

# MỐI QUAN HỆ GIỮA TUỔI THỌ CÁCH ĐIỆN VÀ TÍCH ĐIỆN KHÔNG GIAN TRONG CÁP HVDC-XLPE

## CORRELATION BETWEEN INSULATION LIFE AND SPACE CHARGE IN HVDC-XLPE CABLE

Vũ Thị Thu Nga

Trường Đại học Điện lực; ngavtt@epu.edu.vn

**Tóm tắt** - Một trong số các yếu tố ảnh hưởng đến sự làm việc của cáp điện một chiều cao áp (HVDC) là sự biến thiên của phân bố điện trường trong lớp cách điện sinh ra từ sự kết hợp giữa chênh lệch nhiệt độ trong cáp, không đồng nhất về điện dẫn và sự tích điện không gian. Mục đích của nghiên cứu này là thảo luận về mối quan hệ giữa tuổi thọ của cách điện với sự tích điện không gian trong cáp điện một chiều cao áp cách điện polymer liên kết ngang (HVDC-XLPE) dựa trên các mô hình về tuổi thọ cách điện phụ thuộc vào ứng suất điện, với sự xem xét của việc không hoặc có xảy ra hiệu ứng đảo chiều điện cực của điện áp đặt. Trong các mô hình này, ảnh hưởng của hệ số tăng cường điện trường (FEF), mật độ trung bình của điện tích (QM) và mức năng lượng của các điện tích tích lũy trong vật liệu khi có điện trường đặt đến độ bền của vật liệu cũng được đề cập. Phép đo thực nghiệm điện tích không gian cùng các đại lượng liên quan đến tuổi thọ cách điện trên các mẫu phẳng và cáp mô hình sẽ được thảo luận.

**Từ khóa** - tuổi thọ cách điện; HVDC; tích điện không gian; hệ số tăng cường điện trường; phương pháp PEA.

### 1. Đặt vấn đề

Về mặt kinh tế, khả năng làm việc ở nhiệt độ cao, dễ dàng chế tạo bảo dưỡng và thân thiện với môi trường, cáp cách điện polymer có nhiều ưu điểm hơn cáp cách điện giấy [1]. Vật liệu cách điện polymer được sử dụng trong hệ thống truyền tải điện AC đã đạt nhiều thành tựu lớn, tuy nhiên khi sử dụng trong truyền tải điện DC thì phải đối mặt với thách thức do sự hình thành tích điện không gian dưới tác động của các ứng lực điện và nhiệt. Hơn nữa, khi làm việc dưới điện áp DC, phân bố điện trường không còn là điện dung ở trạng thái ổn định mà chuyển sang phân bố điện trở khi đi qua chế độ quá độ (là thời gian mà các tích điện không gian được tích lũy). Do đó, tác động trực tiếp của tích điện không gian là làm méo sự phân bố điện trường trong cách điện dẫn đến việc xác định phân bố điện trường dưới điện áp DC không đơn giản. Như vậy, một trong các vấn đề chính của cách điện polymer trong cáp HVDC là liên quan đến sự hình thành tích điện không gian. Đó chính là nguyên nhân làm giảm hiệu suất làm việc và tuổi thọ của cáp.

Các phép đo lượng tích điện không gian trong cách điện đã trở nên khá phổ biến trong quá trình nghiên cứu tích điện không gian dưới ứng lực điện. Một số hệ thống đo lường đã tồn tại với những giá trị tiêu biểu về độ nhạy, độ phân giải, mô hình hình học của mẫu đo, đo lường ... Đó là những công cụ hiệu quả trong việc tối ưu hóa cấu trúc vật liệu bán dẫn/cách điện cho cáp HVDC. Trong bài báo này, tác giả giới thiệu phương pháp đánh giá tuổi thọ của vật liệu cáp dựa vào các phép đo thực nghiệm độ tích điện không gian trên vật mẫu phẳng và cáp mô hình.

**Abstract** - One of the factors that affects HVDC cable is the field distribution inside the insulation resulting from combined processes of temperature gradient in the cables, non-linear conductivity and space charge accumulation. The purpose of this work is to present and discuss a relationship between insulation life and space charge in HVDC-XLPE cable based on the models of insulation life under electric stress with and without voltage inversion. In these models, criteria such as Field Enhancement Factor-FEF, space-averaged charge density (QM) and minimum and maximum trap depths ( $\Delta_{min}$ ,  $\Delta_{max}$ ) and their influence on material's durability are also mentioned. Space charge measurements and results concerning insulation life on plaque samples and model cable will be discussed.

