

# Giảm thiểu sóng hài trên lưới điện phân phối có tích hợp điện mặt trời

Nguyễn Phúc Huy<sup>a\*</sup>, Nguyễn Thị Thanh Loan<sup>b</sup>

## Tóm tắt:

Điện mặt trời có quy mô vừa và nhỏ kết nối rải rác trên phạm vi rộng cấp điện của lưới điện phân phối địa phương đã đem lại nhiều lợi ích cho lưới điện. Tuy nhiên với đặc điểm cố hữu của thiết bị điện tử công suất, các bộ nghịch lưu phát sinh sóng hài. Những sóng hài này lan truyền khắp nơi trên lưới điện có thể gây lên những tác động bất lợi. Việc lắp đặt các bộ tụ bù công suất phản kháng có thể làm gia tăng cộng hưởng ở các tần số trùng với tần số sóng hài lan truyền có thể làm cho những ảnh hưởng càng nặng nề hơn. Bài báo này trình bày đặc điểm phát sinh sóng hài của các bộ biến đổi ứng dụng trong điện mặt trời. Xây dựng mô hình mô phỏng lưới điện trung áp của vùng núi phía bắc Việt Nam có kết nối điện mặt trời. Áp dụng kỹ thuật quét tần nhằm tìm ra các điểm cộng hưởng, phân tích sự lan truyền sóng hài trên lưới điện. Từ đó, giải pháp bộ lọc sóng hài thụ động được đề xuất và là giải pháp phù hợp nhằm đảm bảo tổng độ méo dạng sóng hài theo quy định.

**Từ khóa:** nguồn phân tán, điện mặt trời, lưới điện phân phối, sóng hài, bộ lọc sóng hài

---

<sup>a</sup> Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực; 235 Hoàng Quốc Việt, Cổ Nhuế 1, Bắc Từ Liêm, Hà Nội.  
e-mail: huynp@epu.edu.vn

<sup>b</sup> Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực; 235 Hoàng Quốc Việt, Cổ Nhuế 1, Bắc Từ Liêm, Hà Nội.  
e-mail: loanntt@epu.edu.vn

\* Tác giả chịu trách nhiệm chính.

# Harmonic Mitigation in Solar Photovoltaic Integrated Power Distribution Networks

Nguyen Phuc Huy<sup>a\*</sup>, Nguyen Thi Thanh Loan<sup>b</sup>

## Abstract:

Small and medium-scale Photovoltaic Solar Powers (PV) are distributedly connected in wide range distribution power networks with many benefits. However, for the inherent characteristics of power electronic devices, the inverters produce harmonic currents. These harmonics propagate to all points causing unexpected effects. With many compensated capacitor banks installed on the network, the resonances may be occurred at the propagated frequency leading to amplify the effects significantly. This paper presents the harmonic generation characteristic of PV inverters. A simulation model was built to analyze the harmonic in a PV connected distribution power network at Northern of Vietnam. The frequency scan was applied to show resonance points and to analyze the propagation of harmonics. Consequently, passive harmonic filters were proposed to be a suitable solution to keep total harmonic distortions under the limits.

**Key words:** *distributed resources, photovoltaic solar power, distribution power network, harmonic, harmonic filter*

**Received: 7.1.2023; Accepted: 15.6.2023; Published: 30.6.2023**

**DOI: 10.59907/daujs.2.2.2023.130**

---

<sup>a</sup> Electrical Engineering Faculty, Electric Power University; 235 Hoang Quoc Viet, Co Nhue 1, Bac Tu Liem, Hanoi. e-mail: huynp@epu.edu.vn

<sup>b</sup> Electrical Engineering Faculty, Electric Power University; 235 Hoang Quoc Viet, Co Nhue 1, Bac Tu Liem, Hanoi. e-mail: loanntt@epu.edu.vn

\* Corresponding Author.

## Giới thiệu

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. Theo dự thảo Quy hoạch điện VIII tỷ trọng nguồn năng lượng tái tạo (gió, mặt trời, sinh khối) tăng từ 27% (2020) lên đến 56,3% vào năm 2045 (N. Đ. Hậu, 2022). Trong phân khúc lưới điện phân phối, các nguồn điện này có công suất nhỏ được kết nối gần hơn với phụ tải điện, chúng được gọi chung là nguồn điện phân tán (DG) (Math H. J. Bollen, 2011). Nguồn điện mặt trời (PV) trong lưới điện phân phối có tỉ suất thâm nhập ngày càng lớn, phân bố rải rác dẫn tới sự thay đổi về chiều công suất cũng như những thay đổi về tổn thất, điều kiện mang tải của đường dây và các vấn đề về chất lượng điện áp. Khi công suất phát của các PV tăng lên lớn hơn nhu cầu của phụ tải điện, điện áp tại điểm kết nối có thể tăng cao. Nếu mức tăng quá lớn, đường dây có thể bị quá tải và tổn thất công suất sẽ tăng lên (Hsieh et al., 2011; Ismael et al., 2019; Math H. J. Bollen, 2011). Bên cạnh đó, các PV kết nối qua các bộ biến đổi điện tử công suất sẽ "bơm" sóng hài dòng điện vào trong lưới điện (Đoàn Đức Tùng, 2019; Lê Đức Tùng, 2020; Zeb et al., 2018). 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 PV (Barutcu et al., 2020), và do đó mức độ nhiễu sóng hài thường được quy định trong các tiêu chuẩn và qui định cụ thể (30/2019/TT-BCT, 2019; IEEE Std 519-2014, 2014). 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 (Tortoreli et al., 1987).

