

MÔ PHÒNG SỰ PHÂN BỐ NHIỆT VÀ ĐIỆN TRƯỜNG TRONG KHỚP NỐI CÁP HVDC SỬ DỤNG MÔ HÌNH VĨ MÔ

MODELLING TEMPERATURE AND ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN HVDC CABLE JOINTS USING MACROSCOPIC MODEL

Vũ Thị Thu Nga, Trần Thanh Sơn, Trần Anh Tùng

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 28/8/2018, Ngày chấp nhận đăng: 20/12/2018, Phản biện: TS. Hoàng Mai Quyền

Tóm tắt:

Hệ thống truyền tải điện một chiều đang được phát triển mạnh hiện nay nhằm kết nối phụ tải với nguồn năng lượng phân tán với mục đích đồng bộ hóa giữa các mạng lưới HVAC khác nhau. Xu hướng cáp được sử dụng hiện nay cho hệ thống HVDC là cáp có cách điện tổng hợp dựa trên vật liệu polyetylen, nó dần thay thế cho cáp cách điện bằng giấy tẩm dầu do có một số lợi ích vượt trội. Tuy nhiên, một trong những vấn đề quan trọng với các vật liệu tổng hợp này là cần phải ngăn chặn sự tích lũy điện tích không gian là tác nhân gây ra các hỏng hóc sớm đối với hệ thống cáp. Đặc biệt với các phụ kiện như khớp nối cáp và các đầu nối chính là các điểm yếu trong hệ thống cáp, liên quan đến sự phân bố điện trường nguy hiểm do sự liên kết của các cách điện có tính chất khác nhau. Mục đích của nghiên cứu này là cung cấp phương pháp mô phỏng các hiện tượng trạng thái nhất thời và ổn định xảy ra trong các hệ thống cáp và thiết bị phụ kiện HVDC, với sự xem xét các điều kiện không cân bằng nhiệt trên cáp. Nghiên cứu dựa trên các dữ liệu thực nghiệm được mô hình hóa của vật liệu cách điện cấu thành lên cáp và thiết bị phụ kiện trên hệ thống được lấy từ trường hợp thực tế. Nghiên cứu sẽ cho phép dự đoán, phân bố nhiệt độ và biến dạng điện trường dưới các điều kiện ứng suất điện và nhiệt trong hệ thống cáp và thiết bị đầu nối.

Từ khóa:

Cáp HVDC, khớp nối cáp, phân bố điện trường, phân bố nhiệt độ.

Abstract:

Energy transport through High Voltage Direct Current links are currently being developed for the connection to distributed electrical energy sources for synchronization purpose among various HVAC networks. Oil-impregnated paper insulated cables represent reliable solutions and tend to be replaced by synthetic insulation based on polyethylene materials. One of the key issues with these synthetic materials is the need to prevent space charge accumulation, which represents an early failure mechanism for cables. Specifically, accessories like cable joints and terminations represent weak points in the cable, particularly as regards the hazardous field distribution resulting from the association of insulations of different nature. The aim of this research is to provide modelling approaches of transient and steady state phenomena occurring in HVDC cable systems, with consideration of non-equilibrium thermal conditions on the cables. The project is based on experimental data on insulating materials constituting the modelled accessories and system design taken from a real case study. It will enable to predict temperature distribution and associated field distortion as a function of stressing condition and thermal environment.

Keywords:

HVDC cable, cable joints, field distribution, temperature distribution.

