

Xây dựng mô hình giảng dạy thực nghiệm điều khiển PWM cho bộ nghịch lưu cầu H-NPC 1 pha điều khiển động cơ không đồng bộ

Võ Quốc Thái
Trường Trung cấp Cai Lậy
Tiền Giang, Việt Nam
quocthai110690@gmail.com

Đào Thị Bé Dung
Trường Trung cấp Cai Lậy
Tiền Giang, Việt Nam
dungdaotg2017@gmail.com

Đào Văn Tâm
Trường Trung cấp Cai Lậy
Tiền Giang, Việt Nam
daotam_81@yahoo.com.vn

Nguyễn Phước Lộc
Trường Đại học Sư phạm
Kỹ thuật Vĩnh Long
Vĩnh Long, Việt Nam
locnp@vlute.edu.vn

Bùi Thanh Hiếu
Trường Đại học Sư phạm
Kỹ thuật Vĩnh Long
Vĩnh Long, Việt Nam
hieutb@vlute.edu.vn

Tóm tắt — Bài báo trình bày một mô hình giảng dạy thực nghiệm bộ nghịch lưu một pha cầu H diode kẹp 3 bậc (H-NPC-3L) điều khiển động cơ không đồng bộ bằng kỹ thuật điều chế độ rộng xung sóng mang (PWM). Bộ nghịch lưu H-NPC-3L thường được ứng dụng phổ biến trong các ứng dụng kết nối lưới hoặc làm nguồn dự phòng UPS trong công nghiệp. Ngoài các khả năng như chịu điện áp cao, điện áp ngõ ra và dòng điện có độ méo dạng sóng hài thấp, bộ nghịch lưu H-NPC-3L còn có ưu điểm vượt trội là dễ điều khiển với phương pháp PWM. Các kỹ thuật PWM dùng trong thực nghiệm dựa trên đặc điểm trên bảng trạng thái đóng ngắt của bộ nghịch lưu cầu H-NPC-3L. Bài báo này tập trung trình bày mô hình thực nghiệm bộ nghịch lưu H-NPC-3L sử dụng kỹ thuật điều chế độ rộng xung sóng mang trên vi điều khiển STM32F411 một cách chi tiết. Kết quả phân tích sẽ được đánh giá bằng hình ảnh thực tế đo được từ máy đo máy đo dạng sóng Tektronix TDS2024C. Để làm nổi bật ưu điểm của cấu hình nghịch lưu H-NPC-3L các kết quả thực nghiệm sẽ được so sánh với cấu hình bộ nghịch lưu cầu H 2 bậc (H-2L). Các kết quả thu được khẳng định các lợi thế của cấu hình bộ nghịch lưu cầu H-NPC-3L.

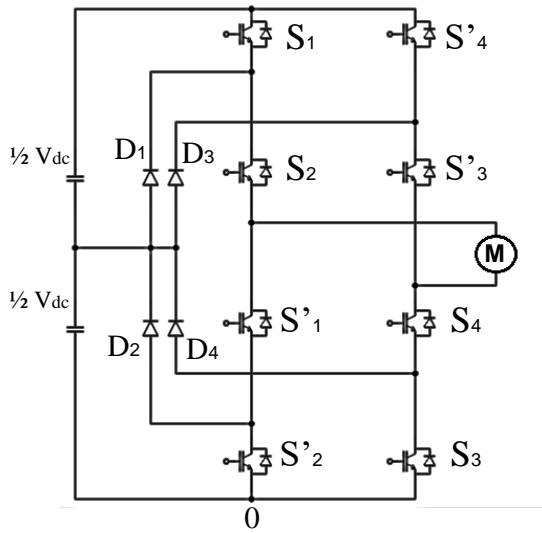
Từ khóa — Nghịch lưu nguồn áp, nghịch lưu cấu hình H-NPC, Nghịch lưu đa bậc, Kỹ thuật PWM.

I. GIỚI THIỆU

Do sự phát triển mạnh mẽ của các ứng dụng sử dụng năng lượng điện, việc nghiên cứu các bộ biến đổi công suất ngày càng trở nên quan trọng. Bộ nghịch lưu áp một pha cầu H 2 bậc (H-2L) là một trong số các cấu hình bộ biến đổi 1 pha được nghiên cứu và ứng dụng phổ biến cho các ứng dụng công suất vừa và nhỏ với các ưu điểm như: cấu trúc đơn giản và dễ điều khiển [1-4]. Tuy nhiên, cấu hình này vẫn có một số hạn chế như: chất lượng sóng hài điện áp ngõ ra còn thấp và stress điện áp trên linh kiện cao khi sử dụng điện áp lớn. Để cải thiện chất lượng điện áp ngõ ra như: giảm độ méo dạng THD điện áp và dòng điện ngõ ra, giảm stress điện áp trên linh kiện, các cấu hình nghịch lưu đa bậc thường được xem xét [5-8].

