

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

KHOA: CƠ - ĐIỆN

BỘ MÔN ĐIỆN KHÍ HÓA



BÁO CÁO HỌC THUẬT

Tên đề tài:

**“ĐÁNH GIÁ CẤU TRÚC BỘ CHUYỂN ĐỔI DC/AC CỦA HỆ THỐNG
ĐIỆN MẶT TRỜI MỘT PHA ĐẢM BẢO TIÊU CHUẨN KẾT NỐI VỚI LƯỚI
ĐIỆN HẠ ÁP ”**

Người biên soạn: TS. Đỗ Đức Thành

Hà Nội, 6-2026

Khoa Cơ-Điện

Bộ môn Điện khí hóa

BÁO CÁO HỌC THUẬT NĂM 2026

Người soạn: TS. Đỗ Đức Thành

Tên đề tài:

“Đánh giá cấu trúc bộ chuyển đổi DC/AC của hệ thống điện mặt trời một pha đảm bảo tiêu chuẩn kết nối với lưới hạ áp”

1. Tổng quan tình hình nghiên cứu và ngoài nước thuộc lĩnh vực của đề tài

*** Nghiên cứu trong nước:**

Các nghiên cứu tập trung vào đặc điểm vận hành của các bộ chuyển đổi DC/AC của hệ thống điện mặt trời áp mái công suất nhỏ đảm bảo tiêu chuẩn kết nối với lưới điện hạ áp [1-3]. Các khía cạnh được quan tâm là mức độ sóng hài phát vào lưới, tính toán lựa chọn bộ lọc phù hợp, tối đa hóa lượng công suất vào hệ thống, dòng điện rò,... Thông qua mô hình mô phỏng có thể dự đoán được ảnh hưởng của sự thay đổi các tham số cấu trúc hoặc cấu hình bộ chuyển đổi [3]. Việc giảm dòng điện rò được thực hiện thông qua các giải pháp triệt tiêu hoặc hạn chế thành phần nhiễu không đối xứng [4-7]. Hơn nữa, hiệu quả của bộ lọc sóng hài cũng phụ thuộc vào đặc tính nguồn nhiễu tương ứng với các cấu trúc khác nhau của bộ chuyển đổi [3], [6]. Đặc biệt là việc khảo sát hiệu quả giảm sóng hài của bộ lọc đầu ra với các mô hình bộ chuyển đổi DC/AC điện mặt trời quy mô nhỏ chưa được quan tâm thích đáng.

*** Nghiên cứu ngoài nước:**

Hiện nay, đã có rất nhiều tác giả công bố nhiều công trình, bài báo liên quan đến nguồn điện mặt trời áp mái kết nối với lưới điện hạ áp 220V [4-7]. Đặc biệt là do đặc điểm của cấu trúc nguồn năng lượng mặt trời không có máy biến áp (transformer-less topology) kết nối trực tiếp với lưới xuất hiện nhiều vấn đề trong quá trình thiết kế và vận hành hệ thống. Các cấu trúc phổ biến đã được đề xuất và nghiên cứu kiểm nghiệm như H5, HERIC, H6 do hãng sản xuất SMA, Sunways, Integram đề xuất tương ứng [4]. Nguyên lý cơ bản là giữ cho thành phần điện áp không đối xứng không đổi trong quá trình chuyển mạch của các van. Kết quả suy giảm dòng điện rò đã được kiểm chứng trong tài liệu [4] cho dải tần số âm thanh. Nhưng với dải tần số sóng hài (dưới 2kHz) vẫn chưa được khảo sát cụ thể [3]. Do đó, cần khảo sát chi tiết hơn về ảnh

hường của các dạng cấu trúc này đến việc đảm bảo tiêu chuẩn sóng hài điện áp và dòng điện rò khi kết nối lưới điện hạ áp.

2. Tính cấp thiết của đề tài

Vấn đề kết nối nguồn năng lượng điện mặt trời áp mái với dải công suất nhỏ phải đáp ứng một số yêu cầu kỹ thuật chung như chất lượng sóng hài điện áp và tiêu chuẩn dòng điện rò [8]. Theo chỉ thị số 20/CT-TTg [9] của Thủ tướng chính phủ đến năm 2030 yêu cầu 50% hộ tiêu thụ điện phải lắp đặt điện mặt trời áp mái. Các cấu trúc bộ biến đổi DC/AC một pha kết nối lưới trực tiếp sử dụng phương pháp chế độ rộng xung PWM có thể là nguồn gây nhiễu lớn ảnh hưởng đến chế độ làm việc bình thường của lưới điện hạ áp. Do đó, đề tài nghiên cứu đánh giá các bộ biến đổi và tính toán lựa chọn thông số bộ lọc sóng hài của bộ biến đổi nguồn năng lượng mặt trời có ý nghĩa lý luận và áp dụng thực tiễn.

3. Mục tiêu nghiên cứu của đề tài

- Cấu trúc bộ chuyển đổi DC/AC nguồn năng lượng mặt trời một pha công suất nhỏ.
- Đặc tính vận hành của các bộ chuyển đổi và thông số bộ lọc sóng hài phù hợp cho khi kết nối với lưới điện hạ áp.

4. Nhiệm vụ nghiên cứu

- Tổng quan về nguồn năng lượng mặt trời áp mái một pha và bộ lọc sóng hài.
- Các cấu trúc điển hình của bộ biến đổi DC/AC một pha như H4, H5, HERIC, H6.
- Lựa chọn thông số bộ lọc sóng hài đảm bảo tiêu chuẩn kết nối lưới.

5. Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp lý thuyết: Nghiên cứu phân tích lý thuyết về đặc tính nhiễu dẫn.
- Phương pháp mô phỏng: kiểm chứng kết quả thông qua mô hình mô phỏng bằng phần mềm Matlab/Simulink.

6. Phạm vi và đối tượng nghiên cứu

- Phạm vi nghiên cứu: Bộ biến đổi nguồn năng lượng mặt trời công suất nhỏ.
- Đối tượng nghiên cứu: Đáp ứng của bộ lọc sóng hài với cấu trúc bộ biến đổi.

7. Nội dung nghiên cứu

7.1. Bộ lọc sóng hài và tiêu chuẩn kết nối lưới

7.1.1. Bộ lọc sóng hài

Chất lượng điện áp là một chỉ tiêu quan trọng trong chất lượng điện năng của hệ thống điện, bao gồm: độ lệch điện áp, độ không đối xứng, độ không sin,.. Trong đó, độ không sin của đường cong điện áp được đánh giá bởi chỉ tiêu độ méo sóng hài tổng THD.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_1} \cdot 100$$

trong đó: V_1 biểu thị thành phần điện áp cơ bản, V_i biểu thị thành phần điện áp hài riêng lẻ và n là giá trị lớn nhất của bậc hài xem xét (bậc 40, 2000 Hz).

Thông thường, một bộ lọc thông thấp (gọi là bộ lọc hài) được lắp đặt ở đầu ra của bộ biến tần làm giảm giá trị của tổng độ méo hài (THD) theo các giới hạn cụ thể [5], [8]. Việc lựa chọn thông số bộ lọc thông thường đã được nghiên cứu trong nhiều ấn phẩm [2], [3], [5], [11], [12]. Về nguyên tắc, các thông số bộ lọc được lựa chọn để đảm bảo chất lượng điện năng hoặc sự ổn định của hệ thống như dòng điện rò tối thiểu, hoặc điện áp gợn sóng, hoặc hệ số công suất đơn vị [5]. Các tham số bộ lọc được chọn để làm giảm dao động và tránh sự bất ổn trong quá trình vận hành hệ thống.

Trong lưới điện hạ thế, vấn đề chất lượng điện đóng vai trò quan trọng trong việc lắp đặt các thiết bị gia dụng hoặc các nguồn điện phân tán [8-11]. Phát xạ hài là một trong những tiêu chí chất lượng điện liên quan đến dải tần số thấp. Độ méo của các dạng sóng điện áp và dòng điện thường được xác định theo từng bậc hài riêng lẻ hoặc độ méo hài tổng (THD). Bên cạnh đó, dòng điện rò liên quan đến các tiêu chuẩn an toàn để tránh điện giật cũng được đề cập như một tiêu chí trong hướng dẫn lắp đặt. Giá trị căn bậc hai trung bình (RMS) của dòng điện rò được chỉ định trong nhiều tiêu chuẩn tùy thuộc vào loại thiết bị điện, mức điện áp, v.v. Việc kết nối các thiết bị PV quy mô nhỏ đi kèm với các thiết bị gia dụng cần phải tính đến những vấn đề này.