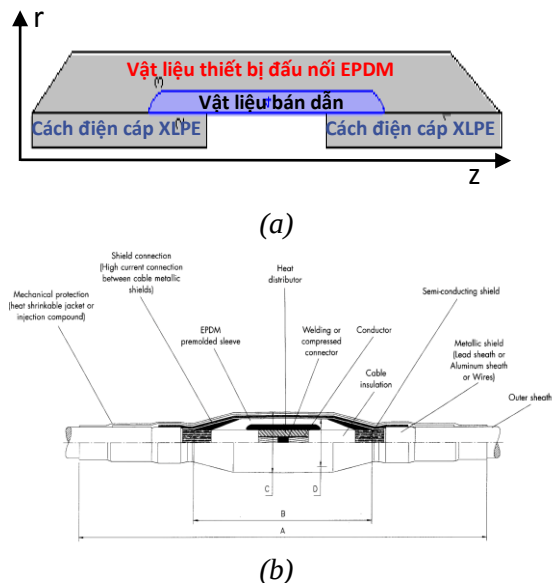
1. GIỚI THIỆU

Thị trường cho kết nối cáp một chiều cao áp (HVDC) cách điện polymer đã tăng lên đáng kể trong thập kỷ qua, do sự phát triển của các nguồn điện phân tán và truyền tải điện đi xa [1]. Để đáp ứng công suất truyền tải cao hơn, điện áp hệ thống đã tăng dần từ 80 kV, lên các hệ thống HVDC 320 kV và hiện tại là hơn 500 kV [2]. Mức tăng điện áp làm tăng đáng kể về hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống cáp. Bên cạnh cáp, chất lượng của các phụ kiện như đầu mối và khớp nối đúc sẵn HVDC cũng đóng một vai trò quan trọng. Do có số lượng lớn các khớp nối cáp trong hệ thống HVDC nên việc thiết kế phải có hiệu quả về chi phí, trong đó chi phí do sửa chữa và thời gian ngừng hoạt động kéo dài là rất lớn, nó tăng lên đáng kể nếu các sự cố xảy ra trên biển. Vì những lý do này, sự chắc chắn trong thiết kế của các phụ kiện, khớp nối ngày càng trở nên vô cùng quan trọng và cần thiết để có thể chịu được áp lực điện gia tăng. Điện trường phải được điều khiển sao cho không vượt quá mức chịu đựng của vật liệu tương ứng trong bất kỳ phần tử nào của hệ thống. Trong các ứng dụng DC, phân loại điện trường tính chất điện trở là phổ biến, ngoài ra trong quá trình hoạt động điện trường trong thiết bị có thể được phân bố lại bằng cách điều khiển dòng điện rò [3]. Tuy nhiên, trong thực tế, phương pháp này có thể phức tạp vì điện trở suất của vật liệu phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ và điện trường [4].

Trong nghiên cứu này, một thiết kế chung cho khớp nối cáp DC được mô phỏng. Các hiện tượng của khớp nối, với các thông số vật liệu thực tế, dưới các ứng lực khác nhau đã được xem xét. Khớp nối được mô phỏng trong các điều kiện ứng suất nhiệt và điện khác nhau để kiểm tra độ bền của nó. Như sẽ được mô tả dưới đây, mục đích chính của nghiên cứu này là xem xét sự phân bố nhiệt độ và điện trường ở các vị trí có sự tiếp giáp giữa các vật liệu khác nhau trong khối thiết bị nối cáp. Điện trường tại các vị trí này bị chi phối bởi các tính chất vật liệu xung quanh rất nhạy cảm với sự thay đổi của nhiệt độ và điện trường [5], có thể gây ra các vấn đề về độ bền nghiêm trọng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cấu trúc hình học



Hình 1. Thiết kế chung được sử dụng trong mô phỏng: (a) mô hình mô phỏng, (b) cấu trúc chung của khớp nối cáp

Tất cả mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Comsol Multiphysics với cấu trúc hình học đối xứng trên 2D (hình 1a) lấy từ khối cấu trúc của khớp nối cáp cao áp từ nhà sản xuất Silec Cable (hình 1b: trục r thể hiện bán kính của khối khớp nối, trục z thể hiện chiều dài của khối khớp nối) [6].

Trong thiết kế này, khớp nối cáp tồn tại sự tiếp giáp giữa 2 vật liệu khác nhau XLPE/EPDM của cách điện cáp và vật liệu của khớp nối với độ dày của 2 lớp vật liệu tương ứng là 22,285/44,1 mm. Chiều dài của toàn bộ khớp nối trong cấu trúc được mô phỏng là 87,5 cm. Lõi cáp có bán kính là 22,285 mm (không thể hiện trong mô phỏng).

