

ẢNH HƯỞNG CỦA CẤU TRÚC HÌNH HỌC CỦA KHỐI ĐIỀU KHIỂN ỨNG SUẤT ĐẾN SỰ PHÂN BỐ ĐIỆN TRƯỜNG CỦA ĐẦU NỐI CAO ÁP

EFFECT OF STRESS CONTROLLED ON ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN HIGH VOLTAGE CABLE JOINTS

Vũ Thị Thu Nga

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 14/05/2022, Ngày chấp nhận đăng: 15/07/2022, Phản biện: TS. Hoàng Mai Quyền

Tóm tắt:

Cáp điện là thành phần quan trọng trong hệ thống truyền tải và phân phối điện. Đầu nối cáp một trong những phụ kiện cơ bản của cáp điện để kết nối giữa các đường dây hoặc với thiết bị điện. Các khía cạnh khác nhau được xem xét trong khi thiết kế đầu nối cáp vì chúng phải đảm bảo tính toàn vẹn trong liên kết cáp tạo kết trong hệ thống truyền tải điện. Khi điện trường tăng tại đầu nối cáp có thể gây ra phóng điện tại các nơi tiếp giáp giữa các điện môi và dọc theo bề mặt cách điện làm hỏng cáp. Đầu nối cáp thường được thiết kế để loại bỏ tập trung ứng suất điện tại các vị trí này để kiểm soát được điện trường tại đầu nối cáp. Cấu trúc hình học của khối điều khiển ứng suất có ảnh hưởng lớn đến sự phân bố điện trường trong đầu nối cáp. Trong nghiên cứu này, sự ảnh hưởng của cấu trúc hình học khối điều khiển ứng suất đến phân bố điện trường trong đầu nối cáp được tính toán, phân tích, so sánh bởi phương pháp phần tử hữu hạn giữa cấu trúc đầu nối cáp khác nhau để có được thiết kế phù hợp kiểm soát sự tăng cao của điện trường trong đầu nối cáp.

Từ khóa:

Điều khiển ứng suất, cáp điện, đầu nối cáp cao áp.

Abstract:

Power cables are of importance in power transmission and distribution systems. Cable joints are the basic accessories of the power cables to make connections between lines or to an electrical apparatus. The various aspects are considered while designing the cable terminations and joints because they must ensure the integrity their associated cables in the power transmission system. Electric field enhancement at the interface of materials can produce local discharges that could lead to either flashover along the insulation surface or dielectric breakdown causing cable failure. Cable terminations are designed to eliminate the stress concentration at the screen termination to avoid the break-down of the cable. The geometry of the stress controlled has a great influence on the electric field distribution in the cable joint. In this study, the effect of stress controlled on the electric field distribution in high voltage cable joints was calculated, analyzed and compared by the finite element method between different cable joint structures to obtain a suitable design of the cable joint.

Keywords:

Stress cone, high voltage cable, high voltage cable joint.

1. GIỚI THIỆU

Để đáp ứng nhu cầu điện năng của xã hội với mức tiêu thụ điện tăng cần phải có hệ thống truyền tải công suất lớn. Lắp đặt cáp cao áp là một xu hướng tất yếu ở các khu vực đô thị và khu đông dân cư. Tuy nhiên cáp cao thế được sản xuất với chiều dài hạn chế do có nhiều trở ngại trong quá trình sản xuất và vận chuyển. Các phụ kiện cáp cao áp như đầu nối cáp giúp kết nối cáp có chiều dài hạn chế để đảm bảo tính liên tục của hệ thống truyền tải điện. Tuy nhiên sự cố đứt cáp thường xuyên xảy ra do việc lắp đặt phụ kiện không đủ tiêu chuẩn và môi trường hoạt động bên ngoài bất thường [1]. Theo thống kê các sự cố cáp trong 10 năm gần đây, tỷ lệ hư hỏng phụ kiện cáp chiếm hơn một nửa tổng số sự cố ở cáp, trong đó hơn 75% sự cố phụ kiện cáp xảy ra ở mỗi nối cáp thông thường mà không tính đến các sự cố do phá hủy bên ngoài [2], [3].

