

NGHIÊN CỨU SỰ LAN TRUYỀN SÓNG HÀI TRONG LƯỚI ĐIỆN TRÊN MIỀN TẦN SỐ

STUDY ON HARMONIC PROPAGATION IN ELECTRIC POWER NETWORKS IN FREQUENCY DOMAIN

Nguyễn Phúc Huy, Đặng Việt Hùng

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 21/5/2018, Ngày chấp nhận đăng: 2/7/2018, Phản biện: TS. Trần Quang Khánh

Tóm tắt:

Sóng hài xâm nhập và lan truyền trong lưới điện có thể tăng lên khi có cộng hưởng ở những tần số hài nhất định. Bài báo ứng dụng kỹ thuật quét tần số để tìm ra những điểm cộng hưởng xuất hiện trên lưới điện. Xây dựng quan hệ truyền sóng hài dòng điện - điện áp riêng tại các nút, hoặc giữa các nút giúp ta dự báo được khả năng sóng hài tăng cao hoặc giảm thấp ở những tần số quan tâm. Áp dụng phân tích vectơ phức các đại lượng, tiến hành tính toán chế độ xác lập của hệ thống theo lý thuyết mạch tuyến tính trên miền tần số và xếp chồng kết quả để tìm sóng hài dòng điện và điện áp tại các nút. Kết quả cho thấy, các kỹ thuật được sử dụng kết hợp trên miền tần số là phù hợp để khảo sát sự lan truyền sóng hài. Đó là bước đầu tiên thiết lập cơ sở cho việc đề xuất giải pháp loại trừ ảnh hưởng của sóng hài, tính toán thiết kế và quy hoạch lưới điện.

Từ khóa:

Sóng hài, miền tần số, quét tần số, lan truyền sóng hài, mạch tuyến tính.

Abstract:

Harmonics penetrate and propagate deeply in electric power networks may be amplified at specific resonance frequencies. This paper deals with the use of frequency scan to inspect those resonance frequencies in an electric power network. The relations of harmonic voltage - current transfer at each bus and between buses are established, giving predictions to the rising or lowering of concerned harmonics. The complex phasor analysis and linear circuit analysis are applied in frequency domain to analysis the steady state of the network, superimposition of all harmonics to get node voltages and currents. The results show that, the proposed techniques are suitable for investigating harmonic propagation. This is the first step to establish basic solutions to eliminate effects of harmonics, to plan and design electric power networks.

Key words:

Harmonic, frequency domain, frequency scan, harmonic propagation, linear circuit.

1. MỞ ĐẦU

Trên lưới điện và hệ thống điện có đầu

nối rất nhiều loại phần tử phi tuyến và phụ tải phi tuyến phát sinh sóng hài, có

thể là sóng hài điện áp hoặc dòng điện. Sóng hài đó có thể lan truyền khắp lưới điện và có thể làm tăng cao mức nhiễu sóng hài khi xuất hiện cộng hưởng, trong đó các thiết bị tụ điện bù ngang công suất phản kháng có ảnh hưởng rõ rệt trong việc tạo nên các điểm cộng hưởng [1]. Sóng hài của dòng điện được sinh ra thay đổi theo thời gian và phụ thuộc vào điện áp [2]. Điều đó thể hiện rằng mức độ sóng hài xâm nhập và ảnh hưởng của nó phụ thuộc vào chế độ vận hành của lưới điện.

Theo quy định chung, mức yêu cầu về sóng hài ngày càng được kiểm soát ngặt nghèo theo những tiêu chuẩn cụ thể. Và để một phần kiểm soát đáp ứng được những yêu cầu đó thì cần tiến hành nghiên cứu và sàng lọc ban đầu những nguyên nhân có thể gây ra sự tăng cao độ nhiễu sóng hài trên lưới. Giải pháp nghiên cứu cộng hưởng trên miền tần số thường được nhắc đến là giải pháp đầu tiên [3, 4]. Dựa vào đặc tính tổng trở tần số có thể đoán biết được trước những điểm cộng hưởng tại các nút trong lưới điện. Mô phỏng trong miền thời gian cũng thường được kết hợp với mô phỏng trên miền tần số sẽ cho dạng sóng dòng điện và điện áp tại những vị trí cần khảo sát.

