

NGHIÊN CỨU HIỆN TƯỢNG ĐÁNH THỦNG CÁCH ĐIỆN KHÔNG KHÍ DÀI Ở CHUỖI CÁCH ĐIỆN 500 KV DO SÉT

STUDY OF LONG AIR INSULATION BREAKDOWN IN 500 KV INSULATOR STRING DUE TO LIGHTNING

Lê Khắc Lâm, Đặng Việt Hùng

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 30/10/2024, Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2024, Phản biện: TS. Nguyễn Hữu Kiên

Tóm tắt:

Bài báo trình bày những kết quả mô phỏng đánh thủng cách điện không khí giữa 2 điện cực của chuỗi cách điện trên đường dây 500kV dưới tác động của điện áp xung sét bằng phần mềm EMTP. Các xung sét có hình dạng, biên độ khác nhau đánh ở các vị trí khác nhau vào dây dẫn trên khoảng cột 600 m đã được xem xét.

Kết quả mô phỏng cho thấy trị số điện áp đánh thủng cách điện không khí giữa hai điện cực của chuỗi cách điện phụ thuộc phi tuyến vào hình dạng xung sét cũng như vị trí đánh trên khoảng cột 600 m, đặc biệt với những xung sét có độ dốc sườn trước lớn. Điều này cần lưu ý khi tính toán khoảng vượt đường dây tránh phóng điện giữa 2 đầu chuỗi cách điện khi trị số quá điện áp ở mức thấp. Từ kết quả mô phỏng, rút ra được biểu thức thể hiện quan hệ phụ thuộc giữa điện áp đánh thủng và khoảng cách 2 điện cực của chuỗi cách điện.

Từ khóa:

Khoảng cách không khí dài, chuỗi cách điện 500 kV, xung sét, EMTP.

Abstract:

This study presents the simulation results of air insulation breakdown between two electrodes of the insulator string on a 500 kV line under the impact of lightning impulse voltage using EMTP software. Lightning impulses with different shapes and amplitudes striking at different positions on the conductor on a 600 m pole were considered.

The simulation results show that the value of air insulation breakdown voltage between two electrodes of the insulator string depends nonlinearly on the lightning impulse shape as well as the strike position on a 600 m pole, especially with lightning impulses with large front slopes. This should be noted when calculating the line clearance to avoid discharge between the two ends of the insulator string when the internal overvoltage is low. From the simulation results, the expression showing the dependence relationship between the breakdown voltage and the distance between the two electrodes of the insulator string has been given.

Keywords:

Long air gap, 500 kV insulator string, lightning impulse, EMTP.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện tượng đánh thủng cách điện không khí dưới tác động của sét trên đường dây truyền tải luôn là mối quan tâm của các nhà khoa học với nhiều kết quả nghiên cứu đã được báo cáo [1-6]. Những hiểu biết về hiện tượng xảy ra đối với cách điện không khí dài dưới tác động của xung sét tiêu chuẩn thường không đủ để dự đoán kết quả của các xung điện áp sét có hình dạng khác thường gây ra trên hệ thống truyền tải trong thực tế. Do vậy, cần nhiều thời gian để làm rõ các đặc tính phóng điện bằng thực nghiệm đối với các xung điện áp với mọi hình dạng có thể xảy ra trong tự nhiên.

Tuy nhiên, do điện áp xung sét trong tự nhiên lớn đến mức các máy phát xung hiện có khó có thể tái tạo được, cho nên nhiều nghiên cứu được thực hiện nhằm đưa ra mô hình tính toán lý thuyết thay vì thực nghiệm [3,7]. Phần mềm EMTP là một công cụ mô phỏng rất mạnh, đã được công nhận và sử dụng rộng rãi trên thế giới từ những thập niên cuối của thế kỷ XX cho phép thực hiện mô phỏng cách điện không khí dài và các xung điện áp sét lớn có hình dạng khác nhau.

Đường dây 500kV có vai trò huyết mạch trong hệ thống điện Việt Nam (Hình 1). Do đó, nghiên cứu các hiện tượng xảy ra trên đường dây, trong đó có hiện tượng phóng điện ở chuỗi cách điện, để đảm bảo vận hành an toàn và hiệu quả, luôn là một vấn đề rất bức thiết. Mục đích của nghiên cứu là áp dụng các mô hình trong EMTP để xem xét hiện tượng phóng điện trên chuỗi cách điện

trên cột 500 kV dưới tác động của các xung sét có điện áp và hình dạng khác nhau.