Điểm yếu của đầu nối cáp có liên quan đến sự phân bố không đồng đều của điện trường bên trong chúng, do vậy cần kiểm soát ứng suất điện trường để giảm ứng suất điện trường trong vùng tới hạn. Có nhiều nghiên cứu về điều khiển ứng suất điện trường trong cáp ngầm cao áp như Yang và cộng sự [4] đã tiến hành các phân tích so sánh về việc đánh giá điện trở tiếp xúc của các mối nối cáp dựa trên mô phỏng. Letvenuk và cộng sự [5] đã kiểm tra hiệu ứng khe hở không khí đối với các phụ kiện cáp trung thế. Họ đề xuất một cách tiếp cận dựa trên vật liệu mới để kiểm soát mức độ ứng suất điện. Frobin và cộng sự [6] đã sử dụng phần mềm

Comsol Multiphysics để tạo mô hình các phụ kiện cáp HVDC. Sự phân bố điện trường bên trong đầu nối cáp có thể được cải thiện bằng cách điều chỉnh cấu trúc hình học của phần điều khiển ứng suất trong cấu tạo của đầu nối cáp [7], [8]. Trong nghiên cứu này, tác giả tập trung vào sự so sánh và phân tích phân bố điện trường trong đầu nối cáp với hai cấu trúc khác nhau của phần điều khiển ứng suất trong cấu tạo đầu nối cáp.

2. PHƯƠNG PHÁP VÀ CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN

2.1 Phương pháp nghiên cứu

Trong đầu nối cáp, việc kiểm soát ứng suất đạt được nhờ vào cấu trúc của đầu nối, đầu cuối cáp và khớp nối phải được thiết kế phù hợp để có hiệu suất lâu dài và đáng tin cậy. Phân tích sự phân bố trường trong các mối nối và đầu cuối cáp là nền tảng của quá trình thiết kế sao cho đạt được hiệu quả truyền tải công suất tốt nhất và tuổi thọ của hệ thống truyền tải cao nhất.

Phương pháp truyền thống để kiểm soát ứng suất điện ở đầu nối cáp là sử dụng bộ phận kiểm soát ứng suất trong đầu mối nối. Trong đó, có thể lựa chọn hình dạng và kích thước khác nhau của bộ phận kiểm soát ứng suất trong đầu nối cáp cao áp như: hình phẳng, hình nón với kích thước khác nhau hoặc lựa chọn vật liệu sử dụng cho nó: thường sử dụng vật liệu có hệ số điện môi cao [9].

Sử dụng giải pháp lựa chọn cấu trúc hình học bộ phận kiểm soát ứng suất được sử dụng phổ biến hơn. Với hình dạng khác

nhau (phẳng hoặc cong) của phần điều khiển ứng suất có thể làm phân tán đồng đều hơn các đường đẳng thế dẫn đến giảm gradien điện thế ở bề mặt của chất điện môi. Việc chế tạo các bộ phận kiểm soát ứng suất trong cấu trúc của đầu nối cáp là rất quan trọng. Bộ phận kiểm soát ứng suất không hoạt động đúng nếu cấu trúc của nó là bị biến dạng. Với phương pháp thứ hai để kiểm soát ứng suất là chọn vật liệu có hệ số điện môi cao sẽ khúc xạ điện trường về phía đầu cáp dẫn đến giảm ứng suất tại điểm cuối của lớp vỏ.

