

STUDY ON THE IMPACT OF SOLAR ENERGY SYSTEMS ON DISTRIBUTION NETWORKS CONSIDERING HARMONIC DISTORTION EFFECTS

Nguyen Tran Thi My Xuan¹, Vo Pha Ga¹, Tran Huu Tinh^{1*}, Vo Ngoc Dieu²

¹Can Tho University of Technology, ²Ho Chi Minh University of Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	07/5/2025	This study focuses on evaluating the impact of photovoltaic power systems on the distribution network in the Ca Mau province area, with particular emphasis on harmonic distortion. The system model was developed and simulated using Etap software, considering various scenarios with different photovoltaic penetration levels ranging from 0% to 145%, different interconnection points, and actual operating conditions in Ca Mau. Harmonic analysis tools were employed to collect data on voltage total harmonic distortion and assess the extent of the impact. The results indicate that as the photovoltaic system output increases, the harmonic distortion levels at network buses also rise significantly, exceeding permissible limits in some cases. This may adversely affect electrical equipment and compromise system stability. Therefore, it is necessary to integrate harmonic filters and implement appropriate control strategies to mitigate the negative impacts of photovoltaic-generated harmonics on the distribution network.
Revised:	20/8/2025	
Published:	20/8/2025	
KEYWORDS		
Solar energy		
Power quality		
Harmonics		
Power system		
Etap software		

NGHIÊN CỨU TÁC ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI ĐẾN LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI XÉT ĐIỀU KIỆN ẢNH HƯỞNG SÓNG HẢI

Nguyễn Trần Thị Mỹ Xuân¹, Võ Pha Ga¹, Trần Hữu Tinh^{1*}, Võ Ngọc Diệu²

¹Trường Đại học Kỹ thuật - Công nghệ Cần Thơ, ²Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	07/5/2025	Nghiên cứu này tập trung đánh giá tác động của hệ thống điện năng lượng mặt trời đến lưới điện phân phối tại khu vực tỉnh Cà Mau, đặc biệt là ảnh hưởng đến sóng hài. Mô hình bài toán được xây dựng và mô phỏng trên phần mềm Etap, với các kịch bản khác nhau về tỉ lệ xâm nhập hệ thống điện năng lượng mặt trời khác nhau từ 0% đến 145%, vị trí đấu nối và điều kiện vận hành thực tế tại khu vực tỉnh Cà Mau. Phần mềm phân tích sóng hài được sử dụng để thu thập dữ liệu về độ méo dạng sóng hài điện áp và đánh giá mức độ ảnh hưởng. Kết quả cho thấy khi công suất từ hệ thống điện năng lượng mặt trời tăng lên, mức sóng hài tại các điểm nút trong lưới điện cũng gia tăng đáng kể, vượt ngưỡng cho phép trong một số trường hợp. Điều này có thể gây ảnh hưởng xấu đến thiết bị điện và độ ổn định hệ thống. Do đó, cần tích hợp các bộ lọc sóng hài và giải pháp điều khiển phù hợp nhằm giảm thiểu tác động tiêu cực của sóng hài từ nguồn điện năng lượng mặt trời đến lưới điện.
Ngày hoàn thiện:	20/8/2025	
Ngày đăng:	20/8/2025	
TỪ KHÓA		
Năng lượng mặt trời		
Chất lượng điện năng		
Sóng hài		
Hệ thống điện		
Phần mềm Etap		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12742>