7.1.2. Tiêu chuẩn kết nối lưới

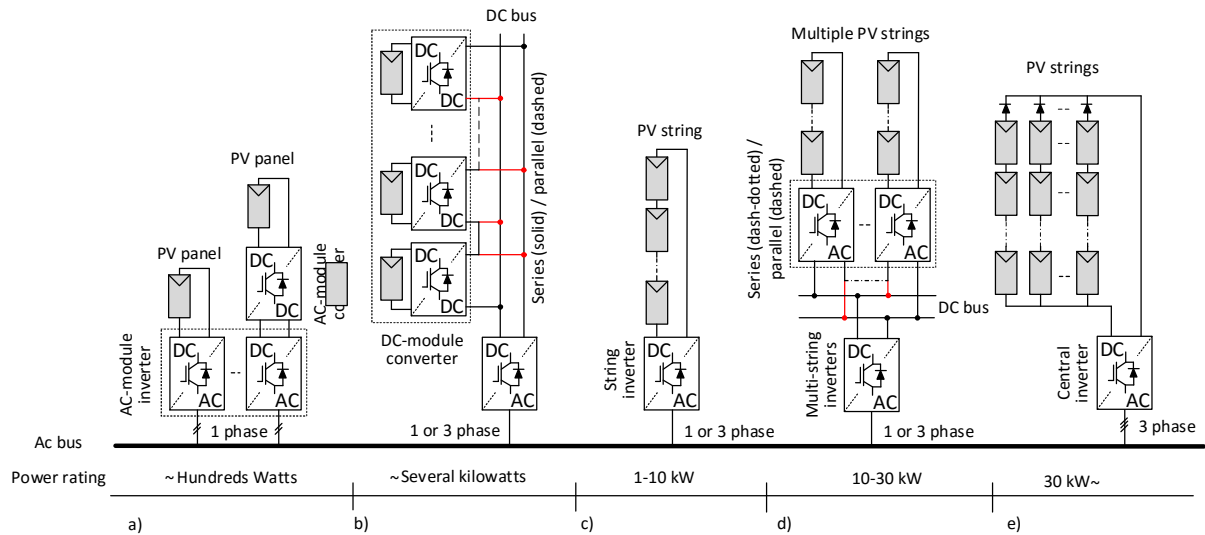
Nhiều tiêu chuẩn yêu cầu giá trị cụ thể của tiêu chuẩn méo hài tổng. Dựa trên các tiêu chuẩn IEC/IEEE, ví dụ EN 50160, THD_v của điện áp đầu ra bị giới hạn ở 8% điện áp định mức. Tương tự, giới hạn méo hài dòng điện của hệ thống PV là 5% dòng điện định mức. Kết quả thực tế của bộ biến tần PV quy mô nhỏ cho thấy THD_v của điện áp đầu ra bị giới hạn ở 3% (méo trung bình của Hà Lan). Vì vậy, cần có bộ lọc thông thấp (hay còn gọi là bộ lọc hài) để giảm THD_v tại điểm kết nối (PCC) theo các

giới hạn trên. Các tiêu chuẩn này có thể được sử dụng để chọn các giá trị tối ưu của bộ lọc thông thấp cho một điều kiện cụ thể [5].

7.2. Bộ biến đổi nguồn năng lượng mặt trời áp mái

7.2.1. Nguồn năng lượng mặt trời

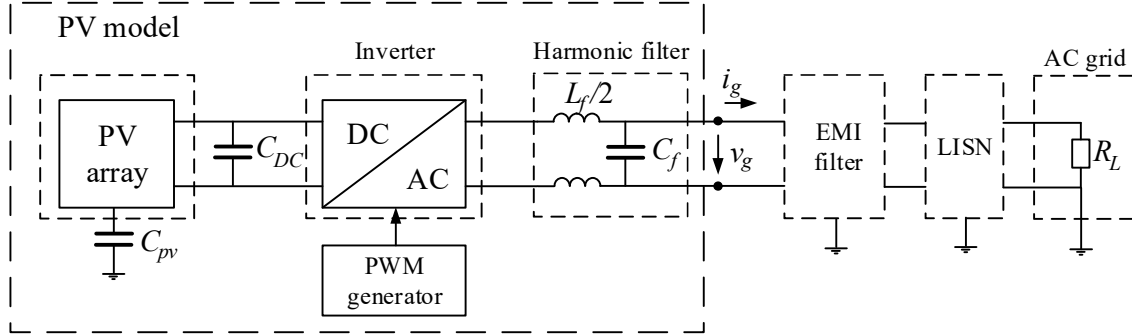
Hệ thống năng lượng mặt trời (Photovoltaic system - PV) có thể được phân loại thành hệ thống PV làm việc độc lập, hệ thống PV kết nối lưới điện và hệ thống lai [4], [7]. Đối với các bộ nguồn PV, công suất định mức thay đổi từ các hệ thống PV quy mô nhỏ (vài kW) đến các hệ thống PV lớn (vài trăm kW). Hệ thống PV một pha gồm một chuỗi tấm pin mặt trời PV gắn trên mái nhà có thể là lựa chọn tốt nhất cho lĩnh vực dân dụng (Hình 1) [7]. Một phần năng lượng mặt trời có thể cung cấp cho các phụ tải dân dụng như chiếu sáng, làm mát và các phụ tải gia dụng khác.



Hình 1. Tổng quan về bộ nguồn PV: a. Hệ thống nhỏ lẻ, b. Khu dân cư/hệ thống nhỏ lẻ, c. Khu dân cư, d. Khu dân cư/thương mại, e. Quy mô lưới/thương mại [7]

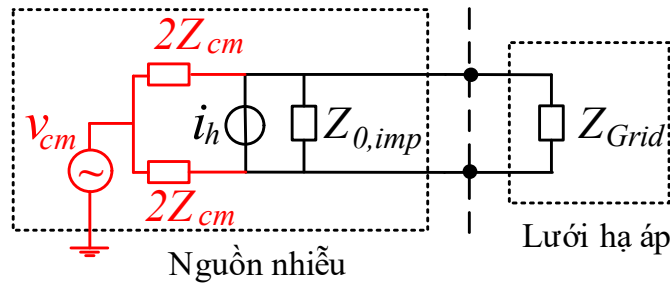
Hình 2 mô tả một ví dụ về các thiết bị PV quy mô nhỏ một pha [5]. Bộ biến đổi DC/AC là một liên kết chính giữa điện áp một chiều PV và lưới điện AC khi hệ thống PV được kết nối lưới điện. Sơ đồ điều khiển của bộ biến tần PV phải tuân theo tần số và điện áp của lưới điện LV bằng một vòng khóa pha và điện áp liên kết DC phải được kiểm soát để trích xuất công suất tối đa từ các tấm pin PV. Điều này có thể được thực hiện bằng thuật toán theo dõi điểm công suất cực đại (MPPT) theo đường cong I - V. Thông thường, thuật toán nhiễu loạn và quan sát (P & O) hoặc mạch gia tăng (IC) được sử dụng để tìm kiếm điểm công suất cực đại. Một bộ biến đổi được kết nối lưới

điện thông thường có thể sử dụng phương pháp điều chế độ rộng xung PWM và tần số điều chế trong phạm vi từ 2kHz đến 20kHz.