Hình 1. Cột điện đường dây 500 kV

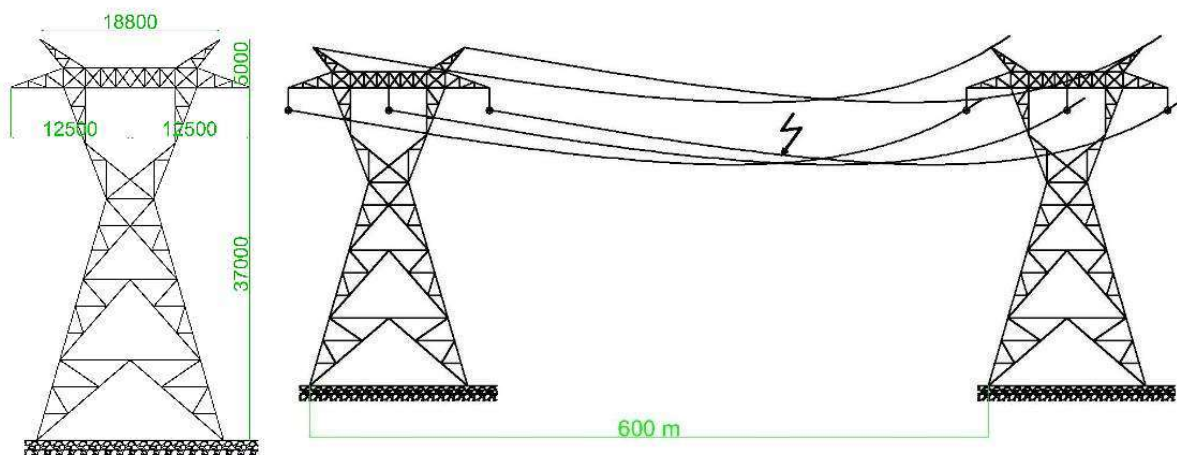
2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG HOẠT ĐỘNG CỦA CHUỖI CÁCH ĐIỆN DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA XUNG SÉT

a) Cột điện

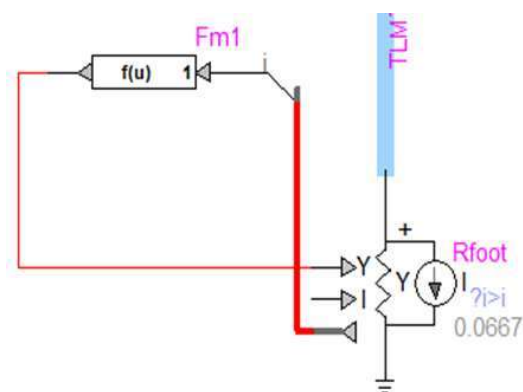
Mô hình cột điện sử dụng trong mô phỏng là mô hình đường truyền không phụ thuộc vào tần số - CPDL (Constant Parameter Distributed Line) của IEEE [8]. Trong mô hình này, các tham số của mô hình được tính toán ở một tần số nhất định. Ưu điểm chính của việc sử dụng mô hình này là tốc độ tính toán nhanh phù hợp với những hệ thống máy tính cấu hình thấp.

b) Tiếp địa

Bài báo này sử dụng mô hình điện trở tiếp địa chân cột có trị số phụ thuộc dòng thoát sét (Hình 3). Cụ thể, điện trở tiếp địa chân cột được mô phỏng bằng mô hình điện trở phi tuyến, theo đó trị số điện dẫn thay đổi phụ thuộc sự biến thiên của dòng điện thoát sét.



Hình 2. Hình minh họa cột điện 500kV



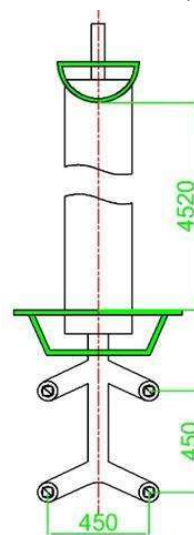
Hình 3. Mô hình tiếp địa chân cột

c) Dây dẫn

Dây pha và chuỗi cách điện được treo trên xà có độ cao 37m của cột điện cao 42m (Hình 2). Điểm treo chuỗi cách điện được xem xét nằm cách trục chính giữa của cột 12,5m. Hai dây chống sét nằm ở 2 vị trí đối xứng nhau ở độ cao 42m và cách nhau 18,8m.