Phương pháp điều khiển cơ bản áp dụng cho các

bộ nghịch lưu một pha là phương pháp điều chế sóng mang (PWM). Kỹ thuật này sử dụng sóng điều khiển dạng sin so sánh với sóng mang để tạo ra xung kích cho các linh kiện. Trong thực tế, hai phương pháp cơ bản thường được áp dụng là phương pháp điều khiển PWM lưỡng cực (Bipolar PWM) và PWM đơn cực (Unipolar PWM) [8]. Yêu cầu của các bộ nghịch lưu một pha kết nối lưới trực tiếp không qua máy biến áp đòi hỏi giảm độ méo dạng áp ra bộ nghịch lưu. Rõ ràng, điều này không phù hợp với bộ nghịch lưu cầu H 2 bậc. Bộ nghịch lưu một pha đa bậc có thể là một giải pháp hiệu quả cho các ứng dụng một pha công suất lớn, áp cao có yêu cầu về độ méo dạng sóng hài thấp [3]. Một trong số cấu hình nghịch lưu đa bậc được nghiên cứu phát triển là bộ nghịch lưu H-NPC-3L được mô tả ở hình 1.



Hình 1. Bộ nghịch lưu một pha H-NPC-3L

Bài báo này nghiên cứu ứng dụng bộ nghịch lưu cầu H-NPC-3L và xây dựng mô hình giảng dạy thực nghiệm điều khiển PWM cho bộ nghịch lưu H-NPC-3L điều khiển động cơ không đồng bộ. Kết quả phân tích so sánh được kiểm chứng và đánh giá bằng kết quả thực nghiệm để thấy được ưu điểm nổi trội của bộ nghịch lưu H-NPC-3L.

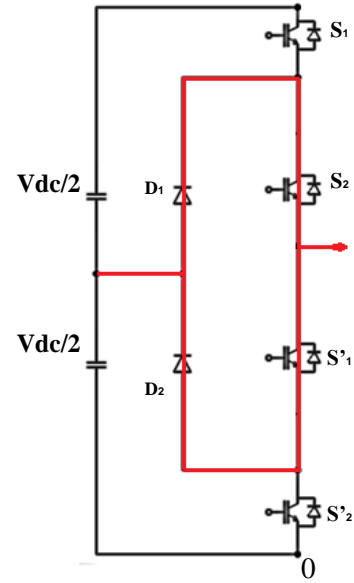
Nội dung tiếp theo của bài báo gồm các phần chính:

- phân tích điện áp và mô hình hoá bộ nghịch lưu
- Trình bày kỹ thuật PWM
- kết quả thực nghiệm và thảo luận
- đánh giá kết quả thực nghiệm
- kết luận.

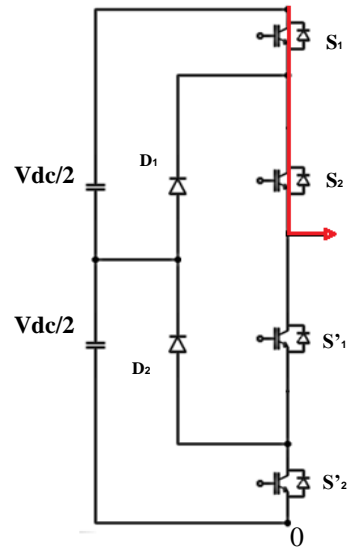
II. PHÂN TÍCH ĐIỆN ÁP BỘ NGHỊCH LƯU H-NPC-3L

Do nhánh H-NPC-3L chứa 2 cặp khóa S_1, S_2 nên nó có thể tối đa 4 trạng thái làm việc. Ngoại trừ trạng thái $S_1 S_2 = 10$ gây ra ngắn mạch nguồn DC nên không được phép sử dụng, các trạng thái còn lại của cặp khóa $S_1 S_2$ gồm 11,01 và 00 được mô tả trên hình 2.

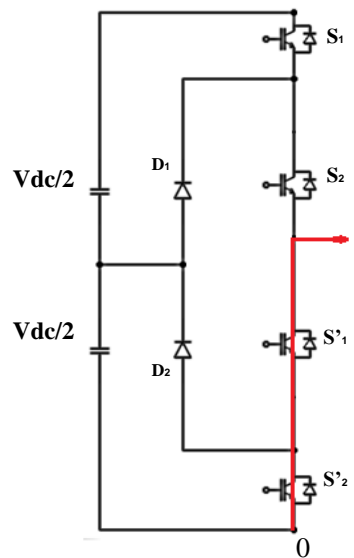
Gọi $U_{S_1}, U_{S_2}, U_{S'_1}, U_{S'_2}$ là các điện áp trên các khóa tương ứng S_1, S_2, S'_1, S'_2 .