Các phần tiếp theo của bài báo sẽ tiến hành tính toán và phân tích về sóng hài cho một lưới điện phân phối trung áp cụ thể có tích hợp điện mặt trời, từ đó đề xuất giải pháp hạn chế và loại trừ sóng hài trên lưới.

## Sóng hài phát sinh từ điện mặt trời

Sóng hài trên lưới điện có thể được sinh ra từ nhiều nguồn khác nhau bởi các phần tử phi tuyến kết nối. Sóng hài là trường hợp riêng của sóng điều hòa, có tần số bằng bội số của sóng điều hòa tần số cơ bản (50 Hz, hoặc 60 Hz). Sóng điều hòa có thể được xác định là tổng của các sóng có tần số khác nhau. Trong số các sóng hài thành phần của sóng điều hòa, các sóng hài bậc  $3k-1$  (2, 5, 8, 11,...) ở pha  $b$  và  $c$  trễ pha so với thành phần sóng hài bậc  $3k-1$  pha  $a$  tương ứng là  $120^\circ$  và  $240^\circ$  được gọi là thành phần sóng hài thứ tự thuận; ngược lại các thành phần sóng hài bậc  $3k+1$  (4, 7, 10, 13,...) được gọi là thành phần sóng hài thứ tự nghịch; các thành phần sóng hài bội 3 có bậc hài  $3k$  (3, 6, 9,...) là các thành phần sóng hài thứ tự không (Das, 2017; J Arrillaga, 2003).

Để đảm bảo các ảnh hưởng của sóng hài không quá lớn, tiêu chuẩn về sóng hài trên lưới đề cập tới các giới hạn cần thiết thông qua các chỉ tiêu như tổng độ méo dạng sóng hài (THD) và hệ số méo dạng từng thành phần ( $IHD_h$ ), cho cả điện áp và dòng điện ta có:

- Tổng độ méo sóng điều hòa

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} \left(\frac{F_h}{F_1}\right)^2} \quad (1)$$

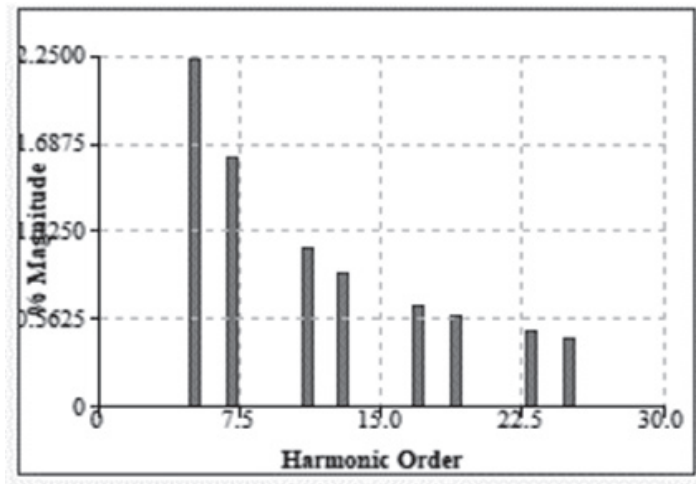
- Hệ số méo dạng từng thành phần sóng hài

$$IHD_h = \frac{F_h}{F_1} \times 100 (\%) \quad (2)$$

trong đó  $F_1$  và  $F_h$  là giá trị điện hiệu dụng sóng cơ bản và sóng bậc  $h$ .

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 điện vì 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 biến đổi 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 (Zeb et al., 2018). Các cấu hình bộ biến đổi sử dụng chủ yếu là loại hai mức điện áp (two-level voltage) và ba mức điện áp (three-level voltage). Quá trình đóng mở các van vẫn được thực hiện bằng kỹ thuật điều chế độ rộng xung (PWM) là chủ yếu. Với bộ biến đổi 6 xung (6 pulse converter) phổ biến, sóng dòng điện đầu ra sẽ bao gồm các thành phần sóng hài có các bậc  $h = 6k \pm 1$  ( $k=1, 2, 3, \dots$ ) (Amirnaser Yazdani, 2010; Chidurala et al., 2015). Kết quả thực nghiệm trong (Zeb et al., 2018) 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 lớn tập trung xung quanh giá trị là bội số của tần số sóng mang (CIGRE WGB4.67, 2019), tuy có tỉ lệ nhỏ nhưng chúng vẫn có thể gây ra các vấn đề về tương hợp điện từ (EMI).

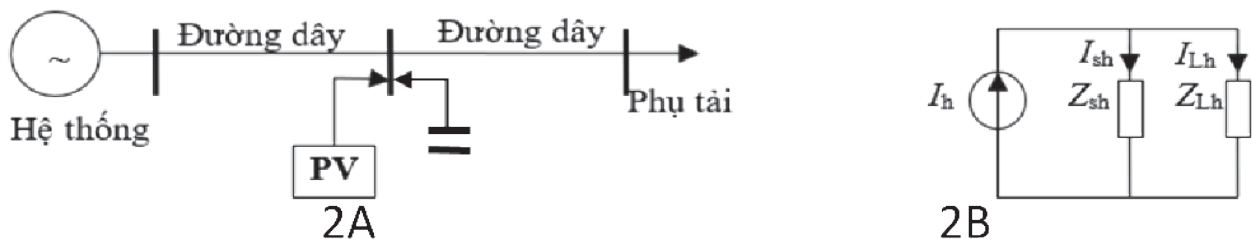
Với tính chất của lưới điện dùng trong nghiên cứu này, chưa có nguồn dữ liệu đo đạc thực tế mức độ phát sinh sóng hài của hệ thống năng lượng mặt trời tại điểm kết nối chung (PCC), tuy nhiên kết quả kiểm định sóng hài của Inverter được sử dụng trên lưới (SonLaPC, 2021) và catalogue của nhiều hãng cung cấp thiết bị thì tổng độ méo sóng hài của bộ biến đổi không quá 3%, vì vậy trong mô phỏng phổ hài của PV được lựa chọn trên cơ sở loại bộ biến đổi 6 xung điển hình với như hình 1.



