

MÔ PHỎNG HỒ QUANG ĐIỆN THỨ CẤP TRÊN ĐƯỜNG DÂY TRUYỀN TẢI

SIMULATION OF SECONDARY ARC ON TRANSMISSION LINE

Đặng Việt Hùng^{1,*},
Lê Khắc Lâm¹, Phạm Thị Thanh Đam¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huivh5804.2024.249>

TÓM TẮT

Bài báo thực hiện mô hình hóa và mô phỏng hiện tượng phóng điện hồ quang trên đường dây truyền tải, trong đó tập trung xây dựng mô hình động nhằm xác định các thông số hồ quang theo phương pháp cân bằng nhiệt Caissie-Mayr. Mô hình được xây dựng và cho phép tính toán dòng điện, điện áp, điện dẫn và các thông số khác của hồ quang xét cho trường hợp xảy ra sự cố một pha chạm đất trên đường dây truyền tải 500kV. Hồ quang thứ cấp xuất hiện tại vị trí sự cố khi máy cắt tác động cắt pha sự cố. Giá trị dòng điện hồ quang thứ cấp có vai trò quyết định trong việc đóng lại thành công của máy cắt tự động đóng lại một pha trên lưới truyền tải.

Từ khóa: Hồ quang điện thứ cấp, sự cố một pha chạm đất, mô hình hồ quang, SPAR.

ABSTRACT

This paper presents a model for modelling of arc discharge phenomenon on transmission lines, focusing on using a dynamic model to determine arc parameters according to the Caissie-Mayr methods. The model allows calculation of current, voltage, conductivity, and other parameters of the arc, considering the case of a single phase to earth fault on a 500kV transmission line. When the circuit breaker operates to clear the fault phase, the secondary arc appears at the fault location. The value of the secondary arc current plays a decisive role in the successful reclosing of a single-phase auto-reclosure (SPAR) on the transmission grid.

Keywords: Arc secondary, model arc, single phase to earth fault, SPAR.

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

*Email: hungdv79@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 18/4/2024

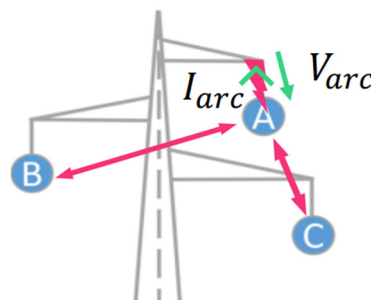
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/5/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/7/2024

1. GIỚI THIỆU

Theo thống kê hiện nay, phần lớn sự cố trên đường dây truyền tải là sự cố chạm đất một pha thoáng qua. Để

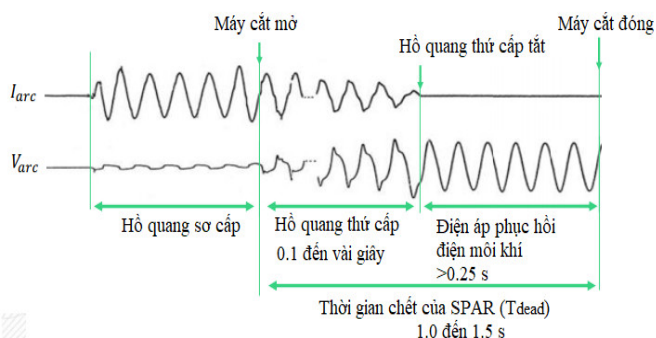
nâng cao độ tin cậy cung cấp điện, các đường dây truyền tải được trang bị thiết bị tự động đóng lại một pha (SPAR). Khả năng đóng lại thành công của SPAR có liên quan đến giá trị dòng điện hồ quang thứ cấp xuất hiện trong mạch điện. Hồ quang thứ cấp là hồ quang xuất hiện tại điểm sự cố sau hồ quang sơ cấp do hiện tượng tương hỗ điện cảm và điện dung giữa pha lành và pha sự cố khi SPAR tác động cắt pha sự cố (hình 1, 2). Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm đánh giá các yếu tố (chiều dài đường dây, dòng điện sơ cấp, điện trở điểm sự cố, đảo pha, kháng điện trên đường dây,...) ảnh hưởng đến giá trị hồ quang thứ cấp [1-3]. Trong thực tế, hồ quang thứ cấp sẽ tự tắt, tuy nhiên thời gian tồn tại và giá trị của dòng điện hồ quang thứ cấp tác động lớn đến khả năng đóng lại thành công của SPAR và làm tăng thời gian chết (T_{dead}) cho đóng lại một pha, ảnh hưởng đến ổn định động của hệ thống điện.



