

MÔ PHỎNG THAM SỐ HỒ QUANG ĐIỆN TRÊN MÁY CẮT ĐƯỜNG DÂY TRUYỀN TẢI

SIMULATION OF ELECTRIC ARC MODEL IN CIRCUIT BREAKER OF TRANSMISSION LINE

Đặng Việt Hùng, Lê Khắc Lâm

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 22/02/2024, Ngày chấp nhận đăng: 08/4/2023, Phản biện: TS. Nguyễn Hữu Kiên

Tóm tắt:

Bài báo thực hiện mô hình hóa và mô phỏng hiện tượng phóng điện hồ quang trên máy cắt đường dây truyền tải dựa trên mô hình cân bằng năng lượng bằng phần mềm EMTP-RV. Mô hình hiện tượng phóng điện Cassie và Schwarz được sử dụng nhằm đánh giá các tham số của hồ quang điện khi xảy ra hiện tượng ngắn mạch một pha và ba pha. Kết quả mô phỏng cho thấy sự thay đổi của các giá trị điện trở, điện áp và dòng điện hồ quang xuất hiện giữa hai điện cực máy cắt. Mô hình phóng điện hồ quang Cassie kết hợp cùng mô hình Schwarz đã giải quyết bài toán mô phỏng hiện tượng phóng điện trong máy cắt cho trường hợp dòng điện lớn và trường hợp dòng điện cận zero.

Từ khóa:

Mô hình hồ quang, máy cắt, đường dây truyền tải, ngắn mạch.

Abstract:

The paper focuses on the modeling and simulation of the arc discharge phenomenon on circuit breaker of transmission line based on the energy balance model using the EMTP software. The Cassie and Schwarz arc discharge models are used to evaluate the parameters of the electric arc that occurs in the single-phase and three-phase short circuit phenomenon. The simulation results show the changes of the resistance, voltage and current values of the arc that appear between the two poles of the circuit breaker. The Cassie model combined with the Schwarz model has solved the problem of simulating the arc discharge phenomenon in the circuit breaker for the case of large current and the case of near-zero current.

Keywords:

Arc model, circuit breaker, transmission line, short circuit.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đường dây truyền tải đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ tin cậy cung cấp điện của hệ thống điện. Trong quá trình truyền tải điện năng, đường dây thường gặp các sự cố ngắn mạch, để đảm bảo an toàn và nhanh chóng cách ly sự cố,

trên đường dây được trang bị các máy cắt. Máy cắt đường dây có nhiệm vụ cắt mạch điện và dập tắt hồ quang phát sinh. Khi máy cắt tác động cắt mạch điện, điện trường giữa hai điện cực tăng cao làm xuất hiện hồ quang, hồ quang điện phát sinh giữa hai điện cực máy cắt phụ thuộc

vào nhiều yếu tố. Việc nghiên cứu và mô phỏng hồ quang điện nhằm hiểu rõ bản chất vật lý của hiện tượng đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao độ tin cậy cung cấp điện, đặc biệt trong nghiên cứu máy cắt và quá điện áp khi đóng cắt máy cắt đường dây [1], [2].

Bài báo tập trung trình bày phương pháp mô hình hóa và mô phỏng các tham số của hồ quang điện xuất hiện trong máy cắt đường dây truyền tải khi xảy ra ngắn mạch.

2. MÔ HÌNH HỒ QUANG ĐIỆN

Trong thực tế, quá trình phát sinh hồ quang là một hiện tượng phức tạp, phụ thuộc vào nhiều thông số và khó xác định chính xác về mặt định lượng. Tuy nhiên, để giải thích quá trình phát sinh, lan truyền và dập tắt hồ quang, nhiều mô hình khác nhau đã được phát triển nhằm mô hình hóa hồ quang trong máy cắt và tại điểm ngắn mạch trên lưới điện, trong đó có mô hình động dựa trên mối quan hệ cân bằng năng lượng và cân bằng nhiệt.

Từ các mô hình cân bằng năng lượng và cân bằng nhiệt cơ sở, Cassie và Mayr đã phát triển các mô hình được sử dụng rất phổ biến trong nghiên cứu hồ quang, mô hình đã làm rõ các bản chất vật lý của hồ quang điện [3], [4].

▪ Mô hình Cassie:

Mô hình được biểu diễn bởi phương trình:

$$\frac{dG_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2}{U_a^2} - 1 \right) \quad (1)$$

Hay:

$$G_c(t) = \int \frac{1}{\tau_c} \left[\frac{i^2}{U_a^2 \cdot G_c} - G_c \right] dt \quad (2)$$

Trong đó:

u, i : điện áp và dòng điện tức thời hồ quang;

G_c : điện dẫn động của hồ quang ;

τ_c : hằng số thời gian hồ quang;

U_a : hằng số điện áp hồ quang.

