

ẢNH HƯỞNG CỦA KHUYẾT TẬT TRONG CÁCH ĐIỆN ĐẾN SỰ PHÂN BỐ ĐIỆN TRƯỜNG CỦA CÁP TRUNG ÁP XLPE

EFFECT OF INSULATION DEFECTS ON ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN MV CABLE XLPE

Vũ Thị Thu Nga

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 14/6/2023 Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2023, Phản biện: TS Nguyễn Hữu Kiên

Tóm tắt:

Cáp điện là thành phần quan trọng trong hệ thống truyền tải và phân phối điện. Trong quá trình chế tạo cáp, mọi quy trình của nhà sản xuất đều hướng tới chất lượng cáp hoàn toàn theo thiết kế, không khuyết tật. Tuy nhiên, trong quá trình chế tạo và vận hành cáp các khuyết tật có thể xuất hiện ở các vị trí, có tính chất và hình dạng kích thước khác nhau trong vật liệu cách điện. Ảnh hưởng của tất cả các yếu tố tạo nên khuyết tật đối với sự phân bố điện trường là một trong những nguyên nhân gây ra sự cố trong cáp và hệ thống điện. Sự thay đổi của phân bố điện trường khi xuất hiện khuyết tật là hạt không khí và tạp chất đồng trong cách điện cáp XLPE được phân tích trong bài báo.

Từ khóa:

Cáp cao áp, phân bố điện trường, khuyết tật trong cáp.

Abstract:

Power cables are of importance in power transmission and distribution systems. During cable production, the procedures must be followed at every stage of production and quality control must be done precisely to have the cable quality completely by design, without defects. However, during the manufacture and operation of cables, defects may appear in different locations, shapes and sizes in the insulating material. The influence of defects on the electric field distribution is the causes of failure in the cable and electrical system. The change of electric field distribution when the defects are air particles and copper impurities in XLPE cable insulation are analyzed in the paper.

Keywords:

High voltage cable, electrical field distribution, defect in cable.

1. GIỚI THIỆU

Ở điều kiện làm việc với điện áp cao dễ dàng làm xuất hiện sự cố trong cách điện của cáp. Để hạn chế vấn đề này, việc lựa chọn vật liệu cách điện và các công đoạn sản xuất cáp phải được thực hiện một

cách cẩn thận, chất lượng và đúng quy trình. Lớp cách điện chính là lớp quan trọng nhất của cáp điện cao áp và chất lượng của vật liệu này ảnh hưởng trực tiếp đến tuổi thọ của cáp [1], [2], [3]. Khi có sự thâm nhập của các khuyết tật

do các hạt lạ tiếp xúc trong vật liệu cách điện cáp, ảnh hưởng dễ nhận thấy của các khuyết tật này là gây ra phóng điện cục bộ, tại khu vực xảy ra chúng và gây ra sự biến dạng trong phân bố điện trường [4] dẫn tới sự phân bố điện trường không đồng nhất trong lớp cách điện cáp có thể làm vượt quá giá trị của độ bền điện môi và gây hư hỏng cáp, mối nối cáp và đầu cáp [5], [6].

Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện về ảnh hưởng của khe hở cách điện đối với hiện tượng phóng điện cục bộ và tuổi thọ của cáp. Phóng điện cục bộ xảy ra tại nơi có các lỗ khí trong cách điện của cáp khi điện trường tác động lên các lỗ khí vượt quá cường độ điện trường đánh thủng của nó. Sự phóng điện này có thể dẫn đến hư hỏng vật liệu cách điện và do đó dẫn đến sự cố hoàn toàn, có thể gây nguy hiểm cho toàn bộ hệ thống [7]. Uydur và đồng nghiệp đã thực hiện mô phỏng điện trường và từ trường trong cáp cách điện XLPE có cấu trúc $3 \times (1 \times 240/25) \text{ mm}^2$ và $3 \times 240/25 \text{ mm}^2$ khi xảy ra mất cân bằng tải trong 3 lõi cáp và với các hình dạng khuyết tật khác nhau [2]. Illias và nhóm nghiên cứu đã kiểm tra bằng thực nghiệm hiện tượng phóng điện cục bộ hình thành bởi các hốc khí hình cầu trong chất cách điện rắn vào năm 2009 và đưa ra các định nghĩa từ kết quả đo phóng điện cục bộ. Sau đó, nhóm đã được nghiên cứu mô hình mô phỏng nhằm so sánh với kết quả thực nghiệm [8].