(a)



(b)



(c)

Hình 2: Trạng thái hoạt động mạch một nhánh của bộ nghịch lưu H-NPC-3L

Trạng thái (11): $S_1 = S_2 = 1$, biểu diễn ở hình 2a. Ta có:

$$\begin{cases} U_{S_1} = 0, U_{S'_1} = \frac{V_{dc}}{2} \\ U_{S_2} = 0, U_{S'_2} = V_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

$$v_{A0} = 0$$

Trạng thái (01): $S_1 = 0, S_2 = 1$, biểu diễn ở Hình 2b. Ta có:

$$\begin{cases} U_{S_1} = \frac{V_{dc}}{2}, U_{S'_1} = 0 \\ U_{S_2} = 0, U_{S'_2} = \frac{V_{dc}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

$$v_{A0} = \frac{V_{dc}}{2}$$

Trạng thái (00): $S_1 = 0, S_2 = 0$, biểu diễn ở Hình 2c, ta có:

$$\begin{cases} U_{S_1} = V_{dc}, U_{S'_1} = 0 \\ U_{S_2} = \frac{V_{dc}}{2}, U_{S'_2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$v_{A0} = 0$$

Từ kết quả phân tích, ta thấy các linh kiện (S_1, S'_2) nối đến các đầu nguồn DC chịu áp cực đại bằng V_{dc} , các linh kiện (S_2, S'_1) nối đến điểm trung tính nguồn DC chịu áp cực đại bằng $\frac{V_{dc}}{2}$

Phân tích điện áp ngõ ra bộ nghịch lưu H-NPC-3L trên hình 1, ta có:

$$\begin{cases} v_{A0} = (S_1 + S_2) \frac{V_{dc}}{2} \\ v_{B0} = [(1 - S_3) + (1 - S_4)] \frac{V_{dc}}{2} \end{cases} \quad (4)$$

Với V_{dc} , là điện áp nguồn DC và S_1, S_2, S_3, S_4 lần lượt là các trạng thái đóng ngắt các khoá IGBT S_1, S_2, S_3, S_4 .

Ở bộ nghịch lưu H-NPC-3L hoạt động theo phương thức đóng ngắt đối nghịch như sau:

$$S_x = -S'_x \quad (5)$$

Điều kiện $0 \leq S_1 \leq S_2 \leq 1$ và $0 \leq S_3 \leq S_4 \leq 1$

Điện áp tải:

$$v_t = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4) \frac{V_{dc}}{2} - V_{dc} \quad (6)$$

Từ (6) ta được kết quả như sau:

BẢNG 1. TRẠNG THÁI ĐÓNG NGẮT CÁC KHOÁ IGBT TRÊN CẤU HÌNH BỘ NGHỊCH LƯU H-NPC-3L

Trạng thái	S1	S2	S3	S4	v_t
1	1	1	1	1	V_{dc}
2	0	1	1	1	$V_{dc}/2$
3	1	1	0	1	$V_{dc}/2$

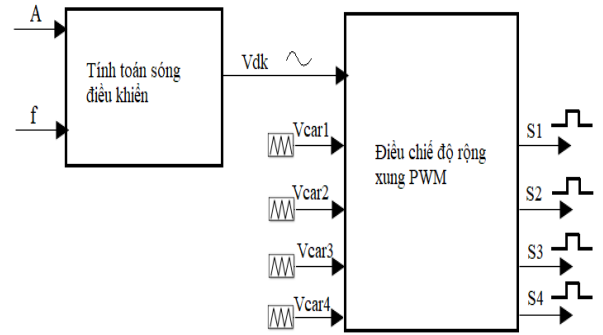
4	0	0	1	1	0
5	0	1	0	1	0
6	1	1	0	0	0
7	0	0	0	1	$-V_{dc}/2$
8	0	1	0	0	$-V_{dc}/2$
9	0	0	0	0	$-V_{dc}$

Quan hệ giữa điện áp ngõ ra theo các trạng thái đóng ngắt các khoá bán dẫn S_1, S_2, S_3, S_4 được liệt kê đầy đủ trên Bảng 1. Bộ nghịch lưu H-NPC-3L có 9 trạng thái đóng ngắt, có thể đạt 5 mức điện áp tải khác nhau ($-V_d, -V_d/2, 0, +V_d/2, +V_d$).

Dựa vào bảng trạng thái kỹ thuật điều khiển bộ nghịch lưu H-NPC-3L bằng phương pháp điều chế độ rộng xung sóng mang sẽ được phân tích ở phần tiếp theo.

III. KỸ THUẬT PWM ĐIỀU KHIỂN CHO BỘ NGHỊCH LƯU H-NPC-3L

3.1 Kỹ thuật điều chế độ rộng xung PWM



Hình 3: Nguyên lý điều chế độ rộng xung PWM

Kỹ thuật PWM mô tả ở hình 3 sử dụng sóng điều khiển V_{dk} có dạng sin so sánh với các sóng mang $V_{car1}, V_{car2}, V_{car3}, V_{car4}$ tạo ra giản đồ kích đóng các khóa công suất trong mạch.

Kỹ thuật PWM có phần đơn giản hơn kỹ thuật điều chế vector không gian.

Phương trình áp điều ở kỹ thuật điều chế PWM là:

$$v_{dk} = 1 + \frac{V_m \sin \theta}{V_d} \quad (7)$$

$$v_{dk} = 1 + m \sin \theta \quad (8)$$

Với: m là chỉ số điều chế được định nghĩa bằng phương trình (9)

$$m = \frac{V_m}{V_{dc}} \quad (9)$$

V_m là biên độ áp tải yêu cầu.