* Corresponding author. Email: thtinh@ctu.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong bối cảnh ứng dụng năng lượng mặt trời (PV - Photovoltaic) vào lưới điện phân phối ngày càng được đẩy mạnh nhằm phát triển nguồn năng lượng sạch và bền vững, hiện tượng sóng hài phát sinh từ những bộ biến tần nối lưới của hệ thống PV đang trở thành một thách thức kỹ thuật. Nhiều nghiên cứu gần đây đã tập trung vào phân tích hiện tượng sóng hài và đề xuất những giải pháp nhằm giảm thiểu ảnh hưởng. Li và cộng sự [1] đề xuất chiến lược điều khiển hai chế độ cho biến tần PV nối lưới sử dụng máy biến áp tách đôi, giúp kiểm soát sóng hài tốt hơn khi hòa lưới trung tâm. Xiong và cộng sự [2] là một trong những tác giả đầu tiên phân tích chi tiết các thành phần sóng hài phát sinh từ biến tần PV nối lưới và đã đề xuất thiết kế bộ lọc thích ứng giúp giảm thiểu biến dạng điện áp gây ra bởi các thành phần sóng hài trong hệ thống phân phối. Gusai [3] đã thực hiện một đánh giá tổng hợp các phương pháp phân tích sóng hài, so sánh hiệu quả của các giải pháp kỹ thuật như bộ lọc chủ động và thụ động, làm cơ sở định hướng cho việc lựa chọn cấu hình lọc phù hợp theo từng ứng dụng cụ thể. Ahsan và cộng sự [4] làm rõ vai trò của phụ tải phi tuyến trong việc tạo ra và khuếch đại sóng hài trong mạng điện áp thấp, chỉ ra mối quan hệ chặt chẽ giữa đặc tính tải và sự cộng hưởng sóng hài trong mạng điện thực tế. Al-Sharif và cộng sự [5] đã tiến hành một nghiên cứu điển hình tại Saudi Arabia, phân tích sóng hài trong các hệ thống PV lớn nối lưới và đánh giá mức độ biến dạng điện áp tại nhiều vị trí trong mạng phân phối, bổ sung dữ liệu thực nghiệm còn thiếu trong các nghiên cứu trước. Trong khi Zhao [6] thực hiện phân tích chuyên sâu hiện tượng sóng hài và đánh giá hiệu quả của các bộ lọc, đặc biệt tập trung nghiên cứu khả năng ứng dụng trong các hệ PV thương mại và công nghiệp. Alaql [7] mở rộng nghiên cứu theo hướng phân tích chất lượng điện năng tổng thể, nhấn mạnh ảnh hưởng của các sóng hài bậc cao và đề xuất giải pháp giảm thiểu bằng các bộ lọc tích hợp vào hệ thống inverter. Yang Liu và cộng sự [8] đưa ra giải pháp điều khiển phối hợp nhằm giảm sóng hài bằng rộng trong biến tần PV. Dash và Sadhu [9] đã so sánh chi tiết giữa bộ lọc công suất chủ động và thụ động, chỉ ra ưu nhược điểm khi áp dụng trong hệ thống năng lượng tái tạo nối lưới, đặc biệt trong điều kiện phụ tải thay đổi nhanh. Mở rộng hệ thống lưới điện, Hernández-Mayoral và cộng sự [10] đã đánh giá toàn diện các vấn đề về chất lượng điện năng, chiến lược điều khiển và kỹ thuật tối ưu hóa, trong đó có hệ PV nối lưới, làm cơ sở cho việc tích hợp năng lượng tái tạo vào các hệ thống phân phối hiện đại.

Phần lớn các nghiên cứu hiện tại chủ yếu tập trung vào mô hình lý thuyết, đánh giá cục bộ từng thành phần như biến tần hoặc bộ lọc, hoặc sử dụng các dữ liệu giả định chung để phân tích tác động của sóng hài. Việc áp dụng số liệu thực tế từ hệ thống phân phối điện đang vận hành để mô phỏng và kiểm tra mức độ lan truyền của sóng hài theo các vị trí đầu nối khác nhau trong mạng, phân tích ảnh hưởng của từng cấp bậc sóng hài (5, 7, 11, v.v.) đến chất lượng điện năng trong lưới điện phân phối, thay vì chỉ xem xét méo dạng sóng hài điện áp (THD - Total Harmonic Distortion) tổng, đưa ra ngưỡng cảnh báo tích hợp PV theo từng vị trí nút tải cụ thể, phục vụ cho quy hoạch và vận hành thực tế. Nghiên cứu này mô phỏng các kịch bản vận hành điển hình của hệ thống PV nối lưới tại tỉnh Cà Mau bằng phần mềm Etap, từ đó xác định các vị trí nhạy cảm, có nguy cơ vượt chuẩn THD và đưa ra các giải pháp khắc phục.

2. Mô hình và phương pháp áp dụng

2.1. Mô hình bài toán

Hệ thống phân phối được tích hợp các nguồn PV theo mức tỉ lệ thâm nhập PV khác nhau. Tỉ lệ thâm nhập này là tỉ lệ thâm nhập phần trăm công suất PV so với một công suất cơ sở của hệ thống, được xác định theo công thức:

$$\%P_{Penetration} = \frac{P_{ac}}{P_{load}} \times 100\% \quad (1)$$

$$P_{ac} = P_{dc} \times \eta_{inverter} \quad (2)$$

$$P_{dc} = G \times S_{pin} \times \eta_{pin} \times N \quad (3)$$

Trong đó, P_{ac} là công suất đầu ra của biến tần, $\eta_{inverter}$ là hiệu suất biến tần, P_{dc} là công suất đầu ra của tấm pin, G là bức xạ mặt trời, S_{pin} là diện tích 1 tấm pin, N là tổng số tấm PV. Theo định nghĩa này thì tỉ lệ thâm nhập 100% là công suất PV xấp xỉ bằng công suất cơ sở, trong khi tỉ lệ trên 100% cho biết công suất PV vượt quá phụ tải địa phương, dẫn đến công suất dư thừa trả về lưới.