Trong nghiên cứu này, sự phân bố điện trường được mô phỏng khi có xuất hiện các khuyết tật có tính chất khác nhau là lỗ

khí hoặc hạt nước xâm nhập vào trong lớp cách điện của cáp XLPE. Cáp được sử dụng trong nghiên cứu là cáp lõi đơn bán kính 4 mm, điện áp đặt vào lõi dẫn là 40 kV ở nhiệt độ môi trường 30°C. Các kết quả được phân tích cho từng trường hợp khuyết tật và so sánh ở các loại khuyết tật khác nhau sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM).

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

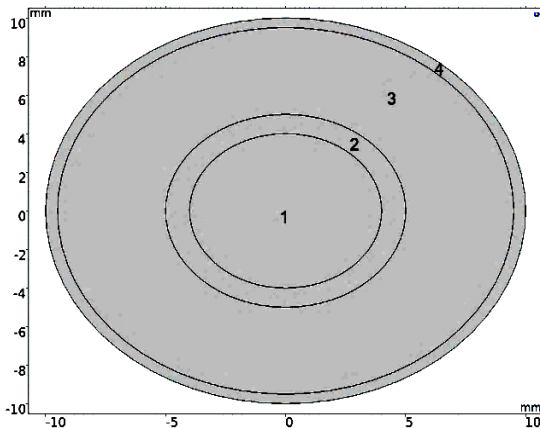
Một trong những bài toán quan trọng nhất của các phép giải tích dùng trong kỹ thuật điện cao thế là phân tích sự phân bố điện trường, là nghiệm của các phương trình Laplace và Poisson. Đặc biệt là trong các trường hợp có hình học phức tạp, sự phân bố của điện trường càng trở nên phức tạp và khó phân tích cụ thể. Cáp điện cao áp có cấu trúc hình trụ và các phương trình điện trường của hệ tọa độ hình trụ được sử dụng để phân tích chúng. Phương trình (1) là biểu thức điện trường được đưa ra cho cáp lõi đơn [9].

$$E = \frac{1}{r} \frac{U_0}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1)$$

Trong đó, r (mm) là bán kính tại vị trí tính toán điện trường, r_1 (mm) là bán kính lõi dẫn (bán kính trong), r_2 (mm) là bán kính lớp vỏ cáp (bán kính ngoài), U_0 (kV) là điện áp pha đặt vào cáp.

Việc tính toán phân tích điện trường là khó khăn, đặc biệt là trong trường hợp có các khuyết tật tồn tại trong cách điện cáp, vì các vật liệu lạ trong vật liệu cách điện của cáp không thể dự đoán được hình dạng và kích thước. Do vậy, khi sử dụng

các phương pháp số ở điều kiện điện trường không đồng nhất, với sự biến thiên của nhiệt độ và kích thước khác nhau của khuyết tật có thể làm số lượng tính toán tăng rất nhiều và không thể thực hiện vô hạn. Comsol là một phần mềm mô phỏng sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng trong các phân tích của nghiên cứu này. Ý tưởng chính của FEM là chia khu vực đang nghiên cứu thành các phần tử nhỏ, trong đó độ lớn của mọi trường được lấy bằng một hàm. Điện áp có thể được sử dụng làm cường độ trường khi các trường điện tĩnh được nghiên cứu giảm thiểu các giao diện từ truyền nhiệt và dòng chất lỏng đến kết cấu cơ học.



Hình 1. Cấu trúc cáp XLPE

(1) lõi dẫn; (2) lớp bán dẫn bên trong; (3) cách điện cáp XLPE; (4) lớp bán dẫn bên ngoài

Các tính toán được thực hiện trên mô hình đối xứng trục không gian (2D) của hình học cáp một lõi dưới hai mô đun sử dụng trong phần mềm mô phỏng là trao đổi nhiệt và dòng điện để phân tích rõ sự phân bố điện trường với sự biến thiên của nhiệt độ trong cách điện cáp dưới tác dụng của điện trường ngoài. Sự phân bố điện trường trong cấu trúc của cáp được

mô phỏng, phân tích trên mô hình cấp thể hiện trong Hình 1.

