

# XÁC ĐỊNH TÍCH ĐIỆN KHÔNG GIAN TRONG VẬT LIỆU CÁCH ĐIỆN CÁP HVDC BẰNG PHƯƠNG PHÁP PEA: PHÉP ĐO VÀ KỸ THUẬT HIỆU CHỈNH

## PHẦN 1: ỨNG DỤNG TRONG MẪU VẬT LIỆU PHẪNG

DETERMINING SPACE CHARGE ON INSULATION IN CABLE HVDC  
BY PEA METHOD: MEASUREMENT AND DECONVOLUTION TECHNIQUE

PART 1: APPLICATION ON FLAT MATERIAL SAMPLE

**Vũ Thị Thu Nga**

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 22/04/2020, Ngày chấp nhận đăng: 11/07/2020, Phản biện: TS. Nguyễn Hữu Kiên

### Tóm tắt:

Thiết kế của cáp đúc polymer HVDC là một trong những vấn đề thách thức nhất trong ngành cáp bởi sự phân bố điện trường trên độ dày cách điện bị ảnh hưởng mạnh mẽ bởi điện tích không gian, nó có thể kiểm soát hoạt động của hệ thống cáp, đặc biệt là độ tin cậy và tuổi thọ của cáp. Thật vậy, khi điện áp DC được đặt trên lớp điện môi polymer, điện tích không gian tích lũy trong đó có tốc độ nhanh hoặc chậm, phụ thuộc chủ yếu vào mức điện áp, tính chất của cách điện và của các điện cực. Nếu mật độ điện tích không gian đủ lớn, cường độ trường có thể vượt quá ngưỡng cho phép của điện môi, dẫn đến hỏng cách điện. Hiện nay, đã có nhiều phương pháp xác định sự phân bố điện tích không gian trong điện môi và mỗi phương pháp đều có những ưu, nhược điểm riêng. Tuy nhiên, phương pháp được lựa chọn mong muốn có thể nâng cao về độ phân giải, mức độ đặt các ràng buộc và thời gian ghi nhận thông tin bởi sự phân bố điện tích không gian trong điện môi thu được không chỉ phụ thuộc vào thời gian, các ràng buộc mà còn phụ thuộc vào trạng thái vật liệu mẫu: mẫu phẳng hoặc mô hình cáp thực tế. Phương pháp Pulsed Electro-Acoustic (PEA) là phương pháp đáp ứng tốt các phép đo điện tích không gian dưới các ràng buộc động khác nhau. Hơn nữa, kỹ thuật hiệu chỉnh được sử dụng phù hợp sau phép đo cũng là yếu tố rất quan trọng để thu được kết quả tin cậy. Trong bài báo này, tác giả giới thiệu về kỹ thuật hiệu chỉnh sau phép đo điện tích không gian của phương pháp PEA trong mẫu vật liệu phẳng.

### Từ khóa:

đo điện tích không gian, phương pháp PEA, hiệu chỉnh điện tích, cáp HVDC.

### Abstract:

HVDC polymer molded cable design is one of the most challenging problems in the cable industry because the electric field distribution on the insulation thickness is strongly influenced by space charge, which can control the operation of the cable system, especially its reliability and long life. Indeed, when a DC voltage is applied to the polymer dielectric layer, the accumulated space charges depend primarily on the voltage level, the properties of insulating and electrodes. If the space charge density is large enough, the field strength may exceed the strength threshold of dielectric,

leading to the insulation failed. There are many methods for determining the space charge distribution in dielectric, with its advantages and disadvantages. However, selected method desired can improve the resolution, constraints and time record information because the obtained space charge distribution depends on time, constraints and the material sample: flat sample or cable model. The Pulsed Electro-Acoustic (PEA) method responds well to measurements of space charge under dynamic constraints. Moreover, the appropriately calibration technique used after measurements is also a very important factor to obtain reliable results. In this paper, the author introduces the deconvolution technique after the space charge measurement of PEA method in a flat material sample.

**Keywords:**

space charge measurement, pulsed electroacoustic technique, charge calibration, HVDC cable.