Trong quá trình mô phỏng, ban đầu giả thiết tỉ lệ thâm nhập PV tại các nút đầu nối bằng 0%. Mỗi trạm biến áp được đặt ngưỡng quá tải là 130% công suất định mức [11], [12]. Đây là giới hạn để xác định mức PV tối đa có thể tích hợp trước khi phân tử quá tải. Sau đó, tỉ lệ thâm nhập PV được tăng dần và kiểm tra điều kiện quá tải: nếu một trạm biến áp xuất hiện cảnh báo quá tải (vượt 130% định mức), tỉ lệ thâm nhập PV tại trạm đó sẽ được điều chỉnh giảm 5% theo phương trình.

$$\% P_{pen} = \% P_{pen} - 5\% \quad (4)$$

Mức thâm nhập PV tại trạm này sau khi điều chỉnh được giữ cố định ở mức an toàn (dưới 130% tải định mức). Kiểm tra tổn thất công suất tác dụng trên toàn lưới. Tiến hành tăng tỉ lệ thâm nhập PV với những trạm chưa bị quá tải lên 5%.

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(P_{Li} - P_{PVi})^2 + Q_{Li}^2}{U_i^2} \times r_{oi} \times L_i \right] + \left| \sum_{i=1}^m \Delta P_{trans_i} \right| \quad (5)$$

$$\Delta P_{trans} = \Delta P_0 + \left(\frac{S_L}{S_{dm}} \right)^2 \times \Delta P_n \quad (6)$$

Trong đó, ΔP là tổn thất công suất tác dụng toàn lưới, P_L là công suất tác dụng tải, P_{PV} là công suất đầu ra biến tần, Q là công suất phản kháng tải, U là điện áp nút, ΔP_{trans} là tổn thất trong máy biến áp, ΔP_0 là tổn hao không tải, S_L là công suất tải, S_{dm} là công suất định mức máy biến áp, ΔP_n là tổn hao ngắn mạch. Đặt lại những trạm chưa bị quá tải trên phần mềm Etap với:

$$\% P_{pen} = \% P_{pen} + 5\% \quad (7)$$

Quy trình điều chỉnh này được lặp lại cho đến khi tất cả các trạm đạt đến giới hạn thâm nhập. Cách tiếp cận này cho phép xác định mức thâm nhập PV tối ưu cho hệ thống, đảm bảo không phần tử nào bị quá tải, đồng thời tổn thất công suất tác dụng tương ứng ở từng bước tăng công suất PV.

2.2. Phân tích tỉ lệ xâm nhập bằng phương pháp Adaptive Newton – Raphson vào lưới điện phân phối

2.2.1. Phương pháp Adaptive Newton – Raphson

Phương pháp Adaptive Newton – Raphson (ANR) là một cải tiến của thuật toán Newton-Raphson cổ điển, được sử dụng để giải các hệ phương trình phi tuyến trong bài toán dòng công suất của hệ thống điện. Phương pháp ANR có khả năng hội tụ nhanh trong các hệ thống tuyến tính hoặc ít phi tuyến, thì hiệu quả của nó có thể bị suy giảm đáng kể khi được triển khai trên lưới điện phân phối có tích hợp PV, đặc biệt trong điều kiện xuất hiện các thành phần sóng hài do bộ nghịch lưu và tải phi tuyến gây ra. Trong nghiên cứu này, phương pháp ANR được áp dụng nhằm nâng cao độ chính xác và độ ổn định khi thực hiện phân tích dòng công suất trên lưới điện có ảnh hưởng của sóng hài. Điểm nổi bật của ANR là khả năng điều chỉnh linh hoạt hệ số bước lặp tại mỗi vòng lặp, dựa trên độ lớn sai số còn lại. Cơ chế này giúp thuật toán duy trì khả năng hội tụ ổn định trong môi trường phi tuyến mạnh và giảm thiểu hiện tượng hội tụ sai hoặc không hội tụ thường xảy ra khi sử dụng bước lặp cố định. Về mặt toán học, thuật toán ANR vẫn dựa trên nguyên lý cơ bản Newton-Raphson thực hiện gồm:

Bước 1: Xây dựng ma trận Jacobi dựa trên thông số kỹ thuật của hệ thống điện.

