

# MÔ PHỎNG HIỆN TƯỢNG PHÓNG ĐIỆN TRÊN BỀ MẶT CÁCH ĐIỆN DƯỚI ĐIỆN ÁP XOAY CHIỀU

SIMULATION OF DISCHARGE PROPAGATION ON INSULATOR SURFACES UNDER AC VOLTAGE

Đặng Việt Hùng\*, Nguyễn Duy Minh

## TÓM TẮT

Bài báo trình bày ứng dụng mô hình mạch điện tương đương RLC trong mô phỏng động hiện tượng phóng điện. Mô hình mô phỏng áp dụng cho trường hợp điện áp đặt là xoay chiều. Các thông số của hồ quang điện như điện áp, dòng điện, vận tốc được xác định tức thời. Quá trình lan truyền hồ quang điện được mô phỏng bởi các đoạn mạch RLC phát triển nối tiếp nhau, các giá trị RLC và tham số bề mặt được xác định theo các tiêu chuẩn khác nhau. Mô hình cho phép đánh giá ảnh hưởng các tham số đầu vào như điện áp, điện trở suất bề mặt đến quá trình lan truyền của hồ quang điện và dự đoán điện áp gây ra phóng điện toàn phần.

**Từ khóa:** Phóng điện bề mặt, mạch điện tương đương, hồ quang điện.

## ABSTRACT

This paper deals with the application of RLC equivalent circuit model in dynamic simulation of discharge phenomena. Applied voltage in the simulation model is AC voltage. Parameters of electric arc such as voltage, current, velocity are instantaneous. The propagation of electric arc is simulated by the successive development of RLC circuits; values of RLC and parameters of propagation surface are determined according to different criteria. The described model allows estimating influence of input parameters such as voltage, surface resistivity on arc propagation and predicting the voltage causing flashover.

**Keywords:** Surface discharge, electrical equivalent circuit, arc.

Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

\*Email: hungdv79@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 05/01/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/3/2020

Ngày chấp nhận đăng: 24/6/2020

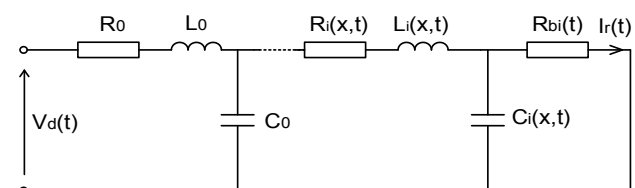
## 1. GIỚI THIỆU

Trong quá trình vận hành, cách điện của các thiết bị điện chịu điện áp trên bề mặt, trong một số trường hợp có thể gây ra hiện tượng phóng điện cục bộ một phần trên bề mặt hoặc phát triển thành phóng điện toàn phần nối liền giữa hai điện cực gây ngắn mạch. Đặc biệt với cách điện làm việc ngoài trời chịu ảnh hưởng của môi trường như nhiễm bẩn hoặc sương muối, phóng điện trên bề mặt có thể xảy ra ở cả với điện áp vận hành trong điều kiện bình thường. Hiện tượng phóng điện gây ra tổn thất, hư hỏng bề mặt cách điện và ảnh hưởng đến độ tin cậy khi vận hành của thiết bị điện, có thể gây ngắn mạch và làm gián đoạn quá trình cung cấp điện.

Việc nghiên cứu, mô phỏng và đánh giá quá trình phóng điện trên bề mặt có ý nghĩa giúp hiểu rõ hơn về bản chất của hiện tượng, từ đó tìm giải pháp góp phần nâng cao độ tin cậy. Các mô hình nghiên cứu quá trình phóng điện thường tập trung vào các mô hình tĩnh, trong đó dự báo điện áp gây ra phóng điện toàn phần ở điện áp một chiều hoặc điện áp xung [1,2]. Hiện tượng phóng điện trong trường hợp điện áp xoay chiều thường diễn ra phức tạp hơn do hồ quang điện xoay chiều có đặc trưng cơ bản là có thể bị dập tắt khi dòng điện qua 0, do vậy các tiêu chí để hồ quang phát sinh lại cũng cần được tính đến. Bài báo tập trung xây dựng mô hình động mô phỏng quá trình lan truyền phóng điện dưới điện áp xoay chiều, phương pháp mạch điện tương đương RLC được sử dụng trong bài toán mô hình hóa [3], các tham số bề mặt và hồ quang điện được thay thế bằng các giá trị R,L,C. Mô hình động ngoài việc cho phép dự báo điện áp phóng điện toàn phần còn cho phép đánh giá các tham số khác của quá trình phóng điện theo thời gian, xem xét ảnh hưởng của các yếu tố bề mặt, môi trường trong quá trình phát triển của hồ quang điện.

