

PHÂN TÍCH LAN TRUYỀN SÓNG HÀI TRONG LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI CÓ TÍCH HỢP ĐIỆN MẶT TRỜI PHÂN TÁN

ANALYSIS OF HARMONIC PROPAGATION IN MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS WITH INTEGRATION OF DISTRIBUTED SOLAR PHOTOVOLTAICS

Nguyễn Phúc Huy

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 16/02/2024, Ngày chấp nhận đăng: 08/4/2024, Phản biện: PGS. TS. Phạm Văn Hòa

Tóm tắt:

Bài báo đã phân tích nguy cơ xuất hiện các điểm cộng hưởng tần số bậc cao trong lưới điện phân phối trung áp có tích hợp các nguồn điện mặt trời (PV). Mô hình mô phỏng và tính toán lưới điện phân phối đã được xây dựng cho một lưới điện cụ thể trên phần mềm ETAP. Sử dụng công cụ Harmonic analysis phân tích một số trường hợp vận hành cụ thể cho thấy sóng hài đặc tính của dòng điện phát sinh từ các inverter của các PV lan truyền khắp lưới điện làm tăng cao biên độ điện áp hài bậc 5 và 7. Ảnh hưởng lan truyền sóng hài lớn hơn khi PV kết nối về phía cuối lưới, và đặc biệt là trong chế độ PV phát lớn mà phụ tải tiêu thụ thấp điểm thì lan truyền sóng hài gây ảnh hưởng càng lớn hơn.

Từ khóa:

Điện mặt trời, sóng hài, lan truyền sóng hài, lưới điện phân phối, ETAP.

Abstract:

The paper conducted an analysis of the risk of high-order frequency resonance in the medium-voltage distribution network with integration of solar photovoltaics (PV). The model of an identified distribution network was simulated and calculated in ETAP. Applying Harmonic analysis tool in ETAP to analyse specific operational cases showed that characteristic harmonic current generated from the PVs' inverters propagating throughout the grid caused harmonic voltages to rise in amplitude at 5th and 7th order. The harmonic propagation effect is greater when the PV is connected towards the end of the grid, and especially in PVs' high power generation mode where the load is low consumption, harmonic propagation has a much greater effect.

Keywords:

Solar photovoltaics, harmonic, harmonic propagation, distribution networks, ETAP.

1. MỞ ĐẦU

Phát điện từ các nguồn năng lượng tái tạo đang là xu hướng chủ đạo trên thế giới, tiến tới giảm thiểu sự phụ thuộc vào các nguồn năng lượng hóa thạch. Ở Việt Nam

theo Quy hoạch điện VIII tỉ trọng nguồn năng lượng tái tạo (gió, mặt trời, sinh khối) tăng 30,9-39,2% vào năm 2030 [1]. Sự phát triển các nguồn điện mới từ năng lượng tái tạo đem lại nhiều lợi ích bền

vững về môi trường, giảm áp lực đối với các nguồn điện truyền thống (thủy điện, nhiệt điện,...) cũng kéo theo nhiều ảnh hưởng tới hệ thống điện.

Trong phân khúc lưới điện phân phối, các nguồn điện sử dụng năng lượng tái tạo như điện gió, điện mặt trời, điện sinh khối... có công suất nhỏ được kết nối gần hơn với phụ tải điện, chúng được gọi chung là nguồn điện phân tán (DG) [2]. Sự phân bố rải rác của các nguồn này trong lưới điện dẫn tới sự phân bố và chiều công suất thay đổi, kéo theo những thay đổi về tổn thất, khả năng tải và các vấn đề về chất lượng điện năng [2]-[4]. Đối với các DG kết nối qua các bộ biến đổi điện tử công suất như điện gió, điện mặt trời sẽ bơm sóng hài dòng điện vào trong lưới điện [5]. Giới hạn về mức phát sinh sóng hài tại các nút trên lưới điện sẽ dẫn tới sự giới hạn về công suất phát của DG [6], và do đó mức độ nhiễu sóng hài thường được quy định trong các tiêu chuẩn và qui định cụ thể [7], [8]. Ngoài ra, sóng hài lan truyền trong lưới điện có thể tăng cao ở nhiều vị trí, đặc biệt khi lưới điện có kết nối các bộ tụ bù công suất phản kháng thì mức tăng có thể lớn do xuất hiện cộng hưởng ở nhiều tần số [9].

