

ĐÁNH GIÁ ĐỊNH LƯỢNG CÁC GIẢI PHÁP HẠN CHẾ TÁC ĐỘNG CỦA QUÁ TRÌNH QUÁ ĐỘ DO ĐÓNG TỤ Ở TRẠM BIẾN ÁP

QUANTITATIVE EVALUATION OF BACK-TO-BACK CAPACITOR SWITCHING TRANSIENT CONTROLS AT POWER SUBSTATION

Ma Thị Thương Huyền¹,
Vũ Hoàng Giang^{1,*}, Đoàn Văn Đạo²

TÓM TẮT

Tụ bù ngang được sử dụng phổ biến để điều chỉnh điện áp ở các cấp điện áp khác nhau trong hệ thống điện. Trong vận hành, sự biến thiên của phụ tải trong ngày yêu cầu đóng cắt tụ để thay đổi lượng công suất bù phù hợp đưa vào hệ thống điện. Bên cạnh hiệu quả về kỹ thuật khi sử dụng tụ bù ngang mang lại thì quá trình đóng cắt còn dẫn đến nhiều tác động không mong muốn. Vì vậy, hệ thống tụ bù ngang thường được trang bị thêm các phần tử hạn chế tác động của quá trình quá độ kết hợp thêm lựa chọn thời điểm đóng tụ phù hợp. Bài báo giới thiệu phương pháp phân tích phổ để đánh giá các giải pháp hạn chế tác động của quá trình quá độ khi đóng tụ liền kề. Các giải pháp chính bao gồm đặt kháng điện nối tiếp với tụ, đóng tụ qua điện trở phụ và đặt kháng giữa hai giàn tụ nối liền kề nhau. Mỗi giải pháp được mô phỏng trên phần mềm cho tụ bù ngang 110kV của trạm biến áp 220kV Mai Động. Dữ liệu dòng điện và điện áp trên tụ được thu thập và phân tích phổ với giải thuật STFT (Short-Time Fourier Transform). Kết quả mô phỏng và phân tích phổ cho thấy biên độ của thành phần tần số cao xuất hiện trong xung dòng và áp có thể sử dụng làm chỉ số cho tính hiệu quả của từng giải pháp.

Từ khóa: Đóng cắt tụ, phân tích phổ, quá trình quá độ, sóng hài, tụ bù ngang.

ABSTRACT

Shunt capacitors have been widely used for regulating the voltage module at various voltage levels in power systems. The daily variation of loads requires capacitor switching in order to appropriately adjust the amount of compensating reactive power injected into the power system. Apart from the technical effect that the utilization of shunt capacitors can offer, it leads to several unexpected consequences. Hence, a shunt capacitor system is commonly either equipped with some elements to mitigate the negative impact due to capacitor switching transient or combined with the appropriate selection of switching time points. This article presents the spectral analysis-based technique to evaluate the back-to-back capacitor switching transient controls. The mitigating methods that are investigated include the use of a series inductor to the capacitor, capacitor switching via an additional resistor, and the installation of an inductor between two capacitor banks. Each method applied to 110kV capacitor banks of 220kV Mai Dong substation is simulated. The capacitor voltages and currents are recorded and analyzed by using the algorithms of STFT (Short-Time Fourier Transform). Simulation results show that the magnitude of high frequency can be used to indicate the effectiveness of each method.

Keywords: Capacitor switching, spectral analysis, transient, harmonics, shunt capacitor.

¹Trường Đại học Điện Lực

²Ban Quản lý dự án truyền tải điện, Tổng Công ty Truyền tải điện quốc gia

*Email: giangvh@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 04/9/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 08/10/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/10/2021

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong hệ thống điện, điện áp tại một nút được duy trì trong giới hạn cho phép bằng cách điều khiển công suất phản kháng để cân bằng giữa công suất đi vào và công suất đi ra khỏi nút. Có nhiều phương tiện khác nhau như: các tổ máy phát điện, máy bù đồng bộ, tụ bù ngang và thiết bị FACTS... được sử dụng để phát hoặc tiêu thụ công suất phản kháng. Ngoài ra, việc điều chỉnh đầu phân áp của các bộ điều áp của máy biến áp cũng cho phép thay đổi phân bố dòng công suất phản kháng trong hệ thống điện.