Phương pháp kiểm soát ứng suất sử dụng vật liệu có hằng số điện môi cao có một số hạn chế. Điện trường bị khúc xạ khi truyền từ chất điện môi này sang chất điện môi khác, điện môi của các vật liệu xác định góc khúc xạ, độ lớn của khúc xạ. Khi điện điện môi tăng, điện trường có thể tăng cao gây ra phóng điện làm hỏng vật liệu cách điện trong đầu nối cáp, do vậy lựa chọn vật liệu cũng cần phải cẩn thận và phù hợp với cấu trúc đầu nối để hạn chế việc phóng điện.

Trong nghiên cứu này, phương pháp lựa chọn cấu trúc hình học bộ phận kiểm soát ứng suất sử dụng vật liệu có hằng số điện môi cao được đưa ra phân tích và so sánh dựa vào sự phân bố điện trường trong 2 trường hợp cấu trúc kiểm soát ứng suất hình phẳng và hình nón.

2.2 Tính chất điện nhiệt đặc trưng trong đầu nối cáp

Hiện nay các loại cáp sử dụng phổ biến trong truyền tải điện thường sử dụng cáp có cách điện polyme. Trong cáp điện

polyme, dây dẫn được bọc một lớp cách điện ép đùn bằng polyme và chủ yếu dựa trên các hợp chất polyethylene liên kết chéo (XLPE), là một loại cách điện đặc biệt để đạt hiệu quả tốt nhất trong điều kiện truyền tải điện. Điện dẫn trong vật liệu cách điện XLPE có thể thay đổi bởi sự thay đổi của nhiệt độ và điện trường [10]. Do vậy, quan hệ của điện dẫn theo định luật Arrhenius thường gặp ở điện trường nhỏ trong polyme được viết như sau:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T}\right) \quad (1)$$

Ở đó: σ , σ_0 tương ứng là điện dẫn và giá trị điện dẫn tham chiếu (S/m). E_a là năng lượng kích hoạt của điện dẫn (eV). T là nhiệt độ (K) và K_B là hằng số Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K hoặc $8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/K).

Vật liệu sử dụng cho các thiết bị đầu nối, cao su EPDM là loại vật liệu được sử dụng phổ biến trong hệ thống truyền tải điện sử dụng cáp có cách điện polymer. Các tính chất về điện dẫn của vật liệu cao su EPDM tương tự như một vật liệu cách điện [11] [12], giá trị điện dẫn của EPDM cũng chịu tác động của hiệu ứng nhiệt độ và điện trường.

Giả thiết sự phụ thuộc của điện dẫn vào điện trường của vật liệu thể hiện như công thức sau:

$$\gamma = \alpha E^\beta \quad (2)$$

Từ các nghiên cứu thực nghiệm, công thức bán thực nghiệm của điện dẫn với điện trường được thể hiện như sau:

$$J = Ae^{(-B/E)} \quad (3)$$

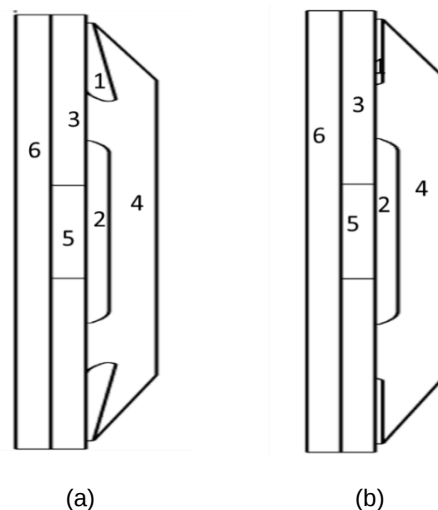
Trong đó A và B là các hằng số phụ thuộc vào vật liệu.

Khi sử dụng các đầu nối các đoạn cáp, hiện tượng tiếp giáp giữa 2 lớp vật liệu cách điện khác nhau giữa cách điện của cáp và của thiết bị đầu nối, từ đó có thể xảy ra hiện tượng tích điện không gian tại lớp tiếp xúc và sự phân bố điện trường trong thiết bị đầu nối ở các vị trí khác nhau là không đồng nhất, làm giảm tuổi thọ của hệ thống truyền tải điện. Khối điện tích không gian ở lớp tiếp giáp giữa 2 vật liệu dưới tác dụng của điện áp được xác định theo hiệu ứng Maxwell-Wagner-Sillars, nó là kết quả của việc không thể đáp ứng đồng thời việc bảo toàn cả về dòng điện và sự dịch chuyển điện.

