MÔ PHỎNG PHÂN BỐ ĐIỆN TRƯỜNG TRÊN BỀ MẶT CÁCH ĐIỆN POLYME DƯỚI TÁC ĐỘNG NHIỄM BẨN CỦA MÔI TRƯỜNG

SIMULATION OF ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION ALONG POLYMER INSULATORS UNDER POLLUTION CONDITIONS

Đặng Việt Hùng[1], Phùng Anh Tuấn[2], Nguyễn Ngọc Văn[1]

[1]Trường Đại học Điện lực, [2]Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Ngày nhận bài: 10/5/2018, Ngày chấp nhận đăng: 29/8/2018, Phản biện: TS. Lê Thị Minh Châu

Tóm tắt:

Bài báo tập trung vào việc nghiên cứu về sự phân bố điện trường trên bề mặt chuỗi cách điện polyme dưới các tác động của môi trường. Sử dụng công cụ mô phỏng 2D, bài báo nghiên cứu tác động của điện dẫn cũng như độ dày của lớp ô nhiễm trên bề mặt cách điện polyme. Kết quả mô phỏng chỉ ra những vị trí trên chuỗi cách điện có cường độ điện trường lớn, phân bố điện trường dọc theo chiều dài dòng rò trong các trường hợp thay đổi chiều dày hoặc điện dẫn lớp ô nhiễm trên bề mặt cách điện. Bài báo cũng đề xuất một ý tưởng về việc giám sát tình trạng nhiễm bẩn của chuỗi cách điện nhằm lựa chọn thời điểm cần vệ sinh phần tử này.

Từ khóa:

Điện trường, ô nhiễm, cách điện polyme, mô phỏng 2D.

Abstract:

This paper focuses on the distribution of electric fields on the surface of polymeric insulators under the influence of dust. Using the 2D simulation tool, authors investigate the effect of the conductance as well as the thickness of the contaminated layer on the polymer insulator surface. Simulation results indicate locations in the insulation chain that has a high electric field strength, the distribution of electric field along the surface while varying the thickness or conductance of pollution. The article also proposes an idea of monitoring the insulating contamination situation of the insulators to select when to clean it.

Keywords:

Electric field, pollution, polymer insulator, 2D simulatio.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong quá trình làm việc, các vật liệu cách điện đường dây trên không thường chịu sự tích tụ của các chất ô nhiễm từ nhiều nguồn khác nhau như bụi bẩn, sương muối… Lớp phủ ô nhiễm trên bề mặt cách điện là nguyên nhân làm suy giảm cách điện của đường dây, dẫn đến hiện tượng phóng điện trên bề mặt cách điện làm hư hỏng cách điện, gây ra các sự cố mất điện và ảnh hưởng đến việc vận hành lưới điện. Lớp nhiễm bẩn trên bề

mặt cách điện có khả năng dẫn điện, đặc biệt là khi lớp nhiễm bẩn bị ẩm, làm xuất hiện những vùng có điện trường lớn gây ra phóng điện cục bộ từ đó phát triển thành phóng điện toàn phần.

Bài báo thực hiện tính toán mô phỏng phân bố điện trường trên chuỗi cách điện khi bị nhiễm bẩn trong các trường hợp khác nhau, mô hình được xây dựng trên phần mềm mô phỏng trường điện từ Maxwell-2D dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). FEM là phương pháp số gần đúng để giải các bài toán được mô tả bởi các phương trình vi phân đạo hàm riêng trên miền xác định có hình dạng, điều kiện biên bất kỳ mà nghiệm chính xác không thể tìm được bằng phương pháp giải tích.