## 2. PHƯƠNG PHÁP MẠCH ĐIỆN TƯƠNG ĐƯƠNG RLC

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 hồ quang điện phát triển được một bước, mỗi bước  $i$  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 1; trong đó  $V_d$  là điện áp đặt,  $R_iL_iC_i$  tương ứng là điện trở, điện cảm và điện dung của đoạn mạch thứ  $i$ ,  $R_b$  là điện trở lớp bề mặt tính từ đầu hồ quang điện đến điện cực đối diện.



Hình 1. 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  $R_0, L_0, C_0, I_r$  là dòng điện rò, ta có dòng điện và điện áp tại mỗi bước thứ  $i$  được xác định theo các phương trình sau:

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

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

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

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

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

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

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

Từ các phương trình (3)-(7) có thể viết lại dưới dạng sau:  
 $Y(t) = AX(t) + BU(t)$  (8)

Trong đó:

$$Y(t) = \frac{dX(t)}{d(t)} \quad \text{và} \quad X(t) = \begin{bmatrix} V_0(t) \\ V_1(t) \\ I_0(t) \\ I_1(t) \end{bmatrix}$$

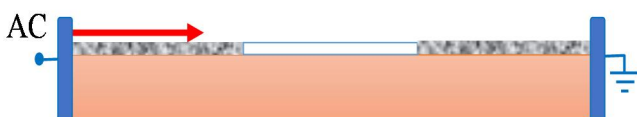
$$U(t) = \begin{bmatrix} V_d(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Với A, B là các tham số của ma trận trạng thái (8), 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 hồ quang điện.

### 3. MÔ HÌNH VÀ THAM SỐ MÔ PHỎNG

#### 3.1. Mô hình mô phỏng

Trong thực tế vận hành, lớp ô nhiễm trên bề mặt cách điện thường phân bố không đều, bài báo giả thiết lớp ô nhiễm gồm 3 lớp phân bố không đều trên bề mặt. Do vậy, mô hình nghiên cứu mô phỏng quá trình lan truyền tia lửa điện trên bề mặt gồm 3 lớp cách đều nhau với giả thiết gồm lớp ô nhiễm - lớp sạch - lớp ô nhiễm (hình 2).



Hình 2. Mô hình mô phỏng

#### 3.2. Tham số mô phỏng

##### 3.2.1. 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:

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

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

##### 3.2.2. Điện dung lớp bề mặt

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

$$C_b = \epsilon_b \frac{S_b}{L-X} \tag{10}$$

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.

##### 3.2.3. Điện trở hồ quang điện

Trong quá trình phát triển về phía điện cực đối diện, điện trở hồ quang điện có tính chất phi tuyến, bài báo sử dụng mô hình động được đề xuất bởi Mayr [5], trong đó giả thiết hồ quang điện có dạng hình trụ tròn với bán kính không đổi.

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

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

##### 3.2.4. Điện dung hồ quang điện

Trong mô hình mô phỏng, điện dung đầu hồ quang điện ( $C_i$ ) là điện dung tính từ đầu hồ quang điện đến điện cực đối diện theo mô hình xấp xỉ sau [6]:

$$C_i = 4\pi\epsilon_0 r_i \cdot \text{sh}(\alpha) \sum_{n=1}^{\infty} [\text{sh}(n\alpha)]^{-1} \tag{12}$$

Trong đó:  $\cosh(\alpha) = \frac{L-x_i}{r_i}$  với  $r$  là bán kính hồ quang điện được xác định theo mô hình Wilkins [7].

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

##### 3.2.5. Điện cảm hồ quang điện

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

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

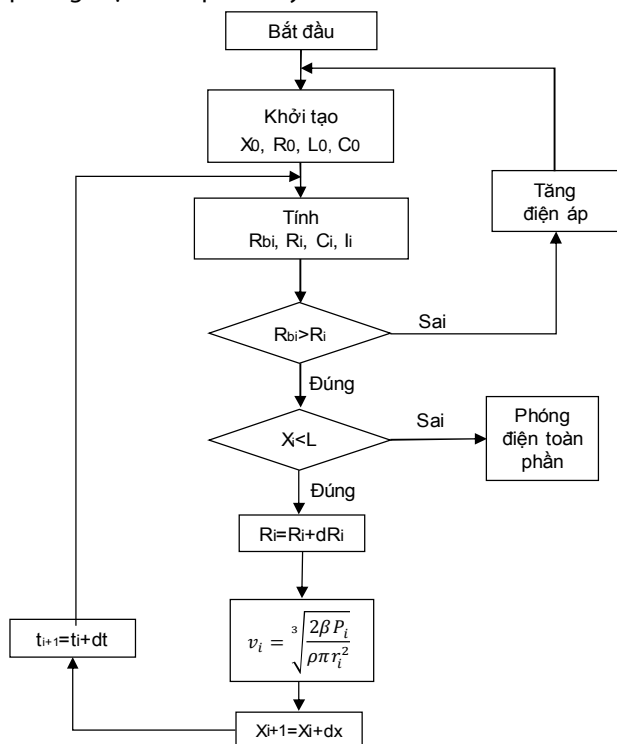
##### 3.2.6. Vận tốc hồ quang điện

Vận tốc trong quá trình phóng điện phụ thuộc vào cường độ điện trường tại điểm đầu hồ quang điện đến điện cực đối diện. Để tính toán vận tốc tức thời ( $v_i$ ), bài báo sử dụng mô hình cân bằng năng lượng Beroual [3], trong đó:

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

Với  $\rho$  là mật độ không khí và  $\beta$  ( $0 < \beta < 1$ ) là tỉ lệ phần năng lượng cần thiết cho quá trình phát triển hồ quang điện.

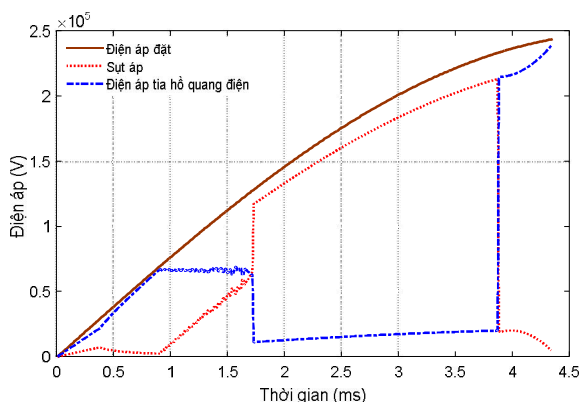
Thuật toán tính toán quá trình phóng điện được giới thiệu ở hình 3, giả thiết ban đầu hồ quang điện có chiều dài bằng 0,1L, các tham số được xác định khi điện áp đặt xoay chiều tăng dần, quá trình tính toán dừng lại khi hiện tượng phóng điện toàn phần xảy ra.



Hình 3. Thuật toán tính toán quá trình phóng điện

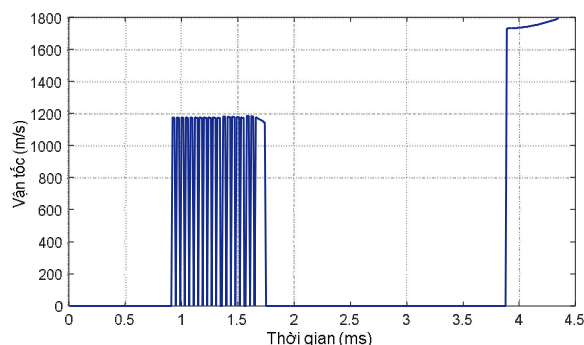
#### 4. ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để đánh giá ảnh hưởng của việc phân bố lớp ô nhiễm trên bề mặt như hình 2, bài báo thực hiện mô phỏng cho trường hợp chiều dài lớp bề mặt mô phỏng bằng 180cm, lớp ô nhiễm có điện dẫn suất là 100 $\mu$ S/m và lớp sạch có điện dẫn suất là 1,0 $\mu$ S/m. Điện áp đặt là xoay chiều có tần số 50Hz và tăng dần đến khi xảy ra phóng điện toàn phần.

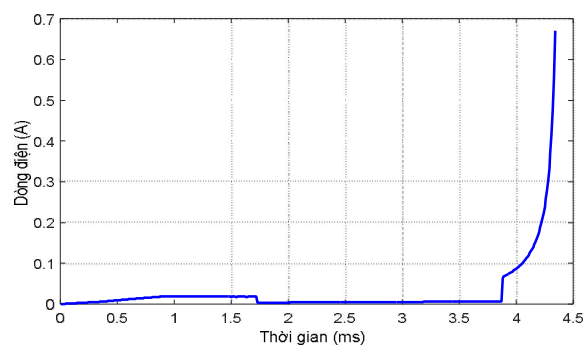


Hình 4. Điện áp trong quá trình lan truyền

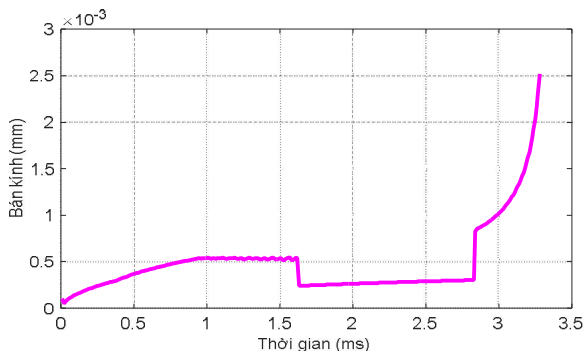
Kết quả mô phỏng cho thấy điện áp gây phóng điện toàn phần xảy ra khi điện áp đặt đạt giá trị bằng 240kV tại chu kì đầu tiên của điện áp nguồn xoay chiều (hình 4). Trong quá trình phát triển, điện áp hồ quang điện thay đổi khi chuyển qua các lớp có điện dẫn suất khác nhau, điện áp giảm khi lan truyền qua lớp có điện dẫn suất nhỏ hơn (lớp sạch).



