

## ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA ĐIỆN ÁP MỘT CHIỀU ĐẾN HIỆN TƯỢNG PHÓNG ĐIỆN TRÊN BỀ MẶT CÁCH ĐIỆN

### THE EFFECT OF DC VOLTAGE ON THE DISCHARGE PHENOMENA AT INSULATOR SURFACE

**Đặng Việt Hùng, Nguyễn Duy Minh**

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 22/01/2021, Ngày chấp nhận đăng: 21/05/2021, Phản biện: TS. Nguyễn Mạnh Quân

#### **Tóm tắt:**

Bài báo trình bày và đánh giá ảnh hưởng của điện áp một chiều (DC) đến hiện tượng phóng điện trên bề mặt cách điện, thực hiện mô hình hóa và mô phỏng hiện tượng phóng điện dựa trên phương pháp mạch điện tương đương RLC. Mô hình được xây dựng cho phép mô phỏng và đánh giá ảnh hưởng của điện áp DC đến quá trình lan truyền tia lửa điện trên bề mặt vật liệu cách điện; các thông số của quá trình như điện tích, điện trở, bán kính, dòng điện, điện áp, vận tốc được mô phỏng dựa trên mô hình động. Mô hình cũng cho phép đánh giá giá trị điện áp đặt, phân bố lớp điện dẫn trên bề mặt cách điện đến quá trình lan truyền và phóng điện toàn phần tia lửa điện.

#### **Từ khóa:**

Tia lửa điện, phóng điện bề mặt, điện áp một chiều, mạch điện tương đương.

#### **Abstract:**

This paper deals with the effect of direct voltage (DC) on the discharge phenomena at insulator surface. A model and perform simulations of discharge phenomena base on RLC equivalent circuit method. The described model allows to simulate and evaluate the effect of DC voltage to the propagation of electrical arc on the insulator surface; parameters of this process such as electric charge, resistance, radius, current, voltage, velocity are simulated based on dynamic model. The model also allows estimating of voltage rating and conductive layer distribution on insulator surface to the arc propagation and flashover.

#### **Keywords:**

Arc, discharge propagation, DC voltage, equivalent electrical network.

### **1. ĐẶT VẤN ĐỀ**

Hiện nay, cùng với sự phát triển của khoa học công nghệ, hệ thống truyền tải điện cao áp một chiều (HVDC) ngày càng được sử dụng rộng rãi trong thực tế tại nhiều nước trong vai trò truyền tải điện năng công suất lớn. Trong quá trình

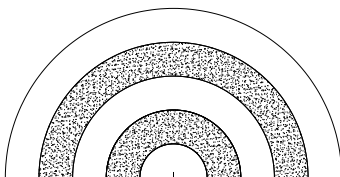
truyền tải, đường dây HVDC đi qua nhiều khu vực khác nhau, cách điện đường dây chịu ảnh hưởng của môi trường ô nhiễm, dưới tác dụng của điện trường cao trên đường dây làm xuất hiện hiện tượng phóng điện trên bề mặt cách điện gây ra tổn thất, phá hỏng cách điện và ảnh hưởng

đến độ tin cậy trong vận hành đường dây truyền tải.

Việc nghiên cứu, đánh giá ảnh hưởng của điện áp và môi trường đến quá trình bắt đầu và lan truyền tia lửa điện trên cách điện đường dây là quan trọng trong việc nâng cao độ tin cậy cung cấp điện. Hiện nay, việc nghiên cứu hiện tượng phóng điện trên cách điện có thể được thực hiện bằng nghiên cứu thực nghiệm trong phòng thí nghiệm hoặc thực hiện thông qua mô hình hóa và mô phỏng hiện tượng [1,2,3]. Bài báo sử dụng phương pháp mô hình động nhằm mô hình hóa và mô phỏng hiện tượng, quá trình lan truyền tia lửa điện được mô hình bằng các bước phát triển của một mạch điện tương đương RLC [3], các điều kiện lan truyền theo các tiêu chuẩn đã biết, các tham số và điều kiện ảnh hưởng tới quá trình lan truyền được xác định.