Hình 2. Cấu trúc mô hình nguồn năng lượng mặt trời PV [5]

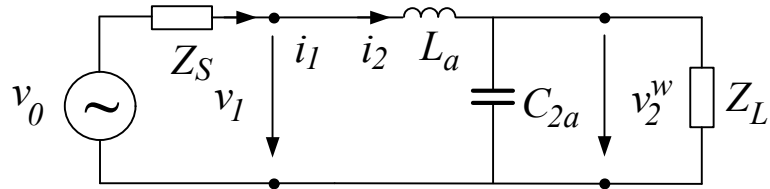
Khi các ứng dụng điện mặt trời kết nối với lưới điện hạ áp (Hình 3), đặc tính nhiễu sẽ được xem xét với 2 thành phần đối xứng (v_{dm}) và nhiễu không đối xứng (v_{cm}) [7]. Biểu thức xác định các thành phần nhiễu: $v_{dm} = v_{a0} - v_{b0}$ và $v_{cm} = (v_{a0} + v_{b0})/2$. Trong đó, v_{a0} và v_{b0} là điện áp các dây dẫn so với đất. Đối với thành phần nhiễu đối xứng, nguồn điện mặt trời có thể được xem xét như một nguồn dòng hài i_h (sơ đồ Norton). Giá trị nghịch đảo của tổng dẫn đầu ra ($Z_{0,imp}$) được xác định tùy theo các thông số cấu trúc của bộ biến đổi và bộ lọc sóng hài. Đối với thành phần nhiễu không đối xứng, sơ đồ Thévenin được sử dụng với nguồn nhiễu v_{cm} và tổng trở không đối xứng Z_{cm} . Tổng trở tương đương phía lưới Z_{Grid} được biểu diễn tương ứng với tổng trở đo lường tại vị trí kết nối. Do có sự tồn tại của thành phần nhiễu không đối xứng v_{cm} nên tồn tại một dòng điện khép mạch qua điện dung ký sinh của tấm pin PV và điểm nối đất của lưới hạ áp. Dòng điện này được gọi là dòng điện rò, giá trị của nó phụ thuộc lớn vào nguồn gây nhiễu v_{cm} .



Hình 3. Mô hình nhiễu của nguồn điện mặt trời [7]

Cấu trúc bộ lọc sóng hài gồm một số dạng điện hình như sau: chỉ có điện cảm (L), điện cảm và điện dung (LC, CL), sơ đồ hình π (CLC), chỉ có điện dung (C) và sơ đồ hình T (LCL) [3]. Đối với ứng dụng điện mặt trời một pha, bộ lọc gồm có một điện

cảm và một điện dung (LC) được sử dụng. Để có thể đánh giá hiệu quả bộ lọc nhiễu ở vị trí đầu ra bộ chuyển đổi, các thành phần đối xứng và không đối xứng của nhiễu tổng được phân tách riêng. Dựa trên khái niệm độ suy giảm nhiễu của đường truyền trước và sau khi bổ sung các bộ lọc có thể đánh giá hiệu quả của chúng theo thành phần cấu tạo của bộ lọc (Hình 4). Đối với bộ lọc sóng hài tổng quát cho nhiễu đối xứng DM, cấu trúc gồm điện cảm L và điện dung C được sử dụng phổ biến.

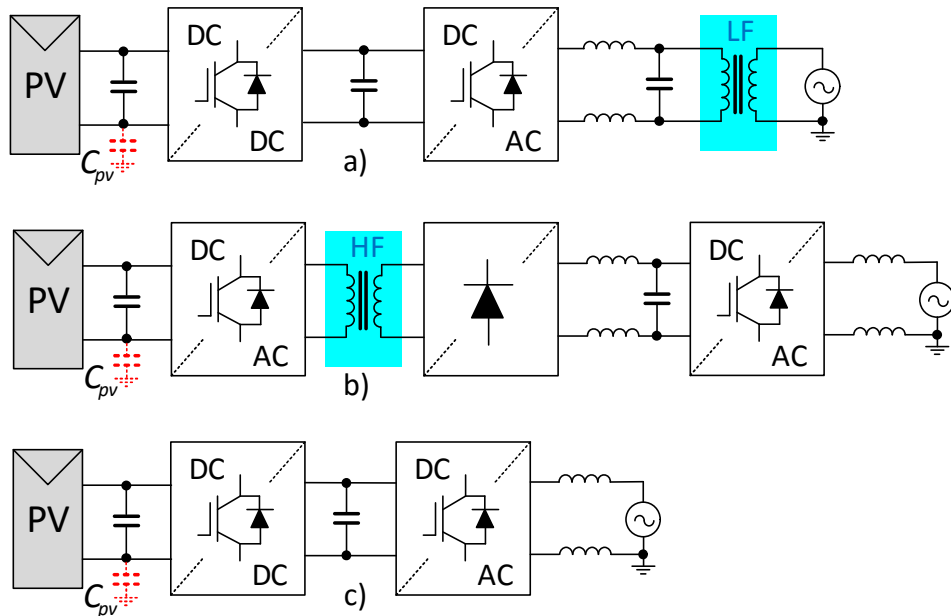


Hình 4. Mô hình tính toán độ suy giảm nhiễu [3]

7.2.2. Cấu trúc bộ biến đổi DC/AC một pha cổ điển

a. Cấu trúc bộ chuyển đổi

Các dạng cấu trúc phổ biến nguồn năng lượng PV công suất nhỏ được đưa ra trên Hình 5. Thông thường, có ba cấu hình hệ thống PV được áp dụng trong hướng dẫn lắp đặt có thể được tóm tắt là máy biến áp tần số thấp (Hình 5a), máy biến áp (HF) tần số cao (Hình 5b) và cấu trúc không có máy biến áp (Hình 5c) [4].



Hình 5. Cấu trúc bộ biến đổi: a. Máy biến áp tần số thấp, b. Máy biến áp tần số cao và c. Cấu trúc không có máy biến áp [4]

Máy biến áp tần số thấp (50/60Hz) của bộ biến đổi tiêu chuẩn với phương pháp PWM là một phần tử rất nặng và cồng kềnh. Vì vậy, cấu trúc này chỉ được sử dụng

trong hệ thống PV công suất cao như bộ biến đổi trung tâm [7]. Trong trường hợp cấu trúc biến áp tần số cao, trong khi sử dụng tần số chuyển mạch lớn hơn 20kHz, máy biến áp lõi ferit có thể là lựa chọn tốt hơn. Đối với các bộ biến đổi DC/AC trên mái nhà được kết nối với lưới điện dân dụng có công suất dưới 3kW, cấu trúc biến áp HF thường được ưu tiên [7].

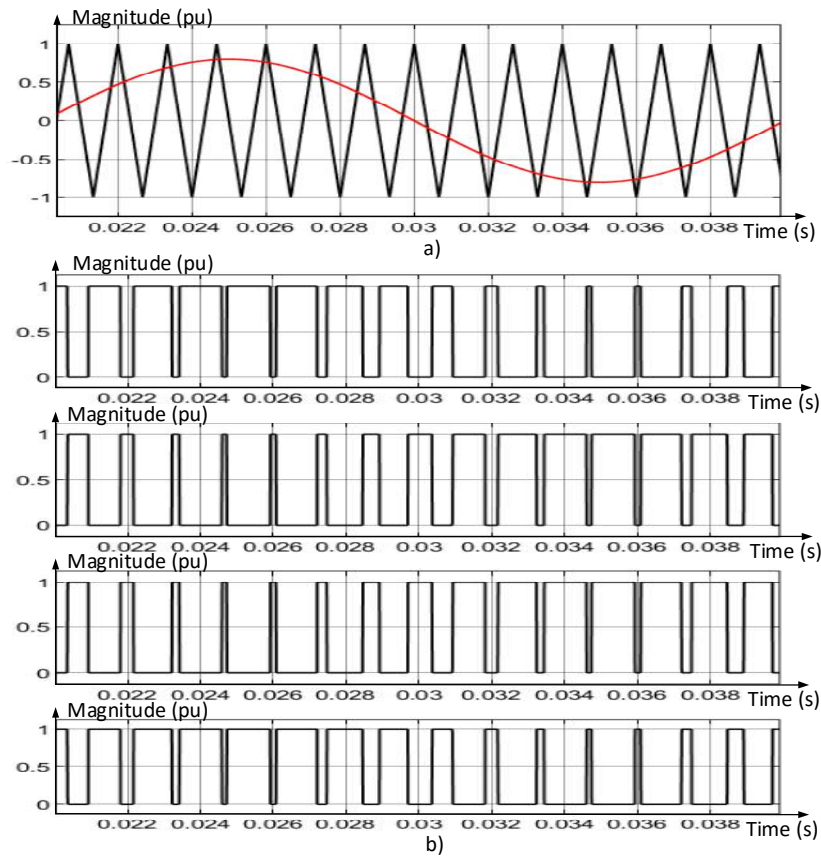
Do chi phí thấp hơn, kích thước/trọng lượng và hiệu suất cao, nên một cấu trúc không có máy biến áp cao tần được sử dụng cho các bộ chuyển đổi PV. Cấu trúc này thiếu sự cách ly về điện sẽ có một vấn đề lớn với dòng điện rò [4-7]. Sơ đồ PWM đơn cực của cấu trúc cầu toàn phần (Full-Bridge) thông thường có điện áp không đối xứng CM chỉ chứa các bội số lẻ của tần số sóng mang và sóng hài dải biên của chúng. Thông thường, có một số cấu trúc được đề xuất để giảm dòng điện rò [4]. Ý tưởng cơ bản là giữ điện áp chênh lệch không đối xứng CM không đổi trong quá trình chuyển mạch. Một số biện pháp khác nhau đã được sử dụng như phân tách DC khỏi phía AC và/hoặc nối kết điện áp không đối xứng trong thời gian tự do hoặc sử dụng cấu hình nối đất chung [4]. Do đó, cấu trúc FB với phương pháp điều chế PWM đơn cực là trường hợp mang lại hiệu quả kém nhất.