Để có thể tiến hành khảo sát lưới điện trong miền tần số, các phần tiếp theo của bài báo sẽ mô tả mô hình hóa phù hợp của từng phần tử. Dựa trên cơ sở lý thuyết phân tích vectơ phức của các đại lượng, và hệ phương trình tuyến tính để tìm được mối quan hệ điện áp và dòng điện hài thông qua tổng trở truyền sóng hài.

2. MÔ HÌNH HÓA PHẦN TỬ TRÊN MIỀN TẦN SỐ

Các phần tử thụ động, điện trở thường được mô tả là không đổi theo tần số. Trong khi đó cuộn kháng và tụ điện có thay đổi theo tần số như (1) và (2) [5].

$$jX_{hL} = jhX_L = jh\omega_0 L \quad (1)$$

$$jX_{hC} = -j \frac{X_C}{h} = -j \frac{1}{h\omega_0 C} \quad (2)$$

trong đó h là bậc sóng hài; X_L và X_C là giá trị cảm kháng và dung kháng ở tần số cơ bản ($\omega_0 = 2\pi f_0$) của lưới điện, và có thể được tính qua điện áp và công suất của phần tử.

Đối với đường dây trên không, mô hình thông số tập trung chỉ xét cho các đường dây ngắn. Với đường dây dài, xét đến trường hợp đảo pha hoàn toàn, sơ đồ thay thế hình π với tổng trở nối tiếp và tổng dẫn song song được tính như sau:

$$\underline{Z}_s = \underline{Z}_c \cdot \sinh(\underline{\gamma}l) \quad (3)$$

$$\frac{Y_{sh}}{2} = \frac{1}{\underline{Z}_c} \cdot \tanh\left(\frac{\underline{\gamma}l}{2}\right) \quad (4)$$

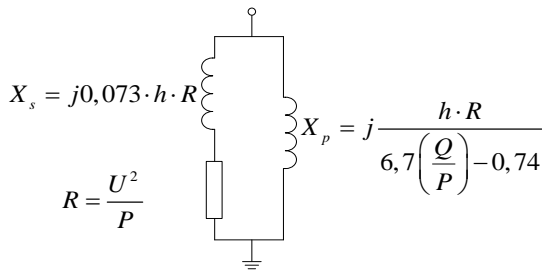
trong đó \underline{Z}_c và $\underline{\gamma}$ là tổng trở sóng và hệ số truyền sóng của đường dây.

Riêng điện trở máy phát điện (R_{hg}) hoặc máy biến áp (R_{ht}) được xét có sự thay đổi theo tần số như (5) với R là giá trị điện trở ở tần số cơ bản. Còn cảm kháng X_{hL} của máy phát điện là điện kháng siêu quá độ.

$$R_{h(g/T)} = R\sqrt{h} \quad (5)$$

Để phục vụ bài toán phân tích sóng hài, mô hình phụ tải tuyến tính của CIGRE được cho là phù hợp nhất như hình 1 [3].

Để nghiên cứu sự lan truyền sóng hài trên lưới điện, trong bài báo này nguồn sóng hài là nguồn dòng điện được sinh ra từ các thiết bị điện tử công suất, bộ biến đổi nguồn dòng như SVC, lò hồ quang cảm ứng... [6, 7].