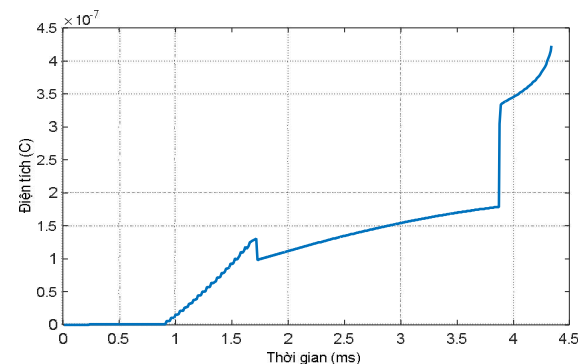
Hình 5. Vận tốc trong quá trình lan truyền



Hình 6. Dòng điện trong quá trình lan truyền



Hình 7. Bán kính trong quá trình lan truyền



Hình 8. Điện tích trong quá trình lan truyền

Trong quá trình phát triển đến điện cực đối diện, vận tốc hồ quang điện phát triển theo bước dưới dạng xung tại lớp sạch (hình 5), vận tốc trung bình có thể đạt 1200m/s, khi tiến gần đến điện cực đối diện xuất hiện bước nhảy của vận tốc xấp xỉ bằng 1800m/s, xảy ra trước thời điểm phóng điện toàn phần. Dòng điện có giá trị nhỏ trong quá trình phóng điện và tăng nhanh khi đến gần điện cực đối diện, dòng điện hồ quang điện giảm khi phát triển qua lớp có điện dẫn suất nhỏ và đạt giá trị đỉnh bằng 0,7A trước khi hiện tượng phóng điện toàn phần nối liền hai điện cực xảy ra (hình 6), khi đó tương đương với trường hợp ngắn mạch pha-đất của cách điện. Bán kính hồ quang điện có cùng hình dáng và tỉ lệ với dòng điện (hình 7), điện tích hồ quang điện trong quá trình lan truyền thể hiện trên hình 8 và được xác định bằng:  $q(t) = \sum C_i V_i(t)$ .

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo ứng dụng phương pháp mạch điện tương đương *RLC* thực hiện mô hình hóa và mô phỏng động hiện tượng phóng điện trên bề mặt, xét cho trường hợp điện áp đặt là xoay chiều và sự phân bố không đồng đều lớp ô nhiễm trên bề mặt cách điện. Mô hình cho phép xác định các thông số (dòng điện, điện tích, vận tốc...) của hồ quang điện trong quá trình lan truyền. Điện áp hồ quang điện thay đổi khi đi qua các lớp bề mặt có điện dẫn suất khác nhau, điện áp gây phóng điện toàn phần bằng 240kV, vận tốc hồ quang điện đạt xấp xỉ 1200 m/s, dòng điện và vận tốc xuất hiện bước nhảy tại thời điểm trước khi xảy ra phóng điện toàn phần nối liền hai điện cực. Việc tính toán mô phỏng cho thấy ảnh hưởng của sự phân bố và giá trị điện dẫn suất lớp ô nhiễm đến quá trình phóng điện trên bề mặt cách điện, do đó trong quá trình vận hành cần đặc biệt lưu ý đến việc vệ sinh cách điện nhằm đảm bảo nâng cao độ tin cậy cung cấp điện.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Rizk F., 1981. *Mathematical models for pollution flashover*. Electra, 78, pp.71-103.
- [2]. Hampton B.F., 1964. *Flashover mechanism of pollution insulation*. Proc IEE, 111, pp.985-990.
- [3]. Beroual A., 2003. *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.
- [4]. Z.Renyu and G.Zicheng, 1985. *A study on difference between the flashover voltage of contaminated insulator under AC and DC voltage*. IEEE Trans., pp.332-334.
- [5]. Mayrer O., 1943. *Beitrag zur theorie der statischen und der dynamischen lichtbogens*. Arch. Elektrotech, 37, pp.558-608.
- [6]. Durand E., 1943. *Electrostatique*. 37, pp.588-608.
- [7]. R. Wilkins, 1969. *Flashover Voltage of HV Insulators with Uniform Surface Pollution Films*. Proc IEE, Vol. 116, pp. 457-465.
- [8]. Fofana I., Beroual A., 1996. *A model for long gaps discharge using an equivalent dectrical network*. IEEE Trans. Dielectric Electrical Insulation, pp.273-283.

## AUTHORS INFORMATION

**Dang Viet Hung, Nguyen Duy Minh**

Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University