Trong các thiết bị kể trên, tụ bù ngang được sử dụng khá phổ biến ở các cấp điện áp khác nhau. Thực tế vận hành cho thấy nhu cầu công suất phản kháng tại một nút thường thay đổi do phụ tải trong hệ thống điện biến thiên liên tục trong ngày. Do đó, trong vận hành cần thực hiện đóng cắt các giàn tụ để thay đổi dung lượng bù phù hợp với từng thời điểm.

Bên cạnh các lợi ích của tụ bù ngang đã đề cập ở trên, quá trình vận hành chúng còn gây ra các tác động không mong muốn như [1]:

- Làm cho vấn đề ô nhiễm sóng hài trầm trọng hơn, gây ra hiện tượng cộng hưởng;
- Tăng dòng xung kích quá độ của máy biến áp, gây ra quá điện áp và kéo dài sự tồn tại tại quá trình quá độ;
- Tăng yêu cầu về chức năng đối với các thiết bị đóng cắt, chúng có thể chịu các ứng suất vượt quá định mức quy định trong các tiêu chuẩn như tiêu chuẩn của IEEE, ANSI (Viện Tiêu chuẩn Quốc gia Hoa Kỳ);
- Phóng điện ra mạch ngoài và gây ra quá điện áp trên các tiếp điểm thứ cấp của máy biến dòng;

- Gây tác động tới các tải nhạy cảm như các hệ thống truyền động điện và có thể dẫn đến dừng hoạt động của hệ thống.

Hơn nữa, bản thân các tụ điện cũng phải chịu các ứng suất trong quá trình quá độ dẫn đến kết quả là nhiều bộ tụ đã hư hỏng nhanh hơn so với tốc độ già cỗi dự kiến. Ví dụ, trong năm 2018, có khá nhiều bộ tụ của các trạm biến áp 220kV do Truyền tải điện Hà Nội quản lý đã xảy ra hư hỏng, một số trường hợp được thống kê minh họa trong bảng 1 [2].

Bảng 1. Thống kê hư hỏng tụ bù ngang trên lưới Truyền tải điện Hà Nội năm 2018

| TT | Tên trạm biến áp | Pha sự cố | Số bình hư hỏng |
|----|---------------------|-----------|-----------------|
| 1 | Trạm 220kV Phố Nối | A | 01 |
| | | C | 02 |
| | | B | 01 |
| 2 | Trạm 220kV Vân Trì | A, B | 01 (A) 04 (B) |
| 3 | Trạm 220kV Mai Động | B | 2 |
| 4 | Trạm 220kV Chèm | B, C | 02 (B) 01(C) |

Để hạn chế các ảnh hưởng của quá trình quá độ do việc đóng cắt tụ, nhiều giải pháp đã được áp dụng. Một số giải pháp chính có thể kể đến như:

- Đặt kháng điện nối tiếp để hạn chế xung dòng;
- Đóng mạch qua điện trở;
- Lựa chọn thời điểm đóng phù hợp;
- Đặt thêm kháng điện nối giữa các giàn tụ.

Bên cạnh đó, một số giải pháp khác đã được sử dụng trong thực tế như [1]: sử dụng chống sét van; chia giàn tụ lớn thành nhiều giàn tụ có dung lượng nhỏ; tránh sử dụng tụ đồng thời ở nhiều cấp điện áp để hạn chế khả năng cộng hưởng, đồng thời có thể đặt MOV tại các thanh góp điện áp thấp; chuyển từ dạng tụ bù sang dạng tụ trong bộ lọc để hạn chế xung dòng và tần số của nó; điều chỉnh nấc phân áp phù hợp có xét đến sự tăng lên của điện áp trên tụ trong chế độ xác lập.

Bài báo thực hiện đánh giá hiệu quả của các giải pháp chính thường sử dụng để hạn chế ảnh hưởng của quá trình quá độ khi đóng tụ. Việc đóng bộ tụ 110kV trong trạm biến áp thực tế được mô phỏng với các giải pháp hạn chế khác nhau. Sau đó sử dụng phương pháp phân tích phổ (STFT) để xác định biên độ của thành phần sóng hài bậc cao trong tín hiệu dòng điện và điện áp trên tụ, từ đó cho phép định lượng tính hiệu quả của từng giải pháp.