Hình 1. Mô hình phụ tải trong miền tần số của CIGRE

3. CƠ SỞ PHÂN TÍCH LAN TRUYỀN SÓNG HÀI

Các đại lượng không sin chu kỳ không đổi có thể được biểu diễn là tổng của các cặp đại lượng trực giao có các tần số khác nhau, tạo thành chuỗi Fourier. Mỗi thành phần có tần số f_h là bội bậc h của tần số cơ bản f_0 , gọi là sóng hài bậc h . Dựa vào khai triển Euler dạng hàm mũ đối với mỗi cặp hai thành phần trực giao ta được dạng biểu diễn chuỗi Fourier phức trong miền tần số sau đó sử dụng nguyên lý xếp chồng để tìm dòng và áp tổng. Đối với điện áp ở tần số f_h ta có thể viết:

$$\begin{aligned} u_h(t) &= \sqrt{2}U_h \cos(h\omega_0 t + \theta_{uh}) \\ &= \sqrt{2}U_h \cdot \Re\{e^{j\theta_{uh}} e^{jh\omega_0 t}\} \end{aligned} \quad (6)$$

Nếu dòng điện cũng biểu diễn như dạng

(6), giản ước $e^{jh\omega_0 t}$ và $\Re\{\bullet\}$ ta có được tổng trở của mạch được biểu diễn như (7) [5] và công suất phức cũng có thể tính từ các đại lượng dòng và áp như (8).

$$\underline{Z}_h = \frac{U_h e^{j\theta_{uh}}}{\sqrt{3}I_h e^{j\theta_{ih}}} = Z_h e^{j(\theta_{uh} - \theta_{ih})} \quad (7)$$

$$= Z_h e^{j\theta_{zh}} = R_h + jX_h$$

$$\underline{S}_h = \sqrt{3} \underline{U}_h \cdot \underline{I}_h^* = \sqrt{3} U_h I_h e^{j(\theta_{uh} - \theta_{ih})} \quad (8)$$

Trong các công thức trên, \underline{U}_h và \underline{I}_h là điện áp phức và dòng điện phức hài bậc h với góc pha tương ứng là θ_{uh} và θ_{ih} ; θ_{zh} là góc của tổng trở hài bậc h .

Khi phân tích chế độ xác lập của mạch điện tuyến tính trong điều kiện các đại lượng không sin, phân tích riêng với từng thành phần sóng hài độc lập sau đó xếp chồng kết quả. Một cách tổng quát có thể mô tả qua quan hệ sau ứng với từng bậc hài h :

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

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

Ma trận \underline{Y}_h được thành lập với các phần tử là $Y_h^{i,j}$ tương ứng là tổng dẫn tương đương giữa nút i và j ở bậc hài h .

$$\underline{Y}_h = \begin{bmatrix} Y_h^{1,1} & \dots & Y_h^{1,j} & \dots & Y_h^{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_h^{j,1} & \dots & Y_h^{j,j} & \dots & Y_h^{j,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_h^{N,1} & \dots & Y_h^{N,j} & \dots & Y_h^{N,N} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Nghịch đảo của ma trận tổng dẫn chính là ma trận tổng trở \underline{Z}_h , ta có quan hệ:

$$\underline{U}_h = \underline{Z}_h \cdot \underline{I}_h \quad (11)$$

trong đó, với dòng điện hài được bơm vào nút j là \underline{I}_h^j , điện áp hài tại nút i là $\underline{U}_h^i = \underline{Z}_h^{i,j} \cdot \underline{I}_h^j$ với $\underline{Z}_h^{i,j}$ vectơ tổng trở phức, đóng vai trò là hàm truyền sóng hài bậc h từ nút j tới nút i . Ứng với mỗi tần số trong dải tần số khảo sát ta được một ma trận tổng dẫn và từ đó tính ma trận tổng trở hài trong đó mỗi phần tử của ma trận là tỉ lệ truyền giữa điện áp và dòng điện hài tương ứng giữa các nút trong lưới điện.

Kỹ thuật xây dựng tổng trở theo tần số này gọi là kỹ thuật quét tần, là giải pháp đơn giản và được thực hiện ở bước đầu tiên trong các bài toán phân tích sóng hài, đặc biệt trong các bài toán thiết kế tính toán bộ lọc sóng hài. Các phần tử trên đường chéo chính $\underline{Z}_h^{j,j}$ là tổng trở vào nút j , tức là hàm truyền sóng hài dòng điện - điện áp riêng nút j . Ngoài ra, từ các tổng trở tương hỗ giữa các nút có thể xác định được sóng hài điện áp ở nút bất kỳ khi biết dòng điện hài bơm vào lưới điện.