Bài báo sẽ trình bày phương pháp mô hình hóa lưới điện trong nghiên cứu sóng hài, tiến hành nghiên cứu phương thức lan truyền của sóng hài trong lưới điện phân phối trung áp có tích hợp điện mặt trời. Với lưới điện thực tế được sử dụng trong

nghiên cứu với tỉ lệ tích hợp PV nhất định, các vấn đề về lan truyền sóng hài và điện áp hài tại các nút trên lưới điện sẽ được phân tích kỹ.

2. SÓNG HÀI TỪ PV VÀ LAN TRUYỀN SÓNG HÀI TRONG LƯỚI ĐIỆN

2.1. Mô hình hóa trong mô phỏng

2.1.1. Mô hình hóa lưới điện

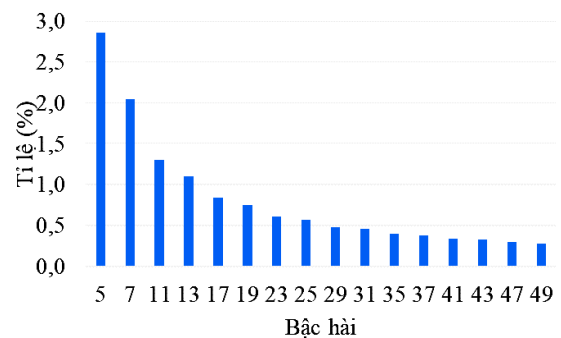
Lưới điện phân phối trong nghiên cứu bao gồm nguồn hệ thống điện, đường dây phân phối, trạm biến áp phân phối, phụ tải điện... Sơ đồ thay thế của nguồn hệ thống là sơ đồ Thevenin nguồn áp nối tiếp tổng trở tương đương. Đường dây và máy biến áp được thay thế bằng các sơ đồ thông số tập trung hình π , trong khi đối với phụ tải điện, đa số các nghiên cứu đều chỉ ra mô hình phụ tải tuyến tính của CIGRE là phù hợp nhất cho bài toán phân tích sóng hài [10], [11]. Các phần tử trong sơ đồ là điện trở đặc trưng cho quá trình phát nóng, thất thoát dưới dạng nhiệt do hiệu ứng Joule, điện cảm và điện dung đặc trưng cho quá trình từ hóa và trao đổi điện năng. Điện trở được mô tả là không đổi theo tần số, tuy nhiên với máy phát điện hoặc máy biến áp vẫn có thể xét tới sự thay đổi theo tần số theo quan hệ $\mathbf{R}_{h(g/T)} = R\sqrt{h}$ với R là giá trị điện trở ở tần số cơ bản. Trong khi đó cảm kháng và dung kháng có thay đổi theo tần số như $\mathbf{X}_{hL} = h\mathbf{X}_L$ và $\mathbf{X}_{hC} = \frac{\mathbf{X}_C}{h}$, trong đó h là bậc sóng hài, $\mathbf{X}_L$ và $\mathbf{X}_C$ là giá trị cảm kháng và dung kháng ở tần số cơ bản của lưới điện.