b. Cấu trúc cầu toàn phần (FB)

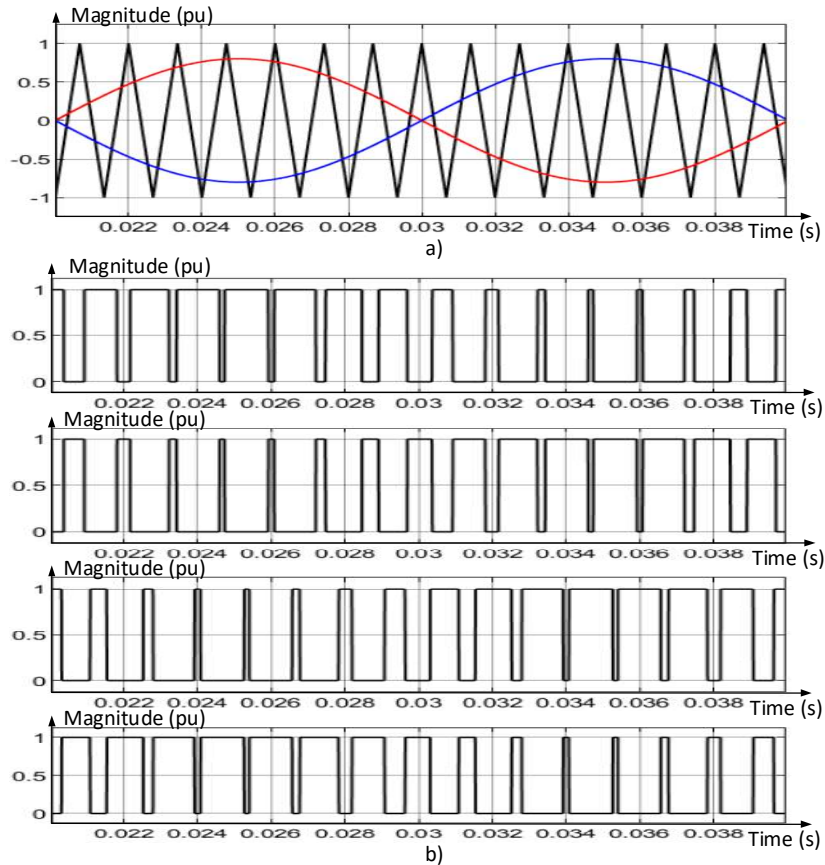
Đối với cấu trúc cầu toàn phần FB ứng dụng cho bộ biến đổi DC/AC, có 2 phương pháp điều chế cơ bản là phương pháp đơn cực (Unipolar) và phương pháp lưỡng cực (Bipolar). Hình 6a chỉ rõ phương pháp điều chế đơn cực, thời điểm đóng mở xung được xác định dựa trên điểm cắt của điện áp tựa hình sin với tín hiệu xung răng cưa. Tần số tín hiệu điều biến xung răng cưa hiển thị là 750Hz. Kết quả dạng thời gian hoạt động của các van bán dẫn ($S_1 - S_4$) được trình bày trên Hình 6b.

Tương tự như trên, quá trình điều chế tín hiệu với phương pháp lưỡng cực (Bipolar) được trình bày trên Hình 7. Dựa trên phân tích chuỗi fourier của tín hiệu điện áp đầu ra có thể đánh giá được nhiều thành phần đối xứng và không đối xứng của dạng tín hiệu điện áp đầu ra bộ biến đổi DC/AC.

Sơ đồ nguyên lý tạo xung điều khiển cho van bán dẫn được thực hiện trong phần mềm Matlab/Simulink. Cấu trúc cầu đầy đủ (H4) được sử dụng như mô hình tham chiếu khi xem xét về đặc tính vận hành của các bộ chuyển đổi dùng cho nguồn điện hệ thống mặt trời công suất nhỏ.

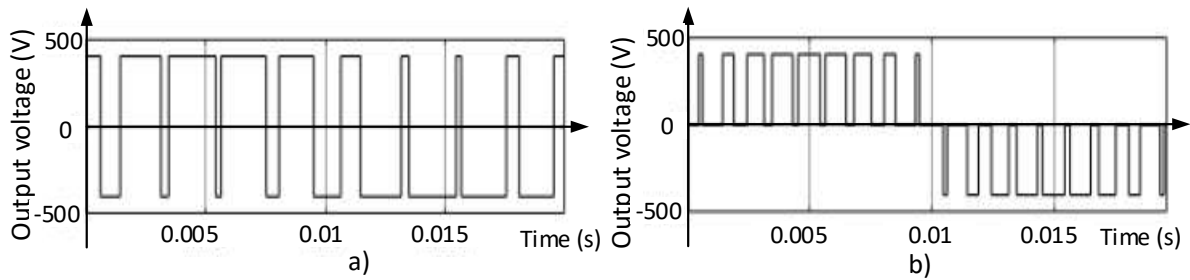


Hình 6. Kết quả dạng xung điện áp đơn cực: a. Điều chế tín hiệu và b. Xung đóng cắt



Hình 7. Kết quả dạng xung điện áp lưỡng cực: a. Điều chế tín hiệu và b. Xung đóng cắt

Kết quả dạng sóng điện áp đầu ra với tần số điều biến $f_c = 750$ Hz cho trên Hình 8a và Hình 8b tương ứng.



Hình 8. Kết quả dạng xung điện áp đầu ra: a. PWM Đơn cực và b. PWM Lưỡng cực

Tại điểm kết nối lưới, hệ thống nguồn điện mặt trời sử dụng bộ biến đổi DC/AC ghép nối trực tiếp sẽ phát xạ sóng hài dòng điện vào lưới. Giá trị biên độ các thành phần hài phụ thuộc vào nhiều thông số như: công suất đỉnh, tần số điều biến, bộ lọc,... Quá trình phát xạ sóng hài của bộ nguồn PV phải nằm trong giới hạn cho phép theo các tiêu chuẩn cụ thể. Do đó, việc lựa chọn bộ lọc sóng hài với các tham số phù hợp sẽ đóng vai trò quan trọng trong quyết định đến sự tuân thủ các quy định kết nối lưới.

Theo chỉ tiêu chất lượng điện áp đầu ra, độ méo sóng hài tổng (THD) được sử dụng để kiểm chứng sự thỏa mãn yêu cầu về chất lượng sóng hài theo quy định chung. Tần số chuyển mạch của các cấu trúc không có máy biến áp nằm trong khoảng từ 2kHz đến 20kHz [5]. Thông thường, tần số chuyển mạch càng cao thì có thể thu được THD của dạng sóng đầu ra càng thấp. Một bộ lọc sóng hài hoặc bộ lọc thông thấp được lắp đặt ở đầu ra của bộ biến đổi PV để triệt tiêu nhiễu tần số cao bằng PWM. Các thông số phù hợp của bộ lọc thông thấp này được xác định tùy thuộc vào tần số chuyển mạch của PWM.

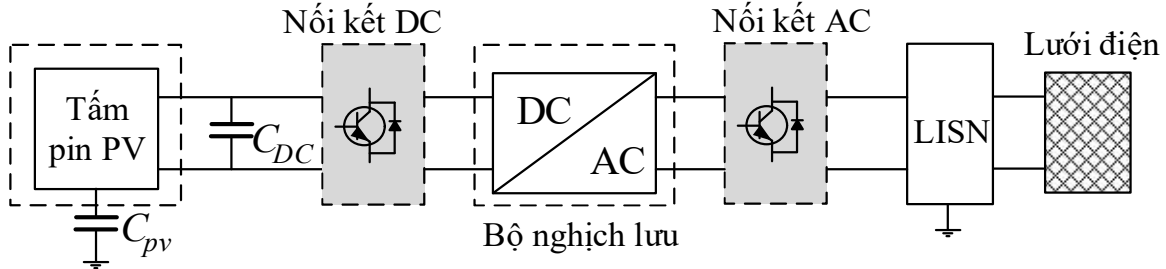
7.3. Cấu trúc bộ biến đổi DC/AC cải tiến

7.3.1. Nguyên lý cơ bản

Với chi phí thấp, kích thước nhỏ gọn và hiệu suất cao nên cấu trúc không máy biến áp được sử dụng cho các ứng dụng điện mặt trời. Do thiếu cách ly nên cấu trúc này gặp phải vấn đề lớn với dòng điện rò bởi nhiễu không đối xứng khi sử dụng phương pháp PWM đơn cực. Vì vậy, cần thiết đề xuất các cấu trúc khác để làm suy giảm nhiễu không đối xứng.