3. CẤU TRÚC VÀ THÔNG SỐ MÔ PHỎNG

Thiết kế của bộ phận điều khiển ứng suất điện trường trong đầu nối cáp cao áp có ảnh hưởng lớn đến sự phân bố điện trường trong cáp, đầu nối và nơi tiếp giáp giữa hai vật liệu cách điện giữa cáp và đầu nối.

Trong nghiên cứu, thiết kế bộ phận điều khiển ứng suất điện trường có dạng hình nón (hình 4a) và hình học phẳng (hình 4b) và trong khớp nối cho cáp ngầm cao áp được phân tích so sánh mô phỏng theo phương pháp phần tử hữu hạn. Đầu nối cáp cao áp được sử dụng trong mô phỏng là một kết nối phẳng ethylene propylene diene monomer (EPDM) dùng cho cáp polyethylene (XLPE) liên kết chéo 220 kV (hình 1).



Hình 1. Cấu trúc đầu nối cáp

- (1) bộ phận điều khiển ứng suất điện trường;
(2) điện cực giữa; (3) cách điện cáp (XLPE);
(4) cách điện của đầu nối (EPDM); (5) bộ phận kết nối;
(6) lõi dẫn của cáp

Cáp được sử dụng trong mô phỏng trong có độ dày lớp cách điện là 22,675 mm. Đặc tính của hệ thống cách điện cáp bao gồm các vật liệu cách điện được sử dụng trong thiết kế mỗi nối được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1: Đặc tính của hệ thống cách điện cáp, vật liệu cách điện được sử dụng trong thiết kế mỗi nối

Vật liệu	Hằng số điện môi ϵ	Điện dẫn suất [S/m]
Lõi cáp	6	$5,998.10^7$
Bán dẫn của bộ phận điều khiển ứng suất điện trường	50	6.10^3
XLPE	2.3	$\sigma(T,E)$, phụ thuộc vào nhiệt độ và điện trường
EPDM	2.9	$\sigma(T,E)$, phụ thuộc vào nhiệt độ và điện trường

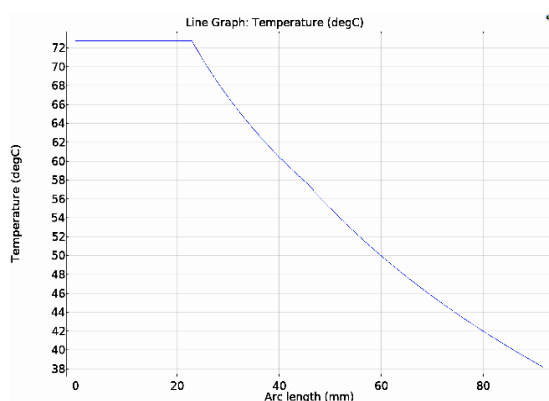
Vật liệu	Hằng số điện môi ϵ	Điện dẫn suất [S/m]
Bán dẫn ở điện cực giữa	50	6.10^3

Thông số kỹ thuật thử nghiệm điện áp xoay chiều nêu rõ rằng các mối nối cáp phải được thử nghiệm ở $2,5 U_0$ trong 15 phút mà không có sự cố. Do vậy, trong luận văn này, cấu trúc cáp điện cho điện áp 220 kV nên điện áp xung là 700 kV đã được áp dụng trong mô phỏng mối nối. Nhiệt độ môi trường là 30°C . Dòng điện trong lõi dẫn là 1000 A.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Phân bố nhiệt độ

