

Nghiên cứu phương pháp cân bằng pha của lưới điện làm việc trong chế độ không đối xứng sử dụng các phần tử kháng trong hệ thống điện

Asymmetrical Load Balancing using Reactive Components

Nguyễn Quốc Minh*, Võ Tá Đông, Nguyễn Duy Minh

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội - Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

Đến Tòa soạn: 24-5-2018; chấp nhận đăng: 28-9-2018

Tóm tắt

Đối với vận hành hệ thống điện trong thực tế, tình trạng làm việc mất đối xứng có thể xuất hiện do một vài nguyên nhân. Một số nguyên nhân liên quan trực tiếp đến cấu trúc bất đối xứng của các phần tử trong hệ thống điện, có thể kể đến như đường dây tải điện trên không, máy biến áp. Sự bất đối xứng do cấu trúc này gây nên bất đối xứng của điện áp rơi trên từng pha. Tuy nhiên, nguyên nhân chủ yếu dẫn tới tình trạng làm việc mất đối xứng là do phụ tải không đối xứng. Trong lưới phân phối, phụ tải có thể xuất hiện ở dạng 3 pha 2 pha hoặc một pha, tuy nhiên, tình trạng phụ tải không đối xứng thường do những phụ tải pha công suất lớn. Khi hệ thống điện làm việc ở chế độ không đối xứng thì có thể xuất hiện các thành phần dòng, áp thứ tự nghịch và thứ tự không bên cạnh thành phần thứ tự thuận. Các thành phần này có ảnh hưởng xấu đến sự làm việc của các thiết bị điện, đặc biệt là các động cơ, làm gia tăng phát nóng và giảm tuổi thọ thiết bị, tăng tổn thất công suất và tổn thất điện năng, giảm hiệu suất truyền tải. Nghiên cứu này sẽ tập trung đánh giá hiệu quả của phương pháp cân bằng pha, sử dụng các phần tử kháng, sử dụng công cụ mô phỏng hệ thống điện PSCAD.

Từ khóa: hệ thống điện, cân bằng pha, phần tử kháng.

Abstract

In practical three-phase power systems, unbalance operating condition is normally caused by several factors. Some factors are directly related to the asymmetrical structure of the power grid, such as overhead transmission lines, transformers, which leads to different voltage drops at each phase. However, the most accountable factors contributed to the unbalance condition of the network is the load diversity. In typical power distribution systems, loads can be connected in three-phase, single phase between two lines or single phase between line and neutral. Unbalance loads can range from several kW to MW levels such as furnace or electric rail track. Under heavy unbalance load condition, the significant amount of negative voltage and current sequences can cause negative impact on the power systems by introducing more heat losses in windings, damaging rotating machine and reducing efficiency. Recent studies show that unbalance operating condition caused by asymmetrical load can be compensated by using reactive elements [1-4]. In this paper, the effect of using reactive components will be examined in detail. The simulation will be performed in PSCAD for validation of the method.

Keywords: power systems, unbalance load compensation, reactive elements.

1. Tổng quan

Trong điều kiện hoạt động bình thường của hệ thống điện, các thông số dòng điện và điện áp được xem là hệ thống đối xứng. Tuy nhiên trong thực tế vận hành, dòng và áp có thể bị mất đối xứng do nhiều nguyên nhân khác nhau. Nguyên nhân đầu tiên có thể kể đến gây ra sự mất cân bằng pha là do cấu trúc bất đối xứng của các phần tử trên lưới, ví dụ như đường dây. Sự không đối xứng này ra tổn thất điện áp khác nhau trên các pha và do đó dẫn đến sự mất cân bằng điện áp. Đối với sự mất đối xứng của cấu trúc dây dẫn trên không do khoảng cách giữa các pha khác nhau, có thể sử dụng phương pháp hoán vị pha để đối

xứng hóa. Tuy nhiên, nguyên nhân chính của tình trạng làm việc không đối xứng của hệ thống điện, nếu không tính đến sự cố, là do tải không cân bằng. Các phụ tải không đối xứng có thể xuất hiện ở dạng phụ tải 1 pha hoặc phụ tải 2 pha với công suất biến thiên từ vài chục W cho đến kW, thông thường được kết nối ở mạng hạ áp và trung áp. Đặc biệt, một số phụ tải công nghiệp công suất lớn (~MW) được kết nối với các mạng lưới điện cao áp hoặc trung áp như thiết bị hàn, lò cao tần v.v.. Sự mất cân bằng dòng điện và điện áp gây ra bởi các phụ tải công nghiệp này thường đi kèm với các vấn đề về chất lượng điện năng như sóng hài, sụt giảm điện áp [1].