**2. MÔ HÌNH MÔ PHỎNG**

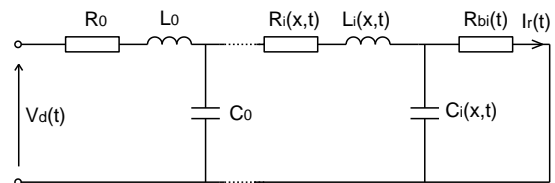
Để đánh giá ảnh hưởng của điện áp và các thông số bề mặt đến quá trình lan truyền tia lửa điện, bài báo xây dựng mô hình mô phỏng là trường hợp mặt phẳng, trong đó lớp ô nhiễm phân bố không đồng đều trên bề mặt; mô hình gồm 5 lớp, lớp ô nhiễm và lớp sạch xen kẽ nhau và xét cho trường hợp lớp sạch gần điện cực dương (hình 1).



Hình 1. Mô hình mô phỏng

Quá trình lan truyền được mô hình hóa bằng phương pháp mạch điện tương

đương. Trong đó, giả thiết mỗi khi điều kiện lan truyền thỏa mãn thì tia lửa điện phát triển được một bước, mỗi bước được thay thế bằng một đoạn mạch  $R_iL_iC_i$ . Do vậy, quá trình lan truyền tương ứng với việc các đoạn mạch RLC được mắc nối tiếp nhau. Mô hình mô phỏng thể hiện trong hình 2; trong đó  $V_d$  là điện áp đặt,  $R_iL_iC_i$  tương ứng là điện trở và điện dung của đoạn mạch thứ  $i$ ,  $R_b$  là điện trở lớp bề mặt tính từ đầu tia lửa điện đến điện cực đối diện.



Hình 2. Mô hình mạch điện tương đương RLC

Giả thiết tại thời điểm ban đầu tia lửa điện có độ dài  $x_0$  với các giá trị  $R_0L_0C_0$ ,  $I_r$  là dòng điện rò, ta có dòng điện và điện áp tại mỗi bước thứ  $i$  được xác định theo:

$$V_{i-1}(t) - V_i(t) = R_i I_i(t) + L_i \frac{dI_i(t)}{dt} \tag{1}$$

$$I_i(t) = I_{i-1}(t) - C_{i-1} \frac{dV_{i-1}(t)}{dt} \tag{2}$$

$$V_d(t) - V_0(t) = R_0 I_0(t) + L_0 \frac{dI_0(t)}{dt} \tag{3}$$

$$V_0(t) - V_1(t) = R_1 I_1(t) + L_1 \frac{dI_1(t)}{dt} \tag{4}$$

$$I_0(t) = I_1(t) + C_1 \frac{dV_0(t)}{dt} \tag{5}$$

$$I_1(t) = I_r(t) + C_1 \frac{dV_1(t)}{dt} \tag{6}$$

$$I_r(t) = \frac{V_1(t)}{R_{b1}} \tag{7}$$

Từ các phương trình (3)-(7) có thể viết lại dưới dạng sau:

$$Y(t) = AX(t) + BU(t) \quad (8)$$

Trong đó:

$$Y(t) = \frac{dX(t)}{d(t)}$$

$$\text{và } X(t) = \begin{bmatrix} V_0(t) \\ V_1(t) \\ I_0(t) \\ I_1(t) \end{bmatrix}$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} V_d(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Với  $A, B$  là các tham số của ma trận trạng thái,  $U(t)$  và  $Y(t)$  tương ứng là các giá trị đầu vào và đầu ra. Phương trình (8) cho phép tính toán tại thời điểm bất kì các giá trị tương ứng với các bước phóng điện như điện áp  $V_0$  và  $V_i$ , dòng điện  $I_0$  và  $I_i$ . Trong trường hợp xảy ra hiện tượng phóng điện toàn phần, dòng điện và điện áp tương ứng được xác định bởi  $I_f(t) = I_N(t)$  và  $V_f(t) = V_d(t) - V_N(t)$ , với  $N$  là tổng số bước phát triển tia lửa điện.

