

MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH LAN TRUYỀN SÓNG HÀI TRÊN ĐƯỜNG DÂY TRUYỀN TẢI KẾT NỐI BÙ DỌC CÓ ĐIỀU KHIỂN

MODELLING AND ANALYSIS OF HARMONIC PROPAGATION IN CONNECTED THYRISTOR CONTROLLED SERIES COMPENSATION TRANSMISSION LINES

Nguyễn Phúc Huy

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 04/10/2019, Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2019, Phản biện: TS. Nguyễn Xuân Trường

Tóm tắt:

Thiết bị bù dọc có điều khiển (TCSC) được sử dụng trên các đường dây truyền tải để nâng cao khả năng điều khiển công suất trong hệ thống điện. Nó có thể tạo ra cộng hưởng ở nhiều tần số khác nhau bên cạnh đặc tính phát sinh sóng hài do sử dụng van bán dẫn. Sóng hài sinh ra hoặc sóng hài sẵn có của lưới điện lan truyền trên lưới điện và làm tăng độ méo điện áp các nút. Bài báo ứng dụng kỹ thuật mô phỏng trên miền sóng hài để mô phỏng và khảo sát ảnh hưởng của TCSC trong việc lan truyền sóng hài trong lưới điện. Kết quả mô phỏng cho thấy mức độ ảnh hưởng của TCSC đến lan truyền sóng hài cần phải xét tới khi đánh giá độ méo điện áp các nút. Sự gia tăng độ méo sóng hài có thể gây quá tải cho các thiết bị lọc và những tác dụng phụ không mong muốn.

Từ khóa:

Sóng hài, miền sóng hài, thiết bị dọc có điều khiển, TCR, lan truyền sóng hài.

Abstract:

Thyristor controlled series capacitor (TCSC) are installed in transmission lines to enhance power controllability. It could give rise to resonance at different frequencies additional to harmonic generating due to semiconductor valves. Harmonics are generated by or existing harmonics propagated in power networks and increasing voltage distortion. This paper deals with the use of harmonic domain technique to simulate and inspecting the effect of TCSC on harmonic propagation. The result showed that the effect of TCSC on harmonic propagation and should be considered in distorted voltage investigation. Consequently, the strong voltage distortion could make filters overload and undesirable side-effects.

Keywords:

Harmonic, Harmonic domain, TCSC, TCR, Harmonic propagation.

1. MỞ ĐẦU

Sóng hài trong hệ thống điện được sinh ra không những làm ảnh hưởng đến chất lượng làm việc của các thiết bị điện liên kết mà nó còn có thể lan truyền trong hệ

thống điện. Để nghiên cứu sự lan truyền sóng hài, kỹ thuật quét tần sơ bộ cho thấy các điểm cộng hưởng trên lưới điện, kỹ thuật mô phỏng trên miền thời gian có thể cho dạng sóng thay đổi theo thời gian

nhưng chúng không cho thấy sự tương tác giữa lưới điện và thiết bị điện phi tuyến [1]. Trên thực tế thì thiết bị điện tử công suất là các nguồn hài bị ảnh hưởng nhiều bởi tín hiệu đầu vào và do đó luôn có sự tương tác (modulation) sóng hài giữa chúng và lưới điện. Kỹ thuật phân tích trên miền sóng hài là sự kết hợp phân tích sóng hài trên miền thời gian và miền tần số, áp dụng thuận lợi cho cả trường hợp phân tích các hệ động, sóng hài trung gian (interharmonic) [2, 3].

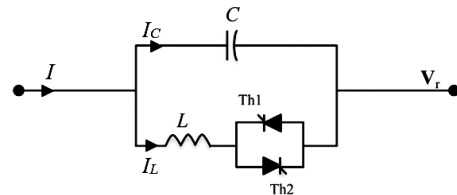
Theo xu hướng của lưới điện truyền tải điện xoay chiều linh hoạt, TCSC là một thiết bị hữu dụng trong việc nâng cao khả năng điều khiển công suất trong hệ thống điện. Các mô hình tĩnh trong phân tích siêu quá độ điện từ không phù hợp với quá trình động của quá trình đóng cắt TCSC, chúng có độ chính xác cao nhưng lại hạn chế về sự thay đổi theo thời gian của đặc tính phi tuyến [4-8]. Mặc dù trên lưới điện Việt Nam hiện chưa lắp đặt TCSC vì vấn đề chi phí đầu tư cao nhưng các nghiên cứu vẫn cần được thực hiện để có cái nhìn toàn diện hơn [9].

