

Ảnh hưởng của môi trường đặt cáp đến quá điện áp trên vỏ cáp trong đường dây truyền tải điện có cấu trúc hỗn hợp

Effect of Cable Configuration on Overvoltage on Cable Sheath in "Mix" Transmission Lines

Phạm Thành Chung^{1*}, Phạm Hồng Thịnh², Trần Văn Tóp¹

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

²PSEG Long Island, Hicksville, New York, USA

*Email: chung.phamthanh1@hust.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo trình bày các kết quả tính toán điện áp cảm ứng trên vỏ cáp trong trường hợp sét đánh trên đường dây truyền tải 220 kV có cấu trúc hỗn hợp, gồm đường dây trên không nối với một đoạn cáp XLPE sử dụng phương pháp hoán vị vỏ để tăng khả năng tải. Các tính huống mô phỏng được thực hiện trên phần mềm EMTP-ATP nhằm phân tích trị số điện áp cảm ứng trên vỏ cáp khi thay đổi môi trường đặt cáp. Kết quả mô phỏng cho thấy tổng trở sóng của vỏ cáp thay đổi mạnh khi môi trường đặt cáp thay đổi, dẫn đến trị số điện áp trên vỏ cáp có thể vượt quá mức độ cách điện của vật liệu vỏ cáp khi cáp đi trên không. Kết quả cũng gợi ý sự cần thiết của việc sử dụng các thiết bị hạn chế quá điện áp trên vỏ cáp trong đường dây có cấu trúc hỗn hợp, đặc biệt ở các khu vực cáp đi trên không.

Từ khoá: Điện áp vỏ cáp, hoán vị vỏ cáp, đường dây hỗn hợp, EMTP-ATP.

Abstract

This paper deals with the induced voltage along cross-bonded cable sheaths of a 220 kV mixed overhead-cable transmission line when a lightning surge propagates from the overhead line. The simulation is performed by using EMTP-ATP software to analyze the effect of surrounding environment of the cable on the sheath voltage and the surge impedance thereof. The results show that the sheath voltage can exceed the impulse withstand voltage of the cable jacket in overhead cables. The results also suggest that the sheath voltage limiters (SVL) need to be installed at the junction between minor sections of overhead cables to minimize the effects of lightning induced voltage on the sheath.

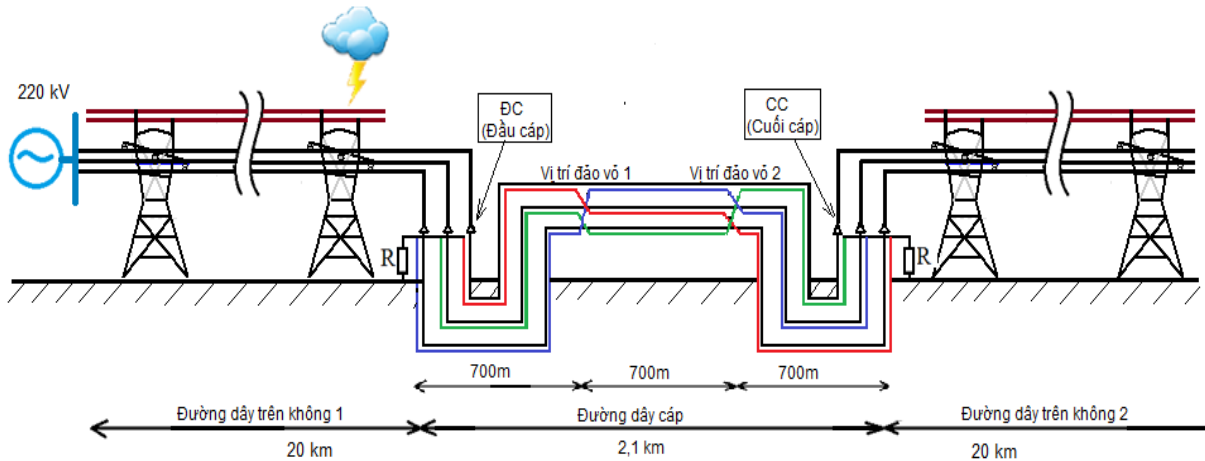
Keywords: Sheath voltage, crossbonding, "mixed" overhead-cable line, EMTP-ATP.