2.1.2. Nguồn phát sinh sóng hài

Sóng hài trên lưới điện có thể được sinh ra từ nhiều nguồn khác nhau bởi các phần tử phi tuyến và phụ tải phi tuyến. Trong đó, đối với các PV kết nối với lưới điện thông qua các bộ biến đổi DC/AC sẽ làm phát sinh sóng hài dòng điện bơm vào lưới do đặc tính cố hữu của các thiết bị điện tử công suất. Trên thị trường hiện nay, các bộ biến đổi được sử dụng trong kết nối PV với lưới điện là bộ nghịch lưu nguồn áp (VSI) sử dụng các van bán dẫn IGBT. Các VSI làm việc với chế độ điều khiển theo dòng điện là chủ yếu, do đó sẽ ảnh hưởng trực tiếp tới dòng điện hài bơm vào lưới [12]. Các cấu hình bộ biến đổi sử dụng chủ yếu là loại hai mức (two-level) và ba mức (three-level) điện áp, quá trình đóng mở các van được thực hiện bằng kỹ thuật PWM. Với bộ biến đổi 6 xung (6 pulse converter) phổ biến, sóng dòng điện đầu ra sẽ bao gồm các thành phần hài có các bậc $h = 6n \pm 1$ ($n=1, 2, 3, \dots$) [12] – [14]. Kết quả thực nghiệm trong [12] cũng chỉ ra rằng phần lớn sóng hài xuất hiện là bậc 5, 7, 11, 13, ... Với các bộ biến đổi có PWM với tần số sóng mang lớn, số xung đóng cắt tăng lên sẽ làm sóng hài có bậc cao tập trung xung quanh giá trị là bội số của tần số sóng mang [15].

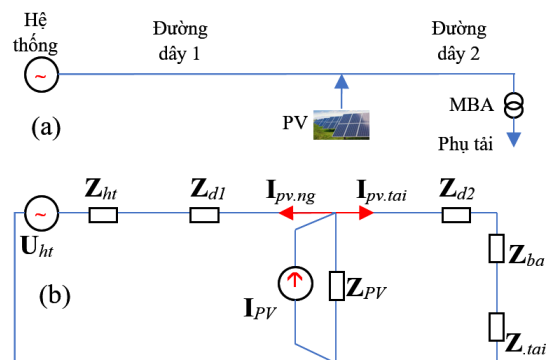
Với tính chất của lưới điện dùng trong nghiên cứu này, chưa có nguồn dữ liệu đo

đặc thực tế mức độ phát sinh sóng hài của điện mặt trời tại các điểm kết nối chung (PCC), tuy nhiên kết quả kiểm định sóng hài của Inverter được sử dụng trên lưới [16] và catalogue của nhiều hãng cung cấp thiết bị thì tổng độ méo sóng hài của bộ biến đổi không quá 3%, vì vậy trong mô phỏng nguồn sóng hài dòng điện từ PV có phổ hài điển hình của inverter 6 xung như Hình 1.



Hình 1. Dạng phổ sóng hài đầu ra bộ biến đổi 6 xung

2.2. Mô hình lan truyền sóng hài



Hình 2. Mô hình cơ bản trong nghiên cứu lan truyền sóng hài

Với tính chất của lưới điện phân phối chủ yếu hình tia hoặc kín vận hành hở, sơ đồ

minh họa cho phương pháp thể hiện như trên Hình 2 với nguồn lưới điện là sin chuẩn, phụ tải tuyến tính và PV phát sinh sóng hài.

Sóng hài dòng điện từ PV được bơm vào lưới điện sẽ được truyền ngược về phía nguồn ($I_{pv.ng}$) và xuôi xuống phía tải ($I_{pv.tai}$) cuối lưới điện, gây ra sóng hài điện áp. Mỗi quan hệ giữa các thành phần dòng điện trong Hình 2 được mô tả như (1).

$$\begin{cases} I_{PV} = I_{pv.ng} + I_{pv.tai} \\ I_{pv.tai} = I_{PV} \frac{Z_{ht} + Z_{d1}}{Z_{\Sigma}} \end{cases} \quad (1)$$

trong đó: Z_{d1} và Z_{d2} là tổng trở của các đoạn đường dây; Z_{ba} là tổng trở của MBA phân phối và Z_{tai} là tổng trở phụ tải; và $Z_{\Sigma} = Z_{ht} + Z_{d1} + Z_{d2} + Z_{ba} + Z_{tai}$.

Từ (1) có thể thấy, nếu tổng trở của hệ thống là không đổi ($Z_{ht} = \text{const}$) và không xét ảnh hưởng của tổng trở PV (Z_{PV}), sóng hài phát sinh từ PV sẽ lan truyền phụ thuộc chủ yếu vào kết cấu đường dây và khoảng cách kết nối PV (tức Z_{d1} và Z_{d2}), máy biến áp (tức Z_{ba}) và công suất phụ tải điện (tức Z_{tai}).

