

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG GIẢM THỜI GIAN ĐÓNG LẠI MỘT PHA TRÊN ĐƯỜNG DÂY TRUYỀN TẢI BẰNG KHÁNG BÙ NGANG VÀ DAO ĐÓNG CẮT NHANH

SIMULATION INVESTIGATION ON REDUCING SINGLE-PHASE AUTO-RECLOSING TIME ON TRANSMISSION LINES USING SHUNT REACTOR AND HSGS

Đặng Việt Hùng, Lê Khắc Lâm, Nguyễn Phúc Huy

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 14/5/2025, Ngày chấp nhận đăng: 30/5/2025

Tóm tắt:

Bài báo thực hiện mô hình hóa và mô phỏng các giải pháp nhằm giảm thời gian đóng lặp lại của máy cắt tự động đóng lại một pha trên đường dây truyền tải điện 500 kV bằng EMTP-RV. Trong nghiên cứu có sử dụng mô hình hồ quang nhằm thực hiện mô phỏng động hồ quang dựa trên phương pháp cân bằng nhiệt và có tính đến giá trị điện áp đánh thủng U50% của điện môi khí. Hai giải pháp nhằm giảm thời gian tồn tại của hồ quang thứ cấp được nghiên cứu là sử dụng kháng trung tính bù ngang và dao đóng cắt nhanh (HSGS) đặt tại 2 đầu đường dây. Các giải pháp cho phép giảm thời gian đóng lặp lại tương ứng là 0,77 s và 0,2 s; điện áp phục hồi TRV tương ứng là 58,3 kV và 14,8 kV khi sử dụng kháng trung tính và HSGS, đảm bảo đóng lại thành công SPAR. Kết quả mô phỏng với mô hình đề xuất cho phép quan sát quá trình quá độ của dòng điện, điện áp hồ quang thứ cấp khi xảy ra hiện tượng ngắn mạch một pha trên đường dây truyền tải.

Từ khóa: Mô hình động hồ quang; hồ quang thứ cấp; máy cắt tự động đóng lại một pha; dao đóng cắt nhanh; kháng trung tính bù ngang.

Abstract:

This paper focuses on modeling and simulating solutions to reduce the reclosing time of single-phase auto-reclosing (SPAR) circuit breakers on 500 kV transmission lines using EMTP-RV software. The dynamic arc model simulates the phenomenon based on the thermal balance method, incorporating U50% breakdown voltage of long air gap. This study investigates two approaches to reducing secondary arc duration: (1) the employment of a neutral shunt reactor, and (2) the installation of high-speed grounding switches (HSGS) at both ends of the line. The solutions reduce reclosing time to 0.77 s and 0.2 s, with corresponding transient recovery voltages (TRV) of 58.3 kV and 14.8 kV for the neutral shunt reactor and HSGS, respectively, ensuring successful SPAR operation. Simulation results demonstrate that the proposed model allows observation of transient processes of current and voltage of the secondary arc during a single-phase short-circuit on the transmission line.

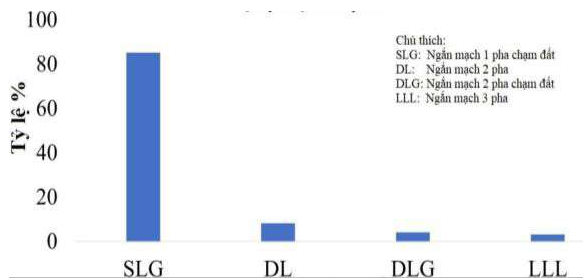
Keywords: Dynamic arc model; Secondary arc; SPAR; HSGS; Neutral Shunt Reactor.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đường dây truyền tải đóng vai trò quan trọng trong truyền tải điện năng. Trong quá trình vận hành, phần lớn sự cố trên đường dây truyền tải