Sự mất cân bằng pha do tải không đối xứng sẽ sinh ra thành phần dòng điện thứ tự nghịch khá lớn, ảnh hưởng trực tiếp tới hiệu quả làm việc của các

* Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 913281695
Email: minh.nguyenquoc@hust.edu.vn

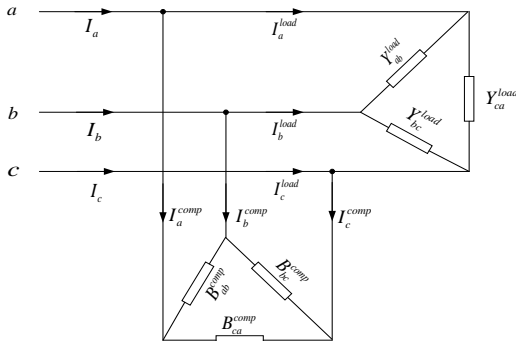
thiết bị điện, nhất là các thiết bị quay như gây phát nóng rotor, gây rung lắc, dẫn tới giảm tuổi thọ của thiết bị. Dòng điện thứ tự nghịch xuất hiện trên lưới sẽ gia tăng tổn thất công suất và tổn thất điện năng, giảm hiệu suất truyền tải.

Bên cạnh đó, các thành phần dòng và áp thứ tự nghịch còn gây ảnh hưởng đến sự làm việc của một số hệ thống bảo vệ (ví dụ như bảo vệ khoảng cách), bộ chuyển đổi ba pha (bộ chỉnh lưu ba pha, bộ chuyển đổi AC-DC) v.v...

Vì vậy, việc sử dụng các biện pháp cân bằng pha khi tải không đối xứng, nhằm làm giảm thiểu ảnh hưởng tiêu cực của thành phần dòng điện thứ tự nghịch là rất cần thiết trong quá trình vận hành. Một số phương pháp cân bằng pha đã được sử dụng có thể kể đến như phân chia đều phụ tải từng pha ở lưới hạ áp, kết nối phụ tải pha ở cấp điện áp cao hơn, sử dụng máy biến áp 1 pha v.v... Tuy nhiên, các phương pháp này có nhược điểm đó là phải thay đổi cấu trúc lưới khi tải thay đổi, gây khó khăn trong quá trình vận hành. Một số nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng có thể sử dụng các phần tử kháng kết nối với lưới để làm giảm thiểu thành phần dòng điện thứ tự nghịch [2-5]. Phương pháp này có ưu điểm đó là cài đặt và vận hành khá đơn giản, dễ dàng điều chỉnh khi phụ tải thay đổi. Nghiên cứu này sẽ tập trung vào đánh giá hiệu quả của phương pháp cân bằng pha sử dụng phần tử kháng điện.

2. Cơ sở lý thuyết

Không mất tính tổng quát, có thể giả thiết phụ tải 3 pha được kết nối ở dạng sơ đồ tam giác và phụ tải được đặc trưng bởi tổng dẫn. Thiết bị bù cũng được đấu nối theo sơ đồ tam giác và chỉ bao gồm các phần tử L hoặc C. Việc tính toán chính xác mạch điện ba pha không đối xứng là tương đối phức tạp, yêu cầu phải biết thông số của toàn bộ lưới. Trong thực tế thì thường chỉ yêu cầu đặt bù cục bộ tại phân đoạn có phụ tải không đối xứng. Do đó, để đơn giản hóa khối lượng tính toán, có thể giả thiết hệ thống điện áp pha tại chỗ đặt bù là hệ thống đối xứng. Với giả thiết như vậy, việc tính toán giá trị thông số bù có thể được minh họa như sau:



Hình 1. Sơ đồ mạch 3 pha có phần tử bù.

