

PHÂN TÍCH SÓNG HÀI LAN TRUYỀN QUA MÁY BIẾN ÁP PHÂN PHỐI

ANALYSIS ON HARMONIC PROPAGATION THROUGH DISTRIBUTION TRANSFORMERS

Nguyễn Phúc Huy, Đặng Việt Hùng

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 13/05/2024, Ngày chấp nhận đăng: 27/06/2024, Phản biện: TS. Trần Quang Khánh

Tóm tắt:

Sóng hài là một trong các vấn đề về chất lượng điện năng trên lưới điện phân phối cần được quan tâm khi nguồn điện mặt trời (PV) được kết nối với lưới điện ngày càng tăng. Bài báo đã phân tích các trường hợp sóng hài được sinh ra từ PV lan truyền giữa lưới phân phối trung và hạ áp qua máy biến áp phân phối (MBA). Sóng hài từ PV phía lưới điện hạ áp lan truyền sang phía trung áp của MBA với mức độ ảnh hưởng nhỏ và tỉ lệ nghịch với công suất ngắn mạch của hệ thống. Trong khi đó sóng hài từ phía trung áp sẽ ảnh hưởng nhiều hơn tới lưới điện phía hạ áp đặc biệt là khi phía hạ áp có tụ bù và công suất phụ tải nhỏ. Giải pháp bù ứng động theo phụ tải phía hạ áp có thể làm giảm mức độ ảnh hưởng của sự lan truyền sóng hài từ phía cao áp, cải thiện chất lượng điện năng của mạng điện.

Từ khóa:

Điện mặt trời, Lan truyền sóng hài, Máy biến áp phân phối, Bù công suất phản kháng.

Abstract:

Harmonics are one of the power quality issues on distribution networks that need to be concerned when the connected solar photovoltaic (PV) sources are increasingly. The paper analyzed cases of harmonics generated from PV propagating between medium and low-voltage distribution grids through distribution transformers. Harmonics from the PV on the low-voltage side propagate to the medium-voltage side of the transformer with a low degree of influence and inversely proportional to the short-circuit power of the system. Meanwhile, harmonics from the medium voltage side will effect the low-voltage grid, especially when the low-voltage side has compensating capacitors and low load capacity. The solution of using dynamic reactive power compensation on low-voltage side can reduce the impact of harmonic propagation from the high-voltage side which improves power quality.

Keywords:

Solar Photovoltaics, Harmonic Propagation, Distribution transformer, Reactive power compensation.

1. MỞ ĐẦU

Hiện nay, việc xây dựng hệ thống điện không carbon với tỉ trọng cao các nguồn phát điện từ năng lượng tái tạo đang là xu hướng chủ đạo trên thế giới. 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]. Các nguồn điện có quy mô công suất lớn kết nối lên lưới điện truyền tải, trong khi các nguồn điện vừa và nhỏ kết nối vào khu vực lưới điện phân phối

trung áp và hạ áp, gọi chung là nguồn phát điện phân tán (DG) [2]. Mức độ thâm nhập ngày càng tăng của các nguồn này trong lưới điện phân phối ảnh hưởng tới tổn thất công suất, khả năng tải của lưới điện 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 và mức độ nhiễu sóng hài thường được quy định trong các tiêu chuẩn và quy định cụ thể [6, 7]. Sóng hài lan truyền có thể tăng cao ở nhiều vị trí, đặc biệt khi lưới điện có kết nối các bộ tụ bù công suất phản kháng [8], và có xu hướng ảnh hưởng nhiều hơn về phía phụ tải với mức độ phụ thuộc vào mô hình phụ tải được sử dụng [9]. Nghiên cứu lan truyền sóng hài có thể được thực hiện bằng kỹ thuật quét tần, tính toán tổng trở các nút trên miền tần số để tìm ra các điểm cộng hưởng [10].

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 sinh ra từ các nguồn điện mặt trời phân tán (PV) từ hai phía của máy biến áp phân phối. Phân tích các yếu tố ảnh hưởng tới mức độ lan truyền và đề xuất giải pháp hạn chế.