cao áp và siêu cao áp là các sự cố ngắn mạch một pha thoáng qua (Hình 1) [1,2]. Do vậy, nhằm nhanh chóng khôi phục khả năng cung cấp điện, loại bỏ hồ quang và nâng cao độ tin

cây cung cấp điện, các đường dây truyền tải được trang bị thiết bị tự động đóng lại một pha (SPAR). Khi xảy ra ngắn mạch một pha, hồ quang sơ cấp xuất hiện tại điểm sự cố. Sau khi SPAR tác động cắt pha sự cố, xuất hiện hồ quang thứ cấp theo sau hồ quang sơ cấp do hiện tượng tương hỗ điện cảm và điện dung giữa pha lành và pha sự cố.



Hình 1. Tỷ lệ các loại sự cố ngắn mạch trên lưới truyền tải

Trong thực tế, hồ quang thứ cấp sẽ tự tắt. Tuy nhiên, nếu thời gian tồn tại của hồ quang thứ cấp kéo dài sẽ không đảm bảo khả năng đóng lại thành công của SPAR và ảnh hưởng đến sự vận hành ổn định của hệ thống điện. Thời gian tồn tại hồ quang thứ cấp phụ thuộc vào nhiều yếu tố như cấu hình đường dây, vị trí điểm ngắn mạch, trong đó đặc biệt tính đến giá trị của dòng điện hồ quang. Nhằm giảm thời gian đóng lặp lại của SPAR, các đường dây truyền tải thường được lắp đặt khí cụ điện giúp dập tắt nhanh hồ quang thứ cấp trong giới hạn cho phép [3-7]. Hiện nay, có nhiều nghiên cứu về ảnh hưởng của hồ quang điện thứ cấp; tuy nhiên các nghiên cứu sử dụng các mô hình đơn giản, không tính đến mô hình hồ quang và điện áp phóng điện chọc thủng điện môi ($U_{50\%}$) tại điểm sự cố.

Bài báo thực hiện nghiên cứu mô hình hóa và mô phỏng bằng phần mềm EMTP-RV hiện

tượng hồ quang điện thứ cấp trên lưới điện truyền tải 500 kV trong trường hợp xảy ra ngắn mạch một pha chạm đất. Trong đó, nghiên cứu sử dụng mô hình động có tính đến sự lan truyền hồ quang xuất hiện tại điểm ngắn mạch và điện áp đánh thủng $U_{50\%}$, điều này phù hợp với thực tế vận hành của đường dây truyền tải. Nhằm nhanh chóng dập tắt hồ quang điện thứ cấp và giảm thời gian chết của máy cắt (T_{dead}), đảm bảo độ tin cậy cung cấp, bài báo thực hiện mô phỏng hai giải pháp được sử dụng có hiệu quả hiện nay là lắp đặt kháng bù ngang và HSGS, trong đó thực hiện mô hình hóa và tính toán các thông số của kháng bù ngang, thời gian tác động của HSGS, nghiên cứu ảnh hưởng khi áp dụng các giải pháp trên đến tham dòng điện, điện áp phục hồi và thời gian tồn tại của hồ quang thứ cấp.

2. MÔ HÌNH HỒ QUANG CÓ XÉT ĐẾN ĐIỆN ÁP ĐÁNH THỦNG

2.1. Mô hình hồ quang

Mô hình hồ quang mô phỏng trong nghiên cứu sử dụng mô hình động được biểu diễn bằng phương trình Cassie của điện dẫn hồ quang như sau [8,9]:

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

$$g(t) = \int \frac{1}{\tau}(G - g)dt \quad (2)$$

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:

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

Trong đó:

i_{arc} : dòng điện hồ quang (A);

u_0 : điện áp hồ quang (V/m);

r_0 : điện trở hồ quang (Ω/m).