Đối với thành phần sóng hài dòng điện trên các nhánh, mức độ lan truyền có thể đánh giá thông qua hệ số lan truyền về dòng điện hài ($T_i(h)$) từ các PV như sau:

$$T_i(h) = \frac{I_i(h)}{\sum I_{PVj}(h)} \quad (2)$$

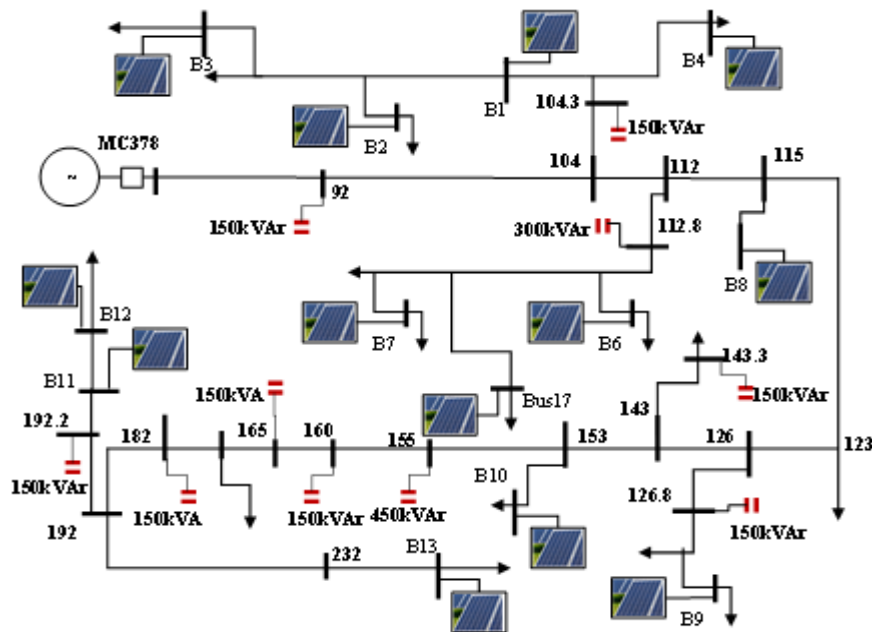
trong đó $I_i(h)$ và $I_{PVj}(h)$ là dòng điện hài bậc h tại nhánh i được sinh ra do lan truyền sóng hài bậc h từ các PVj.

3. TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

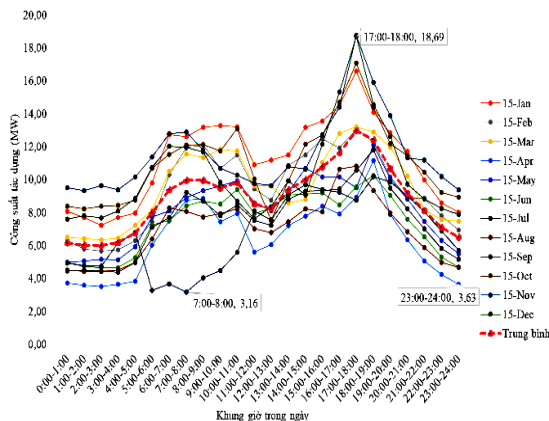
3.1. Xuất tuyến 378- E17.2 Sơn La

Xuất tuyến 378-E17.2 Sơn La thuộc quyền quản lý của Điện lực Mai Sơn, Công ty Điện lực Sơn La. Tổng chiều dài toàn bộ xuất tuyến là 217 km, với hơn 200 trạm biến áp phân phối 35/0,4 kV. Dây dẫn được sử dụng trên lưới là dây nhôm lõi thép với các cấp dây đường trục là AC-95, đường nhánh là AC-70 và AC-50. Trên lưới điện có đầu nối các bộ tụ bù công suất phản kháng 3 pha với các gam công suất 150 kVAR và 300 kVAR để cải thiện điện áp và tổn thất [16]. Sơ đồ rút gọn của xuất tuyến với các đường trục và nhánh có thể hiện các vị trí kết nối PV theo qui hoạch được thể hiện như Hình 3.