Hình 1. Dạng sóng và phổ hài đầu ra bộ biến đổi 6 xung (J Arrillaga, 2003)

### Giảm thiểu sóng hài trên lưới điện

Khi PV kết nối vào lưới điện sẽ là nguồn sinh ra sóng hài dòng điện bơm vào lưới. Các sóng hài này sẽ tương tác với các phần trên lưới điện phụ thuộc nhiều tính chất của mạng, vị trí kết nối của PV. Tự điện bù công suất phản kháng khi đấu nối vào lưới điện cũng làm xuất hiện cộng hưởng ở các tần số khác nhau.



Hình 2. Sơ đồ lưới điện và sơ đồ thay thế xét ảnh hưởng của sóng hài dòng điện. 2A. Mô hình đơn giản cho đường dây kết nối PV; 2B. Sơ đồ thay thế trong tính toán ảnh hưởng sóng hài lên lưới

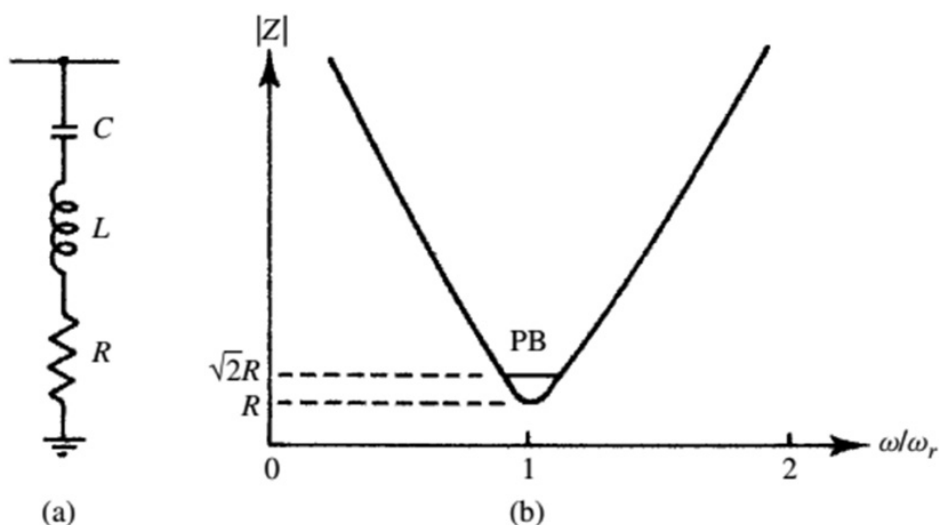
Từ hình 2.B (Das, 2017), dòng điện hài từ nguồn PV ( $I_h$ ) phát một phần về phía lưới hệ thống ( $I_{sh}$ ) và một phần về phía phụ tải sau điểm đấu nối, ta có quan hệ sau:

$$\frac{I_{Lh}}{I_{sh}} = \frac{Z_{sh}}{Z_{Lh}} \quad (3)$$

trong đó tổng trở phía hệ thống ( $Z_{sh}$ ) phụ thuộc vào công suất ngắn mạch của hệ thống (Das, 2017), tổng trở phía sau PV ( $Z_{Lh}$ ) phụ thuộc vào cấu trúc đường dây và các phần tử bù, bản thân phụ tải điện.

Có thể thấy từ (3), công suất ngắn mạch của hệ thống càng nhỏ (hệ thống yếu) hay PV kết nối càng gần nguồn hệ thống ( $Z_{sh}$  giảm) thì ảnh hưởng của sóng hài tới phía hệ thống sẽ tăng lên. Ngược lại, khi PV kết nối càng xa nguồn hệ thống hay trong các chế độ tải non ( $Z_{Lh}$  giảm) thì ảnh hưởng của sóng hài phía lưới phía sau điểm kết nối PV lớn hơn phía nguồn hệ thống. Ngoài ra, điện áp hài có thể tăng lên cao mặc dù dòng điện hài bơm vào là nhỏ do ảnh hưởng của cộng hưởng ở tần số hài tương ứng (Das, 2017). Việc phân tích và phát hiện các điểm cộng hưởng trên lưới điện có thể được thực hiện thông qua kỹ thuật quét tần, tìm kiếm các điểm có nguy cơ gia tăng lượng sóng hài ở tần số nhất định để quyết định giải pháp xử lý. Đặc biệt khi có sự tham gia của tụ bù công suất phản kháng trên lưới điện, số điểm cộng hưởng có thể xuất hiện nhiều hơn.

Một trong các giải pháp đơn giản và kinh tế, thuận lợi trong vận hành là lắp đặt các bộ lọc sóng hài thụ động tại các điểm có nguy cơ tăng cao về nhiều sóng hài. Mục tiêu là tạo ra các cộng hưởng mới nhằm triệt tiêu các cộng hưởng đã xuất hiện trước khi lắp đặt bộ lọc. Đơn giản nhất, ta áp dụng bộ lọc đơn nhằm triệt tiêu từng thành phần sóng hài riêng lẻ, mà đa phần là bậc 5 và bậc 7 xuất hiện nhiều trên lưới. Sơ đồ mạch và đặc tính tổng trở- tần số của bộ lọc đơn như trong hình 3.