Các thông số liên quan đến cáp sẽ được phân tích và các đặc tính điện của vật liệu được sử dụng trong mô Hình cấp được đưa ra trong Bảng 1.

Bảng 1. Đặc tính vật liệu của cáp XLPE được sử dụng trong mô phỏng

Vật liệu	Hằng số điện môi ϵ	Điện dẫn suất [S/m]
Lõi cáp	6	$5,998.10^7$
Lớp bán dẫn	50	6.10^3
XLPE	2,3	$\sigma (T,E)$, phụ thuộc vào nhiệt độ và điện trường [10]

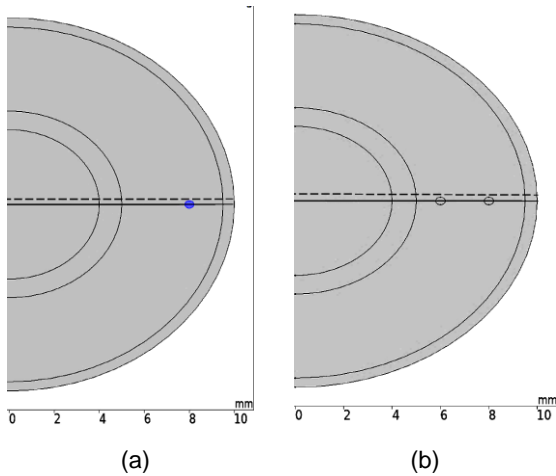
Các loại khuyết tật khác nhau như lỗ khí hoặc tạp chất đồng (của lõi cáp) đã được sử dụng để mô hình hóa rõ hơn các khuyết tật có thể xảy ra trong quá trình sản xuất và vận hành cáp.

Bảng 2. Đặc tính của vật liệu khuyết tật trong cách điện cáp

Vật liệu	Hằng số điện môi ϵ
Không khí	1
Đồng	6

Khuyết tật có hình trụ tròn, bán kính là 0,2 mm, vị trí của khuyết tật nằm trong lớp cách điện của cáp, khoảng cách của tâm khuyết tật với bề mặt cách điện bên trong là 3 mm.

Tất cả các kết quả mô phỏng được lấy phân tích trên mặt cắt đi qua khuyết tật và khu vực lân cận khuyết tật khi có 1 vị trí khuyết tật (hình 2a) và khi có 2 vị trí khuyết tật (Hình 2b).



Hình 2. Vị trí khuyết tật và mặt cắt lấy thông số điện trường. (a) có 1 vị trí khuyết tật, (b) có 2 vị trí khuyết tật; (đường nét liền) đi qua khuyết tật, (đường nét đứt) lân cận với khuyết tật

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

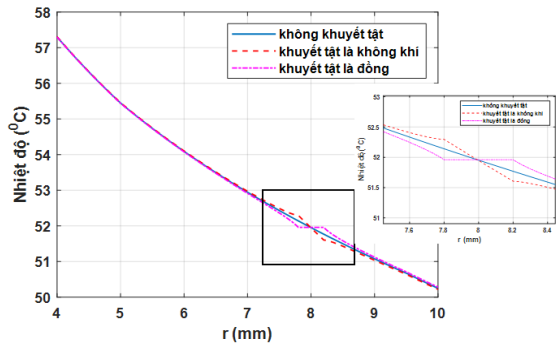
3.1. Trường hợp có 1 vị trí khuyết tật trong cách điện cáp

Khi cáp làm việc, dòng điện lõi dẫn của cáp gây ra 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, xuất hiện sự chênh lệch nhiệt độ giữa lõi dẫn tới lớp ngoài của vỏ cáp.

Sau khi làm việc ở chế độ ổn định, sự phân bố nhiệt độ khi chỉ có một vị trí khuyết tật được thể hiện trong Hình 3 khi không có khuyết tật, khuyết tật là không khí và khuyết tật đồng.