## 1. GIỚI THIỆU

Trong những thập kỷ qua, sự quan tâm đến truyền tải DC đã tăng lên do nhu cầu trao đổi năng lượng điện xuyên quốc gia phát triển, liên quan chặt chẽ đến việc tăng năng lượng từ các nguồn năng lượng tái tạo, lắp đặt ngoài khơi hoặc ở khoảng cách xa đối với phụ tải. Vì nhiều lý do, đường dây truyền tải điện một chiều cao áp (HVDC) là giải pháp tốt nhất cho các khoảng cách xa và là giải pháp duy nhất cho các ứng dụng dưới biển [1]. Việc sử dụng cáp đúc polymer trong HVDC đã cho thấy sự lão hóa sớm do hiện tượng tích lũy điện tích không gian trong điện môi và gần các điện cực.

Mong muốn hiểu biết về cơ chế hình thành và tích lũy điện tích trong vật liệu cách điện dẫn đến sự phát triển của các kỹ thuật đo lường mới cho phép tiếp cận phân bố không gian của mật độ điện tích trong những thập kỷ qua. Độ di chuyển chậm của các điện tích trong các cách điện cao phân tử cho phép thực hiện phép đo theo phương pháp không phá hủy với độ phân giải không gian của mật độ điện tích. Các kỹ thuật không phá hủy này

được chia thành ba họ khác nhau tùy theo bản chất của nhiễu để thăm dò điện tích: phương pháp nhiệt (TP, LIMM, TS), xung âm (PWP, LIPP) và phương pháp điện âm (PEA) [2]. Ba nhóm kỹ thuật không phá hủy này dựa trên cùng một nguyên tắc là sự cân bằng giữa lực tĩnh điện và lực đàn hồi bị xáo trộn. Trong nhóm các phương pháp nhiệt, sự khuếch tán nhiệt được sử dụng để thay đổi trạng thái cân bằng và do đó tạo ra một phản ứng điện. Phương pháp âm học PEA sử dụng biến dạng được tạo ra bởi sự lan truyền của sóng áp suất để thay đổi trạng thái cân bằng tĩnh điện và tạo ra tín hiệu điện [3]. Cuối cùng, phương pháp điện âm dựa vào sự kích thích bởi các xung điện, lực tĩnh điện được tạo ra bởi sự tương tác với các điện tích tạo ra phản ứng cơ học. Hiện nay, các kỹ thuật khác nhau đều có thể thiết lập phân bố mật độ điện tích trong cách điện polymer, tuy nhiên, mỗi loại kỹ thuật đo lường đều có những ưu, nhược điểm. Phương pháp PEA hiện đang được sử dụng phổ biến và đáng tin cậy nhất để phát hiện sự tích lũy điện tích không gian ở điện môi của cáp HVDC nhờ hệ thống

đo lường tương đối đơn giản, độ phân giải không gian tốt, độ an toàn cao và đáp ứng tốt với những mẫu vật liệu phẳng và cấu hình cáp đồng trục. Bài báo này mô tả nguyên tắc đo lường của phương pháp PEA và kỹ thuật hiệu chỉnh, cụ thể cho vật liệu mẫu phẳng, đáp ứng tần số của hệ thống được mô tả. Kết quả đo điện tích không gian trên các mẫu vật liệu phẳng nhờ kỹ thuật hiệu chỉnh sau phép đo cũng được giới thiệu.

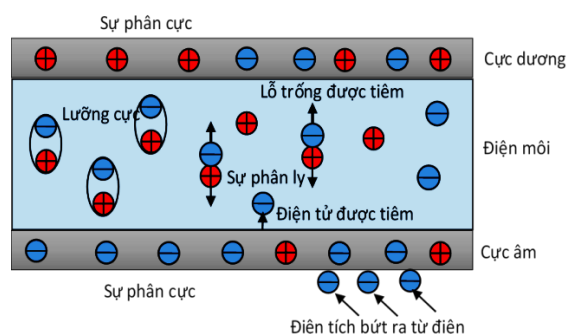
## 2. SỰ HÌNH THÀNH VÀ TÍCH LŨY ĐIỆN TÍCH KHÔNG GIAN TRONG CÁCH ĐIỆN DƯỚI HVDC

Điện tích không gian là tất cả các hạt điện tích, dương hoặc âm, tồn tại trên bề mặt hoặc bên trong của điện môi. Các điện tích trong khối điện môi có thể là lưỡng cực (phân tử phân cực...) hoặc các điện tích/lỗ trống được tiêm vào (do ứng suất điện, chùm electron...) hoặc các ion tạp chất xuất hiện ban đầu hoặc được tạo ra bởi quá trình phân ly dưới ứng suất của điện môi. Các điện tích trên bề mặt điện môi có thể tồn tại 3 dạng: điện tích phân cực lưỡng cực, hoặc điện tích “hình ảnh” khi có sự tồn tại của điện tích không gian ngoài điện tích lưỡng cực trong khối điện môi, hoặc điện tích được tạo ra bởi sự bút phá trên bề mặt điện môi [4], [5].