- Hệ thống điện áp pha:

$$\begin{aligned} U_a &= U \\ U_b &= a^2U \\ U_c &= aU \end{aligned} \tag{1}$$

- Hệ thống dòng điện tải:

$$\begin{aligned} I_a^{load} &= I_{ab}^{load} - I_{ca}^{load} = UY_{ab}(1-a^2) - UY_{ca}(a-1) \\ I_b^{load} &= I_{bc}^{load} - I_{ab}^{load} = UY_{bc}(a^2-a) - UY_{ab}(1-a^2) \\ I_c^{load} &= I_{ca}^{load} - I_{bc}^{load} = UY_{ca}(a-1) - UY_{bc}(a^2-a) \end{aligned} \tag{2}$$

- Hệ thống dòng điện bù:

$$\begin{aligned} I_a^{comp} &= I_{ab}^{comp} - I_{ca}^{comp} = UjB_{ab}(1-a^2) - UjB_{ca}(a-1) \\ I_b^{comp} &= I_{bc}^{comp} - I_{ab}^{comp} = UjB_{bc}(a^2-a) - UjB_{ab}(1-a^2) \\ I_c^{comp} &= I_{ca}^{comp} - I_{bc}^{comp} = UjB_{ca}(a-1) - UjB_{bc}(a^2-a) \end{aligned} \tag{3}$$

- Hệ thống dòng điện tại đầu nguồn:

$$\begin{aligned} I_a &= I_a^{load} + I_a^{comp} \\ I_b &= I_b^{load} + I_b^{comp} \\ I_c &= I_c^{load} + I_c^{comp} \end{aligned} \tag{4}$$

Theo yêu cầu của bài toán bù thì hệ thống dòng điện tại đầu nguồn phải là hệ thống đối xứng, điều kiện này tương đương với thành phần thứ tự nghịch bằng không:

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) = 0 \tag{5}$$

Do I_2 là số phức nên (5) tương đương với:

$$\begin{aligned} \text{Re}(I_2) &= 0 \\ \text{Im}(I_2) &= 0 \end{aligned} \tag{6}$$

Ta nhận thấy rằng thông số của các thiết bị bù bao gồm 3 ẩn số: B_{ab}^{comp} , B_{bc}^{comp} và B_{ca}^{comp} , tuy nhiên (6) chỉ có 2 phương trình. Vì vậy muốn giải được thì cần thêm một phương trình hoặc một điều kiện. Trong thực tế, bài toán bù cân bằng pha thường kết hợp thêm chỉ tiêu nâng cao hệ số công suất. Vì vậy, ta có thể thêm vào một phương trình ràng buộc về hệ số công suất:

$$\cos \varphi = 1 \tag{7}$$

Giải hệ phương trình (6) và (7), ta thu được các thông số bù như sau:

$$\begin{aligned} B_{ab}^{comp} &= -B_{ab}^{load} + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{bc}^{load} - G_{ca}^{load}) \\ B_{bc}^{comp} &= -B_{bc}^{load} + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{ca}^{load} - G_{ab}^{load}) \\ B_{ca}^{comp} &= -B_{ca}^{load} + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{ab}^{load} - G_{bc}^{load}) \end{aligned} \tag{8}$$

Phương trình (8) cho phép xác định thông số của các thiết bị bù với mục tiêu là giảm thiểu thành phần dòng điện thứ tự nghịch, kết hợp với chỉ tiêu hệ số công suất bằng một, dựa trên thông số tổng dẫn của phụ tải. Trong thực tế thì việc đặc trưng phụ tải dưới dạng tổng dẫn là tương đối khó khăn do đặc tính tĩnh và động của các phụ tải rất đa dạng. Vì vậy, phương trình (8) thường được biểu diễn dưới dạng tương đương theo dòng điện tải [4]:

$$B_{ab}^{comp} = \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} im(I_1^{load}) - re(I_2^{load}) + \frac{1}{\sqrt{3}} im(I_2^{load}) \right] \quad (9)$$

$$B_{bc}^{comp} = \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} im(I_1^{load}) - \frac{2}{\sqrt{3}} re(I_2^{load}) \right]$$

$$B_{ca}^{comp} = \frac{1}{\sqrt{3}U} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} im(I_1^{load}) + re(I_2^{load}) + \frac{1}{\sqrt{3}} im(I_2^{load}) \right]$$