Phương trình (1,2) 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. Mối quan hệ giữa hằng số hồ quang và chiều dài l_{arc} được thể hiện theo phương trình sau:

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

Trong đó:

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

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

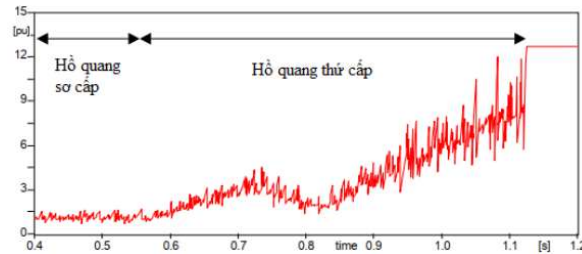
α : hệ số (từ -0,1 đến -0,6).

Tốc độ phát triển hồ quang một phần được quyết định bởi điện dẫn bên trong dòng plasma, hồ quang tắt khi xảy ra sự mất cân bằng về nhiệt trong bản thân hồ quang, điều kiện hồ quang tắt như sau [7]:

$$\begin{cases} g < g_{min} \\ \frac{dr_{arc}}{dt} > \left(\frac{dr_{arc}}{dt} \right)_{min} \end{cases} \quad (5)$$

Chiều dài hồ quang $l_{arc}(t)$ là một trong các 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

môi trường, thường khó để tính toán và định lượng một cách chính xác. Tuy nhiên, các mô hình thường cho phép đánh giá hồ quang trong trường hợp kịch bản nguy hiểm nhất. Hình 2 mô tả kết quả thực nghiệm sự thay đổi của $l_{arc}(t)$ trong trường hợp mô phỏng lưới điện có điện áp 400 kV, dài 230 km [7].



Hình 2. Mối quan hệ giữa chiều dài hồ quang theo thời gian

2.2. Điện áp đánh thủng cách điện

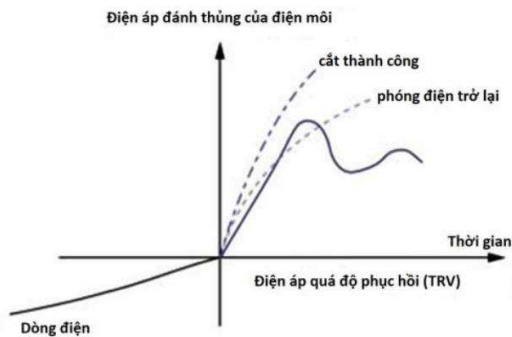
Hồ quang điện thứ cấp xảy ra trong môi trường cách điện không khí dưới điện áp tần số công nghiệp. Giá trị điện áp phóng điện nhỏ nhất xảy ra trong trường hợp điện trường không đồng nhất có dạng điện cực trụ - mặt phẳng (rod-plane). Điện áp phóng điện chọc thủng 50% được tính theo phương trình sau, áp dụng cho trường hợp khoảng cách giữa các điện cực $d < 3$ m [10].

$$U_{50RP} = 750\sqrt{2} \ln(1 + 0,55d^{1,2}) \quad (6)$$

Giá trị đỉnh của U_{50RP} điện áp tần số công nghiệp thường có giá trị cao hơn 20-30% so với trường hợp điện áp xung xảy ra do đóng cắt khi điện cực dương. Điện áp xảy ra phóng điện có thể xác định bằng 90% điện áp U_{50RP} . Ảnh hưởng của hình dáng điện cực dưới điện áp tần số lưới nhỏ hơn so với trường hợp điện áp xung. Khi điện cực lớn hơn 2 m, giá trị điện áp phóng điện 50% có thể được tính toán qua công thức:

$$U_{50\%} = U_{50RP}(1,35K - 0,35K^2) \quad (7)$$

Với K là hệ số hình dạng (giá trị trong khoảng 1,36-1,58).