2.2. Vật liệu

Vật liệu được sử dụng trong cách điện cáp và khớp nối cáp tương ứng là XLPE và EPDM với tính chất của điện dẫn phụ thuộc vào nhiệt độ và điện trường theo công thức bán thực nghiệm 1 [7] [8]:

$$\sigma(T, E) = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T}\right) \cdot \sinh(B(T) \cdot E) \cdot E^\alpha \quad (1)$$

Trong đó:

A et α : hằng số;

E_a : năng lượng hoạt động của điện dẫn;

T : nhiệt độ;

E : điện trường đặt;

$B = a \cdot T + b$: thông số phụ thuộc vào nhiệt độ để tính đến sự thay đổi của ngưỡng điện trường vào nhiệt độ.

Dựa vào kết quả thực nghiệm đo dòng điện dưới các điều kiện khác nhau về

nhiệt độ và điện trường đặt, các giá trị trong công thức 1 được xác định trong bảng 1 [9].

Bảng 1. Các hệ số trong công thức của điện dẫn cho XLPE và EPDM (điện dẫn được đo bằng S/m)

	XLPE	EPDM
A (S.I)	$1,55 \cdot 10^{-3}$	0,19
E_a (eV)	1	0,44
B (m/V)	$1,38 \cdot 10^{-7}$ với $T \leq 313$ K	$4,8 \cdot 10^{-10} T$ $- 5,1 \cdot 10^{-7}$
	$-1,3 \cdot 10^{-9} T + 5,45 \cdot 10^{-7}$ với $T \geq 313$ K	
α	1,15	-0,42

2.3. Phương pháp mô phỏng

Trong nghiên cứu này, để tính toán sự phân bố nhiệt độ và điện trường ở các điều kiện khác nhau trong các khớp nối phân đoạn cáp cao áp, nhóm nghiên cứu đã sử dụng hai mô đun trong phần mềm Comsol Multiphysics là: mô đun truyền nhiệt (Heat Transfer) và mô đun dòng điện (Electric Currents).

Quá trình truyền nhiệt được mô tả là sự thay đổi năng lượng nhiệt do sự chênh lệch nhiệt độ. Quá trình trao đổi nhiệt diễn ra theo hướng chuyển nhiệt năng từ nơi có nhiệt độ cao đến nơi có nhiệt độ thấp. Có ba cơ chế liên quan đến việc truyền nhiệt là: dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ. Mô hình toán học sử dụng cho truyền nhiệt theo cơ chế dẫn nhiệt trong Comsol® ứng dụng trong vật liệu rắn thể hiện bởi phương trình sau:

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (2)$$

Trong đó: ρ , C_p , T , t và k tương ứng là mật độ, công suất nhiệt, nhiệt độ, thời gian và độ dẫn nhiệt của vật liệu. Q là nguồn nhiệt.

Các thông lượng nhiệt trao đổi bằng đối lưu bởi bề mặt của một chất rắn được đặt trong một chất lỏng được đưa ra bởi phương trình của Newton (công thức 2):

$$q_0 = h \cdot (T_{ext} - T_a) \quad (3)$$

Trong đó T_{ext} , T_a là nhiệt độ tương ứng ở bề mặt và ở xa phần tử làm nóng. H là hệ số đối lưu, hệ số này không phụ thuộc vào bản chất của bề mặt nhưng phụ thuộc vào các thuộc tính của chất lỏng và bản chất của dòng chảy.

Các thông lượng nhiệt trao đổi bởi bức xạ được thể hiện bởi biểu thức 3:

$$q = \varepsilon_{em} \cdot \sigma_s (T_{ext}^4 - T_a^4) \quad (4)$$

Ở đó σ_s là hằng số Stefan-Boltzmann $\sigma_s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, ε_{em} là hệ số phát xạ của bề mặt ($\varepsilon_{em} = 1$ cho bề mặt đen, $\varepsilon_{em} \ll 1$ cho bề mặt sáng). Trong trường hợp của cáp điện, chúng tôi giả thiết rằng quá trình phát xạ của bề mặt lớp bán dẫn (semi-conductor) trong cáp là 0,8.