3.2 Các kỹ thuật PWM điều khiển cho bộ nghịch lưu H-NPC-3L

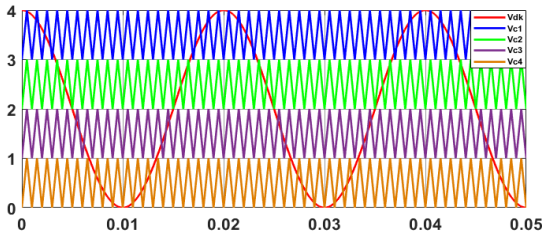
Mô hình giảng dạy thực hiện ba kỹ thuật PWM điều khiển cho cấu hình bộ nghịch lưu H-NPC-3L. Các kỹ thuật PWM này dễ dàng thực hiện trên bảng

phương pháp lập trình trực tiếp trên vi điều khiển STM32F411. Ngoài ra sinh viên có thể thực hiện phương pháp những.

a) Kỹ thuật PD-PWM (Phase Disposition)

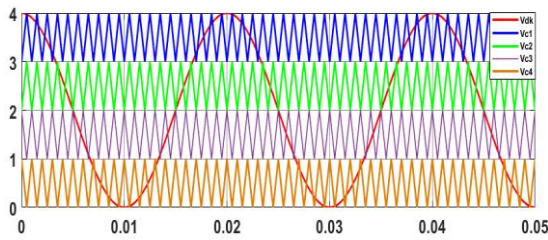
Do nghịch lưu cầu H-NPC-3L tạo nên 5 mức điện áp khác nhau, có thể sử dụng kỹ thuật dịch biên của 5 sóng mang tam giác để thực hiện. Ví dụ, nếu kỹ thuật PD ở hình 4 sử dụng 5 trạng thái 1, 3, 6, 8, 9 ở bảng 1 thì tổ hợp 4 sóng mang đồng pha sẽ được chọn theo điều kiện:

$$4 \geq v_{c1} \geq 3 \geq v_{c2} \geq 2 \geq v_{c3} \geq 1 \geq v_{c4} \geq 0$$



Hình 4. Sóng mang so sánh với sóng điều khiển dùng trong kỹ thuật điều khiển PD-PWM với tần số sóng mang $f_c = 5(\text{kHz})$ và chỉ số điều chế $m = 1$

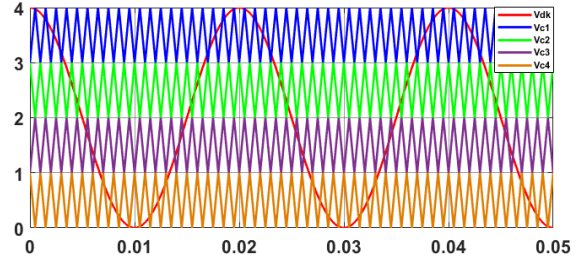
b) Kỹ thuật POD-PWM (Phase Opposition Disposition)



Hình 5. Dạng sóng mang so sánh với sóng điều khiển dùng trong kỹ thuật điều khiển POD-PWM với tần số sóng mang $f_c = 5(\text{kHz})$ và chỉ số điều chế $m = 1$

Với kỹ thuật POD ở hình 5 dùng 4 sóng mang với hai sóng V_{c1} , V_{c2} cùng biên độ và cùng tần số, cùng pha nhau và bố trí đối xứng với hai sóng V_{c3} , V_{c4} qua trục 2.

c) Kỹ thuật APOD-PWM (Alternative Phase Opposition Disposition)



Hình 6. Dạng sóng mang so sánh với sóng điều khiển dùng trong kỹ thuật điều khiển APOD-PWM với tần số sóng mang $f_c = 5(\text{kHz})$ và chỉ số điều chế $m = 1$

Với kỹ thuật APOD dùng 4 sóng dạng tam giác bố trí dịch pha 180 độ như hình 6.

Phương trình áp điều khiển của kỹ thuật PWM có thể thiết lập theo chỉ số điều chế m (9) như sau:

$$v_{dk} = 2 + \frac{V_m \sin \theta}{V_d / 2} = 2(1 + \frac{V_m}{V_d} \sin \theta) \quad (10)$$

$$v_{dk} = 2(1 + m \sin \theta) \quad (11)$$

IV. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

4.1 Độ méo dạng sóng hài

Độ méo dạng sóng hài điện áp (THDU)

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (12)$$

Độ méo dạng hài dòng điện (THDI)

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (13)$$

Với U_n , I_n là trị hiệu dụng điện áp và dòng điện sóng hài bậc n .