### 3. THAM SỐ MÔ HÌNH THAY THẾ

#### 3.1. Điện trở lớp bề mặt

Điện trở lớp bề mặt được xác định theo mô hình được đề xuất bởi Renyu-Zhicheng [4] có dạng như sau:

$$R_b(t) = \frac{1}{\pi\delta} \ln \frac{L - x(t)}{r} \quad (9)$$

Trong đó  $\delta$  là điện dẫn suất,  $r$  là bán kính tại đầu tia lửa điện và  $L, x(t)$  tương ứng là chiều dài bề mặt phóng điện và chiều dài tia lửa điện tại thời điểm  $t$ .

#### 3.2. Điện dung lớp bề mặt

Điện dung lớp bề mặt được xác định theo mô hình sau:

$$C_b = \epsilon_b \frac{S_b}{L - X} \quad (10)$$

Trong đó  $\epsilon_b, S_b$  là hằng số điện môi và diện tích lớp bề mặt. Trong trường hợp bề mặt phẳng ta có  $S_b = e_b \cdot l$  với  $e_b, l$  tương ứng là chiều rộng và chiều dài lớp bề mặt.

#### 3.3. Điện trở tia lửa điện

Điện trở của tia lửa điện được tính toán theo phương trình Mayr [5] với giả thiết tia lửa điện có dạng hình trụ tròn với bán kính không đổi.

$$\frac{d}{dt} \left[ \ln \frac{1}{R_i} \right] = \frac{1}{\tau} \left( \frac{V_{arc}(t) I_{arc}(t)}{P_0} - 1 \right) \quad (11)$$

Với  $V_{arc}, I_{arc}$ , tương ứng là điện áp, dòng điện của tia lửa điện, hằng số thời gian tia lửa điện  $\tau = 100 \mu s$ ; theo giả thiết Mayr, giá trị nhiệt dẫn và nhiệt độ bên ngoài tia lửa điện là hằng số, do đó công suất tia lửa điện được xác định như sau:  $P_0 = E_{arc} \cdot I_{arc}$ .

#### 3.4. Điện dung tia lửa điện

Trong mô hình mô phỏng, điện dung ở đầu tia lửa điện ( $C_{arc}$ ) được tính từ đầu tia lửa điện đến điện cực đối diện theo công thức sau [6]:

$$C_{arc}(t) = 4\pi\epsilon_0 r \cdot sh(\alpha) \sum_{n=1}^{\infty} [sh(n\alpha)]^{-1} \quad (12)$$

Trong đó:  $cosh(\alpha) = \frac{L - x(t)}{r}$  với  $r$  là bán kính tia lửa điện được tính toán theo mô hình Wilkins [6].

$$r(t) = \sqrt{\frac{I_{arc}(t)}{1,45\pi}}$$

### 3.5. Điện cảm tia lửa điện

Điện cảm tia lửa điện được xác định theo mô hình tính toán được đề xuất bởi [8], trong đó giả thiết điện cảm gồm hai thành phần: điện cảm do năng lượng từ trường tích lũy trong tia lửa điện và điện cảm do từ trường bức xạ bởi dòng điện tia lửa điện.

$$L_i = \mu_0/2\pi \left[ 0.25 + \ln\left(\frac{D_f}{r_i}\right) \right] \quad (13)$$

### 3.6. Vận tốc tia lửa điện

Vận tốc trong quá trình lan truyền phụ thuộc vào cường độ điện trường tại điểm đầu tia lửa điện, hay nói cách khác phụ thuộc vào độ lớn điện áp đặt. Để tính toán vận tốc tức thời ( $v_i$ ) của tia lửa điện, mô hình sử dụng phương pháp cân bằng năng lượng của A. Beroual [3].

$$v_i(t) = \left( \frac{2\beta}{\rho\pi r_i^2} \cdot P_i(t) \right)^{1/3} \quad (14)$$

Trong:  $\rho$  là mật độ không khí và  $\beta$  ( $0 < \beta < 1$ ) là tỉ lệ phần năng lượng cần thiết cho quá trình lan truyền tia lửa điện,  $P(t)$  là công suất tia lửa điện tính bởi  $P(t) = V_{arc} \cdot I_{arc}$ .