Phần tiếp theo của bài báo được bố cục như sau: Mục 2 giới thiệu về các thông số giới hạn của tụ vận hành trong quá trình quá độ; Các phương pháp phân tích phổ được giới thiệu trong mục 3; Mục 4 trình bày kết quả mô phỏng khi áp dụng các giải pháp cho tụ bù ngang 110kV; Cuối cùng, kết luận được đưa ra trong mục 5.

2. THÔNG SỐ GIỚI HẠN CỦA TỤ KHI VẬN HÀNH TRONG QUÁ TRÌNH QUÁ ĐỘ

Trong quá trình làm việc, tụ có thể bị quá tải do sóng hài, đặc biệt trong các điều kiện cộng hưởng. Tụ có thể tiếp tục vận hành nếu các thông số về điện áp, dòng điện và công suất không vượt quá giới hạn. Các ngưỡng thông số bao gồm [3-5]:

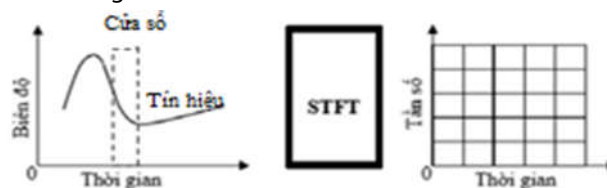
- Giá trị hiệu dụng của điện áp không vượt quá 110% giá trị định mức [6];
- Giá trị đỉnh của điện áp không vượt quá $1,2\sqrt{2}$ lần giá trị hiệu dụng định mức;
- Dòng điện không vượt quá 135% dòng điện hiệu dụng định mức;
- Công suất phản kháng không vượt quá 135% công suất phản kháng định mức của tụ.

3. GIỚI THIỆU PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH PHỔ

Trong quá trình đóng tụ, thường xuất hiện quá điện áp và dòng điện xung kích. Trong bài báo này quá trình quá độ khi đóng tụ bù ngang được mô phỏng bằng phần mềm EMTP cho trạm biến áp truyền tải thực tế để lấy tín hiệu dòng điện và điện áp trên tụ. Sau đó, sử dụng phương pháp phân tích phổ cho các sóng điện áp và dòng điện này nhằm phát hiện ra các thành phần sóng hài có thể gây ảnh hưởng tới việc vận hành và bảo vệ của các thiết bị trong hệ thống.

Tín hiệu dòng điện và điện áp trong quá trình quá độ thu được là tín hiệu không dừng (non-stationary) có tần số thay đổi theo thời gian nên việc sử dụng biến đổi FFT (Fast Fourier Transform) để phân tích có những hạn chế nhất định, bởi biến đổi FFT chỉ cho biết thông tin về tần số được tính trung bình trong toàn bộ thời gian của tín hiệu [7]. Do đó, với những tín hiệu biến đổi đột ngột như trong quá trình quá độ, phân tích FFT không còn đáp ứng được về độ chính xác hoặc không thể phát hiện được một thành phần tần số đặc tính cho trước.

Vì vậy, trong nghiên cứu này, thuật toán STFT được sử dụng để phân tích tín hiệu theo thời gian ở chế độ quá độ thành các thành phần có tần số khác nhau. Đối với mỗi tín hiệu dòng điện, hoặc điện áp, việc này có thể thực hiện bằng cách của số hóa một tín hiệu $x(n)$ thành một chuỗi liên tục những cửa sổ tuần tự x_k , $k = 1, 2, \dots, m$ gọi là những khung tín hiệu. Độ rộng của cửa sổ được lựa chọn đủ ngắn để đoạn tín hiệu có thể xem như dừng và đạt được độ phân giải về thời gian.