1. Giới thiệu chung

Những năm gần đây, sự mở rộng quy mô lưới truyền tải kết hợp với quá trình đô thị hóa dẫn đến sự xuất hiện ngày càng nhiều các đường dây hỗn hợp bao gồm cáp ngầm kết hợp với đường dây trên không trên lưới truyền tải. Sự kết hợp giữa đường dây trên không và cáp là một bài toán phức tạp trong kỹ thuật truyền tải với nhiều tham số không đồng nhất như thông số đường dây ở tần số 50 Hz (điện cảm, điện dung và điện dẫn) cũng như sự khác nhau rất lớn về tổng trở sóng (đường dây trên không có tổng trở truyền sóng lớn khoảng 400 Ω trong khi đường cáp chỉ có tổng trở sóng khoảng vài chục Ω). Trong khi các chế độ truyền sóng (propagation mode) của đường dây trên không đơn giản với hai chế độ là chế độ trên không (aerial mode) đối với dòng điện thứ tự thuận và chế độ trở về trong đất (earth return mode) thì đường dây cáp phức tạp hơn nhiều do phần dẫn điện của mỗi dây cáp có ít nhất 2 phần bao gồm lõi (core) và vỏ (sheath) với giả thiết không có phần vỏ kim loại bảo vệ cách điện vỏ (jacket). Chính vì thế

đối với cáp có ít nhất 3 chế độ truyền sóng bao gồm các chế độ đồng trục (coaxial mode), chế độ trở về trong đất và chế độ trở về giữa các vỏ (intersheath) [1]. Do vậy dạng dòng điện và điện áp trong lõi cáp và cảm ứng trên vỏ cáp ở chế độ làm việc bình thường cũng như trong các trường hợp quá độ (đóng cắt, ngắn mạch, sét) phức tạp hơn nhiều khi cáp được kết hợp với đường dây trên không. Sự phức tạp này đặt ra các thách thức hoàn toàn mới như tính toán chính định và xác lập phương thức cho bảo vệ rơ le, tính toán và lựa chọn loại máy cắt phù hợp, và đặc biệt là tính toán các loại quá điện áp do đóng cắt, do ngắn mạch và do sét trên cả lõi cáp và vỏ cáp.

Nghiên cứu về quá điện áp trong lưới điện truyền tải với cấu trúc hỗn hợp cũng chỉ mới bắt đầu trên thế giới từ khoảng 15 năm trở lại đây [2,3]. Tuy nhiên các nghiên cứu này đều sử dụng các tham số đặc thù cho khu vực mà đường dây đó đi qua, do vậy không phù hợp với đường dây truyền tải Việt Nam [4]. Những nghiên cứu cụ thể và chi tiết về quá điện áp trên đường dây truyền tải hỗn hợp có tính cấp thiết cao trong đóng góp vào những hiểu biết cơ bản về vấn đề này cho hệ thống điện Việt Nam.



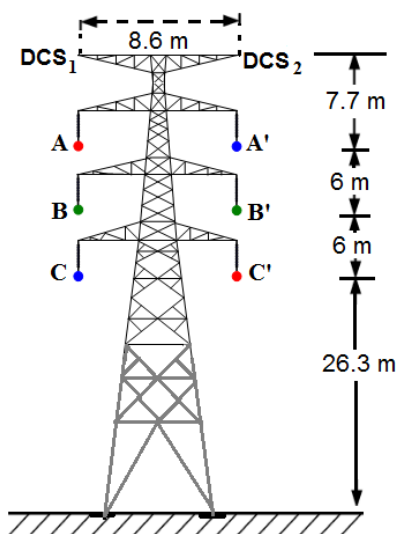
Hình 1. Mô hình đường dây truyền tải điện có cấu trúc hỗn hợp

Bài báo này trình bày kết quả mô phỏng quá trình điện áp trên vỏ cáp của đường dây truyền tải 220 kV hỗn hợp khi dòng điện sét chạy trong lõi cáp do lan truyền từ đường dây trên không bằng chương trình mô phỏng EMTP/ATP. Ảnh hưởng của môi trường đặt cáp đến quá điện áp trên vỏ cáp được làm rõ để đặt ra cơ sở cho các biện pháp hạn chế quá điện áp trên vỏ cáp.