**Key words** - insulation life; HVDC; space charge; field enhancement factor; pulsed electro-acoustic method.

### 2. Phương pháp đánh giá

#### 2.1. Mô hình tương quan giữa tuổi thọ vật liệu cách điện và tích điện không gian

Vật liệu polymer trải qua những thay đổi liên tục trong suốt trong thời gian hoạt động của nó, thành phần hóa học và cấu trúc vi mô của nó có thể thay đổi dưới sự ảnh hưởng kết hợp của điện, cơ nhiệt và độ ẩm làm nhiều thuộc tính có thể bị biến đổi. Ví dụ, tính dẫn điện và tổn thất điện môi có thể sẽ tăng lên trong quá trình làm việc và do đó độ bền cơ học cũng như độ bền điện môi của nó bị xấu đi. Cuối cùng, vật liệu có thể bị già hóa; kết quả là nó không thể thực hiện chức năng cách điện theo đúng tiêu chuẩn yêu cầu.

Vấn đề thay đổi tuổi thọ của vật liệu cách điện dưới tác động kết hợp của các ứng suất điện và nhiệt dưới tác dụng của điện áp AC là sự kết hợp ảnh hưởng của các ràng buộc riêng biệt. Sự già hóa do nhiệt, nói chung tương ứng với sự suy thoái hóa học của vật liệu trong hầu hết các trường hợp được mô phỏng bởi luật Arrhenius, sự thay đổi tuổi thọ của vật liệu được đặc trưng bởi công thức [2], [3]:

$$L_t(T) = L_{0t} \exp \left[ \frac{-G}{k_B} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (1)$$

Trong đó,  $L_{0t}$  là tuổi thọ của vật liệu ở nhiệt độ tương ứng  $T_0$ , nó thường là nhiệt độ khí quyển;  $G$  là năng lượng kích hoạt, năng lượng kích hoạt càng lớn, sự biến động về tuổi thọ của cáp càng nhanh.

Sự già hóa của vật liệu do tác động của điện trường được xác định theo luật nghịch đảo công suất theo công thức [3]:

$$L_t(E) = L_{0E} \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-n} \quad (2)$$

Trong đó;  $L_{OE}$  là tuổi thọ của vật liệu ở điện trường tương ứng  $E_0$ ,  $n$  là hệ số công suất liên quan đến sự già hóa vật liệu, thường được xác định bởi quá trình hiệu chỉnh phù hợp kết quả thực nghiệm của điện áp với thời gian phá hủy vật liệu (đặc tính V-t). Giá trị  $n$  càng lớn thì tuổi thọ của vật liệu càng ngắn.

Khi không có tác động của điện trường, chỉ có sự già hóa do nhiệt tác động vào tuổi thọ của vật liệu. Tuy nhiên, dưới một ràng buộc điện áp, tuổi thọ của vật liệu sẽ chịu tác động của cả già hóa do nhiệt và điện trường, tuổi thọ vật liệu trong trường hợp này được xác định bởi sự kết hợp của 2 ràng buộc trên [4]:

$$L_t(E, T) = L_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-n'} \exp\left[\frac{-G}{k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (3)$$

**Dưới tác dụng của điện trường DC**, sự tích điện không gian trong vật liệu có thể là nguồn gốc của sự suy thoái vật liệu bởi sự tăng cường của điện trường cục bộ [5]. Ở điện trường rất cao, sự xuất hiện điện tích bút phá từ các điện cực gây nên hiện tượng cây điện và mất ổn định nhiệt. Dưới điện trường nhỏ hơn, sự già hóa diễn ra chậm hơn và tuổi thọ vật liệu được kéo dài hơn, tuy nhiên sự xuất hiện của các điện tích không gian (bởi sự thay đổi hình thái của vật liệu) có thể góp phần làm tăng tỷ lệ già hóa (liên quan đến sự hình thành các khuyết tật trong vật liệu). Như vậy, thời gian phá hủy vật liệu tương quan với số lượng điện tích tích lũy trong vật liệu [6].

Khi cấp điện được thiết kế làm việc với bộ chuyển đổi nguồn điện áp SVC (Voltage Source Converter), sự đảo chiều luồng công suất sẽ được thực hiện bởi sự thay đổi hướng của dòng điện mà không đảo chiều điện áp. Trong trường hợp đó, tuổi thọ cách điện sẽ được xác định thông qua định luật nghịch đảo công suất – thời gian phá hủy vật liệu là hàm của ứng lực điện lớn nhất qua vật liệu:

$$L = C \cdot \left(\frac{1}{F_{\max}}\right)^N \quad (4)$$

Trong đó:  $F_{\max}$  là ứng lực điện lớn nhất qua vật liệu cách điện,  $N$  là hệ số già hóa và còn được biết như là độ bền điện áp (Voltage Endurance Coefficient VEC) và  $C$  là hằng số.