Nguồn nhiệt lượng Q trong phương trình (2) thể hiện một năng lượng cho mỗi đơn vị thể tích. Trong trường hợp của các loại cáp điện, Q tương ứng là mật độ tiêu hao năng lượng bởi hiệu ứng Joule do dòng điện trong lõi cáp tạo ra. Do vậy mật độ tiêu hao năng lượng bởi hiệu ứng Joule trong lõi cáp có thể được thể hiện dưới công thức 5:

$$Q_{ame} = R_{T0} (1 + \alpha(T_{ame} - T_0)) \cdot I_{ame}^2 / S_{ame} \quad (5)$$

Trong đó: R_{T0} là điện trở trên một đơn vị chiều dài của dây dẫn ở nhiệt độ T_0

($3,87 \cdot 10^{-4} \text{ W.m}^{-1}$ cho đồng ở $T_0 = 20^\circ\text{C}$). I_{ame} và S_{ame} tương ứng là dòng điện và tiết diện của lõi cáp.

Trong quá trình làm việc của cáp điện, dưới tác động của các yếu tố điện áp và môi trường, sự tích điện sẽ hình thành và sự điện tích này (ρ) phụ thuộc vào điện trường E theo phương trình Maxwell-Gauss:

$$\nabla \cdot (\varepsilon E) = \rho \quad (6)$$

Khi điện tích xuất hiện và thay đổi theo thời gian sẽ làm biến đổi mật độ dòng điện J , mối liên quan được thể hiện qua phương trình vi phân:

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot J = 0 \quad (7)$$

Hơn nữa, theo định luật Ohm, mối liên hệ giữa điện trường, điện dẫn (σ) và mật độ dòng điện được thể hiện theo công thức:

$$J = \sigma \cdot E \quad (8)$$

Sự không đồng nhất của điện dẫn phụ thuộc vào điện trường là một phần và liên kết các phương trình khác nhau làm cho chúng ta khó có thể giải được hệ phương trình này theo phương pháp toán học đơn thuần. Đó là lý do mà chúng tôi sử dụng phương pháp số để giải quyết vấn đề này (sử dụng phần mềm chuyên dụng để giải quyết). Mô đun dòng điện được sử dụng trong mô phỏng với mục đích để giải một hệ phương trình gồm các phương trình khác nhau là (6), (7), (8).

2.4. Điều kiện mô phỏng

Mô phỏng được thực hiện trên vật liệu cách điện của cáp điện là XLPE và vật liệu của thiết bị đầu nối tiếp giáp với cáp điện là EPDM với sự phụ thuộc của điện

dẫn vào điện trường và nhiệt độ theo phương trình 1.

Giá trị đặt ban đầu:

- Về điện áp: điện áp đặt vào cáp là $V_{đặt} = 200 \text{ kV}$.
- Về dòng điện: dòng điện làm việc đi trong lõi cáp là $I_{lv} = 1000 \text{ A}$.
- Nhiệt độ môi trường là 20°C .
- Nhiệt độ ở thời điểm ban đầu là: $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Sự phân bố nhiệt độ và điện trường trong thiết bị đầu nối được mô phỏng theo thời gian, từ $t=0 \text{ s}$ đến $t=20000 \text{ s}$ và ở chế độ xác lập.

3. KẾT QUẢ

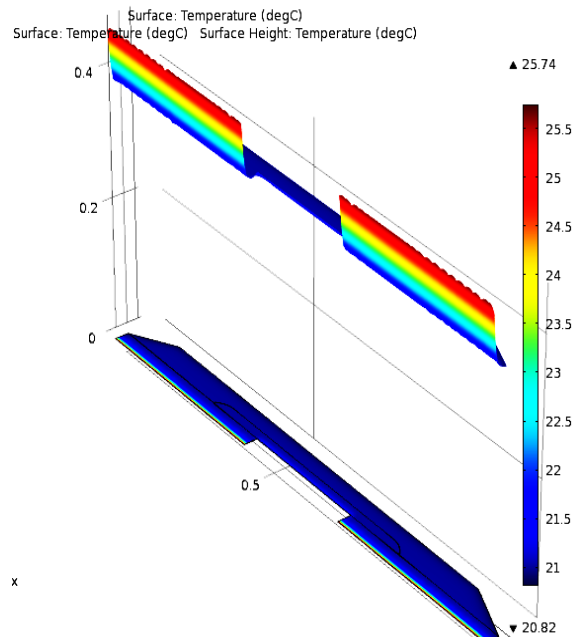
3.1. Phân bố nhiệt độ

Dưới tác động của dòng điện làm việc đi trong lõi cáp, theo hiệu ứng Joule sẽ có một lượng nhiệt phân bố trong cáp và lan truyền sang phần vật liệu của thiết bị đầu nối hình thành sự chênh lệch nhiệt độ trong khối thiết bị. Sự phân bố nhiệt độ theo thời gian đặt điện áp và dòng điện theo thang màu được thể hiện trong hình 2.

