

Khoa Cơ-Điện

Bộ môn Điện khí hóa

BÁO CÁO HỌC THUẬT NĂM 2025

Người soạn: TS. Đỗ Đức Thành

Tên đề tài:

“Đặc tính nhiễu của bộ biến đổi nguồn năng lượng mặt trời kết nối với lưới điện hạ áp”

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

*** Nghiên cứu trong nước:**

Nhiều tác giả tập trung nghiên cứu vào vấn đề tối ưu hóa công suất phát ra của bộ biến đổi DC/AC năng lượng mặt trời (Maximum Power Point Tracking - MPPT) và hạn chế lượng sóng hài phát ra bằng các bộ lọc thụ động. Trong quá trình vận hành, đặc tính nhiễu của nguồn năng lượng mặt trời xuất hiện trên lưới không chỉ phụ thuộc vào cấu trúc của bộ biến đổi, bộ lọc sóng hài, phương pháp điều chế PWM,... mà còn phụ thuộc vào đặc tính tổng trở tại điểm kết nối. Bên cạnh đó, vấn đề tương thích điện từ (Electromagnetic compatibility - EMC) với các sóng hài bậc cao trong dải tần số từ 9kHz đến 150kHz chưa có được chú trọng và quan tâm đến. Tần số làm việc của phương pháp điều chế độ rộng xung (PWM) của các bộ biến đổi nằm trong khoảng (2kHz – 20kHz) sẽ phát sinh rất nhiều sóng hài nằm trong phạm vi này, do đó cần phải xem xét kỹ lưỡng.

*** Nghiên cứu ngoài nước:**

Hiện nay, đã có rất nhiều tác giả công bố nhiều công trình, bài báo liên quan đến nguồn năng lượng mặt trời công suất nhỏ. Đặc biệt là vấn đề sóng hài tần số thấp đến 2kHz và đặc tính nhiễu dẫn của bộ biến đổi nguồn năng lượng mặt trời trong dải tần số 150kHz đến 30MHz. Tuy nhiên, do đặc điểm của cấu trúc nguồn năng lượng mặt trời không có máy biến áp cao tần (transformer-less topology) kết nối trực tiếp với lưới xuất hiện nhiều vấn đề trong quá trình thiết kế và vận hành hệ thống. Do sự đa dạng về cấu trúc và nhiều thông số là chưa biết và biến thiên trong một dải rộng nên cần phải sử dụng phương pháp để khảo sát đặc tính nhiễu mang tính xác xuất thống kê [4]. Đây là một xu hướng đang được nghiên cứu và quan tâm rất nhiều hiện nay.

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, tiêu chuẩn tương thích điện từ,... Theo chỉ thị số 20/CT-TTg [18] của Thủ tướng chính phủ đến năm 2030 yêu cầu 50% hộ tiêu thụ điện phải lắp đặt điện mặt trời áp mái. Với đặc điểm bộ biến đổi DC/AC 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 đặc tính nhiễu 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

- Bộ biến đổi DC/AC nguồn năng lượng mặt trời công suất nhỏ
- Nghiên cứu ảnh hưởng của các sóng hài bậc cao sinh ra bởi bộ biến đổi DC/AC đến lưới điện hạ áp: theo tham số bộ lọc sóng hài, đặc tính tổng trở mạng,...

4. Nhiệm vụ nghiên cứu

- Nghiên cứu tổng quan về nguồn năng lượng mặt trời áp mái.
- Xác định đặc tính nhiễu sóng hài của bộ biến đổi DC/AC
- Ảnh hưởng của nguồn năng lượng mặt trời khi 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: Đặc tính nhiễu của bộ biến đổi khi kết nối với lưới hạ áp.

7. Nội dung nghiên cứu

7.1. Chất lượng điện năng và vấn đề tương thích điện từ

7.1.1. Chất lượng điện năng

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.

Trong dải tần số thấp, độ méo hài tổng được sử dụng như một tiêu chuẩn phổ biến cho chất lượng điện năng. Do sự gia tăng của sóng hài tồn tại trong lưới điện hạ thế, dạng sóng điện áp và dòng điện bị méo vượt quá thành phần cơ bản lý tưởng. Độ méo được giới hạn để đảm bảo hoạt động bình thường của các thiết bị khác, đặc biệt là thiết bị nhạy cảm với sóng hài. Phát xạ hài của tải phi tuyến tính hoặc thiết bị chuyển mạch như các phụ tải gia đình và nguồn phát điện phân tán được xác định rõ trong việc xây dựng các tiêu chuẩn. THD_v của dạng sóng điện áp được xác định theo phương trình sau:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n V_i^2}}{V_1} \cdot 100$$

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.

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 [41], 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) [26]. 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].

7.1.2. Vấn đề tương thích điện từ EMC

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. Các sóng hài tần số cao (nhiều loạn) được tạo ra theo phương pháp PWM có thể được triệt tiêu bằng một độ dốc cụ thể phụ thuộc vào các cấu trúc bộ lọc. Ví dụ, một bộ lọc tầng ($L_f - C_f$) có độ dốc giảm thiểu là +40dB/thập phân. Khi các thể hệ phân tán được kết nối với lưới điện hạ thế, chúng cần đáp ứng các giới hạn EMC. Sau đó, các thông số của bộ lọc thông thấp sẽ ảnh hưởng mạnh đến chất lượng điện năng và các vấn đề EMC [5].

Việc lựa chọn thông số bộ lọc thông thường đã được nghiên cứu trong nhiều ấn phẩm. 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 bài báo này, một phạm vi phù hợp của các thành phần bộ lọc được xác định bởi cả tiêu chuẩn THD và giới hạn EMC [5]. Rõ ràng, phân tích xác định không thể tiết lộ các hành vi ngẫu nhiên thực tế, do đó, phương pháp xác suất là cần thiết để đề xuất. Các hành vi ngẫu nhiên được phân tích bằng phương pháp Monte-Carlo (MC) [4].

Việc lựa chọn các thông số bộ lọc thông thấp đảm bảo tiêu chuẩn méo hài tổng thể (THD). Các phạm vi hợp lý của các thành phần bộ lọc được nghiên cứu liên quan đến chất lượng điện lượng và độ ổn định của hệ thống. Do đó, các giới hạn THD và giới hạn EMC chuẩn được sử dụng hữu ích để xác định độ tự cảm và điện dung của bộ lọc. Hơn nữa, việc triệt tiêu bộ lọc thông thấp đối với điện áp CM và DM được đo bằng LISN có thể hữu ích để xác định các phạm vi phù hợp. Các thông số của bộ lọc EMI bổ sung được xem xét cẩn thận để triệt tiêu điện áp CM và DM dưới các giới hạn.

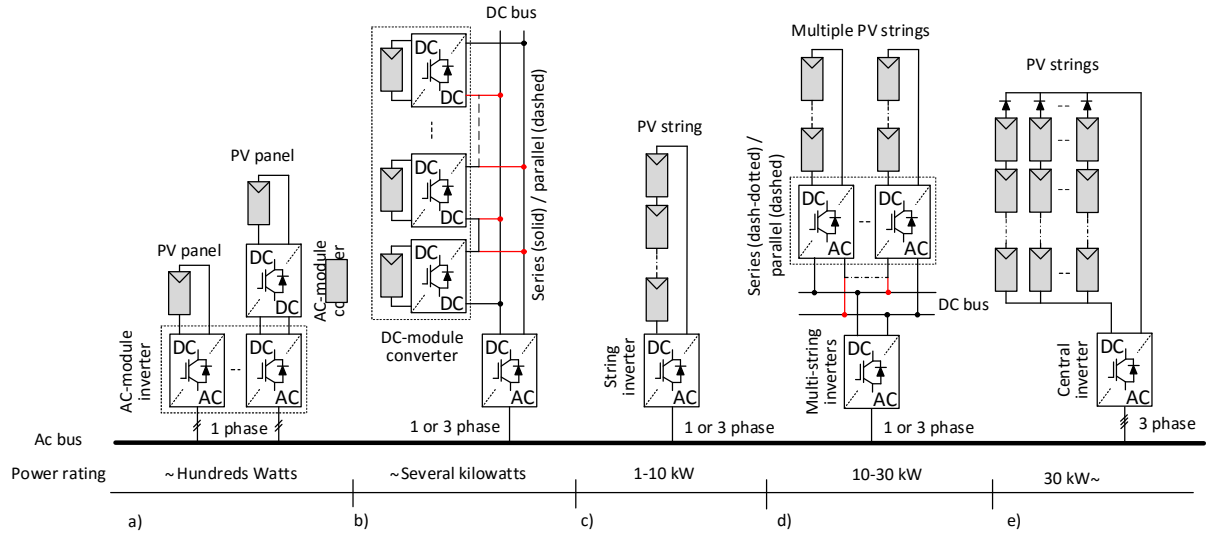
Trong lưới điện hạ thế, vấn đề chất lượng điện đóng vai trò quan trọng trong việc lắp đặt các thiết bị gia dụng hoặc các hệ thống phân tán. Phát xạ hài là một trong những tiêu chí chất lượng điện liên quan đến dải tần số thấp. Độ méo của các dạng sóng điện áp và dòng điện thường được xác định theo từng bậc hài riêng lẻ hoặc độ méo hài tổng (THD) [61]. Bên cạnh đó, dòng điện rò rỉ 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 [17, 75]. 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.

