

# Tính toán trường điện của đường dây truyền tải cao áp một chiều bằng phương pháp phần tử hữu hạn

• Vũ Phan Tú

ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 22 tháng 10 năm 2013, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 27 tháng 11 năm 2013)

## TÓM TẮT:

*Đường dây truyền tải cao áp một chiều (HVDC) đã và đang được lắp đặt tại nhiều nước tiên tiến trên thế giới, và nó cũng sẽ là vấn đề được đặt ra trong tương lai của truyền tải điện Việt Nam. Một hiện tượng quan trọng khi vận hành đường dây truyền tải HVDC là phóng điện vàng quang xung quanh dây dẫn, nó sẽ làm tăng đáng kể cường độ trường điện trên mặt đất và trong không gian xung quanh dây dẫn. Bài báo này sẽ trình bày việc nghiên cứu tính toán cường độ trường điện của các kiểu đường dây truyền tải HVDC*

*dạng một cực, hai cực, mạch đơn và mạch kép bằng phương pháp phần tử hữu hạn trên nền của phần mềm COMSOL MULTIPHYSICS. Các kết quả tính toán cho thấy mức độ thay đổi cường độ và hình dạng phân bố của trường điện tại các vị trí khác nhau bên trên mặt đất dưới các kiểu đường dây khảo sát. Kết quả này cũng là cơ sở dữ liệu tốt cho việc tính toán, thiết kế các đường dây truyền tải HVDC của truyền tải điện Việt Nam trong tương lai.*

**Từ khóa:** Đường dây truyền tải HVDC, trường điện, phương pháp phần tử hữu hạn.

## 1. GIỚI THIỆU

Hệ thống đường dây truyền tải HVDC được xem là có nhiều ưu điểm hơn so với đường dây truyền tải HVAC trên cùng chiều dài và cùng công suất truyền tải. Chính vì thế mà nó đã và đang được lắp đặt tại nhiều nước trên thế giới như Brazil, Thụy Điển, Nga, Australia, Mỹ, Canada, Trung quốc... Trên thực tế cũng có nhiều kiểu xây lắp đường dây truyền tải HVDC như đường dây HVDC vận hành độc lập dạng đơn cực, lưỡng cực, mạch đơn, mạch kép hoặc hệ thống đường dây truyền tải cao áp AC/DC vận hành song song. Đường dây đơn cực là mô hình được sử dụng thông dụng nhất, tuy nhiên mô hình mạch kép đang gây được sự quan tâm đáng kể bởi các nhà nghiên cứu [11]-[12]. Bên cạnh

đó, các kiểu đường dây phân pha, tương tự như với đường dây truyền tải siêu cao áp AC, là được sử dụng phổ biến với đường dây truyền tải HVDC nhằm mục đích làm giảm trường điện trên bề mặt dây dẫn và giảm tổn hao vàng quang, nhiễu vô tuyến,...

Một vấn đề quan trọng trong quá trình thiết kế và vận hành đường dây truyền tải HVDC đã và đang được rất nhiều nhà nghiên cứu trên thế giới quan tâm chính là hiệu ứng vàng quang xuất hiện khi điện áp làm việc trên đường dây vượt qua giá trị điện áp khởi tạo vàng quang (corona onset voltage), và nó chính là nguyên nhân tạo ra cường độ trường điện ion hóa và mật độ dòng điện ion tại mặt đất. Các ion được phát ra bởi

vàng quang trên dây dẫn sẽ di chuyển hoặc là về phía điện cực (dây) đối diện hoặc là về phía mặt đất dọc theo đường trường [8], [10]. Trong trường hợp đường dây lưỡng cực, có ba vùng điện tích không gian tồn tại: vùng đơn cực dương nằm giữa điện cực dương và mặt đất; vùng đơn cực âm nằm giữa điện cực âm và mặt đất; vùng lưỡng cực nằm giữa hai điện cực [8]. Việc tính toán cường độ trường điện của đường dây truyền tải HVDC, nó sẽ giúp cho các nhà thiết kế chọn được các cấu trúc tối ưu cho đường dây truyền tải HVDC, được thực hiện bằng hai cách đó là phương pháp giải tích [2] và phương pháp số. Tuy nhiên, cho đến nay, với sự phát triển vượt bậc của máy tính và khoa học tính toán thì phương pháp số, cụ thể là phương pháp phần tử hữu hạn, đã hoàn toàn thay thế cho phương pháp giải tích [3]-[12].