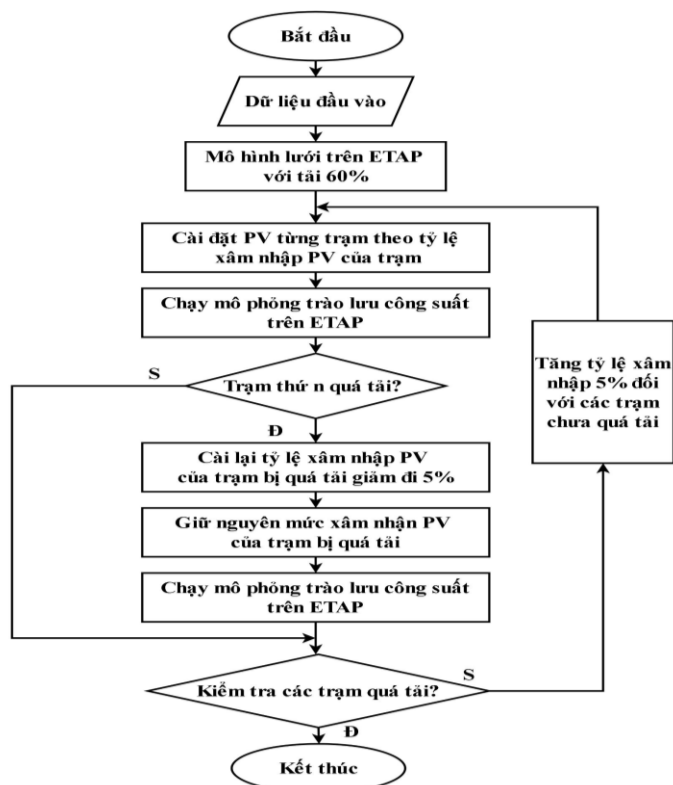
Bước 2: Giải hệ phương trình tuyến tính để tính toán các giá trị hiệu chỉnh điện áp.

Bước 3: Cập nhật điện áp tại các nút và kiểm tra điều kiện hội tụ dựa trên sai số.

Bước 4: Tiếp tục lặp cho đến khi sai số nhỏ hơn ngưỡng giới hạn cho phép [13].

Phương pháp ANR cho phép giải bài toán dòng công suất mở rộng, trong đó các thành phần bậc cao của điện áp và dòng điện được xem xét bên cạnh tần số cơ bản, từ đó cung cấp kết quả chính xác về phân bố điện áp, dòng điện và chỉ số tổng méo dạng sóng hài điện áp tại các nút.

2.2.2. Phân tích tỉ lệ xâm nhập của PV vào lưới điện phân phối



Hình 1. Lưu đồ giải thuật

Phương pháp ANR xác định tỉ lệ thâm nhập PV cho lưới phân phối tình trạng tải vận hành thực tế trên lưới điện là 60% công suất đặt, quyết định lấy trường hợp này làm trường hợp để xác định tỉ lệ thâm nhập PV của lưới với ràng buộc là gây quá tải trạm biến áp được tiến hành được thể hiện ở lưu đồ Hình 1 và thực hiện các bước như sau:

Bước 1: Thu thập những số liệu của lưới. Lấy số liệu phụ tải của những trạm biến áp tương ứng: Số liệu được thu thập ở đây dữ liệu về tải thực tế tại Điện lực Cà Mau.

Bước 2: Thực hiện mô hình hóa số liệu phụ tải trong Etap. Mô hình hóa lưới điện trên phần mềm Etap với trường hợp vận hành thực tế những trạm biến áp tại phát tuyến 475CM với phụ tải 60%, bức xạ nhận được của những tấm PV là cực đại.

Bước 3: Tiến hành cài đặt các tấm PV theo tỉ lệ thâm nhập tương ứng trên phần mềm Etap.

Bước 4: Tiến hành chạy mô phỏng trào lưu công suất trên Etap: Trào lưu công suất trong phần mềm Etap được tính dựa theo phương pháp ANR.

Bước 5: Kiểm tra báo cáo quá tải ở từng trạm tương ứng.

Bước 6: Cài đặt lại tỉ lệ thâm nhập PV của trạm bị quá tải trên Etap.

Bước 7: Giữ nguyên tỉ lệ thâm nhập PV này cho trạm đã bị quá tải trong suốt quá trình về sau.

Bước 8: Tiến hành chạy mô phỏng trào lưu công suất theo miền thời gian trên Etap sau khi cài đặt lại những trạm bị báo quá tải.

Bước 9: Kiểm tra tổn thất công suất tác dụng trên toàn lưới. Tiến hành tăng tỉ lệ thâm nhập PV với những trạm chưa bị quá tải lên 5%.