7.2. Bộ biến đổi nguồn năng lượng mặt trời

7.2.1. Cấu trúc bộ biến đổi nguồn năng lượng mặt trời

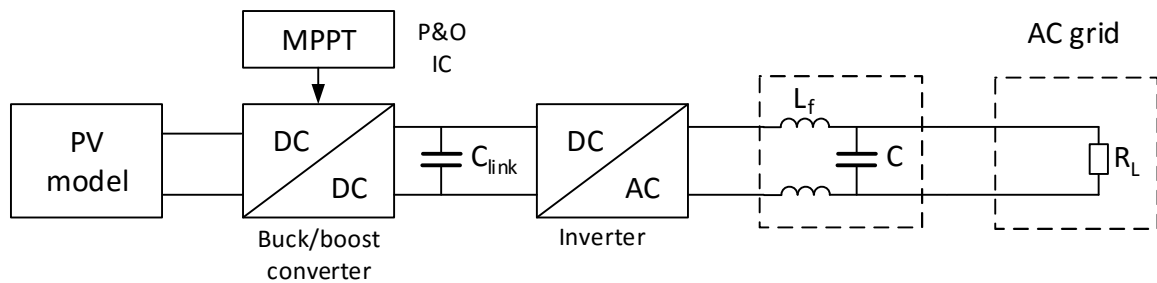
Hệ thống năng lượng mặt trời (Photovoltaic system - PV) có thể được phân loại thành hệ thống PV làm việc độc lập, hệ thống PV kết nối lưới điện và hệ thống lai [2]. Đối với các bộ nguồn PV, công suất định mức thay đổi từ các hệ thống PV quy mô nhỏ (vài kW) đến các hệ thống PV lớn (vài trăm kW). Hệ thống 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) [1]. 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 [2].



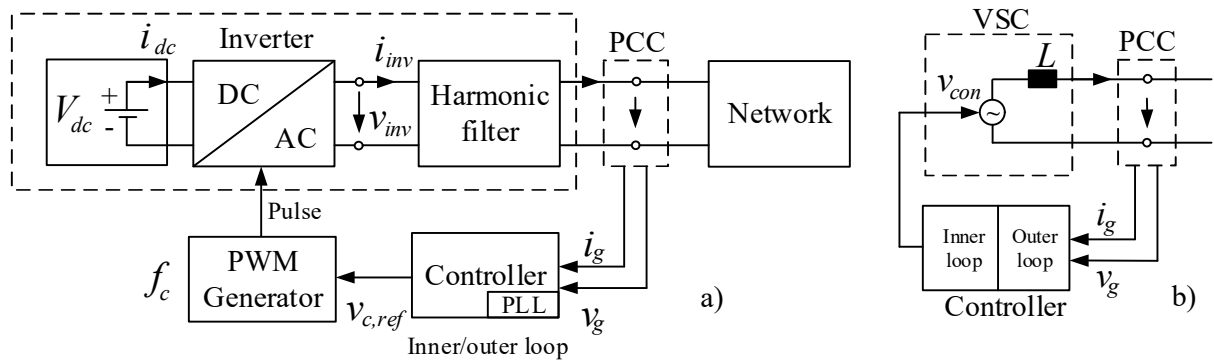
Hình 1. Tổng quan về bộ nguồn PV: a. Hệ thống nhỏ lẻ, b. Khu dân cư/hệ thống nhỏ lẻ, c. Khu dân cư, d. Khu dân cư/thương mại, e. Quy mô lưới/thương mại [1]

Hình 2 mô tả một ví dụ về các thiết bị PV quy mô nhỏ một pha [2]. 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 (Hình 3b). 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 (PLL - Hình 3a) 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 [2]. 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. Một ví dụ về bộ nguồn năng lượng PV một pha

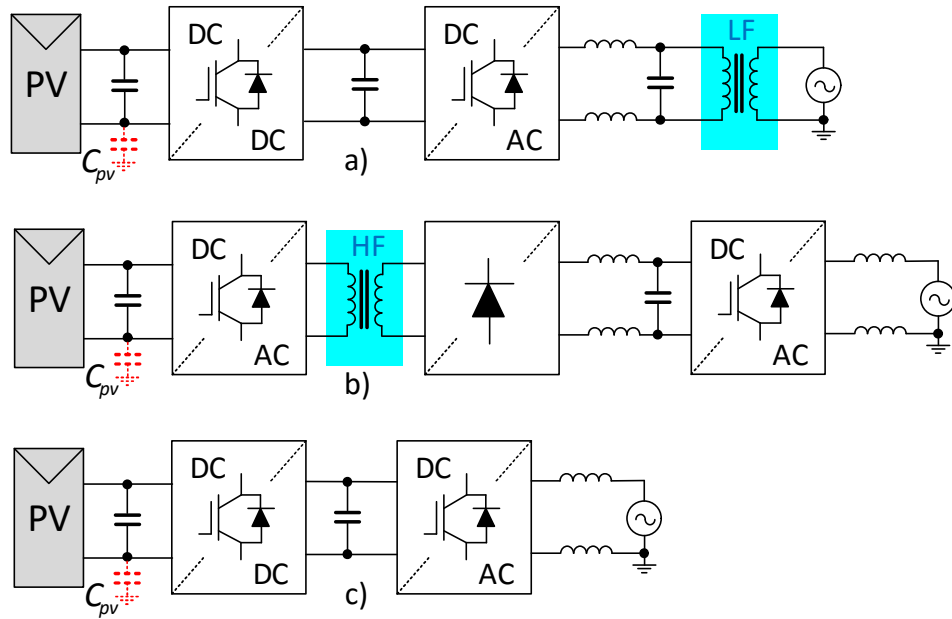
Hình 3b cho thấy sơ đồ điều khiển của bộ biến đổi PV. Hai vòng điều khiển bên ngoài hoạt động để điều khiển độc lập công suất tác dụng và công suất phản kháng thu được từ bộ biến đổi PV. Cấu trúc vòng điều khiển dòng điện bên trong sử dụng bộ điều khiển tích phân tỷ lệ (PI) (khung dq) với băng thông cao hơn (ít nhất 10 lần) so với các vòng điều khiển ngoài. Hầu hết bộ biến đổi PV được coi là bộ chuyển đổi nguồn điện áp (VSC) mặc dù tấm pin PV là nguồn điện áp [2]. Hơn nữa, tần số điều chế của bộ phát PWM ảnh hưởng mạnh đến tổng độ méo hài của dạng sóng đầu ra (Hình 3a). Nó cũng phát sinh nhiễu tần số cao (bội số của tần số điều chế f_c) vào lưới điện hạ áp.



Hình 3. Bộ biến đổi nguồn áp VSC: a. Hệ thống PV, b. Bộ điều khiển

Các dạng cấu trúc phổ biến nguồn năng lượng PV công suất nhỏ được đưa ra trên Hình 4. 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 4a), máy biến áp (HF) tần số cao (Hình 4b) và cấu trúc không có máy biến áp (Hình 4c) [1].

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 [2]. 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 [1].



Hình 4. 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

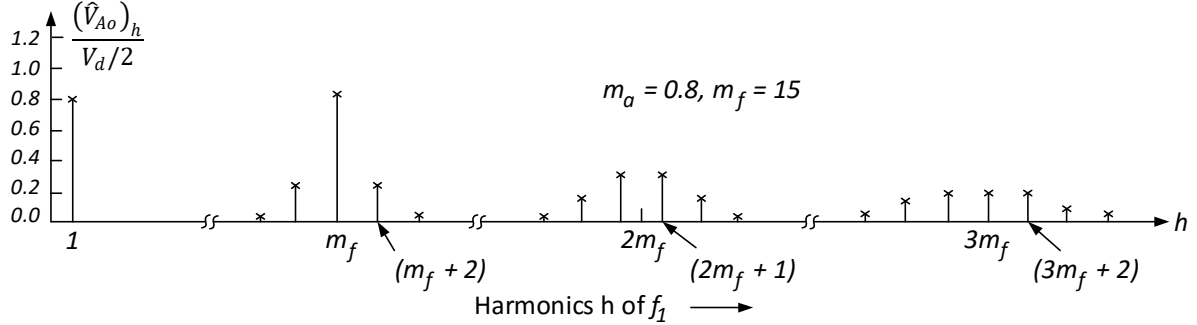
Do chi phí thấp hơn, kích thước/trọng lượng và hiệu suất cao, nên một cấu trúc không có máy biến áp cao tần được sử dụng cho các bộ chuyển đổi PV. Cấu trúc này thiếu sự cách ly về điện sẽ có một vấn đề lớn với dòng điện rò [13], [14]. Sơ đồ PWM đơn cực của cấu trúc cầu toàn phần (Full-Bridge) thông thường 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 [14]. 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 [14]. Do đó, cấu trúc FB với phương pháp điều chế PWM đơn cực là trường hợp mang lại hiệu quả kém nhất.