FEM được sử dụng trong nhiều nghiên cứu về mô phỏng vật liệu cách điện [1-3]. Theo FEM, quá trình tính toán mô phỏng trên chuỗi cách điện được thực hiện như sau:

- Mô tả miền không gian, kích thước hình học của đối tượng cần nghiên cứu.
- Mô tả tính chất vật liệu của các đối tượng cần nghiên cứu.
- Mô tả giới hạn không gian nghiên cứu nhằm đảm bảo độ chính xác theo yêu cầu.
- Rời rạc hóa mô hình mẫu thành một số hữu hạn phần tử. Các phần tử hữu hạn (finite element) sẽ được tạo ra ở bước này. Các phần tử được liên kết với nhau bằng các nút và cạnh để tạo thành mô hình mẫu hoàn chỉnh.
- Phương trình Maxwell và các điều kiện biên được sử dụng để liên kết tất cả các phần tử với nhau tùy theo cấu trúc của chúng bằng việc đơn giản hóa một cách phù hợp, sau đó thiết lập các phương trình phần tử hữu hạn. Hệ phương trình này sẽ được rời rạc hóa trên tập các phần tử, tạo nên ma trận liên kết. Các biến số là các giá trị thế (potentials) ở nút hoặc cạnh.
- Giải hệ phương trình rời rạc trên các nút (hoặc cạnh) để tìm nghiệm là các giá trị thế. Tập hợp các giá trị thế ở các nút (hoặc cạnh) mà làm cho năng lượng của hệ thống tổng thể đạt giá trị cực tiểu sẽ chính là tập nghiệm của hệ phương trình này.
- Các giá trị đo được như điện thế φ (V), điện trường E (V/m), cường độ từ trường H (A/m), mật độ từ cảm B (tesla) sẽ được tính toán từ phân bố các giá trị thế này.

Để nghiên cứu điện thế và điện trường phân bố trên chuỗi cách điện, sử dụng mô hình điện trường tĩnh trong điện môi. Phần mềm tính toán phân bố điện trường bằng cách giải biểu thức:

$$J = \sigma.E \quad (1)$$

Trong đó J (A/m^2) là mật độ dòng điện, $\sigma = 1/\rho$ là độ dẫn điện (Siemens) và E là cường độ điện trường.

Mặt khác, trong bài toán điện tĩnh, điện trường E được xác định bởi:

$$E = - \nabla \varphi \quad (2)$$

Thay phương trình (2) vào (1) và thực hiện phép toán divergent ở cả 2 vế được:

$$\nabla J = \nabla\sigma\nabla \varphi = 0 \quad (3)$$

Div của cảm ứng điện D bằng mật độ điện tích ρ *theo* biểu thức sau:

$$\nabla D = \rho \quad (4)$$

Kết hợp các biểu thức (2), (4) và đưa vào hằng số điện môi ε ($D = \varepsilon E$) ta được phương trình Poisson của điện thế như sau:

$$\nabla \varepsilon \nabla \varphi = - \rho \quad (5)$$

Từ đó:

$$\vec{E} = -\nabla\varphi = -\left(\vec{i}\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) \quad (6)$$

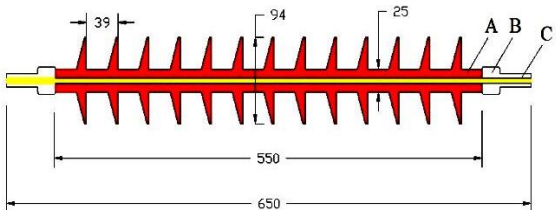
Ở đây, φ là điện thế, cũng chính là biến số cần phải đi tìm. Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, mô hình được phân tích bằng cách rời rạc hóa thành các phần tử dạng tam giác. Bộ giải sẽ đi tìm một phân bố điện thế cực tiểu hóa năng lượng tổng thể và thỏa mãn phương trình (5). Giá trị điện thế cần tìm được gán trên tọa độ của các nút của lưới tam giác. Lưới phần tử chỉ được chia nhỏ hơn tại những vị trí quan trọng của chuỗi cách điện. Điều này góp phần làm giảm độ phức tạp tính toán và tăng tốc độ tính toán.