Một số cấu trúc bộ biến đổi đã được nghiên cứu nhằm cải thiện đặc tính nhiễu không đối xứng CM bằng cách bổ sung thêm các khóa đóng cắt [3], [4]. Nguyên lý cơ

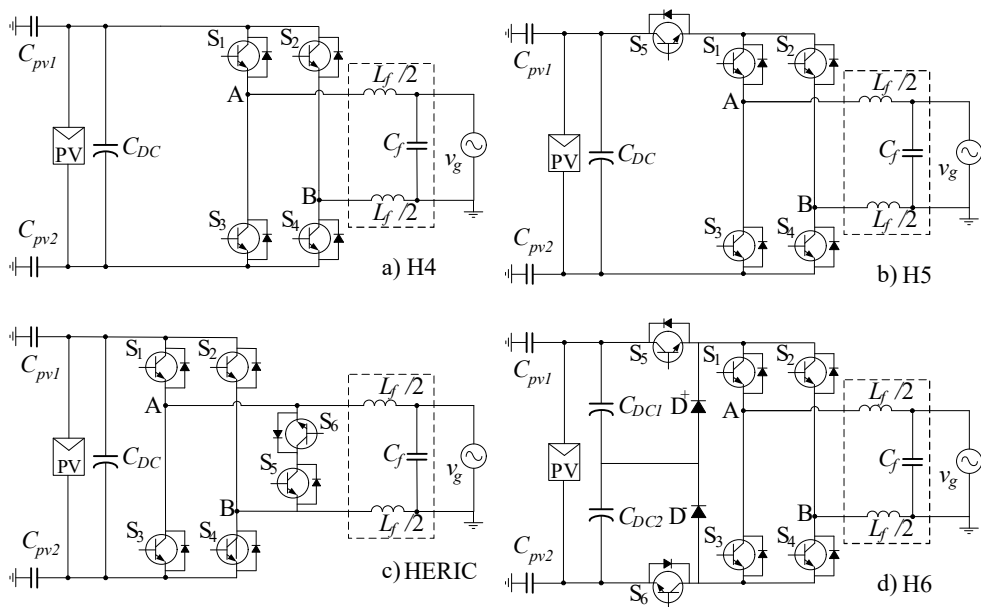
bản là giữ cho điện áp không đối xứng có trị số không đổi trong quá trình chuyển mạch. Một số giải pháp kỹ thuật được đề xuất như phân tách phía một chiều khỏi phía xoay chiều, triệt tiêu nhiễu không đối xứng trong chu kỳ tự do của đi-ốt hoặc sử dụng cấu hình nối đất chung (Hình 9) [6].



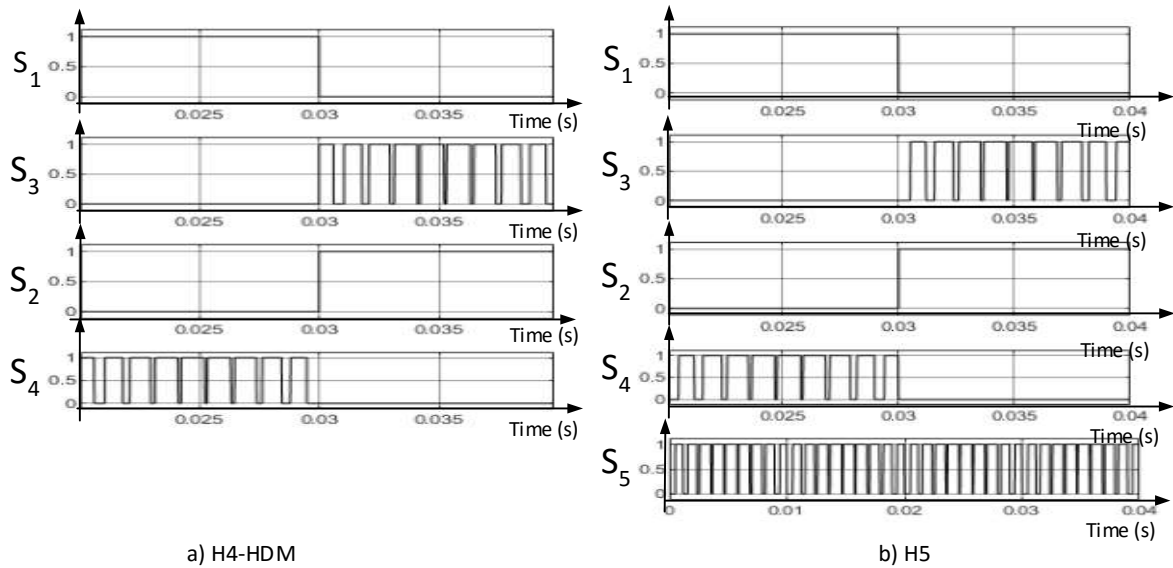
Hình 9. Giải pháp cải thiện thành phần nhiễu không đối xứng [6]

7.3.2. Mô hình bộ biến đổi

Hình 10 trình bày cấu trúc giảm nhiễu thành phần không đối xứng cho ứng dụng điện mặt trời như H5, HERIC và H6 [4]. Cấu trúc H5 được hãng SMA đề xuất thay đổi các van S_1 và S_2 đóng cắt theo chu kỳ lưới, khóa S_5 được đặt ở phía DC hoạt động ở chế độ ngắt gián đoạn đồng bộ với tần số chuyển mạch [3]. Thông qua khóa S_5 , dòng điện rò sẽ bị ngắt quãng và tạo ra trạng thái tổng trở cao đối với nhiễu không đối xứng. Trạng thái hoạt động của các van được đưa ra trên Hình 11b. Dựa trên nguyên lý đóng cắt này, mô hình H5 được mô phỏng trong Matlab/Simulink thông qua sửa đổi cấu trúc cầu đầy đủ H4 và bổ sung thêm khóa S_5 .



Hình 10. Cấu trúc DC/AC điển hình: a. H4, b. H5, c. HERIC và d. H6 [3], [4]



Hình 11. Cấu trúc DC/AC cải tiến (1): a. H4-HDM, b. H5

Dựa trên khái niệm bộ chuyển đổi tin cậy và hiệu suất cao hãng sản xuất Sunways đã đề xuất cấu trúc HERIC bổ sung thêm 2 khóa S_5 và S_6 ở phía xoay chiều AC. Các van S_5 và S_6 hoạt động chu kỳ của điện áp lưới tạo nên dạng sóng điện áp đầu ra ba mức. Các trạng thái hoạt động của các van bán dẫn của sơ đồ HERIC với 6 van được hiện thị trên Hình 12a.