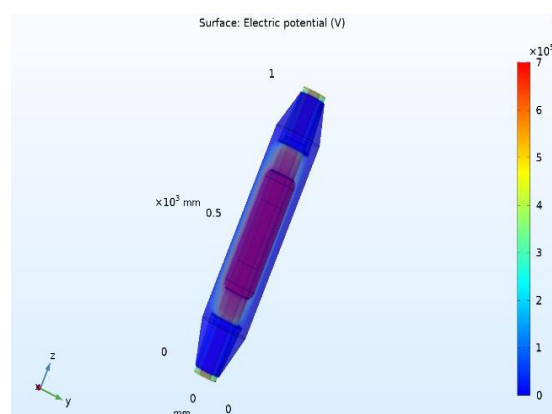
Sau khi đặt dòng điện vào lõi dẫn của cáp, suất hiện sự phát nóng trong cáp dưới tác dụng của hiệu ứng Joule, nhiệt lượng sẽ tỏa ra từ lõi đồng đi ra phía bên ngoài dọc theo bán kính của cáp và đầu nối, gây ra sự chênh lệch nhiệt độ giữa lõi dẫn tới lớp ngoài của đầu nối cáp. Sau khi làm việc ở chế độ ổn định, sự phân bố nhiệt độ được thể hiện trong hình 2.



Hình 2. Sự phân bố nhiệt độ trong phần đầu nối cáp

Với dòng điện đặt trong dây dẫn, sau một thời gian ổn định, nhiệt độ của lõi cáp đạt nhiệt độ xấp xỉ 73°C , bên ngoài lớp cách điện của đầu nối cáp đạt được là 38°C , độ chênh lệch nhiệt độ giữa lớp bên trong và bên ngoài là 35°C .

Điện áp 3D của mô hình đề xuất được đưa ra trong hình 3.



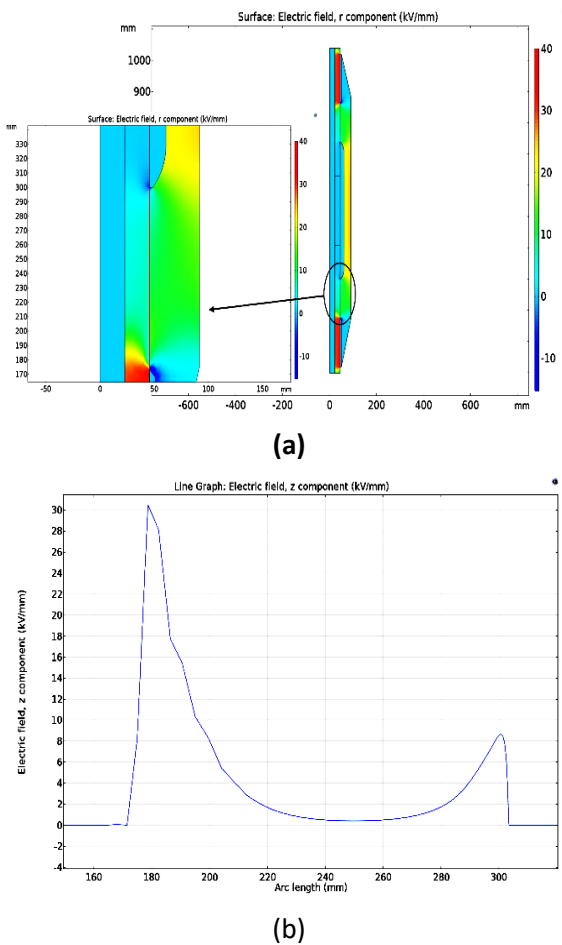
Hình 3. Hình ảnh 3D của đầu nối cáp và phân bố điện áp

4.2. Phân bố điện trường trong cáp và đầu nối

Đối với thiết kế mối nối kiểm soát ứng suất điện trường theo hình phẳng, sự phân bố điện trường được thể hiện trong hình 4. Ở đây, các vùng tối hạn phải được xác định từ sự phân bố điện trường theo hướng của thành phần z (dọc theo chiều dài của đầu nối cáp). Sự phân bố điện trường trong vùng đường màu đỏ (nơi tiếp giáp giữa 2 vật liệu cách điện) được chỉ ra trong hình 4.

