

PHÂN TÍCH SÓNG HÀI CỦA KHÁNG ĐIỆN BÙ NGANG ĐIỀU KHIỂN BẰNG THYRISTORS (TCR) TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN

ANALYSING HARMONICS GENERATED BY THYRISTOR-CONTROLLED REACTORS USED IN POWER SYSTEMS

Trần Tấn Vinh

Trường Cao đẳng Công nghệ Thông tin, Đại học Đà Nẵng; ttvinh@cit.ud.vn

Tóm tắt - Khi sử dụng thiết bị kháng điện bù điều khiển bằng thyristor (TCR) để cải thiện chất lượng điện áp trong hệ thống điện, sẽ tồn tại các sóng hài dòng điện. Các thành phần dòng điện hài này sẽ gây tác hại đến hệ thống điện, như làm cho điện áp, dòng điện trên lưới điện không còn dạng hình sin, làm tăng tổn thất công suất trong lưới điện. Vì vậy cần phải nghiên cứu phổ sóng hài dòng điện do TCR gây ra và phân tích ảnh hưởng của nguồn sóng hài này đến hệ thống điện. Bài báo trình bày ứng dụng của TCR và nguồn hài của nó gây ra, mô hình các phần tử trong hệ thống điện khi phân tích sóng hài và thuật toán phân tích ảnh hưởng của sóng hài của TCR đến chất lượng điện áp của lưới điện dựa trên bài toán tính trào lưu công suất. Bằng chương trình Matlab, đã tính toán minh họa áp dụng cho một sơ đồ lưới điện mẫu 5 nút và từ đó đề xuất sử dụng bộ lọc để hạn chế tác hại của sóng hài.

Từ khóa - điện kháng điều khiển bằng thyristors (TCR); hệ thống điện; sóng hài; cộng hưởng; độ méo điện áp và dòng điện; bộ lọc sóng hài

1. Đặt vấn đề

Nhằm nâng cao chất lượng điện năng, nhiều thiết bị bù công suất phản kháng được sử dụng trong lưới điện phân phối. Do phụ tải thường xuyên biến đổi nên công suất phản kháng bù cần phải được điều khiển thích ứng nhằm duy trì điện áp nằm trong phạm vi cho phép. Để đáp ứng yêu cầu này, những thiết bị bù công suất phản kháng có điều khiển như điện kháng hoặc điện dung điều khiển bằng thyristors (TCR/TSC) thường được sử dụng [1, 2, 3]. Tuy nhiên, đây lại là những nguồn sóng hài gây nhiều tác hại đến lưới điện, nên cần phải nghiên cứu tính toán phân tích ảnh hưởng của các thành phần dòng điện hài đến lưới điện. Trong bài báo này trình bày việc ứng dụng thiết bị TCR, và thuật toán phân tích ảnh hưởng của sóng hài đến chất lượng điện áp của lưới điện; từ đó có thể đề xuất giải pháp sử dụng các bộ lọc để hạn chế tác hại của sóng hài.

2. Sóng hài dòng điện của thiết bị bù TCR

Điện kháng điều khiển bằng thyristor (TCR) là một thiết bị bù tính có điều khiển, nguyên lý làm việc được trình bày trên Hình 1. Hai thyristor được mắc ngược chiều nhau để dẫn điện vào mỗi nửa chu kỳ của nguồn điện cung cấp. Giả thiết các thyristor có góc mở α như nhau thì tùy thuộc vào góc α , dòng điện chạy qua kháng điện L có dạng như Hình 2 [2].

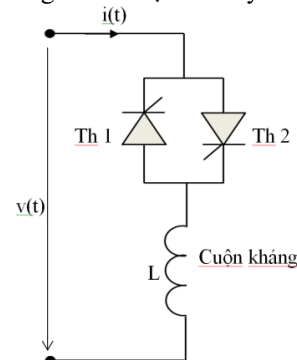
Khi $\alpha = \pi/2$ thì mạch dẫn điện hoàn toàn, và khi $\pi/2 < \alpha < \pi$ thì mạch dẫn điện không hoàn toàn, khi đó sẽ xuất hiện các thành phần dòng điện hài. Giả thiết nguồn điện áp $v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t)$, dòng điện $i(t)$ được tính theo biểu thức sau [2]:

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t); & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0; & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (1)$$

Abstract - Voltage stabilization is essential for a power system. Thyristor-controlled reactors (TCR) can be used to improve the voltage quality, yet it has a major drawback of generating harmonic currents. These harmonics have important effects on the power system quality, such as distortion of voltage and current waveforms, increasing power loss. This paper presents the application of TCR and its harmonic resource, the modeling of components in studying harmonics in power systems, and algorithm of analysis of effects of the harmonic currents generated by TCR on voltage quality based on load flow algorithm. We simulated a 5-bus system, using the load flow algorithm implemented in Matlab. Based on this analysis, we proposed a new filter set to effectively reduce the effects of the harmonics.