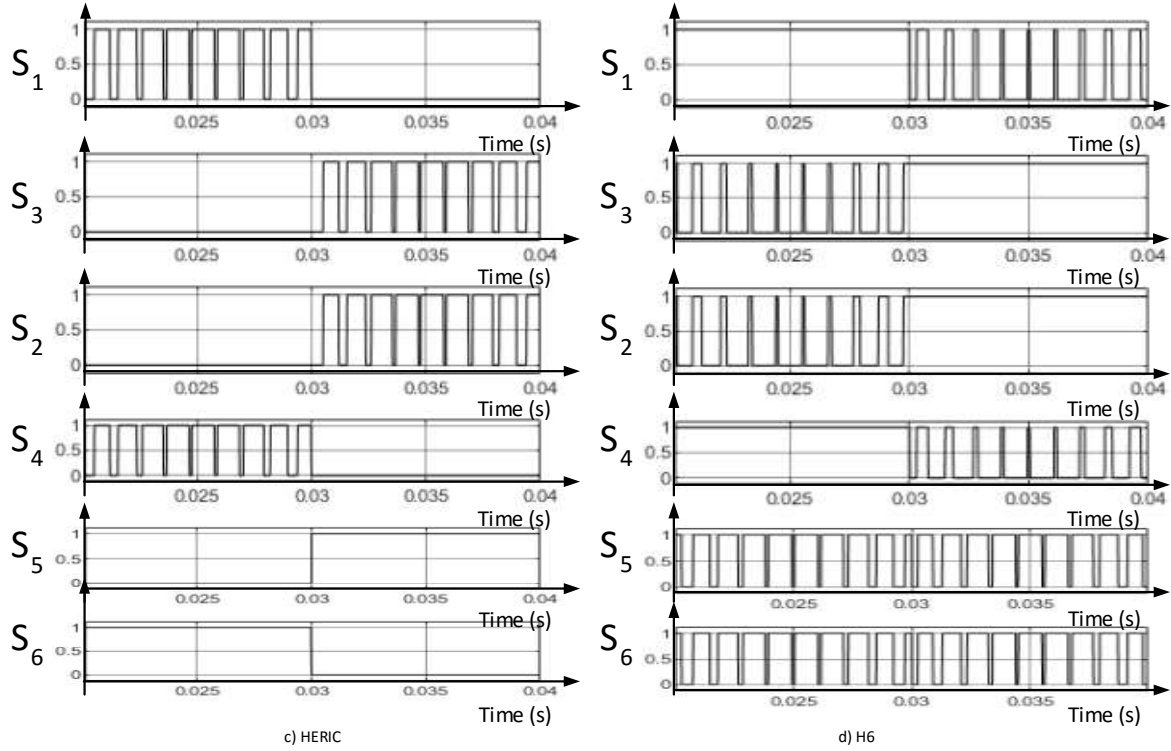
Cấu trúc cầu đầy đủ với việc nối tắt phía một chiều (DC bypass) được gọi là cấu trúc H6 do hãng Ingeteam xây dựng. Hai khóa đóng cắt và đi-ốt được bổ sung ở phía DC để ngắt quãng pin quang điện khỏi phía xoay chiều AC trong trạng thái điện áp qua không. Như vậy, nhiều thành phần không đối xứng có thể được giảm đáng kể thông qua giải pháp nối kết 2 phía của bộ biến đổi DC/AC (Hình 9). Trong đó, phương pháp nối kết phía DC đối với cấu trúc bộ biến đổi H5, H6 và nối kết phía AC cho cấu trúc HERIC. Kết quả làm giảm trị số dòng điện rò đã được ghi nhận trong tài liệu [3], [4]. Hình 12b đưa ra trạng thái hoạt động của các van bán dẫn cho cấu trúc H6.

7.3.3. Mô phỏng cấu trúc bộ chuyển đổi DC/AC

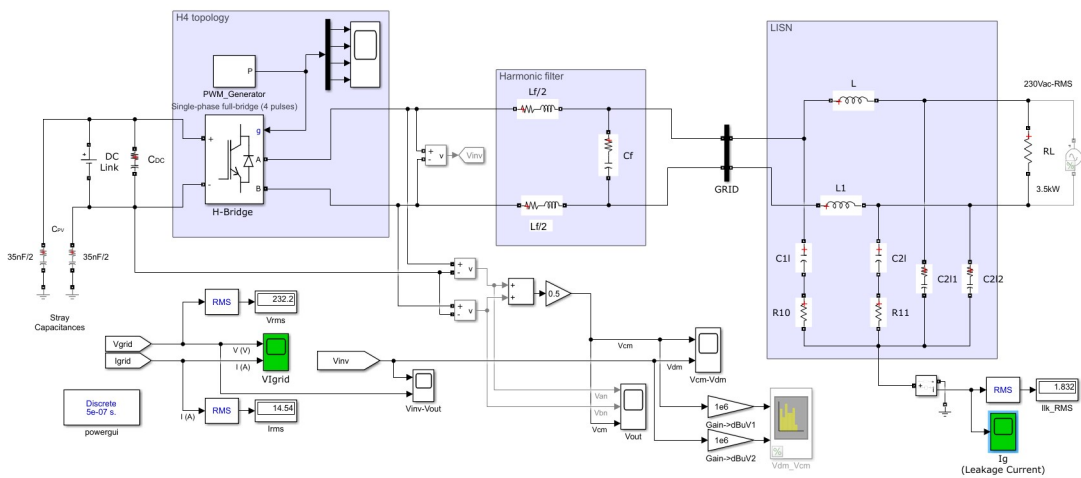
a. Mô hình mô phỏng bộ chuyển đổi DC/AC cho điện mặt trời áp mái

Cấu trúc các bộ chuyển đổi (H4, H5, HERIC và H6) sẽ được mô phỏng trong Matlab/Simulink với một bộ lọc sóng hài tại vị trí đầu ra (Hình 9). Mô hình tổng trở ghép nối mạng LISN (50uH//50Ω) được sử dụng để giả lập việc đo lường các thông số trong điều kiện phòng thí nghiệm. Hình 13 mô tả sơ đồ mô phỏng hệ thống điện mặt trời áp mái với cấu trúc cầu đầy đủ H4. Thông số sơ đồ mô phỏng như sau: điện dung

ký sinh của các tấm pin mặt trời C_{pv} bằng 35nF, điện áp một chiều là 400V, điện áp xoay chiều là 230V, giá trị tụ điện dung một chiều C_{DC} lấy bằng 200uF [1]. Dạng sóng điện áp sẽ được xem xét với thành phần đối xứng và không đối xứng. Trong phần tiếp theo sẽ trình bày chi tiết dạng sóng điện áp đầu ra và dòng điện rò giữa hai loại sơ đồ cấu trúc điện hình: sơ đồ cầu đầy đủ (H4) và sơ đồ cải tiến H6.



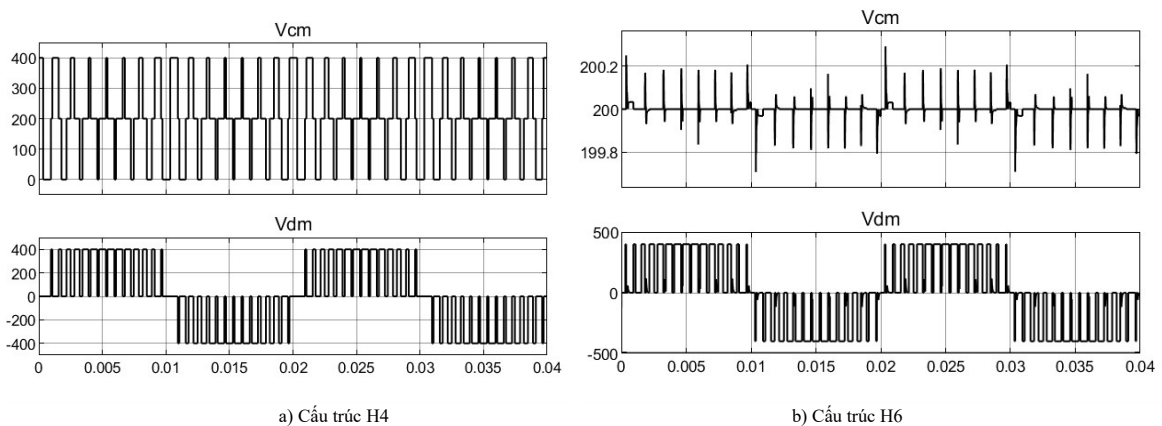
Hình 12. Cấu trúc DC/AC cải tiến (2): a. HERIC, b. H6



Hình 13. Sơ đồ mô phỏng trong Matlab/simulink cho cấu trúc cầu đầy đủ (H4) [6]