Công suất 1 pha được truyền tải bằng 4 dây nhôm ACSR 330/42 có đường kính dây 24,84

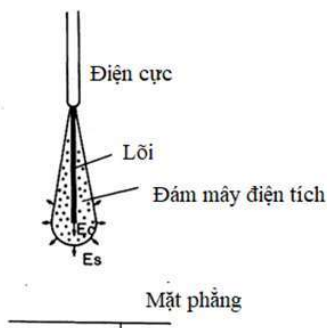
mm, điện trở suất 1 chiều là $0,08989\Omega/\text{km}$. Các dây của 1 pha nằm ở 4 góc của hình vuông có kích thước $0,45 \times 0,45\text{m}$ (Hình 4).



Hình 4. Hình minh họa chuỗi cách điện đường dây

Các dây dẫn được mô phỏng bằng mô hình phụ thuộc tần số (Frequency Dependent - FD). Không giống như mô hình đường dây dạng tham số hằng số (Constant Parameter - CP),

mô hình FD có tính đến sự phụ thuộc tần số của điện trở nối tiếp và độ tự cảm của dây dẫn trên một đơn vị chiều dài. Do vậy, nhìn chung mô hình này chính xác hơn mô hình CP. Trong mô hình dây dẫn sử dụng dây FD thể hiện cho dây pha. Điện áp chuỗi cách điện được xem xét nằm trên pha biên và được đo bởi Vôn-kế m².

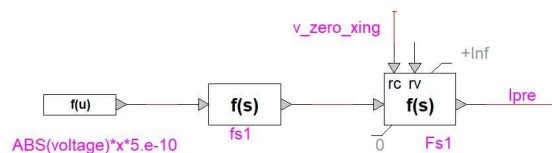


Hình 5. Mô hình phóng điện leader [1]

d) Mô hình chuỗi cách điện

Để mô phỏng hiện tượng xảy ra trên chuỗi cách điện khi đường dây chịu tác động của dòng điện sét, bài báo sử dụng phương pháp mô hình mô phỏng được đề xuất bởi Shindo và Suzuki [1], trong đó có tính đến sự phát triển

và lan truyền của dòng điện hồ quang (leader) theo đặc tính Vôn – giây áp dụng cho trường hợp điện cực có chiều dài lớn (vài mét) (Hình 5, 6). Bài báo sử dụng mô hình điện cực trụ – mặt phẳng.



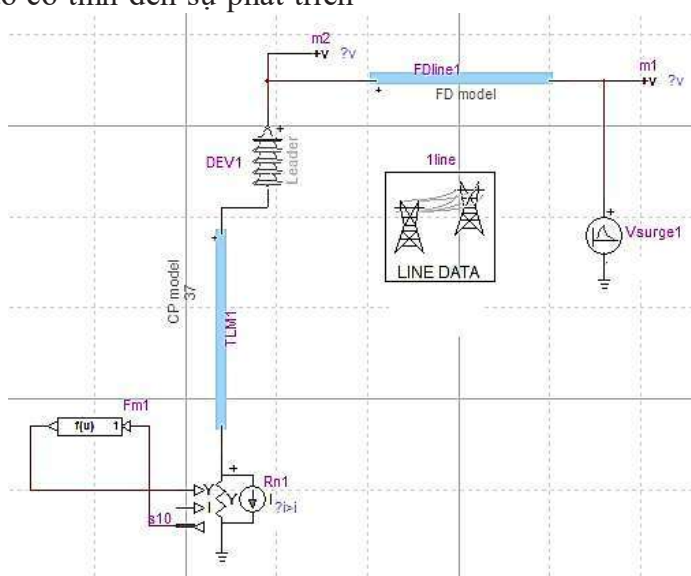
Hình 6. Mô hình mô phỏng tính toán dòng điện [9]