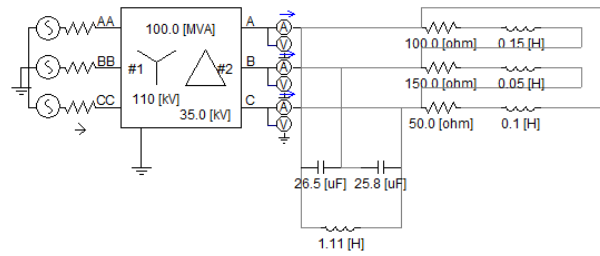
3. Mô phỏng trên PSCAD

PSCAD (Power System Computer Aided Design) là chương trình tính toán phân tích hệ thống điện và mô phỏng quá trình quá độ điện từ được sử dụng phổ biến trong công nghiệp cũng như trong giảng dạy và nghiên cứu. Ngoài việc tính toán phân tích các chế độ làm việc của hệ thống điện, PSCAD còn được sử dụng phổ biến để cài đặt bảo vệ role, tính toán phối hợp cách điện của máy biến áp, máy cắt và thiết bị chống sét, phân tích cộng hưởng tần số thấp, thiết kế lọc sóng hài, tính toán hệ thống truyền tải điện một chiều, mô phỏng các thiết bị FACTS v.v... PSCAD có một số ưu điểm nổi bật như cho phép thiết kế mạch, chạy mô phỏng, phân tích dữ liệu, hiển thị kết quả một cách trực diện trên giao diện đồ họa tích hợp. Bên cạnh đó, các thông số có thể được thay đổi ngay trong khi đang chạy mô phỏng.

Sơ đồ mạch điện 3 pha không đối xứng dạng đơn giản được thiết lập trong PSCAD để mô phỏng phương pháp cân bằng pha (hình 2). Trong sơ đồ này, phụ tải không cân bằng được đặc trưng bởi các điện trở và điện kháng và đầu tam giác phía 35kV. Các thông số của mạch điện bao gồm thông số máy biến áp và thông số phụ tải được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số lưới 3 pha có tải không đối xứng

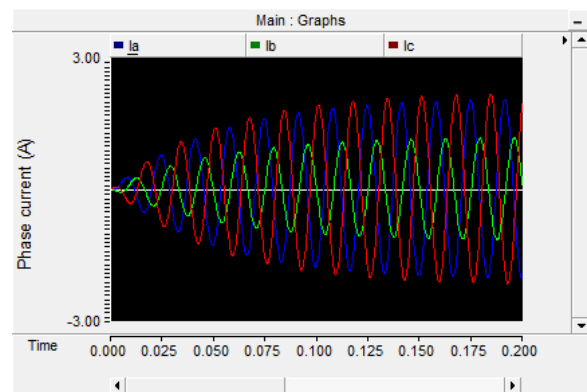
Thông số	Giá trị
Công suất định mức MBA	100MVA
Tổng trở MBA	0.1pu
Điện trở tải pha AB	100Ω
Điện kháng tải pha AB	0.15μH
Điện trở tải pha BC	150 Ω
Điện kháng tải pha BC	0.05μH
Điện trở tải pha CA	50 Ω
Điện kháng tải pha CA	0.1μH



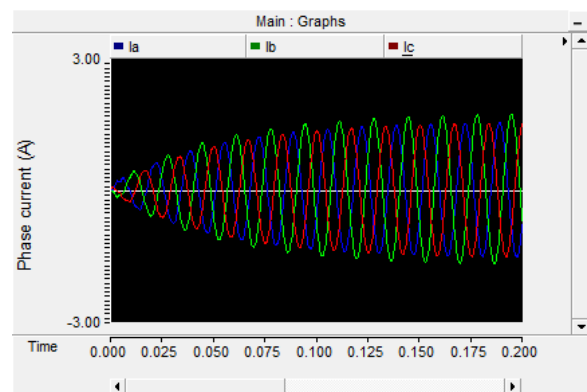
Hình 2. Sơ đồ mạch điện 3 pha không đối xứng mô phỏng trong PSCAD.

Trị số dòng điện pha trước khi bù được thể hiện ở các hình 3 và 6. Tính toán các thông số bù theo phương trình (9) thu được $B_{ab}=8,327 \times 10^{-3}S$, $B_{bc}=-2,864 \times 10^{-3}S$ và $B_{ca}=8,092 \times 10^{-3}S$. Do B_{ab} và $B_{ca}>0$ nên các phần tử bù sẽ mang tính dung kháng với giá trị điện dung tương ứng là $C_{ab}=B_{ab}/w=26,507\mu F$, $C_{bc}=B_{bc}/w=-25,759\mu F$; $B_{ca}<0$ nên phần tử bù sẽ mang tính cảm kháng với giá trị điện cảm tương ứng là $L_{bc}=-1/wB_{bc}=1,1115H$.