Trong mô hình Cassie, tổn thất nhiệt xảy ra do hiện tượng đối lưu, mức độ ion hóa trong hồ quang xảy ra mãnh liệt. Do vậy, sự chuyển trạng thái cân bằng năng lượng thay đổi theo mặt cắt ngang hồ quang và điện dẫn thay đổi theo bán kính hồ quang. Mô hình Cassie phù hợp áp dụng cho trường hợp dòng điện hồ quang có giá trị lớn.

▪ Mô hình Schwarz

Mô hình được Schwarz phát triển từ mô hình Mayr (thường gọi là mô hình Mayr cải tiến) [3], [5].

Mô hình Mayr có dạng như sau:

$$\frac{1}{G_M} \cdot \frac{dG_M}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u \cdot i}{P_0} - 1 \right) \quad (3)$$

Trong đó:

G_M : điện dẫn động của hồ quang điện;

τ_m : hằng số thời gian hồ quang;

P_0 : hằng số nhiệt lạnh hồ quang.

Schwarz đã cải tiến mô hình Mayr, trong

đó các tham số τ_m và P_0 phụ thuộc vào điện dẫn hồ quang và là các hàm năng lượng:

$$\tau_m = A \cdot G^\alpha \text{ và } P_0 = B \cdot G^\beta.$$

Từ đó có phương trình mô hình Schwarz:

$$\frac{1}{G_M} \cdot \frac{dG_M}{dt} = \frac{1}{A \cdot G^\alpha} \left(\frac{u \cdot i}{B \cdot G^\beta} - 1 \right) \quad (4)$$

Hay:

$$G_M(t) = \int \frac{1}{A \cdot G^\alpha} \left[\frac{i^2}{B \cdot G^\beta} - G_M \right] dt \quad (5)$$

Trong mô hình trên, hồ quang giả thiết có dạng hình trụ với đường kính không đổi, tổn thất nhiệt xảy ra do dẫn nhiệt và điện dẫn hồ quang thay đổi theo mức độ ion hóa. Mô hình phù hợp áp dụng cho trường hợp dòng điện hồ quang có giá trị nhỏ (cận zero).

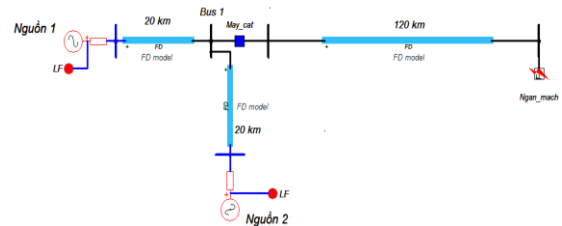
Trong mô phỏng hồ quang điện, hai mô hình được kết hợp trong tính toán điện dẫn tổng (G).

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_M} + \frac{1}{G_C} \quad (6)$$

3. MÔ HÌNH MÔ PHỎNG

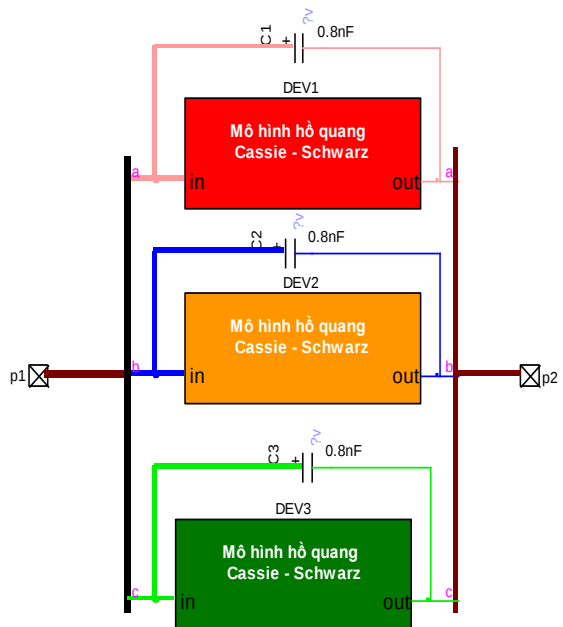
Bài báo thực hiện xây dựng mô hình mô phỏng trên phần mềm tính toán quá độ EMTP-RV. Mô hình mô phỏng gồm một đường dây cấp điện áp 400 kV cấp điện từ 02 nguồn: Nguồn điện cấp đến Bus 1 từ 02 đường dây có chiều dài 20 km, đường dây từ máy cắt đến điểm ngắn mạch dài 120 km (Hình 1), nguồn điện mô phỏng

bằng nút Slack bus, đường dây trên không được mô phỏng trên bằng mô hình phụ thuộc tần số FD.