Trong mô hình, cường độ điện trường đầu cực phóng điện E là tổng của E_c và E_s (Hình 5). Với E_c là cường độ điện trường trong trung tâm leader được tính theo:

$$E_c = k.V/(D - x) \quad (1)$$

E_s là cường độ điện trường corona được xác định theo:

$$E_s \sim (i/(D - x)) \cdot (x/D) \quad (2)$$



Hình 7. Mô hình mô phỏng chuỗi cách điện dưới tác động của xung sét

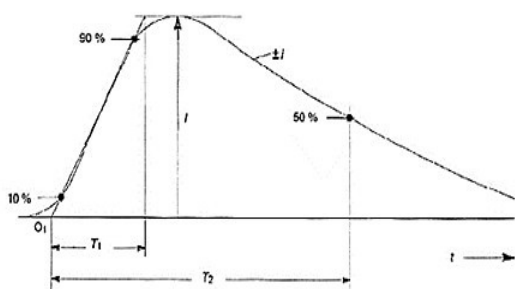
Với V , i , D , x tương ứng là điện áp đặt, dòng điện phóng điện, chiều dài chuỗi cách điện và chiều dài phóng điện.

3. MÔ PHỎNG CÁC TÌNH HUỐNG SÉT ĐÁNH LÊN DÂY DẪN VÀ KẾT QUẢ THU ĐƯỢC

Nghiên cứu sẽ xem xét đến mối quan hệ giữa điện áp 2 đầu điện cực của chuỗi cách điện với vị trí tương đối của xung sét và hình dạng, biên độ điện áp xung sét trong phạm vi 1 khoảng cột 600m.

Nhằm đơn giản hoá mô hình mô phỏng và đánh giá trực tiếp mức điện áp đánh thủng trên chuỗi cách điện, bài báo này chỉ xem xét trường hợp xung sét đánh thẳng vào dây pha. Ở 2 đầu khoảng vượt, do 2 chuỗi cách điện có vai trò như nhau nên chỉ thực hiện đo lường điện áp trên 1 chuỗi.

Để đánh giá sự phụ thuộc điện áp phóng điện vào hình dạng, trong bài báo này xem xét các xung sét được đề cập trong các tiêu chuẩn kỹ thuật [10-12] có thời gian sườn trước T_1 (μs) và thời gian đến một nửa giá trị T_2 (μs) tương ứng là: 10/350, 8/200, 1/200, 0,25/100.



Hình 8. Hình dạng xung sét

Nguồn điện áp xung sét biến thiên theo công thức:

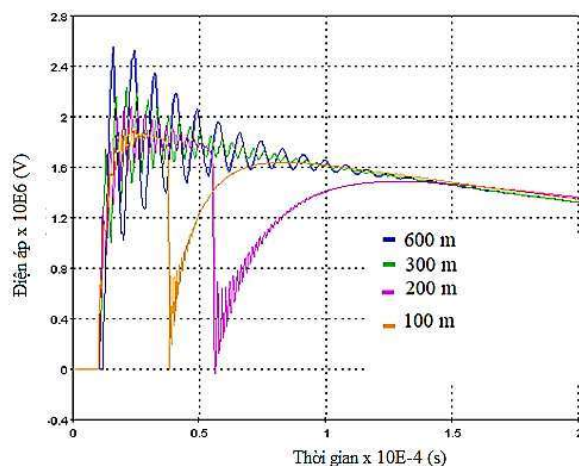
$$V(t) = V_m \cdot [e^{\alpha \cdot t} - e^{\beta \cdot t}] \quad (3)$$

Trong đó: V_m là biên độ điện áp; α và β là các hệ số. Thay đổi các hệ số α và β sẽ thu được các xung sét có hình dạng khác nhau.

3.1. Mô phỏng khi sét đánh vào khoảng vượt ở các vị trí khác nhau trên dây dẫn

Sử dụng xung sét 10/350 μs đánh vào các vị trí trên dây pha với khoảng cách 600m, 300m, 200m, 100m đến cột.

Khoảng cách cách điện không khí dài theo Hình 4 là 4520 mm.



Hình 9. Điện áp đo được ở chuỗi cách điện khi xung sét 1925kV 10/350 μs đánh trúng ở 4 vị trí khác nhau lần lượt là 600m, 300m, 200m, 100m cách điểm treo chuỗi cách điện

– Kết quả mô phỏng cho thấy :

– Đồ thị điện áp giữa 2 đầu cực chuỗi cách điện phản ánh đúng bản chất của hiện tượng

đánh thủng cách điện không khí. Khi xảy ra phóng điện, điện áp sụt giảm đột ngột. Do cách điện không khí sau khi bị đánh thủng có khả năng hồi phục, nên hồ quang bị tắt và điện áp giữa 2 đầu cực lại tăng lên.