2. Mô hình tính toán

2.1 Đường dây

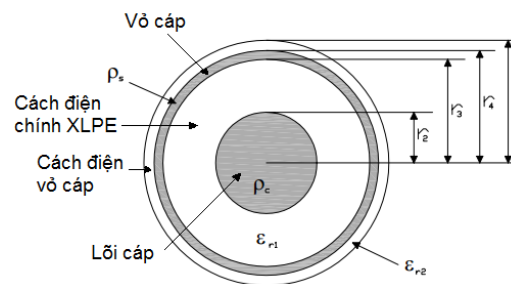
Mô hình sử dụng cho tính toán là một đường dây mạch kép 220 kV có cấu trúc hỗn hợp bao gồm đường dây- cáp ngầm- đường dây trên không như minh họa trên Hình 1. Đường dây trên không mạch kép 220 kV treo 2 dây chống sét có tổng chiều dài 40 km với thông số cột như trên Hình 2. Đoạn cáp ngầm dài 2 km sử dụng loại cáp XLPE với 6 cấp đơn. Cấu tạo cáp và các thông số cáp được trình bày trên Hình 3 và Bảng 1. Cách bố trí cáp trong đất và đi trên không được trình bày trên Hình 4.



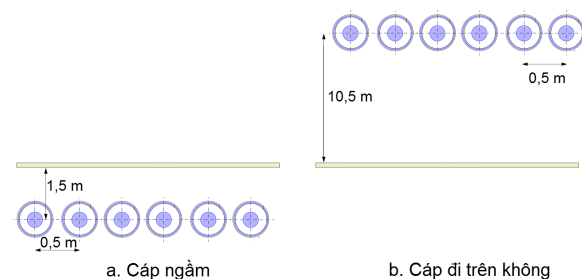
Hình 2. Kết cấu cột điện của đường dây trên không 220 kV

Bảng 1. Thông số cáp ngầm 2500 mm²

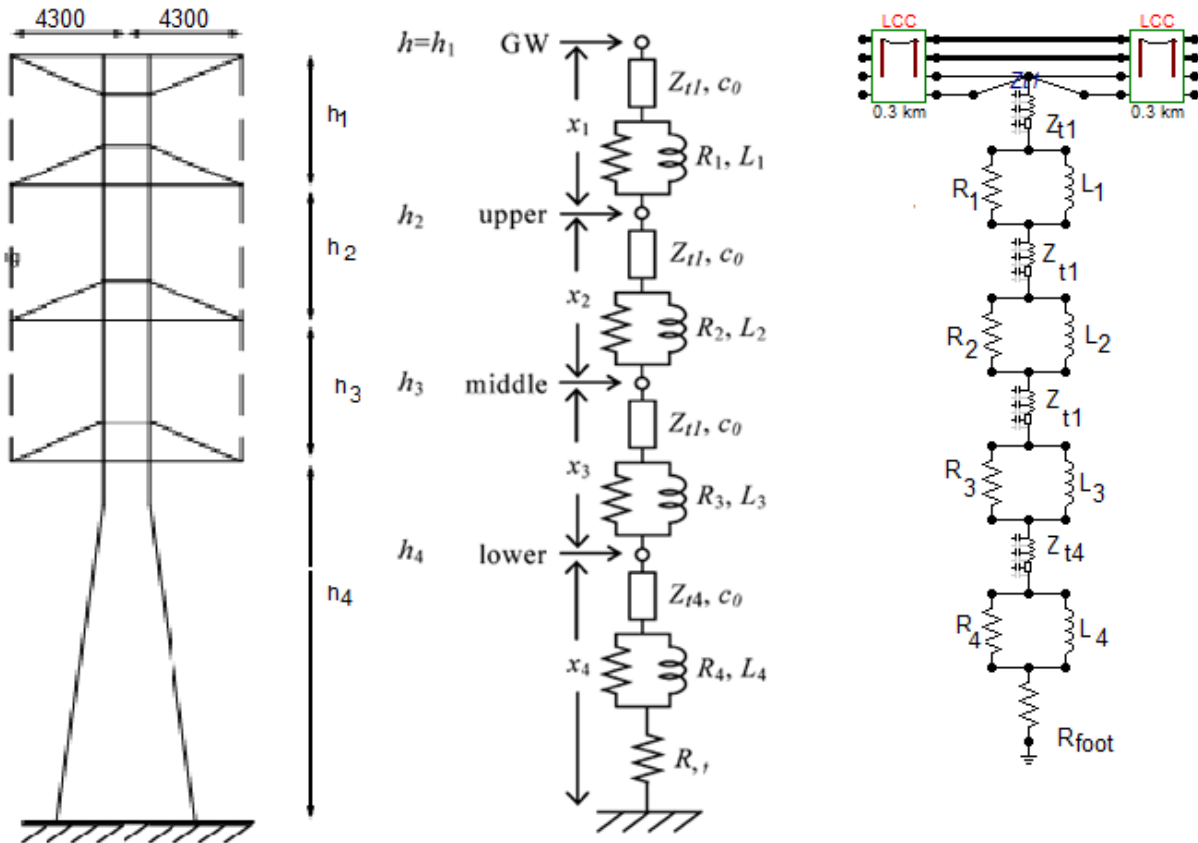
r_2	32,5 mm
r_3	64,2 mm
r_4	65,5 mm
r_5	71,3 mm
ϵ_{r1}	2,4
ϵ_{r2}	2
ρ_c	$1,724 \cdot 10^{-8} \Omega m$
ρ_s	$2,84 \cdot 10^{-8} \Omega m$