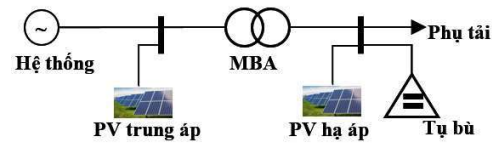
2. PHÂN TÍCH LAN TRUYỀN SÓNG HÀI QUA MÁY BIẾN ÁP PHÂN PHỐI

2.1. Mô hình phân tích và hệ số lan truyền sóng hài

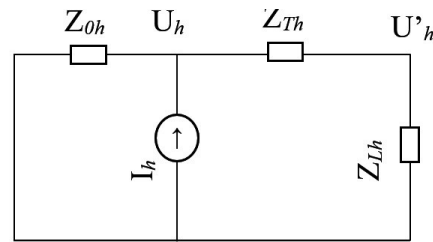
Xét một lưới điện phân phối như Hình 1, nguồn điện mặt trời phân tán (PV) được kết nối vào khu vực lưới điện trung áp và hạ áp.

Khi xét ảnh hưởng riêng của một nguồn sóng hài tới lưới điện, ta xây dựng mô hình như trong hình 2, I_h và Z_{0h} là dòng điện hài bậc h được sinh ra và tổng trở hài tương đương của các phần tử khác, U_h

là điện áp hài bậc h tại điểm kết nối của nguồn hài với lưới điện. Phần lưới điện được xét ảnh hưởng có U'_h là điện áp hài bậc h được sinh ra, Z_{Lh} là tổng trở hài tương đương của lưới điện được xét và Z_{Th} là tổng trở hài giữa điểm kết nối nguồn hài với lưới điện đó.

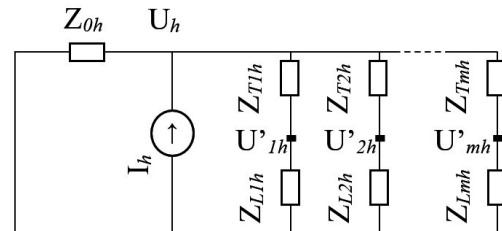


Hình 1. Sơ đồ mô tả lưới điện phân phối có kết nối PV



Hình 2. Mô hình phân tích lan truyền sóng hài

Hình 3 có thể áp dụng cho trường hợp lưới điện có nhiều nhánh kết nối.



Hình 3. Mô hình phân tích lan truyền sóng hài khi có nhiều nhánh liên kết

Giả thiết mô hình như trong Hình 2, sóng hài điện áp ở hai phía máy biến áp được tính toán và so sánh mức độ lan truyền. Để thuận lợi, ta xây dựng hệ số lan truyền các thành phần sóng hài điện áp như sau:

$$T_{Uh} = \frac{U'_h}{U_h} = \frac{|Z_{Lh}|}{|Z_{Th} + Z_{Lh}|} \quad (1)$$

Các đại lượng trong (1) đều là các hàm của bậc sóng hài h , trong đó tổng trở thay thế của máy biến áp phụ thuộc bậc sóng hài xác định theo (2).

$$Z_{Th} = R_T \cdot \sqrt{h} + j \cdot h \cdot X_T \quad (2)$$

với R_T và X_T là điện trở và điện kháng được xác định từ các thông số định mức của máy biến áp; h là bậc sóng hài.

Trong khi đó, tổng trở phần lưới điện sóng hài lan truyền tới Z_{Lh} tùy thuộc vào từng trường hợp mà có các thành phần tham gia khác nhau như hệ thống nguồn, thiết bị bù, phụ tải. Tổng trở mô hình hóa của các phần tử được xây dựng như sau:

+ Hệ thống nguồn:

$$\begin{cases} Z_{sh} = R_s + j \cdot h \cdot X_s \\ X_s = \frac{1,05 \cdot U_n^2}{S_k} \cdot \frac{a}{\sqrt{1+a^2}}; \\ R_s = \frac{X_s}{a} \end{cases} \quad (3)$$

với: U_n (kV) là điện áp danh định của hệ thống; S_k (MVA) là công suất ngắn mạch; a là tỉ số X/R của hệ thống; R_{s1} và X_{s1} (Ω) là điện trở và điện kháng hệ thống ở tần số cơ bản.