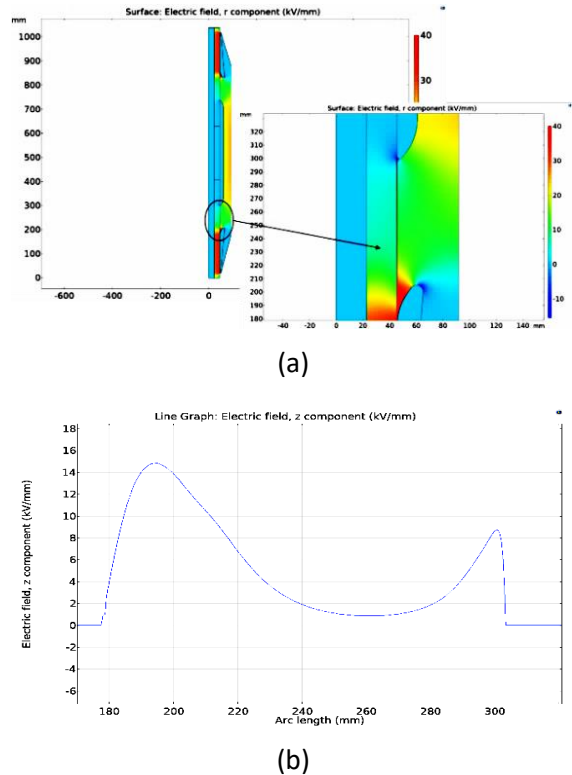
Quan sát thấy giá trị điện trường đạt xấp xỉ 31 kV/mm ở các vùng quan trọng. Giảm giá trị này ở các khu vực quan trọng là cần thiết cho sự an toàn của linh kiện.

Trong trường hợp này, cùng với sự biến dạng của lớp cách điện, sự cố sẽ xảy ra do phóng điện cục bộ và đánh thủng. Ngay cả khi việc tăng kích thước của vật liệu cách điện cho phép giảm điện trường ở những khu vực tiếp giáp giữa 2 vật liệu này, thì đây không phải là một cách tiếp cận hiệu quả.



Hình 4. Điện trường phân bố dọc mặt tiếp giáp của 2 vật liệu XLPE và EPDM khi điều khiển ứng suất điện trường là hình phẳng; (a) theo phổ màu, (b) theo đường cong

Do đó, một thiết kế hình nón ứng suất tối ưu có thể cung cấp khả năng kiểm soát ứng suất trong vùng này. Phân bố điện trường được thể hiện trong hình 5.

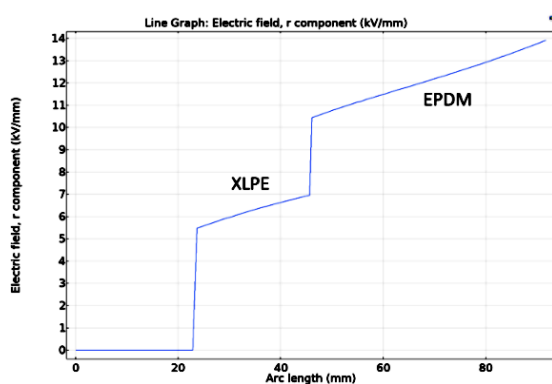


Hình 5. Điện trường phân bố dọc mặt tiếp giáp của 2 vật liệu XLPE và EPDM khi điều khiển ứng suất điện trường là hình nón; (a) theo phổ màu, (b) theo đường cong