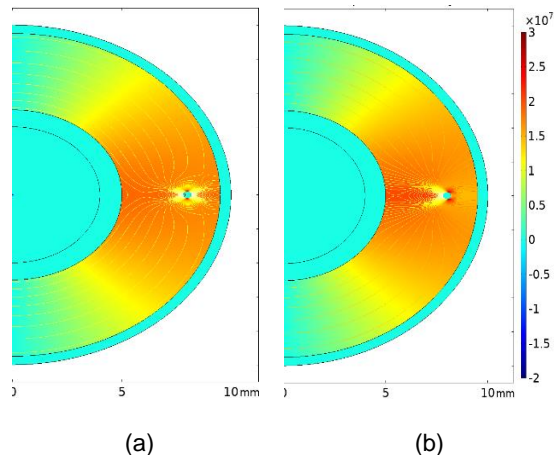
Với dòng điện đặt trong dây dẫn, sau một thời gian ổn định, nhiệt độ của lõi cáp đạt nhiệt độ xấp xỉ $57,3^{\circ}\text{C}$, bên ngoài lớp cách điện của đầu nối cáp đạt được là $50,3^{\circ}\text{C}$, độ chênh lệch nhiệt độ giữa lớp bên trong và bên ngoài là 7°C . Tại vị trí tồn tại khuyết tật, nhiệt độ có sự thay đổi

so với trường hợp không có khuyết tật trong cách điện cáp. Khi khuyết tật là lỗ khí, nhiệt độ chênh lệch dọc theo bán kính của cáp tăng, trong khi đó khuyết tật là tạp chất đồng thì nhiệt độ gần như không thay đổi dọc theo bán kính cáp.



Hình 3. Sự phân bố nhiệt độ dọc theo bán kính cáp khi không và có một loại khuyết tật (a), tại vị trí khuyết tật (b)

Dưới điện áp đặt 80 kV (tương ứng với điện áp thử nghiệm gấp 2,5 lần U_0). Đối với khuyết tật là lỗ khí hoặc tạp chất đồng trong cách điện cáp, phân bố điện trường được thể hiện theo bảng màu trên mặt cắt dọc theo bán kính của cáp được trình bày trong Hình 4.



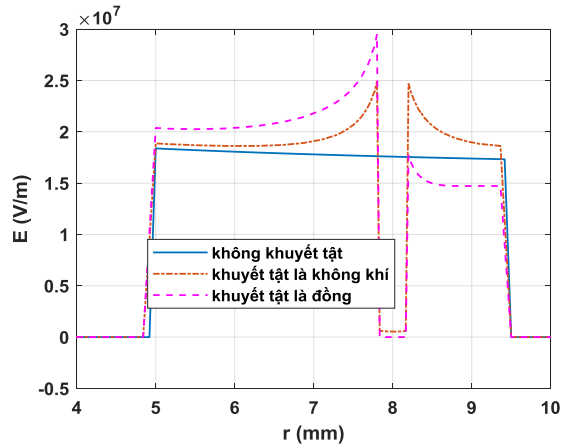
Hình 4. Phân bố điện trường theo bảng màu khi có 1 vị trí khuyết tật, (a) không khí, (b) tạp chất đồng

Rõ ràng là sự phân bố của điện trường bên trong cách điện khi có khuyết tật sẽ không còn đồng đều ở tất cả vị trí trong cách điện, điện trường bị tăng cường quang khu vực xuất hiện khuyết tật. Do sự khác biệt về hằng số điện môi đối với các vật liệu khác nhau, phân bố điện trường quan sát thấy rằng có sự thay đổi điện trường cả về cường độ và khu vực là khác nhau.