Biểu đồ phụ tải ngày hàng tháng trong năm 2020 của xuất tuyến (Hình 4) có hai thời điểm cực đại sáng - tối. Công suất lớn nhất có thể đạt 21 MW vào cao điểm tối, trong khi khoảng thời gian giữa trưa công suất giảm thấp. Tình hình bù công suất phản kháng trong các trạm biến áp phân phối cũng được quan tâm, đảm bảo hệ số công suất đạt mức yêu cầu từ 0,9 trở lên.



Hình 3. Cấu trúc lưới điện trong nghiên cứu



Hình 4. Phụ tải xuất tuyến 378-E17.2 (năm 2020)

Ở thời điểm khảo sát, các nguồn điện mặt trời (PV) kết nối lên xuất tuyến 378-E17.2 có tổng công suất đặt ~15000 kWp với công suất mỗi trạm từ 630 kWp tới 1980 kWp phân bố khá đồng đều trên lưới. Đối với khu vực Sơn La, cường độ bức xạ mặt trời lớn nhất là trong tháng 7 và tháng 8 với hơn 1 kW/m² [17]. Khi đó, với mức phát lớn nhất của PV mức thâm nhập lên

tới ~60%, trong khi xét ở điều kiện bức xạ mặt trời thấp thì tỉ lệ đó khoảng 17%.

3.2. Mô tả kịch bản nghiên cứu

Với đặc điểm lưới điện như trên kết hợp với cường độ bức xạ mặt trời (Ir) theo các thời điểm trong ngày, các kịch bản mô phỏng được xây dựng tương ứng như sau:

- TH1: $P_{\text{tải.max.sáng}}=12 \text{ MW}$; $I_{\text{r}}=700 \text{ W/m}^2$;
- TH2: $P_{\text{tải.max.chiều}}=21\text{MW}$; $I_{\text{r}}=700 \text{ W/m}^2$;
- TH3: $P_{\text{tải.min.trưa}}=6 \text{ MW}$; $I_{\text{r}}=1000 \text{ W/m}^2$;
- TH4: $P_{\text{tải.min.sc}}=6 \text{ MW}$; $I_{\text{r}}=200 \text{ W/m}^2$.

Xuất tuyến được mô phỏng trên phần mềm ETAP với module Harmonic Analysis trong phân tích. Kỹ thuật quét tần số được sử dụng để xác định được đặc tính tổng trở - tần số tại các nút có nguy cơ cộng hưởng là các vị trí đầu nối tụ bù công suất phản kháng. Kết quả mô phỏng

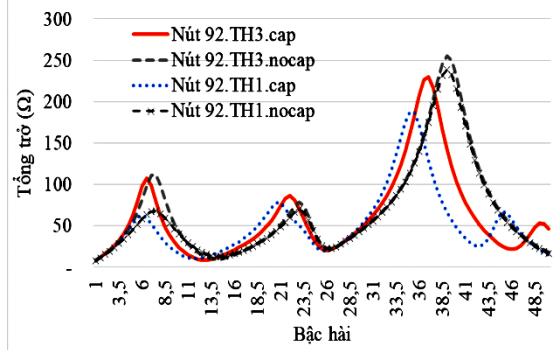
được sử dụng để tính toán hệ số lan truyền sóng hài dòng điện các nhánh do dòng điện hài từ các PV trên lưới gây ra.