7.2.2. Phương pháp điều chế độ rộng xung PWM

a. Tổng quan về PWM

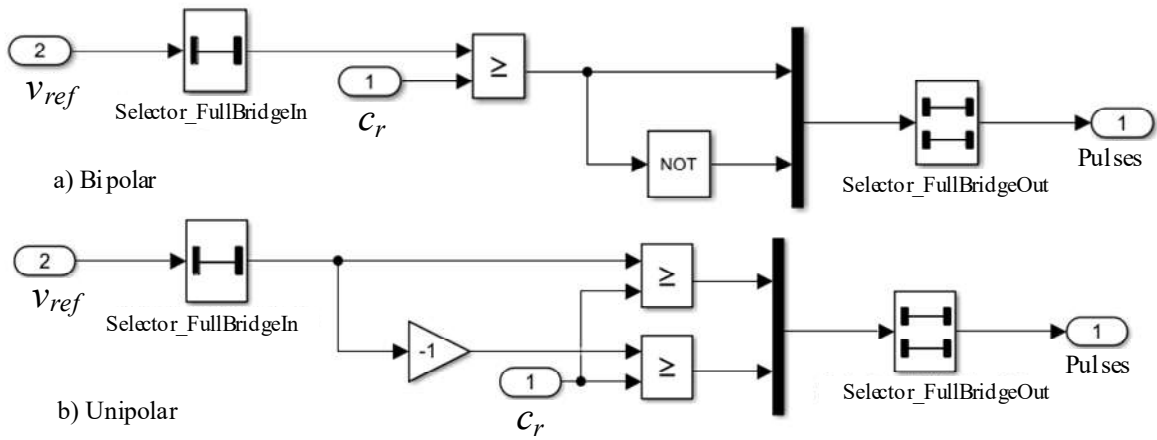
Hình 5 cho thấy phổ sóng hài chung của điện áp pha-trung tính [21]. Hình này được hiển thị tương ứng với chỉ số điều chế biên độ $m_a = 0,8$ và tỷ lệ điều chế tần số $m_f = f_c / f_l = 15$ (f_l biểu thị tần số cơ bản). Các sóng hài trong điện áp đầu ra của bộ biến đổi luôn xuất hiện dưới dạng các dải bên tập trung xung quanh tần số điều biến và bội số của nó, tức là xung quanh các sóng hài $m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$. Về mặt lý thuyết, phạm vi tần

số mà sóng hài điện áp xảy ra có thể được chỉ ra là $f_h = (jm_f \pm k)f_1$ tức là, bậc sóng hài (h) thay đổi với dải bên thứ k của j nhân với tỷ lệ điều chế tần số m_f : $h = jm_f \pm k$ [15]. Độ lớn của các sóng hài này được trình bày chi tiết trong Tài liệu tham khảo [15].

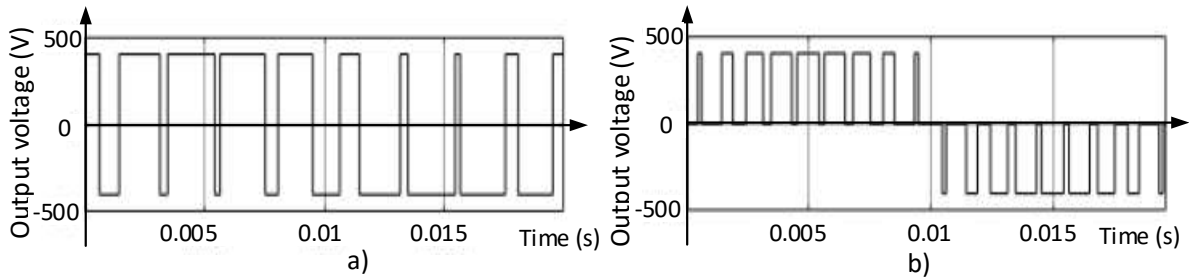


Hình 5. Phân bố chuỗi fourier của dạng điện áp đầu ra [15]

Đối với cấu trúc 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). Sơ đồ nguyên lý tạo xung điều khiển cho van bán dẫn được thực hiện trong phần mềm Matlab/Simulink (Hình 6). Kết quả dạng sóng điện áp đầu ra với tần số điều biến $f_c = 750$ Hz cho trên Hình 7a và Hình 7b tương ứng.

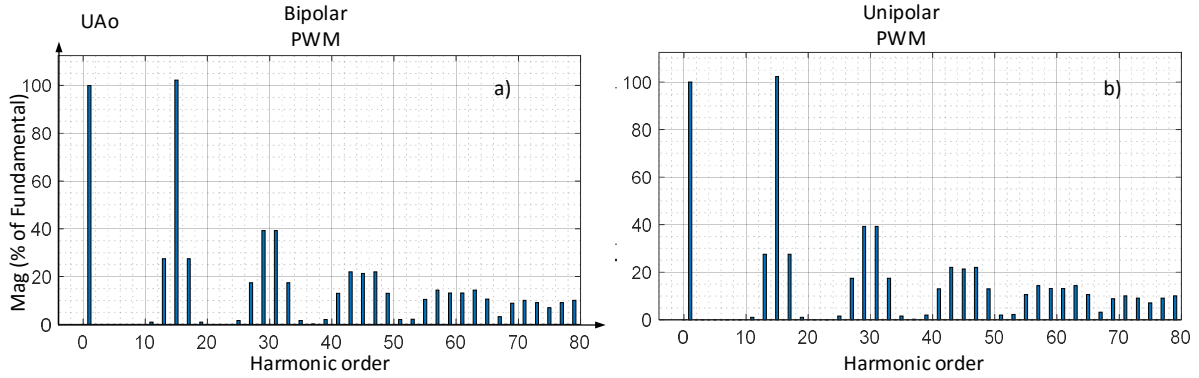


Hình 6. Mô hình điều chế xung: a. Lưỡng cực và b. Đơn cực

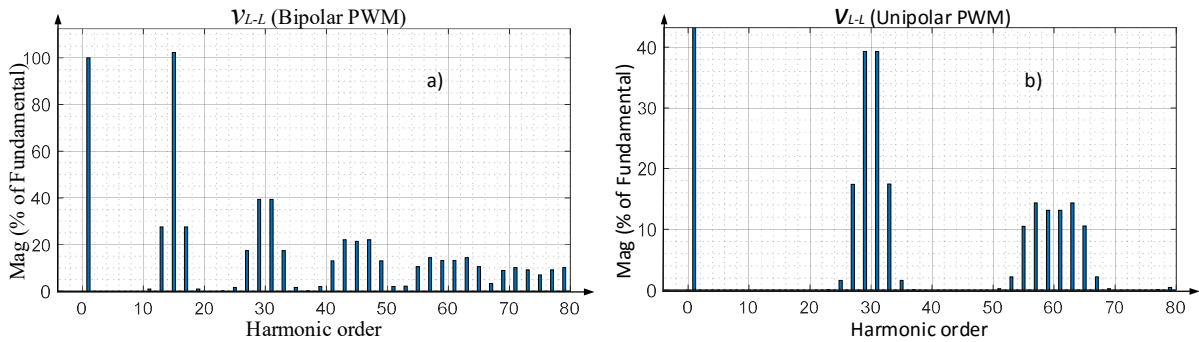


Hình 7. Kết quả dạng xung điện áp: a. Đơn cực và b. Lưỡng cực

Kết quả phân tích chuỗi fourier cho dạng sóng điện áp đầu ra bộ chuyển đổi DC/AC sử dụng phương pháp PWM với tần số điều biến $f_{c_PWM} = 750$ Hz cho trên Hình 8 (pha-đất) và Hình 9 (pha-pha). Với chức năng phân tích sóng hài Fourier Transformation (FFT) trong phần mềm Matlab có thể định lượng biên độ nhiều sóng hài bậc cao kiểm chứng những giá trị tính toán trong lý thuyết.

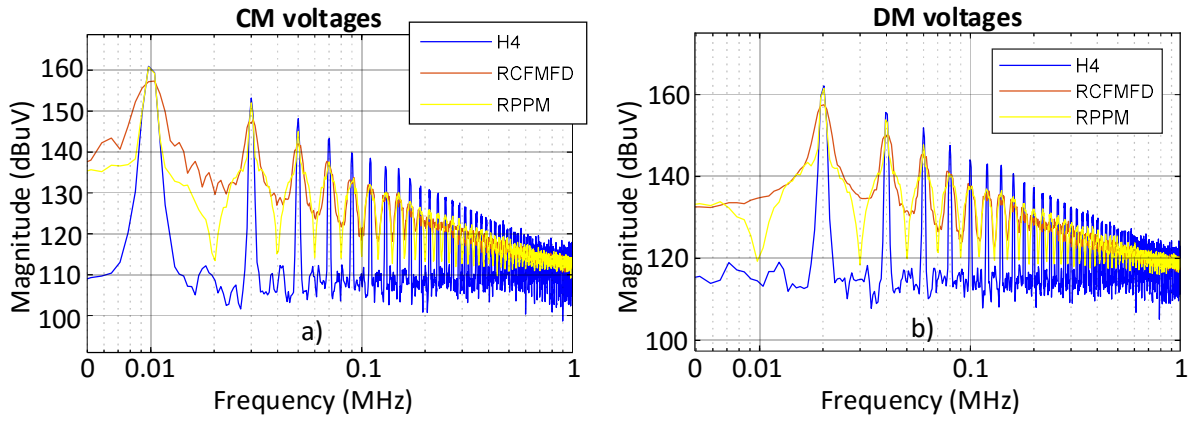


Hình 8. Điện áp pha – đất: a. Lưỡng cực và b. Đơn cực



Hình 9. Điện áp pha – pha: a. Lưỡng cực và b. Đơn cực

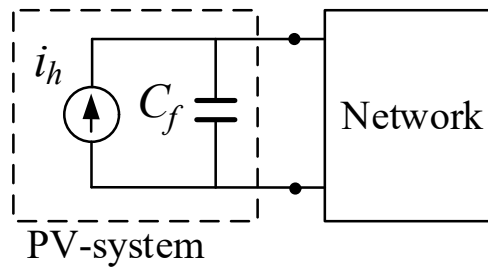
Nhận thấy rằng, các thành phần hài bậc lẻ bị triệt tiêu khi sử dụng phương pháp điều chế đơn cực (Unipolar). Hình 10 trình bày kết quả phân tích phổ tần dạng sóng điện áp chế độ chung CM và chế độ đối xứng DM tương ứng với phương pháp PWM đơn cực và các phương pháp ngẫu nhiên (Random PWM) [7]. Trong trường này, khối phân tích tích phổ Spectrum Analyzer được sử dụng. Có thể quan sát các nhiễu loạn tần số cao với biên độ lớn tại các vị trí là tích số của tần số điều chế PWM ($f_{c_RPWM} = 10\text{kHz}$). Do đó, phương pháp điều chế đơn cực (Unipolar PWM) được sử dụng trong mô phỏng đánh giá nhiễu của bộ biến đổi DC/AC. Sau khi tính toán được độ suy giảm (Attenuation) của đường truyền nhiễu dẫn sẽ xác định giá trị nhiễu CM và DM còn lại tại vị trí đầu nối. Giá trị nhiễu còn lại phải thỏa mãn giá trị theo tiêu chuẩn EMC.