Trong bài báo này, chúng tôi cung cấp cho các giảng viên, nhà nghiên cứu, kỹ sư điện của các trường đại học, cao đẳng kỹ thuật, các công ty tư vấn xây dựng điện, công ty điện lực và công ty truyền tải điện một cái nhìn tổng quát về cường độ trường điện ion hóa của đường dây truyền tải điện HVDC, nó được tính toán bằng việc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trên nền phần mềm COMSOL MULTIPHYSICS. Các kết quả tính toán cho thấy cường độ và hình dạng của trường điện tại mặt đất và xung quang dây dẫn trong dạng 2D và 3D, đặc biệt nó còn cho thấy tính khả dụng, hiệu quả của phương pháp phần tử hữu hạn là có thể áp dụng cho tất cả các loại đường dây truyền tải HVDC từ đơn cực cho đến đa cực, từ mạch đơn cho đến mạch kép, phân pha,... Ngoài ra các kết quả tính toán cũng là các dữ liệu quan trọng cho các nhà nghiên cứu, kỹ sư trong thiết kế và dự đoán vận hành các đường dây truyền tải HVDC của truyền tải điện Việt Nam trong tương lai.

## 2. CÔNG THỨC TOÁN HỌC

### Công thức toán học của trường điện ion hóa

Tổng quát, cường độ trường điện ion hóa trong không khí có quan hệ với mật độ điện tích  $\rho_+$  và  $\rho_-$  theo phương trình Poisson và các điều kiện như sau

$$\nabla \cdot \vec{E} = (\rho_+ - \rho_-) / \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_{\pm} = \mp (R_i \rho_+ \rho_-) / q_e \quad (2)$$

$$\vec{J}_{\pm} = k_{\pm} \rho_{\pm} \vec{E} \mp D_{\pm} \nabla \rho_{\pm} \quad (3)$$

$$\vec{J} = \vec{J}_+ + \vec{J}_- \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (5)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi. \quad (6)$$

Với  $k_+$ ,  $k_-$  là tốc độ chuyển động của ion dương và ion âm.  $D_+$  và  $D_-$  là các hệ số khuếch tán của ion dương và ion âm.  $\vec{J}_+$  và  $\vec{J}_-$  là các vector mật độ dòng dương và âm; và  $\vec{J}$  là vector mật độ dòng tổng;  $R_i$  là hệ số tái hợp ion trong không khí;  $q_e$  là điện tích điện tử.

### Các giả thiết

Trong thực tế, việc giải các phương trình trường điện ion hóa (1)-(6) là rất khó khăn, vì vậy trong quá trình tính toán cần phải sử dụng các giả thuyết như sau [2]-[10]

Độ dày của lớp ion hóa xung quanh dây dẫn là không đáng kể. Điều này có nghĩa là với đường dây đơn cực thì toàn bộ điện cực không gian được lấp đầy bằng các điện tích cùng dấu, và với đường dây lưỡng cực thì các ion lấp đầy giữa 2 cực.

Điện tích không gian chỉ ảnh hưởng bởi độ lớn và không phụ thuộc vào hướng của điện trường (giả thuyết Deutsch [2]).

Vận tốc chuyển động của ion dương  $k_+$  và ion âm  $k_-$  là không đổi (không phụ thuộc vào độ lớn điện trường).

Độ khuếch tán của ion dương  $D_+$  và ion âm  $D_-$  là không đáng kể và được xác định bởi

$$D = \frac{kk_B T}{q_e} \quad (7)$$

Trong đó,  $k$  là hằng số chuyển động của ion,  $k_B$  là hằng số Boltzmann.  $T$  là nhiệt độ tuyệt đối, và  $q_e$  là điện tích điện tử.

Trường điện khò tạo vàng quang trên bề mặt dây dẫn là hằng số ( $E_0 = \text{constant}$ ) – giả thuyết Kaptzov. Với đường dây lưỡng cực thì  $E_{0+}$  và  $E_{0-}$  là hằng số (kV/m): Dây dẫn đồng trục  $E_{0+}$  và  $E_{0-}$  được xác định bằng công thức

$$E_{0+} = (31,53 + 0,963/\sqrt{R}).10^2 \quad (8)$$

$$E_{0-} = (31,02 + 0,945/\sqrt{R}).10^2 \quad (9)$$

và trong cấu trúc dây dẫn – đất,  $E_{0+}$  và  $E_{0-}$  được xác định bằng

$$E_{0+} = 30(1 + \sqrt{9,06/R}.10^{-2}).10^2 \quad (10)$$

$$E_{0-} = (31 + 0,813/\sqrt{R}).10^2 \quad (11)$$

Bề mặt dây dẫn là tương đối đồng nhất.

Đường dây hình trụ dài vô hạn, song song với nhau và với mặt đất. Mặt đất được giả thiết là mặt phẳng nằm ngang.

Bỏ qua ảnh hưởng của gió, ẩm ướt,...

### Điều kiện biên

Ngoài các giả thiết đã trình bày ở trên, việc giải các phương trình (1)-(6) cũng đòi hỏi các điều kiện biên như sau

Điện thế trên bề mặt dây dẫn thì bằng điện áp truyền tải (điều kiện Dirichlet).