Hình 1. Tương hỗ giữa pha sự cố và pha lành của hồ quang thứ cấp

Để hiểu rõ về hiện tượng phóng điện hồ quang, nhiều mô hình số đã được nghiên cứu xây dựng và phát triển nhằm mô hình hóa và mô phỏng hiện tượng [4]. Tuy nhiên, khác với hồ quang sơ cấp đã được nghiên cứu trong nhiều thử nghiệm, hồ quang thứ cấp là hiện tượng có tính chất ngẫu nhiên, tính chính xác của kết quả nghiên cứu phụ thuộc vào mô hình sử dụng trong mô phỏng. Bài báo thực hiện mô phỏng hiện tượng hồ quang

thứ cấp trên đường dây 500kV trong trường hợp sự cố một pha chạm đất, trong đó sử dụng mô hình động hồ quang dựa trên sự cân bằng năng lượng và mô phỏng bằng phần mềm EMTP-RV, mô hình mô phỏng cho phép tính toán các thông số hồ quang thứ cấp xuất hiện trong mạch điện.



Hình 2. Dòng điện và điện áp hồ quang trong quá trình tác động của SPAR

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT MÔ HÌNH HỒ QUANG ĐIỆN

2.1. Mô hình hồ quang điện

Mô hình mô phỏng trong bài báo sử dụng mô hình động được mô tả bằng phương trình Caissie của điện dẫn hồ quang [5, 6]:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} (G - g) \tag{1}$$

$$\text{Hay: } g(t) = \int \frac{1}{\tau} (G - g) dt \tag{2}$$

Trong đó:

G: Điện dẫn hồ quang;

τ : Hằng số thời gian hồ quang;

g: Điện dẫn động hồ quang.

Với G được xác định bởi phương trình:

$$G = \frac{|i_{arc}|}{(u_0 + r_0 |i_{arc}|) \cdot l_{arc}} \tag{3}$$

Trong đó :

i_{arc} : Dòng điện hồ quang;

u_0 : Điện áp hồ quang trên một đơn vị chiều dài (V/m);

r_0 : Điện trở hồ quang trên một đơn vị chiều dài (Ω/m).

Phương trình (1) mô tả trường hợp tổng quát mô hình hồ quang điện xét trong trường hợp hồ quang xuất hiện giữa 2 điện cực. Do hiện tượng hồ quang phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau tùy theo điều kiện xuất hiện, các giá trị trong phương trình trên như τ , u_0 , r_0 thường được xác định từ thực nghiệm. Trong trường hợp hồ quang điện thứ cấp phụ thuộc vào chiều dài hồ quang, ta có mối quan hệ giữa hằng số hồ quang và chiều dài l_{arc} được thể hiện theo phương trình sau:

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{l_{arc}}{l_0} \right)^\alpha \tag{4}$$

Trong đó:

τ_0 : Giá trị ban đầu của hằng số hồ quang;

l_0 : Giá trị ban đầu của chiều dài hồ quang;

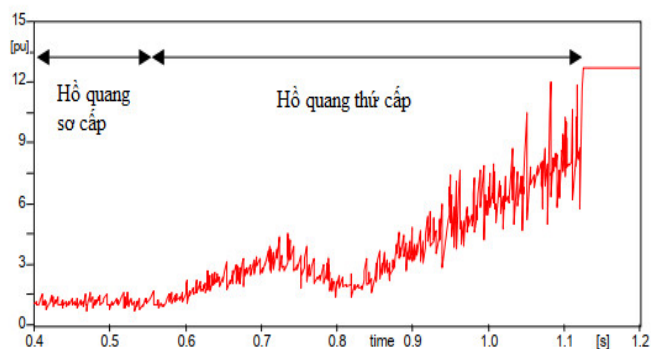
α : Hệ số có giá trị trong khoảng từ -0,1 đến -0,6.