2. MÔ PHỎNG PHÂN BỐ ĐIỆN TRƯỜNG TRÊN BỀ MẶT CÁCH ĐIỆN

2.1. Mô hình mô phỏng

Hiện nay, cách điện polyme ngày càng được sử dụng rộng rãi do có ưu điểm là trọng lượng nhẹ, dễ dàng vận chuyển, lắp đặt và bảo quản. Trong thực tế, cấu tạo chuỗi cách điện polyme gồm 3 phần chính: lõi ống bằng sợi thuỷ tinh, đĩa cách điện làm bằng polyme tổng hợp và các khớp nối bằng thép mạ kẽm nhúng nóng.

Chuỗi cách điện có dạng hình trụ và có tính chất đối xứng, do vậy bài báo sử dụng mô hình 2D nhằm phân tích, tính toán ảnh hưởng của lớp bụi đến cường độ điện trường trên bề mặt cách điện. Mô hình mô phỏng là chuỗi cách điện polyme hai đầu được bọc kim loại, một đầu được nối với dây dẫn (mang điện thế) và một đầu được nối với cột (điện thế bằng zero). Các đĩa cách điện được làm bằng vật liệu polyme tổng hợp có hằng số điện môi tương đối bằng 4,2 và lõi ống cấu tạo bằng vật liệu sợi thủy tinh có hằng số điện môi tương đối bằng 7,2 (hình 1).



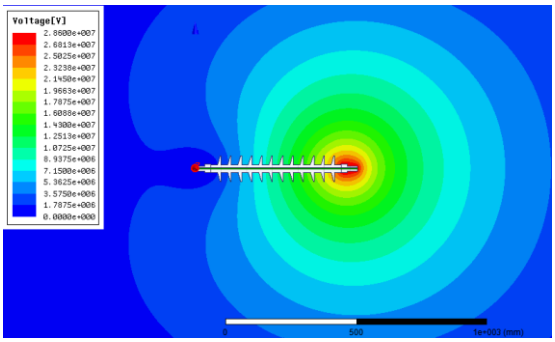
Hình 1. Mô hình chuỗi cách điện polyme

(A - phần cách điện polyme; B - phần đầu kim loại; C - lõi ống cấu tạo bằng vật liệu sợi thủy tinh. đơn vị : mm)

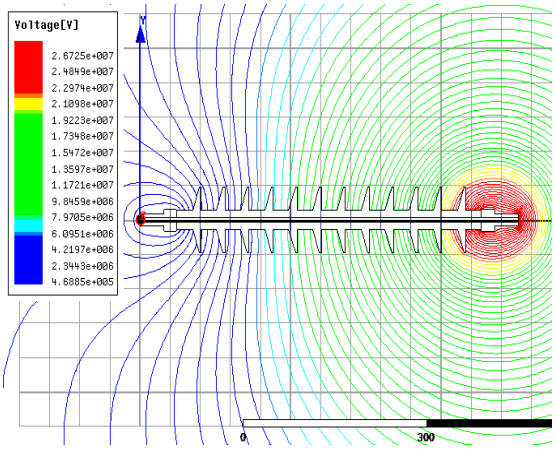
2.2. Kết quả mô phỏng

2.2.1. Trường hợp bề mặt cách điện sạch

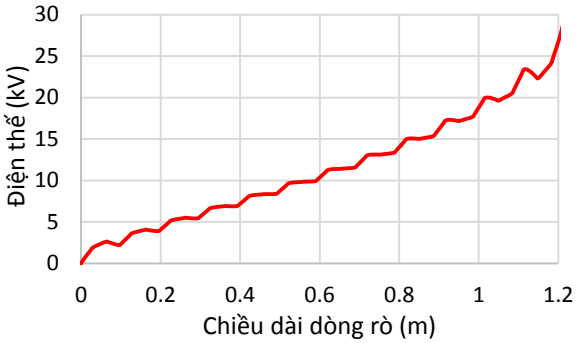
Trước khi xét ảnh hưởng của lớp bụi ô nhiễm đến phân bố điện trường trên chuỗi cách điện, bài báo xét trường hợp khi cách điện không bị ô nhiễm (cách điện sạch), việc đánh giá đồng thời cũng nhằm mục đích so sánh với trường hợp khi chuỗi cách điện bị nhiễm bẩn. Để thực hiện đánh giá, dựa trên mô hình được xây dựng trên phần mềm mô phỏng Maxwell-2D, một đầu điện cực có điện áp 0 kV và đầu còn lại có cực đại của điện áp pha của đường dây 35 kV (sau đây gọi là điện cực dương). Kết quả phân bố cho thấy điện thế tập trung ở điện cực dương và giảm dần về phía điện cực đối điện (hình 2, 3).