Điện thế tại mặt đất bằng không (điều kiện Dirichlet).

Độ lớn của trường điện tại bề mặt phân pha dương và âm được giả thiết là bằng trường điện khò tạo vàng quang là  $E_{0+}$ ,  $E_{0-}$  (tiêu chuẩn Peek [1], hoặc giả thiết của Kaptzov).

## 3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

### Đường dây đơn cực

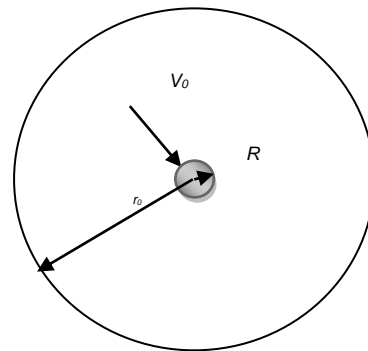
Trong trường hợp đường dây đơn cực, thay (6) vào (1), (3) vào (5) và bỏ qua sự khuếch tán ion, chúng ta có  $-\nabla \cdot \nabla \varphi = \rho / \epsilon_0$  (12)

và phương trình biểu diễn sự phát triển mật độ điện tích bên trong không gian điện cực – vỏ là:

$$\nabla \rho \cdot \nabla \varphi = \rho^2 / \epsilon_0 \quad (13)$$

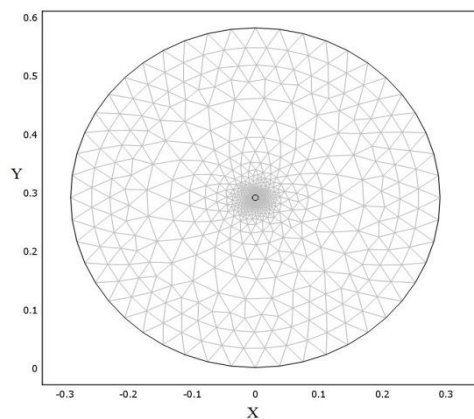
### Dây dẫn đồng trục

Trong phần này, chúng ta xem xét một dây dẫn đồng trục như trên Hình 1., có các thông số như sau: Điện áp  $V_0 = +120kV$ ; Bán kính dây  $R = 4.75$  mm; Bán kính biên:  $r_0 = 290.5$ mm.



Hình 1. Mô hình cấu trúc dây dẫn đồng trục.

Bước đầu tiên trong phương pháp phần tử hữu hạn là rời rạc hoá miền khảo sát, ở đây chúng tôi sử dụng 1600 phần tử tam giác như được trình bày trong Hình 2.

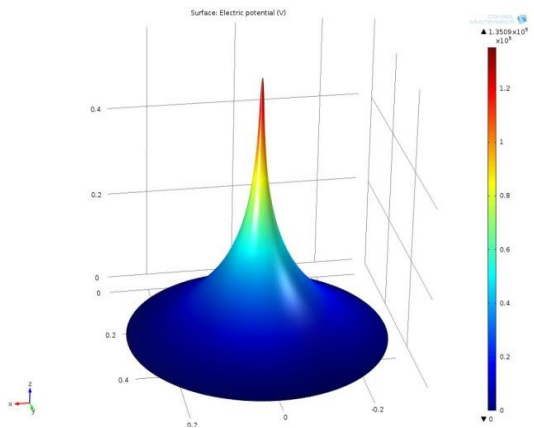


Hình 2. Lưới phần tử hữu hạn trong dây dẫn đồng trục.

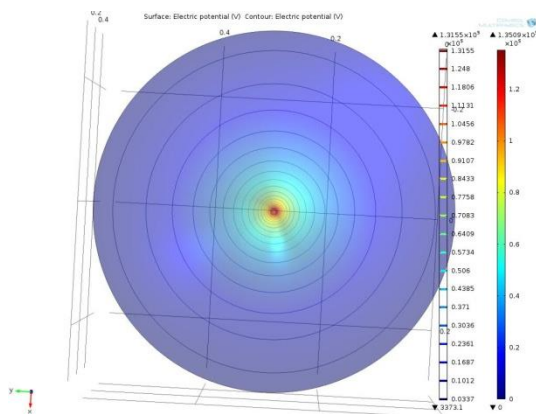
Phương trình (12) sẽ được giải với các điều kiện biên như sau

$$\varphi = 0 \text{ tại } r = r_0 \quad (14)$$

$$\varphi = V_0 \text{ tại } r = R \quad (15)$$



Hình 3. Phân bố trường điện của dây dẫn đồng trục.