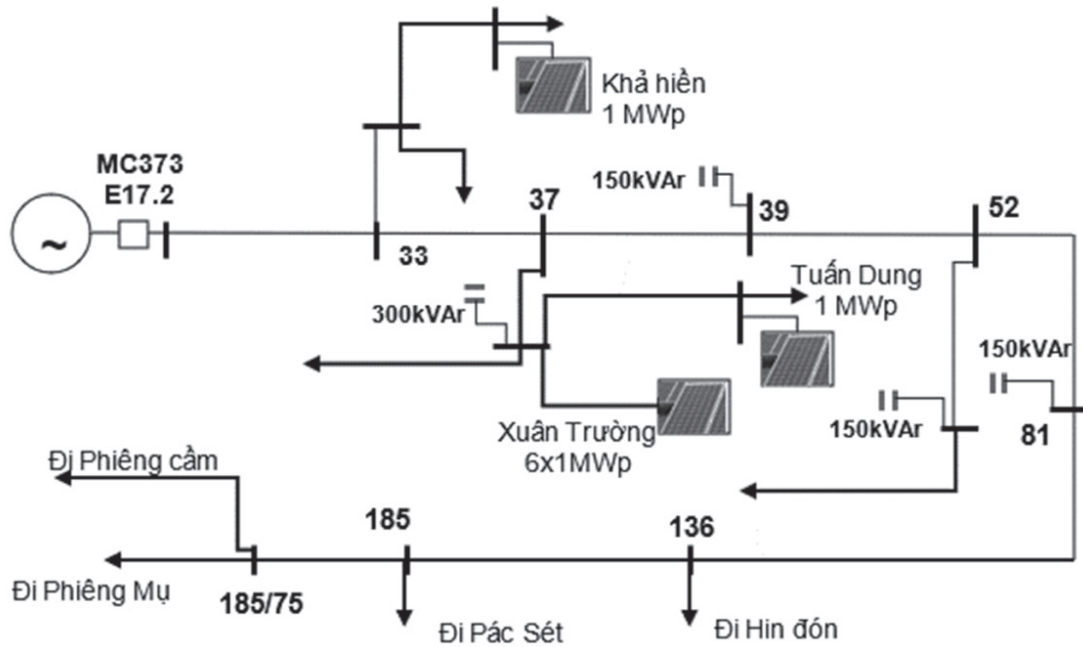


Hình 3. Sơ đồ bộ lọc đơn và đặc tính  $Z(f)$  (Arillaga, 2003)

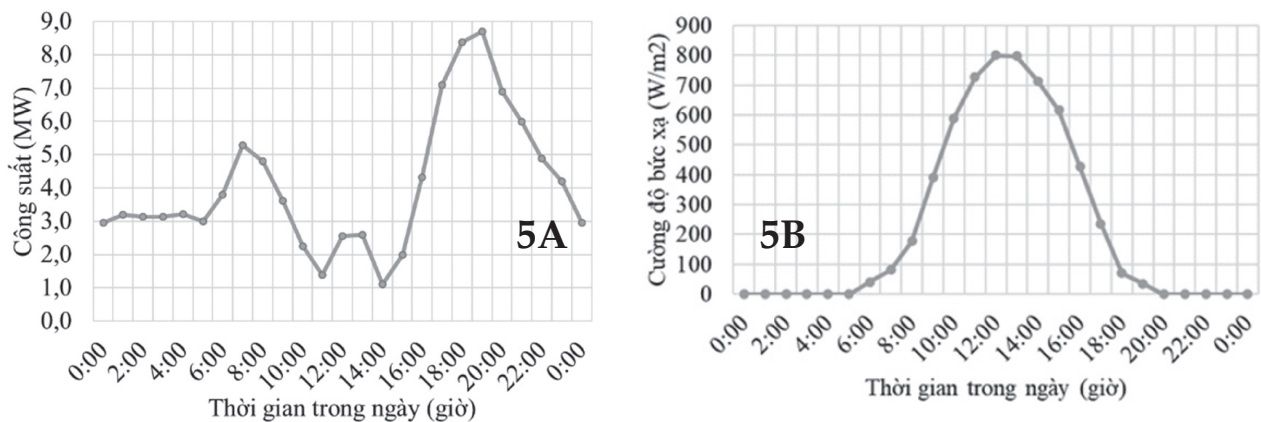
### Kết quả tính toán mô phỏng và phân tích

Lưới điện được sử dụng trong mô phỏng và phân tích là xuất tuyến 382-Mai Sơn, sau máy cắt 373-E17.2 Sơn La, sơ đồ tối giản gồm đường trục chính, các nhánh rẽ và các nguồn PV được thể hiện trong hình 4, đồ thị phụ tải thể hiện trong hình 5A. 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, tổng chiều dài toàn bộ xuất tuyến hơn 200 km. Với 138 trạm biến áp phân

phối 35/0,4 kV đều được thực hiện bù nâng cao  $\cos\phi = 0,9$ , tổng công suất phụ tải lớn nhất 8,7 MW. Ngoài ra, hiện tại trên lưới điện có đấu nối nhiều bộ tụ bù công suất phản kháng 3 pha với các gam công suất 150 kVAr và 300 kVAr; 8 nguồn PV kết nối trên lưới tập trung chủ yếu ở phần đầu của xuất tuyến trong đó có cụm 6 PV Xuân Trường nhánh Bản Mạt, tổng công suất thiết kế 8 MWp. 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/m<sup>2</sup> (SonLaPC, 2021; Viện Năng Lượng, 2016).