Hình 1. Nguyên tắc của phép biến đổi STFT

Như vậy, có thể nói nguyên tắc của phương pháp STFT là phân chia tín hiệu ra thành từng đoạn đủ nhỏ sao cho có

thể xem tín hiệu trong mỗi đoạn là tín hiệu ổn định, sau đó thực hiện biến đổi Fourier trên từng đoạn tín hiệu này. Mỗi đoạn phổ này sẽ chứa thông tin về tần số trong một khoảng thời gian nhỏ. Kết nối liên tiếp các đoạn phổ có thể xác định được thông tin tần số theo thời gian (hình 1) [8].

Ma trận STFT được cho bởi: $X(f) = [X_1(f), X_2(f), \dots, X_m(f)]$ trong đó phần tử thứ k của ma trận được biểu diễn dưới dạng:

$$X_k(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n g(n - kR) e^{-i2\pi fn} \tag{1}$$

trong đó:

x_n : Tín hiệu dòng điện hoặc điện áp trên tụ điện;

$g(n)$: Hàm cửa sổ có độ rộng M;

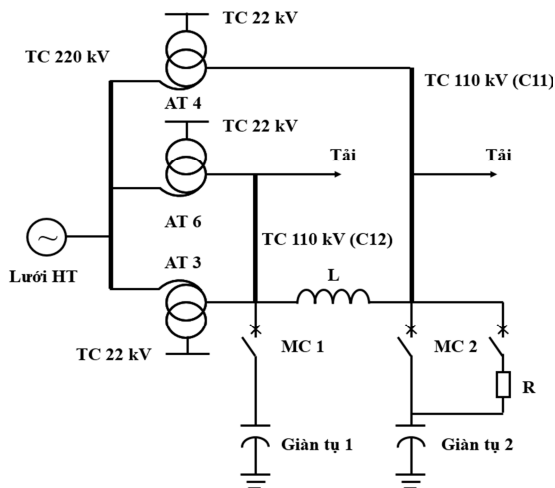
$X_k(f)$: Phân tích DFT (Distributed Fourier Transform) tại thời điểm kR;

R: Bước nhảy giữa hai DFT liên tiếp.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Mục này trình bày kết quả mô phỏng đóng bộ tụ bù ngang 110kV gồm hai giàn tụ, công suất mỗi giàn là 40MVAR đặt tại Trạm biến áp 220kV Mai Động. Thông số của bộ tụ như trong phụ lục. Sơ đồ mô phỏng được thể hiện trên hình 2 với các phần tử chính sau:

- Nguồn: nguồn điện áp hình sin tần số 50Hz và giá trị hiệu dụng điện áp dây bằng 110kV; tổng trở trong được tính theo công suất ngắn mạch trên thanh góp 110kV cho kết quả $Z_N = 1,445\Omega$;



Hình 2. Sơ đồ mô phỏng đầy đủ các giải pháp hạn chế tác động của quá trình đóng tụ

- Điện kháng và điện trở của máy biến áp: thanh góp được cấp điện từ phía 220kV qua các MBA tự ngẫu điện kháng và điện trở của mỗi máy biến áp là $X_{MBA1} = 23,232\Omega$, $R_{MBA1} = 0,27\Omega$;

- Điện cảm nối tiếp và điện dung của giàn tụ:

$$L_1 = L_2 = 64,25mH; C_1 = C_2 = 9,6\mu F.$$

- Điện kháng của kháng điện L nối tiếp giữa hai tụ $X_L = 15,08\Omega$.

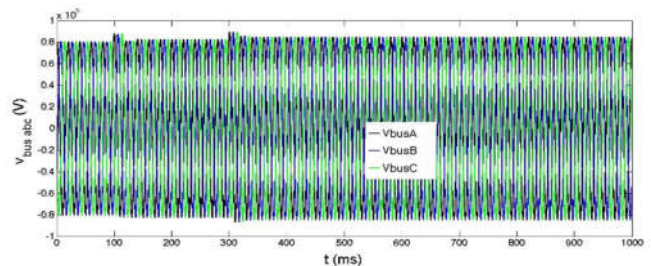
- Các tải và đường dây được tính toán với giá trị thực tế tại một thời điểm trong ngày;

- Bỏ qua điện cảm của thanh góp và dây dẫn.