Hình 10. Phân tích phổ tần: a. Chế độ chung CM và b. Chế độ đối xứng DM [7]

b. Bộ biến đổi DC/AC điện mặt trời áp mái

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. Mô hình đơn giản hóa thay thế tương đương được đưa ra trên Hình 11. 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.

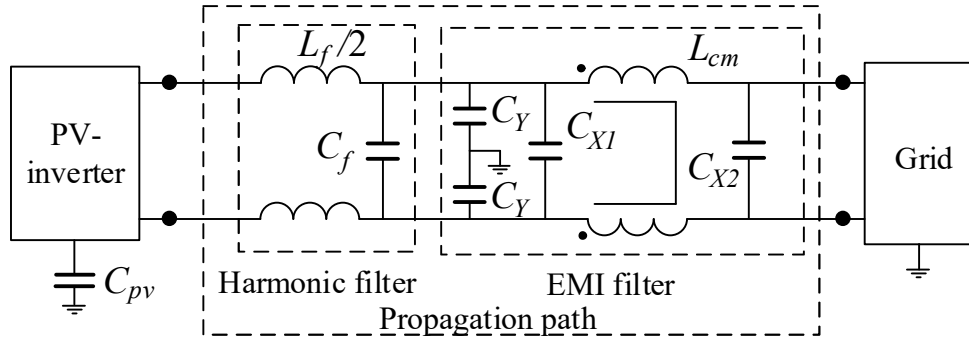


Hình 11. Mô hình phát xạ sóng hài của bộ biến đổi DC/AC

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.

7.2.3. Quy trình thiết kế bộ lọc L_f - C_f

Bộ lọc thông thấp được thiết kế để giảm sóng hài lẻ và THD theo tỷ lệ phần trăm cụ thể của các thành phần cơ bản (Hình 12). Các giới hạn điện áp/dòng điện này của chất lượng điện năng đối với phát xạ sóng hài được xác định theo bậc sóng hài lên đến bậc 40 hoặc bậc 50 (2kHz hoặc 3kHz). Tất nhiên, bộ lọc sóng hài này có thể giảm đáng kể nhiễu loạn tần số cao bằng tần số điều chế cao của phương pháp PWM ($f_{sw} = 2$ kHz đến 20 kHz).



Hình 12. Các khâu suy giảm nhiễu dẫn từ bộ biến đổi DC/AC

Tuy nhiên, trong quá trình thiết kế bộ lọc LC, nên chọn tần số góc f_{cf} cao hơn 10 lần so với tần số cơ bản f_l và nhỏ hơn một nửa tần số chuyển mạch f_{sw} ($10f_l < f_{cf} < 0,5f_{sw}$). Giá trị độ tự cảm tối thiểu L_f được xác định bằng điều kiện dòng điện tron tru với dòng điện gợn sóng tối đa $I_{ripple,max}$ là 10% đến 20% dòng điện định mức I_{dm} , đối với phương pháp PWM đơn cực [5]:

$$L_{fmin} = \frac{0,25 \cdot V_{dc} \cdot T_{sw}}{(0,1 \text{ đến } 0,2) I_{dm}}$$

trong đó V_{dc} là điện áp DC (điện áp cực-cực), T_{sw} là thời gian chuyển mạch, $T_{sw} = 1/f_{sw}$.

Giá trị độ tự cảm tối đa L_{fmax} thường được xác định bởi các giới hạn của trọng lượng, không gian lắp đặt, độ sụt điện áp và chi phí. Ở đây, L_{fmax} được xác định bởi tần số góc tối thiểu f_{cfmin} và điện dung tối đa C_{fmax}

$$L_{fmax} = \frac{1}{(2\pi f_{cfmin})^2 \cdot C_{fmax}}$$

trong đó f_{cfmin} biểu thị tần số góc tối thiểu ($f_{cfmin} = 10f_l = 500$ Hz), tần số cơ bản $f_l = 50$ Hz.

Hơn nữa, yêu cầu của quy trình thiết kế bộ lọc thông thấp đảm bảo tính ổn định của hệ thống điện [5]. Nó được đề cập là có khả năng làm giảm các điều kiện cộng hưởng và tránh tương tác của từng thành phần. Vì vậy, điện dung DM tối đa C_{fmax}

được xác định bằng công suất phản kháng Q_{cf} rút ra của bộ lọc LCL nhỏ hơn 50% công suất hoạt động định mức P_{dm} và $Q_{cf} = 2\pi f_1 C_f V_{2g}$, vì vậy:

$$C_{fmax} = \frac{0,5 \cdot P_{dm}}{2\pi f_1 \cdot V_g^2}$$

Tương tự như vậy, điện dung tối thiểu C_{fmin} được chọn để giới hạn điện áp gợn sóng đỉnh-đỉnh tối đa δ_{mm} trong phạm vi từ 5% đến 10% điện áp AC V_g , như sau [5]:

$$C_{fmin} = \frac{I_m}{1,1 \cdot V_g \cdot 2\pi \cdot f_1 \cdot \delta_{mm}}$$

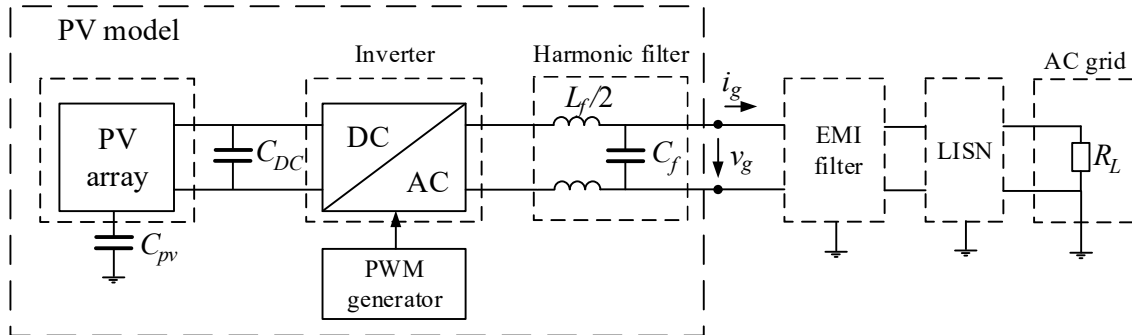
Với trị số biên độ dòng cực đại: $I_m = \sqrt{2} \cdot I_{dm}$, I_{dm} – giá trị dòng định mức.

Cuối cùng, mỗi sản phẩm được kết nối với mạng phải đáp ứng giới hạn EMC cho nhiều tần số cao (phạm vi tần số âm thanh RF). Trong quá trình thiết kế, không chỉ xem xét giới hạn dòng điện rò vì lý do an toàn, do đó, một bộ lọc EMC bổ sung được triển khai để đảm bảo hiệu suất đầu ra đáp ứng tiêu chuẩn EMC [5].

7.3. Đặc tính nhiều bộ biến đổi DC/AC

7.3.1. Mô hình điện mặt trời áp mái công suất nhỏ

Một cấu trúc không có máy biến áp PV một pha với $P_{dm} = 3,5\text{kWp}$ được sử dụng làm mô hình thử nghiệm bằng cách sử dụng PWM lưỡng cực và PWM đơn cực [4]. Dòng điện định mức AC là $I_{rated} = P_{rated} / V_g = 15,2\text{A}$ với điện áp lưới AC $V_g = 230\text{V}$. Điện áp DC V_{dc} là 400V, do đó chỉ số điều chế biên độ ma được tính là $m_a = (V_g / V_{dc}) = 0,82$. Tần số chuyển mạch của phương pháp PWM đơn cực f_{sw} được chọn là 4 kHz (Hình 13). Tổng điện dung ký sinh C_{pv} được coi là 35 nF, thông thường C_{pv} nằm trong khoảng (7 đến 100)nF/kWp. Trở kháng tải R_L được tính là 15Ω . Thời gian lấy mẫu của mô phỏng miền thời gian T_s là $1\text{e-}7\text{ s}$.