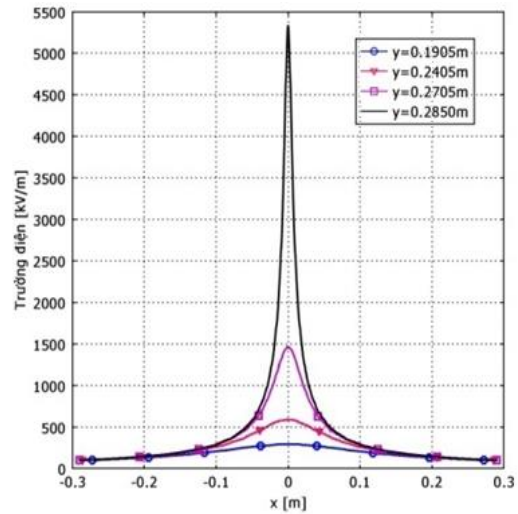


Hình 4. Phân bố đường đẳng thế theo mặt cắt ngang của dây dẫn đồng trục.

Kết quả mô phỏng trường điện của dây dẫn đồng trục được cho như trên Hình 3. tương ứng với nó là phân bố các đường đẳng thế trên bề mặt dây dẫn được trình bày như trong Hình 4.

Hình 5. cho thấy các giá trị cường độ trường điện tại các vị trí  $y = 0.2850m$ ,  $0.2705m$ ,  $0.2405m$  và  $0.1905m$ . Từ kết quả tính toán này, chúng ta có thể nhận thấy rằng cường độ trường

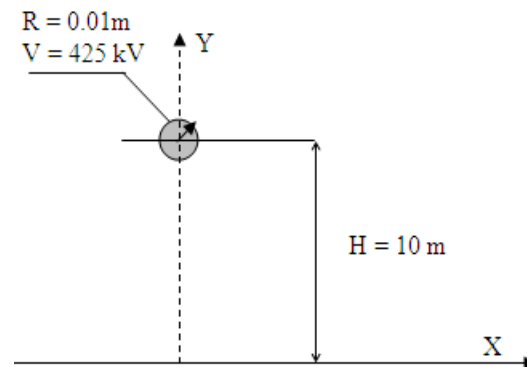
điện tăng rất nhanh tại vị trí gần dây dẫn và giảm dần về không tới các vị trí gần biên ngoài của dây dẫn đồng trục.



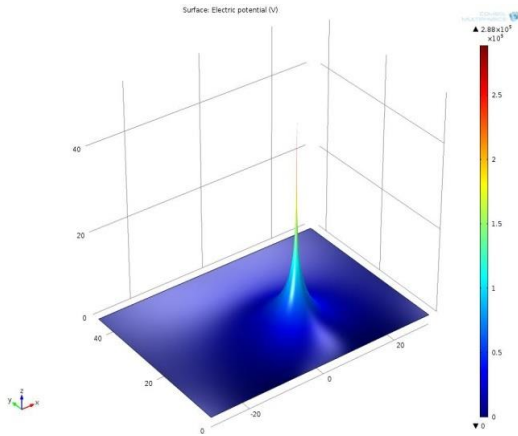
Hình 5. Cường độ trường điện tại độ cao khác nhau so với mặt đất.

#### Mô hình dây dẫn – đất

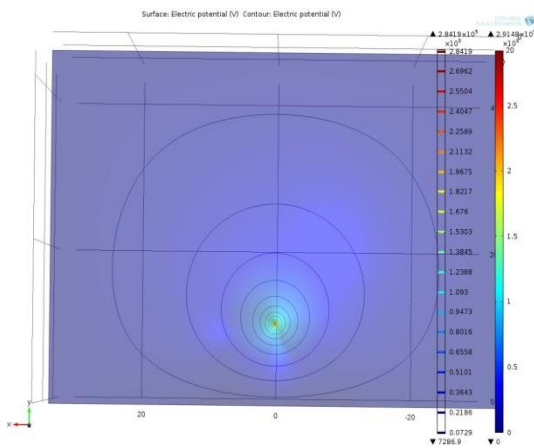
Trong trường hợp này, chúng ta xét mô hình đường dây-đất như trên Hình 6., trong đó đường dây truyền tải có các thông số như sau: Chiều cao của đường dây:  $H = 10m$ ; Bán kính dây dẫn  $R = 0.01m$ ; Điện áp  $V = +425kV$ .



Hình 6. Mô hình đường dây dẫn – đất.