Việc tích tụ không gian dưới điện áp DC có thể tham gia vào quá trình lão hóa thông qua việc thay đổi cấu trúc vật liệu [7] và có thể làm tăng VEC. Theo công thức 4, xét giá trị của VEC là 10, tương ứng với các khuyến nghị của Cigré cho các loại cáp đùn cao áp (HV) [8], nếu tăng 10% giá trị điện trường ( $F_{\max}$ ) thì dẫn đến giảm tuổi thọ khoảng 3 lần. Đối với cách điện không tối ưu, lượng tích điện không gian (yếu tố bóp méo trường) tăng tỷ lệ với điện áp đặt. Để giữ được tuổi thọ cấp trong giới hạn có thể chấp nhận được, phải giảm điện áp đặt tối đa cho cấp trong thiết kế và do đó cũng sẽ làm giảm hiệu suất truyền tải điện.

Trong trường hợp hệ thống cấp làm việc với bộ chuyển đổi điện áp LCC (Line commutated Converters), sự đảo ngược điện cực điện áp xuất hiện. Do vậy, cấp cũng phải được thiết kế chế tạo để thích ứng với sự làm việc của loại ứng lực điện này. Trong trường hợp này, cấp được thử nghiệm [9] thông qua các bài kiểm tra tuổi thọ nhanh kết hợp với các phép đo điện tích không gian, và đã chứng minh rằng tuổi thọ của vật liệu cách điện không chỉ phụ

thuộc vào điện trường mà còn phụ thuộc vào các thông số khác nhau liên quan đến tích lũy điện tích không gian như: số lượng điện tích trung bình ( $Q_M$ ) thu được dưới điện trường đặt  $E_{\text{đặt}}$ , tốc độ tiêu tán điện tích ( $s$ ) trong thời gian khử cực tính ( $E = 0$ ) và tần số đảo ngược phân cực ( $f$ ). Theo mô hình đã được đưa ra bởi Cavallini và cộng sự [10], tỷ số giữa tuổi thọ khi có ( $L_1$ ) và không có ( $L$ ) sự đảo chiều phân cực điện áp như sau:

$$\frac{L_1}{L} = \frac{1}{1 + K \cdot s^{-a_1} Q_M(E_{\text{đặt}}) \cdot f^{a_2}} \quad (5)$$

Trong đó:

$K$ ,  $a_1$  và  $a_2$  là các hệ số quan hệ ( $>0$ ).

$$Q_M(t) = \frac{1}{d} \int_0^d |\rho(x,t)| dx \quad (6)$$

$$s = \frac{1}{Q_{M0}} \cdot \frac{dQ_M(t)}{d \log(t)} = \frac{-k_B T}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \ln(10) \quad (7)$$

$d$  là khoảng cách giữa các điện cực;  $Q_{M0}$  được xác định ngay sau khi volt-off, có thể xem xét bằng lượng điện tích xuất hiện trong khoảng thời gian volt-on;  $\Delta_{\min}$ ,  $\Delta_{\max}$  là độ sâu nhỏ nhất và lớn nhất (tương đương với mức năng lượng đạt được nhỏ nhất và lớn nhất) của điện tích tích lũy trong vật liệu;  $N_0$  là năng lượng đơn vị trong khoảng giữa  $[\Delta_{\min} - \Delta_{\max}]$ .

Theo mối quan hệ trong biểu thức (5), ta có thể nhận thấy rằng, tuổi thọ cách điện cấp giảm với tần số đảo ngược phân cực và số lượng điện tích không gian tồn tại trong vật liệu ( $Q_M$ ). Đối với vật liệu polymer,  $Q_M$  là hàm của điện trường đặt ( $E_{\text{đặt}}$ ) [9, 10] cho các ứng suất điện ở chế độ ohmic theo hàm  $Q_M = E_{\text{đặt}}^b$ ,  $b$  tương đương với tỷ lệ tích lũy điện tích với ứng suất đặt. Theo (5), ta thấy tuổi thọ của vật liệu khi có sự đảo chiều điện cực ( $L_1$ ) giảm tỷ lệ nghịch với tốc độ tiêu tán điện tích. Nó có nghĩa là trong trường hợp có sự đảo chiều điện cực, vật liệu nên đẩy các điện tích ra nhanh nhất có thể khi điện áp về 0 trong khoảng thời gian đảo chiều điện cực. Trong các nghiên cứu cho vật liệu khác nhau (ví dụ trên XLPE), các hệ số tương quan ( $K$ ,  $a_1$  và  $a_2$ ) liên quan đến tuổi thọ cách điện không được thay đổi khi thay đổi điều kiện xử lý vật liệu, mà chỉ có các thông số liên quan đến điện tích không gian như yếu tố tăng cường điện trường, mật độ điện tích bị mắc kẹt và tỷ lệ tiêu tán điện tích trong quá trình thay đổi điện áp được thay đổi.