Hình 3. Mặt cắt cấu tạo cáp 220 kV XLPE



Hình 4. Cách bố trí cáp trong 2 trường hợp đi ngầm và đi trên không



Hình 5. Mô hình mạch và mô hình mô phỏng tương đương trong EMTP-ATP

Mô hình cột sử dụng trong tính toán mô phỏng là mô hình cột nhiều tầng (multistory tower) như minh họa trên Hình 5. Đây là mô hình được sử dụng rộng rãi trong các tính toán mô phỏng quá điện áp sét ở cấp truyền tải [5,6] với điện trở nối đất chân cột là điện trở một chiều có giá trị 10Ω .

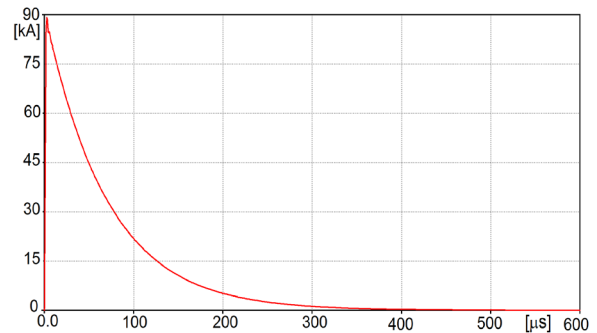
Đường dây trên không được mô phỏng bằng mô hình phân bố rải “JMARTI” với các thông số phụ thuộc vào tần số. Ma trận chuyển giữa miền modal và miền tần số được tính toán ở tần số chính 100 kHz [1] với các thông số đường dây được tính toán với đường trở về của dòng điện trong đất có điện trở suất $100 \Omega\text{m}$ [7].

2.2. Đường cáp ngầm

Đường dây cáp ngầm 220 kV được mô phỏng theo mô hình thông số rải “Bergeron” [8] với các tham số được tính toán ở tần số 100 kHz. Nhằm nâng cao khả năng tải của cáp cũng như giảm điện áp cảm ứng trên vỏ cáp [9], đoạn cáp 2,1 km được chia làm 3 đoạn nhỏ (minor section) có tiến hành hoán vị (đảo vỏ) tại các vị trí nối giữa các đoạn nhỏ. Ở vị trí nối với đường dây trên không, vỏ cáp được nối đất trực tiếp qua điện trở nối đất 4Ω như trên Hình 1.

2.3. Nguồn dòng sét

Nguồn xung CIGRE được sử dụng để mô phỏng dòng điện sét với dạng sóng 1.2/50 μs như minh họa trên Hình 6.