Hình 3. Mối quan hệ giữa TRV và điện áp cách điện

Giá trị điện áp $U_{50\%}$ được so sánh với điện áp phục hồi TRV nhằm xem xét trường hợp xảy ra phóng điện trở lại, trong đó TRV là điện áp quá độ phục hồi tại vị trí sự cố sau khi hồ quang thứ cấp tắt và trước khi máy cắt đóng lặp lại, trường hợp xảy ra phóng điện trở lại tại điểm sự cố khi $U_{TRV} > U_{50\%}$ (Hình 3)

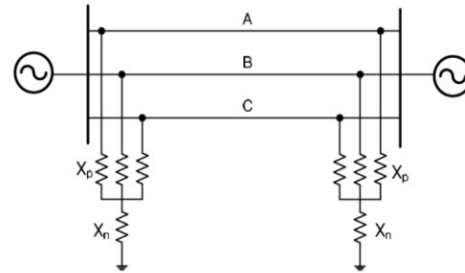
3. GIẢI PHÁP GIẢM HỒ QUANG THỨ CẤP

Để nâng cao độ tin cậy cung cấp điện, cần giảm thời gian tự động đóng lại một pha (T_{dead}) của SPAR. Thời gian tồn tại hồ quang thứ cấp ảnh hưởng lớn đến khả năng đóng lại thành công của SPAR. Trong thực tế, để giảm T_{dead} cần nhanh chóng triệt tiêu điện dung hồ cảm giữa pha lành và pha sự cố. Bài báo trình bày mô phỏng 02 giải pháp sử dụng kháng trung tính bù ngang và HSGS lắp đặt tại 2 đầu đường dây nhằm làm giảm thời gian tồn tại hồ quang thứ cấp.

- Sử dụng kháng trung tính bù ngang

Trong thực tế, đường dây truyền tải được lắp đặt kháng bù ngang nhằm giảm điện áp thanh cái trong trường hợp đường dây non tải, kháng

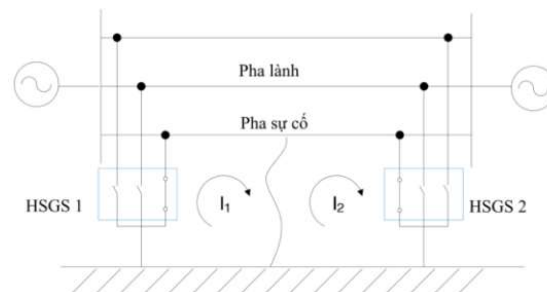
trung tính có vai trò dập hồ quang khi xảy ra ngắn mạch 1 pha và hạn chế hồ quang thứ cấp (Hình 4).



Hình 4. Kháng trung tính bù ngang trên đường dây

- Sử dụng HSGS

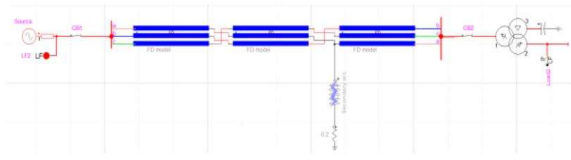
HSGS cho phép nhanh chóng dập tắt hồ quang thứ cấp do HSGS có tổng trở nhỏ hơn tổng trở của hồ quang, cho phép tạo đường dẫn cho dòng điện hồ quang, tuy nhiên giải pháp này trong thực tế còn hạn chế do chi phí cao, phối hợp bảo vệ phức tạp. HSGS được sử dụng phù hợp trong trường hợp đường dây không lắp đặt kháng bù ngang hoặc yêu cầu thời gian dập tắt hồ quang thứ cấp trong thời xác định (Hình 5).



Hình 5. HSGS trên đường dây

4. MÔ HÌNH MÔ PHỎNG

Lưới điện mô phỏng gồm đoạn đường dây 500 kV dài 480 km, sử dụng mô hình đường dây phụ thuộc tần số FD (Frequency Dependence). Máy biến áp 500/22/35 kV có công suất 450 MVA, phụ tải 3 pha công suất $P=300$ MW, $Q=60$ MVar (Hình 6).