Hình 4. Sơ đồ tối giản lưới điện trong mô phỏng



Hình 5. 5A. Phụ tải xuất tuyến; 5B. Cường độ bức xạ tháng 7 khu vực Mai Sơn

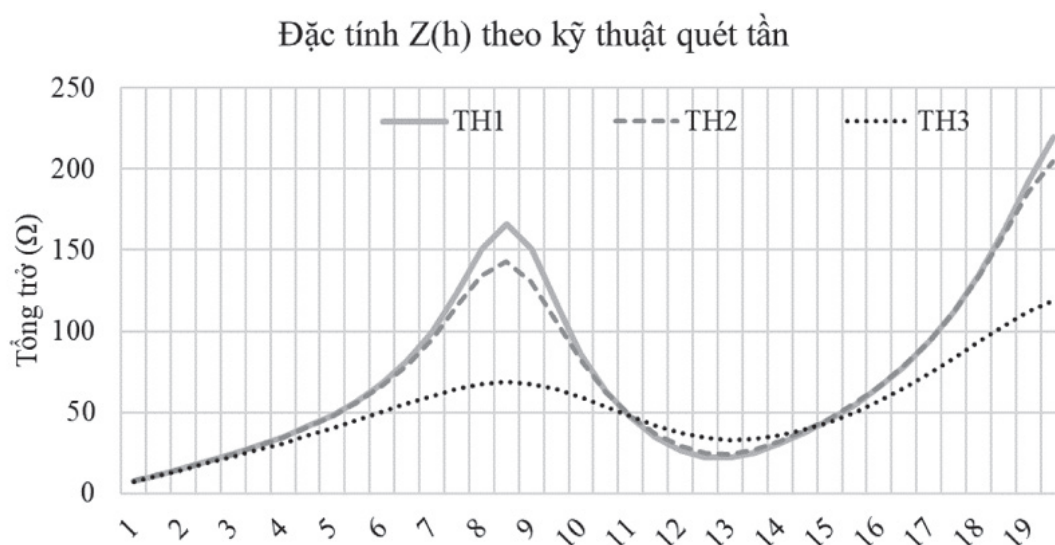
Theo các dữ liệu đã có, các kịch bản trong mô phỏng lưới điện được đề xuất như sau:

+ TH1: lưới điện mang tải trung bình (3,5 MW) và PV kết nối phát max (800 W/m<sup>2</sup>);

+ TH2: lưới điện mang tải trung bình và PV kết nối phát trung bình ( $300 \text{ W/m}^2$ );

+ TH3: giả thiết có sự dịch chuyển về đồ thị phụ tải lưới điện mang tải max ( $8,7 \text{ MW}$ ) và PV kết nối phát max ( $800 \text{ W/m}^2$ );

Sử dụng kỹ thuật quét tần qua công cụ Frequency Scan của ETAP cho thấy các điểm cộng hưởng không xuất hiện ở các tần số tương ứng sóng hài bậc 5, 7, 11, 13 điển hình; hình 6 xét cho điểm 37 đầu nhánh kết nối cụm PV Xuân Trường cho thấy khả năng khuếch đại điện áp hài ở các bậc hài trên là không xảy ra. Tuy nhiên cần chú ý giá trị lớn của tổng trở tương ứng ở sóng hài bậc 7.



**Hình 6. Đặc tính tổng trở - tần số tại nút 37 trong các trường hợp khảo sát**

**Bảng 1. Tổng độ méo dạng (THD %) điện áp PV nhánh PV Xuân Trường**

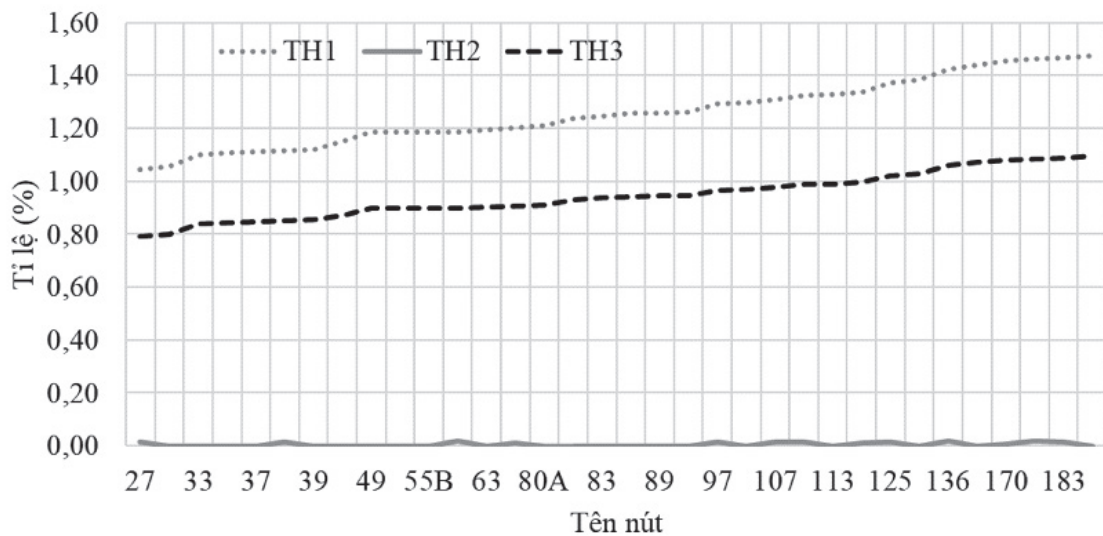
Các trường hợp	Phía thứ cấp MBA của PV						Phía sơ cấp MBA của PV					
	37/9 A/5	37/9 A/6	37/9 A/7	37/9 A/8	37/9 A/9	37/9 A/11	Bus12	Bus14	Bus16	Bus24	Bus26	Bus41
TH1	1,158	1,159	1,160	1,160	1,160	1,160	1,997	1,998	1,998	1,998	1,999	1,999
TH2	0,017	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,017	0,008
TH3	0,893	0,894	0,895	0,895	0,895	0,896	1,914	1,914	1,915	1,915	1,915	1,916