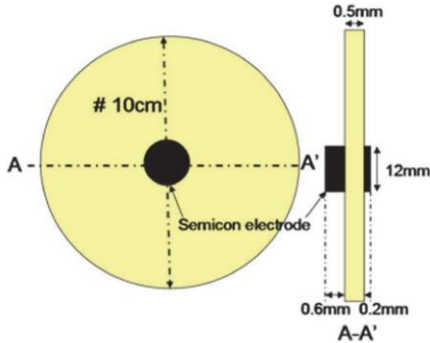
## 2.2. Mẫu, phương pháp và điều kiện thực nghiệm

### 2.2.1. Mẫu đo

Các phép đo điện tích không gian được thực hiện trên mẫu vật liệu cách điện phẳng và mô hình cáp mẫu.

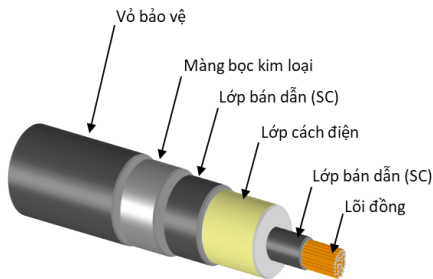
**Đối với mẫu phẳng:** từ các mẫu phẳng vật liệu cách điện XLPE và vật liệu bán dẫn (semiconducting - SC) được cung cấp từ công ty chế tạo cáp điện, chúng được cắt thành hình đĩa với đường kính tương ứng là 10 cm đối với cách điện và 12 mm đối với bán dẫn. Ba lớp bán dẫn - cách điện - bán dẫn được tiếp tục xử lý liên kết ngang cùng nhau ở nhiệt độ 180°C trong 15 phút dưới áp lực để tạo thành mẫu đo gồm 3 lớp. Hai lớp bán dẫn được tạo với độ dày khác nhau là 200 và 600  $\mu\text{m}$ . Lớp bán dẫn phía trên (600  $\mu\text{m}$ ) được tiếp xúc với điện cực PEA (điện cực PEA được nối với cảm biến sóng âm) để làm suy giảm sự phản xạ của sóng âm mà có thể xuất hiện trên bề mặt của mẫu đo và điện cực PEA. Lớp bán dẫn phía dưới (200  $\mu\text{m}$ ) để giữ độ

phân giải không gian phù hợp trong phép đo. Độ dày của lớp cách điện giới hạn đến 500  $\mu\text{m}$  với mục đích đạt được điện trường đặt lên tới 40 kV/mm với điện áp đặt tối đa của thiết bị PEA là 30 kV. Hình 1 thể hiện mẫu đo phẳng được tạo bởi 3 lớp SC/XLPE/SC, với độ dày tương ứng là 600  $\mu\text{m}$ /500  $\mu\text{m}$ /200  $\mu\text{m}$ .



Hình 1. Cấu trúc của mẫu phẳng

Đối với mẫu cáp mô hình: phép đo được thực hiện trên cáp có độ dài 3 m, đường kính lõi đồng là 8,2 mm; lớp bán dẫn bên trong và ngoài có độ dày tương ứng là 1 mm và độ dày của lớp cách điện là 4,5 mm (Hình 2).



Hình 2. Cấu trúc của mẫu cáp mô hình

2.2.2. Phương pháp thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, tác giả lựa chọn phương pháp xung sóng âm - điện PEA (pulsed electro-acoustic) [11] để đo sự tích điện không gian, bởi phương pháp này đơn giản và linh hoạt với một dải rộng về độ dày của mẫu đo có thể từ hàng trăm micro mét đến vài mili mét cho vật liệu XLPE bằng cách thích ứng các đặc tính của thiết bị như độ rộng của xung hoặc độ dày của bộ cảm biến điện. Một ưu điểm nữa của phương pháp PEA là có thể thực hiện phép đo dễ dàng trong cả hai trường hợp volt-on và volt-off, do tính chất kích thích và thông qua việc sử dụng các tụ điện tách biệt. Phương pháp PEA cũng cung cấp độ phân giải theo thời gian rất cao và do đó có thể phát hiện nhanh các hiện tượng thay đổi theo thời gian của tích điện không gian, ví dụ như các khối điện tích được gọi là “gói tích điện nhanh” [12].

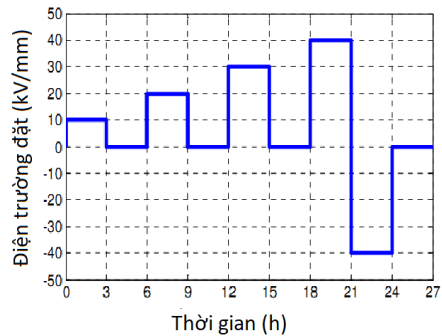
Phương pháp này cũng có thể đáp ứng trong việc đo điện tích không gian trong mẫu cáp đồng trục với ưu điểm là có thể tính toán cả sự ảnh hưởng của chênh lệch nhiệt độ trong cáp. Tuy nhiên, kết quả có phần sai số do hiệu ứng của sự chênh lệch nhiệt độ và tính đến cả cấu trúc hình trụ, sự suy giảm sóng âm trong quá trình hiệu chỉnh từ tín hiệu thô đo được bởi PEA cáp.