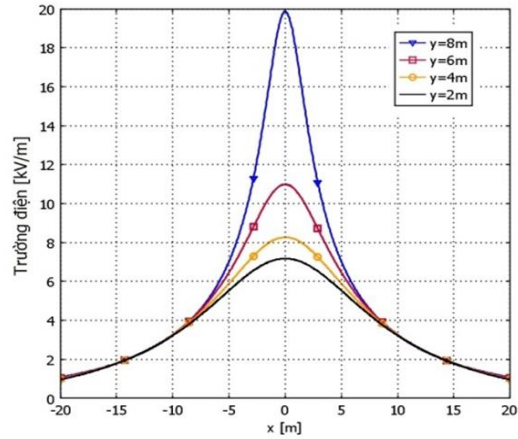
**Hình 7.** Phân bố trường điện của dây dẫn trong mô hình dây dẫn – đất.



**Hình 8.** Phân bố đường đẳng thế trong miền khảo sát xung quanh dây dẫn.

Kết quả mô phỏng 3D trường điện của dây dẫn –đất được cho như trên Hình 7. tương ứng với nó là phân bố các đường đẳng thế xung quang dây dẫn được giới thiệu như trong Hình 8.

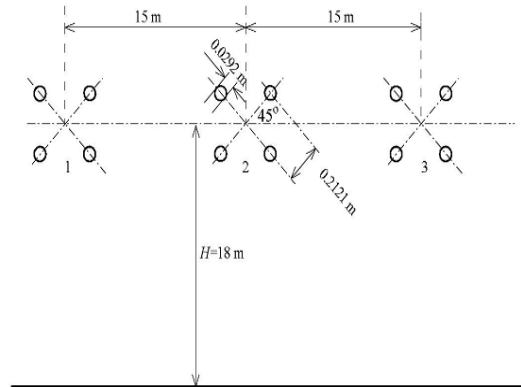
Để thấy được phân bố trường điện, chúng ta cắt theo phương ngang tại vị trí  $y=2m$ ,  $4m$ ,  $6m$  và  $8m$ . Kết quả so sánh được trình bày trên Hình 9. cho thấy mức độ thay đổi đáng kể của trường điện tại các vị trí khác nhau so với mặt đất, tương tự như kết quả thu được ở phần trên.



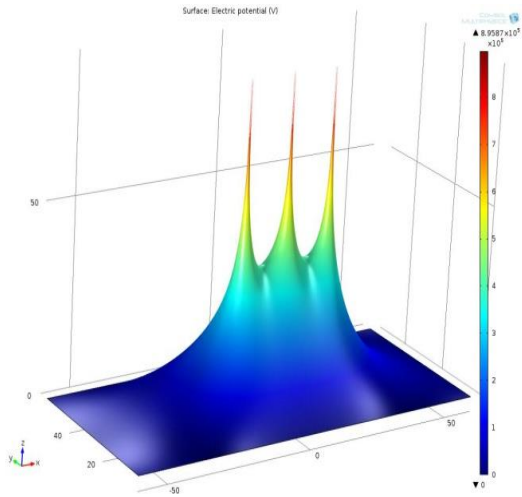
**Hình 9.** Cường độ trường điện tại các độ cao khác nhau so với mặt đất.

### Đường dây truyền tải HVDC đơn cực 3 dây

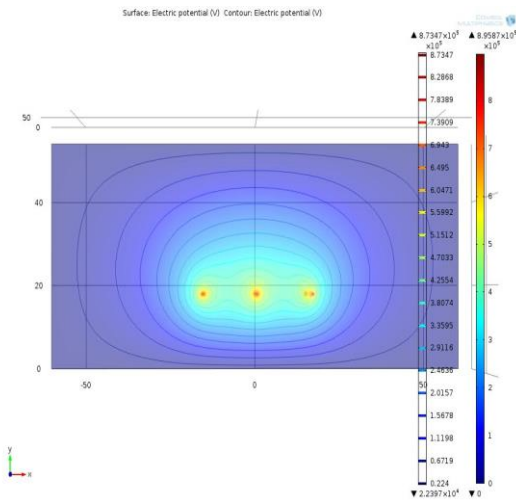
Xét đường dây truyền tải HVDC đơn cực 3 dây như trên Hình 10., với các thông số như sau: Mỗi dây gồm  $4 \times 29,2$  mm; Điện áp  $+750kV$ ; Điện áp khởi tạo vàng quang  $600kV$ ; Bán kính mỗi bó dây  $R = 212.1mm$ ; Chiều cao  $H = 18m$ . Tất cả dữ liệu được lấy từ [4].