Hình 2. Phân bố điện thế chuỗi cách điện trong không gian



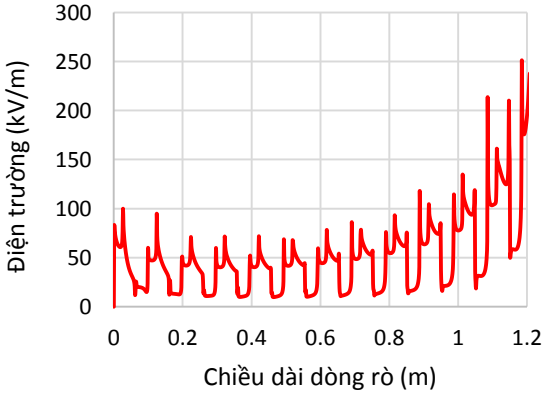
(a)



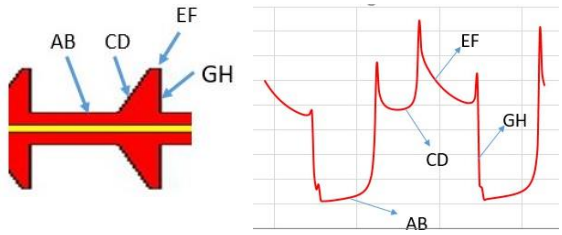
(b)

Hình 3. Phân bố các đường đẳng thế (a) và điện thế trên bề mặt dòng rò (b)

Phân bố điện thế và điện trường dọc theo bề mặt dòng rò cho thấy, điện thế và điện trường thay đổi khi đi qua các đĩa cách điện và tăng dần từ điện cực zero về phía điện cực dương. Đồng thời, khi đi qua các bề mặt polyme cường độ điện trường tại phần đĩa có giá trị lớn hơn tại phần vỏ bọc, cường độ điện trường tăng ở đầu điện cực zero và giảm dần đến khoảng 1/3 chiều dài dòng rò cách điện, sau đó tăng dần về phía điện cực dương, giá trị lớn nhất đạt 252 kV/m tại phía ngoài đĩa polyme cuối cùng gần điện cực (hình 4). Phân tích phân bố điện trường trên một đoạn chuỗi cách điện cho thấy giá trị điện trường thay đổi khi đi qua các đoạn có hình học thay đổi, xuất hiện các đỉnh dạng mũi nhọn tại các điểm gấp khúc (hình 5). Đây là điều cần lưu ý trong thực tế công tác vệ sinh cách điện cũng như trong công nghệ chế tạo cách điện, nhằm đảm bảo an toàn trong vận hành cũng như độ tin cậy cung cấp điện.



Hình 4. Phân bố điện trường trên bề mặt dòng rò chuỗi cách điện sạch



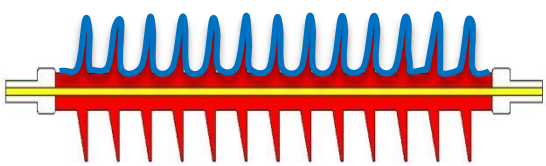
Hình 5. Phân bố điện trường trên một đoạn cách điện