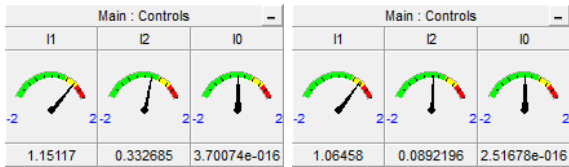
Kết quả mô phỏng so sánh dòng điện trước khi bù và sau khi bù được thể hiện ở các hình vẽ 3,4,5 và 6.



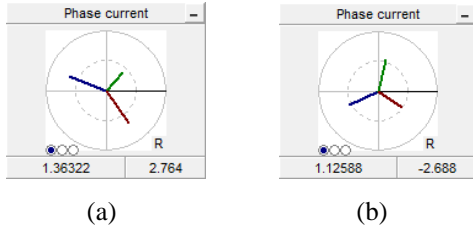
Hình 3. Đồ thị dòng điện pha theo thời gian trước khi bù.



Hình 4. Đồ thị dòng điện pha theo thời gian sau khi bù.



Hình 5. Các thành phần dòng điện thứ tự thuận, nghịch và không trước khi bù (a) và sau khi bù (b).

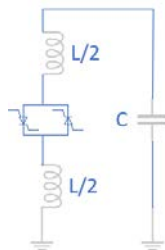


Hình 6. Đồ thị vector dòng điện pha trước khi bù (a) và sau khi bù (b).

Căn cứ vào kết quả mô phỏng, có thể nhận thấy rằng tỉ lệ I_2/I_1 trước khi bù có trị số tương đối lớn là 31%, sau khi bù thì giảm xuống chỉ còn 7,69% trong khi thành phần dòng điện thứ tự thuận thay đổi rất ít (khoảng 1%). Dòng điện thứ tự không không tồn tại trong cả hai trường hợp do lưới có trung tính cách điện. Giá trị $\cos\varphi$ trước khi bù và sau khi bù tương ứng là 0,86 và 0,99. Như vậy, kết quả mô phỏng cho thấy rằng phương pháp đề xuất đã đạt được cả 2 chỉ tiêu là giảm thiểu thành phần dòng điện thứ tự nghịch và cải thiện hệ số công suất.

Trong thực tế, do phụ tải luôn luôn thay đổi nên sử dụng các tụ hoặc kháng bù có giá trị cố định sẽ không đáp ứng được yêu cầu cân bằng pha trong thời gian thực. Các thiết bị bù tĩnh có điều khiển có thể được sử dụng như một giải pháp để đáp ứng được cân bằng pha khi phụ tải thay đổi. Trong khuôn khổ nội dung nghiên cứu này, ta sẽ mô phỏng hiệu quả làm việc của TCR (thyristor controlled reactor) đối với bài toán cân bằng pha. Đặc tính điện kháng của TCR nối song song với một tụ điện cố định (hình 7) được cho dưới dạng [6]:

$$B(\alpha) = B_{L_{max}} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin(2\alpha) \right) - B_C \quad (10)$$



Hình 7. Sơ đồ thiết bị bù tĩnh có điều khiển bao gồm điện kháng có điều khiển mắc song song với tụ điện.

Trong đó:

$$B_{L_{max}} = \frac{1}{\omega L}; B_C = \omega C$$

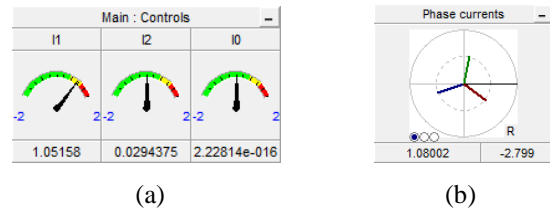
α : góc mở của thyristor ($90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$).

Khi $\alpha=90^\circ$ thyristor mở hoàn toàn, còn khi $\alpha=180^\circ$ thyristor đóng hoàn toàn.