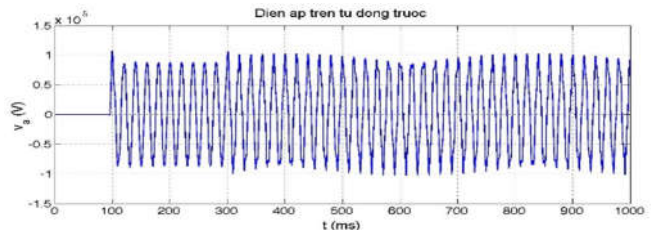
Tiếp theo, mô phỏng được tiến hành ứng với các trường hợp có áp dụng giải pháp hạn chế quá trình quá độ khi đóng tụ khác nhau.

4.1. Mô phỏng đóng cắt tụ với các thông số và thiết bị hiện trạng của trạm (TH1)

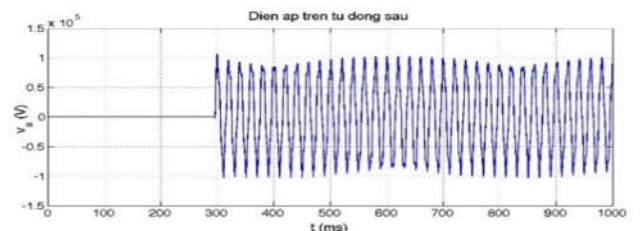
Trường hợp này mô phỏng quá trình đóng tụ khi chưa sử dụng các biện pháp hạn chế tác động của quá trình quá độ, đóng giàn tụ 1 tại thời điểm $t = 100ms$ và đóng giàn tụ 2 tại thời điểm $t = 300ms$. Có thể thấy, sau khi đóng thêm giàn tụ vào, điện áp trên thanh góp 110kV tăng lên có thêm nguồn công suất phản kháng đưa tới thanh góp (hình 3). Tuy nhiên, giá trị điện áp trên thanh góp sau khi đóng tụ vẫn nằm trong giới hạn cho phép (không vượt quá 110% giá trị định mức). Trước khi đóng tụ, điện áp đặt trên tụ và dòng điện qua tụ đều bằng 0. Khi đóng giàn tụ thứ nhất tại thời điểm 100ms, có sự xuất hiện xung dòng điện và điện áp trên giàn tụ 1. Điện áp và dòng điện trên giàn tụ 1 dao động với biên độ giảm dần cho đến khi đạt giá trị ổn định. Khi giàn tụ thứ 2 được đóng vào thì xung điện áp và dòng điện lại xuất hiện trên cả hai giàn tụ. Dòng điện và điện áp trên cả hai giàn tụ trong quá trình quá độ thể hiện rõ độ biến dạng và duy trì khá lâu sau thời điểm đóng (hình 4, 5). Biên độ lớn nhất của xung dòng điện là 435A và xung điện áp trên tụ là 110kV, tiệm cận với giới hạn cho phép như đã nêu ở mục 2.



Hình 3. Điện áp trên thanh góp

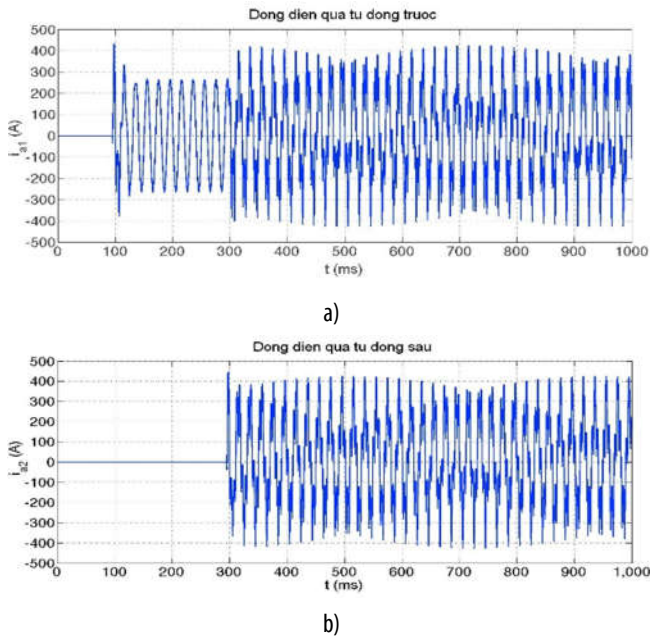


a)



b)