Hồ quang thứ cấp xuất hiện và phát triển do điện áp hồ quang tăng. Hồ quang thứ cấp sẽ phát triển đến khi điện áp đạt giá trị điện áp phục hồi, với điện áp phục hồi là giá trị điện áp giữa 2 điện cực tại điểm sự cố sau khi hồ quang thứ cấp tắt. Thực tế, thời gian tồn tại hồ quang cũng có thể được xác định từ tốc độ phát triển của hồ quang.

Ngoài quá trình kéo dài hồ quang, giá trị tại đó hồ quang khôi phục trở lại (re-ignition) trong quá trình phát triển cũng đóng vai trò quan trọng. Tốc độ phát triển hồ quang một phần được quyết định bởi điện dẫn bên trong dòng plasma của hồ quang, trường hợp điện áp phục hồi đạt giá trị đủ lớn có thể gây ra hiện tượng phóng điện chọc thủng nối liền giữa hai điện cực, khi đó hồ quang có thể tiếp tục quay trở lại chế độ cháy ổn định. Hồ quang tắt khi có sự mất cân bằng về nhiệt trong bản thân hồ quang, hồ quang tắt khi thỏa mãn hai tiêu chuẩn sau [5]:

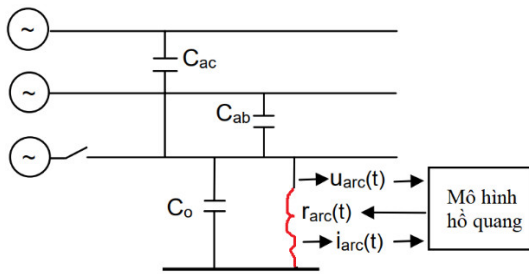
- $g < g_{min}$
- $dr_{arc}/dt > (dr_{arc}/dt)_{min}$

Chiều dài hồ quang $l_{arc}(t)$ là yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến quá trình phát triển và tự tắt của hồ quang, tuy nhiên đây là thông số phụ thuộc vào nhiều yếu tố bên ngoài, rất khó để tính toán và định lượng chính xác các tác động của thông số môi trường trong mô phỏng hồ quang điện. Tuy nhiên, các mô hình thường cho phép đánh giá hồ quang trong trường hợp kịch bản nguy hiểm nhất. Hình 3 mô tả kết quả thực nghiệm sự thay đổi của $l_{arc}(t)$ trong trường hợp mô phỏng lưới điện có điện áp 400kV, dài 230km, lưới điện không có kháng bù ngang [5].



Hình 3. Mối quan hệ giữa chiều dài hồ quang theo thời gian

2.2. Mô hình hồ quang thứ cấp bằng phần mềm EMTP-RV



Hình 4. Mối quan hệ giữa mạch điện và mô hình hồ quang

Phần mềm EMTP-RV cho phép mô phỏng động mô hình hồ quang, trong đó giả thiết hồ quang là các điện trở phi tuyến, hồ quang phát triển theo các bước với các thông số bước trước được cập nhật và tính toán cho bước sau. Dòng điện hồ quang được tính theo sơ đồ thay thế Thevenin:

$$i_{arc} = \frac{g \cdot u_{arc}}{1 + g \cdot u_{arc}} \tag{5}$$

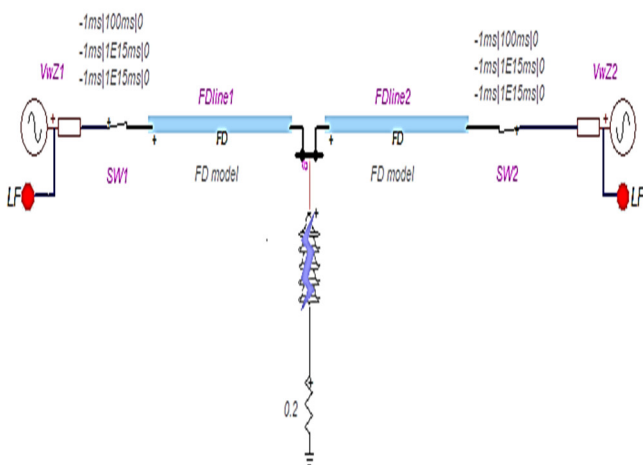
Áp dụng biến đổi LAPLACE cho phương trình (1) thu được:

$$g(t) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \cdot G(t) \tag{6}$$

Với mỗi bước phát triển của hồ quang và từ giá trị dòng điện i_{arc} tính toán từ bước trước, giá trị của $G(t)$ được cập nhật cho bước tiếp theo. Hằng số thời gian τ phụ thuộc vào chiều dài hồ quang, bước tiếp theo của quá trình phát triển hồ quang được xác định thông qua giá trị $r_{arc}(t) = 1/g(t)$. Hình 4 thể hiện mối tương quan giữa các thông số hồ quang thứ cấp và mạch điện trong trường hợp ngắn mạch một pha.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình tính toán mô phỏng



Hình 5. Mô hình lưới điện mô phỏng sự cố một pha chạm đất

Mô hình mô phỏng trên phần mềm EMTP-RV gồm lưới điện cấp điện áp 500kV, gồm hai nguồn và tải. Đường dây được mô phỏng bằng mô hình FD có chiều dài 120 km. Xét trường hợp sự cố một pha chạm đất (pha A) tại điểm giữa đường dây, điện trở tại điểm chạm đất bằng 0,2Ω, 02 đầu đường dây được trang bị SPAR. Khi đường dây xảy ra sự cố một pha chạm đất, máy cắt pha A tại hai đầu đường dây tác động cắt pha A tại thời điểm $t_{trip} = 100ms$, các máy cắt pha B và C không tác động (hình 5).

Mô hình động quá trình lan truyền hồ quang khi xảy ra sự cố một pha chạm đất sử dụng các thông số mô phỏng sau:

$$\alpha = -0,5, \tau_0 = 1,0ms$$

$$u_0 = 0,9kV/m, r_0 = 22m\Omega/m$$

Đối với điều kiện hồ quang tự tắt, các giá trị sau đây được sử dụng trong mô phỏng:

- $g_{min} = 50\mu S.m$
- $(dr_{arc}/dt)_{min} = 20M\Omega/(s.m)$

Từ các phương trình mô phỏng, với các thông số và điều kiện hồ quang tự tắt như trên, mô hình động tính toán các thông số hồ quang (dòng điện, điện áp, điện dẫn,...) được xây dựng trên phần mềm EMTP-RV thể hiện trên hình 6 và 7. Mô hình tính toán điện dẫn là sự kết hợp của mô hình Cassie cho trường hợp dòng điện lớn và mô hình Mayr cho trường hợp dòng điện cận zero.

Phương trình Mayr có dạng sau [6]:

$$g_M(t) = \int \frac{1}{\tau_M} \left(\frac{i^2}{P_0} - g \right) dt \tag{7}$$

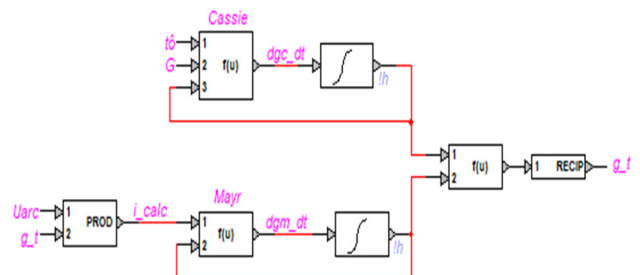
Trong đó:

τ_M : Hằng số thời gian hồ quang Mayr

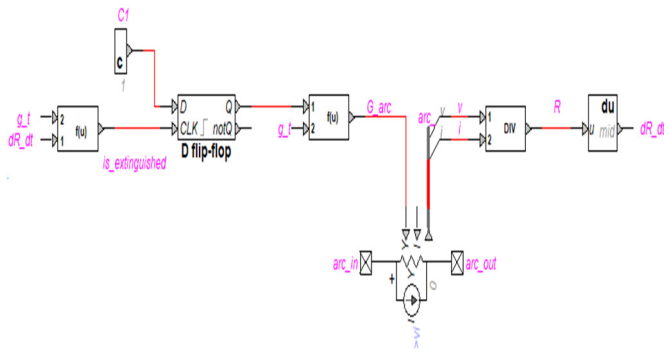
P_0 : Công suất làm lạnh hồ quang (hằng số tổn thất hồ quang)

Trong tính toán sử dụng giá trị $\tau_M = 0,5E-6$ và $P_0 = 10,0E+4$.