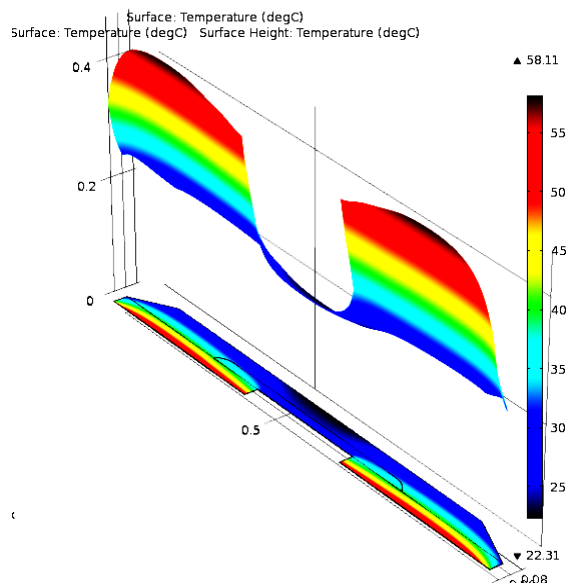
Ta nhận thấy rằng, nhiệt độ trong khối thiết bị được làm nóng lên theo thời gian từ trong lõi của cáp truyền qua cách điện cáp sang vật liệu của thiết bị đầu nối ra ngoài vỏ. Tuy nhiên, quan sát trên thang màu của sự phân bố nhiệt độ, sự truyền nhiệt ở phía cách điện của cáp điện là nhanh hơn so với sự truyền nhiệt ở trong phần vật liệu của khớp nối.

Hình 3 đưa ra một cách thể hiện khác về sự tiến triển của nhiệt độ dọc theo chiều

dài của bán kính khối thiết bị kết nối với thời gian khác nhau và ở thời điểm hệ thống đạt trạng thái ổn định.

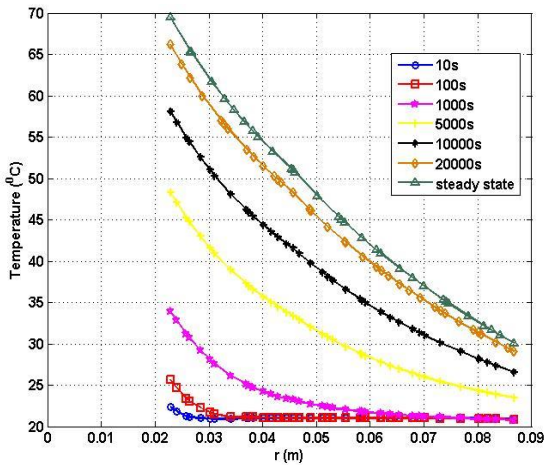


(a)



(b)

Hình 2. Sự phân bố nhiệt độ trong khối thiết bị đầu nối cáp cao áp ở thời gian $t = 100\text{s}$ (a), $t=10000\text{s}$ (b) được thể hiện theo thang màu (2D phía dưới, 3D phía trên)



Hình 3. Đường đặc tính phân bố nhiệt độ ở phần tiếp giáp giữa XLPE/EPDM trong khớp nối cáp cao áp ($z=76\text{cm}$) ở các thời gian khác nhau và ở chế độ xác lập