Key words - thyristor-controlled reactors (TCR); power system; harmonics; voltage and current distortion factors (THD_v, THD_i); harmonic filters.

Trong đó V là điện áp hiệu dụng, $X_L = \omega L$ (ohm), α là góc mở và σ là góc dẫn điện của thyristor, với $\alpha + \sigma/2 = \pi$.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý của TCR

Nhận thấy khi $\pi/2 < \alpha < \pi$ dòng điện $i(t)$ là hàm không sin tuần hoàn với chu kỳ $T = 2\pi$ nên có thể phân tích thành chuỗi Fourier. Vì dòng điện là hàm số chẵn nên không tồn tại thành phần hàm sin, ngoài ra do dòng điện có tính chất đối xứng nửa sóng nên thành phần một chiều bằng zero và không có các thành phần hài bậc chẵn. Vì vậy, dòng điện chạy qua TCR được viết dưới dạng [1]:

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} A_h \cos(h\omega_0 t) \quad (2)$$

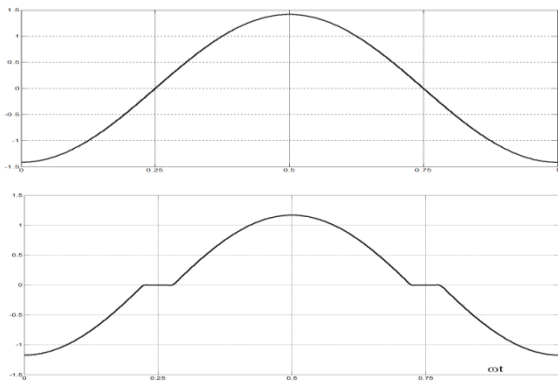
với $h=1, 3, 5, 7, \dots$

Các hệ số A_h là biên độ các thành phần dòng điện hài được tính theo biểu thức:

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(h\omega_0 t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{2\pi} i(t) \cos(hx) dx \quad (3)$$

Theo biểu thức (3) có thể tính được giá trị hiệu dụng dòng điện thành phần tần số cơ bản:

$$I_1 = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} V \quad (4)$$



Hình 2. Dạng sóng của dòng điện mạch TCR khi góc cắt $\alpha = 90^\circ$ và $\alpha = 100^\circ$ (THD = 11,07%)

Và giá trị hiệu dụng của các thành phần sóng hài bậc lẻ:

$$I_h = \frac{4V}{\pi X_L} \left[\frac{\sin(h+1)\alpha}{2(h+1)} + \frac{\sin(h-1)\alpha}{2(h-1)} - \cos\alpha \frac{\sin(h\alpha)}{h} \right] \quad (5)$$

với $h = 3, 5, 7, 9 \dots$

Biểu thức (4) có thể viết dưới dạng $I_1 = Y_{TCR}(\sigma)V$, trong đó $Y_{TCR}(\sigma)$ là điện dẫn tần số cơ bản được điều khiển bởi góc dẫn điện theo qui luật:

$$Y_{TCR}(\sigma) = \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi X_L} \quad (6)$$

Trong hệ thống điện ba pha các kháng điện thường được nối theo sơ đồ tam giác. Giả thiết mạng điện ba pha đối xứng, khi góc mở được chọn hoàn toàn bằng nhau, dòng điện trong các nhánh kháng điện như Hình 3a. Khi nguồn điện áp dây $v_{AB}(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t)$ thì dòng điện dây - ví dụ pha B - sẽ có dạng:

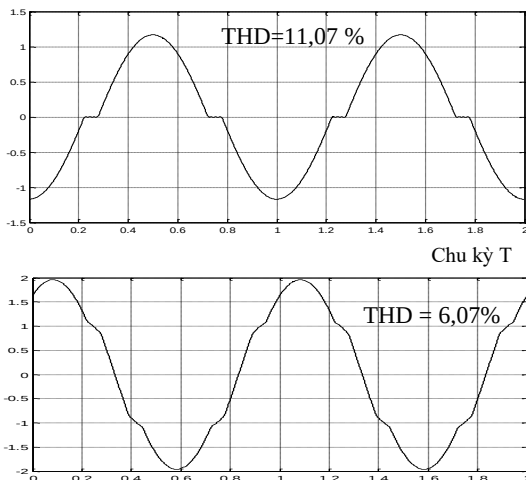
$$i_B(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_{hB}^{\max} \sin\left(h\omega t - \frac{h\pi}{3} + \pi\right) \quad (7)$$

Với h là các số nguyên lẻ, khác bội ba.

Trong đó, biên độ thành phần cơ bản và các thành phần sóng hài của dòng điện dây được tính theo biểu thức:

$$I_{1B}^{\max} = 2\sqrt{2}I_1 \sin \frac{\pi}{3}; I_{hB}^{\max} = 2\sqrt{2}I_h \sin \frac{h\pi}{3} \quad (8)$$

Với một góc cắt α cho trước, có thể tính được tỉ lệ các thành phần sóng hài của dòng điện dây so với thành phần cơ bản. Chẳng hạn khi góc cắt $\alpha = 100^\circ$ thì các thành phần sóng hài được cho ở Bảng 1 và dòng điện có dạng sóng như Hình 3.



Hình 3. Dòng điện trong các nhánh TCR (a) và dòng điện dây khi TCR ba pha nối tam giác (b) với $\alpha = 100^\circ$

Bảng 1. Các thành phần sóng hài của dòng điện pha (I_{ph}) và của dòng điện dây (I_d) khi góc cắt $\alpha = 100^\circ$

Bậc hài h	Thành phần sóng hài (%)		Bậc hài h	Thành phần sóng hài (%)	
	I_{ph}	I_d		I_{ph}	I_d
1	100	100	15	0,37	0
3	9,02	0	17	0,10	0,10
5	4,97	4,97	19	0,07	0,07
7	3,12	3,12	21	0,18	0
9	2,01	0	23	0,23	0,23
11	1,27	1,27	25	0,25	0,25
13	0,74	0,74	27	0,22	0

3. Thuật toán phân tích sóng hài trong hệ thống điện có sử dụng thiết bị bù TCR

3.1. Mô hình các phần tử [1]

Tổng quát, một phần tử có tính điện cảm nếu ở tần số cơ bản có tổng trở $Z = R + jX_L$ thì khi có sóng hài tổng trở sẽ là $Z(h) = R + jhX_L$, với h là bậc hài. Ngược lại, một phần tử điện dung ở tần số cơ bản có điện kháng $X_C = 1/(2\pi fC)$ thì khi có sóng hài điện kháng sẽ trở thành $X_C(h) = X_C/h$.

Vì vậy, mô hình của các phần tử trong hệ thống điện khi phân tích sóng hài sẽ có dạng sau:

Đường dây:

Tổng trở nối tiếp:

$$Z(h) = R + jhX$$

Tổng dẫn mắc rẽ nhánh:

$$Y(h) = G + jhB$$

Máy biến áp

Đối với máy biến áp hai dây quấn, tổng trở thứ tự thuận (Z^+), nghịch (Z^-) và không (Z^0) trong hệ đơn vị tương đối lần lượt là:

$$Z_T^+ = Z_T^- = \frac{\%Z_T}{100} \cdot \frac{S_b}{S_T}; \quad Z_T^0 = Z_T^+ + \frac{3Z_g}{Z_b}$$

Trong đó: S_T và Z_g là công suất định mức và tổng trở nối đất trung tính của máy biến áp T, S_b và Z_b là công suất và tổng trở cơ bản.