3.3. Kết quả mô phỏng và phân tích

3.3.1. Phân tích các điểm cộng hưởng

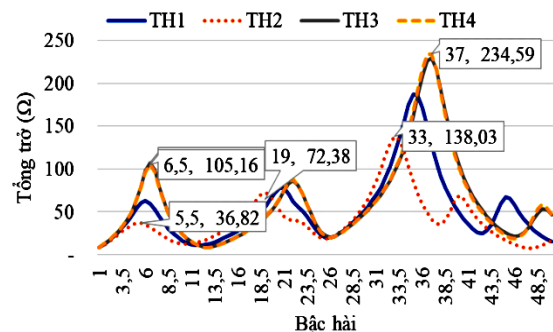
Từ Hình 4 có thể thấy có nhiều điểm bù công suất phản kháng rải khắp lưới điện nhưng tập trung nhiều ở nửa cuối xuất tuyến. Để khảo sát, ta lựa chọn các điểm đầu nối tụ bù và xét trong các TH1 và TH3 với sự thay đổi nhiều về phụ tải và bức xạ mặt trời. Rõ ràng thấy có nhiều điểm cộng hưởng ở nhiều tần số khác nhau. Với sự xuất hiện của các tụ điện, điểm cộng hưởng có xu hướng dịch chuyển về phía tần số thấp hơn; độ lớn tổng trở cộng hưởng gần như không thay đổi ở phạm vi sóng hài bậc thấp (từ bậc ~5 tới ~7), hoặc giảm đi ở phạm vi các sóng hài bậc cao. Do tính chất của đường dây phân phối có $X/R = 2 \div 4$ nên vị trí tụ điện làm dịch chuyển không nhiều điểm cộng hưởng (tức có thể đặt nhiều nơi mà không ảnh hưởng tới cộng hưởng).

Các điểm cộng hưởng xuất hiện phụ thuộc nhiều vào phụ tải của lưới điện, mà ít phụ thuộc vào chế độ công suất phát của PV. Khi công suất phụ tải trên lưới điện giảm, điểm cộng hưởng có xu hướng dịch chuyển lên các tần số lớn hơn, như cộng hưởng ở tần số hài bậc ~5 trong TH2 (tải 21 MW) được dịch chuyển tới cộng hưởng ở tần số hài bậc ~7 ở các mức tải thấp hơn 6 MW và 12 MW (Hình 6).



Hình 5. Đặc tính tổng trở-tần số tại nút 92 trong các trường hợp có tụ bù (cap), và không có tụ bù (nocap)

Dễ thấy cộng hưởng song song xuất hiện quanh các tần số tương ứng với sóng hài có bậc 5, 7, 19, 21, 33, 37. Trong số đó, điểm cộng hưởng gần sóng hài bậc 5, 7 cần phải chú ý vì sẽ có sự gia tăng tương ứng của thành phần sóng hài điện áp.

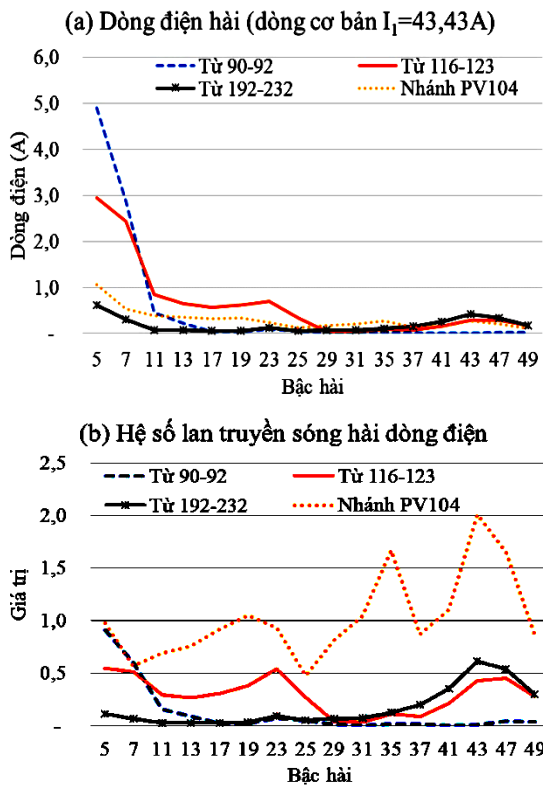


Hình 6. Đặc tính tổng trở - tần số tại nút 92 trong các trường hợp mô phỏng

3.3.2. Lan truyền sóng hài trong xuất tuyến

Sóng hài được sản sinh từ các Inverter của PV sẽ lan truyền đến các điểm trên lưới điện, ảnh hưởng tới lưới điện phía sau điểm kết nối và hướng ngược trở lại về phía đầu xuất tuyến [18]. Để thấy rõ hơn sự lan truyền và ảnh hưởng, ta đi xét trường hợp nặng nề nhất khi các inverter

của PV phát sinh các sóng hài cùng loại và trùng pha nhau. Tiến hành chạy Harmonic Analysis, trích xuất dữ liệu và phân tích cho từng trường hợp cụ thể với hệ số lan truyền dòng điện hài được tính như (2).