Hình 6. Nguồn dòng CIGRE sử dụng trong mô phỏng

3. Kết quả mô phỏng

3.1 Trường hợp A: Cáp ngầm toàn bộ

Trong trường hợp này cáp được giả thiết đi ngầm trên toàn bộ chiều dài 2,1 km với cách bố trí nằm trên mặt phẳng nằm ngang như trình bày trên Hình 4a. Để mô phỏng trường hợp dòng điện sét đi vào đường dây cáp do lan truyền từ đường dây trên không, dòng điện sét 90 kA, 1,2/50 μs dạng sóng CIGRE [10] đánh thẳng vào đỉnh cột của đường dây trên không thứ nhất ngay nơi nối trực tiếp với đường cáp ngầm (Hình 1). Dòng sét này có xác suất xuất hiện là 5% [11] đủ lớn để gây phóng điện trên cách điện pha B của cả 2 lộ và một phần dòng điện sét sẽ lan truyền vào cáp để đi sang đường dây trên không thứ 2. Kết quả tính toán cho thấy 76,7 kA sẽ được tán

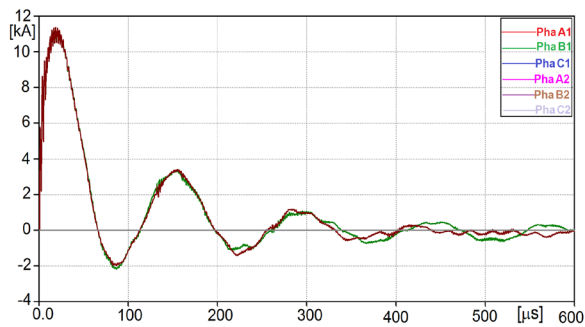
xuống đất qua tiếp địa của cột và 11,4 kA đi vào cáp để sang đường dây trên không thứ 2. Trong trường hợp này, dòng điện sét đi vào lõi cáp có trị số lớn nhất xấp xỉ 11,4 kA và có dạng dao động tắt dần do tổn hao trong lõi cáp gây ra (Hình 7).

Điện áp trên 3 pha lõi cáp ở vị trí cuối cáp (CC) của mạch 1 và mạch 2 được trình bày trên Hình 8 và 9. Ta nhận thấy điện áp lớn nhất xuất hiện trên pha B là pha có dòng điện sét đi qua, tuy nhiên giá trị lớn nhất của điện áp trên cách điện của lõi cáp trong trường hợp này chỉ xấp xỉ 500 kV. Điện áp cảm ứng trong lõi của các pha khác cũng tương đối lớn, xấp xỉ 340 kV. Chú ý rằng trị số này đã tính đến cả giá trị điện áp làm việc của lõi cáp (179,6 kV). Thời gian xuất hiện điện áp trên lõi cáp ở vị trí cuối cáp (CC) trễ hơn so với dòng điện sét đi vào vị trí đầu cáp (ĐC) là 12 μs , tương đương với vận tốc truyền sóng ở chế độ đồng trục (coaxial mode) là 175 m/ μs . Điện áp trong lõi cáp dao động tắt dần do tổn hao trên lõi cáp với tần số dao động xấp xỉ 6,7 kHz. Đây là tần số cộng hưởng của điện cảm và điện dung của bản thân cáp.

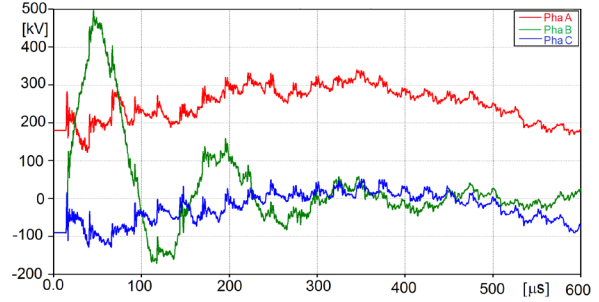
Điện áp trên vỏ (so với đất) tại các vị trí đảo vỏ thứ nhất được trình bày trên hình 10. Ta nhận thấy điện áp trên vỏ của pha A và pha C lớn hơn pha B, do thực tế ở vị trí đảo vỏ thứ nhất vỏ pha C mới được đảo từ pha B còn vỏ của pha A được đảo từ pha C có khoảng cách gần pha B (pha có dòng điện sét đi qua). Dao động điện áp trên vỏ với tần số dao động xấp xỉ 48 kHz có thể do cộng hưởng giữa điện cảm của phần dẫn điện vỏ cáp với điện dung của cách điện vỏ cáp.