Tiến hành mô phỏng phân tích sóng hài cho các trường hợp trên, phân tích tổng độ méo dạng sóng hài tại trong nhánh nhiều PV như trong bảng 1. Với việc lựa chọn cùng



dạng nguồn phát sinh sóng hài và công suất các PV cũng tương đương nhau, và đảm bảo tỉ lệ sóng hài dòng điện đầu ra của các bộ biến đổi  $\sim 3\%$ , thì tỉ lệ sóng hài điện áp đầu vào sơ cấp của các MBA tăng áp của PV là  $\sim 2\%$  trong khi tỉ lệ đó ở phía đầu ra thứ cấp chỉ là  $\sim 1\%$ .

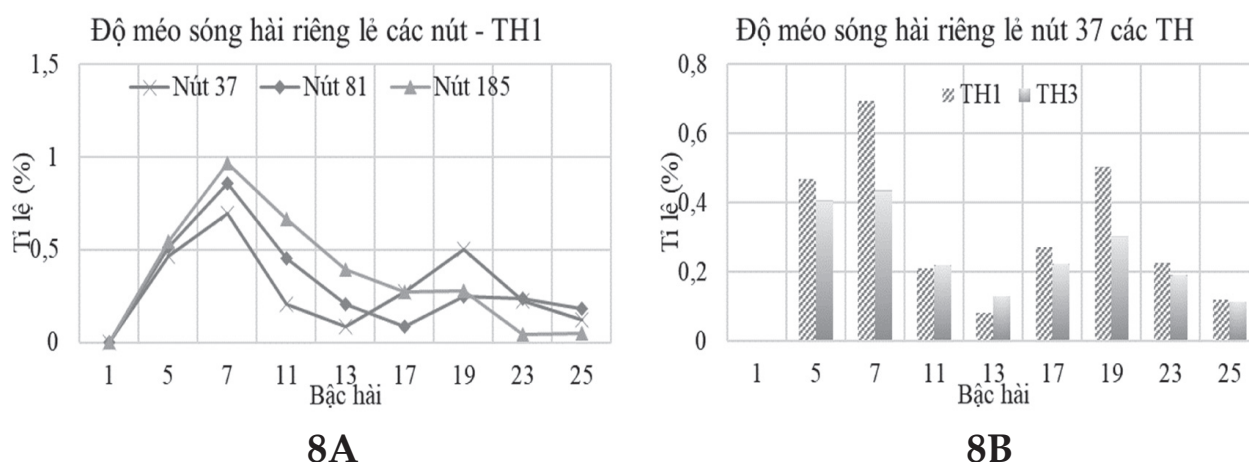
Kết quả mô phỏng trong hình 7 chỉ rõ ảnh hưởng về sóng hài của PV là rất nhỏ ở chế độ phát công suất hạn chế (TH2). Với mức độ phát công suất lớn hơn của PV ở hai trường hợp còn lại, có thể thấy tổng độ méo dạng điện áp tăng dần về cuối lưới điện (nguồn hài phát sinh chủ yếu bơm vào lưới qua nút 37). Điều này hoàn toàn phù hợp với phân tích trên mục 3 khi phía sau không còn nguồn khác bổ sung vào, tức tổng trở phía tải tăng hay công suất ngắn mạch của các điểm càng về cuối lưới càng giảm.



**Hình 7. Tổng méo dạng sóng hài điện áp trên trục chính của lưới điện**

Ngoài ra, sự tương quan về mức phát công suất của PV và chế độ tải của lưới điện sẽ ảnh hưởng lớn tới sóng hài trên lưới. Với cùng mức phát PV ở TH1 và TH3 thì tổng méo dạng sóng hài trên lưới TH1 lớn hơn do phụ tải thấp hơn TH3.