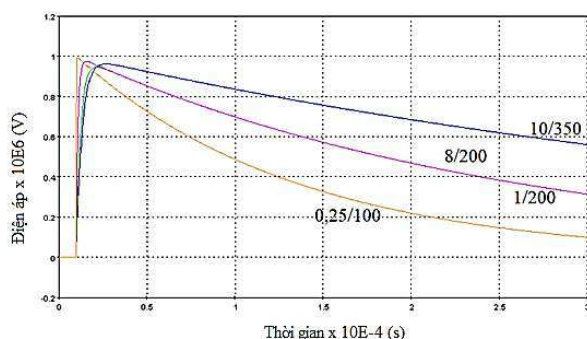
– Vị trí của xung sét càng gần điểm treo chuỗi cách điện, biên độ dao động điện áp đo được ở 2 đầu điện cực chuỗi cách điện càng giảm tuy nhiên tần số dao động lại càng tăng.

Với biên độ điện áp xung sét 1925kV, ở khoảng cách 600m đến chuỗi cách điện, điện áp đo được tại 2 đầu cực chuỗi cách điện dao động và đạt biên độ đến 2550kV nhưng không xảy ra đánh thủng cách điện không khí. Tuy nhiên, khi điểm đánh của sét nằm ở khoảng cách 200 m thì xảy ra đánh thủng điện môi không khí giữa 2 điện cực của chuỗi cách điện. Khoảng cách từ điểm đặt của xung sét càng gần thì không khí bị đánh thủng càng nhanh (Hình 9) dù biên độ dao động điện áp thấp hơn.

Trong nội dung mô phỏng tiếp theo sẽ khảo sát làm rõ thêm mối quan hệ giữa khoảng cách từ điểm đánh của sét trên dây dẫn đến chuỗi cách điện và điện áp xung sét đánh thủng.

3.2. Mô phỏng khi xung sét có hình dạng khác nhau đánh vào dây dẫn trong khoảng vượt

Trong nội dung này xem xét ảnh hưởng của điện áp 2 đầu chuỗi cách điện khi xung sét có cùng biên độ, cùng điểm đánh nhưng hình dạng khác nhau như đã trình bày ở trên gồm 4 dạng: 10/350, 8/200, 1/200, 0,25/100 (μs) (Hình 10).



Hình 10. Hình dạng 4 xung sét trong mô phỏng

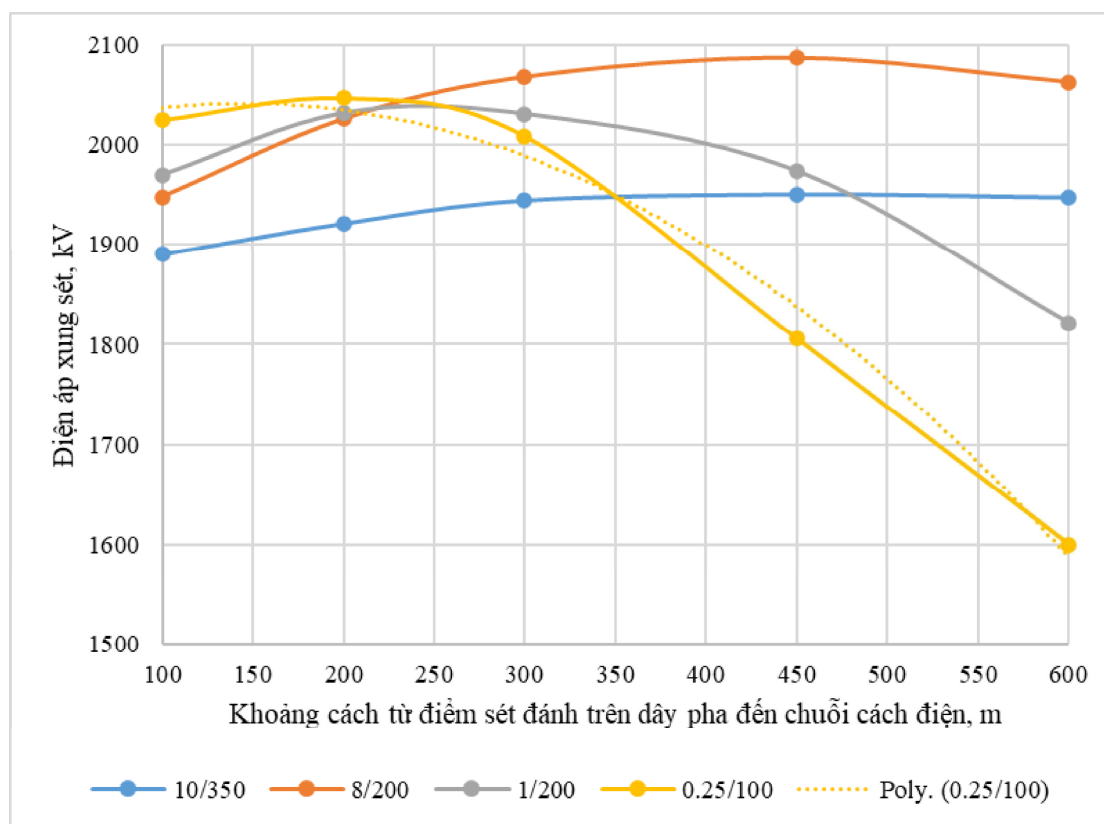
Sau khi chạy mô hình, kết quả được thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị điện áp đánh thủng của các xung sét với hình dạng khác nhau tại các vị trí đánh trên dây dẫn (Đơn vị: kV)