**Hình 10.** Cấu trúc đường dây truyền tải HVDC đơn cực 3 dây.

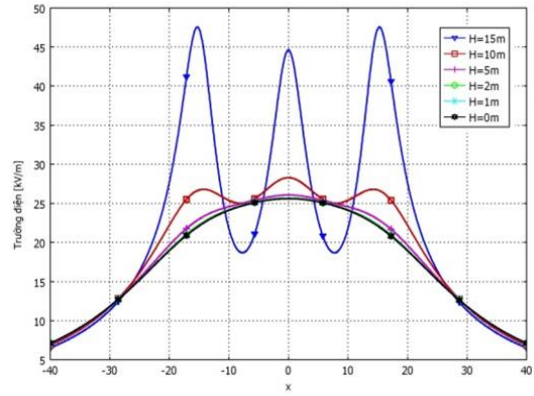


**Hình 11.** Phân bố trường điện của đường dây truyền tải HVDC đơn cực 3 dây.



**Hình 12.** Phân bố đường đẳng thế xung quanh đường dây truyền tải HVDC đơn cực 3 dây.

Kết quả mô phỏng trường điện của dây truyền tải HVDC đơn cực 3 dây được cho như trên Hình 11. tương ứng với nó là phân bố các đường đẳng thế xung quanh ba dây dẫn được giới thiệu trong Hình 12.

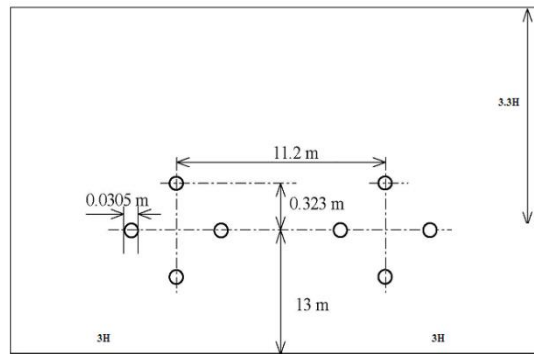


**Hình 13.** Cường độ trường điện tại các độ cao khác nhau của đường dây truyền tải HVDC đơn cực 3 dây.

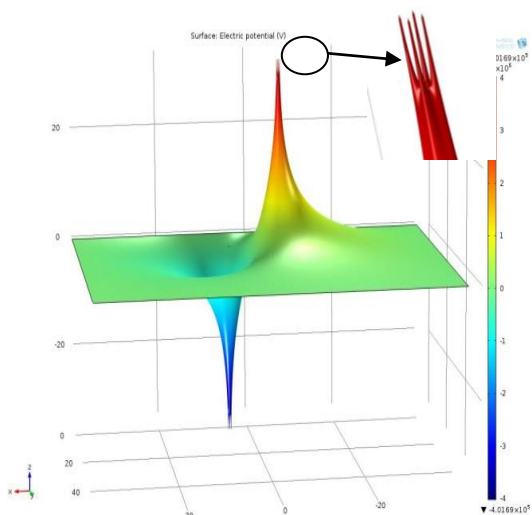
Hình 13. cho thấy kết quả tính toán cường độ trường điện tại các độ cao khác nhau so với mặt đất  $y=0m, 1m, 2m, 5m, 10m$  và  $15m$ . Kết quả cho thấy rằng cường độ trường điện thay đổi đáng kể cả về hình dáng và độ lớn tại các vị trí gần đường dây, đặc biệt như trên Hình 13. là tại vị trí độ cao  $15m$ , tại đó do ảnh hưởng tương hỗ nên cường độ trường điện tại dây chính giữa sẽ nhỏ hơn hai dây bên cạnh. Theo chiều ngược lại càng tiến về mặt đất cường độ trường điện thay đổi không đáng kể và có giá trị gần bằng nhau. Kết quả thu được là tương đồng với [4].

**Đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực**

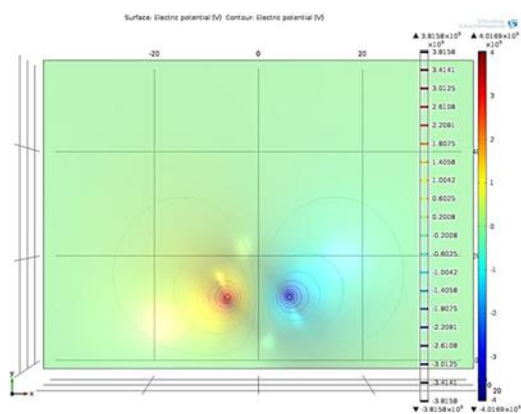
Xét đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực như được giới thiệu trên Hình 14. – [4] với điện áp đường dây hai cực  $\pm 400kV, \pm 500kV, \pm 600kV$ .