2.2.3. Điều kiện thực nghiệm

Đối với mẫu phẳng: các phép đo điện tích không gian

được đặt với điện áp đặt thể hiện trên Hình 3, bao gồm quá trình phân cực/khử cực ở 10, 20, 30 kV/mm, mỗi bước điện áp được thực hiện trong 3h, tối điện trường 40 kV/mm sau đó đảo ngược điện cực điện áp tới -40 kV/mm trong 3h và cuối cùng để thời gian khử cực ( $V = 0$ ) trong 3h. Đặt bước nhảy tăng và giảm của điện trường là 1 kV/mm/s. Phép đo được thực hiện trong dải điện trường ở nhiệt độ cố định từ 25 đến 50°C. Tín hiệu điện tích không gian được ghi lại trong toàn bộ thời gian đo với tần số 1 tín hiệu/s.

Đối với mẫu cáp mô hình: phép đo điện tích không gian được thực hiện trong điều kiện nhiệt độ phòng (không có sự chênh lệch nhiệt độ trong cáp) để có sự tương đồng so sánh kết quả với mẫu phẳng. Trong các phép đo, cáp được đặt điện áp -80 kV trong 90 phút (lớp bán dẫn bên ngoài được nối đất ( $V = 0$ )). Với điện áp đặt này, điện trường tương đương khoảng -25 kV/mm ở lớp bán dẫn bên trong.



Hình 3. Điện trường đặt áp dụng cho các phép đo tích điện không gian trên các mẫu phẳng

Trong nghiên cứu này, tác giả thực hiện nghiên cứu tính toán và trình bày các thông số ảnh hưởng đến tuổi thọ cách điện dựa vào phép đo điện tích không gian gồm:

- Hình ảnh của mật độ tích điện không gian;
- $F_{EFmax}$  và vị trí của chúng ở thời gian ngắn;
- Giá trị  $Q_{M0}$ ,  $\Delta_{max}$ ,  $\Delta_{min}$ .

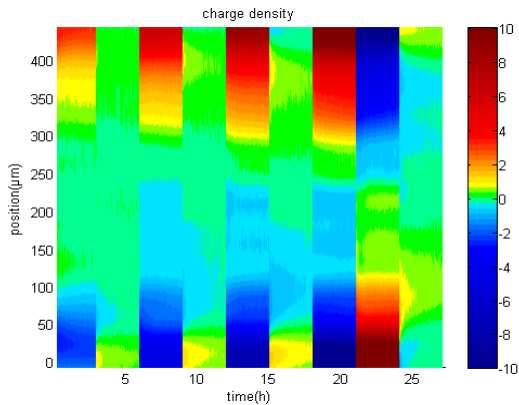
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Sự tích điện không gian

Sự phát triển của điện tích không gian theo thời gian - không gian có thể được sử dụng mã màu để thể hiện mật độ của điện tích. Từ sự thể hiện này, trạng thái của vật liệu được xác định một cách tổng quan dưới quan sát sự tích điện của điện tích với các mức điện trường khác nhau. Cũng từ sự quan sát này, chúng ta cũng có thể đưa ra các ý tưởng ban đầu về tốc độ tiêu tán điện tích trong khoảng thời gian volt-off. Ví dụ, Hình 4 mô tả tích điện của vật liệu XLPE được thực hiện trong phép đo. Trục X thể hiện thời gian (mỗi khoảng thời gian là 3h), trục Y thể hiện độ dày của vật liệu (anod ở phía trên, cathode ở phía dưới trước khi đảo ngược điện cực). Thang màu thể hiện mật độ điện tích tích lũy trong vật liệu (màu xanh thể hiện điện tích âm, màu vàng thể hiện điện tích dương).

Ở 10 kV/mm, các điện tích được bút phá từ cả hai điện cực anode và cathode và hình thành homocharge (điện tích cùng dấu với điện cực) trên các điện cực. Trong khoảng 3h volt-off tỷ lệ tích điện âm vẫn còn nhưng với mật độ rất nhỏ, thể hiện sự tiêu tán nhanh của điện tích sau khi điện áp đặt bằng không. Khi điện trường tăng 20 kV/mm đến

40 kV/mm, sự tích điện xuất hiện nhanh hơn trong vật liệu và lượng điện tích âm chiếm một khoảng không gian lớn trong khối vật liệu. Khi đảo ngược điện cực của điện áp, sự bứt phá điện tích ở hai điện cực vẫn tồn tại, tuy nhiên điện tích dương có sự phân tán nhanh hơn vào trong khối vật liệu. Ta có thể nhận thấy rằng, sự đảo chiều điện cực điện áp là nguồn gốc của sự hình thành mạnh mẽ cầu điện tích dương, nó có xu hướng trung hòa các điện tích âm trong vật liệu.