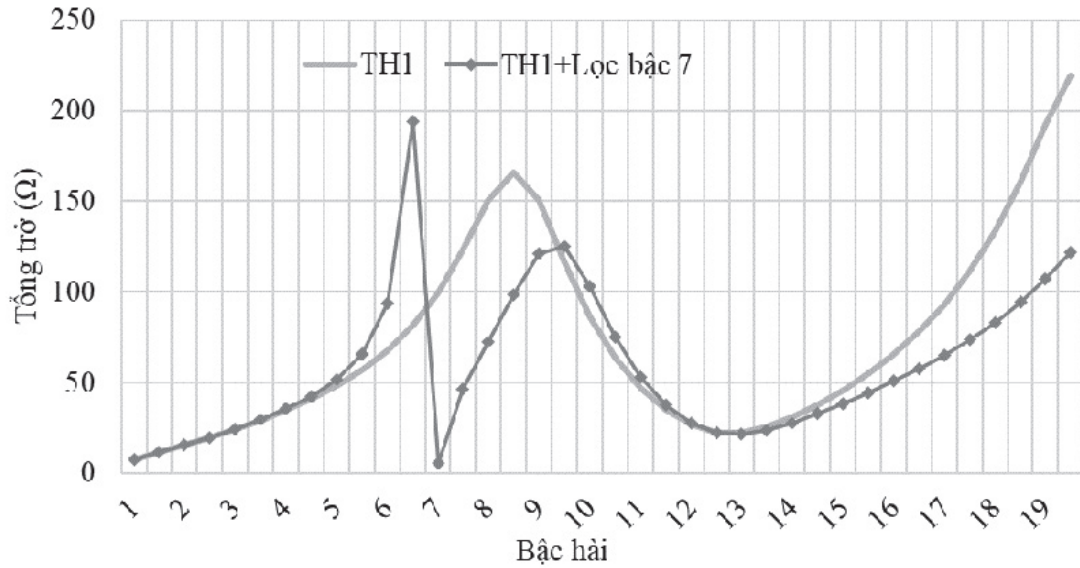
Xét thêm một số nút chính trên lưới điện như đầu cuối đường trục, các vị trí bù, vị trí kết nối PV, ta có thể thấy rõ ràng hơn về tỉ lệ của các sóng hài riêng lẻ một số nút trong TH1 như hình 8A, tỉ lệ méo dạng sóng hài riêng lẻ tại nút 37 giữa TH1 và TH3 như hình 8B. Có thể thấy thành phần hài bậc 7 có tỉ lệ lớn ở các nút, đồng thời tỉ lệ này tăng cao khi phụ tải thấp và PV phát công suất lớn, rõ ràng hơn trong trường hợp lưới điện này vì PV chỉ tập trung ở phần đầu của lưới điện.



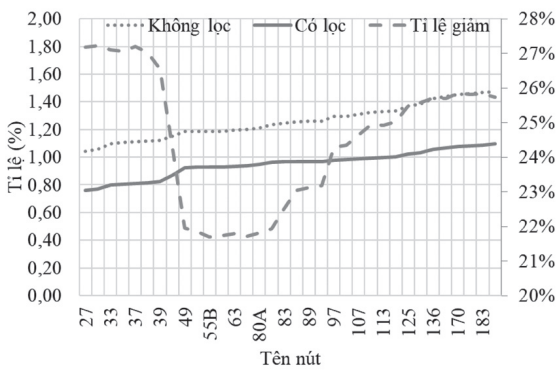
**Hình 8. Độ méo dạng của các sóng hài riêng lẻ**

Với tỉ lệ kết nối PV và mọi cam kết kỹ thuật của nhà sản xuất nếu được thỏa mãn có thể thấy mức nhiễu của sóng hài trên xuất tuyến 382-Mai Sơn là rất nhỏ. Tuy nhiên khi tỉ lệ PV kết nối tăng lên, cũng như phân tích trên, tỉ lệ nhiễu sóng hài có thể tăng và vượt quá giới hạn cho phép.

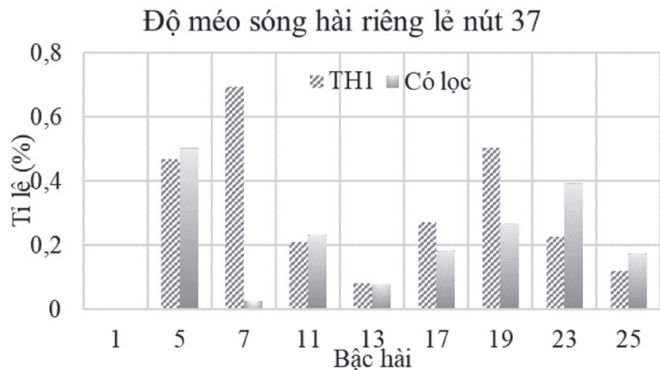
Để giảm thiểu ảnh hưởng của sóng hài, một số tài liệu đã chỉ ra nhiều giải pháp như việc sử dụng ắc-quy lưu điện phía DC của PV, tăng tỉ lệ phát công suất phản kháng của PV tức cho inverter làm việc ở chế độ điều chỉnh điện áp, thiết kế các mạch lọc LC ở đầu ra của inverter (Lê Đức Tùng, 2020; Renukadevi V. & Jayanand, 2015; Vinayagam et al., 2019), sử dụng bộ lọc tích cực (Đoàn Đức Tùng, 2019). Dựa vào tình hình lưới điện 382-Mai Sơn, giải pháp đơn giản có thể hướng tới là thiết kế bộ lọc thụ động trên cơ sở các điểm bù công suất phản kháng hiện có. Cho nhánh PV Xuân Trường hiện tại, sử dụng công cụ Filter Design của ETAP tính toán cải tạo đàn tụ bù 300 kVAr thành bộ lọc đơn sóng hài bậc 7 và vẫn đảm bảo mức bù cũ. Với bộ tụ 300 kVAr đấu tam giác, thông số bộ lọc cải tạo xác định được  $C = 0,276 \mu\text{F}$ ,  $L = 0,7488 \text{ H}$ , hệ số chất lượng  $q = 20$  thì đặc tính  $Z(f)$  tại nút 37 trường hợp TH sau khi đặt bộ lọc như hình 9. Kết quả cho thấy tổng độ méo dạng sóng hài điện áp trên lưới giảm được trên 20% (hình 10A), độ méo các sóng hài riêng lẻ cũng giảm (hình 10B).