### 3.7. Dòng điện tia lửa điện

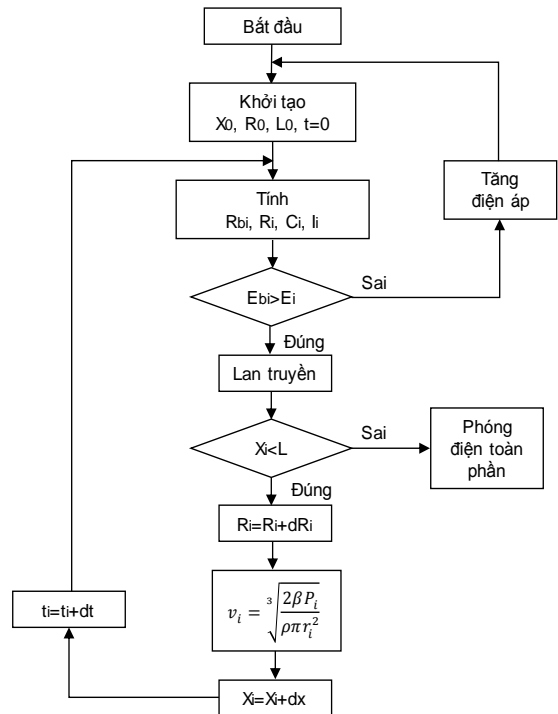
Từ phương trình (1) và (2), dòng điện tia lửa điện tại bước thứ  $i$  được tính theo:

$$I_i(t) = \frac{V_{i-1}(t) - V_i(t)}{R_i} \quad (15)$$

Thuật toán tính toán quá trình phóng điện được giới thiệu ở hình 3, giả thiết ban đầu tia lửa điện có chiều dài bằng  $0.1L$ , điện áp đặt được tăng dần đến khi xảy ra hiện tượng phóng điện toàn phần.

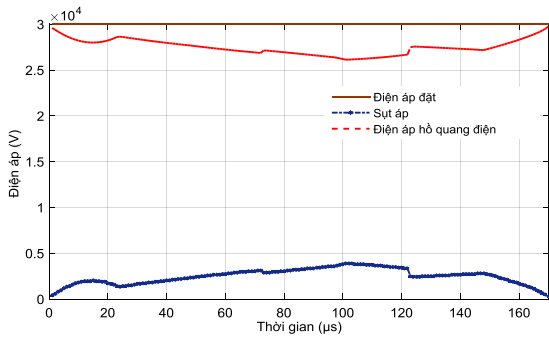
## 4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Bài báo thực hiện mô hình hóa và mô phỏng cho trường hợp bề mặt lớp cách điện phẳng có bán kính bằng 15 cm, gồm 05 lớp có chiều rộng 3 cm; lớp sạch và lớp ô nhiễm có điện dẫn tương ứng bằng  $1 \mu\text{S/m}$  và  $100 \mu\text{S/m}$ , chiều dày tương ứng bằng 0.1 mm và 0.7 mm. Điện áp đặt một chiều khi xảy ra phóng điện toàn phần nối liền 2 điện cực bằng 30 kV.