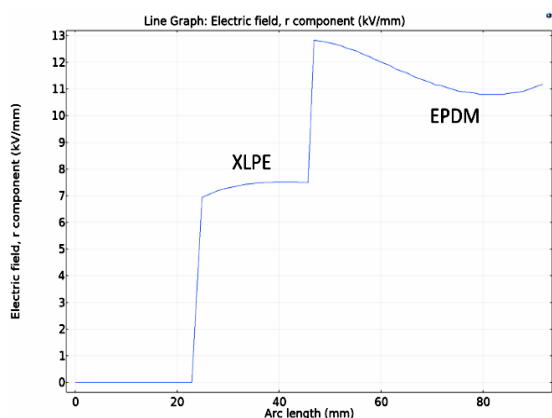
Khi sử dụng cấu trúc hình học này, điện trường lớn nhất có thể quan sát thấy có giá trị xấp xỉ 15 kV/mm ở khu vực quan trọng của đầu nổi, giảm $\frac{1}{2}$ lần so với cấu trúc hình học phẳng (hình 4). Trong khi xác định thiết kế hình học cho ứng suất hình nón tối ưu, ảnh hưởng của khoảng cách giữa hình nón ứng suất và điện cực giữa, là một trong những thông số quan trọng nhất, đến sự phân bố điện trường ở các vùng quan trọng đã được khảo sát. Sự thay đổi của các giá trị điện trường ở các vùng khác nhau theo khoảng cách giữa điện cực giữa và ứng suất hình nón như thể hiện trong hình 8. Giá trị điện trường tăng ở các vị trí gần điện cực giữa và ứng

suất hình nón, giảm dần ở khu vực giữa và đạt giá trị nhỏ nhất ở khoảng 2/3 khoảng cách từ ứng suất hình nón đến điện cực giữa.

Ngoài ra, sự phân bố điện trường theo bán kính của cáp và đầu nối giữa 2 cấu trúc hình học của ứng suất điện trường ở vị trí chiều dài 800 mm đầu nối cũng được thể hiện trong hình 6.



(a)



(b)

Hình 6. Sự phân bố điện trường theo bán kính của cáp và đầu nối, (a) hình phẳng; (b) hình nón

Giá trị điện trường trong lớp cách điện của cáp (XLPE) của 2 cấu trúc hình học đạt giá trị max xấp xỉ bằng nhau, tuy nhiên trong trường hợp ứng suất hình nón

có sự chênh lệch nhỏ hơn so với cấu trúc phẳng giữa phần bên trong lõi và bên ngoài tiếp giáp với cách điện của đầu nối. Trong vật liệu EPDM, giá trị điện trường trong cấu trúc hình nón có xu hướng giảm trong khoảng giữa của độ dày vật liệu, giá trị điện trường đạt cực đại nhỏ hơn so với cấu trúc phẳng.

Như vậy, ứng suất hình nón là thành phần quan trọng nhất của mối nối, giúp giảm ứng suất điện trường tối đa xuất hiện tại điểm tới hạn nơi kết thúc trong quá trình nối cáp, do đó ngăn ngừa các vấn đề phóng điện cục bộ và cách điện. Trong các phân tích, ảnh hưởng của hình học trong đầu nối đối với cường độ điện trường tiếp tuyến trong các bề mặt vật liệu đã thể hiện rõ ràng, giá trị điện trường trong vùng tới hạn đã được giảm xuống bằng cách sử dụng thiết kế ứng suất hình nón.

5. KẾT LUẬN

Thiết kế tối ưu ngày càng trở nên quan trọng với việc sử dụng rộng rãi các loại cáp và kết nối cáp ở các mức điện áp cao. Một trong những thành phần quan trọng nhất trong thiết kế đầu nối là việc tạo ra một cấu trúc điều khiển ứng suất điện tối ưu. Đặc biệt, xác định và giảm điện trường cao nhất trên mối nối là một yếu tố quan trọng về phóng điện cục bộ. Trong nghiên cứu, ứng suất điện trường được tạo ra bởi mức điện áp cao tại các điểm tới hạn đã được phân tích, so sánh thông qua mô phỏng. Với ứng dụng của phần mềm mô phỏng ta có thể dự báo sự phân bố điện trường một cách khá chính xác trong