**Hình 14.** Mô hình đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực và miền khảo sát .

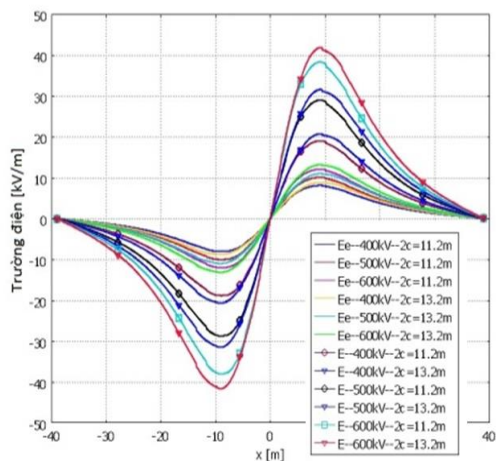


**Hình 15.** Phân bố trường điện của đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực.



**Hình 16.** Phân bố đường đẳng thế xung quang đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực.

Kết quả mô phỏng trường điện của dây truyền tải HVDC lưỡng cực được cho như trên Hình 15. tương ứng với nó là phân bố các đường đẳng thế xung quang dây dẫn lưỡng cực được giới thiệu trong Hình 16.

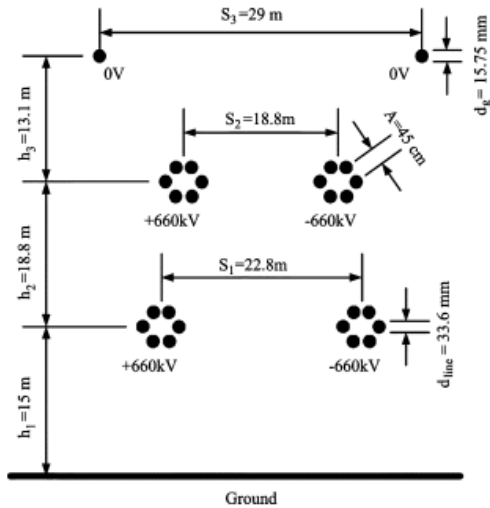


**Hình 17.** Cường độ trường điện tại các độ cao khác nhau của đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực.

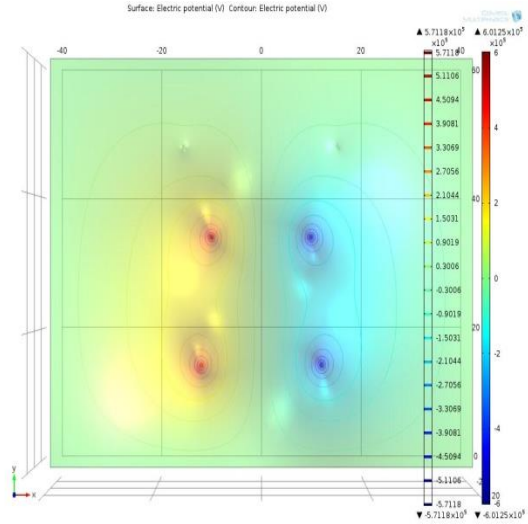
Kết quả tính toán cường độ điện trường tại các độ cao khác nhau của các đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực ( $\pm 600\text{kV}$ ,  $\pm 500\text{kV}$ ,  $\pm 400\text{kV}$ ) như trên Hình 17. là tương đồng với [4]. Nó cho thấy tốc độ thay đổi của cường độ trường điện do ảnh hưởng của điện tích không gian DC, và độ lớn và dấu của cường độ điện trường tương ứng với độ lớn và dấu của điện cực dây dẫn HVDC.

### Đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực mạch kép

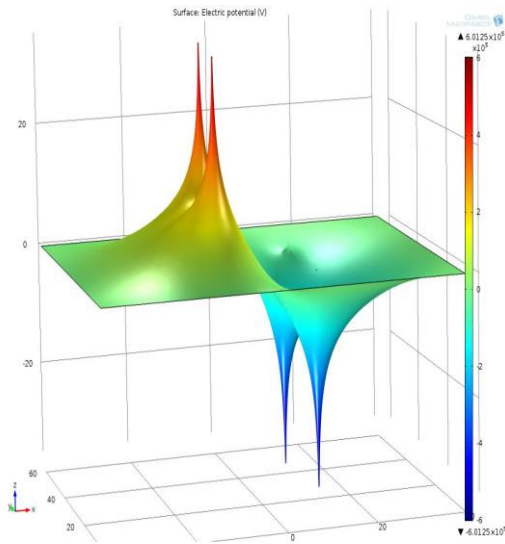
Cuối cùng chúng ta xem xét đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực mạch kép với hai dây chống sét như được giới thiệu trên Hình 18. – [12] với điện áp đường dây mạch kép  $\pm 600\text{kV}$ . Kết quả mô phỏng 3D trường điện của đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực mạch kép được cho như trên Hình 19. tương ứng với nó là phân bố các đường đẳng thế xung quang dây dẫn được giới thiệu trong Hình 20.