Hình 4. Điện áp pha A tại đầu cực của tụ đóng trước (a) và đóng sau (b)

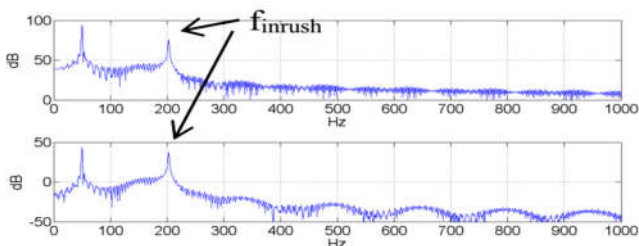


Hình 5. Dòng điện đi vào pha A của bộ tụ đóng trước (a) và tụ đóng sau (b)

Để thấy rõ hơn tần số bậc cao có trong điện áp và dòng điện, dữ liệu mô phỏng được thu thập và phân tích phổ. Kết quả phân tích được thể hiện trên hình 6. Ở đó tần số bậc cao được xác định theo công thức [5]:

$$f_{inrush} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_m \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (2)$$

với L_m là điện cảm giữa hai tụ và C_1, C_2 là điện dung của hai giàn tụ.



Hình 6. Mật độ phổ của điện áp (trên) và dòng điện (dưới) của pha A

4.2. Mô phỏng khi áp dụng các giải pháp hạn chế tác động của quá trình quá độ do đóng tụ

Mô phỏng đóng tụ: khi có điện trở nối tiếp đóng trước (TH2)

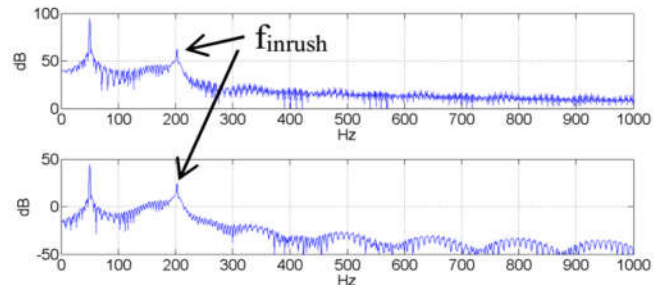
Tác động đóng máy cắt gây ra quá trình quá độ trong mạch RLC. Nhờ có điện trở R quá trình quá độ có thể điều khiển sao cho tác động của dòng điện và điện áp quá độ là bé nhất. Giá trị điện R có thể tính toán theo công thức:

$$R = \frac{Z_0}{\lambda} \quad (3)$$

Trong đó: tổng trở sóng $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ với L là điện cảm giữa

hai tụ có xét đến điện cảm nối tiếp của từng bộ tụ, C là điện dung của các bộ tụ, λ là thông số được lựa chọn để có đặc tính phù hợp nhất [9]. Sau khi tính toán, trong nghiên cứu này, giá trị $R = 5\Omega$ được chọn để mô phỏng.

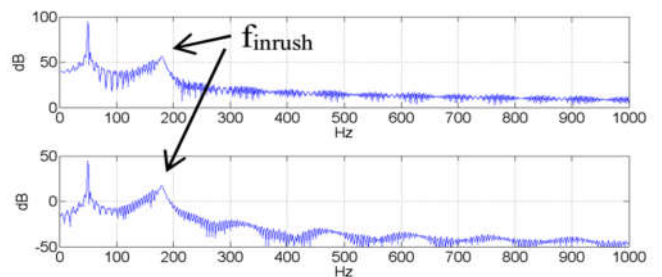
Phân tích mật độ phổ cũng cho thấy sự giảm xuống của các thành phần sóng hài (hình 7).