Mối quan hệ giữa chiều dài hồ quang theo thời gian $I_{arc}(t)$ sử dụng trong mô hình mô phỏng được xây dựng từ kết quả thực nghiệm ở hình 6, 7.



Hình 6. Mô hình tính toán i_{arc} , G và $g(t)$

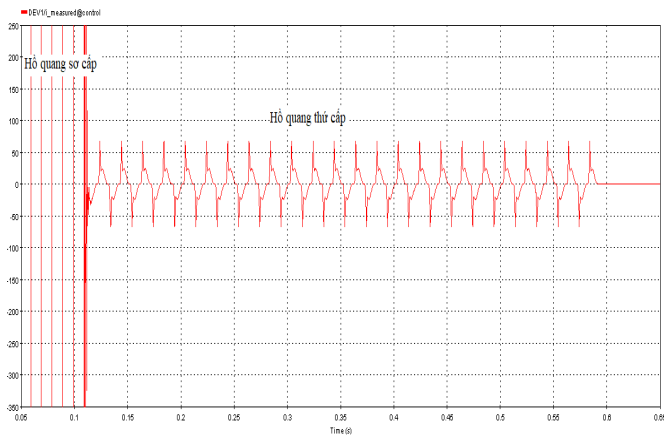


Hình 7. Mô hình động tính toán các giá trị thông số hồ quang

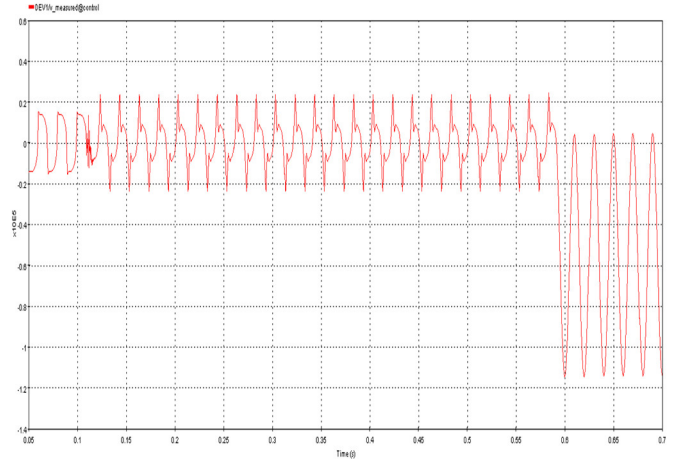
3.2. Kết quả mô phỏng

Bài báo thực hiện mô phỏng động các tham số hồ quang điện như điện áp, điện trở, dòng điện sơ cấp và thứ cấp hồ quang. Từ hình 8 cho thấy, dòng điện hồ quang thứ cấp tại pha A xuất hiện khi SPAR tác động cắt pha A. Hồ quang thứ cấp xuất hiện trong khoảng 0,47s và đạt giá trị đỉnh 65A. Hình dạng dòng điện cho thấy hồ quang trong quá trình phát triển bị kéo dài đột đột. Giá trị điện áp đạt đỉnh 21kV (hình 9), hồ quang thứ cấp tiếp tục phát triển khi điện áp hồ quang nhỏ hơn giá trị điện áp phục hồi cách điện, sau thời điểm hồ quang tắt ta có thể quan sát trên đồ thị dao động điện áp DC phục hồi. Hình 10 thể hiện sự thay đổi của điện dẫn hồ quang trong quá trình hồ quang thứ cấp phát triển, điện dẫn có dạng xung cho thấy hồ quang phát triển theo các bước mỗi khi điều kiện hồ quang phát triển trở lại thỏa mãn. Các giá trị mô phỏng cho thấy đường dây tính toán mô phỏng cần thực hiện các biện pháp nhằm giảm dòng điện và thời gian tồn tại của hồ quang thứ cấp.