Khi nghiên cứu sóng hài với giả thiết bỏ qua hiệu ứng bề mặt, thì tổng trở của máy biến áp sẽ là:

$$Z_T(h) = \begin{cases} Z_T^0(h), & h = 3n = 3, 6, 9, \dots \\ Z_T^+(h), & h = 3n \pm 1 \end{cases}$$

Tổng dẫn của máy biến áp: $Y_T = Z_T^{-1}$

3.2. Thuật toán

Thuật toán phân tích ảnh hưởng của sóng hài trong hệ thống điện gồm các bước sau:

- Nhập số liệu: phổ sóng của nguồn dòng điện hài $I(h)$; thông số của lưới điện.
- Tính thông số các phần tử của hệ thống điện ở các bậc hài h .
- Tính các ma trận tổng dẫn nút $Y_{bus}(h)$ của sơ đồ lưới

điện cho từng bậc sóng hài h.

- Tính ma trận tổng trở nút cho từng bậc sóng hài h theo biểu thức: $Z_{bus}(h) = Y_{bus}^{-1}(h)$

- Tính điện áp tại các nút:

$$V(h) = Z_{bus}(h) I(h)$$

- Tính các dòng điện trên các nhánh:

$$I_{nh}(h) = \frac{\Delta V(h)}{Z_{nh}(h)}$$

- Phân tích các đặc trưng của sóng hài:

Tính các hệ số méo dạng sóng THD của dòng điện và điện áp theo các biểu thức sau:

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2} V_h^2}; THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2} I_h^2}$$

Dạng điện áp tại các nút theo thời gian:

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cos(\omega_0 t + \theta_h)$$

Trong đó V_h , θ_h là điện áp cực đại và góc pha của các thành phần sóng hài bậc h; ω_0 là tần số gốc thành phần sóng cơ bản.

- Xây dựng đặc tính tổng trở của hệ thống theo bậc sóng hài, từ đó xác định tần số cộng hưởng.

4. Tính toán áp dụng

Để minh họa, xét sơ đồ mẫu hệ thống điện có 5 nút điện áp 220 kV như Hình 4 [3].

Số liệu các đường dây (điện trở, điện kháng và dung dẫn) và phụ tải ở các nút như Bảng 2.

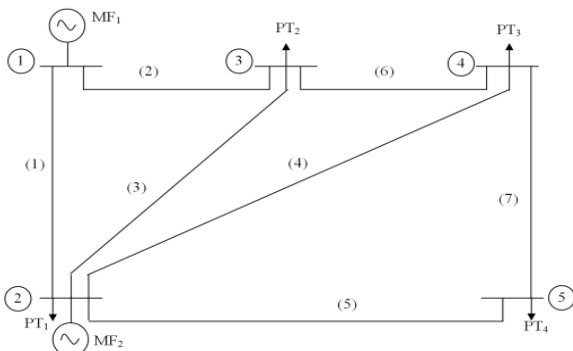
Bảng 2. Số liệu các đường dây và phụ tải ở các nút

a) Thông số các nhánh (p.u), $S_b = 100$ MVA

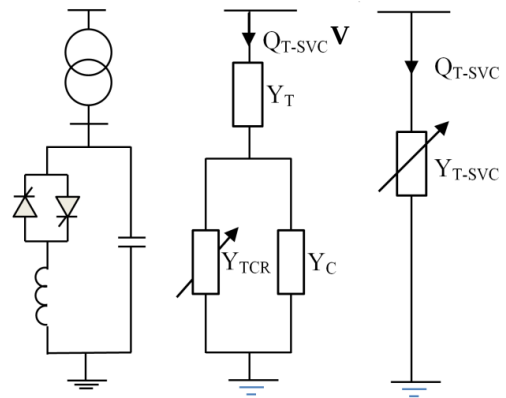
Nhánh số	R	X	B
1	0,02	0,06	0,06
2	0,08	0,24	0,05
3	0,06	0,18	0,04
4	0,06	0,18	0,04
5	0,04	0,12	0,03
6	0,01	0,03	0,02
7	0,08	0,24	0,05

b) Số liệu phụ tải

Nút số	1	2	3	4	5
P (MW)	0	20	45	40	60
Q (MVar)	0	10	15	5	10



Hình 4. Sơ đồ mạng điện 5 nút



Hình 5. Sơ đồ lắp SVC tại nút 3 và sơ đồ thay thế

Theo kết quả tính toán chế độ xác lập, điện áp tại nút 3 bằng 0,97 p.u. Để điều chỉnh điện áp bằng 1 p.u, tại nút này được lắp đặt thiết bị SVC có cấu tạo đơn giản như Hình 5, gồm một bộ tụ bù C cố định kèm với một bộ TCR, có các thông số trong hệ đơn vị tương đối: Cuộn cảm $X_L = 0,288$; tụ bù cố định $X_C = 1,07$; máy biến áp giảm áp $Z_T = j 0,11$ [3].