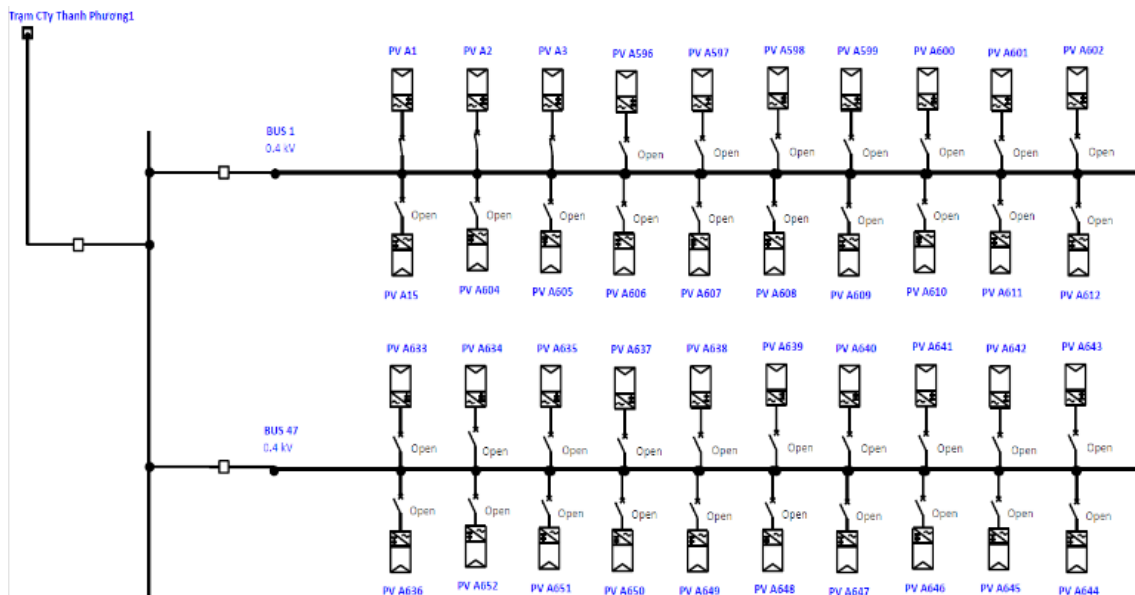
Bước 10: Cài đặt lại những trạm chưa bị quá tải trên phần mềm Etap.

Bước 11: Đưa ra kết luận tỉ lệ thâm nhập PV tối ưu cho hệ thống.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Hệ thống tính toán

Lưới điện khu vực trung tâm thành phố Cà Mau được cung cấp điện từ hai phát tuyến trạm 110 kV Cà Mau và trạm 110 kV An Xuyên với công suất cực đại là 197.869 kVA. Quy mô PV nối lưới tại trung tâm thành phố Cà Mau tính tới tháng 4 năm 2024 có công suất cực đại là 24.708 kW so với nguồn định mức và sản lượng phát lên lưới trong tháng 4 năm 2024 là 3031.006 kW, chiếm tỉ lệ 12%. Lộ ra trạm 110kV Cà Mau được chia làm 02 thanh cái tổng là thanh cái 431CM và 432CM và lộ ra trạm 110kV An Xuyên chia làm 02 thanh cái tổng là thanh cái 431AX và 432AX, mỗi thanh cái chia ra làm nhiều phát tuyến. Nguồn điện PV của khu vực trung tâm thành phố Cà Mau được tập trung cao nhất ở phát tuyến 478AX do tuyến này về số lượng khách hàng có tất cả 29 khách hàng PV, xếp thứ 9 trong tổng số 12 tuyến nhưng có công suất cực đại PV là 5.354 kW cao nhất trong 12 tuyến.

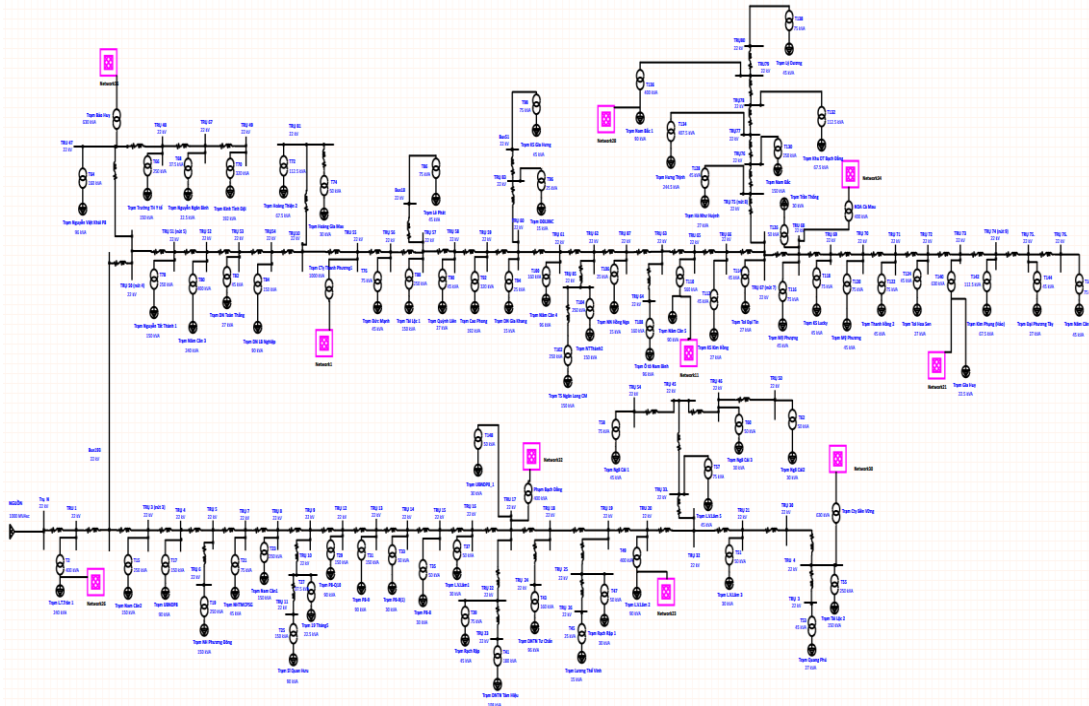


Hình 2. Hệ thống PV trên phần mềm Etap (Trạm Công ty Thanh Phương 1)