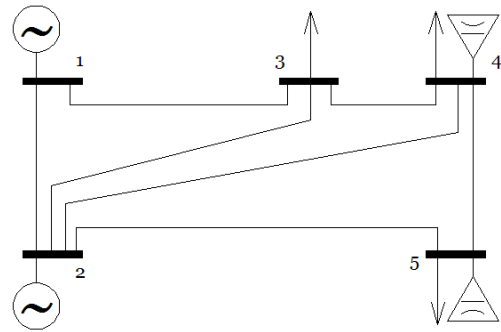
4. MÔ PHÒNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Phần mềm Matlab được sử dụng làm công cụ hỗ trợ cho quá trình mô phỏng. Mô hình lưới điện trong mô phỏng là mô hình chuẩn 5 nút của IEEE như hình 2. Nút 1 và nút 2 là nút máy phát có điện kháng tương ứng là $X_{g1}=j0,0001$ p.u. và $X_{g2}=j0,001$ p.u, trong đó nút 1 là nút cân bằng. Nút 3 và nút 4 có bù công suất phản kháng. Thông số các nhánh đường dây và các nút trong bảng 1 và 2.

Để minh họa và kiểm chứng cho lý thuyết

đã nêu, ta xét 2 trường hợp tương ứng với hai mức công suất yêu cầu từ phụ tải :

- Trường hợp 1 (TH1): Các phụ tải yêu cầu 100%, mức phát sóng hài giảm dần theo từng bậc.
- Trường hợp 2 (TH2): Các phụ tải yêu cầu và sóng hài được bơm vào ở mức 50% trong TH1.



Hình 2. Mô hình lưới điện IEEE 5 nút

Ta tiến hành giải bài toán phân bố dòng công suất sử dụng thuật toán lặp Gauss-Seidel cho thành phần cơ bản của dòng điện và điện áp. Kết quả điện áp các nút có được như trong bảng 3. Toàn bộ quá trình mô phỏng tính toán được thể hiện như trong hình 3.

Bảng 1. Thông số đường dây truyền tải

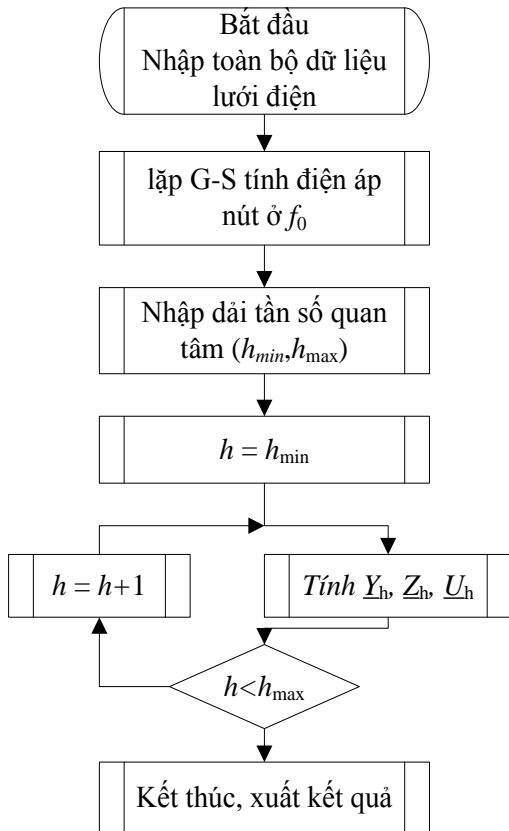
Nhánh	z_{ij} (p.u)	$jb_{ij}/2$ (p.u)
1-2	0,02+j0,06	j0,030
1-3	0,08+j0,24	j0,025
2-3	0,06+j0,18	j0,020
2-4	0,06+j0,18	j0,020
2-5	0,04+j0,12	j0,015
3-4	0,01+j0,03	j0,010
4-5	0,08+j0,24	j0,025

Bảng 2. Thông số nút của lưới điện (p.u.)