U_1 , I_1 là trị hiệu dụng điện áp và dòng điện bài cơ bản

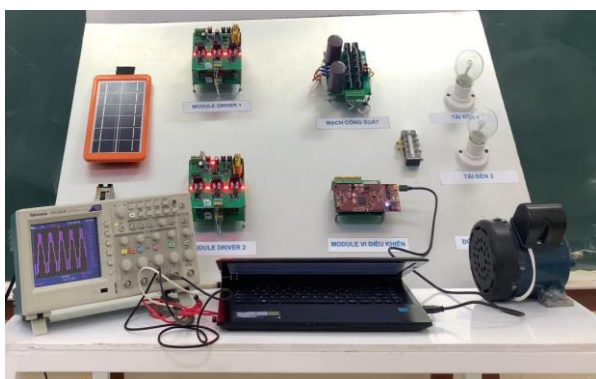
4.2 Chỉ tiêu đánh giá mô hình giảng dạy thực nghiệm

Mục tiêu đặt ra cho mô hình giảng dạy thực nghiệm là:

- Rèn luyện thao kỹ năng lập trình code cho sinh viên
- Thực hành kỹ năng điều chế độ rộng xung PWM, đo kiểm tra kết quả thực nghiệm so với mô phỏng
- Đánh giá được các kết quả nghiên cứu của sinh viên bằng kết quả thực nghiệm trên mô hình.

Sau đây là kết quả thực hiện mô hình

4.3 Tổng quan mô hình giảng dạy thực nghiệm bộ nghịch lưu H-NPC-3L

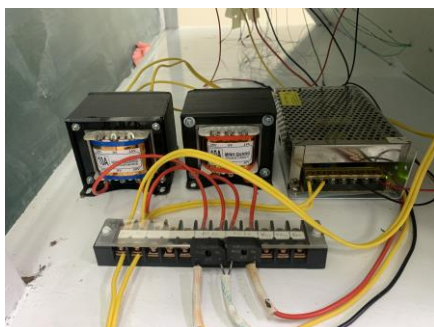


Hình 7. Bộ nghịch lưu cầu H-NPC-3L điều khiển động cơ không đồng bộ 1 pha

Mô hình thực nghiệm bộ nghịch lưu một H-NPC-3L được thể hiện trên hình 7 được thiết kế các module rời để lắp đặt và dễ thực hiện các kỹ năng đo kiểm. Kết quả thực nghiệm khảo sát các quá trình hoạt động cũng như đặc tính của bộ nghịch lưu H-NPC-3L tương ứng các kỹ thuật điều chế sóng mang PWM khác nhau.

Bộ nghịch lưu H-NPC-3L gồm các phần chính:

a) Nguồn DC



Hình 8. Khối nguồn chỉnh lưu AC-DC

Trong thực nghiệm này sử dụng 2 biến áp ở hình 8 có thông số biến áp 220V/60V qua chỉnh lưu tạo ra 2 nguồn DC có giá trị 120V. Nguồn này có thể thay thế bằng nguồn acquy, nguồn từ pin năng lượng mặt trời (PV).

b) Khối vi điều khiển



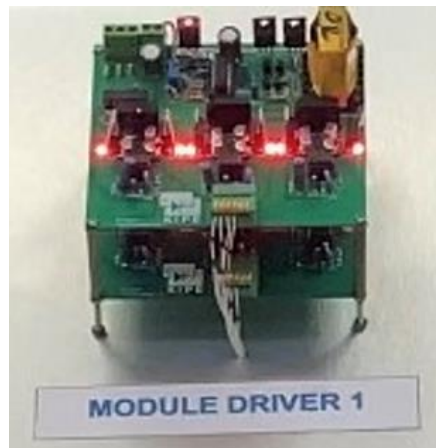
Hình 9. Vi điều khiển TMS32F411

Khối vi điều khiển hình 9 có khả năng xuất xung tốc độ cao điều khiển bộ driver. Có thể thực hiện

nhiều kỹ thuật PWM trên bộ kit này bằng phần mềm CCS V10.2.0.

Ngoài ra STM32F411 còn tích hợp tính năng giao tiếp với biến trở, màn hình cảm ứng do đó các mô hình thực nghiệm hiện nay thường được xem xét sử dụng vi điều khiển này.

c) Khối Driver



Hình 10. Mạch Driver

Mạch Driver ở hình 10 có chức năng chuyển đổi tín hiệu điều khiển từ mức 3.3V của STM32F411 sang $\pm 15V$ để kích cho các IGBT ở mạch công suất hình 11.

Mạch Driver đã thiết kế dead-time để tránh hiện tượng trùng dẫn trên 2 IGBT đối nghịch.

d) Khối công suất



Hình 11. Mạch công suất

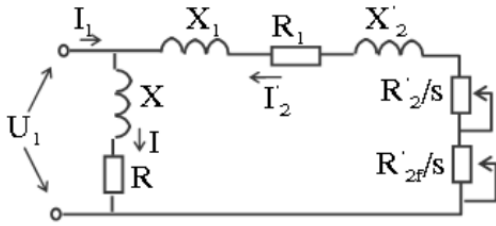
Mạch công suất ở hình 11 gồm 8 IGBT và 4 diode nhanh ghép theo dạng cầu H diode kẹp 3 bậc. Mạch có chức năng chuyển đổi điện áp DC thành điện áp AC với các giá trị tần số và biên độ điện áp như mong muốn.

e) Tải đèn và tải động cơ

Ở mô hình thực nghiệm sử dụng hai loại tải khác nhau để xem xét đặc tính khi bộ nghịch lưu H-NPC-3L hoạt động trên nó.