Trong bài báo này, tác giả sẽ mô phỏng TCSC và lưới điện trên miền sóng hài. Ảnh hưởng của TCSC đến quá trình lan truyền sóng hài trong lưới điện khu vực có kết nối TCSC sẽ được phân tích và làm rõ trong các trường hợp: khi các phụ tải phi tuyến trên lưới điện phát sinh sóng hài, và khi phía hệ thống có sóng hài truyền tới.

2. MÔ HÌNH TCSC TRÊN MIỀN SÓNG HÀI

Cấu hình cơ bản của TCSC được thể hiện

trong hình 1, bao gồm một kháng bù có điều khiển (TCR) nối song song với tụ điện, để nâng cao hiệu quả điều chỉnh công suất trong lưới điện [1,2].



Hình 1. Cấu hình cơ bản của TCSC

Khả năng điều chỉnh của TCSC phụ thuộc vào góc mở α tương ứng của thyristor trong bộ TCR. Ở tần số cơ bản của dòng điện, điện kháng tương đương của TCSC có thể được mô tả như (1):

$$X_{TCSC}(\alpha) = -X_C + (X_C + X_{LC}) \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2(\pi - \alpha)}{\pi} - \frac{4X_{LC}^2 \cos^2(\pi - \alpha)}{X_L} \cdot \frac{k \cdot \tan k(\pi - \alpha) - \tan(\pi - \alpha)}{\pi} \quad (1)$$

trong đó $k = 1/\omega_0 \sqrt{LC}$ và $X_{LC} = \frac{X_C \cdot X_L}{X_C - X_L}$,

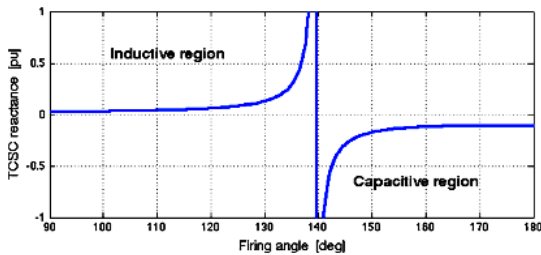
với X_C và X_L là dung kháng và cảm kháng.

TCSC làm việc có ba chế độ cơ bản: chế độ khóa, chế độ dẫn hoàn toàn, và chế độ dẫn một phần. Hình 2 mô tả đặc tính tổng trở của TCSC ở tần số cơ bản, phân biệt rõ ràng hai vùng làm việc, vùng cảm tính và vùng dung tính. Trong chế độ dẫn một phần, phụ thuộc vào góc mở, điểm làm việc có thể nằm ở một trong hai vùng trên [2].

Lý thuyết về miền sóng hài đã được tác giả trong [10] trình bày rõ. Để phục vụ bài toán phân tích sự lan truyền sóng hài, tổng dẫn của TCSC có thể mô tả như (2).

$$\mathbf{Y}_{TCSC} = \mathbf{Y}_{TCR} + \mathbf{Y}_C \quad (2)$$

trong đó $\mathbf{Y}_C = C \cdot \mathbf{D}(j\omega_0)$ là ma trận tổng dẫn của tụ và C là điện dung của nó; $\mathbf{Y}_{TCR} = \frac{1}{L} \mathbf{D}^{-1}(j\omega_0) \mathbf{S}$ là ma trận tổng dẫn của TCR; $\mathbf{D}$ là ma trận vi phân, $\mathbf{S}$ là ma trận hàm đóng cắt của van bán dẫn thyristor [1].



Hình 2. Đặc tính tổng trở của TCSC

3. MÔ HÌNH ĐƯỜNG DÂY VÀ PHỤ TẢI

Trong bài toán giải tích lưới điện, đường dây được thay thế bằng sơ đồ hình pi với tổng trở nối tiếp và các tổng dẫn nối song song. Về cơ bản, mô hình biểu diễn các hiện tượng vật lý liên quan đến đường dây truyền tải, với tổng trở nối tiếp gồm điện trở nối tiếp với điện kháng, và trong đa phần trường hợp thì tổng dẫn nối shunt chỉ gồm thành phần điện dung.