Hình 1. Mô hình lưới điện mô phỏng

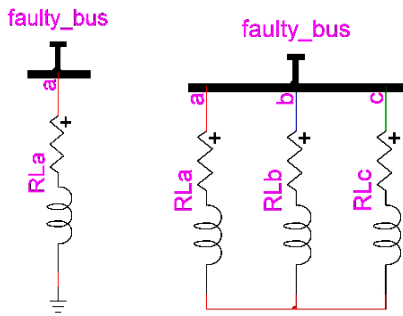
- Mô hình máy cắt và điểm ngắn mạch
Máy cắt ba pha được mô hình hóa từ phương trình (2) và (4) bao gồm ba máy cắt một pha. Để hạn chế quá điện áp khi đóng cắt, máy cắt được nối song song với tụ điện có điện dung $C=0,8 \text{ nF}$ (Hình 2).



Hình 2. Mô hình máy cắt ba pha

Điểm ngắn mạch được mô phỏng như Hình 3, điện trở ngắn mạch trong trường

hợp ngắn mạch một pha bằng $0,2 \Omega$. Xét trường hợp ngắn mạch xảy ra tại thời điểm tại $t = 1 \text{ ms}$. Thời gian thực hiện mô phỏng bằng 100 ms .



Hình 3. Mô hình ngắn mạch một pha và ba pha

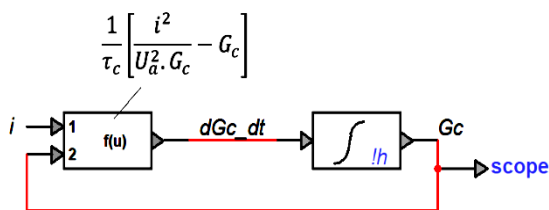
▪ Mô hình hồ quang

Mô hình hồ quang xây dựng là sự kết hợp giữa mô hình Cassie và Schwarz, việc lựa chọn các thông số trong mô hình liên quan đến quá trình phát triển hồ quang và thường được xác định từ thực nghiệm. Nhằm mục đích đánh giá tham số hồ quang trong máy cắt đường dây truyền tải, bài báo lựa chọn các thông số mô phỏng như sau:

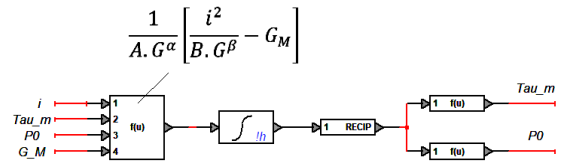
$$A = 0.85e-06; \alpha = 0.09$$

$$B = 0.4e+06; \beta = 0.49$$

$$\tau_c = 1e-06 \text{ (s)} ; U_a = 700 \text{ (V)}$$



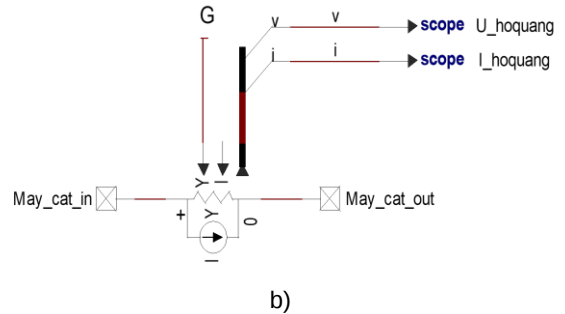
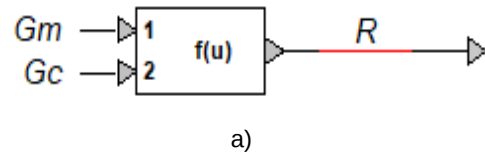
Hình 4. Điện dẫn hồ quang theo Cassie