Ở thời điểm ban đầu, $t=10\text{ s}$ đến $t=1000\text{ s}$, nhiệt độ tăng một lượng nhỏ từ 20 đến 35°C phía trong cách điện của cáp, nhiệt độ phía ngoài của khớp nối gần như không thay đổi, xấp xỉ với nhiệt độ của môi trường (20°C). Sau khoảng thời gian $t = 20.000\text{ s}$, nhiệt độ tăng lên tới 65°C phía trong cách điện cáp nhưng nhiệt độ phía ngoài phần vật liệu của thiết bị đấu nối chỉ thay đổi gần 10°C . Tuy nhiên sau thời gian 20.000 s (hơn 5 giờ), hệ thống chưa đạt được chế độ ổn định về sự phân bố nhiệt độ. Nhiệt độ ở phía trong cách điện cáp và ngoài khớp nối đạt được ở trạng thái ổn định tương ứng là 70 và 30°C , sinh ra độ chênh lệch nhiệt độ trong khối thiết bị đấu nối vào khoảng 40°C . Như vậy, ta cần 1 khoảng thời gian khá dài để đạt được sự ổn định về nhiệt độ trong khối thiết bị.

Do vật liệu trong thiết bị đấu nối cáp có sự truyền nhiệt kém nên quá trình truyền nhiệt từ lõi cáp dưới tác dụng của hiệu

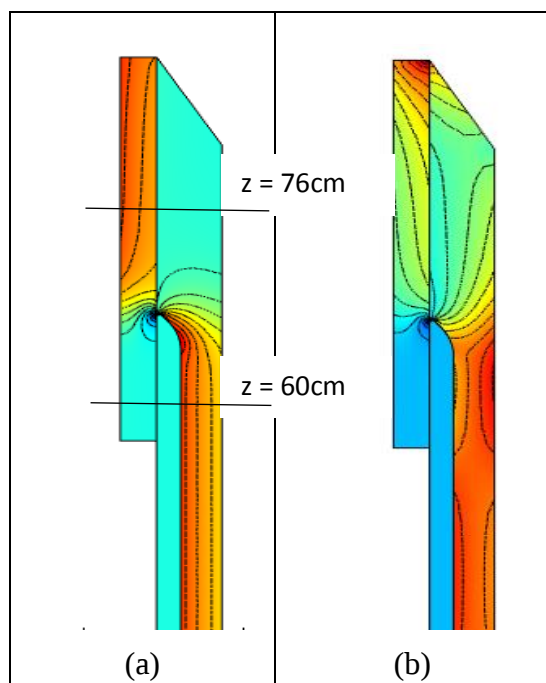
ứng Joule không được nhanh chóng tản ra ngoài, tạo nên giá trị nhiệt độ rất cao phía trong lõi cáp, điều đó có thể là nguyên nhân ảnh hưởng đến sự tác động của nhiệt vào cách điện của cáp làm giảm tuổi thọ và hiệu suất làm việc. Do vậy, quá trình nghiên cứu vật liệu của thiết bị đấu nối cáp cao áp vẫn đang được đẩy mạnh trên thế giới để có loại vật liệu thay thế phù hợp tích hợp thêm khả năng khuếch tán nhiệt độ.

3.2. Phân bố điện trường

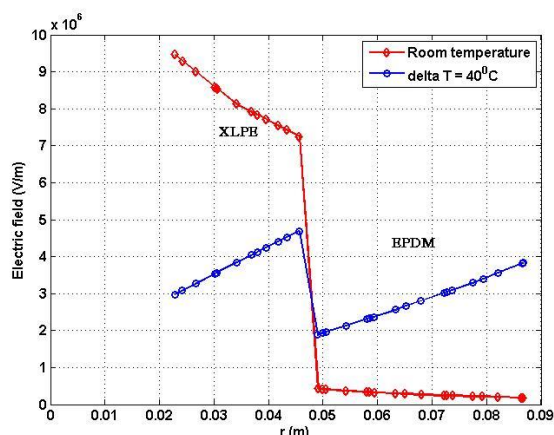
Tính toán sự phân bố điện trường trong chế độ ổn định được thực hiện với 2 điều kiện về nhiệt độ là ở nhiệt độ phòng (20°C) và dưới sự chênh lệch nhiệt độ là 40°C (trong lõi cáp 70°C và phía bên ngoài khớp nối là 30°C - đường đặc tính nhiệt độ ở chế độ xác lập trong hình 3) để thấy rõ được sự ảnh hưởng của nhiệt độ đối với phân bố điện trường trong khớp nối. Kết quả của sự phân bố điện trường được thể hiện trong hình 4.