2.2.2. Trường hợp bề mặt cách điện nhiễm bẩn

Trong trường hợp chuỗi cách điện bị nhiễm bẩn, để đánh giá ảnh hưởng của điều kiện môi trường đến phân bố điện trường trên bề mặt chuỗi cách điện, cần tiến hành xét các trường hợp lớp bụi bám trên bề mặt cách điện có độ dày và điện dẫn suất khác nhau, tương ứng trong thực tế đường dây đi qua các vùng nhiễm bẩn với các đặc tính khác nhau của bụi (bụi xi măng, bụi than, cát, sương muối…). Khi vận hành cách điện đường dây trên không, trường hợp nguy hiểm nhất xảy ra khi phóng điện nối liền giữa hai điện cực gây ra hiện tượng ngắn mạch, bài báo sẽ xem xét trường hợp khi lớp bụi bám trên toàn bộ bề mặt cách điện (hình 6).

Để thuận lợi cho việc so sánh, xét 2 trường hợp:

- Trường hợp 1: Lớp bụi có điện dẫn suất không đổi 20μS/m (hằng số điện môi tương đối 7,1), độ dày d = 1 mm và 3 mm tương ứng với các trường hợp ô nhiễm trung bình và ô nhiễm nặng.
- Trường hợp 2: Lớp bụi có độ dày không đổi d=1mm nhưng có giá trị điện dẫn suất ρ khác nhau tương ứng với các trường hợp ρ =5 μS/m; 10 μS/m; 20 μS/m.

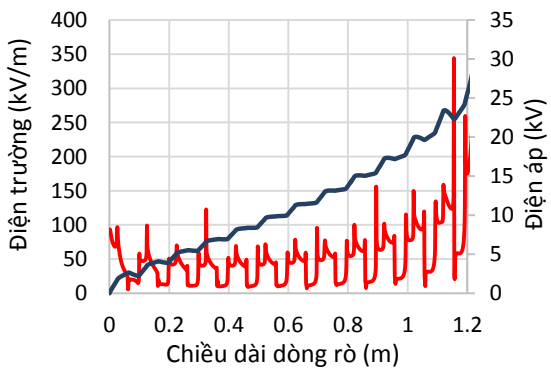


Hình 6. Mô hình lớp bụi bám trên bề mặt chuỗi cách điện

❖ Trường hợp 1: Lớp nhiễm bẩn với độ dày khác nhau

Để xét ảnh hưởng độ dày lớp bụi nhiễm bẩn đến sự phân bố điện trường cũng như sự làm việc tin cậy của chuỗi cách điện, ta thực hiện phân tích trường hợp các lớp bụi có độ dẫn điện giống nhau bằng 20 μS/m nhưng khác nhau về độ dày lớp bụi trên bề mặt cách điện. Cường độ điện trường và điện áp được xét trên bề mặt ngay trên lớp bụi dọc theo chiều dài dòng rò.

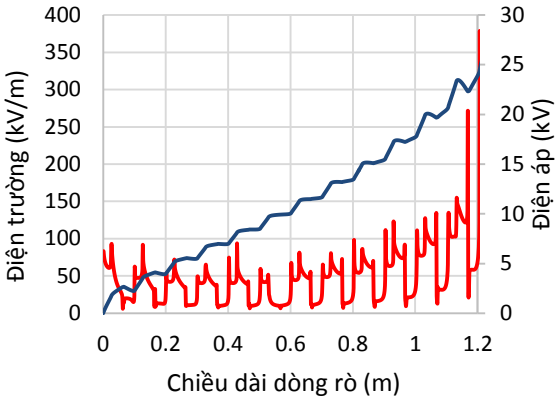
Kết quả mô phỏng cho thấy, chiều dày lớp bụi ảnh hưởng đến sự phân bố điện trường trên bề mặt lớp bụi, khi độ dày lớp bụi tăng thì cường độ điện trường trên bề mặt tăng cho thấy ảnh hưởng của độ dày lớp bụi đến sự làm việc tin cậy của chuỗi cách điện (hình 7, 8). Một số nghiên cứu quốc tế cũng cho kết quả tương tự [4,5].