Hình 5. Điện dẫn hồ quang theo Schwarz

Từ giá trị điện dẫn $G(t)$ hồ quang và tham số nguồn; dòng điện, điện áp hồ quang được tính theo phương pháp mạch điện Norton tương đương theo công thức:

$$i_k = Y_k \cdot v_k + I_k$$



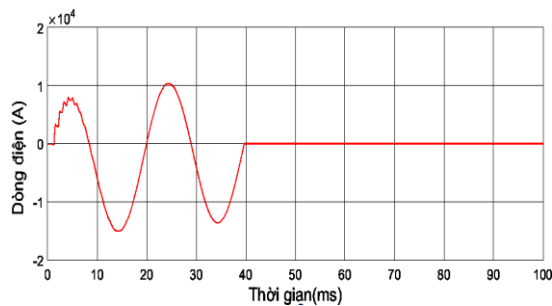
Hình 6. Mô hình tính toán điện trở (a) và dòng điện, điện áp hồ quang máy cắt (b)

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

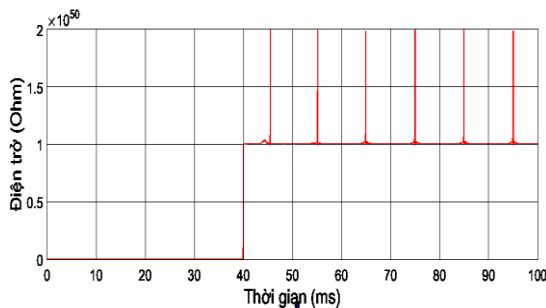
Bài báo thực hiện mô phỏng các tham số hồ quang (dòng điện, điện áp, điện trở...) xuất hiện giữa các tiếp điểm máy cắt khi máy cắt tác động trong trường hợp sự cố ngắn mạch một pha và ba pha. Để theo dõi sự biến thiên của dòng điện và điện áp khi xảy ra ngắn mạch, xét trường hợp máy cắt tác động với thời gian $t > t_{trip}$, trong đó $t_{trip} = 3 \text{ ms}$.

▪ Trường hợp ngắn mạch một pha

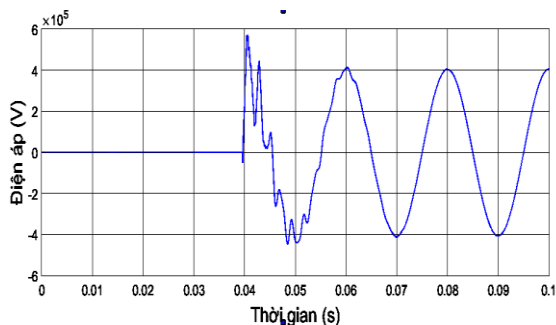
Xét trường hợp ngắn mạch pha A chạm đất với điện trở tại điểm ngắn mạch 0.2Ω . Các kết quả mô phỏng tham số hồ quang máy cắt thể hiện tại Hình 7. Khi ngắn mạch pha A, chỉ máy cắt trên pha A tác động cắt mạch điện nhằm cách ly pha sự cố.



(a) Dòng điện hồ quang

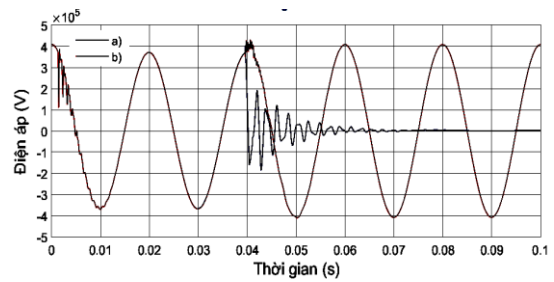


(b) Điện trở hồ quang



(c) Điện áp hồ quang

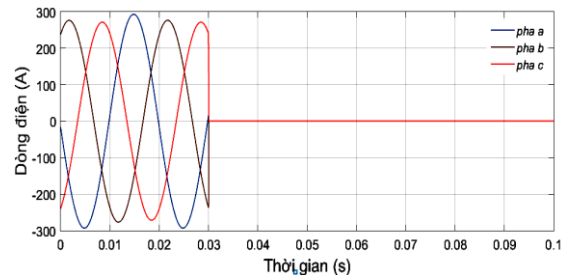
Hình 7. Tham số hồ quang điện



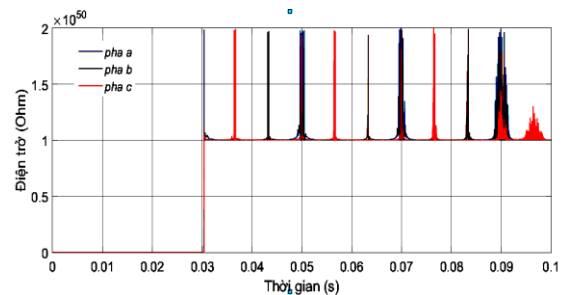
Hình 8. Điện áp đầu cực máy cắt: a) phía đường dây, b) phía nguồn

▪ Trường hợp ngắn mạch ba pha

Kết quả mô phỏng cho thấy, mô hình Cassie kết hợp cùng mô hình Schwarz đã giải quyết bài toán mô phỏng hiện tượng phóng điện hồ quang trong máy cắt cho trường hợp dòng điện lớn và trường hợp dòng điện cận zero.



