

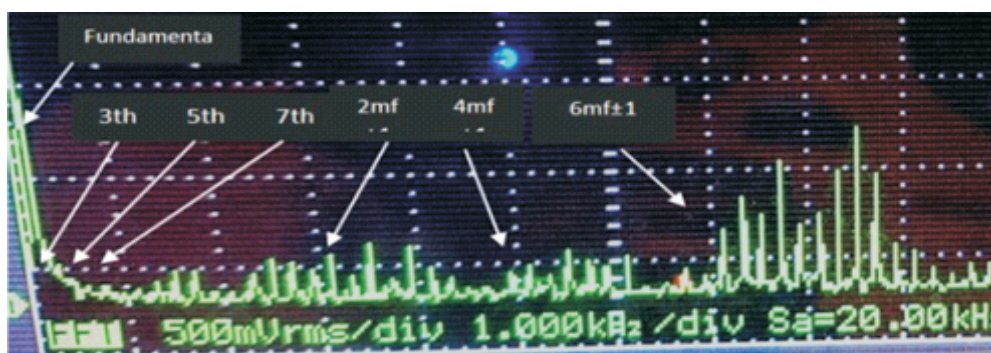


**Hình 9.** Sơ đồ thực nghiệm

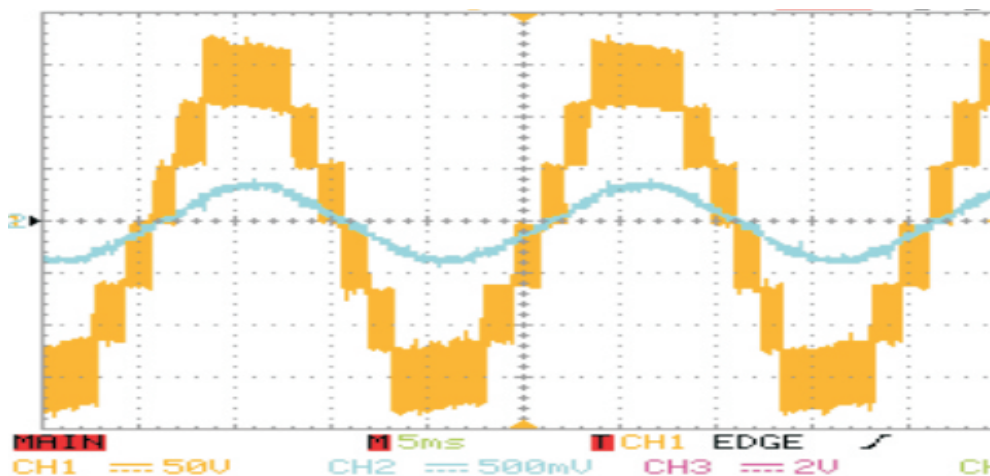




**Hình 10.** Dạng sóng điện áp đầu ra và phổ phân tích hài của nó



**Hình 11.** Phân tích hài hòa dạng sóng đầu ra của nghịch lưu trên máy hiện sóng



**Hình 12.** Điện áp đầu ra của nghịch lưu và điện áp mạng ở trạng thái ổn định trong điều kiện hoạt động không đối xứng

Từ kết quả điện áp ngõ ra của mạch nghịch lưu 7 bậc thì dạng sóng hình sine với tổng sóng hài THD thấp, có giá trị gần 1,41% rất khả quan

đều này chứng tỏ thuật toán GA cho kết quả tốt, giữa thực nghiệm và mô phỏng gần như tương đương nhau. Thuật toán GA tối ưu hoá đa mục

tiêu dựa trên cơ sở giảm tối thiểu sóng hài bậc cao dành cho mạch nghịch lưu đa bậc có kết quả thực nghiệm có thể ứng dụng cho thực tế đạt

hiệu quả cao trong điều kiện làm việc nguồn đối xứng và bất đối xứng.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Radhakrishnan, G., et al., Design and Analysis of the Performance of a Solar Driven Micro-Inverter Using Single Ended Primary Inductance Converter Topology. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2019. 16(2): pp. 529-536.
- [2] Vural, A.M. and E.N. Wirsy, Three-phase modular multilevel converter based unified power flow controller. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2019.
- [3] Ghatge, V.V. and A.V. Naik. Implementation of Multilevel inverter based Dynamic voltage restorer. in 2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). 2018. IEEE.
- [4] Poyyamani Sunddharaj, S., S. S Rangarajan, and S. Gopalan, Neoteric Fuzzy Control Stratagem and Design of Chopper fed Multilevel Inverter for Enhanced Voltage Output Involving Plug-In Electric Vehicle (PEV) Applications. Electronics, 2019. 8(10): pp. 1092.
- [5] Sotoodeh, P. and R.D. Miller. A new multi-level inverter with facts capabilities for wind applications. in 2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech). 2013. IEEE.
- [6] Alishah, R.S., et al., Switched-diode structure for multilevel converter with reduced number of power electronic devices. IET Power Electronics, 2013. 7(3): p. 648-656.
- [7] Gopal, Y., D. Birla, and M. Lalwani, Reduced switches multilevel inverter integration with boost converters in photovoltaic system. SN Applied Sciences, 2020. 2(1): pp. 58.
- [8] Manoharan, M.S., A. Ahmed, and J.-H. Park, A PV power conditioning system using nonregenerative single-sourced trinary asymmetric multilevel inverter with hybrid control scheme and reduced leakage current. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016. 32(10): pp. 7602-7614.
- [9] Uma, D., K. Vijayarekha, and S. Manikandan, Implementation of Cascaded Multilevel Inverter with Bidirectional Switches for STATCOM. Journal of Applied Sciences, 2014. 14(14): pp. 1582-1587.
- [10] Zamiri, E., et al., A new cascaded switched-capacitor multilevel inverter based on improved series-parallel conversion with less number of components. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016. 63(6): pp. 3582-3594.

### ***Liên hệ:***

#### **Ngô Viết Song**

Trường Cao Đẳng Công Nghiệp Huế

Địa chỉ: số 70 Nguyễn Huệ, Tp. Huế

Email: nvsong@hueic.edu.vn

Ngày nhận bài: 03/3/2020

Ngày gửi phản biện: 07/3/2020

Ngày duyệt đăng: 12/4/2020