Hình 6. Mô hình lưới điện mô phỏng

Mô hình hồ quang tại điểm sự cố:

Sử dụng mô hình Cassie trong nghiên cứu quá trình lan truyền của hồ quang với các thông số như sau:

$$\alpha = -0,5$$

$$\tau_0 = 1e-06 \text{ (s)}$$

$$l_0 = 0,5; \text{ (meter)} = 1 \text{ pu}$$

$$U_0 = 900 \text{ (V/m)}$$

$$R_0 = 22e-3 \text{ (}\Omega\text{)}$$

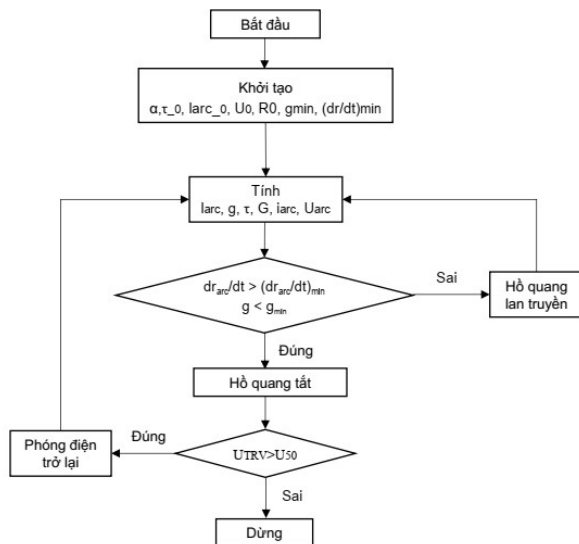
$$t_{trip} = 10e-3 \text{ (s): thời điểm sự cố.}$$

$$g_{min} = 50e-6$$

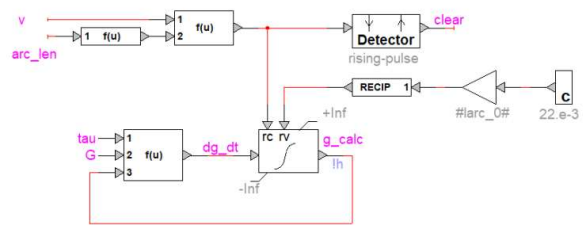
$$(dr/dt)_{min} = 20e6$$

Giá trị điện trở tại điểm ngắn mạch bằng 0,2(Ω).

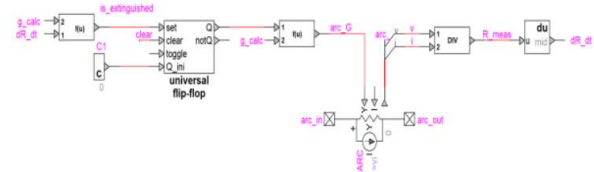
Sơ đồ khối thuật toán thể hiện quá trình tính toán mô hình hồ quang như Hình 7.



Hình 7. Sơ đồ khối thuật toán tính toán quá trình lan truyền hồ quang



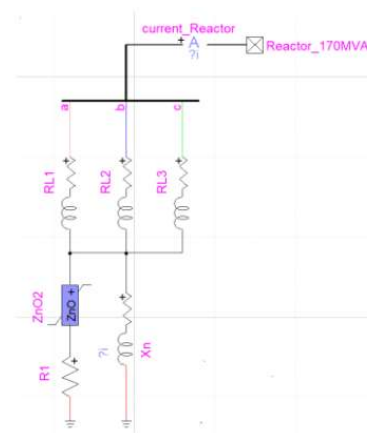
Hình 8. Mô hình tính điện dẫn hồ quang và điện áp U50%



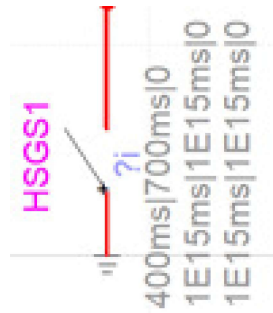
Hình 9. Mô hình tính toán quá trình lan truyền của hồ quang