+ Thiết bị tụ bù công suất phản kháng:

$$Z_{Ch} = \frac{1}{j \cdot h \cdot \omega \cdot C} \quad (4)$$

với: C (Farad) là điện dung của bộ tụ; $\omega = 2\pi f$, tần số cơ bản $f = 50$ Hz.

+ Phụ tải tuyến tính được mô hình hóa gồm điện trở và điện kháng song song, tổng trở tương đương được xác định [9, 10]:

$$Z_{ldh} = \frac{j \cdot R \cdot X}{R + jX} \quad (5)$$

$$\text{với: } R = \frac{U_n^2}{k \cdot P}; \quad X = \frac{U_n^2}{k \cdot Q}; \quad k = 0,1, h + 0,9;$$

P (MW) và Q (MVar) là công suất của phụ tải;

2.2. Xây dựng đặc tính lan truyền và các yếu tố ảnh hưởng

Để xây dựng đường đặc tính hệ số lan truyền, các thông số được tính toán theo (2) tới (5) kết hợp biến đổi sơ đồ theo Hình 1 để xác định được Z_{Lh} , Z_{Th} và thay vào (1), tính toán giá trị T_{Uh} theo từng bậc sóng hài.

Trường hợp khi xét lan truyền sóng hài từ phía hạ áp sang cao áp của MBA thì $Z_{Lh} = Z_{sh}$, hệ số lan truyền là:

$$T_{Uh}^{HC} = \frac{|Z_{sh}|}{|Z_{Th} + Z_{sh}|} \quad (6)$$

trong khi lan truyền từ phía cao áp sang hạ áp thì $Z_{Lh} = Z_{Ch} // Z_{ldh}$, hệ số lan truyền là:

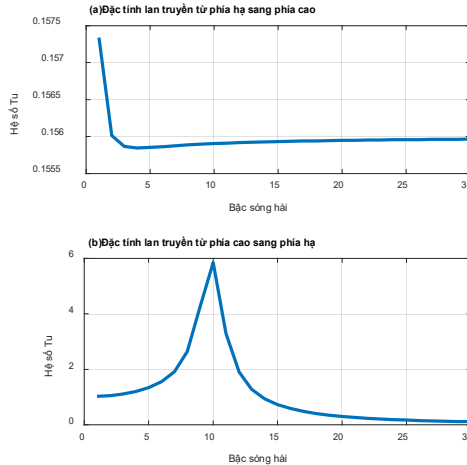
$$T_{Uh}^{CH} = \frac{|Z_{Ch} \cdot Z_{ldh}|}{|Z_{Th} (Z_{Ch} + Z_{ldh}) + Z_{Ch} \cdot Z_{ldh}|} \quad (7)$$

Với trường hợp nguồn hệ thống $S_k = 50$ MVA; MBA phân phối $S_{dmT} = 400$ kVA, 22/0,4 kV, $U_k\% = 4,5\%$, $\Delta P_k = 2,5$ kW, mang tải 80%, $\cos\phi = 0,85$; $Q_{bù} = 30\%$ SđmT, hệ số lan truyền từ (6) và (7) được xây dựng như Hình 4a và 4b.

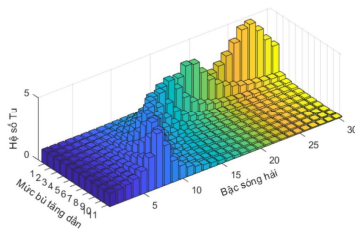
Có thể thấy rằng điện áp hài từ hạ áp sang cao áp của MBA sẽ có giá trị rất nhỏ (tiêu biến) (Hình 4a), và khi hệ thống nguồn càng lớn, tức Z_{sh} càng nhỏ thì T_{Uh}^{HC} càng nhỏ. Trong khi đó, Hình 4b cho thấy điện áp hài lan truyền từ phía cao áp sang hạ áp của MBA có thể bị khuếch đại ở tần số cộng hưởng, phụ thuộc vào mức tải và bù.

Để phân tích cụ thể hơn, ta điều chỉnh mức bù và giữ nguyên mức tải 80% S_{dmT} . Xây dựng lại đường đặc tính theo (7) với từng bậc hài và mức bù $Q_{bù}$.