Xung sét	10/350 μs	8/200 μs	1/200 μs	0,25/100 μs
100 m	1890	1948	1970	2025
200 m	1921	2026	2032	2047
300 m	1944	2068	2031	2009
450 m	1950	2087	1974	1806
600 m	1947	2063	1822	1600

Từ kết quả trên, biểu diễn bằng đồ thị ta thu được như Hình 11.

Từ đồ thị ở Hình 11 nhận thấy, điện áp đánh thủng U_{pd} (kV) của các xung sét phụ thuộc không tuyến tính vào khoảng cách L (m) tính từ điểm sét đánh đến vị trí treo chuỗi cách điện. Với các xung sét mà độ dốc đầu sóng lớn thì trị số điện áp đánh thủng U_{pd} (kV) giảm mạnh ở khoảng cách L (m) lớn, cụ thể trong nghiên cứu này là từ 300m đến 600m theo công thức gần đúng:



Hình 11. Đồ thị thể hiện mối quan hệ giữa khoảng cách từ điểm sét đánh trên dây pha đến chuỗi cách điện và điện áp xung sét đánh thủng

$$U_{pd} = -0,0022 \cdot L^2 + 0,6382 \cdot L + 1995 \quad (4)$$

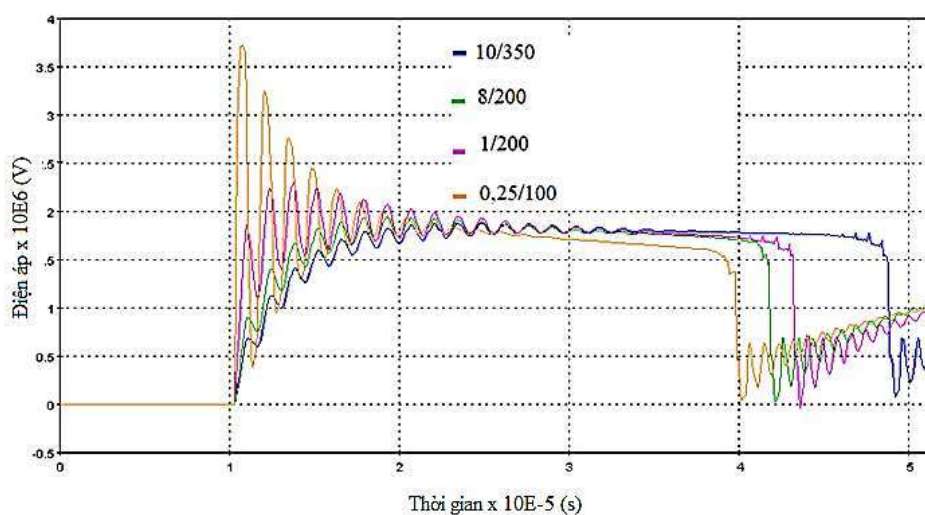
Ngược lại, với các xung sét độ dốc đầu sóng bé thì trị số điện áp xung sét đánh thủng tương đối ổn định. Điều này cần lưu ý khi tính toán, thiết kế khoảng vượt đường dây vì với khoảng vượt lớn, điện áp đánh thủng giảm đến mức có thể dẫn đến phóng điện giữa 2 đầu cực chuỗi cách điện ngay cả khi xảy ra quá điện áp ở mức thấp.