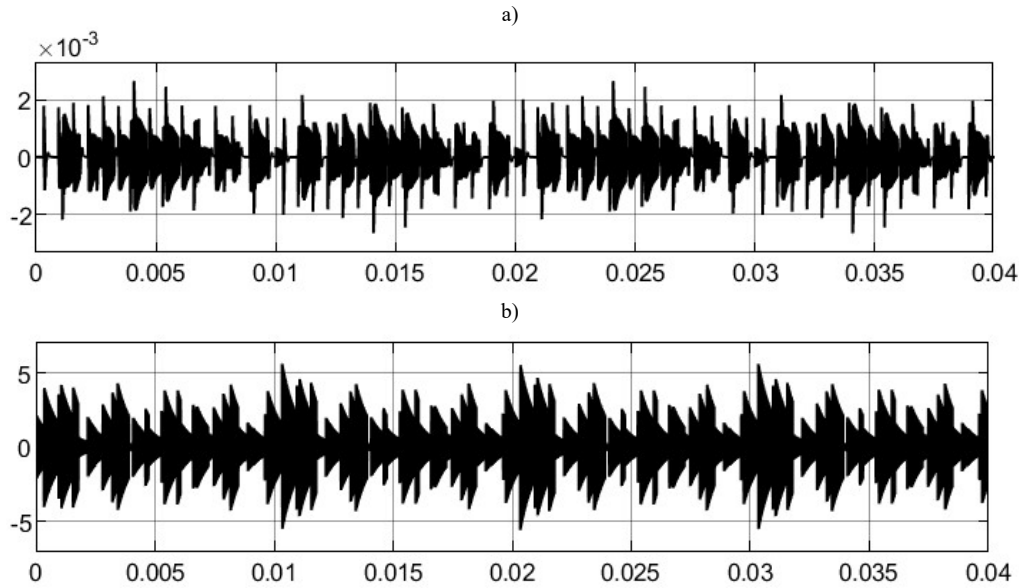
b. Kết quả mô phỏng

Để minh họa rõ ràng hơn việc thay đổi trật tự đóng mở các khóa chuyển mạch đến dạng sóng điện áp đầu ra của bộ chuyển đổi DC/AC, giá trị tần số điều biến f_c bằng 750 Hz được sử dụng. Hình 14a đưa ra dạng sóng điện áp cho thành phần không đối xứng (v_{cm}) và thành phần đối xứng (v_{dm}) đối với sơ đồ H4 [6]. Có thể nhận thấy rằng, thành phần điện áp không đối xứng luôn tồn tại trong quá trình chuyển mạch van bởi phương pháp PWM đơn cực. Với cấu trúc H6, nhờ giải phân tách phía một chiều DC bởi phía xoay chiều AC nên có thể giữ giá trị điện áp không đối xứng v_{cm} gần như không đổi trong suốt chu kỳ (Hình 14b) [6]. Thông qua việc phân tách hai thành phần nhiều không đối xứng và đối xứng có thể khảo sát ảnh hưởng của chúng đến giá trị nhiễu còn lại tại vị trí đầu nối. Để tạo ra tín hiệu sóng điện áp có dạng gần hình sin và hạn chế mức độ nhiễu phát vào lưới điện, bộ lọc sóng hài (L-C) cần được lắp đặt ở phía đầu ra của bộ biến đổi.



Hình 14. Dạng sóng điện áp đầu ra: a. H4 và b. H6 [6]

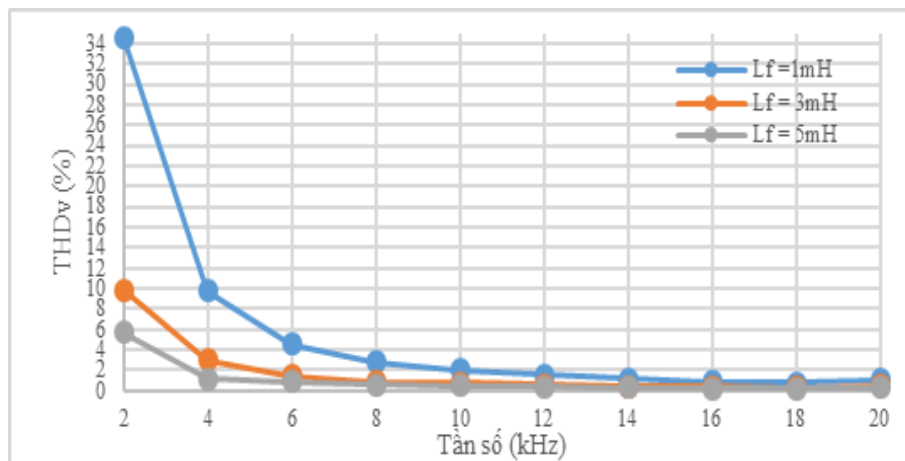
Do thành phần nhiễu không đối xứng tồn tại đi kèm với phương pháp điều chế PWM đơn cực nên dòng điện rò có giá trị lớn và dao động trong phạm vi rộng (Hình 15a). Trị số bình quân phương (RMS) của giá trị dòng điện rò đo lường được 1,681A tương ứng với tần số điều biến 750Hz. Trong khi đó, nhờ giữ được thành phần điện áp không đối xứng gần như không đổi nên giá trị dòng điện rò chỉ là 0,61mA cho cấu trúc H6 (Hình 15b) [6]. Như vậy, bằng cách thay đổi cấu trúc bộ chuyển đổi có thể làm giảm đáng kể trị số nhiễu không đối xứng và giảm thiểu nguy cơ về vấn đề dòng điện rò trong quá trình vận hành.



Hình 15. Trị số dòng điện rò: a. H4 và b. H6 [6]

7.3.4. Thông số bộ lọc sóng hài

Căn cứ trên giá trị tổng độ méo sóng hài điện áp THD_v tiêu chuẩn tại vị trí kết nối có thể xác định được các tham số của bộ lọc sóng hài đáp ứng được yêu cầu. Quá trình đo lường giá trị tổng độ méo sóng hài sử dụng công cụ phân tích chuỗi Fourier nhanh trong phần mềm Matlab (FFT analysis). Tuy nhiên, giá trị tổng độ méo sóng hài lại phụ thuộc chính vào cấu trúc bộ biến đổi, thông số bộ lọc, tần số điều biến PWM. Do đó, cần khảo sát sơ bộ sự thay đổi của giá trị tổng độ méo sóng hài đầu ra theo các biến số này.

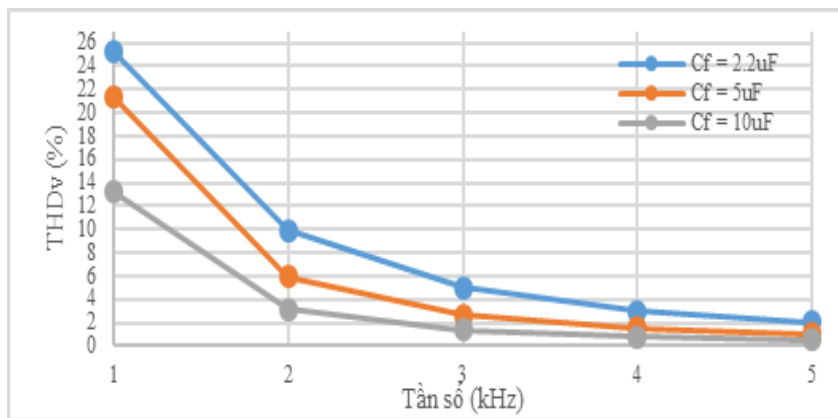


Hình 16. THD_v phụ thuộc vào điện cảm L_f [3]

Hình 16 đưa ra kết quả đo lường tổng độ méo sóng hài đầu ra tương ứng với các giá trị điện cảm là 1mH, 3mH và 5mH khi tần số điều biến thay đổi từ 2kHz đến

20kHz [3]. Cấu trúc cầu đầy đủ H4 được xem xét với giá trị điện dung của bộ lọc được giữ không đổi trong quá trình mô phỏng ($C_f = 2,2\mu\text{F}$). Có thể nhận thấy, với giá trị THD_v tiêu chuẩn bằng 6,5% khi tần số điều biến thấp sẽ yêu cầu giá trị điện cảm tương đối lớn và ngược lại. Thông qua các kịch bản mô phỏng với dải biến thiên của thông số điện cảm bộ lọc có thể xác định được vùng tham số phù hợp cho một cấu trúc cụ thể [3].