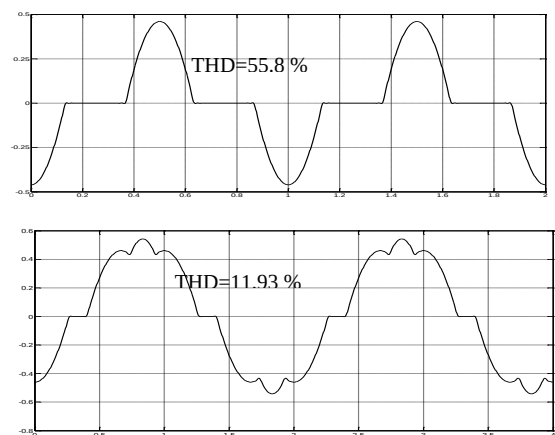
Từ mô hình tổng dẫn biến đổi của thiết bị SVC như Hình 5, công suất phản kháng SVC tiêu thụ (hoặc bơm vào lưới điện) được tính theo biểu thức:

$$Q_{T-SVC} = -V_3^2 Y_{T-SVC}$$

Công suất phản kháng yêu cầu của mạch SVC bơm vào nút 3 là $Q_{T-SVC} = -20,47$ MVA; khi đó điện dẫn sẽ có giá trị $Y_{T-SVC} = 0,2047$ và tổng dẫn của TCR là $Y_{TCR} = -0,7344$. Giải phương trình (6) bằng phương pháp lặp, có thể tính được góc cắt α của bộ TCR bằng $132,43^\circ$ (góc dẫn điện $\sigma = 95,14^\circ$). Khi đó độ méo dòng điện dây $THD_I = 11,93\%$, các thành phần sóng hài của dòng điện TCR được cho ở Bảng 3:

Bảng 3. Các thành phần sóng hài của dòng điện dây TCR (ba pha nối tam giác) khi góc cắt bằng $132,43^\circ$

H	5	7	11	13	17	19
h%	7,00	8,79	3,63	0,35	0,05	1,23
H	23	25	29	31	35	37
h%	0,81	0,26	0,28	0,37	0,25	0,25



Hình 6. Dạng sóng của các dòng pha (a) và dòng điện dây (b) của bộ TCR, góc cắt bằng $132,43^\circ$

Dòng điện thành phần cơ bản của SVC:

$$I_{T-SVC} = Y_{T-SVC} V_3 = 0,2047 \angle 85^\circ 16$$

Dòng điện dây của bộ TCR:

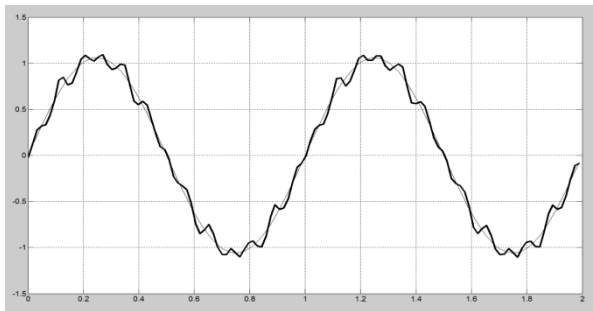
$$I_{TCR} = I_{T-SVC} \frac{Y_{TCR}}{Y_C + Y_{TCR}} = 0,7509 \angle -94^{\circ}84$$

Dòng điện các nhánh L và dòng điện dây của bộ TCR có dạng như trên Hình 6.

Bằng thuật toán đã trình bày ở mục 3, có thể tính toán được ảnh hưởng của sóng hài do TCR đến điện áp các nút sơ đồ lưới điện. Khi sử dụng thiết bị SVC có máy biến áp như đã nói ở trên, sơ đồ tính toán sẽ được xét thêm nút số 6 là thanh cái hạ áp của máy biến áp. Kết quả tính toán độ méo của dạng sóng điện áp THD_V các nút như ở bảng sau:

Nút số	1	2	3	4	5	6
THD _V (%)	8,79	10,08	10,16	10,95	12,22	7,34

Điện áp tại nút 3 có dạng như Hình 7.