**Hình 4.** Tích điện không gian cho mẫu phẳng. Thang màu thể hiện mật độ điện tích không gian ( $C/m^3$ )

### 3.2. Sự phát triển của hệ số tăng cường điện trường (FEF) theo không gian - thời gian

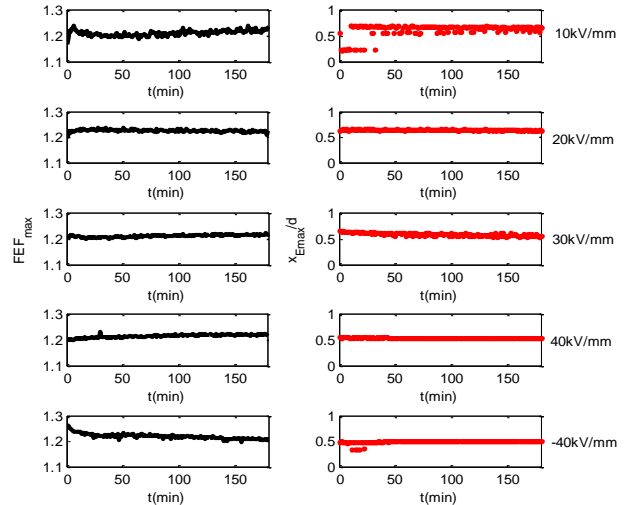
Sự tích điện của điện tích không gian trong vật liệu làm thay đổi giá trị điện trường. Giá trị FEF được xác định là tỷ số của điện trường cục bộ, xác định được khi có điện tích trên điện trường Laplacien (điện trường ban đầu khi đặt điện áp), hệ số FEF sẽ bằng 1 nếu không có sự tích điện xuất hiện trong vật liệu. Nếu tồn tại điện tích không gian tích lũy trong vật liệu, giá trị của FEF nhất thiết sẽ lớn hơn 1 ở bất kỳ vị trí nào trong vật liệu. Do vậy, điều này rất phù hợp cho sự xem xét quá trình phát triển theo thời gian của vị trí  $FEF_{max}$ . Vị trí này trong khoảng thời gian phân cực (có điện áp đặt) có thể mang tới rất nhiều thông tin thú vị, ví dụ:  $FEF_{max}$  tồn tại ở gần điện cực (anode hay cathode) có thể tượng trưng cho khả năng tồn tại điện tích trái dấu với điện cực đó. Tương tự, giá trị  $FEF_{max}$  tồn tại ở giữa khối điện môi có thể là do có sự tích điện homocharge.

Hình 5 miêu tả sự phát triển theo thời gian của  $FEF_{max}$  (cột bên trái) và vị trí của nó ( $X_{E_{max}/d}$ ) ở điện trường đặt khác nhau trong trường hợp mẫu phẳng XLPE-HVDC. Ở tất cả các mức điện trường đặt 10 kV/mm đến 40 kV/mm và -40 kV/mm, giá trị cao nhất của điện trường tồn tại ở trong khối điện môi do có sự hình thành homocharge ở cả 2 điện cực. Giá trị  $FEF_{max}$  đạt khoảng 1,22 sau 3 giờ đặt điện áp.

### 3.3. Cơ chế tiêu tán của điện tích tích lũy trong vật liệu

Tổng số lượng điện tích tồn tại trong vật liệu không thể xác định đầy đủ bằng giá trị FEF, ví dụ: khi tồn tại liên tục các lớp điện tích âm và dương trong vật liệu, ta có thể tính toán giá trị FEF đạt trị số nhỏ, nhưng thực tế số lượng điện tích có thể là tương đối cao và là tác nhân đẩy nhanh quá trình già hóa vật liệu thông qua quá trình tích lũy năng lượng cơ - điện [7]. Vấn đề liên quan hơn trong việc xác định số lượng điện tích tích lũy là tính toán lượng điện tích trung bình dọc theo chiều dày của mẫu đo ( $Q_M$ ). Số lượng điện tích này được ước tính ngay sau khi điện áp đặt bằng

không (volt-off) và nó cũng được xem xét coi như là số lượng điện tích tích lũy trong khoảng thời gian volt-on. Hơn nữa, sự phát triển của  $Q_M$  theo thời gian còn liên quan trực tiếp đến sự tiêu tán điện tích. Sử dụng mô hình tiêu tán điện tích phù hợp [13], những thông số thích hợp liên quan đến các bẫy điện tích (mật độ, mức năng lượng) có thể được đưa ra từ các đường cong của  $Q_M$ .