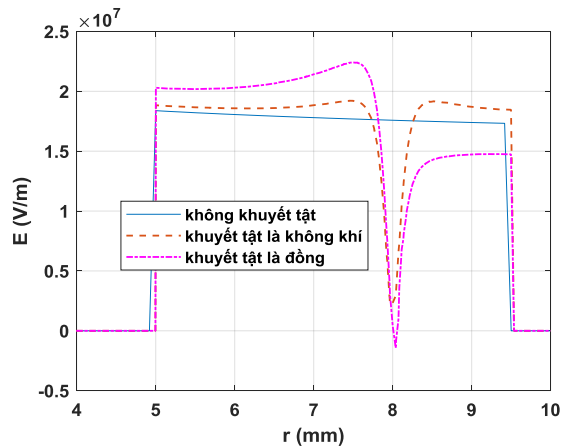
Phân tích điện trường ở khu vực mặt cắt đi qua tâm của khuyết tật (theo đường nét liền Hình 2a), sự phân bố điện trường được chỉ ra trong Hình 5a. Khi xuất hiện khuyết tật, điện trường tăng dần từ lõi cáp đến vị trí có khuyết tật. Đối với khuyết tật là không khí, điện trường tăng xấp xỉ 39%, giá trị điện trường đạt tới $2,5 \cdot 10^7$ V/m tại vị trí khuyết tật phía bên trái (gần lõi cáp), sau đó giảm dần đến $1,9 \cdot 10^7$ V/m ở phía vỏ cáp. Khi khuyết tật là tạp chất đồng thì sự phân bố điện trường xảy ra rất không đồng đều ở hai phía trái và phải của khuyết tật: Điện trường tăng nhanh và vượt quá điện trường khi không có khuyết tật ngay từ vị trí lớp cách điện tiếp giáp lõi cáp, tăng từ $2,04$ đến $2,95 \cdot 10^7$ V/m; phía bên phải của khuyết tật, điện trường giảm thấp hơn so với trường hợp không có khuyết tật.

Quan sát thấy điện trường phân bố ở lân cận khuyết tật (theo mặt cắt đường nét đứt trong Hình 2a) có giảm hơn so với điện trường dọc theo mặt cắt qua tâm của khuyết tật (Hình 5b). Tuy nhiên, giá trị điện trường vẫn tăng cao hơn 20% (khuyết tật là tạp chất đồng) so với trường hợp không có khuyết tật trong lớp cách

điện cáp. Trong những trường hợp này, cùng với sự biến dạng của lớp cách điện, sự cố sẽ có thể xảy ra do phóng điện cục bộ và đánh thủng.



(a)



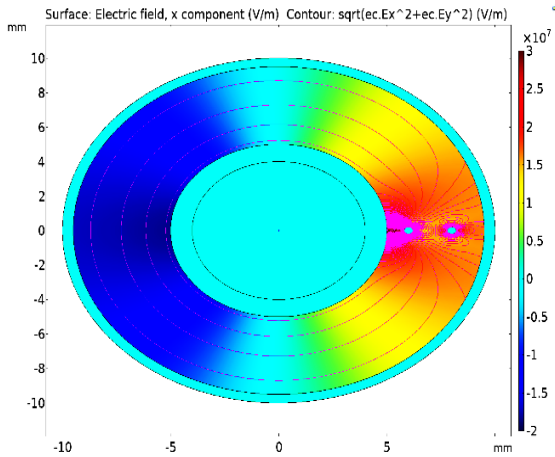
(b)

Hình 5. Phân bố điện trường khi không có khuyết tật và có 1 vị trí khuyết tật (theo hình 2a), (a) dọc theo phần mặt cắt đi qua tâm của khuyết tật và (b) lân cận khuyết tật

3.2. Trường hợp có 2 vị trí khuyết tật trong cách điện cáp

Khi xuất hiện cả tạp chất đồng và lỗ khí trong cách điện cáp, sự phân bố điện trường được thể hiện trên bảng màu trong hình 6. Sự tăng cường điện trường rất lớn

ở khu vực xuất hiện tạp chất, làm méo điện trường và dễ gây ra các hiện tượng phóng điện đánh thủng cách điện.