Nút	P_F	Q_F	P_L	Q_L	Q_c
2	0,3	-	-	-	-
3	-	-	0,45	0,2	-
4	-	-	0,8	0,3	0,3
5	-	-	0,5	0,25	0,4

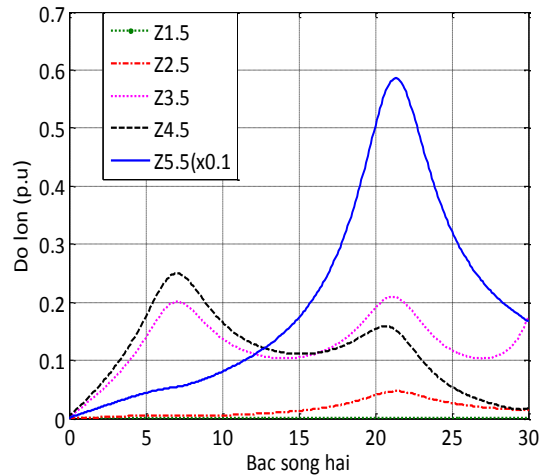
Bảng 3. Điện áp thành các nút ở tần số cơ bản

Nút	U_1 (p.u)	θ_{u1} (độ)	Nút	U_1 (p.u)	θ_{u1} (độ)
1	1,05	0	4	0,979	-6,675
2	1,0	-2,373	5	0,993	-6,406
3	0,980	-5,975			

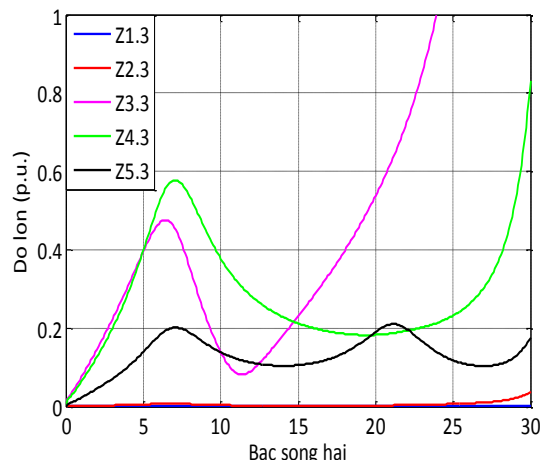


Hình 3. Sơ đồ khối mô phỏng

Tổng trở vào từng nút được xây dựng với kết quả thể hiện trong hình 4. Trong hình 4, đường Z5.5(x0,1) là tổng trở vào của nút 5 (điều chỉnh giảm 10 lần) có điểm cộng hưởng gần với sóng hài bậc 21; từ Z1.5 tới Z4.5 cho ta hàm sóng hài điện áp giữa nút 5 và các nút 1, 2, 3, 4. Có thể nhận thấy, ảnh hưởng của nút 5 tới nút 3 và nút 4 chủ yếu ở hai bậc hài gần với 7 và 21. Ngoài ra ảnh hưởng của sóng hài dòng điện bơm vào nút 5 gần như không ảnh hưởng tới điện áp tại nút 1 và 2.