Ở nhiệt độ phòng, điện trường phân bố trong khối thiết bị có giá trị lớn hơn ở những vị trí có xu hướng gần với lõi cáp, tuy nhiên trong trường hợp có sự chênh lệch nhiệt độ, sự phân bố điện trường có sự thay đổi. Tại vị trí tiếp giáp XLPE/EPDM: ở nhiệt độ phòng, điện trường phân bố chủ yếu ở lớp cách điện cáp XLPE; khi có chênh lệch nhiệt độ sự phân bố của điện trường là tương đối đều trong cả 2 lớp vật liệu và tồn tại những điểm đạt giá trị điện trường lớn (màu đỏ thẫm). Điều này do sự tồn tại của chênh lệch nhiệt độ dẫn tới xuất hiện sự chênh lệch về điện dẫn trong vật liệu.

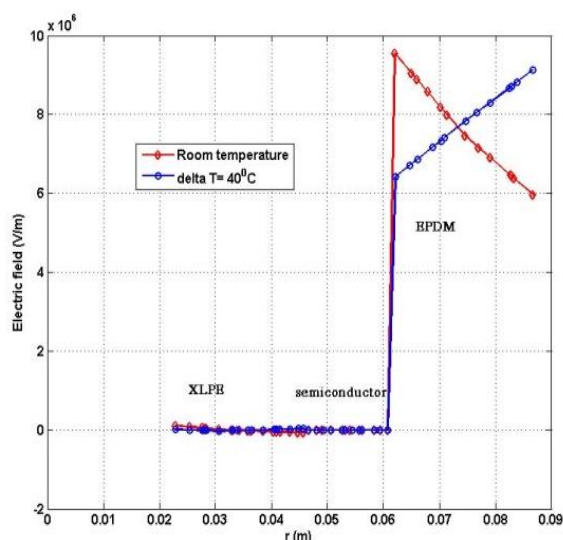
Hiệu ứng này có thể được quan sát rõ hơn trong hình 5, thể hiện sự phân bố điện trường tại vị trí có sự tiếp giáp XLPE/EPDM.



Hình 4. Sự phân bố điện trường bên trong khối thiết bị đầu nối cáp ở 200kV, dưới nhiệt độ 20°C (a), $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ (b). Thang màu được sử dụng là rainbow; từ đỏ đến xanh da trời tương ứng từ cao đến thấp



Hình 5. Đường đặc tính phân bố điện trường bên trong khớp nối cáp tại vị trí tiếp giáp giữa XLPE/EPDM ($z=76\text{ cm}$, hình 4a) ở nhiệt độ phòng và dưới sự chênh lệch nhiệt độ



Hình 6. Đường đặc tính phân bố điện trường bên trong khớp nối cáp tại vị trí tiếp giáp giữa XLPE/semiconductor/EPDM ($z=60\text{ cm}$) ở nhiệt độ phòng và dưới sự chênh lệch nhiệt độ

Ở nhiệt độ phòng, điện trường phân bố chủ yếu trong vật liệu XLPE và giảm dần từ 9,5 kV/mm xuống 7,2 kV/mm ở phía trong lõi cáp đến vị trí tiếp giáp giữa 2 vật liệu. Mặc dù vậy, giá trị điện trường đạt được trong lớp vật liệu EPDM là rất nhỏ, xấp xỉ bằng 0 ở phía ngoài khớp nối. Khi có sự chênh lệch nhiệt độ, điện trường ở lớp cách điện cáp XLPE có xu hướng tăng dần đến vị trí tiếp giáp giữa 2 vật liệu, đồng thời điện trường trong phía ngoài khớp nối đạt giá trị xấp xỉ 4 kV/mm. Ngoài ra, ta còn quan sát thấy trên thang màu (hình 3) sự phân bố điện trường còn có sự thay đổi ở vị trí có sự tiếp giáp giữa lớp bán dẫn và EPDM trong 2 trường hợp nhiệt độ phòng và có sự chênh lệch nhiệt độ. Ở nhiệt độ phòng, vị trí đạt điện trường cao hơn nằm tại phía tiếp giáp với vật liệu bán dẫn, trong khi đó khi có sự chênh lệch nhiệt độ, ở phía ngoài khớp

nổi lại có giá trị điện trường cao hơn (hình 6).