Hình 7. Phân bố điện thế và điện trường khi d= 1 mm

Ta nhận thấy rằng điện trường phân bố giống trường hợp cách điện sạch, điện trường lớn nhất xảy ra tại phía ngoài đĩa cách điện cuối cùng gần điện cực dương, khi chiều dày lớp bụi tăng thì giá trị điện

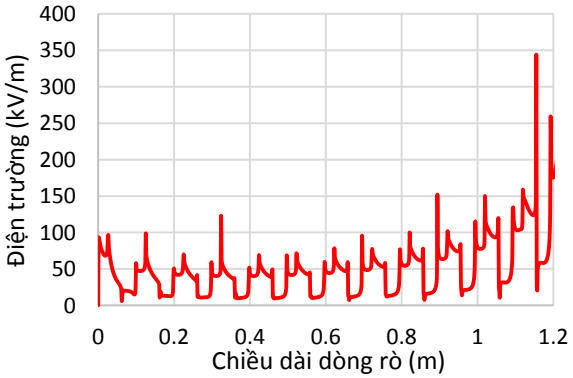
trường trên bề mặt tăng tương ứng, giá trị lớn nhất điện trường bằng 344,2 kV/m khi *d*=1 mm và tăng lên 378,7 kV/m tương ứng *d*=3 mm.



Hình 8. Phân bố điện thế và điện trường khi d=3mm

❖ Trường hợp 2: Lớp nhiễm bẩn với điện dẫn suất khác nhau

Để xét ảnh hưởng của giá trị điện dẫn suất đến sự phân bố điện trường cũng như sự làm việc tin cậy của chuỗi cách điện, ta thực hiện phân tích trường hợp khi lớp bụi có cùng độ dày bằng 1 mm nhưng có các giá trị độ dẫn điện khác nhau (5-10-20 µS/m).



Hình 9. Phân bố điện trường khi ρ=10µS/m

Kết quả cho thấy phân bố cường độ điện trường giống nhau đối với cùng giá trị chiều dày và điện dẫn suất lớp bụi khác nhau. Giá trị cường độ điện trường lớn nhất tăng khi điện dẫn lớp bụi tăng, giá trị cường độ điện trường tăng tương ứng từ 339,2 kV/m; 341,1 kV/m đến 344,2 kV/m khi điện dẫn suất lớp bụi tăng từ 5 µS/m, 10 µS/m đến 20 µS/m (hình 9), biết rằng giá trị cường độ điện trường ban đầu giới hạn có thể gây xuất hiện hiện tượng phóng điện trên bề mặt cách điện là 0,45 kV/mm hay 450 kV/m [4].

3. KẾT LUẬN

Trong quá trình vận hành, bề mặt cách điện đường dây trên không thường chịu ảnh hưởng của điều kiện môi trường (bụi, sương muối, sương mù…) tại nơi mà đường dây đi qua. Mô hình phần tử hữu hạn trên các phần mềm mô phỏng trường điện từ có thể giúp mô phỏng chuỗi cách điện, đánh giá mức độ ảnh hưởng với các thông số khác nhau của lớp bụi đến phân bố điện trường trên bề mặt cách điện.

Kết quả mô phỏng cho thấy trong trường hợp chuỗi cách điện sạch hay mang bụi trên bề mặt, phân bố điện trường dọc theo chiều dài dòng rò thay đổi khi đi qua vùng thân vỏ hay đĩa cách điện và đạt giá trị lớn nhất tại điểm ngoài đĩa cách điện polyme gần điện cực dương (đạt giá trị 252 kV/m đối với trường hợp cách điện sạch). Hình dạng phân bố cường độ điện trường trên bề mặt dòng rò tương đối giống nhau cho hai trường hợp có bụi và không bụi. Khi chiều dày và điện dẫn lớp