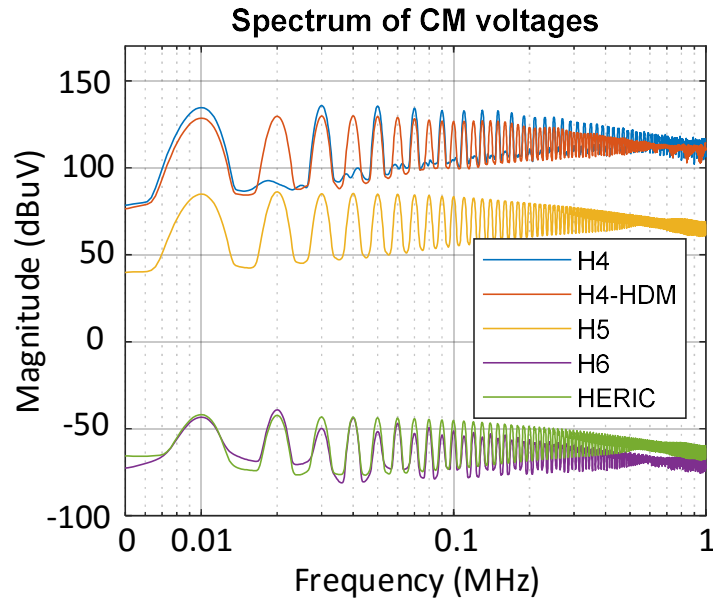
Tương tự như vậy, thông qua việc thay đổi giá trị điện dung bộ lọc C_f cũng sẽ quan sát được giá trị tổng độ méo sóng hài đầu ra như trên Hình 17 cho trường hợp giá trị điện cảm bằng 3mH. Giá trị điện dung được sử dụng trong mô phỏng là 2,2 μF , 5 μF và 10 μF . Tần số điều biến PWM được xem xét ở dải giá trị thấp từ 1kHz đến 5kHz. Như vậy, việc lựa chọn giá trị điện dung phù hợp cũng đóng vai trò rất quan trọng cho việc đảm bảo giá trị tổng độ méo sóng hài tại vị trí kết nối [3].



Hình 17. THD_v phụ thuộc vào điện dung C_f [3]

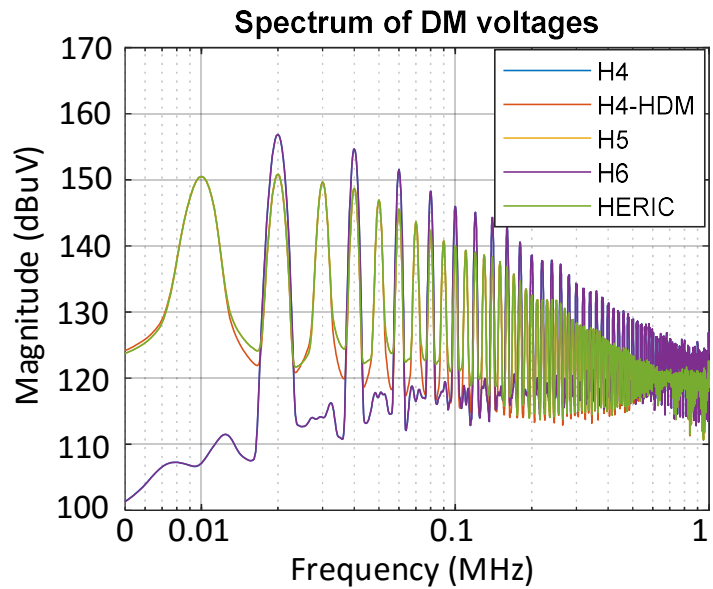
7.3.5. Hiệu quả giảm nhiễu ở tần số âm thanh.

Để làm sáng tỏ hơn đặc tính nhiễu của các cấu trúc bộ biến đổi DC/AC, đặc tính nhiễu đầu ra bộ biến đổi được khảo sát với các thành phần không đối xứng và đối xứng trong dải tần số âm thanh (150kHz ÷ 30MHz). Hình 18 đưa ra kết quả khảo sát thành phần nhiễu không đối xứng tương ứng với tần số điều biến f_c bằng 10kHz [6]. Có thể nhận thấy rằng, cấu trúc H5 có mức độ suy giảm nhiễu đáng kể, khoảng +50dB so với cấu trúc cầu đầy đủ H4. Nhờ đó mà giá trị dòng rò sẽ có trị số nhỏ hơn nhiều. Đặc biệt là cấu trúc H6 và HERIC có biên độ nhiễu suy giảm khá lớn (> 100dBuV), do đó giá trị nhiễu không đối xứng v_{cm} và dòng điện rò gần như bằng 0.



Hình 18. Kết quả nhiễu không đối xứng CM [6]

Bên cạnh đó, thành phần nhiễu đối xứng cũng có sự thay đổi một chút như trên Hình 19 [6]. Cấu trúc H6 có dạng tương tự như cấu trúc H4 nhưng chỉ tồn tại các nhiễu cao tần bậc chẵn của tần số điều biến. Với cấu trúc H5 và HERIC mức độ nhiễu đối xứng giảm +6dB với chỉ các nhiễu cao tần bậc lẻ của tần số f_c .



Hình 19. Kết quả nhiễu đối xứng DM [6]

8. Các kết quả nghiên cứu đạt được

Báo cáo đã trình bày những kết quả sau:

- Đặc điểm vận hành của cấu trúc bộ biến đổi DC/AC một pha như H4, H5, HERIC, H6.

- Hiệu quả giảm giá trị nhiễu tồn tại ở điểm kết nối và trị số dòng điện rò.
- Lựa chọn thông số sóng hài phù hợp theo tính toán lý thuyết và mô phỏng.

9. Kết luận và kiến nghị sử dụng kết quả nghiên cứu

Báo cáo đã tập trung nghiên cứu các loại bộ biến đổi DC/AC một pha nguồn năng lượng mặt trời áp mái công suất nhỏ khi kết nối trực tiếp với lưới điện hạ áp. Thông số bộ lọc phụ thuộc theo cấu trúc bộ chuyển đổi DC/AC có thể được xác định thông qua mô phỏng đảm bảo tiêu chuẩn kết nối.

10. Tài liệu tham khảo

- [1] Nguyễn Phúc Huy và Nguyễn Thị Thanh Loan (2023), "*Giảm thiểu sóng hài trên lưới điện phân phối có tích hợp điện mặt trời*", Tạp chí Khoa học Đại học Đông Á, tập 2, số 2(6) 2-14.
- [2] Đỗ Đức Thành, Ngô Thanh Tuấn (2025), "*Tối ưu hóa thông số bộ lọc sóng hài của bộ biến đổi nguồn năng lượng mặt trời công suất nhỏ kết nối với lưới điện hạ áp*", Hội nghị khoa học toàn quốc về Cơ khí – Điện - Tự động hóa (MEAE
- [3] Đỗ Đức Thành, Ngô Thanh Tuấn (2026), "*Đánh giá cấu trúc bộ chuyển đổi DC/AC một pha điện mặt trời đến việc lựa chọn thông số bộ lọc sóng hài đảm bảo tiêu chuẩn kết nối*", Hội nghị khoa học quốc gia: Công nghệ năng lượng và ứng phó biến đổi khí hậu (ENCCR-2026), trang 31-38.
- [4] K. Zeb, and et. Al (2018), "*A review on recent advances and future trends of transformerless inverter structures for single-phase grid-connected photovoltaic systems*", Energies 2018, pp. 1-33.
- [5] D. T. Do, and H. Hirsch (2020), "*EMI filter performance of transformerless topology for photovoltaic applications*", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), pp. 1-6, DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245763.
- [6] D. T. Do, and H. Hirsch (2021), "*Performance of representative transformer-less topologies for photovoltaic applications*", proceeding of Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity and EMC Europe (EMC+SIPI), England, pp. 1-4, July/August 2021.

- [7] Md Noman H. Khan, and et al. (2019), "*Transformer-less inverter topologies for single phase photovoltaic systems: A comparative review*", IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Power Electronics.
- [8] Bộ Công Thương (2015), Thông tư 39/2015/TT-BCT ngày 18/11/2015 của Bộ Công thương: Quy định hệ thống điện phân phối, đảm bảo các tiêu chuẩn điện áp, tần số, sóng hài tại điểm lắp đặt đo đếm.
- [9] Thủ tướng Chính phủ (2020), Chỉ thị số 20/CT-TTg về việc tăng cường tiết kiệm điện giai đoạn 2020 – 2025.
- [10] Chính phủ (2024), Nghị định 135/2024/NĐ-CP: Quy định về cơ chế, chính sách khuyến khích phát triển điện mặt trời mái nhà tự sản xuất, tự tiêu thụ có đấu nối lưới điện quốc gia.
- [11] Yuan-KangWu, Jhih-Hao Lin and Huei-Jeng Lin (2017), "*Standards and guidelines for grid-connected photovoltaic generation systems: A Review and Comparison*", IEEE Transaction on Industrial Applications, vol. 53, no. 4, pp. 3205-3216.
- [12] F. Y. Shih, D. Y. Chen, Y. P. Wu, and Y. T. Chen (1996), "*A procedure for designing EMI filters for AC line applications*", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 11, no. 1, pp. 1170-1181.