**Hình 18.** Mô hình đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực mạch kép-[12] .



**Hình 20.** Phân bố trường điện của đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực mạch kép.



**Hình 19.** Phân bố đường đẳng thế xung quang đường dây truyền tải HVDC lưỡng cực mạch kép.

Trên cơ sở các giá trị tính toán được, chúng ta có thể thấy rằng việc thay đổi các giá trị  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  và  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  sẽ tác động đáng kể đến giá trị cực đại của cường độ trường điện và mật độ dòng điện ion hóa. Các nhà nghiên cứu trên thế giới đã chứng minh được rằng việc giảm các giá trị khoảng cách này sẽ làm giảm cường độ trường điện trên mặt đất và xung quanh dây dẫn, tuy nhiên giảm như thế nào để có được một thiết kế tối ưu nhất vẫn đang là một bài toán mở và đang được giải quyết.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày việc áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn cho việc tính toán cường độ trường điện của các loại đường dây truyền tải HVDC như đường dây đơn cực, lưỡng cực, mạch đơn và mạch kép. Các kết quả tính toán thu được là tương đương với các kết quả trong tài liệu tham khảo. Kết quả tính toán trong bài báo này cũng chứng minh được rằng các nhà nghiên cứu và thiết kế có thể sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để dự đoán trước được mức độ và hình dạng của hiện tượng vầng quang, cường độ trường điện ion hóa khi vận hành đường dây truyền tải HVDC tại Việt Nam trong tương lai.



Ngoài ra, các vấn đề như ảnh hưởng của các thông số môi trường, ảnh hưởng trường tương hỗ giữa đường dây cao áp AC/DC vận hành song

song sẽ được chúng tôi đề cập trong bài báo tiếp theo.

## Calculation of electric field of HVDC transmission lines using finite element method

• **Vu Phan Tu**

VNU-HCM

### ABSTRACT:

*The HVDC transmission lines have been building in many modern countries in all over the world, and it will be an important problem of Viet Nam power transmission. The important phenomena of operation of HVDC transmission lines is corona discharge around HVDC transmission lines that is a cause to increase significantly the electric field strength over ground surface and around lines. This paper presents the investigation and calculation of the electric*

*field strength of many models of HVDC transmission lines such as monopolar, bipolar, single- and double-circuit using the finite element method based on COMSOL MULTIPHYSICS software. The calculation results have shown the strength and shape of the electric field strength at many positions over ground level. These results are also good datum to calculate and design HVDC transmission lines of Viet Nam power transmission in the near future.*

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. F Peek, *Determination Phenomina in High Voltage Engineering* New York: McGraw Hill, 52-80 (1929).
- [2]. W. Deutsch, Über die Dichteverteilung unipolarer Ionenströme, *Annalen derphysik*, Vol. 5, 589-613 (1933).
- [3]. Vinay Jaiswal and M Joy Thomas, Finite Element Modelling of Ionized Field Quantities around a monopolar HVDC Transmission Line, *Journal of Physics D: Applies Physics*, Vol. 36, No. 23, 3089-3094, Dec. (2003).
- [4]. S. Fortin, H. Zhao, J. Ma, F. P. Dawalibi, A New Approach to Calculate the Ionized Field of HVDC Transmission in the Space and on the Earth Surface, PowerCon 2006. International Conference on Power System Technology, (2006).
- [5]. Tiebing Lu et al, Analysis of the Ionized Field Under HVDC Transmission Lines in the Presence of Wind Based on Upstream

- Finite Element Method, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46, No. 8, Aug. 2010.
- [6]. M. Abdel-Salam and Z. Al-Hamouz, A finite-element analysis of bipolar ionized field, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 31, No.3, 477-483 (1995).
- [7]. Z Al-Hamouz, M Abdel-Salam and A Al-Shehri, Inception voltage of corona in bipolar ionized fields- Effect on corona power loss, *IEEE Trans. Ind Appl* vol. 34, 57-65 (1998).
- [8]. P. Sarma Maruvada, Electric Field and Ion Current Environment of HVdc Transmission Lines: Comparison of calculation and Measurements, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 27, No. 10, 401-410, Jan. 2012.
- [9]. Z Al-Hamouz, Adaptive finite element ballooning analysis of bipolar ionized fields, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, 1266- 1277 (1996).
- [10]. Zakariya M. Al-Hamouz, Corona Power Loss, Electric Field, and Current Density Profiles in Bundled Horizontal and Vertical Bipolar Conductors, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 38, No. 5, Sept./Oct. 2002.
- [11]. Yong Yang, Jiayu Lu, and Yinzhao Lei, A Calculation Method for the Electric Field Under Double-Circuit HVDC Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, No. 4, Oct. 2008.
- [12]. Jie Liu, Jun Zou, Jihuan Tian, and Jiansheng Yuan, Analysis of Field, Ion Flow Density, and Corona Loss of Same – Tower Double – Circuit HVDC Lines Using Improved FEM, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 1, January 2009.