Bảng 1. Công suất tại các vị trí đấu nối PV

Trạm biến áp	Công suất		Vị trí
	kVAr	kW	
Công ty Thanh Phương 1	1000	990	55
Bảo Huy	630	623	47
Công ty TNHH Bền Vững	630	550	4
Gia Huy	630	500	73
Hộ NLMT Phạm Bạch Đằng	400	200	17
Công ty TNHH MTV DNA Cà Mau	400	120	68
Lý Văn Lâm 2	400	150	20
Năm Căn 5	560	256	65
Công ty TNHH Nam Bắc	400	100	79
Khách hàng phân tán	400	142	1
Tổng	5450	3631	

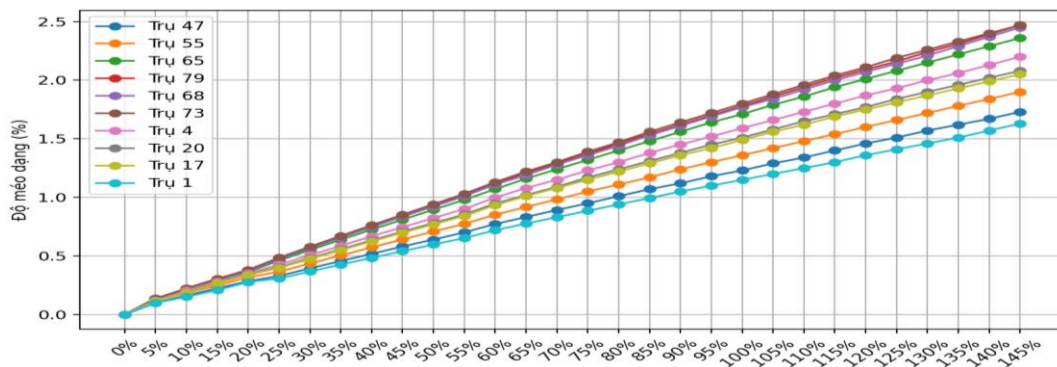
Hệ thống PV nổi lưới: Trên phát tuyến có tổng cộng 86 khách hàng có hệ thống PV nổi lưới với công suất cực đại 3.631 kW. Các trạm có điện mặt trời đầu nổi được trình bày ở Bảng 1. Và mô phỏng các hệ thống PV tại Trạm Công ty Thanh Phương 1 thể hiện ở Hình 2. Mô hình tuyến 475CM 22 kV và hệ thống điện mặt trời đầu nổi thể hiện ở Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ đơn tuyến lưới điện và vị trí xâm nhập

3.2. Đánh giá tác động lên sóng hài

Sau khi chạy phân bố công suất trên phần mềm Etap với các tỉ lệ xâm nhập của PV từ 0% đến 145%, nghiên cứu thu được giá trị sóng hài tại các nút đầu nối PV như Hình 4.



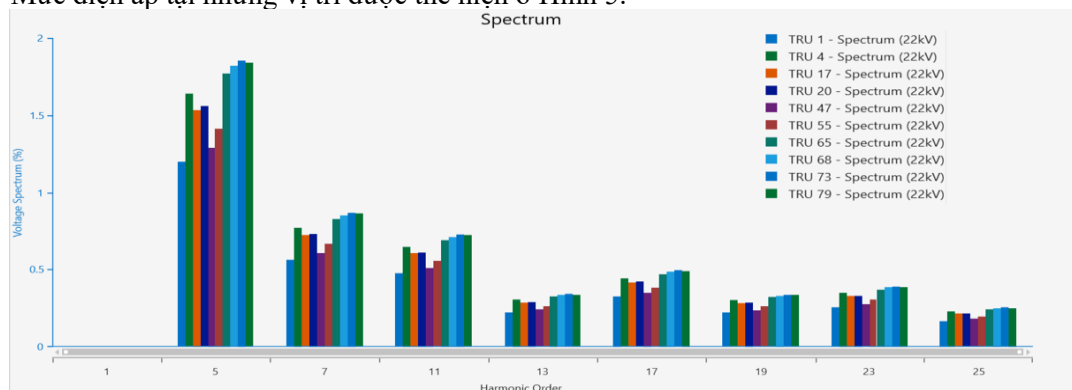
Hình 4. Sóng hài tại các trụ theo tỷ lệ xâm nhập PV

Xu hướng chung: Khi tỷ lệ xâm nhập PV tăng, độ méo dạng sóng hài tại các trụ cũng tăng. Điều này phản ánh thực tế rằng khi lượng PV kết nối vào lưới tăng, hiện tượng sóng hài cũng trở nên rõ rệt hơn do các bộ biến tần tạo ra nhiều hài. Các vị trí như 79, 73, 68 có độ méo dạng cao hơn so với các vị trí còn lại – điều này cho thấy vị trí hoặc điều kiện kết nối của các trụ này làm chúng nhạy cảm hơn với tác động của sóng hài. Vị trí 1 và 17 có độ méo dạng thấp nhất – cho thấy chúng ít chịu ảnh hưởng hơn khi tỷ lệ xâm nhập PV tăng.