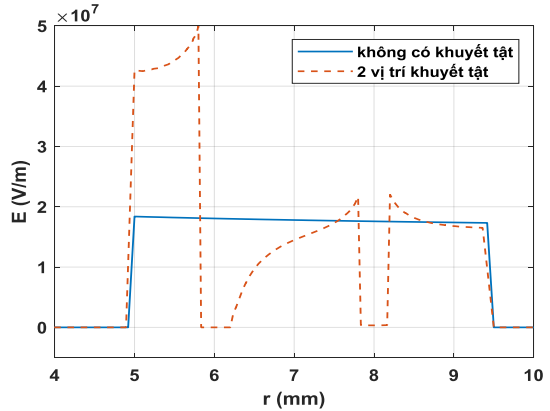


Hình 6. Phân bố điện trường theo bảng màu khi có 2 vị trí khuyết tật (vị trí bên trái là tạp chất đồng, bên phải là lỗ khí)

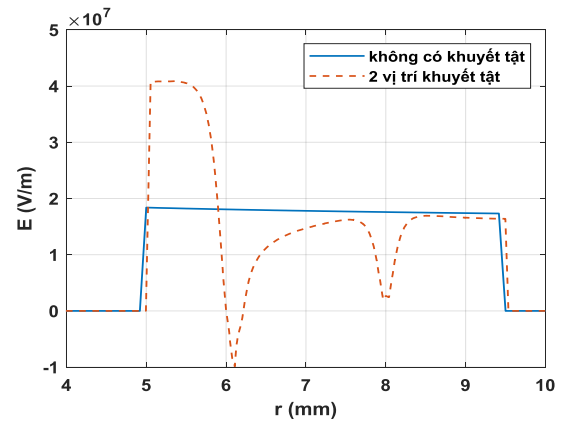
Hiện tượng méo điện trường trong cách điện cáp khi xuất hiện 2 vị trí khuyết tật là tạp chất đồng và lỗ khí được phân tích trong Hình 7. Tại khu vực mặt cắt đi qua tâm của các khuyết tật (Hình 7a), điện trường tăng mạnh tại khu vực có tạp chất đồng, giá trị đạt tới $5 \cdot 10^7$ V/m, gấp 2,5 lần so với trường hợp không có khuyết tật. So sánh với trường hợp chỉ có 1 vị trí khuyết tật là tạp chất đồng thì trong trường hợp này cường độ điện trường đã tăng lên tới 67%.

Ở vị trí lân cận với 2 vị trí khuyết tật (mặt cắt theo đường nét đứt Hình 2b), điện trường tăng cường mạnh (gấp 2 lần khi không có khuyết tật) ở vị trí khuyết tật là tạp chất đồng, sau đó giảm mạnh ở vị trí bán kính 6 mm, sau đó lại tăng trở lại tới vị trí của lỗ khí. Sự phân bố điện trường biến đổi rất lớn (tăng, giảm dọc theo bán kính của cáp) so với điện trường trong

trường hợp vật liệu lý tưởng, không khuyết tật.



(a)



(b)

Hình 7. Phân bố điện trường khi không có khuyết tật và có 2 vị trí khuyết tật (theo Hình 2a), (a) dọc theo phần mặt cắt đi qua tâm của khuyết tật và (b) lân cận khuyết tật

Một trong những kết quả có thể thu được từ sự phân tích phân bố điện trường khi xuất hiện khuyết tật trong cách điện cáp là ảnh hưởng rất quan trọng của dạng khuyết tật đối với sự phân bố điện trường. Cần thực hiện so sánh các dạng khuyết tật khác nhau có xác suất lớn xuất hiện trong cách điện cáp trong quá trình chế tạo và vận hành. Loại vật liệu tạo ra khuyết tật có thể ảnh hưởng khác nhau đến sự phân

bố điện trường ở các dạng khuyết tật khác nhau.

Từ kết quả thu được, để ngăn ngừa các vấn đề biến dạng trong quá trình sản xuất, các quy trình ở mọi giai đoạn sản xuất phải được tuân thủ cẩn thận và phải thực hiện kiểm soát chất lượng một cách chính xác. Trong quá trình vận hành cáp, hoạt động bảo trì được thực hiện tại hiện trường cần tuân thủ nghiêm ngặt đúng quy trình, tỉ mỉ và đánh giá kết quả nghiêm túc các thử nghiệm được thực hiện sau khi bảo trì.

5. KẾT LUẬN

Sự xuất hiện của các hạt lạ trong cách điện cáp sẽ gây ra sự thay đổi nghiêm trọng trong điện trường. Hiện tượng phóng điện cục bộ có thể xảy ra do sự thay đổi điện và do đó phá hủy lớp cách điện của cáp và khiến cáp bị lão hóa nhanh chóng.