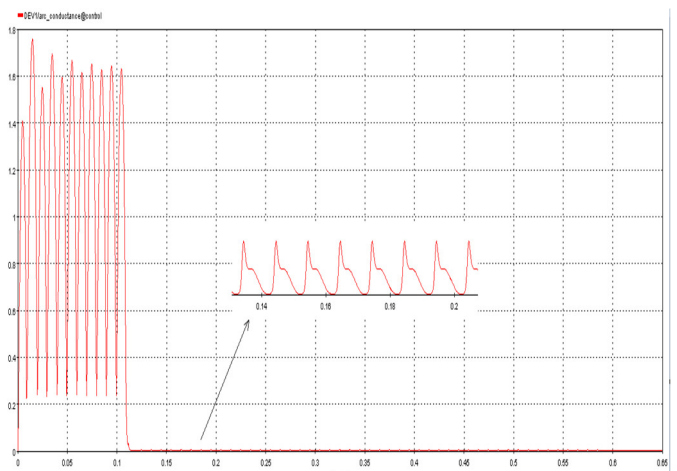
Để đảm bảo SPAR đóng lại thành công và giảm thời gian chết của máy cắt do dòng điện thứ cấp gây ra, có thể thực hiện một số giải pháp như trang bị cho đường dây như dao tiếp đất tác động nhanh (HSES), kháng bù ngang, thực hiện đảo pha đường dây.



Hình 8. Dòng điện hồ quang thứ cấp



Hình 9. Điện áp hồ quang thứ cấp



Hình 10. Điện dẫn hồ quang

4. KẾT LUẬN

Dòng điện hồ quang thứ cấp ảnh hưởng đến khả năng đóng lại thành công của SPAR trên lưới truyền tải. Bài báo đã mô hình hóa hồ quang thứ cấp trên cơ sở phương pháp cân bằng năng lượng và thực hiện mô phỏng động trên phần mềm mô phỏng EMTP-RV, kết quả mô phỏng cho phép tính toán giá trị dòng điện, điện áp và thời gian tồn tại của hồ quang thứ cấp, cũng như các thông số điện dẫn, hằng số thời gian hồ quang trong quá trình phát triển.

Kết quả mô phỏng trên mô hình lưới điện tính toán cho thấy giá trị dòng điện đạt đỉnh đạt 65A trong thời gian 0,47s, điện dẫn hồ quang thay đổi dạng xung cho thấy hồ quang phát triển theo các bước. Bài báo tạo tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo đánh giá ảnh hưởng của các thông số lưới điện (chiều dài đường dây, mạch kép, phân pha, kháng bù...) và vị trí, điện trở điểm sự cố chạm đất một pha đến hồ quang thứ cấp. Từ đó, nghiên cứu các giải pháp nhằm giảm giá trị dòng điện và thời gian tồn tại hồ quang thứ cấp, đảm bảo nâng cao độ tin cậy cung cấp điện trên lưới điện truyền tải.

LỜI CẢM ƠN

Xin chân thành cảm ơn công ty PGSTech đã tài trợ miễn phí phần mềm EMTP-RV 4.2.1 cho Trường Đại học Điện lực để nhóm tác giả thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. H. Cong, D. Han, S. Wang, L. Qiao, Q. Li, "Experimental study on the extinction characteristics of secondary arc under different secondary arc currents near outdoor insulator," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 29, 1, 103-110, 2022 .

[2]. R. Hongtao, "Analysis on secondary arc current of 500kV power station transmission line," in *Proceedings of the 2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA)*, 428-432, Hefei, China, 2020.

[3]. M. Ratajczyk, D. Hart, A. Xemard, et al., "Secondary arc extinction in AC/DC overhead lines," *CIGRE Science and Engineering (CSE)*, 25, 2022.

[4]. *State of the art of circuit-breaker modelling*. Technical Brochures, Cigré Brochure, (135), 1998.

[5]. L. Prikler, M. Kizilcay, G. Bán, P. Handl, "Improved secondary arc models based on identification of arc parameters from staged fault test records," in *14th Power System Computation Conf.*, Sevilla, Spain, 2002.

[6]. M. Kizilcay, T. Pniok, "Digital Simulation of Fault Arcs in Power Systems," *ETEP Journal*, 1, 1, 55-60, 1991.

AUTHORS INFORMATION

Dang Viet Hung, Le Khac Lam, Pham Thi Thanh Dam

Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University, Vietnam