Hình 13. Cấu trúc mô hình nguồn năng lượng mặt trời PV

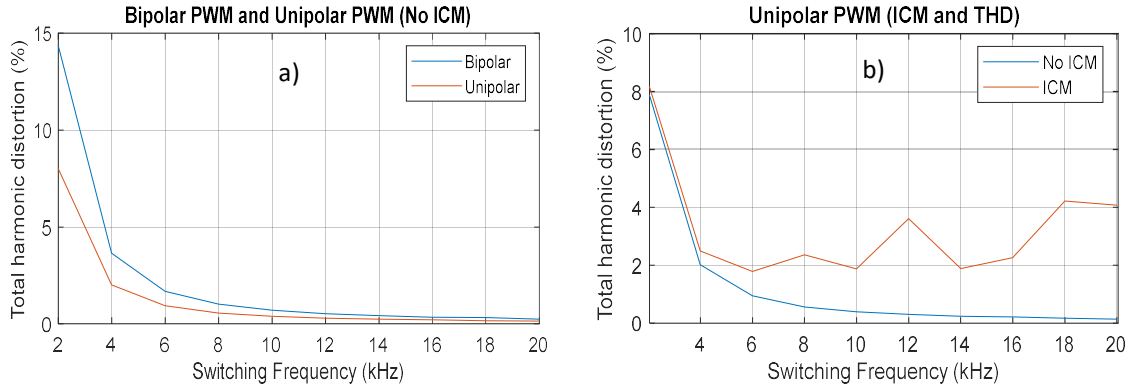
Bảng 1. Các thông số mô hình mô phỏng

Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
Điện áp AC, V_g	220V	Điện áp DC, V_{dc}	400V
Chỉ số điều chế, m_a	0.82	Điện trở tải, R_L	46 Ω
Tụ DC, C_{dc}	200uF	Điện dung ký sinh, C_{pv}	35nF
Tần số điều chế, f_{sw}	10kHz	Thời gian lấy mẫu, T_s	1e ⁻⁷ s

7.3.2. Đặc tính nhiễu xác định theo phương pháp PWM

Tần số chuyển mạch của các cấu trúc không có máy biến áp nằm trong khoảng từ 2kHz đến 20kHz. 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 tần 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. Trong Tài liệu tham khảo [17], trở kháng cơ sở Z_{base} được sử dụng để xác định giá trị tối ưu của độ tự cảm bộ lọc L_f . Đối với tần số chuyển mạch 2kHz, trở kháng cơ sở là 12% của tỷ lệ ngắn mạch (SCR). Trong trường hợp tần số chuyển mạch lớn hơn 10 kHz, trở kháng cơ sở yêu cầu nhỏ hơn 4% [17]. Do đó, tần số chuyển mạch càng cao thì giá trị của các thành phần bộ lọc càng nhỏ để đáp ứng tiêu chí THD tại điểm kết nối.

Giá trị THD của một cấu trúc không có máy biến áp tiêu biểu trong Hình 4 và các tham số mô phỏng trong Bảng 1 được nghiên cứu theo cùng tần số điều chế (4kHz). Hình 14a chứng minh rằng giá trị THD của PWM đơn cực nhỏ hơn giá trị của PWM lưỡng cực [5]. Khi có xét đến sự đóng góp của dòng điện không đối xứng (dòng điện rò), tổng độ méo hài của dòng điện tải tăng đáng kể (xem Hình 14b) [5]. Vì vậy, vấn đề về dòng điện rò đối với PWM đơn cực của cấu trúc không có máy biến áp cần được xem xét một cách chi tiết.



Hình 14. Giá trị dòng điện rò phụ thuộc tần số: a. PWM và b. Dòng CM [5]

7.3.3. Các thông số phù hợp của bộ lọc thông thấp

Đầu tiên, một phạm vi phù hợp của các thông số bộ lọc được tính toán dựa trên phương trình trên, cụ thể như sau [5]:

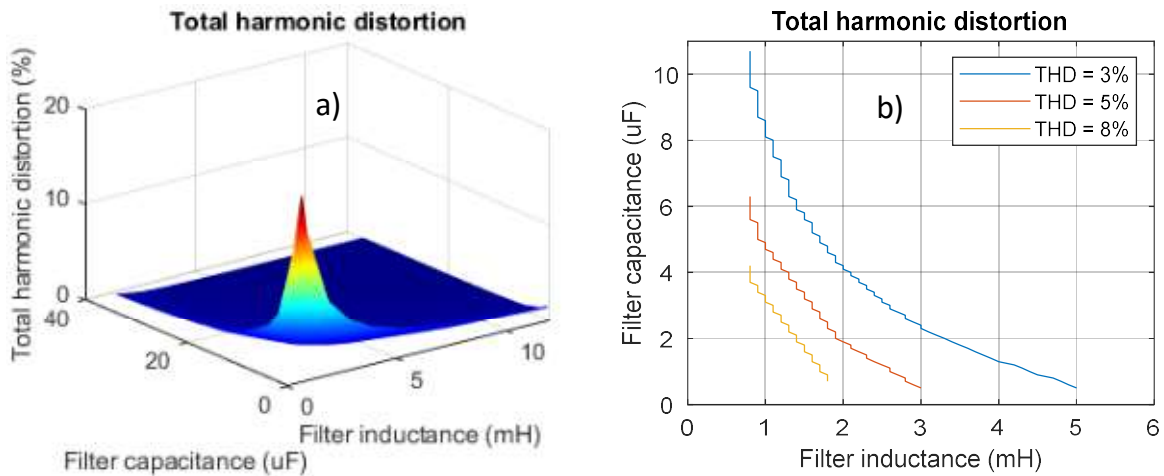
- Giá trị độ tự cảm tối thiểu L_{fmin} được xác định bởi tần số chuyển mạch tối đa $f_{sw,max} = 20\text{kHz}$, dòng điện gợn sóng $I_{ripple,max}$ là 20% dòng điện định mức $I_{r,max} = 26,1\text{A}$ nên giá trị $L_{fmin} = 0,96\text{mH}$.
- Giá trị điện dung tối thiểu C_{fmin} được tính bằng điện áp gợn sóng đỉnh-đỉnh tối đa bằng 10% lưới điện áp thấp V_g và dòng điện định mức tối thiểu $I_{r,min} = 0,87\text{A}$ như sau: $C_{fmin} = 0,6\text{ }\mu\text{F}$.
- Giá trị điện dung tối đa C_{fmax} được tính bằng công suất định mức tối đa $P_{r,max}$ khi đó $C_{fmax} = 18\text{ }\mu\text{F}$.
- Giá trị độ tự cảm cực đại L_{fmax} được xác định bởi tần số góc cực tiểu f_{cfmin} và giá trị điện dung cực đại C_{fmax} vì $L_{fmax} = 5,63\text{mH}$.

Do đó, phạm vi tính toán của độ tự cảm và điện dung của bộ lọc lần lượt là (0,96 đến 5,63)mH và (0,6 đến 18) μF [5]. Thứ hai, để bao phủ tất cả các khả năng của các tham số bộ lọc, cần xem xét các giới hạn khác. Độ tự cảm của bộ lọc tối ưu là 12% trở kháng cơ sở Z_{base} khi tần số chuyển mạch là 2 kHz. Vì tần số chuyển mạch là 4kHz, nên $L_{fmax,4kHz}$ tối ưu nhỏ hơn 10% của Z_{base} . Ví dụ, với $P_{rated} = 1\text{kW}$ và $Z_{base} = V_g^2/P_{rated}$, giá trị độ tự cảm tối đa $L_{fmax,1kW}$ được tính là 16,8mH. Tương tự như vậy, giá trị điện dung tối đa bị giới hạn bởi công suất phản kháng được rút ra của bộ lọc hài nhỏ hơn 15% của P_{rated} . Với P_{rmax} thì điện dung tối đa giới hạn đạt tới $C_{fmax,Pmax} = 54\mu\text{F}$. Vì vậy, các giá trị tối đa tùy chọn như $L_{f,con} = 12\text{ mH}$ và $C_{f,con} = 37\mu\text{F}$ được sử dụng để nghiên cứu THD của điện áp đầu ra [5].

Độ méo hài tổng (THD) phụ thuộc mạnh vào tham số của bộ lọc thông thấp ở đầu ra của bộ biến tần PV. Chức năng thích hợp của việc triệt tiêu giá trị THD của nó trong giới hạn chuẩn khi có các tham số bộ lọc phù hợp ($L_f - C_f$) và tần số chuyển mạch f_{sw} . Hình 15a [5] cho thấy mối quan hệ giữa các giá trị THD và các tham số bộ lọc đối với tần số sóng mang của thể hệ PWM đơn cực được chọn là 4 kHz. Như có thể thấy, các tham số bộ lọc càng cao thì giá trị THD có thể đạt được càng nhỏ.