Trong miền sóng hài, phần tử điện kháng và điện dung được mô tả như sau:

$$\mathbf{Y}_L = [L \cdot \mathbf{D}(j\omega_0)]^{-1} \quad (3)$$

$$\mathbf{Y}_C = C \cdot \mathbf{D}(j\omega_0) \quad (4)$$

L và C là giá trị điện cảm và điện dung của đường dây.

Điện trở của đường dây là phần tử thụ động có giá trị không đổi. Nếu ta gọi tổng dẫn của điện trở R thì trong miền sóng hài sẽ có dạng sau:

$$\mathbf{Y}_R = \frac{1}{R} \mathbf{U} \quad (5)$$

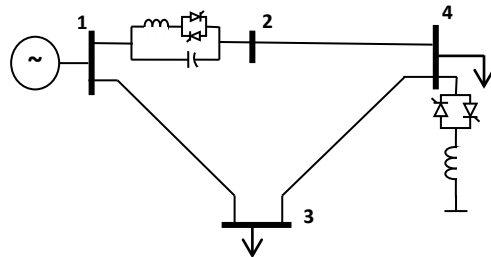
trong đó, $\mathbf{U}$ là ma trận đường chéo đơn vị.

Trong khi đó, mô hình phụ tải tuyến tính được sử dụng gồm điện trở nối tiếp với điện kháng. Mô hình trong miền sóng hài có được là:

$$\mathbf{Y}_{tai} = [R_{tai} \cdot \mathbf{U} + L_{tai} \cdot \mathbf{D}(j\omega_0)]^{-1} \quad (6)$$

4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Phần mềm Matlab được sử dụng làm công cụ hỗ trợ cho quá trình mô phỏng. Mô hình trong hình 3. Nút tải 4 có kết nối một bộ TCR đóng vai trò là một nguồn hài. Lưới điện 230 kV dùng trong mô phỏng có số liệu như trong bảng 1 [1].



Hình 3. Mô hình lưới điện mô phỏng

Bảng 1. Thông số lưới điện

Từ nút	Tới nút	R (p.u.)	X (p.u.)
1	3	0,01	0,05
2	4	0,01	0,05
3	4	0,02	0,06
3 (phụ tải)		0,32	0,35
4 (phụ tải)		1,04	0,48

Bộ TCSC có $C = 67$ p.u., $L = 0,0026$ p.u., TCR có $L_{tcr} = 0,1$ p.u.

Phương trình mô tả quan hệ giữa dòng điện vào các nút và điện áp các nút như sau:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & -\mathbf{Y}_{TCSC} & -\mathbf{Y}_{L2} & 0 \\ -\mathbf{Y}_{TCSC} & \mathbf{Y}_{22} & 0 & -\mathbf{Y}_{L1} \\ -\mathbf{Y}_{L2} & 0 & \mathbf{Y}_{33} & -\mathbf{Y}_{L3} \\ 0 & -\mathbf{Y}_{L1} & -\mathbf{Y}_{L3} & \mathbf{Y}_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \\ \mathbf{U}_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

trong đó:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{11} &= \mathbf{Y}_{TCSC} + \mathbf{Y}_{L2} \\ \mathbf{Y}_{22} &= \mathbf{Y}_{TCSC} + \mathbf{Y}_{L1} \\ \mathbf{Y}_{33} &= \mathbf{Y}_{L2} + \mathbf{Y}_{L3} + \mathbf{Y}_{tai2} \\ \mathbf{Y}_{44} &= \mathbf{Y}_{L1} + \mathbf{Y}_{L3} + \mathbf{Y}_{tai1} + \mathbf{Y}_{TCR} \end{aligned} \quad (8)$$

Vì nút 1 là nút cân bằng của hệ thống, trong mô hình thì không có nguồn dòng điện bơm vào các nút 2, 3 và 4 và do đó, hệ (7) có thể viết gọn lại, xác định được điện áp các nút như sau:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \\ \mathbf{U}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{22} & 0 & -\mathbf{Y}_{L1} \\ 0 & \mathbf{Y}_{33} & -\mathbf{Y}_{L3} \\ -\mathbf{Y}_{L1} & -\mathbf{Y}_{L3} & \mathbf{Y}_{44} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{TCSC} \\ \mathbf{Y}_{L2} \\ 0 \end{bmatrix} \times \mathbf{U}_1 \quad (9)$$