bụi tăng, giá trị cường độ điện trường lớn nhất tăng. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết. Thật vậy, khi chịu tác động của môi trường, điện trường bề mặt tập trung tăng mạnh, điều này kéo theo điều kiện làm việc nặng nề cho cách điện, dễ gây đánh hỏng cách điện. Vì vậy, trong thực tế vận hành cần rửa và vệ sinh cách điện thường xuyên, đặc biệt tại những điểm có điện trường tập trung có giá trị lớn. Vị trí điện trường tập trung lớn nhất được tìm thấy ở nghiên cứu này là ở gần đuôi của chuỗi cách điện, ở gần khu vực treo dây. Do vậy, đây sẽ là vị trí xung yếu trên chuỗi cách điện cần được chú ý khi thực hiện công tác vệ sinh cách điện. Bên cạnh đó, nghiên cứu này cũng chỉ ra rằng, khi bề dày lớp bụi đạt đến giá trị khoảng 1 mm thì giá trị điện trường nhiễm bẩn sẽ tăng đến giới hạn phóng điện. Do đó, đây cũng có thể là ngưỡng cảnh báo cần phải thực hiện vệ sinh chuỗi cách điện. Việc giả lập lại môi trường tạo bụi tương đương sự nhiễm bẩn chuỗi cách điện sẽ cho phép dự báo được thời điểm cần thực hiện việc vệ sinh này.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ và giúp đỡ của Viện Nghiên cứu Quốc tế về khoa học và kỹ thuật tính toán - Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (ICSE - HUST) đã hỗ trợ nhóm tác giả trong việc sử dụng phần mềm có bản quyền Ansys Maxwell để thực hiện các tính toán mô phỏng thể hiện trong bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] E. Asenjo, N. Morales, A. Valdenegro, Solution of low frequency complex fields in polluted insulators by means of the finite element method, IEEE Transactions on Dielectics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 1, February 1992.

[2] Marungsri B and al., Analysis of electric field and potential distributions along surface of silicone rubber insulators under various contamination conditions using finite element method, World Acad Sci, Eng Technol 2009.

[3] Muniraj C, Chandrasekar S., Finite element modeling for electric field and voltage distribution along the polluted polymeric insulator. World J Model Simul, England, UK 2012.

[4] Murugan N, Sharmila G, Kannayeram G., Design optimization of high voltage composite insulator using electric field computations, International conference on circuits, power and computing technologies (ICCPCT), India, 2013.

[5] Muniraj, C., Chandrasekar, S., Finite element modeling for electric field and voltage distribution along the polluted polymeric insulator, World Journal of Modelling and Simulation, Volume 8, Issue 4, 2012.

Giới thiệu tác giả:

Tác giả Đặng Việt Hùng tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2002, 2004. Nhận bằng Tiến sĩ Kỹ thuật điện năm 2010 tại trường Ecole Centrale de Lyon, Cộng hòa Pháp.

Lĩnh vực nghiên cứu: chất lượng điện năng, kỹ thuật vật liệu điện cao áp, tự động hóa lưới điện.

Tác giả Phùng Anh Tuấn tốt nghiệp đại học tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội chuyên ngành hệ thống điện năm 2002, nhận bằng Thạc sĩ Kỹ thuật điện năm 2003 và Tiến sĩ Kỹ thuật điện năm 2006 tại Đại học Quốc gia Bách khoa Grenoble - INPG - Cộng hòa Pháp. Hiện tác giả là giảng viên, nghiên cứu viên tại Viện Điện - Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: nghiên cứu tối ưu hóa cấu trúc máy điện, nghiên cứu ứng dụng phương pháp tính toán số trong thiết kế máy điện đặc biệt, nghiên cứu ứng dụng vật liệu mới trong nâng cao hiệu năng của thiết bị điện, nghiên cứu chẩn đoán và giám sát trang thiết bị điện, phân tích các hư hại của trang thiết bị điện trung và cao áp, nghiên cứu và phát triển các kỹ thuật nâng cao hiệu quả chẩn đoán.

Tác giả Nguyễn Ngọc Văn tốt nghiệp đại học chuyên ngành thiết bị điện - điện tử năm 2008, nhận bằng Thạc sĩ Kỹ thuật điện năm 2010 tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: tự động hóa hệ thống điện, năng lượng mặt trời, công nghệ sạc thông minh.