Kết quả trong Hình 5 cho thấy khi thay đổi mức bù $Q_{bù}$ từ 5% tới 50% S_{dmT} (11 mức), các điểm cộng hưởng dịch chuyển dần về phía tần số thấp.



Hình 4. Đường đặc tính lan truyền sóng hài từ hai phía của 1 MBA phân phối



Hình 5. Ảnh hưởng của mức bù Q khi phụ tải không đổi tới hệ số lan truyền

Trường hợp áp dụng giải pháp bù ứng động, mức bù $Q_{bù}$ thay đổi theo mức tải (Hình 6 với 14 mức tải) thì điểm cộng hưởng dịch về phía tần số cao.

3. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ ĐẶC TÍNH LAN TRUYỀN SÓNG HÀI TỪ PV

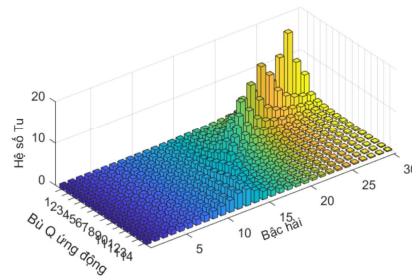
3.1. Sóng hài đặc tính từ PV

Sóng hài do PV sinh ra phụ thuộc nhiều vào công nghệ và phương pháp điều khiển bộ nghịch lưu (inverter), mức độ ảnh hưởng tới lưới điện còn phụ thuộc vào bản thân lưới điện, sóng hài nền, và mức độ mang tải của inverter [12]. Các PV thường sử

dụng inverter 2 mức điện áp và 3 mức điện áp điều khiển bằng phương pháp điều chế độ rộng xung (PWM – Pulse Width Modulation). Bên cạnh các sóng hài bậc thấp 5, 7,... thì sóng hài đặc tính khác của inverter gồm các thành phần bậc cao được xác định phụ thuộc vào hệ số điều chế tần số m_f của sóng mang [5, 13, 14]:

$$h = j.m_f \pm k \quad (8)$$

trong đó: j, k là các ô nguyên (nếu j là lẻ thì k chẵn, và nếu j chẵn thì k lẻ).

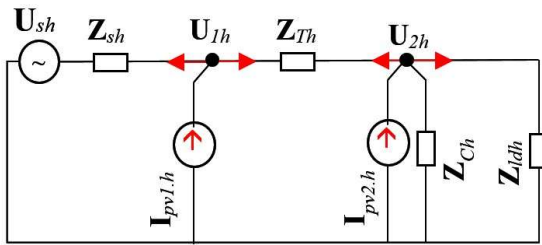


Hình 6. Ảnh hưởng của mức bù Q ứng động theo phụ tải tới hệ số lan truyền

Các inverter PV có tần số đóng cắt lớn lên tới hàng chục kHz (mf lớn), do đó các sóng hài bậc cao như (8) sẽ không được xét tới trong các khảo sát ở phần này do những ảnh hưởng là nhỏ như trong phân tích trong mục 2.2.

3.2. Mô phỏng và đánh giá lan truyền qua MBA phân phối

Hình 7 thể hiện sơ đồ thay thế tính toán sóng hài cho lưới điện trong Hình 1 (bỏ qua dây dẫn kết nối giữa các phần tử): nguồn lưới điện phân phối 35 kV là nguồn 3 pha đối xứng (không có nhiễu sóng hài) có công suất ngắn mạch $S_k = 250$ MVA; PV các phía có mức phát sóng hài <5%, phổ hài của inverter 6 xung; MBA 400 kVA, 22/0,4 kV có $U_k\% = 4,5\%$, $\Delta P_k = 2,5$ kW; phía hạ áp bù công suất phản kháng lớn nhất là 120 kVAR; phụ tải có $S_{max} = 320$ kVA và $\cos\varphi = 0,85$.