4. KẾT LUẬN

Từ các thông số thực nghiệm của sự phụ thuộc giữa điện dẫn vào điện trường và nhiệt độ, tính chất điện dẫn của 2 loại vật liệu XLPE và EPDM được ứng dụng để mô phỏng cho sự phân bố điện trường và sự biến đổi nhiệt độ trong khối thiết bị đầu nối cáp cao áp. Sử dụng 2 mô đun Dòng điện và Trao đổi nhiệt trong COMSOL Multiphysics, ta có được một

cái nhìn trực quan về sự biến đổi nhiệt độ và điện trường tại các khớp nối cáp: sự truyền nhiệt diễn ra nhanh hơn trong vật liệu XLPE so với vật liệu EPDM và sự phân bố điện trường phụ thuộc rất nhiều vào sự chênh lệch nhiệt độ trong vật liệu. Từ những dự báo này, các nhà nghiên cứu sản xuất khớp nối cáp có thể thay thế các vật liệu thích hợp để giảm sự chênh lệch nhiệt độ xảy ra trong khối thiết bị là nguyên nhân gây ra sự thay đổi của điện trường, tác động đến tuổi thọ làm việc của hệ thống cáp cao áp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Murata *et al.*, "Development of High Voltage DC-XLPE Cable System," *SEI Tech. Rev.*, no. 76, pp. 55–62, Apr. 2013.
- [2] W. Long and S. Nilsson, "HVDC transmission: Yesterday and Today," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 5, no. 2, pp. 22–31, Mar. 2007.
- [3] C.K. Eoll, "Theory of Stress Distribution in Insulation of High-Voltage DC Cables: Part I," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-10, no. 1, pp. 27–35, 1975.
- [4] W. Choo, G. Chen and S. G. Swingler, "DC-field solid dielectric cable under transient thermal conditions," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 2, pp. 596–606, 2011.
- [5] Y. Qin, N. Shang, M. Chi, and X. Wang, "Impacts of temperature on the distribution of electric-field in HVDC cable joint," *IEEE 11th Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater. ICPADM Syd. NSW*, pp. 224–227, 2015.
- [6] *Silec Cable*, "One-piece premolded joint for extruded cables from 63 to 500kV." .
- [7] R. Bodega, G.C. Montanari, and P.H.F. Morshuis, "Conduction Current measurements on XLPE and EPR insulation," *Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom.*, pp. 101–105, 2004.
- [8] J. Fothergill, S.J. Dodd, L.A. Dissado, T. Liu, and U.H. Nilsson, "The Measurement of Very Low Conductivity and Dielectric Loss in XLPE Cables: A Possible Method to Detect Degradation Due to Thermal Aging," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. Vol. 18, no. No. 5, p. 1544, Oct. 2011.
- [9] 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 và 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.



Tác giả Trần Thanh Sơn tốt nghiệp đại học tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội ngành hệ thống điện năm 2004, nhận bằng Thạc sĩ ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học Bách khoa Grenoble - Cộng hoà Pháp năm 2005, nhận bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện của Trường Đại học Joseph Fourier - Cộng hoà Pháp năm 2008. Hiện nay tác giả là Trưởng khoa Kỹ thuật điện - Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: ứng dụng phương pháp số trong tính toán, mô phỏng trường điện từ; các bài toán tối ưu hoá trong thống điện.



Tác giả Trần Anh Tùng tốt nghiệp đại học tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội ngành hệ thống điện năm 2007, bảo vệ luận án Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện tại Đại học Paul Sabatier - Toulouse - Pháp năm 2011. Hiện nay tác giả là Trưởng Bộ môn Mạng và Hệ thống điện - Khoa Kỹ thuật điện - Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: lưới điện thông minh, tính toán khả năng tải của cáp ngầm cao thế, vật liệu cách điện polyme và nanocomposite.