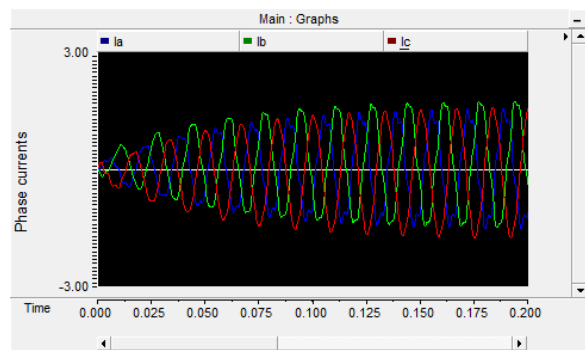
Các thông số về TCR được cho trong bảng dưới:

Bảng 2. Thông số của TCR

	L/2	C	α	B(α)
TCR _{ab}	0,502H	27,091 μ F	120 $^\circ$	8,327 $\times 10^{-3}$ S
TCR _{bc}	0,1134H	27,091 μ F	135 $^\circ$	-2,864 $\times 10^{-3}$ S
TCR _{ca}	0.6909H	27,091 μ F	150 $^\circ$	8,092 $\times 10^{-3}$ S



Hình 8. Các thành phần dòng điện thứ tự thuận, nghịch, không (a) và đồ thị vector dòng điện pha (b) sau khi bù bằng TCR.



Hình 9. Đồ thị dòng điện pha theo thời gian sau khi bù bằng TCR.

Kết quả mô phỏng khi sử dụng TCR được thể hiện ở các hình 8 và 9. Căn cứ vào kết quả mô phỏng, có thể thấy rằng việc sử dụng các thiết bị bù tĩnh có điều khiển đem lại hiệu quả giống như các tụ hoặc kháng cố định, đó là giảm được trị số I_2/I_1 và nâng cao hệ số công suất. Bên cạnh đó, thiết bị bù có điều khiển có thể đáp ứng được sự thay đổi của phụ tải theo thời gian. Tuy nhiên khi sử dụng các thiết bị bù có điều khiển thì sẽ làm xuất hiện các thành phần sóng hài bậc cao do việc sử dụng các thiết bị điện tử công suất. Điều này được thể hiện trên hình 9, dạng sóng dòng điện không phải hoàn toàn hình sin mà bị méo. Việc phân tích và lọc các thành phần sóng hài xuất hiện trên lưới do sử dụng TCR sẽ được tiến hành trong các nghiên cứu tiếp theo.

4. Kết luận

Nghiên cứu tập trung vào việc phân tích hiệu quả của phương pháp bù cân bằng pha sử dụng các phần tử kháng trong hệ thống điện. Cơ sở toán học của bài toán bù được thiết lập, trên cơ sở đó, tác giả đã mô phỏng trên phần mềm PSCAD để kiểm chứng lại phương pháp. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp sử dụng các phần tử kháng đem lại hiệu quả cao, thể hiện ở việc thành phần dòng điện thứ tự nghịch đã giảm xuống dưới mức cho phép, bên cạnh đó hệ số công suất của lưới cũng được cải thiện đáng kể. Nghiên cứu cũng đã chỉ ra rằng việc sử dụng các thiết bị bù tĩnh có điều khiển như TCR có thể đáp ứng được sự thay đổi của phụ tải trong thời gian thực, tuy nhiên các thiết bị có điều khiển này có thể gây ra sóng hài trên lưới, ảnh hưởng đến chất lượng điện năng. Việc phân tích và thiết kế lọc sóng hài sẽ được tiến hành ở các nghiên cứu tiếp theo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài khoa học cấp cơ sở, mã số T2017-PC-094, trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.

Tài liệu tham khảo

- [1] L. S. Czarnecki, "Power related phenomena in three-phase unbalanced systems," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, pp. 1168-1176, 1995.
- [2] J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez and R. Domke, "Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review," Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 12, pp. 2144-2164, December 2005.
- [3] I. K. Said and M. Pirouti, "Neural network-based Load Balancing and Reactive Power Control by Static VAR Compensator," International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 25-31, April 2009.
- [4] Adrian Pana, "Active Load Balancing in a Three-Phase Network by Reactive Power Compensation," Power Quality, IntechOpen, September 2011.
- [5] K. Karthi, R. Radhakrishnan, J. M. Baskaran and L. S. Titus, "Load compensation with hysteresis current controlled SAPF under unbalanced mains voltage and nonlinear load conditions," IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Bangalore, India, Nov. 8-10, 2017.
- [6] L. M. Khanh and T. N. Minh, "Hệ thống truyền tải xoay chiều điện linh hoạt," NXB Bách Khoa Hà Nội, 2017.