Hình 7. Sơ đồ thay thế tính toán sóng hài

Trong sơ đồ trên, các đại lượng được mô tả trong miền sóng hài, trong đó các PV được mô tả như những nguồn dòng bơm sóng hài vào lưới điện. Phương trình mô tả quan hệ các đại lượng được thành lập như sau:

$$\mathbf{I}_h = \mathbf{Y}_h \cdot \mathbf{U}_h \quad (9)$$

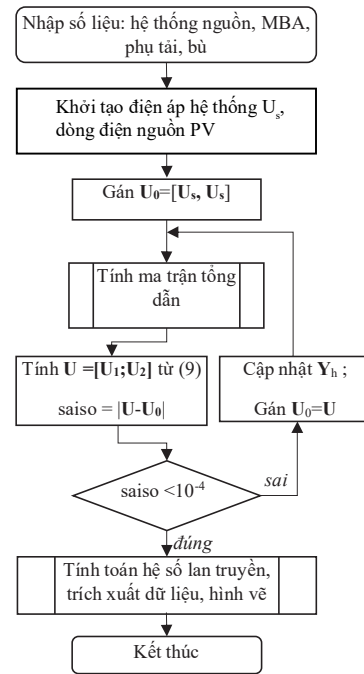
trong đó $\mathbf{Y}_h$, $\mathbf{I}_h$, $\mathbf{U}_h$ là các ma trận các đại lượng vector phức tổng dẫn, dòng điện và điện áp các nút ở từng bậc hài h.

Quá trình tính toán được thực hiện theo lưu đồ như trong Hình 8 trên miền sóng hài [10] cho từng trường hợp mô phỏng.

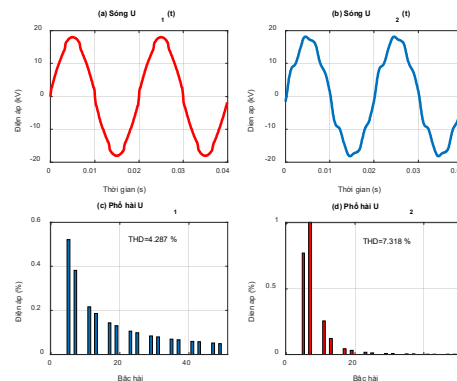
Với phân tích đã được chỉ ra trong phần trước ta tiến hành khảo sát với 8 mức tải (10%-80% $S_{đmT}$) trong các trường hợp sau: TH1 - bù cố định 30%; và TH2 - bù ứng động theo phụ tải. Kết quả thể hiện dạng sóng và phổ hài điện áp hai phía của máy biến áp như Hình 9 và 10.

Có thể thấy, khi điện áp tại đầu vào sơ cấp của máy biến áp có tổng độ méo nhỏ (<5%) thì điện áp phía sơ cấp bị méo dạng nhiều. Tuy các thành phần sóng hài riêng lẻ bậc thấp 5, 7, 11, 13 bị tăng cao không vượt quá giới hạn (<3%) nhưng tổng độ méo dạng vẫn có nguy cơ vượt quá giới hạn 6,5% [8] trong trường hợp TH1.

Rõ ràng mức độ gia tăng độ méo dạng khi áp dụng bù ứng động theo tải (trường hợp TH2) không quá lớn và vẫn nằm trong giới hạn cho phép (Hình 11).

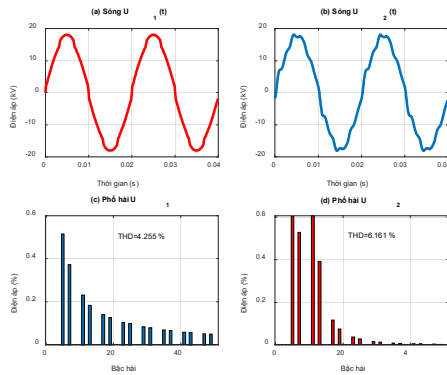


Hình 8. Sơ đồ khối mô phỏng

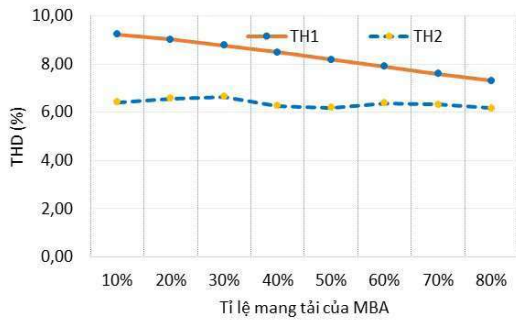


Hình 9. Đặc tính điện áp pha phía sơ cấp và thứ cấp TH1 (khi bù 30% và tải 80%)