**Hình 5.** Sự phát triển của  $FEF_{max}$  và vị trí của nó theo thời gian dưới điện trường đặt khác nhau.

$X = 0/d$  đặc trưng cho điện cực là cathode/anode

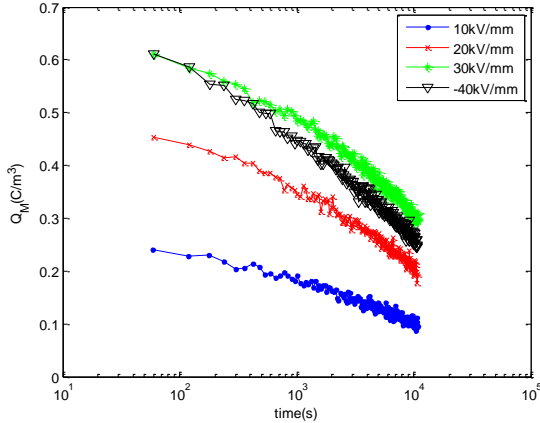
Hình 6 thể hiện các đường cong khác nhau của  $Q_M(t)$  thu được trong thời gian của quá trình khử cực ( $V = 0$ ) trong trường hợp mẫu phẳng XLPE-HVDC ở các điện trường đặt khác nhau. Ta nhận thấy rằng, trước khi đổi chiều điện cực điện áp, số lượng điện tích (ở thời điểm bắt đầu của khử cực) tăng với điện trường đặt. Tuy nhiên, giá trị  $Q_M(t = 0, -40 \text{ kV/mm})$  sau khi đổi chiều phân cực giảm dưới giá trị đạt được ở 30 kV/mm. Điều này do sự tổ chức lại phức tạp của điện tích không gian được điều khiển bởi sự đảo chiều điện áp, ví dụ sự kết hợp giữa sự tồn tại lượng điện tích âm trong khối vật liệu ở 40 kV/mm và sự bứt phá mạnh mẽ điện tích dương từ điện cực anode sau khi đảo chiều điện cực (xem Hình 4). Từ các đường cong của  $Q_M$  (Hình 6), theo mô hình tiêu tán điện tích của Dissado [13], ta có thể xác định được các giá trị của  $\Delta_{max}$  và  $\Delta_{min}$ , thể hiện trong Bảng 1 với mức năng lượng từ 0,99 đến 1,18 eV. Từ các giá trị của  $Q_{M0}$  và  $\Delta_{max, min}$  ta nhận thấy rằng độ sâu của các điện tích tích lũy trong vật liệu (tương ứng với mức năng lượng của nó) càng lớn thì các điện tích đã bị tích lũy trong vật liệu tiêu tán càng khó khi volt-off.

### 3.4. Mẫu cáp đồng trục

Để kiểm tra sự tương quan giữa mẫu phẳng và cáp thực tế, mẫu cáp được sử dụng đo sự tích điện không gian bằng hệ thống đo PEA cáp. Thông qua thuật toán giải mã phân tích kết quả đo của PEA cáp [14], ta thu được điện tích không gian trong lớp cách điện trên mẫu cáp đồng trục, thể hiện trên Hình 7.

Các profile của điện tích thể hiện sự hình thành heterocharge (điện tích trái dấu với điện cực) cả trên 2 điện cực (thể hiện bởi 2 mũi tên) với số lượng lớn hơn ở gần

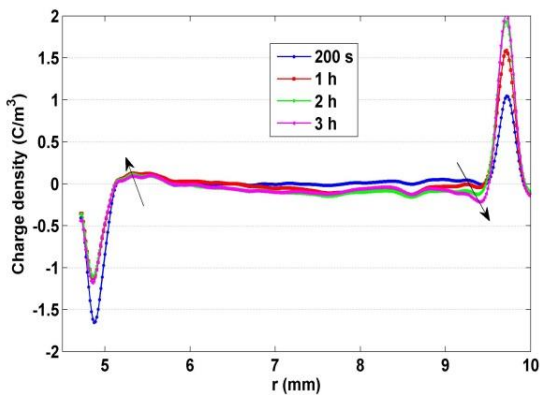
phía lớp bán dẫn bên ngoài. Đây là nguyên nhân dẫn tới sự đảo ngược điện trường phân bố trong vật liệu (điện trường lớp bán dẫn bên ngoài cao hơn lớp bán dẫn bên trong) so với điện trường ban đầu khi đặt điện áp (Laplacien). Sự ảnh hưởng của điện tích không gian tích lũy trong cáp cũng sẽ làm biến dạng điện trường và làm tăng hệ số FEF, yếu tố làm giảm hiệu suất hoạt động của cáp. Tuy nhiên giá trị của FEF trong mẫu cáp khó có thể so sánh bằng định lượng với FEF trên mẫu phẳng bởi ảnh hưởng của sự không đồng nhất của điện trường dọc theo độ dày của cách điện cáp (đo đạc trực).