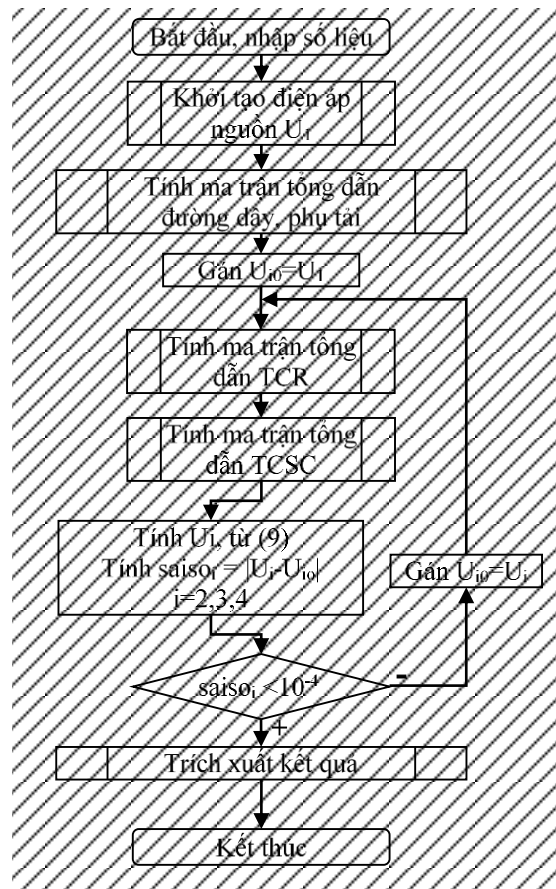
Sơ đồ khối mô phỏng được mô tả trong hình 4, tất cả các mô đun tạo nguồn điện áp, tính tổng dẫn của các phần tử trong miền sóng hài đều được thiết lập trong các chương trình con. Bài toán được thực hiện lặp Gauss-Seidel với sai số 10^{-4} cho phép tính điện áp các nút, dòng điện các nhánh với giả thiết giữ U_1 là không đổi.

Để khảo sát sự ảnh hưởng của TCSC trong việc lan truyền sóng hài trong lưới điện, ta xét trường hợp TCR kết nối tại nút 4 làm việc với góc mở các van là 120° và xét:

- Trường hợp 1 (TH1): Khi chưa có TCSC, sóng hài phát sinh từ TCR sẽ lan truyền trên lưới điện;
- Trường hợp 2 (TH2): Khi chưa có TCSC, ngoài sóng hài của TCR còn có sóng hài bậc 5 từ hệ thống truyền về.

• Trường hợp 3 (TH3): Khi có TCSC làm việc trong vùng dung tính, góc mở của van thyristor là 150° , và khi chỉ có sóng hài từ TCR tại nút 4 ảnh hưởng.

• Trường hợp 4 (TH4): Khi có TCSC làm việc trong vùng dung tính, góc mở của van thyristor là 150° , và khi bên cạnh sóng hài từ TCR tại nút 4 còn có sóng hài bậc 5 từ hệ thống truyền về.



Hình 4. Sơ đồ khối mô phỏng

Bảng 2. Giá trị điện áp cơ bản ở các nút

	U2 (p.u.)	U3 (p.u.)	U4 (p.u.)
TH1	/	0,9100	0,8443
TH2	/	0,9104	0,8451
TH3	1,1175	0,9408	0,9065
TH4	1,1148	0,9414	0,9078

Kết quả điện áp cho các trường hợp mô phỏng có thể thấy ở trong bảng 2. Có thể thấy, sau khi có TCSC (TH3&TH4) điện áp nút 2 ngay sau TCSC tăng lên cao, kéo theo điện áp tại các nút tải 3 và nút tải 4 tăng lên so với trường hợp trước khi có TCSC (TH1&TH2).