Hình 7. Mật độ phổ của điện áp (trên) và dòng điện (dưới) của pha A

Mô phỏng đóng tụ: khi có đặt thêm kháng điện giữa hai giàn tụ (TH3)

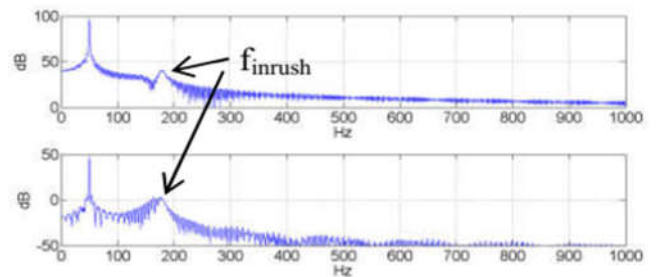
Tác động của quá trình quá độ khi đóng cắt tụ phụ thuộc trực tiếp vào các thông số cơ bản R, L và C của mạch. Trong đó điện cảm giữa hai giàn tụ có tác dụng làm hạn chế quá trình quá độ về biên độ và tần số của dòng điện quá độ.



Hình 8. Mật độ phổ của điện áp (trên) và dòng điện (dưới) của pha A

Thông số được chọn $X_L = 15,08\Omega$ (lấy theo giá trị điện kháng trong dự án đầu tư xây dựng đang được lắp đặt và dự kiến đưa vào vận hành trong năm 2021 tại trạm để hạn chế dòng ngắn mạch trên thanh góp 110kV) để mô phỏng. Kết quả phân tích phổ của giải pháp được thể hiện trên hình 8.

Mô phỏng đóng tụ: khi có đặt thêm kháng điện giữa hai giàn tụ và có điện trở nối tiếp đóng trước (TH4)

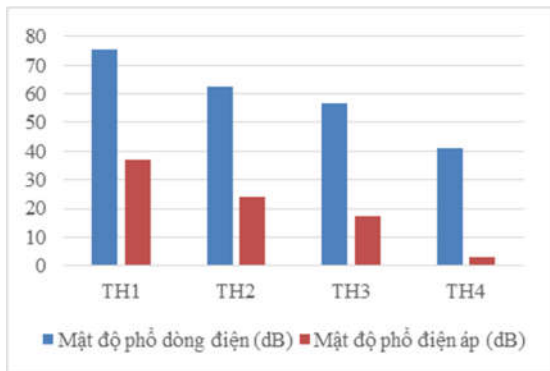


Hình 9. Mật độ phổ của điện áp (trên) và dòng điện (dưới) của pha A

Khi có trở nối tiếp với tụ và điện cảm giữa hai giàn tụ có tác dụng làm hạn chế quá trình quá độ rõ rệt cả về biên độ

và tần số của dòng điện quá độ (hình 9). Thực tế ở trạm biến áp 220kV Mai Động, kháng điện giữa hai thanh góp đóng vai trò như điện cảm trung gian giữa hai giàn tụ. Nhờ đó quá trình quá độ cũng có thể được hạn chế.

Mô phỏng thêm sự có mặt của điện cảm trung gian này cho thấy, ảnh hưởng của quá trình quá độ khi đóng tụ giảm đi rất nhiều (hình 9).



Hình 10. Sự thay đổi mật độ phổ của sóng hài bậc cao khi áp dụng các giải pháp

Tổng hợp kết quả trong bốn trường hợp trên cho thấy có sự tăng dần về hiệu quả khi áp dụng nhiều giải pháp khác nhau. Biên độ của thành phần cơ bản không thay đổi nhiều. Như vậy biên độ của tín hiệu phân tích sẽ phụ thuộc vào biên độ của thành phần tần số bậc cao. Kết quả được minh họa trên hình 10.

Một số nhận xét có thể rút ra như sau:

- TH1: máy cắt tụ có chọn thời điểm đóng và có kháng điện nối tiếp giữa hai giàn tụ. Tuy nhiên, biên độ phổ thành phần tần số bậc cao ghi nhận được ở mức cao cho cả dòng điện và điện áp;

- TH2: khi đưa điện trở nối tiếp đóng trước vào, biên độ phổ giảm đi rõ rệt;

- TH3: đưa kháng điện vào giữa hai giàn tụ cho phép hạn chế tác động do đóng tụ tốt hơn TH2; Giàn tụ được xem là cách ly với phần mạch đóng cắt nếu tốc độ biến thiên của xung dòng (di/dt) không vượt quá tốc độ thay đổi lớn nhất định mức của dòng cắt của máy cắt điện [9]. Ở đó, tốc độ biến thiên của xung dòng tỷ lệ thuận với tần số f_{inrush} nên tỷ lệ nghịch với điện cảm tương đương giữa hai tụ (theo công thức (2)).