Trong nghiên cứu này, các phân tích được thực hiện từ kết quả mô phỏng theo phương pháp phần tử hữu hạn, bằng cách sử dụng các loại vật liệu khuyết tật khác nhau ở cùng một vị trí trong cách điện cáp

nhưng các dạng biến dạng của điện trường là hoàn toàn khác nhau. Khi xuất hiện hai vị trí khuyết tật khác nhau trong cách điện, biến dạng điện trường thay đổi lớn hơn rất nhiều. Kết quả mô phỏng cho thấy sự phân bố điện trường phụ thuộc vào tính chất vật liệu của khuyết tật (lỗ khí, tạp chất đồng). Sự biến dạng của điện trường thay đổi nhiều hơn khi khuyết tật là tạp chất đồng do hằng số điện môi của đồng cao hơn so với không khí, đồng thời giá trị điện trường cực đại đạt được trong cách điện cáp có thể vượt ngưỡng chịu đựng của lớp cách điện cáp và gây ra đánh thủng cách điện, gây ra hư hỏng và sự cố trên toàn hệ thống.

Từ kết quả phân tích, để hạn chế tối đa sự xuất hiện của tạp chất trong cách điện cáp, tăng tuổi thọ làm việc của cáp thì quá trình chế tạo, vận hành và bảo dưỡng cáp phải tuân thủ theo một quy trình nghiêm ngặt, tỉ mỉ và chính xác cao.

LỜI CẢM ƠN

Cảm ơn PTN Laplace, Toulouse, Cộng hòa Pháp đã hỗ trợ phần mềm chuyên dụng COMSOL Multiphysics để mô phỏng trong nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lachini, S., Gholami, A., Mirzaie, M., "Determining Electric Field Distribution in High Voltage Cable in Presence of Cavity," *Univ. Power Eng. Conf. UPEC*, pp. 1–7, 2010.
- [2] Uydur, C. C., Arıkan, O., Kalenderli, O., "The Effect of Insulation Defects on Electric Field Distribution of Power Cables," *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl. ICHVE*, 2018.
- [3] T.T.N. Vu, G. Teysse, S. Le Roy and C. Laurent, "Space Charge Criteria in the Assessment of Insulation Materials for HVDC," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 3, pp. 1405–1415, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006059.
- [4] Zigan, L, "Overview of Electric Field Applications in Energy and Process Engineering," *Energies*, vol. 11, pp. 1161–1193, 2018.

- [5] N. Adi, G. Teyssedre, T.T.N. Vu, N.I. Sinisuka, "DC field distribution in XLPE-insulated DC model cable with polarity reversal and thermal gradient," *IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl. ICHVE*, pp. 1–4, 2016, doi: 10.1109/ICHVE.2016.7800612.
- [6] T.T.N. Vu, G. Teyssedre, S. Le Roy, T.T. Anh, T.S. Trần, "Distribution de champ dans des jonctions de câbles HVDC en situation instationnaire," *Symp. Génie Electrique SGE*, 2020.
- [7] Stancu, C., Notingher, P., Ciuprina, F., Notingher Jr. P., Castellon, J., Agnel, S., & Toureille, A., "Computation of the Electric Field in Cable Insulation in the Presence of Water Trees and Space Charge," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 1, pp. 30–43, 2009.
- [8] Ilias, H. A., Tunio, M. A., Mokhlis, H., Chen, G., & Bakar, and A. H. A, "Experiment and modeling of void discharges within dielectric insulation material under impulse voltage," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 4, pp. 2252–2260, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.004817>.
- [9] Meunier, G., *The Finite Element Method for Electromagnetic Modeling.*, Wiley Publishing, New Jersey, United States. 2008.
- [10] T.T.N. Vu, G. Teyssedre, B. Vissouvanadin, S. Le Roy, C. Laurent, "Correlating conductivity and space charge in multi-dielectrics under various electrical and thermal stresses," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 1, pp. 117–127, 2015, doi: 10.1109/TDEI.2014.004507.

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.