Trước tiên đó là tải đèn. Ở đây mô hình sử dụng 2 đèn sợi đốt có công suất 100W mỗi đèn.

Động cơ sử dụng trong thực nghiệm là động cơ không đồng bộ một pha có công suất 125W. Đặc tính của động cơ được thể hiện ở sơ đồ tương đương như hình 12.



Hình 12: sơ đồ thay thế của động cơ không đồng bộ 1 pha

Với:

U_1 là trị số hiệu dụng của điện áp pha stato (V).

I_1, I_2 là dòng stato, mạch từ hóa (A).

X_1, X_2' là điện kháng stato

R_1, R_2' là điện trở stato

R_2' là điện trở phụ

s là hệ số trượt của động cơ

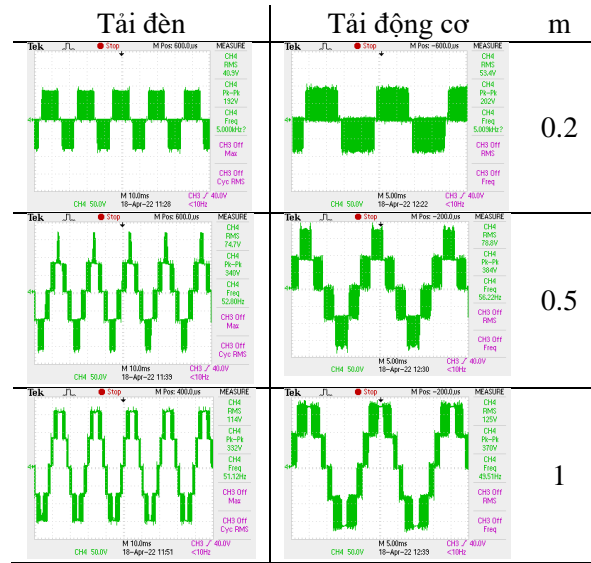
f) Thông số thực nghiệm

Các thông số thực nghiệm được lấy ở Bảng 3. Thông số được sử dụng cho cả nghịch lưu H-NPC-3L và H-2L

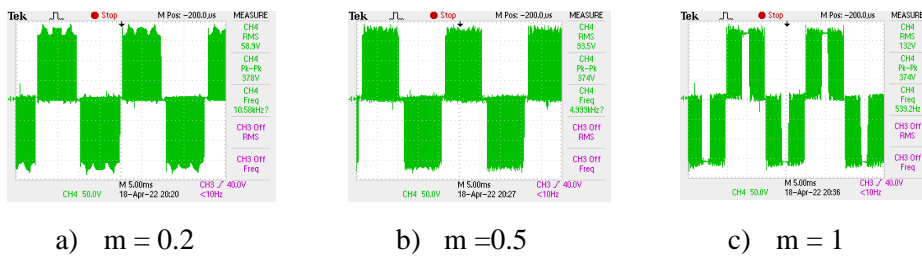
BẢNG 3. THÔNG SỐ THỰC NGHIỆM TRÊN CẤU HÌNH BỘ NGHỊCH LƯU H-NPC-3L

Tên gọi	Ký hiệu	Độ lớn	Đơn vị
Điện áp nguồn DC	V_{dc}	120	V
Tần số cơ bản	f	50	Hz
Giá trị tụ	C	3300	μF
Công suất động cơ	P	125	W
Công suất đèn	P	200	W

Cuối cùng là phân tích những kết quả đo được từ máy đo dạng sóng Tektronix TDS2024C 4 kênh.



Hình 13: Sóng điện áp ngõ ra bộ nghịch lưu H-NPC-3L tần số sóng mang $f=5kHz$

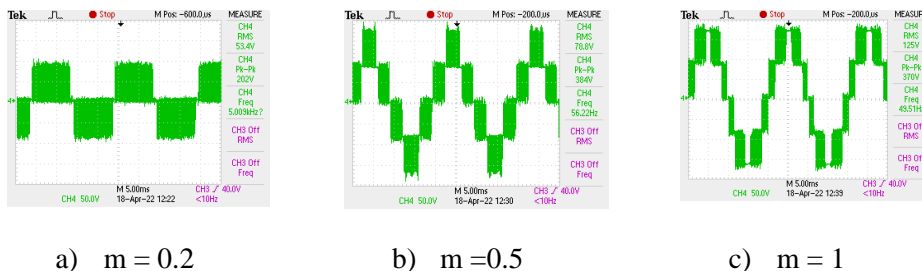


a) $m = 0.2$

b) $m = 0.5$

c) $m = 1$

Hình 14: Dạng sóng điện áp ngõ ra bộ nghịch lưu H-2L thực nghiệm với tải động cơ



a) $m = 0.2$

b) $m = 0.5$

c) $m = 1$

Hình 15: Dạng sóng điện áp ngõ ra bộ nghịch lưu H-NPC-3L thực nghiệm với tải động cơ