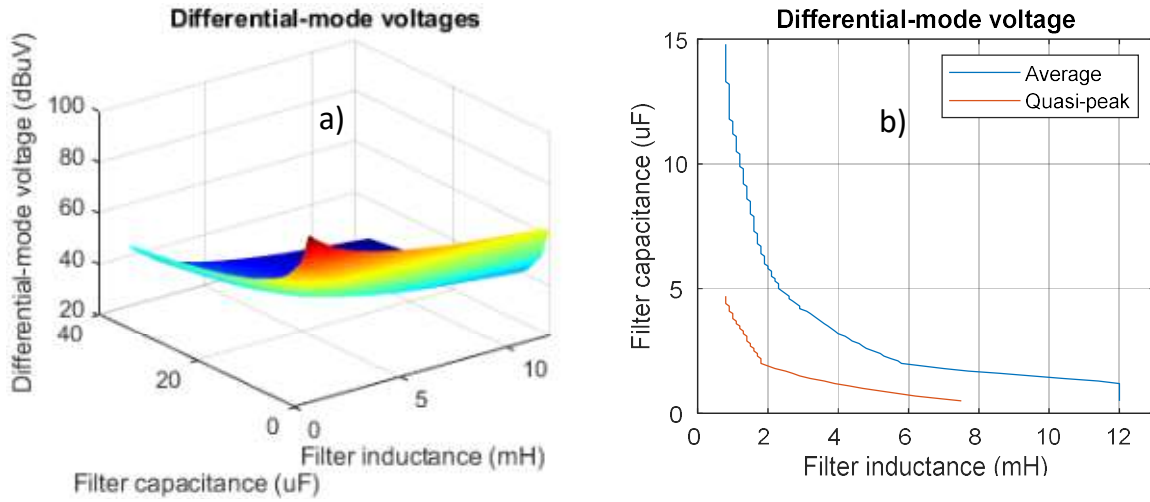
Phương pháp xác định dựa trên 10 điểm tham số bộ lọc. Các giá trị của nó như sau: tổng giá trị độ tự cảm của bộ lọc L_f (0,8 mH, 1 mH, 2 mH, 3 mH, 4 mH, 5 mH, 6 mH, 7 mH, 8 mH, 12 mH) và giá trị điện dung của bộ lọc C_f (0,5 μ F, 2 μ F, 5 μ F, 7 μ F, 12 μ F, 17 μ F, 22 μ F, 27 μ F, 32 μ F, 37 μ F).

THD của điện áp đầu ra được thể hiện trong Hình 15a phụ thuộc vào các thông số bộ lọc ($f_{sw} = 4$ kHz). Vì vậy, các giá trị phù hợp của các thông số bộ lọc liên quan đến các giá trị THD khác nhau được thể hiện trong Hình 15b. Các đường cong này hữu ích cho các nhà thiết kế bộ lọc để đáp ứng yêu cầu về chất lượng điện năng.



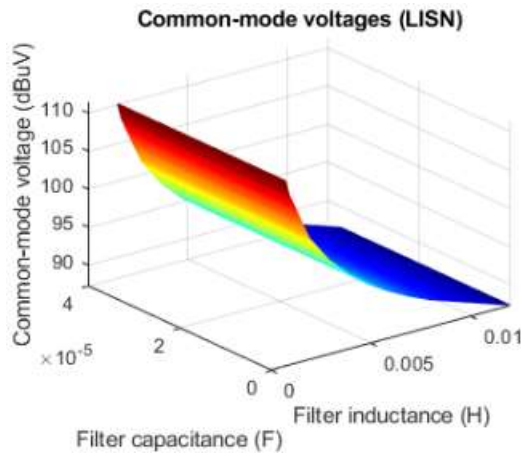
Hình 15. Thông số tối ưu: a. THD theo $L_f - C_f$ và b. $L_f - C_f$ theo THD [5]

Tương tự như vậy, có thể xác định được trị số điện áp đối xứng (DM) đo lường được tại tần số 150kHz cho trên Hình 16a. Từ kết quả mô phỏng, có thể xác định được thông số bộ lọc ($L_f - C_f$) đảm bảo theo tiêu chuẩn trị số trung bình (Average) và cực đại (Quasi-peak).



Hình 16. Điện áp chênh lệch đối xứng: a. Điện áp đầu ra và b. Tiêu chuẩn EMC [5]

Đối với điện áp không đối xứng (CM) được xác định theo thông số điện cảm và điện dung của bộ lọc thụ động được đưa ra trên Hình 17. Giá trị điện áp chế độ chung nhỏ nhất là $V_{cm_min} = 87.2$ dBuV không đảm bảo yêu cầu, nên cần thiết kế thêm bộ lọc nhiễu tần số cao (EMI filter) để giảm trị số này xuống dưới ngưỡng quy định. Trong phạm vi báo cáo này sẽ không trình bày quá trình thiết kế bộ lọc này. Do đó, cần tiến hành nghiên cứu bổ sung sau.



Hình 17. Điện áp chế độ chung và tham số bộ lọc [5]

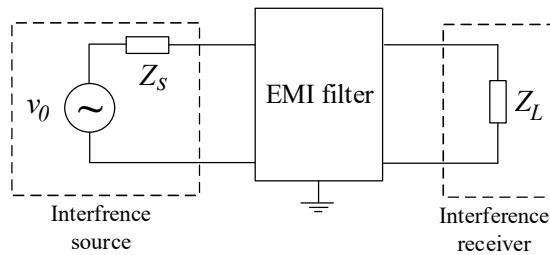
7.3.4. Ảnh hưởng của đặc tính tổng trở mạng

a. Độ suy giảm nhiễu (Attenuation)

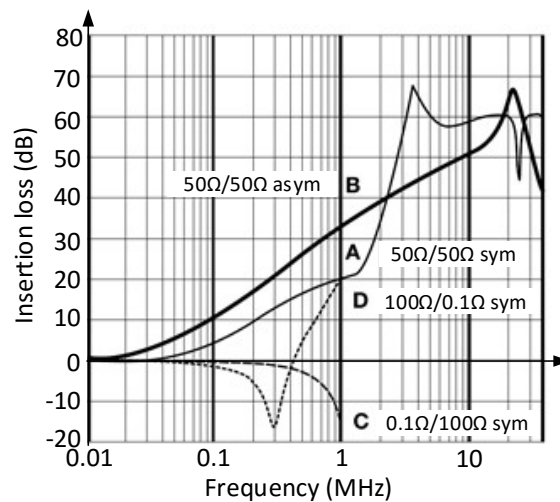
Đặc tính suy giảm của bộ lọc sóng hài và bộ lọc nhiễu tần số cao không chỉ phụ thuộc vào cấu trúc và giá trị của chúng mà còn phụ thuộc vào tổng trở phía nguồn và phía tải. Trong điều kiện phòng thí nghiệm sẽ sử dụng bộ kết nối chuẩn LISN để tạo ra giá trị tổng trở đo lường là $50\Omega/50\Omega$. Tuy nhiên, khi kết nối với lưới điện hạ áp, do

đặc tính tổng trở của mạng khác xa giá trị 50Ω nên cần phải tiến hành khảo sát đặc tính tổng trở của mạng $Z(w)$. Như vậy, việc tuân thủ các tiêu chuẩn trong phòng thí nghiệm có thể sẽ không còn phù hợp trong điều kiện thực tế khi thiết bị kết nối với mạng lưới điện.

Về mặt lý thuyết, đo lường độ suy giảm nhiễu (IL) theo CISPR 17 - sử dụng $50\Omega/50\Omega$ trở kháng như thể hiện trong Hình 18 đối với chế độ không đối xứng (CM) và chế độ đối xứng (DM)). Thông thường, phép đo hệ thống đối xứng cần sử dụng máy biến áp cân bằng (balun). Một trong những phương án thay thế được đưa ra trong CISPR 17 được gọi là 'Phương pháp kích bản xấu nhất gần đúng'. Các giá trị $0,1\Omega$ hoặc 100Ω được sử dụng và các kết quả được chuẩn hóa có thể được sử dụng với độ chính xác tương đối để dự đoán hiệu suất của bộ lọc trong các tình huống lắp đặt thực tế. Ảnh hưởng của sự thay đổi trở kháng nguồn và tải (Z_S / Z_L) đối với hiệu suất bộ lọc EMI được thể hiện trong Hình 19 với bộ lọc EMI AC/DC thông dụng (I_{dm} là 16A, độ tự cảm CM L_{cm} là 0,65mH). Tác động tiêu cực của sự suy giảm đối xứng (DM) tồn tại trong trường hợp trở kháng $0,1\Omega / 100\Omega$ hoặc $100\Omega / 0,1\Omega$ (đường cong C và D trong Hình 2.12, tương ứng) [4].



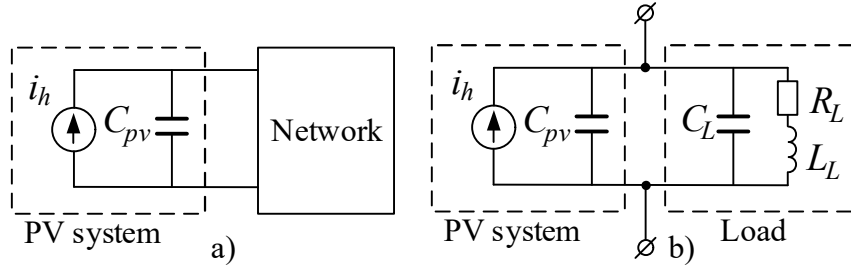
Hình 18. Mô hình đo lường độ suy giảm IL [4]