- Mô hình kháng bù ngang và HSGS

Kháng trung tính, điện trở trung tính nhằm làm giảm dòng điện hồ quang thứ cấp, đảm bảo đóng lại lặp lại thành công. Mô hình mô phỏng kháng trung tính như Hình 10. Công suất kháng bù ngang được lựa chọn với công suất bù bằng 70% công suất phản kháng của đường dây, gồm 2 kháng bù ngang có công suất 170 MVar đặt tại 2 đầu đường dây, giá trị điện kháng của từng kháng bù ngang và điện kháng trung tính tương ứng bằng $X_L = 1436,78 \text{ (}\Omega\text{)}$, $X_n = 1149,43 \text{ (}\Omega\text{)}$.



Hình 10. Mô hình kháng trung tính



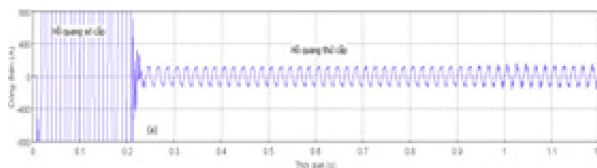
Hình 11. Mô hình HSGS

5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Xét trường hợp xảy ra ngắn mạch một pha chạm đất trên đường dây tại pha A ở thời điểm 0,1 s, vị trí xảy ra ngắn mạch bằng 2/3 khoảng cách về phía nguồn (Hình 6). SPAR tại 2 đầu đường dây tác động cắt pha sự cố A tại thời điểm 0,12 s.

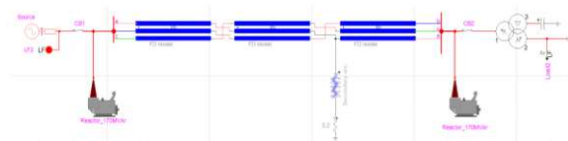
- Trường hợp không sử dụng thiết bị hạn chế hồ quang thứ cấp

Từ kết quả mô phỏng Hình 12 thấy rằng trường hợp không sử dụng thiết bị hạn chế dòng điện hồ quang thứ cấp, khi xảy ra ngắn mạch dòng điện cực đại hồ quang thứ cấp đạt giá trị 160 A, tồn tại trong khoảng thời gian lớn hơn 1,0 s. Do hồ quang chưa tắt, không đảm bảo đóng lại thành công SPAR trước thời điểm trên.



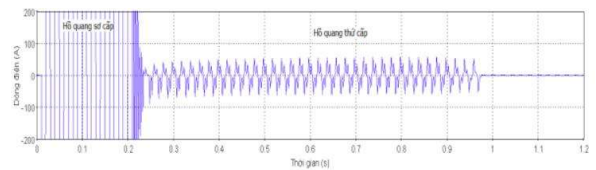
Hình 12. Dòng điện hồ quang

- Trường hợp sử dụng kháng trung tính bù ngang:

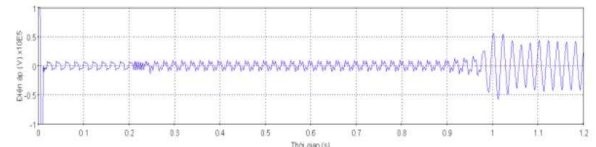


Hình 13. Trường hợp sử dụng kháng bù ngang

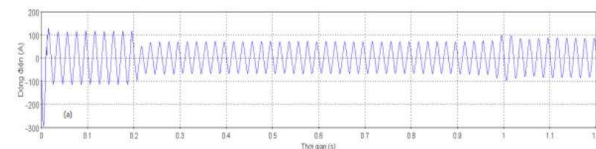
Trong trường hợp sử dụng kháng trung tính bù ngang đặt tại 2 đầu đường dây (Hình 13), giá trị dòng điện hồ quang thứ cấp đạt đỉnh 50 A, hồ quang tắt tại thời điểm 0,97 s. Giá trị điện áp phục hồi TRV tại điểm sự cố đạt 58,3 kV, đảm bảo nhỏ hơn $U_{50\%}$ và không xảy ra phóng điện trở lại (Hình 14, 15). SPAR đóng trở lại thành công sau 0,77 s. Dòng điện qua cuộn kháng tại pha sự cố và kháng trung tính tương ứng đạt giá trị 70,8 A và 77,75 A trong thời gian xuất hiện hồ quang thứ cấp (Hình 16).