3.3. Thảo luận

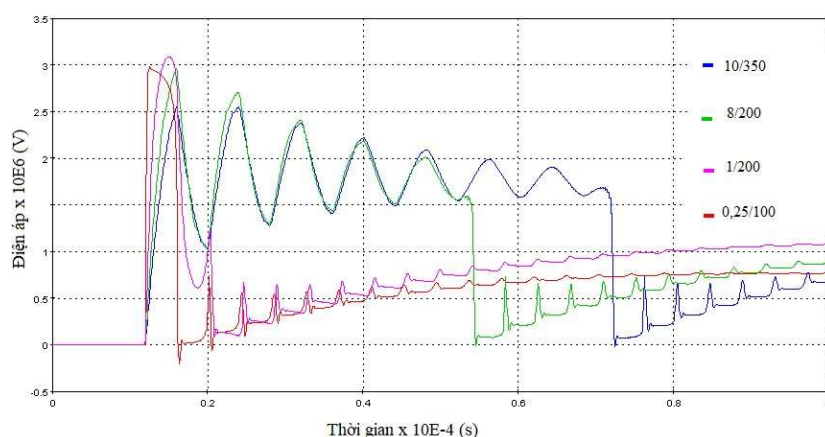
Từ kết quả thu được ở trên, có thể đưa ra một số nhận xét như sau:

– Khi bị sét đánh trúng, điện áp giữa 2 cực của chuỗi cách điện có sự dao động do chịu ảnh hưởng của các thông số độ tự cảm L và điện dung C giữa các dây dẫn nói chung và của bản thân dây dẫn nói riêng, dẫn đến sự dao động điện áp vượt quá biên độ điện áp xung sét. Hiện tượng này đã được quan sát, thể hiện trong nghiên cứu của các nhà khoa học Nhật bản [13] và được giải thích bằng sự khác biệt về đặc tính tổng trở trong hệ thống phụ thuộc hình dạng của xung sét.

– Khi xem xét chi tiết hơn ở 2 vị trí sét đánh là 100m và 600m cách chuỗi cách điện cho thấy thời gian đầu sóng càng ngắn, độ dốc đầu sóng càng lớn thì hiện tượng phóng điện giữa



Hình 12. Hiện tượng đánh thủng cách điện của các xung sét hình dạng khác nhau ở khoảng cách 100 m đến chuỗi cách điện



Hình 13. Hiện tượng đánh thủng cách điện của các xung sét hình dạng khác nhau ở khoảng cách 600 m đến chuỗi cách điện

2 điện cực xảy ra càng sớm hơn, ở khoảng cách gần, sự khác biệt về điện áp giữa 2 điện cực chuỗi cách điện trong các tình huống sét là đáng kể. Với xung sét có độ dốc đầu sóng lớn ($0,25/100\mu s$) thì dao động điện áp diễn ra rất mạnh, đạt biên độ gần gấp 2 lần điện áp xung sét, trong khi với xung sét độ dốc đầu sóng bé hơn ($10/350\mu s$) thì biên độ dao động điện áp không vượt quá trị số điện áp xung sét.

Ngược lại, thời gian xảy ra phóng điện tương đối giống nhau, chỉ sai lệch không quá $10\mu s$ (Hình 12).

– Ở khoảng cách xa hơn, quan sát thấy hiện tượng xảy ra có đặc điểm ngược lại. Cụ thể, khi xung sét có hình dạng khác nhau, điện áp giữa 2 đầu cực chuỗi cách điện đều dao động vượt quá điện áp xung sét và biên độ tương đối bằng nhau, trong khi đó sự khác biệt về thời

điểm xảy ra phóng điện là đáng kể, chênh lệch lên đến khoảng $400\mu\text{s}$ (Hình 13).