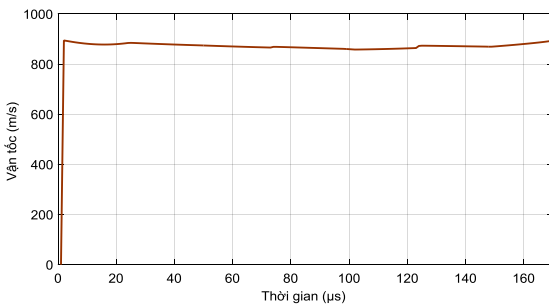


Hình 3: Thuật toán tính toán quá trình lan truyền tia lửa điện

Kết quả mô phỏng cho thấy, trong quá trình lan truyền, điện áp tia lửa điện thay đổi khi đi qua các lớp điện dẫn khác nhau (hình 4) và có xu hướng giảm khi đi qua lớp bề mặt có điện dẫn lớn, kết quả tương tự với trường hợp điện áp đặt là xoay chiều. Thời gian tia lửa điện lan truyền đến bề mặt đối diện và xảy ra phóng điện toàn phần tại thời điểm 165  $\mu\text{s}$ .

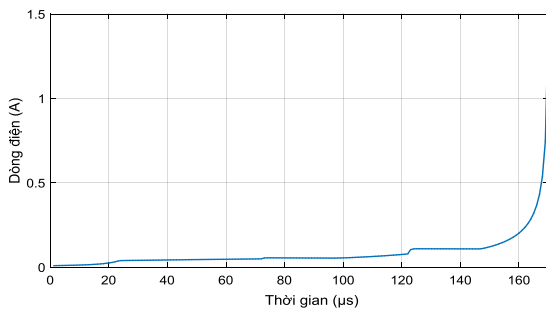


Hình 4. Điện áp trong quá trình lan truyền



Hình 5. Vận tốc trong quá trình lan truyền

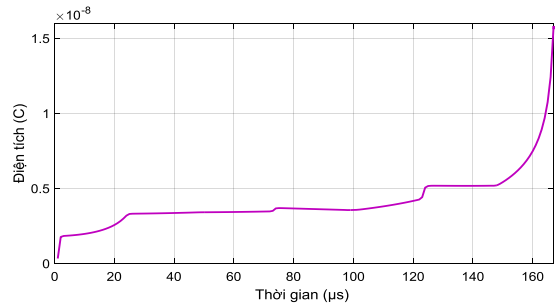
Hình 5 cho thấy vận tốc tia lửa điện trong quá trình lan truyền trên bề mặt. Dưới điện áp một chiều, vận tốc tia lửa điện gần như không đổi trong quá trình lan truyền và đạt giá trị xấp xỉ 900 m/s ngay sau khi xuất hiện tia lửa điện, quá trình lan truyền vận tốc tia lửa điện thay đổi nhỏ khi đi qua lớp bề mặt có điện dẫn khác nhau.



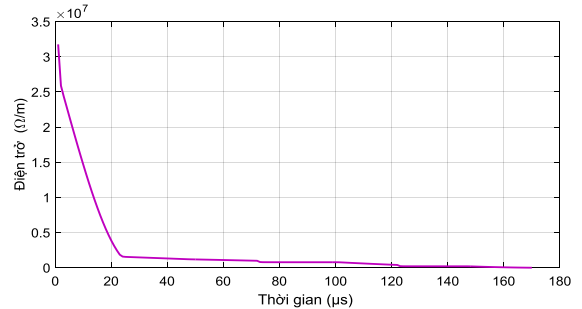
Hình 6. Dòng điện trong quá trình lan truyền

Trong quá trình lan truyền, dòng điện tăng nhẹ và gần như không đổi, dòng điện tăng đột ngột tại thời điểm xảy ra phóng điện

toàn phần đạt giá trị 1.5A (hình 6), điện tích sau mỗi bước phát triển của tia lửa điện tính bằng  $q_i=C_iV_i(t)$  và có dạng như hình 7.