Hình 14. Dòng điện hồ quang (có kháng)

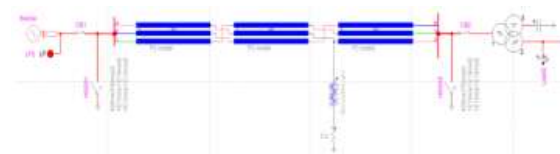


Hình 15. Điện áp hồ quang (có kháng)



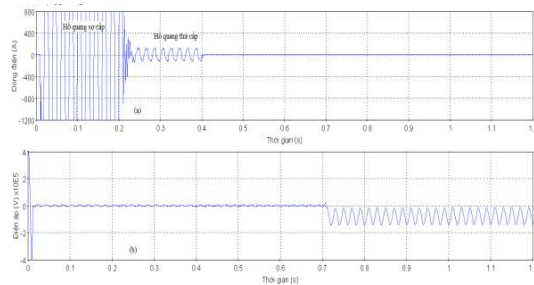
Hình 16. Dòng điện qua cuộn kháng bù ngang (a) và kháng trung tính (b) của pha A

- Trường hợp sử dụng HSGS:

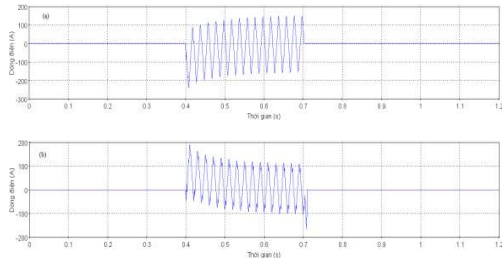


Hình 17. Trường hợp sử dụng HSGS

HSGS được sử dụng tại 2 đầu đường dây tác động đóng tại thời điểm 0,4 s nhằm đảm bảo SPAR đã mở hoàn toàn khi đóng HSGS (Hình 17).



Hình 18. Dòng điện hồ quang (a) và điện áp hồ quang (b) (có HSGS)



Hình 19. Dòng điện HSGS pha A phía nguồn (a) và phía tải (b)

6. KẾT LUẬN

Bài báo sử dụng phương pháp mô hình mô phỏng lưới điện truyền tải 500 kV trong trường hợp xảy ra ngắn mạch một pha chạm đất, SPAR tác động cắt pha sự cố và xuất hiện hồ quang thứ cấp bằng EMTP-RV. Mô hình hồ quang điện được mô tả theo phương trình Cassie, trong đó cho phép tính đến các tham số hồ quang trong quá trình lan truyền. Trường hợp không sử dụng thiết bị hạn chế hồ quang kết quả cho thấy dòng điện hồ quang thứ cấp tồn tại với thời gian và biên độ lớn, không đảm bảo lại thành công SPAR. Nghiên cứu sử dụng 02 giải pháp là kháng trung tính bù ngang và

HSGS nhằm nhanh chóng dập tắt dòng điện hồ quang thứ cấp (Bảng 1), kết quả cho thấy hiệu quả của 2 giải pháp trên trong kịch bản mô phỏng.