Hình 1 thể hiện các loại điện tích khác nhau có thể được quan sát trong một chất điện môi dưới tác dụng của ứng suất điện được đặt cho nó.

Sự hình thành và tích lũy điện tích không gian trong cách điện là một trong những nguyên nhân quan trọng gây ra lỗi của đường dây truyền tải cáp HVDC. Hiện

tượng này thường xuất hiện do một số nguyên nhân như: sự phụ thuộc vào nhiệt độ, sự chênh lệch của cả hai điện dẫn và hằng số điện môi xuất hiện trong khi điện môi làm việc dưới tác động của ứng suất điện HVDC.



**Hình 1. Sơ đồ tóm tắt các loại điện tích không gian khác nhau trong khối điện môi**

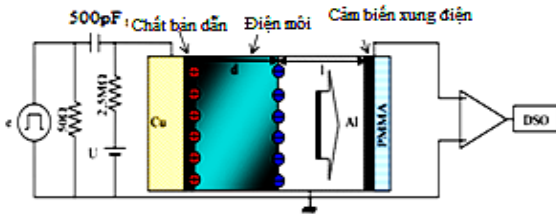
Trong trường hợp điện trường cao bị gián đoạn, xảy ra hiện tượng bút phá điện tích từ các điện cực, hiện tượng này được khuếch đại bởi sự không hoàn hảo tại các giao diện giữa các vật liệu khác nhau; các hạt mang điện được bút phá từ các điện cực có thể vẫn ở gần các điện cực này hoặc có thể di chuyển dẫn đến sự tích lũy điện tích trái dấu ở gần điện cực đối diện hoặc tồn tại trong khối cách điện trong các lỗ trống do tính không đồng nhất của vật liệu; hơn nữa, ion hóa nhiệt sẽ dẫn đến sự hình thành điện tích không gian bên trong lớp cách điện. Điều này dẫn đến việc thiết lập điện tích không gian trong phần lớn điện môi.

## 3. PHƯƠNG PHÁP PEA ỨNG DỤNG TRONG MẪU VẬT LIỆU PHẪNG

### 3.1. Nguyên lý của phương pháp PEA

Nguyên lý của phương pháp PEA là khi đặt các xung điện trường (độ lớn khoảng

kV/mm) trong thời gian rất ngắn (nano giây) đi qua vật liệu cách điện, sự tương tác nhờ lực Coulomb giữa các xung điện áp và điện tích có sẵn trong điện môi tạo ra sự dịch chuyển của điện tích xung quanh vị trí cân bằng của nó và sóng âm có biên độ tỷ lệ với lượng điện tích được tạo ra. Tín hiệu âm được truyền về phía điện cực và được phát hiện chuyển đổi sóng âm thành tín hiệu điện qua bộ cảm biến điện áp (hình 2). Tín hiệu điện áp này đặc trưng cho mật độ điện tích trong điện môi [6]. Sử dụng một kỹ thuật hiệu chỉnh phù hợp cho phép thu được sự phát triển và phân bố điện tích không gian trong lớp điện môi.



Hình 2. Sơ đồ khối của phương pháp PEA [1]

### 3.2. Kỹ thuật hiệu chỉnh trong phép đo điện tích không gian theo phương pháp PEA

Giả sử trong điện môi có một điện tích  $q$  (hình 2) được đặt trong một xung điện trường  $e$ , lực sinh ra là  $f = q.e$  (xung điện trường  $e$  theo chiều  $x$  dọc theo độ dày khối điện môi). Lực tác dụng theo phương  $x$  trên một thể tích  $S.dx$  chứa một mật độ điện tích  $\rho$  là:

$$\mathcal{F}_x(x,t) = \rho(x).S.dx.e_x(t) \quad (1)$$

Áp lực tác dụng lên tiết diện  $S$  là:

$$\delta p_x(x,t) = \mathcal{F}_x(x,t) / S = \rho(x).dx.e_x(t) \quad (2)$$

Gọi  $v_p$ ,  $v_{Al}$  lần lượt là vận tốc lan truyền

sóng âm trong mẫu vật liệu và ở điện cực dưới ( $Al$ ),  $l$  là độ dày của điện cực  $Al$  (hình 2). Khi đó áp lực lan truyền tác dụng đến bộ cảm biến điện áp (piezo) là:

$$\delta p_x(x,t) = \rho(x).e_x(t - l/v_{Al} - x/v_p) \quad (3)$$

Đặt  $\tau = x/v_p$  và  $\rho(x) = \rho(\tau.v_p) = r(\tau)$  là mật độ điện tích không gian dọc theo độ dày của điện môi, áp lực tổng của các lớp tác động lên độ dày  $dx$  là:

$$p(t) = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \delta p_x(x,t) = v_p \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} e_x\left(t - \frac{l}{v_{Al}} - \tau\right).r(\tau).d\tau \quad (4)$$

Gọi  $h(t)$  là hàm truyền của hệ thống,  $v_s(t)$  là tín hiệu đo được từ cảm biến điện áp (piezo), ta có:

$$v_s(t) = h(t).p(t) \quad (5)$$

Để đơn giản, ta chuyển biểu thức về dạng tần số  $f$  theo chuỗi số Fourier, ta có:

$$V_s(f) = H(f).P(f) \quad (6)$$

Khi cảm biến điện áp được nối với 1 bộ khuếch đại, xung nhận được của mạch được đưa qua bộ khuếch đại  $g(t)$ . Khi đó tín hiệu nhận được từ phương pháp PEA dạng tần số  $f$  là:

$$\begin{aligned} V_{PEA}(f) &= H(f).P(f).G(f) \\ &= H(f).G(f).v_p.E(f).R(f).exp(-2i\pi l/v_{Al}) \end{aligned} \quad (7)$$

Suy ra,

$$V_{PEA}(f) = S(f).R(f) \quad (8)$$

trong đó:

$$S(f) = v_p.H(f).G(f).E(f).exp(-2i\pi l/v_{Al}) \quad (9)$$

được gọi là hàm biến đổi của hệ thống này.

Hàm truyền này có thể được lấy từ hiệu

tín hiệu chuẩn  $V_{PEA1}(f)$  được tạo ra bởi điện tích ( $\sigma_1$ ) được hình thành ở điện cực thấp  $Al$  (nối đất) khi điện áp DC hiệu chỉnh ở cường độ thấp ( $U_{ref}$ ) được đặt qua một mẫu có độ dày  $d$ :

$$V_{PEA1}(f) = S(f) \cdot \sigma_1 / v_p \quad (10)$$

Với  $\sigma_1 = \varepsilon \cdot U_{ref} / d$ .

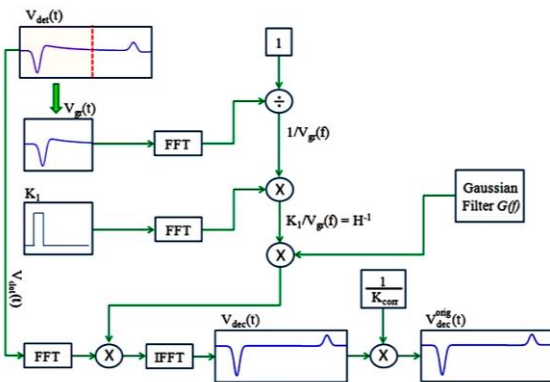
Từ đó ta có thể xác định được  $R(f)$  là:

$$R(f) = \frac{\sigma_1}{v_p} \left[ \frac{V_{PEA}(f)}{V_{PEA1}(f)} \right] \quad (11)$$

Hơn nữa, khi bỏ qua hiện tượng suy giảm của sóng đàn hồi, điện tích không gian được xác định bởi phần thực của biến đổi Fourier ngược của  $R(f)$ :

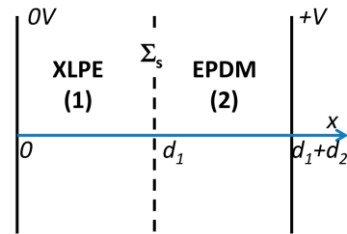
$$\rho(t, v_p) = \frac{\sigma_1}{v_p} \text{Re} \left( F^{-1} \left[ \frac{V_{PEA}(f)}{V_{PEA1}(f)} \right] \right) \quad (12)$$