Hình 7. Dạng sóng điện áp nút 3; THD_V = 10,16 %

+ Tổng trở hệ thống nhìn từ thanh cái hạ áp của máy biến áp T:

$$Z_6(h) = Z_{HT}(h) + Z_T(h)$$

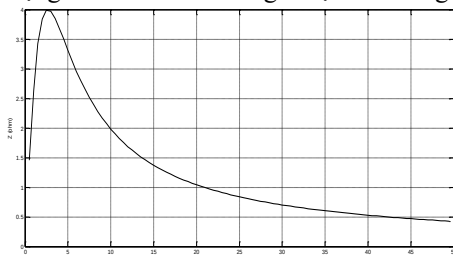
+ Tổng dẫn tương đương của hệ thống nhìn từ nguồn hài TCR:

$$Y_{td}(h) = Y_6(h) + Y_C(h)$$

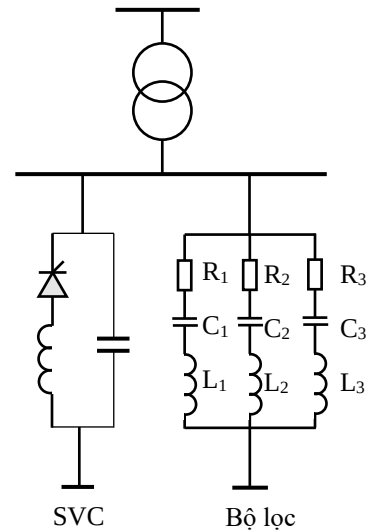
$$Z_{td}(h) = \frac{1}{Y_{td}(h)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_6(h)} + \frac{1}{Z_C(h)}}$$

Đặc tính tổng trở của hệ thống theo bậc sóng hài được trình bày trên Hình 8.

Nhận thấy điện áp của các nút lưới điện có độ méo dạng sóng vượt quá mức cho phép (theo tiêu chuẩn IEEE-51) [2]. Vì vậy, để hạn chế ảnh hưởng của sóng hài do TCR gây ra, cần phải sử dụng các bộ lọc. Giả sử bộ lọc các sóng hài bậc 5, 7, 11 có dạng như Hình 9 và thông số lọc như trong Bảng 2.



Hình 8. Đặc tính tổng trở hệ thống Z(h)



Hình 9. Sơ đồ nguyên lý bộ lọc sóng hài

Kết quả độ méo điện áp tại các nút sau khi sử dụng bộ lọc các thành phần hài bậc 5, 7 và 11 được cho trong bảng sau.

Nút số	1	2	3	4	5	6
THD _V (%)	1.45	1.61	1.67	1.90	2.01	0.85

Bảng 2. Thông số các bộ lọc sóng hài bậc 5, 7 và 11 (trong hệ đơn vị tương đối), công suất bộ lọc $Q_f = 10\text{MVar}$, hệ số chất lượng $Q = 30$;

Bậc hài	h = 5	h = 7	h = 11
R	0,067	0,048	0,030
XL	0,40	0,204	0,083
XC	10	10	10

5. Kết luận

Việc sử dụng TCR trong hệ thống điện đã sinh ra nguồn dòng điện hài, gây tác hại đến lưới điện. Dòng điện chạy qua kháng điện là hàm tuần hoàn không có dạng hình sin. Bằng phương pháp phân tích chuỗi Fourier đã phân tích được phổ sóng hài của dòng điện trong mạch TCR với các góc cắt khác nhau. Với chương trình xây dựng dựa trên thuật toán đã trình bày, cho phép phân tích được ảnh hưởng của nguồn hài TCR đến thông số vận hành của hệ thống điện. Nhận thấy sóng hài của TCR làm điện áp của lưới điện có độ méo dạng sóng vượt quá mức cho phép khi góc cắt lớn. Vì vậy để hạn chế tác hại của sóng hài, cần thiết phải sử dụng các bộ lọc sóng hài như minh họa trong bài báo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] George J. Wakileh, Power Systems Harmonics, Springer, 2001.
- [2] T. J. E. Miller, Reactive Power Control in Electric Systems, John Wiley & Sons Ltd, 1982.
- [3] Enrique Acha, Claudio R. Fuettes Esquivel, Hugo Ambriz-Perez, Cesar Angeles Camacho, FACTS – Modelling and Simulation in Power Networks, John Wiley & Sons Ltd, 2004.