- TH4: khi áp dụng đồng thời giải pháp TH2 và TH3 cho thấy thành phần bậc cao trong dòng điện giảm thấp nhất trong các trường hợp và thành phần tần số bậc cao trong tín hiệu điện áp ở mức rất thấp.

Như vậy, có thể thấy giải pháp sử dụng kháng điện đặt giữa hai tụ có tính khả thi tốt nhất vì có thể hạn chế được đáng kể thành phần tần số bậc cao và có thể lắp đặt được khá dễ dàng trong thực tế. Mặc dù đã được áp dụng ở cấp điện áp phân phối ở mức vài chục kV trở xuống, giải pháp sử dụng điện trở nối tiếp đóng trước tuy có hiệu quả cao nhưng trong ứng dụng ở cấp điện áp từ 110kV trở lên còn chịu ràng buộc về khả năng chế tạo điện trở có thể làm việc ở điện áp và công suất lớn.

5. KẾT LUẬN

Thông tin thu được từ mô phỏng và phân tích phổ STFT cho thấy để hạn chế quá trình quá độ khi đóng tụ cần kết hợp các giải pháp khác nhau như chọn thời điểm đóng phù hợp, đặt thêm kháng điện nối tiếp, kháng điện trung gian giữa các giàn tụ và đặt điện trở nối tiếp trước tụ. Hơn nữa, cần sử dụng thiết bị có khả năng đáp ứng nhanh và chính xác để chọn thời điểm đóng chính xác cho tụ.

Ngoài ra kết quả phân tích mật độ phổ trong nghiên cứu cho thấy biên độ của sóng hài bậc cao của dòng điện và điện áp quá độ là một trong những chỉ số có tính định lượng tốt trong đánh giá tác động của quá trình quá độ và tính hiệu quả của các giải pháp áp dụng.

PHỤ LỤC

Bảng thông số kỹ thuật giàn tụ bù ngang

| TT | Nội dung | | |
|----|--------------------|-----------------|------------|
| | Hạng mục | Giá trị/bình | Giá trị/bộ |
| 1 | Kiểu loại | CHDE - 142 | |
| 2 | C_{dm} (μF) 20°C | 8/bình | 9,6 |
| 3 | Công suất (kVAR) | 565 | 40.000 |
| 4 | U_{dm} (kV) | 123 | 123 |
| 5 | I_{dm} (A) | 37,7 | 300 |
| 6 | Năm sản xuất | 2003 | |
| 7 | Nước sản xuất | ABB - Thụy Điển | |

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J. Das, 2005. *Analysis and control of large shunt capacitor bank switching transients*. IEEE Transactions on Industry Applications.
- [2]. Hanoi Power Transmission Corporation, 2018. *Bang tong hop cac hu hong tu bu ngang tai cac tram bien ap do truyen tai dien Ha Noi quan ly*.
- [3]. IEEE Standard 18, 2002. *Standard for shunt capacitor banks*.
- [4]. IEEE Standard C37.99, 2005. *Guide for protection of shunt capacitor banks*.
- [5]. J. C. Das, 2015. *Power system harmonics and passive filter designs*. John Wiley & Sons.
- [6]. IEC 60871-1, 2014. *Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V - Part 1: General*.
- [7]. M. Frigo, S. G. Jonson., 1998. *FFTW: An Adaptive Software Architecture for the FFT*. Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing.
- [8]. J. B. Allen, L. R. Rabiner, 1997. *A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis*. Proceedings of the IEEE.
- [9]. A. Greenwood, 1991. *Electrical Transients in Power Systems*. New York: John Wiley and Sons.

AUTHORS INFORMATION

Ma Thi Thuong Huyen¹, Vu Hoang Giang¹, Doan Van Dao²

¹Electric Power University

²The Power Transmission Projects Management Board, Branch of the National Power Transmission Corporation