**Hình 6.** Sự phát triển của  $Q_M$  theo thời gian thu được trong 3h sau khi phân cực (volt-on) ở điện trường đặt khác nhau

**Bảng 1.** Giá trị  $FEF_{max}$  và các thông số xác định được theo mô hình tiêu tán điện tích khi có sự tích điện không gian trong vật liệu XLPE

$E_{app}$ (kV/mm)	10	20	30	40	-40
$FEF_{max}$	1,23	1,22	1,22	1,22	1,21
$Q_{Mo}(C/m^3)$	0,26	0,46	0,6	x	0,6
$\Delta_{min}$ (eV)	0,99	1	1	x	0,99
$\Delta_{max}$ (eV)	1,17	1,18	1,18	x	1,17



**Hình 7.** Sự phát triển của mật độ điện tích theo thời gian trong cách điện của cáp điện đồng trục XLPE-HVDC dưới điện áp đặt -80 kV trong 3 giờ

**4. Kết luận**

Tác giả đã giới thiệu phương pháp đánh giá tuổi thọ của vật liệu sử dụng trong cáp HVDC từ các thông số tính toán được từ phép đo điện tích không gian. Các thông số được quan tâm là độ méo điện trường tối đa, mật độ điện tích còn lại sau khi volt-off. Với việc sử dụng các thông số này, mặc dù kết quả còn sơ lược, chúng ta vẫn có thể có một bức tranh về độ bền của vật liệu dưới ứng lực điện DC khi có hoặc không có sự đảo chiều điện cực. Hơn nữa, sự so sánh về tuổi thọ (độ bền) của các vật liệu khác nhau cũng có thể được thực hiện khả thi thông qua các phép đo điện tích không gian trong cáp điện XLPE-HVDC.

**Lời cảm ơn:** Cảm ơn Phòng thí nghiệm LAPLACE (Toulouse, Pháp) đã giúp đỡ tác giả thực hiện các phép đo thực nghiệm.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] T. L. Hanley et al., “A General Review of Polymeric Insulation for Use in HVDC Cables”, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 19, No. 1, 2003, pp. 13-24.
- [2] R. Liu, “Long-Distance DC Electrical Power Transmission”, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 29, No. 5, 2013, pp. 37-46.
- [3] L. Simoni, “A General Approach to The Endurance of Electrical Insulation Under Temperature and Voltage”, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. EI-16, No. 4, 1981, pp. 277-289.
- [4] G. Mazzanti and M. Marzinotto, *Extruded Cable for High-Voltage Direct- Current Transmission*. Hoboken, New Jersey: JohnWiley & Sons, Inc, 2013.
- [5] G C. Montanari, “Bringing an Insulation to Failure: The Role of Space Charge”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 18, No. 2, 2011, pp. 339-364.
- [6] G. Mazzanti et al., “Electrical Aging and Life Models: The Role of Space Charge”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 12, No. 5, 2005, pp. 876-890.
- [7] L.A Dissado et al., “The Role of Trapped Space Charges in The Electrical Aging of Insulating Materials”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 4, 1997, pp. 496-505.
- [8] Cigré Working Group 21.01, “Recommendations for Testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at Rated Voltage up to 250 kV”, 2003, pp. 1-29.
- [9] G. C. Montanari et al., “Evaluation of DC Insulation Performance Base on Space-charge Measurements and Accelerated Life Test”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 7, 2000, pp. 322-328.
- [10] A. Cavalini et al., “Life Model Base on Space-charge Quantities for HVDC Polymeric Cables Subjected to Voltage-polarity Inversions”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 9, 2002, pp. 514-523.
- [11] T. Maeno et al., “Measurement of Spatial Charge Distribution in Thick Dielectric Using the Pulsed Electro-acoustic Method”, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 23, 1988, pp.433-439.
- [12] S. Delpino et al., “Fast Charge Packet Dynamics in XLPE Insulated Cable Model”, *Proceedings Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Vancouver (Canada), 2007, pp. 421-424.
- [13] L. A. Dissado et al., “Space Charge Injection and Extraction in High Divergent Fields”, *Proceedings Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Harbin (China), 1999, pp. 23-26.
- [14] B. Vissouvanadin et al., “Deconvolution Techniques for Space Charge Recovery Using Pulsed Electroacoustic Method in Coaxial Geometry”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 21, Iss. 2, 2014, pp. 821-828.