Hình 9. Đặc tính Z(f) tại nút 37 khi khảo sát TH1 không có và có bộ lọc



10A



10B

Hình 10. Hiệu quả giảm độ méo dạng sóng hài sau khi đặt bộ lọc

**Kết luận**

Bài báo này trình bày khái niệm sóng hài trên lưới điện, mô hình phân tích sự lan truyền sóng hài lên lưới điện về phía phụ tải hay nguồn khi có phát sinh sóng hài từ nguồn điện mặt trời. Thông qua ứng dụng phần mềm ETAP mô phỏng và tính toán lưới điện thực tế, sử dụng công cụ quét tần để nhận thức rõ các điểm cộng hưởng, bài báo đã phân tích sóng hài trên lưới điện trong các trường hợp khác nhau. Kết quả mô phỏng là giải đáp tường minh cho mô hình lý thuyết đã trình bày về ảnh hưởng của sóng hài từ PV bơm lên

lưới điện. Từ các phân tích qua 03 trường hợp cụ thể, giải pháp lọc sóng hài bậc 7 được lựa chọn cho thấy tỉ lệ giảm tổng độ méo dạng sóng hài lên tới gần 30%.

Mặc dù các kết quả mới dựa trên những giả thiết về mức phát sinh sóng hài từ các bộ biến đổi của PV nhưng kết quả của bài toán cũng là định hướng chung cho các trường hợp có tỉ lệ phát sinh sóng hài nhỏ hơn. Gợi ý giải pháp tận dụng và cải tiến các bộ tụ bù công suất phản kháng thành các bộ lọc góp phần giúp các đơn vị vận hành lưới điện giảm thiểu chi phí và các tính toán khác cho lưới điện.

### Tài liệu tham khảo

- 30/2019/TT-BCT (2019). *Sửa đổi bổ sung một số điều thông tư số 39/2015/TT-BCT ngày 18 tháng 11 năm 2015 của Bộ trưởng Bộ Công Thương quy định hệ thống điện phân phối*.
- Amirnaser Yazdani, R. I. (2010). *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. Wiley-IEEE Press.
- Barutcu, I. C., Karatepe, E., & Boztepe, M. (2020). "Impact of harmonic limits on PV penetration levels in unbalanced distribution networks considering load and irradiance uncertainty". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118, 105780. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105780>
- Chidurala, A., Saha, T., & Mithulananthan, N. (2015). "Harmonic characterization of grid connected PV systems & validation with field measurements". *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286198>
- CIGRE WGB4.67 (2019). *AC side harmonics and appropriate harmonic limits for VSC HVDC* (Technical Brochures).
- Das, J. C. (2017). *Harmonic Generation Effects Propagation and Control* (1st ed.). CRC Press.
- Đoàn Đức Tùng, N. mnh N. (2019). "Phương pháp giảm thiểu sóng hài từ hệ thống điện mặt trời và tải phi tuyến". *Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, 17(5), 6.
- Hsieh, W.-L., Lin, C.-H., Chen, C.-S., Hsu, C. T., Ku, T.-T., Tsai, C.-T., & Ho, C.-Y. (2011). "Impact of PV generation to voltage variation and power losses of distribution systems". *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 1474-1478. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2011.5994129>
- IEEE Std 519-2014. (2014). "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems". *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, 1-29. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>
- Ismael, S. M., Abdel Aleem, S. H. E., Abdelaziz, A. Y., & Zobaa, A. F. (2019). "State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation". *Renewable Energy*, 130, 1002-1020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.008>
- J Arrillaga, N. R. W. (2003). *Power System Harmonics Second Edition*. Wiley Press.

- Lê Đức Tùng, N. Q. M. (2020). “Phân tích, đánh giá và giảm thiểu sóng hài trong hệ thống điện khi có kết nối hệ thống pin năng lượng mặt trời”. *Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân Sự*, 67(6), 5.
- Math H. J. Bollen, F. H. (2011). *Integration of Distributed Generation in the Power System* (1st edition). John Wiley & Son.
- N. Đ. Hậu (2022). “Báo cáo khoa học và công nghệ trong chuyển dịch năng lượng tại Việt Nam”. *Hội thảo Quốc tế Chuyển dịch năng lượng đào tạo nhân lực, Nghiên cứu và Công nghệ*, Đại học Điện lực.
- Renukadevi V., & Jayanand, B. (2015). “Harmonic and Reactive Power Compensation of Grid Connected Photovoltaic System”. *Procedia Technology*, 21, 438-442. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.10.067>
- SonLaPC. (2021). *Hồ sơ kỹ thuật lưới điện trung áp Mai Sơn, Sơn La*.
- Tortoreli, M., Russell, P. E., Baltas, P., & Morris, J. A. (1987). “Harmonic Distortion Propagation in Distribution Systems with Utility Interactive Photovoltaic Systems”. A. Goetzberger, W. Palz, & G. Willeke (Eds.), *Seventh E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*. Springer Netherlands, 182-186.
- Viện Năng Lượng. (2016). *Quy hoạch phát triển điện lực tỉnh Sơn La giai đoạn 2016-2025 có xét tới năm 2035*.
- Vinayagam, A., Aziz, A., PM, B., Chandran, J., Veerasamy, V., & Gargoom, A. (2019). “Harmonics assessment and mitigation in a photovoltaic integrated network”. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 20, 100264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100264>.
- Zeb, K., Uddin, W., Khan, M. A., Ali, Z., Ali, M. U., Christofides, N., & Kim, H. J. (2018). “A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1120-1141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.053>.