Việc xử lý tín hiệu được thực hiện bởi phần mềm chuyên dụng để tính toán các biến đổi Fourier trực tiếp và nghịch đảo của tín hiệu PEA. Do tín hiệu PEA có băng thông tần số hạn chế, sự phân chia giữa phổ tín hiệu và có hệ thống hiệu chỉnh dẫn đến khuếch đại nhiều tần số cao. Một phép lọc Gaussian (low-pass) được sử dụng để loại bỏ nhiễu ở tần số cao. Sơ đồ tóm tắt hiệu chỉnh tín hiệu được phác họa trên hình 3.



Hình 3. Sơ đồ tóm tắt hiệu chỉnh tín hiệu PEA [7]

Phương pháp trên cũng có thể sử dụng cho mẫu điện môi được ghép bởi 2 lớp điện môi khác nhau với hằng số điện môi và truyền sóng âm khác nhau. Ví dụ, đối với 2 lớp điện môi khác nhau như trên hình 4, trong đó  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  và  $d_1$ ,  $d_2$  lần lượt là hằng số điện môi và độ dày tương ứng của điện môi 1 và 2.



Hình 4. Điện môi 2 lớp được tạo bởi 2 vật liệu khác nhau là XLPE và EPDM

Tuy nhiên, do sự không liên tục của cấu hình và đặc biệt là tốc độ truyền âm của 2 điện môi khác nhau nên việc xử lý tín hiệu thô của phép đo PEA để xác định điện tích không gian phải đặc biệt được chú ý bởi ngoài việc xuất hiện điện tích trong từng lớp điện môi còn có sự xuất hiện điện tích không gian tại nơi tiếp giáp giữa 2 điện môi. Trong kỹ thuật hiệu chỉnh này, tích điện không gian tại bề mặt tiếp giáp giữa 2 điện môi ban đầu được tính bởi lý thuyết Gauss và điều kiện giới hạn điện thế. Giả định gần đúng ban đầu là phân bố trường mang tính chất điện dung và điện tích tại bề mặt tiếp giáp giữa 2 điện môi (do sự khác biệt về độ dẫn giữa hai vật liệu) có thể bị bỏ qua trong quá trình hiệu chỉnh. Từ các điều kiện này, biểu thức của điện tích tồn tại ở điện cực  $V = 0V$  trong trường hợp hai lớp điện môi (hình 4) là:

$$\rho_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot U}{\varepsilon_1 \cdot d_2 + \varepsilon_2 \cdot d_1}$$

Trong đó:  $U$  là điện áp đặt.

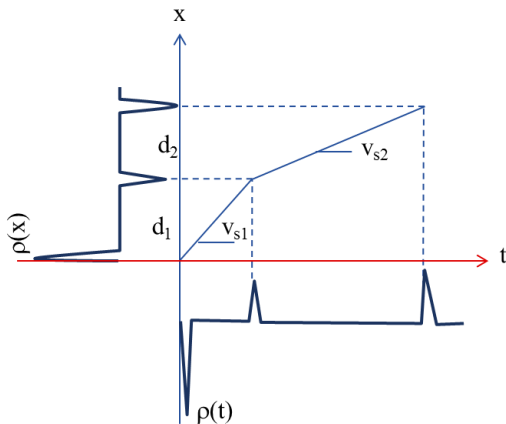
Theo công thức (10), giả thiết rằng có thể bỏ quá sóng phản xạ của sóng âm ở mặt tiếp giáp giữa 2 vật liệu, sự phân bố của điện tích không gian từ tín hiệu thô đo được  $v_{PEA}(t)$  được đưa ra bởi biểu thức:

$$\rho(t(x)) = \frac{1}{v_s(x)} \text{Re} \left[ F^{-1} \left\{ \frac{V_{PEA}(f)}{H_{setup}(f)} \right\} \right]$$

trong đó:  $H_{setup}(f)$  được tính toán bởi  $h_{setup}(t)$  qua sự biến đổi Fourier.

$$h_{setup}(t) = \frac{1}{\rho_1} v_{PEA1}(t)$$

Hình 5 thể hiện một phép đo đơn giản theo thời gian của  $\rho(t)$  thu được bằng kỹ thuật hiệu chỉnh tín hiệu thô PEA, từ đó thu được tín hiệu của điện tích không gian theo vị trí  $\rho(x)$ .