Bảng 2. Điện áp trên vỏ cáp trong trường hợp A

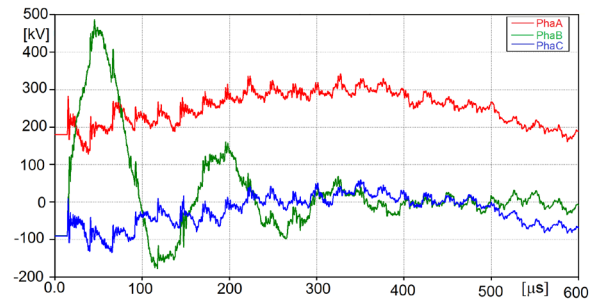
	Vị trí đảo vỏ thứ 1			Vị trí đảo vỏ thứ 2		
	A1	B1	C1	A1	B1	C1
V_{\max} (kV)	23	17,2	40,7	22,7	19,1	32,8
t (μs)	26	507	97,6	182	168	91,1



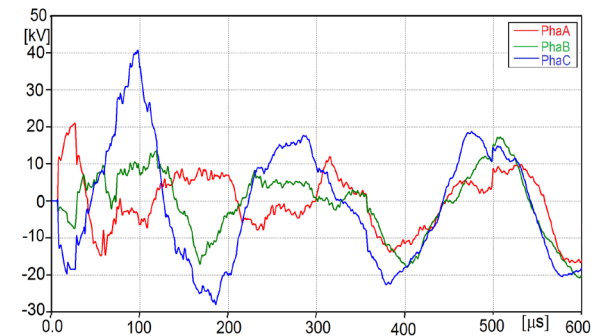
Hình 7. Dòng điện chạy trong lõi cáp của các pha.



Hình 8. Quá điện áp trên lõi mạch 1 vị trí CC



Hình 9. Quá điện áp trên lõi mạch 2 vị trí CC



Hình 10. Quá điện áp trên vỏ cáp mạch 1 tại vị trí đảo vỏ thứ nhất

Bảng 2 trình bày điện áp trên các vị trí đảo vỏ thứ 1 và thứ 2. Điện áp trên vỏ cáp ở vị trí đảo vỏ thứ hai thấp hơn ở vị trí đảo vỏ thứ nhất khoảng 24% so với vị trí đảo vỏ thứ nhất do tổn hao trên vỏ cáp gây ra. Tại thời điểm 97,6 μs , quá điện áp lớn nhất trên vỏ tại pha C1 có thể đạt tới trị số $V_{\max} = 40,7$ kV, trị số này vượt quá mức cách điện xung BIL (40 kV) của vỏ cáp 220 kV [9]. Kết quả này gợi ý rằng đối với các vị trí đảo vỏ gần nơi có dòng điện sét đi vào cần phải tính toán cụ thể trị số điện áp cảm ứng nhằm sử dụng các thiết bị hạn chế quá điện áp trên vỏ (Sheath Voltage Limiter - SVL) cho phù hợp.

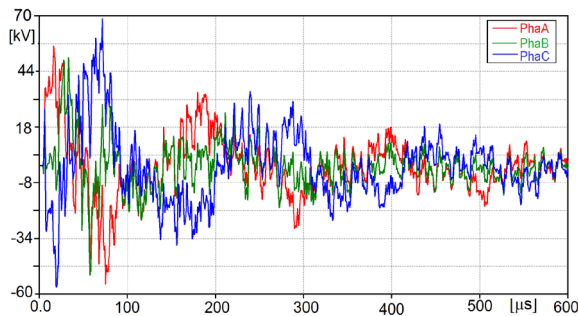
3.2 Trường hợp B: Cáp đi trên không

Hình 12 mô tả điện áp trên vỏ cáp tại các vị trí đảo vỏ thứ nhất trong trường hợp cáp đi trên không được bố trí trên cùng một mặt phẳng cách mặt đất 10,5 m (Hình 4b). Khi cáp đi trên không, sự suy giảm (attenuation) trên vỏ cáp nhỏ hơn nhiều so với trường