Hình 12 cho thấy rõ hơn hệ số lan truyền của từng thành phần sóng hài riêng lẻ ứng với từng trường hợp mô phỏng. Với mức bù lớn và không đổi, các sóng hài bậc thấp sẽ có hệ số lan truyền lớn (Hình 12a). Trong khi đó, mức tải thấp sẽ chịu ảnh hưởng nhiều hơn với hệ số lan truyền lớn của các sóng hài bậc cao, tuy có biên độ hài nhỏ nhưng cũng ảnh hưởng làm tăng tổng độ méo dạng.



Hình 10. Đặc tính điện áp pha phía sơ cấp và thứ cấp TH2 (bù ứng động ở mức tải 80%)

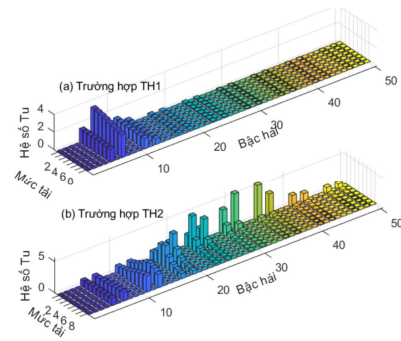


Hình 11. Tổng độ méo dạng sóng U2(t) khi phía sơ cấp có sóng hài

4. KẾT LUẬN

Sóng hài do các PV sinh ra lan truyền qua máy biến áp phân phối (MBA) gây ra méo dạng đối với sóng điện áp ở cả hai phía tuy mức độ ảnh hưởng là khác nhau.

Kết quả cho thấy cần tập trung nghiên cứu sóng hài từ phía trung áp lan truyền sang phía hạ áp để có giải pháp phù hợp. Đặc biệt khi phụ tải thấp và mức bù công suất phản kháng lớn thì ảnh hưởng sẽ càng tăng lên. Dung lượng bù phù hợp với mức phụ tải cần phải được tính toán kỹ để giảm hệ số lan truyền của các sóng hài bậc thấp. Bên cạnh đó, mặc dù các sóng hài bậc cao có biên độ nhỏ, nhưng do hệ số lan truyền lớn cũng có thể ảnh hưởng làm tăng méo dạng sóng.



Hình 12. Hệ số lan truyền điện áp hài riêng lẻ trong các trường hợp

XÁC NHẬN

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

- [1]. 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.
- [2]. Math H. J. Bollen, Fainan Hassan, Integration of Distributed Generation in the Power System, John Wiley & Son, Hoboken, New Jersey, Canada, 2011.
- [3]. 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.
- [4]. 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.

- [5]. 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.
- [6]. 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.
- [7]. 30/2019/TT-BCT, "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," Bộ Công thương, 2019
- [8]. 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).
- [9]. 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.
- [10]. Enrique Acha, Manuel Madrigal, Power system harmonics: computer modelling and analysis, John Wiley & Son, Hoboken, New Jersey, Canada, 2001.
- [11]. 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.
- [12]. R. O. Anurangi, A. S. Rodrigo and U. Jayatunga, "Effects of high levels of harmonic penetration in distribution networks with photovoltaic inverters," 2017 IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Peradeniya, Sri Lanka, 2017, pp. 1-6.
- [13]. 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.
- [14]. D. Grahame Holmes, Thomas A.Lipo, Pulse width modulation for power converters: principle and practice, John Wiley & Son, Hoboken, New Jersey, Canada, 2003.

Giới thiệu tác giả:

Tác giả Nguyễn Phúc Huy tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ tại Trường 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.



Tác giả Đặng Việt Hùng tốt nghiệp Đại học và Thạc sĩ tại trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2002 và 2004. Nhận bằng Tiến sĩ Kỹ thuật điện tại trường École Centrale de Lyon (Cộng hòa Pháp) năm 2010.

Lĩnh vực nghiên cứu: Chất lượng điện năng, vật liệu điện, ứng dụng điện tử công suất.