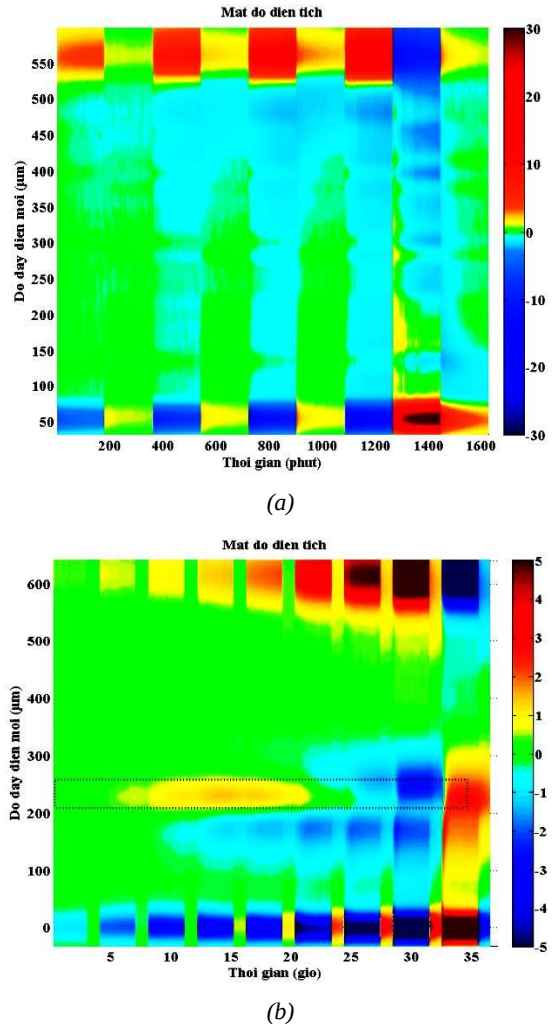


Hình 5. Xác định điện tích không gian theo vị trí từ tín hiệu điện tích không gian theo thời gian từ kỹ thuật hiệu chỉnh tín hiệu thô PEA trong trường hợp ghép 2 lớp điện môi khác nhau

### 3.3. Kết quả phép đo điện tích không gian theo phương pháp PEA

Hình 6 là ví dụ kết quả thu được về sự phân bố điện tích không gian theo thang màu trong vật liệu XLPE (a) ở 40°C và điện môi 2 lớp XLPE/EPDM (b) ở 20°C dưới điện trường đặt thay đổi từ 10 đến 40kV/mm bởi kỹ thuật hiệu chỉnh của tín

hiệu thô trong phép đo điện tích theo phương pháp PEA.

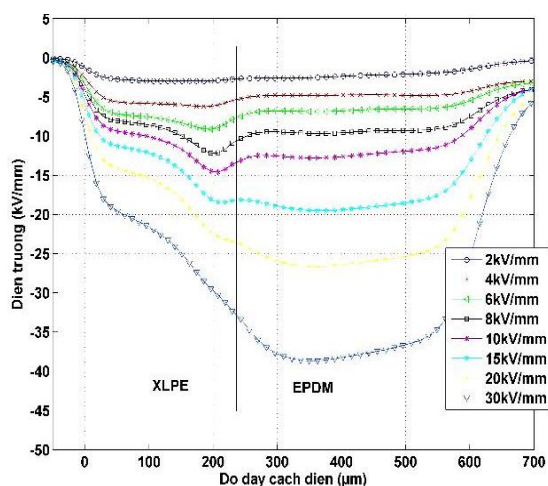


Hình 6. Sự phân bố điện tích không gian theo thang màu ở nhiệt độ 20°C của vật liệu XLPE (a) dưới điện trường đặt là 10, 20, 30 và 40kV/mm sau đó đảo cực -40kV/mm; điện môi 2 lớp XLPE/EPDM (b) dưới điện trường đặt từ 2 đến 30kV/mm sau đó đảo cực -30kV/mm. Bảng màu thể hiện mật độ điện tích theo C/m<sup>3</sup>

Các quy trình cụ thể của kỹ thuật hiệu chỉnh được trong phần 3.2 được áp dụng để xử lý tín hiệu thô liên quan đến tính chính xác của phân bố điện tích không gian. Sự phân tích điện tích hình thành và phân rã, số lượng, dấu hiệu và động học cũng đã được xem xét. Kết quả thu được

có sự đồng nhất khá lớn giữa các kết quả đo điện tích không gian hình thành và kết quả tính toán từ phép đo điện dẫn của vật liệu.