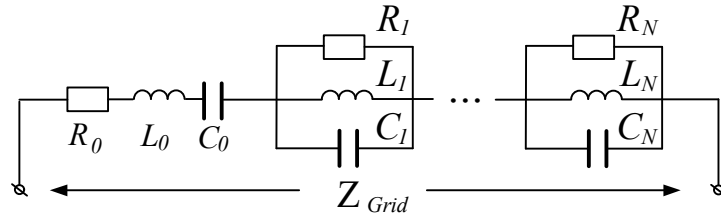
Hình 19. Đặc tính suy giảm của bộ lọc hài tần số cao EMI [4]

b. Đo lường tổng trở mạng

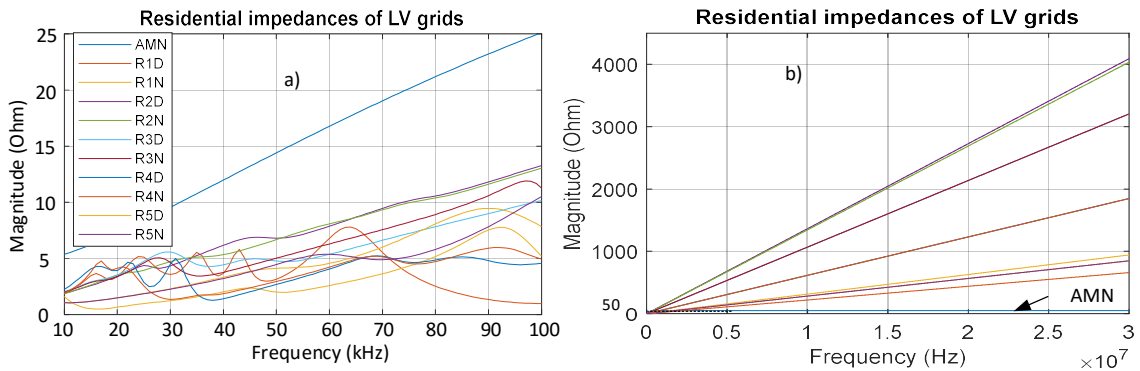
Khi kết nối với lưới điện hạ áp, bộ biến đổi PV được coi như một nguồn dòng sóng hài kết nối lưới lưới (Hình 20a). Với mạng lưới điện hạ áp, mô hình tải với các phần tử điện trở R_L , điện cảm L_L , điện dung C_L cho trên Hình 20b. Các giá trị thay thế tương đương này cần được khảo sát thông qua quá trình đo lường trực tiếp. Mô hình tổng trở lưới cho dải tần số xem xét là 9kHz đến 100kHz được đề xuất trên Hình 21 [9]. Kết quả biến thiên của tổng trở lưới cũng được mở rộng cho tần số 150kHz-30MHz.



Hình 20. Mô hình đơn giản hóa bộ biến đổi PV: a. Nguồn dòng và b. Tổng trở lưới

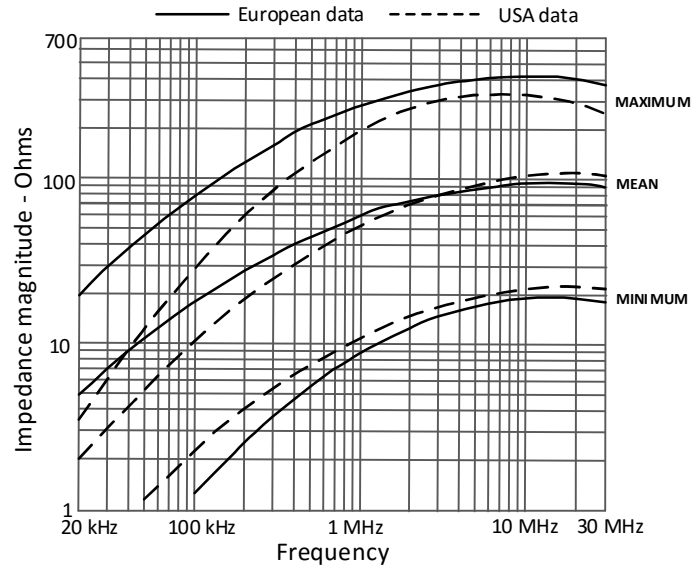


Hình 21. Mô hình đẳng trị tổng trở lưới cho dải tần số 9kHz – 100kHz [9]



Hình 22. Biến thiên tổng trở lưới: a. 10kHz-100kHz [9] và b. 150kHz-30MHz

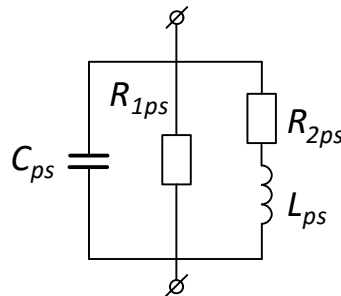
Nhận thấy, quá trình ngoại suy của tổng trở cho dải tần số âm thanh RF (150kHz – 30 MHz) từ mô hình đẳng trị trên Hình 21 không đảm bảo độ chính xác so với kết quả đo lường thực tế (chỉ vài trăm Ohm – Hình 23 [16]). Giá trị tổng trở rất lớn, tổng trở mang tính cảm cho phạm vi này. Do đó, cần đề xuất mô hình tổng trở phù hợp hơn [4] và thu thập số liệu đo lường trên thực tế [9], [12], [16].



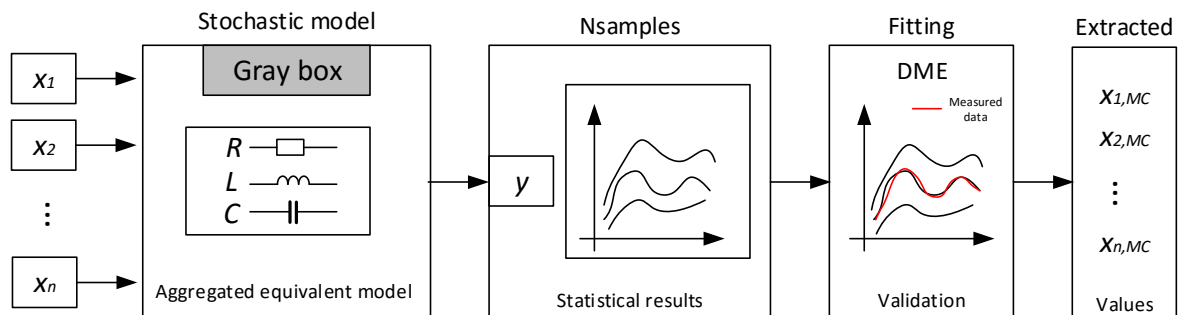
Hình 23. Mô hình tổng trở lưới đo lường [16]

c. Mô hình thống kê

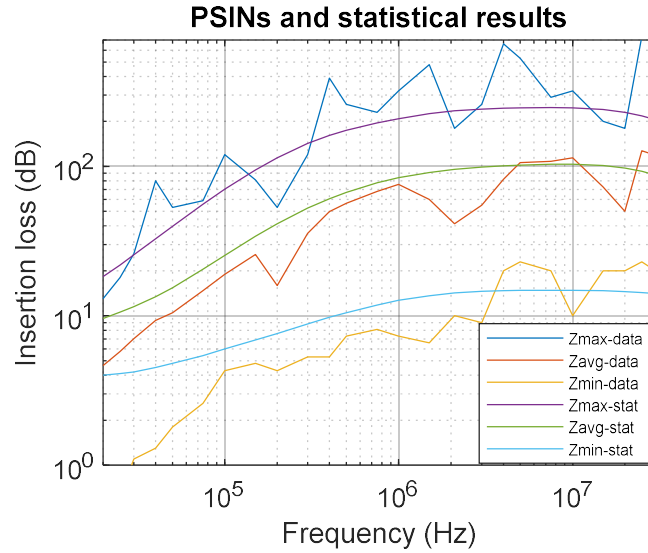
Mô hình tổng trở lưới được đề xuất cho phù hợp với dải tần số 150kHz-30MHz cho trên Hình 24 [4]. Các thông số của sơ đồ RLC sẽ được tái tạo dựa trên dữ liệu đo lường và phương pháp mô phỏng ngẫu nhiên Monte-Carlo trong phần mềm Matlab. Các bước thực hiện được tổng kết cho trên Hình 25. Đầu tiên, phạm vi có thể có của các thành phần tương đương được suy ra dựa trên các phần thực và phần ảo của trở kháng phức hợp trong Tài liệu tham khảo [16].



Hình 24. Mô hình tổng trở mạng tương đương [4]



Hình 25. Sơ đồ trích xuất các thông số sử dụng phương pháp MC [4]



Hình 26. Mô hình tổng trở tương đương [4]

Do đó, phạm vi phù hợp của mỗi thành phần được suy ra là $R_{1ps} = (12,2 \text{ đến } 588)$, $R_{2ps} = (0,01 \text{ đến } 14,5)$, $C_{ps} = (0,009 \text{ đến } 758,9) \text{ nF}$, $L_{ps} = (1,4 \text{ đến } 288,5) \text{ H}$ [4, 16]. Các mô phỏng MC sử dụng số lượng mẫu gồm 10000 mô phỏng. Tất cả các khả năng của các tham số mô hình trở kháng được nghiên cứu bởi các tham số này như R_{1ps} , R_{2ps} , L_{ps} , C_{ps} với phân phối đồng đều [4].