4. KẾT LUẬN

Phóng điện giữa 2 điện cực dài trong không khí là hiện tượng rất phức tạp cần nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm sâu hơn nhằm giải thích và kiểm chứng bản chất các quá trình diễn ra. Các kết quả thu được trong nghiên cứu thông qua mô phỏng bằng phần mềm EMTP cho thấy, các xung sét có hình dạng khác nhau gây ra sự phóng điện giữa 2 cực chuỗi cách điện 500kV phụ thuộc mức điện áp và khoảng cách từ điểm sét đánh trên dây dẫn đến chuỗi cách điện. Sự phụ thuộc phi tuyến như đã trình bày trong nghiên cứu này, đặc biệt đối với các

xung sét có độ dốc đầu sóng lớn, cần được lưu ý trong tính toán và thiết kế khoảng vượt phù hợp cho đường dây truyền tải, tránh hiện tượng phóng điện khi xảy ra quá điện áp thấp. Các kết quả chi tiết hơn ở các vị trí sét đánh cách chuỗi cách điện 100m và 600m cho thấy sự khác biệt trong ảnh hưởng của sét tới việc phóng điện ở 2 đầu điện cực chuỗi cách điện về biên độ dao động điện áp và thời gian xảy ra đánh thủng không khí.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả xin chân thành cảm ơn EMTP Alliance đã tạo điều kiện, cho phép sử dụng miễn phí phần mềm để chúng tôi hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. *A new calculation method of breakdown voltage-time characteristics of long air gaps*. Takatoshi Shindo, Toshio Suzuki. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 6, June 1985, pp. 1556-1563.
- [2]. *Performance of large air gaps under lightning overvoltages: Experimental study and analysis of accuracy of predetermination methods*. A. Pignini, G. Rizzi et al. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989.
- [3]. *A Model for Long Air Gap Discharge using an Equivalent Electrical Network*. I. Fofana, A. Beroual. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 3 No. 2, April 1996.
- [4]. *Breakdown Characteristics of Long Air Gap with Negative Polarity Switching Impulse*. Yu Wang, Xishan Wen, Lei Lan, Yunzhu An. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, April 2014.
- [5]. *Breakdown mechanisms of rod-plane air gaps with a dielectric barrier subject to lightning impulse stress*. Hans Kristian Meyer, Frank Mauseth. A part of the project "Electrical insulation with low-GWP gases" (project number: 245422) funded by the Research Council of Norway and the industrial partners ABB AS, Norway and ABB Switzerland Ltd.
- [6]. *Breakdown Characteristics of Long Air Gap at Different Frequency Based on Series Resonance*. Zhengyong Hu, Peng Xu, Wenlong Tan, Kai Gao, Lv Cui. Journal of Physics: Conference Series. 2143 (2021) 012051. IOP Publishing. DOI:10.1088/1742-6596/2143/1/012051.

- [7]. *Modelling negative discharges in long air gaps - Lightning application*. Abderrahmane Beroual, Issouf Fofana. DOI: 10.1088/978-0-7503-1236-3. ISBN978-0-7503-1236-3.
- [8]. *Accurate modeling and simulation of transmission line transients using frequency dependent modal transformations*. Abur, A., Ozgun, O., & Magnago, F. H. (n.d.). 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194). doi:10.1109/pesw.2001.917314
- [9]. *EMTP- RV 4.4.0, "Air gap leader"*.
- [10]. *TCVN 6099-1 : 2007*. Kỹ thuật thử nghiệm điện áp cao.
- [11]. *TCVN 7998-1 : 2009* *Cải cách điện dùng cho đường dây trên không có điện áp danh nghĩa lớn hơn 1000 V*
- [12]. *TCVN 9888-1:2013* *Bảo vệ chống sét*.
- [13]. *A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using EMTP*. A. Ametani, T. Kawamura. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.

Giới thiệu tác giả:



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

Hướng 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.



Tác giả **Đặng Việt Hùng** tốt nghiệp Đại học và Thạc sĩ tại trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2002 và 2004. Năm 2010 nhận bằng Tiến sĩ Kỹ thuật điện tại trường École Centrale de Lyon (CH Pháp). Hiện đang công tác tại Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện Lực.

Hướng nghiên cứu chính: Chất lượng điện năng, Vật liệu kỹ thuật điện cao áp.