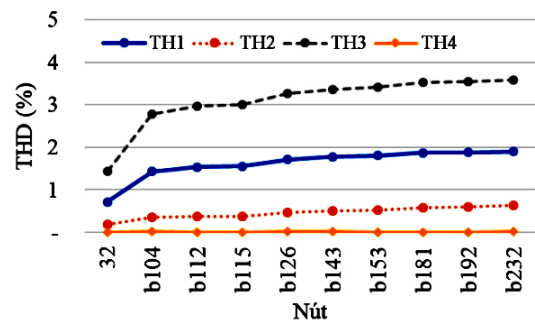


Hình 7. Sóng hài dòng điện các nhánh trong TH1

Hình 7 cho kết quả sau khi tính toán hệ số lan truyền sóng hài dòng điện từ PV tới các đoạn đường dây. Lựa chọn đoạn đầu nhánh kết nối nhiều PV (nhánh PV104 – sau nút 104 có 04 PV kết nối), các đoạn phía đầu lưới điện, giữa lưới điện, và phía cuối sau các PV. Quan sát trên Hình 7 có thể thấy, với nhánh PV104, ảnh hưởng của sóng hài dòng điện phát sinh từ PV tới sóng hài dòng điện đầu nhánh là rất rõ

rệt, với hệ số lan truyền sóng hài bậc 5 xấp xỉ bằng 1. Tỷ lệ gia tăng tương tự khi sóng hài dòng điện bậc 5 truyền ngược về phía nguồn (nhánh từ nút 90-92), so với khi lan truyền về cuối lưới. Tuy rằng mức độ lan truyền có tỷ lệ lớn ở các sóng hài bậc cao đặc biệt ở 23, 35, 43 nhưng do biên độ dòng điện hài tương ứng là rất nhỏ nên ảnh hưởng tới tổng độ méo (THD) là không đáng kể.

Kết quả tính toán tương tự cho các trường hợp khác, đặc biệt trường hợp nặng nề nhất khi PV có mức phát lớn và phụ tải của xuất tuyến nhỏ (TH3) cho thấy tỷ lệ méo dạng sóng hài trong xuất tuyến trung áp trong nghiên cứu này đều nằm trong giới hạn cho phép ($\leq 5\%$) như Hình 8. Việc áp dụng các giải pháp để giảm thiểu sóng hài trên lưới do đó là không cần thiết trong trường hợp này.



Hình 8. Tổng độ méo sóng hài điện áp các nút trực chính

4. KẾT LUẬN

Trong lưới điện trung áp có kết nối nguồn điện mặt trời phân tán, sóng hài dòng điện do chúng sinh ra lan truyền trên lưới điện gây ra méo dạng sóng điện áp. Do tính chất của lưới điện trung áp trong nghiên

cứu này, các điểm cộng hưởng song song xuất hiện và làm gia tăng điện áp hài bậc 5 và bậc 7.

Kết quả của bài báo cho thấy rằng, tụ bù trung áp xuất hiện không làm thay đổi nhiều cộng hưởng trên xuất tuyến trung áp, nguy cơ khuếch đại điện áp hài do lan truyền sóng hài là thấp. Mức độ lan truyền sóng hài dòng điện bậc cao lớn nhưng do biên độ dòng điện hài rất nhỏ nên ảnh hưởng cũng không nhiều. Do đó, việc đảm bảo điều kiện tỉ lệ méo dạng sóng hài phát sinh của các PV khi nối lưới (<3% theo qui định) về cơ bản có thể đảm

bảo độ méo dạng sóng dòng điện và điện áp trên lưới ở trong giới hạn cho phép. Mặc dù giải pháp loại trừ sóng hài có thể chưa cần xét tới nhưng cũng cần tính tới các giải pháp như nâng cấp dây dẫn, giảm tỉ lệ kết nối PV cuối lưới nhằm đảm bảo chất lượng điện áp khu vực cuối xuất tuyến (đồng thời đảm bảo độ méo dạng sóng thấp).