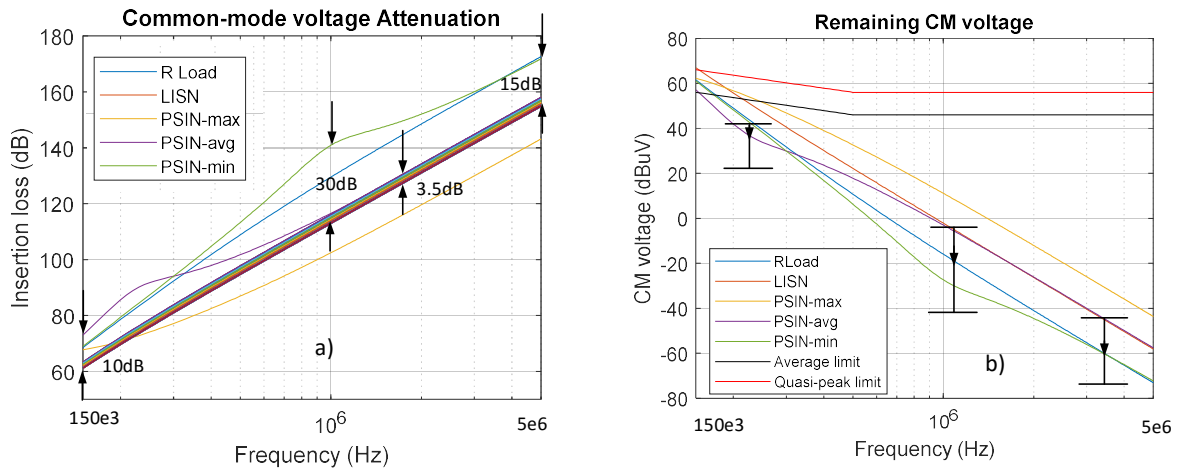
Các thông số được tái lập cho các đường đặc tính tổng trở lớn nhất, trung bình và nhỏ nhất (Z_{max} , Z_{avg} , Z_{min} – Hình 26) được liệt kê như sau: $R_{1ps_Z_{max}} = 450 \Omega$, $R_{2ps_Z_{max}} = 10 \Omega$, $L_{ps_Z_{max}} = 140 \text{ mH}$, $C_{ps_Z_{max}} = 0.01 \text{ nF}$, $R_{1ps_Z_{avg}} = 90 \Omega$, $R_{2ps_Z_{avg}} = 3 \Omega$, $L_{ps_Z_{avg}} = 30 \text{ mH}$, $C_{ps_Z_{avg}} = 0.03 \text{ nF}$, $R_{1ps_Z_{min}} = 18 \Omega$, $R_{2ps_Z_{min}} = 0.7 \Omega$, $L_{ps_Z_{min}} = 1.5 \text{ mH}$, $C_{ps_Z_{min}} = 0.11 \text{ nF}$ [4]. Mô hình tổng trở lưới $Z(w)$ với các thông số này sẽ được sử dụng để nghiên cứu giá trị nhiễu tồn tại ở vị trí kết nối tương ứng với điều kiện thực tế.

d. Đặc tính suy giảm nhiễu

Để có thể xem xét sự biến thiên của độ suy giảm nhiễu loạn tần số cao phụ thuộc vào đặc tính tổng trở lưới tại vị trí kết nối, có hai phương pháp sẽ được sử dụng. Phương pháp gần đúng sử dụng các giá trị tổng trở tải là hằng số ($R_L = 15, 50, 100, 250, 350, 500 \Omega$) [6]. Mô hình tổng hợp tương đương của trở kháng nguồn điện (PSIN) được sử dụng để nghiên cứu các nhiễu còn lại tồn tại khi lắp đặt bộ biến đổi PV. Trong tình huống này, bộ lọc sóng hài ($L_f - C_f$) được xem xét riêng cho các thành phần chế độ chung và chế độ đối xứng. Các tham số mô phỏng tương tự như trường hợp trở kháng lưới điện trở. Hơn nữa, suy giảm CM và DM được xem xét mà không

có tác động của các thành phần điện dung ký sinh. Tần số quan sát tối đa được biểu thị là 5MHz (thời gian lấy mẫu T_s là $1e^{-7}$ giây).

Các nguồn nhiễu CM và DM của mô hình mô phỏng trên có giá trị đỉnh gần đúng là 130 dBuV ở tần số quan sát 150 kHz f_{obs} , độ dốc -20 dB/thập phân [4]. Điện áp DM còn lại được đo tại điểm ghép nối chung (PCC) nhỏ hơn giới hạn trung bình 56dBuV ($V_{dm_PCC} = 43dB(uV)$) [4]. Ngược lại, điện áp CM tại $f_{obs} = 150kHz$ cao hơn giới hạn trung bình hoặc giới hạn gần đỉnh ($V_{cm_PCC} = 90dB(uV)$), do đó, bộ lọc EMI bổ sung với các thông số là độ tự cảm CM $L_{cm} = 2mH$, tụ điện Y $C_Y = 10nF$, tụ điện X $C_X = 0,047\mu F$, độ tự cảm rò rỉ của cuộn cảm CM $L_{lk} = 0,5\% \times L_{cm} = 0,01 mH$ [4].



Hình 27. Mô hình tổng trở PSIN: a. Độ suy giảm CM và b. Điện áp CM còn lại [4]

Hình 27a mô tả sự suy giảm điện áp CM theo các kịch bản khác nhau của trở kháng tải tương đương $Z(w)$ (màu xanh lam - Điện trở tải, màu cam - LISN, màu vàng - Z_{max} , màu tím - Z_{avg} , màu xanh lá cây - Z_{min}) [4]. Do đó, các điện áp CM còn lại cũng thỏa mãn giới hạn đỉnh gần đúng (bộ dò QP) được xác định bởi một đại lượng đo (đường cong LISN) và các khoảng dung sai (Hình 27b). Trong trường hợp này, sự đóng góp của thành phần DM vào các điện áp không đối xứng có thể không đáng kể. Hơn nữa, sự suy giảm điện áp DM trong Hình 26 chứng minh hiệu ứng IL tiêu cực trong dải tần số dưới 500kHz [4]. Điện áp CM và DM còn lại thay đổi đáng kể với khoảng dung sai cao hơn 10dB ở 150kHz, thậm chí còn hơn 20dB ở dải tần số cao hơn tùy thuộc vào các trở kháng khác nhau - $Z(w)$ [4]. Ở dải tần số $> 1 MHz$, đặc tính trở kháng trung bình (PSIN-avg) có độ suy giảm CM là trở kháng LISN (Hình 27a). Tương tự như vậy, độ suy giảm CM liên quan đến đặc tính trở kháng tối thiểu (PSIN-min) gần với trở kháng tải điện trở [4].

8. Các kết quả nghiên cứu đạt được

Báo cáo đã trình bày những kết quả sau:

- Đặc điểm vận hành của bộ biến đổi DC/AC nguồn mặt trời công suất nhỏ
- Đặc tính suy giảm nhiễu của bộ lọc sóng hài thụ động.
- Đặc tính nhiễu khi kết nối với lưới điện.

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

Báo cáo đã tập trung nghiên cứu các vấn đề về đặc tính nhiễu của bộ biến đổi DC/AC nguồn năng lượng mặt trời áp mái công suất nhỏ khi kết nối trực tiếp với lưới điện hạ áp. Những nội dung trình bày trong báo cáo bước đầu khảo sát và đánh giá nguy cơ tiềm ẩn của bộ biến đổi năng lượng mặt trời với một số dữ liệu thu thập được. Do đó, cần tiến hành nghiên cứu chi tiết hơn nữa trong điều kiện vận hành thực tế.

10. Tài liệu tham khảo

- [1] 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.
- [2] D. T. Do, and V. B. Ho (2016), "On the possibility of solar energy integration to the electric power supply system for surface coal-mining loads in the Quang Ninh area", *IEEE International Conference on Advances in Electro-mechanics for Mining and Geo-resources Development (AEM 2016)*, pp. 1-7.
- [3] D. T. Do, and H. Hirsch (2020), "Harmonic resonance risk assessment of photovoltaic applications in low voltage grid", *IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 868-873, DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152499.
- [4] D. T. Do, and H. Hirsch (2020), "Probability distribution approach of EMI filter performance for photovoltaic applications", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC+SIPI)*, pp. 681-684, DOI: 10.1109/EMCSI38923.2020.9191570.
- [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), "EMI filter performance for photovoltaic applications considering termination impedances", proceeding of IEEE 23th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE021 ECCE Europe), Belgium, pp. 1-5.
- [7] 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.
- [8] C. A. Paul (2006), Introduction to Electromagnetic Compatibility, 2nd Edition.
- [9] B. Sudiarto (2017), "The properties and behaviour of disturbances in the frequency range 9 kHz to 150 kHz produced by household appliances in a residential network environment", Ph.D. Thesis, University of Duisburg-Essen.
- [10] J. Smith, and et. al (2017), "Power quality aspects of solar power - results from CIGRE JWG C4/C6.29", International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), pp. 809-813, vol. 2017, iss. 1.
- [11] M. Bollen, M. Olofsson, A. Larsson, S. Ronnberg, and M. Lundmark (2014), "Standards for Supraharmonics (2 to 150 kHz)", IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, vol. 3, pp. 114-118.
- [12] B. Sudiarto, A. N. Widyanto, and H. Hirsch (2014), "Current distortion characteristics of some home appliances in distorted voltage environment for frequency range of 2-150 kHz", IEEE Renewable Energy & Power Quality Journal, vol. 1, pp. 344-348, April 2014.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins (1989), Power Electronics - Converters, applications, and Design, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc.

- [16] J. A. Malack and J. E. Engstrom (1976), "RF impedance of United States and European power lines", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-18, no. 1, pp. 36-38.
- [17] 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.
- [18] Thủ tướng Chính phủ (2020), Chỉ thị số 20/CT-TTg về việc tăng cường tiết kiệm điện giai đoạn 2020 – 2025.