hợp cáp đi ngầm trong đất [12]. Mặt khác, tổng trở sóng của vỏ cáp chính bằng tổng trở sóng của đường dây trên không, do đó lớn hơn nhiều so với trường hợp cáp nằm hoàn toàn trong đất. Sự khác nhau cơ bản này làm cho điện áp trên vỏ cáp trong trường hợp cáp đi trên không ở các vị trí đảo vỏ tăng gấp 1,7 lần so với trường hợp cáp đi ngầm toàn bộ, với điện áp lớn nhất ở vỏ pha C tăng từ 40,7 kV (Trường hợp A) lên 67,7 kV (Trường hợp B) như trình bày trong Bảng 3. Đối với dòng điện sét 11,4 kA đi vào lõi cáp, điện áp trên mọi điểm của vỏ đều lớn hơn mức BIL cho phép (40 kV) của vỏ cáp XLPE 220 kV.

Bảng 3. Điện áp trên vỏ cáp trong trường hợp B

Pha	Vị trí đảo vỏ thứ 1			Vị trí đảo vỏ thứ 2		
	A1	B1	C1	A1	B1	C1
V_{max} (kV)	55,9	-51,1	67,7	31,5	48,1	57,2
t (μ s)	16,2	57,5	71,5	29,7	29,2	68



Hình 11. Quá điện áp trên vỏ cáp mạch 1 tại vị trí đảo vỏ thứ nhất

So sánh với trường hợp A, điện áp lớn nhất tại vị trí đảo vỏ A1 đạt đến giá trị lớn nhất $V_{max}=23$ kV (Hình 10) ở thời gian 26 μ s thì điện áp lớn nhất tại vị trí này đạt trị số 55,9 kV tại 16,2 μ s, ngay ở dao động đầu tiên đối với trường hợp cáp đi trên không. Kết quả này là do vận tốc truyền sóng trên vỏ cáp trong trường hợp B lớn hơn trường hợp A (212 m/ μ s so với 175 m/ μ s) và xấp xỉ vận tốc ánh sáng làm thời gian để sóng phản xạ đầu tiên từ vị trí đảo vỏ thứ hai trở về vị trí đảo vỏ thứ nhất chỉ mất khoảng 2,3 μ s, dẫn đến các đỉnh tiếp theo bị bào mòn nhiều hơn và tần số dao động cao hơn nhiều trường hợp A.

3.3. Trường hợp C: Một phần cáp đi trên không

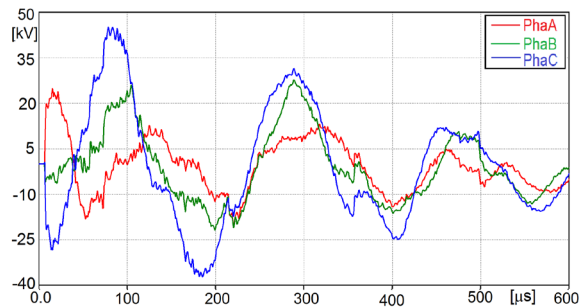
Trong thực tế có nhiều trường hợp cáp đi qua cầu, khi đó một phần cáp đi ngầm trong đất và một phần đi trên cầu. Phần này mô phỏng trường hợp giữ nguyên các vị trí đảo vỏ nhưng đoạn cáp được đi hỗn hợp cả trên không và dưới đất như trên Hình 1. Điện áp trên vỏ cáp tại các vị trí đảo vỏ thứ nhất trong Hình 12.

Điện áp trên vỏ cáp tại 2 vị trí đảo vỏ và thời gian đạt đỉnh được trình bày trong Bảng 4. Điện áp

lớn nhất trên vỏ luôn xuất hiện tại pha C1 với giá trị $V_{max} = 45,1$ kV. Trị số này nhỏ hơn trường hợp cáp đi trên không (67,7 kV) và lớn hơn trường hợp cáp đi ngầm (40,7 kV). Kết quả này cho thấy sự kết hợp giữa tổng trở sóng cao của vỏ cáp đoạn đi trên không và tổng trở sóng thấp của đoạn cáp đi ngầm làm cho điện áp lớn nhất trên vỏ cáp nằm giữa trị số điện áp ứng với hai trường hợp này.