Tần số sóng mang $f_c = 5kHz$

Tải động cơ công suất

$P = 125W$

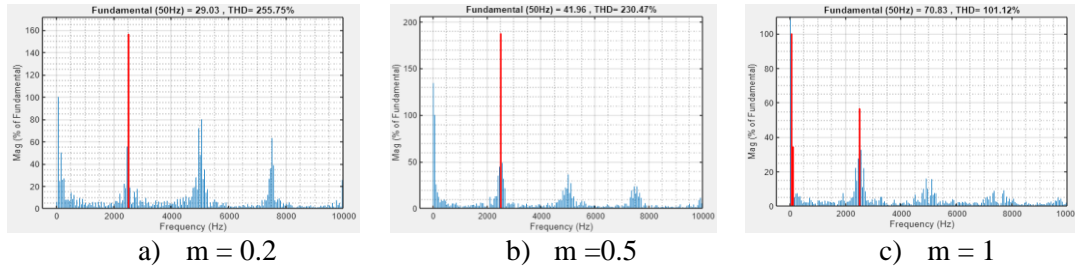
Nguồn DC = 120V

Tần số sóng mang $f_c = 5kHz$

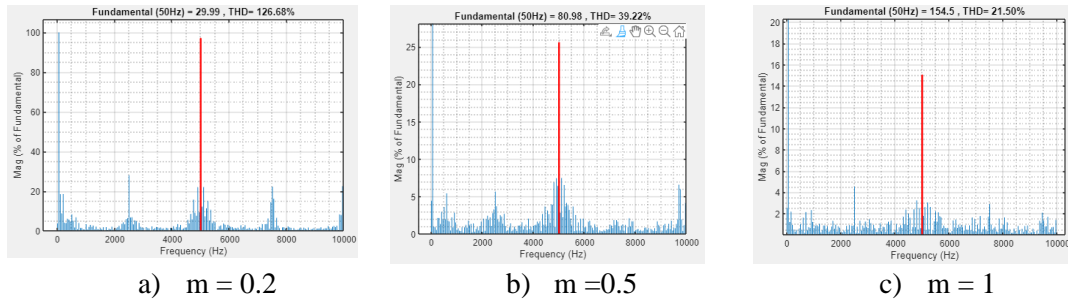
Tải động cơ công suất

$P = 125W$

Nguồn DC = 120V



Hình 13: Kết quả phân tích sóng hài điện áp của bộ nghịch lưu cầu H-2L ở tải đèn



Hình 17: Kết quả phân tích sóng hài điện áp của bộ nghịch lưu cầu H-NPC-3L ở tải đèn

Hình 13 là dạng sóng điện áp ngõ ra bộ nghịch lưu H-NPC-3L với tần số sóng mang $f_c = 5\text{kHz}$ và được khảo sát trên cả tải đèn và tải động cơ. Ở chỉ số điều chế thấp $m = 0.2$ thì điện áp có dạng 2 bậc nhưng khi ở chỉ số điều chế $m = 0.5$ đến chỉ số điều chế $m = 1$ thì điện áp bắt đầu có dạng đa bậc.

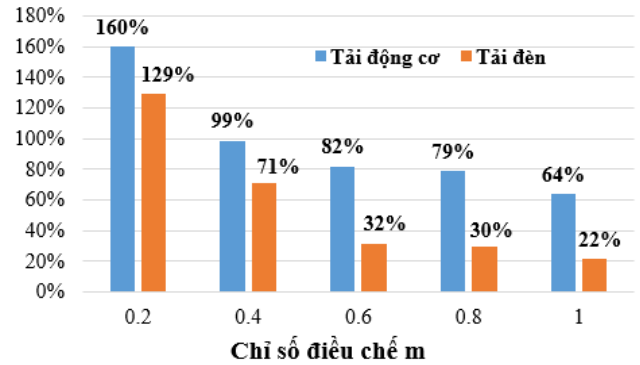
Hình 14 và 15 lần lượt mô tả dạng sóng điện áp ngõ ra của bộ nghịch lưu H-2L và H-NPC-3L. Có thể dễ nhận ra sự khác biệt ở hai cấu hình H-2L và H-NPC-3L vì ở chỉ số điều chế cao $m = 1$ hay chỉ số thấp $m = 0.2$ thì cấu hình H-2L vẫn cho điện áp ngõ ra ở dạng 2 bậc. Điện áp đặt lên linh kiện chỉ thay đổi giữa 3 mức $+V_{dc}$, 0 , $-V_{dc}$. Mặc khác ở cấu hình H-NPC-3L có điện áp ngõ ra thay đổi ở 5 mức điện áp $+V_{dc}$, $+V_{dc}/2$, 0 , $-V_{dc}/2$, $-V_{dc}$. Do đó điện áp đặt trên linh kiện ở cấu hình H-NPC-3L được chia nhỏ dẫn đến việc thiết kế cho mạch công suất H-NPC-3L không cần sử dụng IGBT có ngưỡng chịu điện áp cao.