Tổng độ méo sóng hài của các sóng dòng điện và điện áp như trong bảng 3, 4. Bảng 3 cho thấy độ méo lớn xảy ra tại nút 4 là nút có nguồn hài bơm vào kéo theo méo sóng xảy ra cho điện áp nút 3. Trong khi đó độ méo sóng điện áp sau TCSC là không đáng kể. Phổ hài điện áp nút trường hợp 4 có thể quan sát trong hình 5 cho thấy rõ hơn điều đó. Giữa các trường hợp tổng độ méo sóng hài của điện áp các nút lại thay đổi không đáng kể, thậm chí là giảm.

Bảng 3. Tổng độ méo sóng hài điện áp

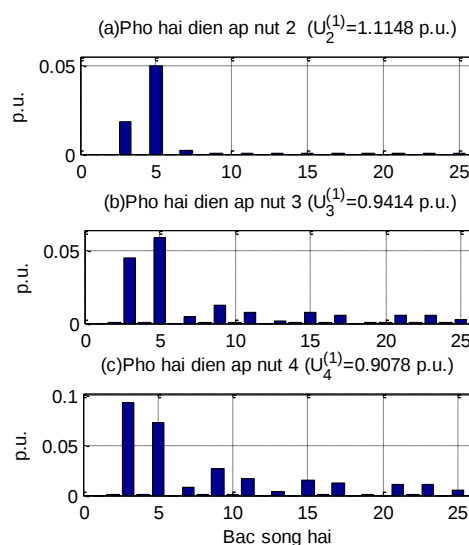
	THD_{U_2} (%)	THD_{U_3} (%)	THD_{U_4} (%)
TH1	/	5,49	12,29
TH2	/	8,19	14,36
TH3	1,76	5,48	11,82
TH4	4,77	8,11	13,75

Bảng 4. Tổng độ méo sóng hài dòng điện

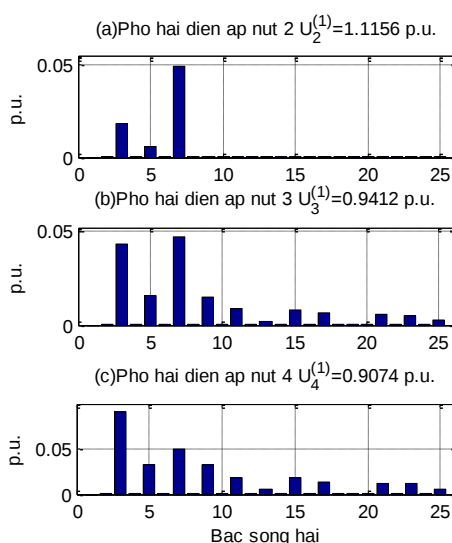
	$THD_{i_{sc}}$ (%)	THD_{i_1} (%)	$THD_{i_{13}}$ (%)	$THD_{i_{34}}$ (%)
TH1	/	18,58	16,11	24,69
TH2	/	18,79	16,25	25,11
TH3	16,79	18,60	25,10	42,88
TH4	17,16	18,95	25,31	44,17

Đối với dòng điện các nhánh có thể thấy từ bảng 4, tổng độ méo dòng điện nguồn bơm vào nút 1 gần như không thay đổi,

trong khi dòng điện các nhánh khác của lưới điện thì tăng lên mạnh, đặc biệt là nhánh liên kết giữa các nút tải. Tổng độ méo dòng điện nhánh qua TCSC thay đổi rất ít giữa trường hợp 3 (16,69%) và trường hợp 4 (17,16%). Điều đó có thể thấy rằng ảnh hưởng của TCSC đến sóng hài lan truyền là rất nhỏ trong trường hợp của bài toán đã đặt ra.