Các vị trí còn lại 4, 20, 47, 55, 65 nằm ở mức trung bình - có xu hướng tăng theo tỷ lệ xâm nhập PV, nhưng không vượt quá mức cảnh báo. Tuy nhiên, tại ngưỡng 120 - 145%, một số vị trí đã tiệm cận $THD \geq 2\%$, điều này cần được xem xét khi quy hoạch công suất PV trong tương lai.

Đáng chú ý: Tại mức xâm nhập 100%, độ méo dạng tại các vị trí dao động khoảng 1,5% đến hơn 2%, trong đó một số vị trí đã tiệm cận ngưỡng 2,5% ở mức 140% - là ngưỡng có thể vi phạm tiêu chuẩn theo EN 50160, IEC/TR 61000-2-2.

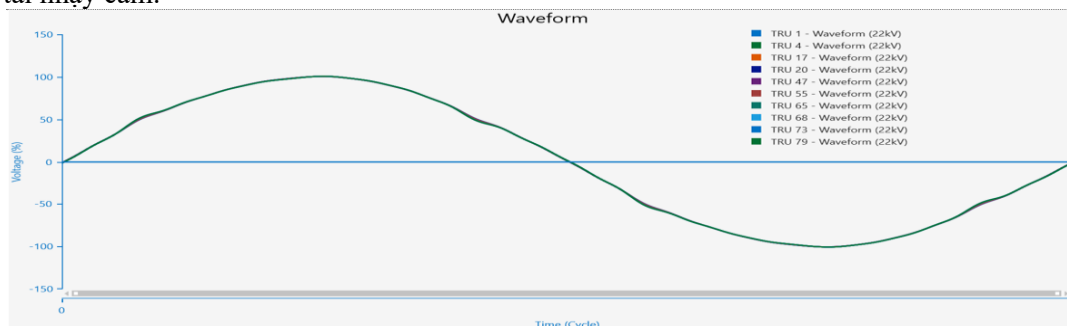
Mức điện áp tại những vị trí được thể hiện ở Hình 5.



Hình 5. Phổ sóng hài tại những vị trí đầu nối PV khi tỷ lệ xâm nhập là 145%

Phân tích phổ sóng hài thấy được:

- Mức độ sóng hài: Nhìn chung, mức độ sóng hài tại những vị trí đầu nối PV tương đối cao.
- Sóng hài bậc 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25: Đây là những sóng hài phổ biến nhất và có biên độ cao nhất. Sóng hài bậc 5 và 7 có biên độ lớn nhất – phổ biến trong hệ thống do biến tần PV gây ra. Một số trụ có vị trí bậc 5 gần 2%, đáng lưu ý vì có thể ảnh hưởng đến chất lượng điện năng. Vị trí 73, 79 có biên độ sóng hài cao hơn ở nhiều bậc, cho thấy đây là vị trí chịu ảnh hưởng rõ nhất từ sóng hài. Các bậc từ 13 đến 25 đều có giá trị thấp (dưới 0,6%), tuy nhiên cần xem xét khi có tải nhạy cảm.



Hình 6. Dạng sóng điện áp khi tỷ lệ xâm nhập là 145%

Độ méo dạng THD thu được từ kết quả chạy Harmonic Analysis của xuất tuyến 475CM trong những trường hợp vận hành với tỷ lệ điện mặt trời xâm nhập từ 0% đến 145% đều nằm trong giới hạn cho phép theo quy định [14], [15]. Tuy nhiên, ta nhận thấy độ méo dạng THD tăng lên theo công suất của hệ thống mặt trời tích hợp. Nếu công suất tích hợp tiếp tục tăng thì khả năng méo dạng sóng điện áp vượt ngưỡng là rất cao và cần được xem xét kỹ lưỡng.

Sử dụng phần mềm mô phỏng trên Etap với dữ liệu thực tế tại lưới điện Cà Mau, kết quả cho thấy sự gia tăng tỷ lệ xâm nhập PV vào lưới điện phân phối làm tăng đáng kể độ méo dạng THD, đặc biệt tại những vị trí nhạy cảm như 73 và 79. Sóng hài bậc 5 và 7 là thành phần chủ yếu, gây biến dạng điện áp rõ rệt khi tỷ lệ tích hợp PV vượt 100%. Dù THD vẫn trong giới hạn cho phép, xu hướng tăng nhanh theo công suất PV tích hợp cảnh báo nguy cơ vượt ngưỡng trong tương lai nếu không có biện pháp kiểm soát.