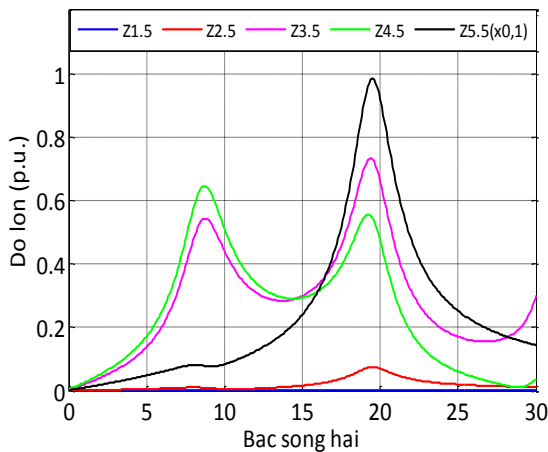
Hình 4. Tổng trở truyền sóng hài từ nút 5



Hình 5. Tổng trở truyền sóng hài từ nút 3

Từ hình 5 cũng có thể thấy, nếu nguồn hài dòng điện xuất hiện tại nút 3 thì ảnh hưởng của nó tới nút 1 và 2 cũng rất nhỏ. Ảnh hưởng tới nút 4 và 5 chủ yếu ở sóng hài bậc 7, còn sóng hài bậc 21 thường không xuất hiện nên không phải là vấn đề đáng ngại. Những kết quả tương tự cũng thu được cho trường hợp ảnh hưởng từ nút 4 tới các nút khác trên lưới điện.

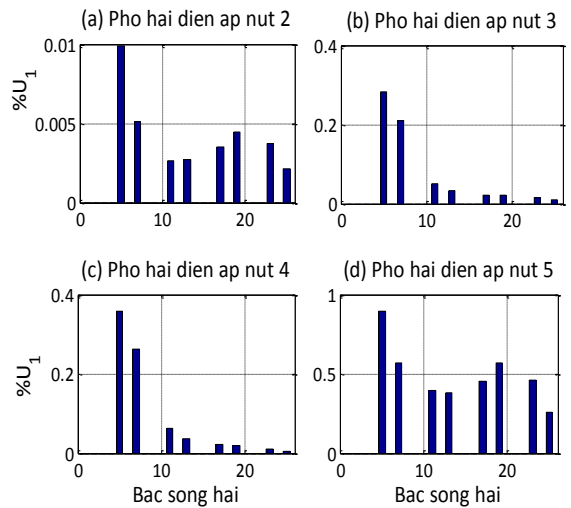
Với quan hệ giữa thông số của các phần tử với tần số đã được thiết lập, rõ ràng rằng khi chế độ làm việc (mức độ mang tải) của các phần tử thay đổi thì tổng trở truyền sóng hài cũng thay đổi theo. Hình 6 mô tả tổng trở truyền sóng hài từ nút 5 tới các nút khác trong trường hợp phụ tải giảm 50% công suất.



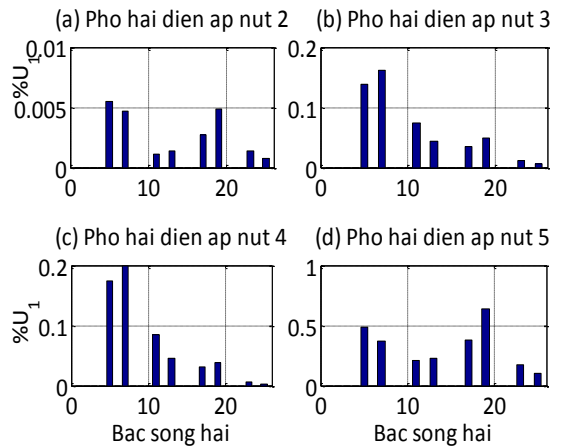
Hình 6. Tổng trở truyền sóng hài từ nút 5 -TH2

Bảng 4. Độ lớn dòng điện hài bơm vào nút 5

Bậc hài	% I_1	Bậc hài	% I_1
5	5,05	17	0,44
7	2,59	19	0,35
11	1,05	23	0,24
13	0,75	25	0,20



Hình 7. Phổ sóng hài điện áp các nút TH1



Hình 8. Phổ sóng hài điện áp các nút TH2

Có thể thấy, các điểm cộng hưởng đã dịch chuyển từ 7 và 21 chuyển tới gần 9 và 19.