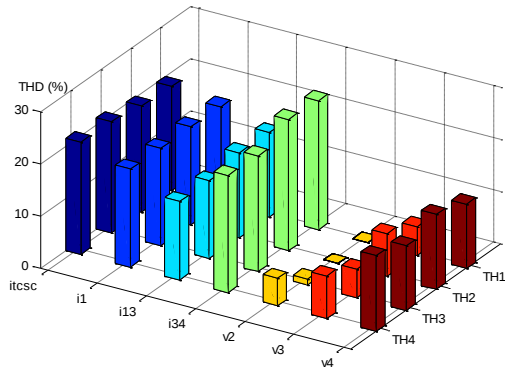


Hình 4. Phổ hài điện các nút ở TH4

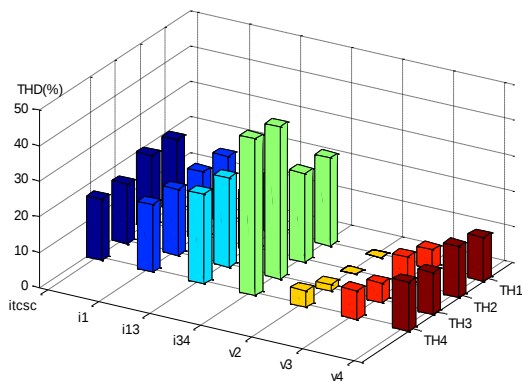


Hình 5. Phổ hài điện các nút ở TH4 khi hệ thống có sóng hài bậc 7

Tiến hành mô phỏng trường hợp 4 khi hệ thống có sóng hài bậc 7, độ méo tăng cao ở tất cả các nút (hình 6).



(a) TCSC làm việc ở vùng cảm tính



(b) TCSC làm việc ở vùng dung tính

Hình 6. Tổng hợp phổ hài điện áp các nút và dòng các nhánh

Trường hợp khi TCSC hoạt động trong vùng cảm tính cũng có kết quả tương tự như trên, tổng hợp hai trường hợp có thể quan sát trong hình 7.

5. KẾT LUẬN

Kỹ thuật mô phỏng trên miền sóng hài đã cho thấy hiệu quả trong việc mô phỏng và khảo sát cả dạng sóng tín hiệu và phổ tần số của nó.

Bài báo đã phân tích sóng hài từ các phụ tải phi tuyến và từ nguồn hệ thống lan truyền trong lưới điện trên miền sóng hài. Khi chưa có TCSC trên lưới, sóng hài được lan truyền chỉ phụ thuộc vào tổng trở riêng tại từng nút của lưới điện. Khi có lắp đặt TCSC, đặc tính sóng hài lan truyền có một số thay đổi do xuất hiện có các điểm cộng hưởng khác nhau. Trong trường hợp đã mô phỏng, ảnh hưởng của TCSC tới lan truyền của sóng hài là tương tự nhau trong cả hai trường hợp vận hành ở vùng cảm tính và vùng dung tính.

Kết quả khảo sát qua mô phỏng là cơ sở ban đầu cho việc đề xuất các giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng của sóng hài.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Enrique Acha, Manuel Madrigal, Power Systems Harmonics: Computer Modelling and Analysis, Wiley-IEEE Press, United State of America, 1st edition, 2001.
- [2] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, Wiley-IEEE Press, United State of America, 1st edition, 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] H. García, J. Segundo, M. Madrigal, Harmonic analysis of power systems including thyristor-controlled series capacitor (TCSC) and its interaction with the transmission line, Electric Power Systems Research, Volume 106, January 2014, Pages 151-159.

- [5] Uriel Vargas, Abner Ramirez, Reformulating Extended Harmonic Domain Models for Accurate Representation of Harmonics Dynamics, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.31, no.6, 2016.
- [6] Abner Ramirez, The Modified Harmonic Domain: Interharmonics, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.26, no.1, January 2011.
- [7] M.A.C. Mercado, J. R. Orillaza, Harmonic state space model of a closed-loop balanced Thyristor Controlled Series Compensator, *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Belo Horizonte, 2016, pp. 587-592.
- [8] Ehsan Karami, Manuel Madrigal, and et...., Single-phase modeling approach in dynamic harmonic domain, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.33, No.1, p.257-267, 2017.
- [9] Nguyễn Mạnh Cường, Giải pháp xây dựng hệ thống điện truyền tải linh hoạt, Hội nghị khoa học và công nghệ Điện lực toàn quốc, Hà Nội, 13 trang, 15-16 tháng 11, 2017.
- [10] Nguyễn Phúc Huy, Phân tích sóng hài SVC trong điều kiện vận hành không lý tưởng trên miền sóng hài, Tạp chí khoa học và công nghệ năng lượng - Trường đại học Điện lực, Số 19, trang 73-80.

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 ngành 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.