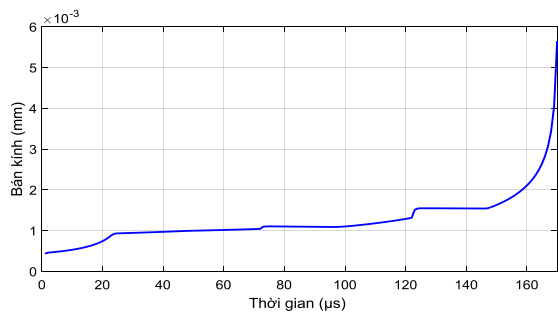


Hình 7. Điện tích trong quá trình lan truyền



Hình 8. Điện trở trong quá trình lan truyền

Điện trở tia lửa điện giảm nhanh và có giá trị nhỏ gần như không đổi trong quá trình lan truyền theo phương trình Mayr (hình 8); bán kính tia lửa điện là hàm số của dòng điện theo mô hình Wilkins, hình 9 thể hiện sự thay đổi của bán kính trong quá trình lan truyền.



Hình 9. Bán kính trong quá trình lan truyền

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo sử dụng phương pháp mạch điện tương đương mô phỏng động quá trình lan truyền tia lửa điện trên bề mặt cách điện dưới điện áp một chiều, kết quả mô phỏng thể hiện sự thay đổi của các tham số vận tốc, dòng điện, bán kính, điện tích trong quá trình lan truyền. Kết quả mô phỏng cho thấy vận tốc tia lửa điện gần như

không đổi và đạt giá trị khoảng 900 m/s, các tham số có sự thay đổi nhỏ khi đi qua các lớp điện dẫn khác nhau. Việc xác định các đặc tính tia lửa điện cho phép xem xét các vấn đề liên quan đến giá trị điện dẫn và sự phân bố của lớp bề mặt cách điện đối với quá trình thiết kế, chế tạo và đặc biệt là vận hành đường dây cao áp một chiều.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Sundararajan and R.S. Gorur, *Dynamic Arc Modelling of Pollution Flashover on Insulators under DC Voltage*, IEEE Trans. On Elect. Insul., Vol. 28, pp.209-219, 1993.
- [2] Muhsin Tunay Gencoglu, Mehmet Cebeci, *The pollution flashover on high voltage insulators*, Electric Power Systems Research, November, 2008.
- [3] Beroual A., *Universal dynamic model of discharge propagating in air, liquids, solid/liquid interfaces and polluted*, 13th International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, The Netherlands, August 25-29, 2003.
- [4] Z. Renyu and G.Zicheng, *A study on difference between the flashover voltage of contaminated insulator under AC and DC voltage*, IEEE Trans., pp.332-334, 1985.
- [5] Mayrer O., *Beitrag zur theorie der statischen und der dynamischen lichtbogens*, Arch. Elektrotech, pp.558-608, 1943.
- [6] Durand E., *Electrostatique*, pp.588-608, 1943.
- [7] R. Wilkins, *Flashover Voltage of HV Insulators with Uniform Surface Pollution Films*, Proc IEE, Vol. 116, pp. 457-465, 1969.
- [8] Fofana I., Beroual A., *A model for long gaps discharge using an equivalent electrical network*, IEEE Trans. Dielectric Electrical Insulation, pp.273-283, 1996.

### Giới thiệu tác giả:



Tác giả Nguyễn Duy Minh tốt nghiệp đại học ngành hệ thống điện Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào năm 2004, nhận bằng Thạc sĩ và Tiến sĩ ngành năng lượng và các hệ thống vào năm 2011 tại Viện khoa học ứng dụng quốc gia Lyon (Cộng hòa Pháp). Hiện nay tác giả công tác tại Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính: vật liệu bán dẫn, điện tử công suất trong hệ thống điện.



Tác giả Đặng Việt Hùng tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2002 và 2004, nhận bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện tại Trường Ecole Centrale de Lyon (Cộng hòa Pháp) năm 2010. Hiện nay tác giả công tác tại Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính: chất lượng điện năng, vật liệu kỹ thuật điện cao áp, hệ thống cung cấp điện.