Tiến hành bơm nguồn hài dòng điện vào nút 5 với số liệu trong bảng 4. Giải mạch điện theo quan hệ (11) để tìm được điện áp hài tại các nút. Có thể nhận thấy trong TH1, sóng hài điện áp chủ yếu tăng cao ở bậc 7 và xung quanh bậc 21 (hình 7). Trong TH2, tuy phụ tải, dòng điện hài bơm vào đã giảm đi 50%, tuy nhiên mức hài bậc 17 và 19 ở nút 5 và các nút khác

vẫn ở mức cao so với TH1 do có cộng hưởng xảy ra (hình 8).

Kết quả trên rất hữu ích trong các bài toán phân tích thiết kế lưới điện, thiết kế các bộ lọc cần thiết trang bị trong lưới điện để đảm bảo chất lượng điện năng.

Bảng 5. Tổng độ méo sóng hài điện áp các nút (THDv%) các trường hợp

Nút	TH1	TH2
1	0,0002	0,0001
2	0,0138	0,0095
3	0,3674	0,2383
4	0,4586	0,2852
5	1,5036	1,0328

5. KẾT LUẬN

Kỹ thuật quét tần số là bước làm đầu tiên

trong nghiên cứu sự xâm nhập và lan truyền của sóng hài trong mạng lưới điện. Đây là bước làm đơn giản nhưng cần thiết. Bên cạnh đó, khi bỏ qua tương tác hài giữa lưới điện với nguồn phát sinh sóng hài thì kỹ thuật xếp chồng là phù hợp cho nghiên cứu vấn đề đã nêu trên.

Trên miền tần số, dựa vào đặc tính tổng trở truyền sóng hài có thể quan sát được các điểm cộng hưởng. Tùy theo từng chế độ vận hành của mạng điện, các điểm cộng hưởng có thể thay đổi và có thể gây nguy hiểm. Việc khảo sát mạng điện trong các chế độ khác nhau sẽ giúp sàng lọc những nguy cơ gây hại để đề xuất các biện pháp khắc phục như thiết kế bộ lọc hoặc thiết kế lưới nhằm dịch chuyển điểm cộng hưởng tới các sóng hài gần như không xuất hiện trên lưới điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Reyes S. Herrera, Patricio Salmerón, Harmonic disturbance identification in electrical systems with capacitor banks, *Electric Power Systems Research*, Vol.82, No.1, 2012, 18-16.
- [2] Baghzouz Y., and others, Time-Varying Harmonics: Part II-Harmonic Summation and Propagation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.17, no.1, January 2002.
- [3] IEEE Task Force on Harmonic Modeling and Simulation, Impact of Aggregate Linear Load Modeling on Harmonic analysis: A comparison of Common Practice and Analytical Methods, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 18, No. 2, April 2003.
- [4] Xiongfei Wang, and others, Modeling and Analysis of Harmonic Resonance in a Power Electronics Based AC Power System, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sept. 2013, pp. 5229-5236.
- [5] Enrique Acha, Manuel Madrigal, *Power Systems Harmonics: Computer Modelling and Analysis*, Wiley-IEEE Press, United State of America, 1st edition, 2001.
- [6] Fatma Rabea, and others, Implementation of a Simplified SVC Model into Newton-Raphson Load Flow Algorithm, *International conference on Innovative trend in computer engineering (ITCE2018)*, Aswan University, Egypt, p. 374 - 379, 2018.

- [7] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, Wiley-IEEE Press, United State of America, 1st edition, 2002.

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. Năm 2015 nhận bằng Tiến sĩ Hệ thống điện và Tự động hóa tại Trường Đại học Điện lực Hoa Bắc, Bắc Kinh, Trung Quốc.

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



Tác giả Đặng Việt Hùng tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2002, 2004. Nhận bằng Tiến sĩ Kỹ thuật điện năm 2010 tại trường Ecole Centrale de Lyon, Cộng hòa Pháp.

Lĩnh vực nghiên cứu: chất lượng điện năng, kỹ thuật vật liệu điện cao áp, tự động hóa lưới điện.