LỜI CẢM ƠN

Công trình nghiên cứu này đã được Trường Đại học Điện lực tài trợ thông qua đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường năm 2023.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [2] Thủ tướng Chính phủ, "Quyết định số 500/QĐ-TTg ngày 15/3/ Phê duyệt Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050", 2023.
- [3] Math H.J. Bollen, Fainan Hassan, Integration of Distributed Generation in the Power System, John Wiley & Son, Hoboken, New Jersey, Canada, 2011.
- [4] W.L. Hsieh, C.H. Lin, C.S. Chen, C.T. Hsu, T.T. Ku, C.T. Tsai and C.Y. Ho, "Impact of PV generation to voltage variation and power losses of distribution systems," in IEEE 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011.
- [5] S.M. Ismael, "State of the art of hosting capacity in modern power system with distributed generation," Renewable Energy, tập 130, pp. 1002-1020, 2019.
- [6] Kamran Zeb, and others, A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system, Renewable and Sustainable Energy Reviews 94 (2018) 1120–1141.
- [7] Ibrahim Cagri Barutcu, Engin Karatepe, Mutlu Boztepe, "Impact of harmonic limits on PV penetration levels in unbalanced distribution networks considering load and irradiance uncertainty", Electrical Power and Energy Systems, 118 (2020) 105780.
- [8] IEEE, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992) , vol., no., pp.1-29, 11 June 2014.
- [9] 30/2019/TT-BCT, "Sửa đổi bổ sung một số điều thông tư số 39/2015/TT-BCT ngày 18/11/2015 của Bộ trưởng Bộ Công Thương quy định hệ thống điện phân phối," Bộ Công Thương, 2019.
- [10] M. Tortoreli, "Harmonic distortion propagation in distribution systems with utility interactive photovoltaic systems," A. Goetzberger et al. (eds.), Seventh E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Brussels and Luxembourg , 1987, 4 trang (182-186).

- [11] V.F. Corasaniti, R. Bianchi and F. Viollaz, "Comparison load models in harmonic flows," 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. (IEE Conf. Publ No. 482), vol.2, 2001, pp. 5.
- [12] Nguyễn Phúc Huy, Đặng Việt Hùng, "Nghiên cứu sự lan truyền sóng hài trong lưới điện trên miền tần số", Tạp chí Khoa học và công nghệ năng lượng, số 16, 2018, 36-43.
- [13] Kamran Zeb, Waqar Uddin, and etc., "A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 94, 2018, Pages 1120-1141
- [14] Amirnaser Yazdani, Reza Iravani, Voltage-Sourced Converters in Power Systems, Wiley-IEEE Press, 2010.
- [15] A. Chidurala, T. Saha and N. Mithulananthan, "Harmonic characterization of grid connected PV systems & validation with field measurements," 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, pp. 1-5.
- [16] CIGRE WGB4.67, AC side harmonics and appropriate harmonic limits for VSC HVDC, Technical Brochures, 2019.
- [17] "Hồ sơ kỹ thuật lưới điện trung áp Mai Sơn, Sơn La", Công ty Điện lực Sơn La, 2020-2021.
- [18] V.N. Lượng, "Quy hoạch phát triển điện lực tỉnh Sơn La giai đoạn 2016-2025 có xét tới năm 2035", Hà Nội, 2016.
- [19] Arangarajan Vinayagam, Asma Aziz, Balasubramaniyam PM, Jaideep Chandran, Veerapandiyan Veerasamy, Ameen Gargoom, Harmonics assessment and mitigation in a photovoltaic integrated network, Sustainable Energy, Grids and Networks, Volume 20, 2019, 100264.
- [20] Renukadevi V., B. Jayanand, Harmonic and Reactive Power Compensation of Grid Connected Photovoltaic System, Procedia Technology, Volume 21, 2015, Pages 438-442

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Nguyễn Phúc Huy tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ tại Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2003 và 2010, nhận bằng Tiến sĩ ngành hệ thống điện và tự động hóa hệ thống điện tại Trường Đại học Điện lực Hoa Bắc, Bắc Kinh, Trung Quốc năm 2015.

Lĩnh vực nghiên cứu: chất lượng điện năng, lưới điện phân phối thông minh, ứng dụng điện tử công suất, độ tin cậy của hệ thống điện.