Bảng 4. Điện áp trên vỏ cáp trong trường hợp C

Pha	Vị trí đảo vỏ thứ 1			Vị trí đảo vỏ thứ 2		
	A1	B1	C1	A1	B1	C1
V_{max} (kV)	24,8	27,7	45,1	29,3	26,4	26,4
t (μ s)	15,5	288	78,6	349	393,3	82,5



Hình 12. Quá điện áp trên vỏ cáp mạch 1 tại vị trí đảo vỏ thứ nhất.

4. Kết luận

Trong bài báo này, điện áp trên các vị trí đảo vỏ của một đoạn cáp của đường dây truyền tải có cấu trúc hỗn hợp được tính toán với 3 môi trường đặt cáp khác nhau (Trường hợp A: cáp ngầm toàn bộ, Trường hợp B: cáp đi trên không và Trường hợp C: một phần ngầm, một phần đi trên không) khi có dòng điện sét chạy trong lõi cáp của một pha do phóng điện trên đường dây trên không.

Trong cả 3 trường hợp, điện áp trên vỏ cáp ở vị trí đảo vỏ đầu tiên luôn lớn nhất và giảm ở vị trí đảo vỏ tiếp theo trên tất cả các pha. Điện áp lớn nhất trên vỏ nguy hiểm nhất trong trường hợp toàn bộ cáp đi trên không do kết hợp giữa hiện tượng dao động cộng hưởng của phần cáp đi trên không với sự gia tăng của tổng trở sóng vỏ cáp do đi trên không. Trong trường hợp cáp đi trên không, điện áp cảm ứng lớn nhất trên vỏ có thể lớn hơn 1,7 lần so với trường hợp cáp hoàn toàn đi ngầm. Giá trị điện áp cảm ứng này có thể vượt xa mức chịu đựng của cách điện vỏ cáp và gây ra phóng điện trên vỏ cáp, dẫn đến bắt đầu quá trình phá hủy dần dần của cáp. Kết quả tính toán cho thấy cần thiết phải trang bị thiết bị hạn chế quá điện áp SVL tại các vị trí đảo vỏ, đặc biệt là ở vị trí đảo vỏ đầu tiên, nhất là đối với với đường dây hỗn hợp trong đó có một phần cáp đi trên không.

Tài liệu tham khảo

- [1] A. Ametani, T. Ohno, and N. Nagaoka, Cable system transients. Singapore: John Wiley & Sons, 2015, pp.0-550.
- [2] F. M. Gatta, A. Geri, and S. Lauria, Simulation of lightning response of a long mixed overhead-cable EHV line. Proc. International Conference on Grounding and Earthing (GROUND'2006), Maceio, Brazil, 2006.
- [3] R. Benato and A. Paolucci, Operating capability of ac EHV mixed lines with overhead and cables links. EHV AC Undergrounding Electrical Power: Performance and Planning, vol. 78, no. 4, pp. 584-594, Apr. 2008, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2007.05.002>.
- [4] F. Massaro, G. Morana, R. Musca, Transient Behavior of a "Mixed" Overhead-Cable EHV Line under Lightning Events, IEEE Proc. International Power Engineering Conference, Sep. 2009.
- [5] A. Ametani and T. Kawamura, A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 867-875, Apr. 2005, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839183>.
- [6] M. Ishii et al., Multistory transmission tower model for lightning surge analysis, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 3, pp. 1327-1335, July 1991. <https://doi.org/10.1109/61.85882>.
- [7] N. V. Nam, Nghiên cứu một số giải pháp giảm sự cố do sét cho đường dây truyền tải điện trên không, Luận án tiến sĩ, Bộ môn Hệ thống điện., Đại học Bách Khoa Hà Nội., Hà Nội, Việt Nam, 2020.
- [8] W. S. Meyer, Electro-Magnetic Transients Program, Portland, Oregon, U.S: BPA, 1984.
- [9] IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV Through 500 kV, IEEE Standard 575, 2014.
- [10] CIGRE Working Group 01 of SC 33. Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. CIGRE Brochure, 1991.
- [11] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Standard 1243, 1997.
- [12] A. Ametani, Wave Propagation Characteristics of Cables, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 2, pp. 499-505, Mar. 1980, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1980.319685>.