Bảng 1. Thời gian tồn tại hồ quang thứ cấp và điện áp TRV

Giải pháp	t_{arc} (s)	U_{TRV} (kV)
Kháng bù ngang	0,77	58,3
HSGS	0,2	14,8

Tại Việt Nam, lưới điện truyền tải được lắp đặt kháng bù ngang nhằm giúp ổn định điện áp trên đường dây, việc kết hợp kháng bù ngang và kháng trung tính giúp giảm thời gian đóng lặp lại và tận dụng trạm, kháng bù ngang sẵn có. Trong trường hợp các đường dây không yêu cầu bù công suất phản kháng hoặc các đường dây ngắn không có kháng bù ngang việc xem xét lắp đặt HSGS là giải pháp phù hợp hơn; tuy nhiên, cần có các nghiên cứu đánh giá chi tiết về ảnh hưởng của các điều kiện khác của đường dây khi trang bị HSGS.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả cảm ơn công ty PGSTech đã tài trợ phần mềm EMTP-RV 4.2 để thực hiện nghiên cứu này.

Bài báo này là kết quả nghiên cứu Đề tài NKCH cấp Trường Đại học Điện lực năm 2024, mã số ĐTKHCN.01/2024.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Mehdi, C. -H. Kim, A. Hussain, J. -S. Kim and S. J. U. Hassan, "A Comprehensive Review of Auto-Reclosing Schemes in AC, DC, and Hybrid (AC/DC) Transmission Lines," in IEEE Access, vol. 9, pp. 74325-74342, 2021.
- [2]. Baihe Su et al. "Investigation of Arcing Time Prediction for Secondary Arc Based on Statistical Theory and Multivariable Regression Algorithms", Mathematical Problems in Engineering, Volume 2022.

- [3]. Seung-Hyun Sohn, & al. "Analysis of Secondary Arc Extinction Effects according to the Application of Shunt Reactor and High Speed Grounding Switches in Transmission Systems". Journal of International Council on Electrical Engineering, 4(4), 324–329, 2014.
- [4]. Toshiba Corporation. On behalf of CIGRE WG A3.22/28. "IEEE Transactions on Magnetics", IEEE PES switchgear committee. Fall meeting, San Diego, 2012.
- [5]. P. Mestas, & M. C. Tavares. "Neutral Reactor Optimization in order to Reduce Arc Extinction Time during Three-Phase Tripping". International Conference on Power Systems Transients, Croatia, June 15-18, 2015.
- [6]. Zhang Xu, Yan Xiaoqing, & Xu Zhenyu. "HSGS Investigation for Limiting the Secondary Arc on UHV Parallel Lines". The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling, 2012.
- [7]. M. Ratajczyk, et al. "Secondary arc extinction in AC/DC overhead lines". CSE N°25, 2022.
- [8]. L. Prikler, M. Kizilcay, G. Bán, P. Handl, "Improved secondary arc models based on identification of arc parameters from staged fault test records", presented at the 14th Power System Computation Conf., Sevilla, Spain, June 2002.
- [9]. M. Kizilcay, T. Pniok, "Digital Simulation of Fault Arcs in Power Systems", ETEP Journal, vol. 1, no. 1, pp. 55-60, 1991.
- [10]. IS/IEC 60071-2 (1996): Insulation Co-ordination, Part 2.

Giới thiệu tác giả:



Đặng Việt Hùng nhận bằng Tiến sĩ Kỹ thuật điện tại École Centrale de Lyon (CH Pháp) năm 2010. Tác giả hiện đang giảng dạy tại Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính: Chất lượng điện năng, vật liệu cách điện cao áp, quá điện áp.



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

Lĩnh vực nghiên cứu chính: 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.



Nguyễn Phúc Huy tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2003 và 2010. Nhận bằng Tiến sĩ ngành hệ thống điện và tự động hóa hệ thống điện tại Trường Đại học Điện lực Hoa Bắc, Bắc Kinh, Trung Quốc năm 2015. Lĩnh vực nghiên cứu: chất lượng điện năng, lưới điện phân phối thông minh, ứng dụng điện tử công suất, độ tin cậy của hệ thống điện