4. Kết luận

Nghiên cứu chỉ ra rằng việc kết nối hệ thống PV vào lưới điện phân phối mang lại nhiều lợi ích, như cung cấp nguồn năng lượng tái tạo và giảm tải cho lưới điện truyền thống. Tuy nhiên, nó cũng đặt ra các vấn đề về chất lượng điện, đặc biệt là hiện tượng sóng hài. Kết quả phân tích cho thấy sự khác biệt đáng kể trong mức độ ảnh hưởng của sóng hài tại các điểm kết nối, phụ thuộc vào chế độ vận hành và vị trí trong hệ thống lưới. Ngoài ra, nghiên cứu đã đánh giá định lượng tác động của các mức thâm nhập PV đến chất lượng điện năng, đồng thời xác định những vị trí dễ bị ảnh hưởng bởi sóng hài. Các cảnh báo kỹ thuật về ngưỡng tích hợp PV nhằm đảm bảo tổng méo hài không vượt tiêu chuẩn cũng được đưa ra. Những phát hiện này cung cấp nền tảng quan trọng cho các nhà quản lý và đầu tư, hỗ trợ phát triển năng lượng tái tạo một cách bền vững và áp dụng hiệu quả cho các hệ thống lưới điện phức tạp hơn.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Kỹ thuật - Công nghệ Cần Thơ và Trường Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện thuận lợi về thời gian và nguồn lực để nhóm hoàn thành nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. Li, X. Zhang, Z. Guo, J. Wang, and F. Li, "The dual-mode combined control strategy for centralized photovoltaic grid-connected inverters based on double-split transformers," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 12, pp. 12322–12330, 2020.
- [2] L. Xiong, M. Nour, and E. Radwan, "Harmonic analysis of photovoltaic generation in distribution network and design of adaptive filter," *Int. J. Comput. Digit. Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 77–85, 2020.
- [3] A. Gusai, "Harmonic Analysis in PV Connected Power System," *Int. J. Eng. Res.*, vol. V9, no. 08, pp. 474–477, 2020.
- [4] S. M. Ahsan, H. A. Khan, A. Hussain, S. Tariq, and N. A. Zaffar, "Harmonic analysis of grid-connected solar PV systems with nonlinear household loads in low-voltage distribution networks," *Sustain.*, vol. 13, no. 7, pp. 1–21, 2021.
- [5] Y. M. Al-Sharif, G. M. Sowilam, and T. A. Kawady, "Harmonic Analysis of Large Grid-Connected PV Systems in Distribution Networks: A Saudi Case Study," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/8821192.
- [6] K. Zhao, "Grid-Connected PV System Harmonic Analysis," *MATEC Web of Conferences*, vol. 404, pp. 1–8, 2024.
- [7] M. A. Alaqil, "Harmonic Analysis of Power Quality in Grid-Connected Solar Photovoltaic (PV) Systems," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 48, no. 4, pp. 2–11, 2024.
- [8] Y. Liu *et al.*, "Coordinated mitigation control for wideband harmonic of the photovoltaic grid-connected inverter," *Applied Sciences* vol. 13, no. 13, 2023, Art. no. 7441.
- [9] D. K. Dash and P. K. Sadhu, "A Review on the Use of Active Power Filter for Grid-Connected Renewable Energy Conversion Systems," *Processes*, vol. 11, no. 5, pp. 1–24, 2023.
- [10] E. Hernández-Mayoral, "A Comprehensive Review on Power-Quality Issues, Optimization Techniques, and Control Strategies of Microgrid Based on Renewable Energy Sources," *Sustainability*, vol. 15, no. 12, pp. 1–32, 2023.
- [11] Ministry of Industry and Trade of the Socialist Republic of Vietnam "Circular No. 28/2014/TT-BCT: Technical regulations on the operation of power distribution systems," 2014, pp. 8–44.
- [12] Ministry of Industry and Trade of the Socialist Republic of Vietnam "Circular No. 31/2019/TT-BCT: Amendments to Circular," 2019, pp. 1–14.
- [13] C. Zhu *et al.*, "Optimization, validation and analyses of a hybrid PV-battery-diesel power system using enhanced electromagnetic field optimization algorithm and ε -constraint," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 5335–5349, 2024.
- [14] Ministry of Industry and Trade of the Socialist Republic of Vietnam, "Circular No. 39/2015/TT-BCT: Regulations on power quality," 2015, p. 6.
- [15] Ministry of Industry and Trade of the Socialist Republic of Vietnam, "Circular No. 39/2022/TT-BCT: Amendments to Circular," 2023, pp. 104–116.