đầu nổi cáp dưới những ràng buộc về nhiệt và điện. Do vậy, ứng dụng này có thể giúp các nhà chế tạo cáp điện dự đoán được sự phân bố điện trường dưới các điều kiện làm khác nhau để đưa ra được những điều kiện làm việc tốt nhất cho các

loại cáp cụ thể. So sánh hai loại đầu nổi cáp có cấu trúc hình học phần điều khiển ứng suất điện khác nhau, ta thấy sử dụng cấu hình ứng suất hình nón làm giảm cường độ điện trường tối đa bên trong đầu nổi cao áp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C.-K. Chang, C.-S. Lai, and R.-N. Wu, "Decision tree rules for insulation condition assessment of pre-molded power cable joints with artificial defects," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 26, no. 5, pp. 1636–1644, 2019.
- [2] J. H. He, K. He, and L. F. Cui, "Charge-simulation-based electric field analysis and electrical tree propagation model with defects in 10 kV XLPE cable joint," Energies, vol. 12, no. 23, Article ID 4519, 2019.
- [3] L. Zhang, X. LuoYang, Y. Le, F. Yang, C. Gan, and Y. Zhang, "A thermal probability density-based method to detect the internal defects of power cable joints," Energies, vol. 11, no. 7, Article ID 1674, 2018.
- [4] F. Yang, K. Liu, P. Cheng et al., "The coupling fields characteristics of cable joints and application in the evaluation of crimping process defects," Energies, vol. 9, no. 11, p. 932, 2016.
- [5] M. Letvenuk, M. Beninca, H. Noglik, and P. Sheridan, "The use of shear responsive stress control mastics as void fillers in medium voltage cable accessories," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 33, no. 2, pp. 16–23, 2017.
- [6] J. Frobin, C. F. Niedik, C. Freye, J. Frank, D. Haring, and G. Schroder, "Generic approach for HVDC cable accessories modelling," in Proceedings of the IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD), Budapest, Hungary, July 2018.
- [7] H. Ghorbani, M. Jeroense, C. O. Olsson, and M. Saltzer, "HVDC cable systems-highlighting extruded technology," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 1, pp. 414–421, 2014.
- [8] T. Christen, L. Donzel, and F. Greuter, "Nonlinear resistive electric field grading part 1: theory and simulation," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 26, no. 6, pp. 47–59, 2010.
- [9] Blake A.E., Clarke G.J., Starr W.T. , "Improvements In Stress Control Materials ", Transmission and Distribution Conference and Exposition, 1979.
- [10] Gokcen Ba, "Electric field analysis in controlled high voltage cables" Thesis of Graduate School of Natural and Applied Sciences, 2005.
- [11] G. Mazzanti and M. Marzinotto, Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission, Wiley-IEEE Press. New Jersey, 2013.
- [12] Riccardo Bodega, Space Charge Accumulation in Polymeric High Voltage DC Cable Systems. Politecnico di Milano geboren te Lecco, 2006.

- [13] T. T. N. Vu, G. Teyssedre, B. Vissouvanadin, S. Le Ro, and C. Laurent, "Correlating Conductivity and Space Charge Measurements in Multi-dielectrics Under Various Electrical and Thermal Stresses," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 22, no. 1, pp. 117–127, 2015.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Vũ Thị Thu Nga tốt nghiệp đại học ngành hệ thống điện năm 2004, nhận bằng Thạc sĩ ngành kỹ thuật điện năm 2007 tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; nhận bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện tại Đại học Toulouse - Pháp năm 2014. Hiện nay tác giả là giảng viên Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: tích điện không gian, HVDC, vật liệu cách điện, kỹ thuật điện cao áp, rơle và tự động hóa trạm.