Phân tích THDu% ở hai cấu hình H-2L và H-NPC-3L như hình 16 và 17 có thể thấy rõ sự khác biệt về chất lượng THDu%. Cụ thể ở chỉ số điều chế $m = 0.2$ thì H-2L có THDu% = 255.75% trong khi H-NPC-3L có THDu% = 126.68%. Đặc biệt ở chỉ số điều chế cao $m = 1$ thì cấu hình H-2L có THDu% = 101.12% cao hơn gần 5 lần so với H-NPC-3L có THDu% = 21.5%.

Phân tích THDu% khi bộ nghịch lưu H-NPC-3L hoạt động trên hai loại tải khác nhau cũng được khảo sát ở hình 18.

Có thể thấy khi hoạt động ở tải đèn hay tải động cơ thì giá trị THDu% của bộ nghịch lưu H-NPC-3L cũng rất thấp so với H-2L. Nhưng rõ ràng ở tải đèn khi hoạt động giá trị THDu% có phần thấp hơn so với tải động

cơ. Cụ thể ở chỉ số điều chế $m=1$ thì tải đèn có THDu% = 22% còn tải động cơ THDu% = 64%. Điều này chứng minh rằng tính chất của từng loại tải cũng ảnh hưởng nhất định đến chất lượng ngõ ra của bộ nghịch lưu.



Hình 18: Biểu đồ phân tích THDu% trên cấu hình H-NPC-3L

Thực nghiệm cho thấy kết quả gần giống với lý thuyết tính toán nhưng dạng sóng bị nhiễu nhiều, nguyên nhân phần lớn do phần cứng không đáp ứng đầy đủ yêu cầu kỹ thuật. Tính toán coi tất cả các linh kiện đều lý tưởng và không có tổn hao, số linh kiện được sử dụng trong phần cứng của bộ nghịch lưu áp một pha cầu H-NPC-3L nhiều nên việc tổn hao và nhiễu tín hiệu điều khiển là không thể tránh khỏi.

V. KẾT LUẬN

Bài báo này đã trình bày mô hình giảng dạy thực nghiệm bộ nghịch lưu H-NPC-3L sử dụng kỹ thuật điều khiển PWM. Nguyên lý hoạt động, lý thuyết kỹ thuật PWM sóng mang đã được trình bày và thực hiện trên mô hình cho ra kết quả tương đồng với tính toán. Bộ nghịch lưu áp H-NPC-3L giảm một nửa điện áp dv/dt trên linh kiện kết quả giảm stress áp ngõ ra. Chất lượng ngõ ra của cấu hình H-NPC-3L và H-2L bằng kỹ thuật PWM được đánh giá qua chỉ số méo dạng sóng hài áp ngõ ra theo chỉ số điều chế. Phân tích chi tiết cho thấy, mô hình thực nghiệm đáp ứng được nhu cầu thực nghiệm của sinh viên, chất lượng điện áp ngõ ra và dòng điện tuy còn nhiều nhưng đã đảm bảo vận cho tải đèn và tải động cơ không đồng bộ một pha.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] W. Li, Y. Gu, H. Luo, W. Cui, X. He and C. Xia, Topology Review and Derivation Methodology of Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters for Leakage Current Suppression, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 7, pp. 4537-4551, July 2015
- [2] R. Ri *et al.*, Comparative analysis of different transformer-less inverter topologies for Grid-tied Photovoltaic, *Int. Conf. Adv. Electr. Eng. (ICAEE)*, vol. 5th, 2019.
- [3] Kamran Zeb et al, A Review on Recent Advances and Future Trends of Transformerless Inverter Structures for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems, *Energies* 2018, 11, 1968
- [4] Tan Kheng Suan Freddy, Nasrudin A. Rahim, Wooi-Ping Hew, and Hang Seng Che, Comparison and Analysis of Single-Phase Transformerless Grid-Connected PV Inverters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 10, October 2014
- [5] Roberto González, Eugenio Gubía, Jesús López, and Luis Marroyo, Transformerless Single-Phase Multilevel-Based Photovoltaic Inverter, 2694 *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 7, July 2008
- [6] C. Buccella, M. G. Cimatori, 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, doi: 10.1109/IECON.2019.8927243.
- [7] C. A. Rojas, S. Kouro, D. Edwards, B. Wu, and S. Rivera, Five-level H-bridge NPC central photovoltaic inverter with open-end winding grid connection, *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 4622–4627, 2014, doi: 10.1109/IECON.2014.7049199.
- [8] M. Ahmad, A. K. Jha, S. Jana, and K. Kumar, Simulation and performance analysis of a grid connected multilevel inverter considering either battery or solar PV as DC input sources, 3rd *IEEE Int. Conf.*, vol. 1, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1109/CIAC.2017.7977336.