Đối với điện môi ghép bởi 2 lớp vật liệu khác nhau XLPE/EPDM (hình 6.b), do có sự khác nhau về tính chất của vật liệu như vận tốc truyền âm, hằng số điện môi, tính chất điện dẫn... nên tại vị trí tiếp giáp giữa 2 điện môi xuất hiện một lượng điện tích không gian phù hợp với mô hình Maxwell-Wagner về xác định điện tích tại nơi tiếp giáp giữa các điện môi [8], [9].



**Hình 7. Sự phân bố điện trường ở nhiệt độ 20°C của điện môi 2 lớp XLPE/EPDM dưới điện trường đặt khác nhau (tương ứng với sự tích điện không gian của điện môi ở hình 6b)**

Từ kết quả thu được về sự phân bố điện tích trong lớp điện môi, chúng ta cũng có thể tính toán xác định được điện trường trong điện môi bởi sự phát sinh của các điện tích không gian (hình 7).

#### 4. KẾT LUẬN

Để nghiên cứu sự tích lũy điện tích không gian trong vật liệu cách điện dưới tác động của điện áp một chiều HVDC, một số kỹ thuật đo không phá hủy đã được các nhà nghiên cứu phát triển. Cho đến nay, phương pháp PEA được sử dụng rộng rãi nhất bởi ưu điểm về thời gian ghi thông tin, độ phân giải và đáp ứng được nhiều ràng buộc khác nhau. Trong nghiên cứu này, tác giả đã giới thiệu nguyên lý và kỹ thuật hiệu chỉnh của phương pháp PEA trên loại mẫu vật liệu phẳng. Phương pháp này dựa trên sự phát hiện, qua từ cảm biến điện áp, của sóng áp suất được tạo ra từ sự tương tác của xung điện áp với các điện tích bên trong điện môi. Tín hiệu thô từ phép đo PEA trực tiếp trên mẫu vật liệu qua quá trình xử lý hiệu chỉnh tín hiệu có tính đến tốc độ truyền, sự suy giảm, biến dạng của sóng âm theo tần số sẽ thu được sự phân bố điện tích trên vật liệu theo thời gian.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Mazzanti and M. Marzotto, Extruded cables for high-voltage direct-current transmission, IEEE Press. 2013.
- [2] T. Mizutani, "Space Charge Measurement Techniques and Space Charge in Polyethylene", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 1, no. 5, pp. 923–933, 1994.
- [3] Vasquez, "Space Charge Measurement Using Pulsed Electroacoustic Technique and Signal Recovery", J. Eur. Ceram. Soc., pp. 1219–1222, 1999.

- [4] K.S. Suh, E.J. Kim, and T. Takada, "Charge accumulation characteristics in XLPE with heat treated semiconductive electrodes", Proc. Int. Conf. Conduct. Breakdown Solid Dielect., pp. 418–422, 1992.
- [5] L.A. Dissado, O.Paris, T.Ditchi, C.Alquie, and J.Lewiner, "Space Charge Injection and Extraction in High Divergent Fields", Proc. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom., pp. 23–26, 1999.
- [6] K. Fukunaga, "Progress and Prospects in PEA Space Charge Measurement Techniques", DEIS, vol. 24, no. 3, p. 12, 2008.
- [7] Giuseppe Rizzo, Pietro Romano, Antonino Imburgia, and Guido Ala, "Review of the PEA Method for Space Charge Measurements on HVDC Cables and mini-Cables", Energies, vol. 12, 3512, pp. 1–23, 2019.
- [8] Bodega, "Space Charge Measurements on Multi-dielectrics by Means of the Pulsed Electroacoustic Method," IEEE, vol. 13, no. 2, pp. 272–281, 2005.
- [9] Thi Thu Nga Vu, Gilbert Teyssedre, Séverine Le Roy, and Christian Laurent, "Maxwell–Wagner Effect in Multi-Layered Dielectrics: Interfacial Charge Measurement and Modelling", Technologies, vol. 5, no. 27, pp. 1–15, 2017.

#### 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.