(a) Dòng điện hồ quang



(b) Điện trở hồ quang

Hình 9. Tham số hồ quang điện

Khi hồ quang phát triển, giá trị điện trở hồ quang theo mô hình Cassie. Trường hợp

điện áp nguồn qua giá trị không (zero), tại các thời điểm đó hồ quang không được cấp năng lượng và quá trình phản ion hóa xảy ra mãnh liệt, giá trị điện trở hồ quang tăng dưới dạng các đỉnh nhọn (Hình 7.b-9.b) theo mô hình Schawraz. Trong quá trình hồ quang lan truyền với giá trị dòng điện lớn, mô hình Cassie cho phép tính toán các giá trị điện trở hồ quang, giá trị hồ quang đạt $10^{50} \Omega$, mô hình Schwarz tính toán cho giá trị điện trở hồ quang tại dòng điện cận zero với các đỉnh nhọn đạt giá trị $2 \times 10^{50} \Omega$.

Sau thời điểm máy cắt tác động, giá trị điện áp đầu cực máy phát phía đường dây có thể làm xuất hiện quá điện áp phục hồi, hồ quang sẽ phát triển trở lại trong trường hợp giá trị điện áp phục hồi lớn hơn điện áp phóng điện chọc thủng của cách điện (Hình 8).

5. KẾT LUẬN

Bài báo sử dụng phương pháp mô hình

mô phỏng hồ quang điện theo phương pháp Cassie và Schwarz cho phép mô hình hóa và mô phỏng các tham số của hồ quang điện.

Mô hình mô phỏng áp dụng cho trường hợp máy cắt đường dây truyền tải gồm ba máy cắt một pha. Kết quả mô phỏng cho thấy các tham số của hồ quang điện trong quá trình phát triển khi máy cắt tác động. Điện trở hồ quang tăng nhanh dưới dạng các đỉnh nhọn khi dòng điện hồ quang tiến tới giá trị cận zero. Mô hình mô phỏng cũng cho phép xác định điện áp giữa hai điện cực máy cắt trong quá trình cắt, từ đó cho phép tính toán giá trị điện áp phục hồi. Việc nghiên cứu hiện tượng hồ quang trong máy cắt cho phép hiểu rõ hơn về bản chất vật lý của hiện tượng, trong đó có ảnh hưởng của các tham số trong mô hình đến sự phát triển của hồ quang, góp phần đề xuất các giải pháp nâng cao độ tin cậy cung cấp điện trên đường dây truyền tải.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. Patel and N. D. Rabara, "Investigation of High Voltage Circuit Breaker by Mathematical Modelling of Arc Behaviour," *IEEE International Power and Renewable Energy Conference*, Karunagappally, India, 2020, pp. 1-6.
- [2] H. Zhang, Z. Wang, M. Li, Y. Yao, J. Li and J. Zhao, "Simulation Analysis of the Breaking Process of 550kV 80kA SF6 Circuit Breaker," *2022 4th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)*, Chengdu, China, 2022, pp. 1-5.
- [3] S Nitu et al. "Comparison between model and experiment in studying the electric arc," *Journal of optoelectronics and advanced materials* 10.5 (2008), pp. 1192–1196.
- [4] Alireza Khakpour et al. "Electrical arc model based on physical parameters and power calculation," *IEEE Transactions On Plasma Science* 43.8 (2015), pp. 2721–2729.

- [5] Toshiya Ohtaka, Viktor Kertész, and Rene Peter Paul Smeets. "Novel black-box arc model validated by high-voltage circuit breaker testing," IEEE Transactions on Power Delivery 33.4 (2017), pp. 1835–1844.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Đặng Việt Hùng tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ tại Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2002 và 2004. Năm 2010 nhận bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện tại Đại học École Centrale de Lyon (Cộng hòa Pháp). Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: chất lượng điện năng, quá điện áp và vật liệu kỹ thuật điện cao áp.



Tác giả Lê Khắc Lâm bảo vệ luận án Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện cao áp tại Đại học Năng lượng Matxcơva (MPEI) - Liên bang Nga năm 2018. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: công nghệ chế tạo máy điện và thiết bị điện, cách điện trong máy điện và hệ thống điện, chống sét cho đường dây và trạm điện.

