

# TÍNH TOÁN VÀ MÔ PHỎNG TRƯỜNG ĐIỆN TỪ CỦA ĐƯỜNG DÂY TRUYỀN TẢI 500KV BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

Nguyễn Đăng Khoa<sup>1</sup> và Vũ Phan Tú<sup>2</sup>

## ABSTRACT

*This paper proposes a set of mathematical models presenting electric and magnetic fields caused by operations of a high voltage transmission line under normal loading conditions. The mathematical models are expressed in second-order partial differential equations derived by analyzing magnetic field distribution around a 500kV AC power transmission lines. Finite element methods (FEM) for solving wave equations have been exploited. The computer simulation based on the use of the FEM has been developed in MATLAB programming environment. The problem of study is intentionally two-dimensional due to the property of long line field distribution. From all test cases, the calculation line of 1.0m above the ground level is set to investigate the electromagnetic fields acting on a human in comparative with ICNIRP (International Commission for Non-Ionising Radiation Protection) standard.*

**Keywords:** *Electromagnetic Field (EMF), Finite Element Method (FEM), Transmission Line, Matlab programming*

**Title:** *Calculation and Simulation of Electromagnetic Field Distribution for 500kV Power Transmission Systems Using Finite Element Method*

## TÓM TẮT

*Bài viết này trình bày mô hình toán học của điện trường và từ trường gây ra bởi đường dây truyền tải điện cao áp dưới điều kiện phụ tải điện bình thường. Mô hình toán học được thể hiện bằng phương trình vi phân từng phần cấp hai có nguồn gốc bằng cách phân tích sự phân bố của điện trường và từ trường xung quanh đường dây truyền tải điện 500kV AC. Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để giải phương trình sóng. Các mô phỏng bằng máy tính dựa trên việc sử dụng FEM và được lập trình bằng MATLAB. Nghiên cứu này xây dựng bài toán trong môi trường không gian hai chiều của điện trường và từ trường dọc theo đường dây truyền tải điện. Từ tất cả các trường hợp thử nghiệm ở độ cao 1,0 m phía dưới đường dây so với mặt đất được áp dụng để tính điện từ trường tác động lên cơ thể người theo tiêu chuẩn của Ủy ban quốc tế Bảo vệ bức xạ không ion hóa.*

**Từ khóa:** *Trường điện từ (EMF), Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), Đường dây truyền tải, Lập trình Matlab*

## 1 GIỚI THIỆU

Ở Việt Nam, trong những năm qua với sự hội nhập về kinh tế dẫn tới nhu cầu sử dụng điện năng là rất lớn. Từ đó, hệ thống điện cũng được liên tục mở rộng và phát triển cả về nguồn phát, đường dây truyền tải; xuất hiện nhiều đường dây truyền tải cao áp và siêu cao áp đi sâu vào tâm của phụ tải, mật độ phụ tải tập trung cao, điện năng được tiêu thụ nhiều: các khu công nghiệp, nội ô của thành thị, .... Theo thống

<sup>1</sup> Khoa Công Nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

<sup>2</sup> Phó Ban Đào tạo Đại học Quốc Gia Tp. Hồ Chí Minh

kê của các đơn vị quản lý lưới điện cao áp thuộc Tập đoàn điện lực Việt Nam (EVN) cho thấy số nhà và công trình tồn tại trong hành lang an toàn lưới điện cao áp ở các cấp điện áp được thống kê hiện có 187.206 nhà và công trình, nên các vấn đề về ảnh hưởng của đường dây đối với dân sinh cần được xem xét. Những ảnh hưởng bất lợi của điện trường và từ trường ở tần số thấp (50Hz) đến con người và môi trường là vấn đề đã và đang được các nhà khoa học, các tổ chức trong nước cũng như quốc tế quan tâm nghiên cứu. Trong đó, tính toán trường điện từ của đường dây tải điện trên không mà đặc biệt là đường dây cao áp là một việc hết sức quan trọng nhằm xác định phạm vi ảnh hưởng nó: trong số các nguồn điện trường và từ trường tần số thấp, người ta đặc biệt quan tâm đến điện trường và từ trường của dòng điện tần số công nghiệp, các hệ thống cao áp và siêu cao áp, chúng phát ra môi trường xung quanh một trường điện từ mạnh, ảnh hưởng đến sức khỏe của con người. Ở các hệ thống điện áp thấp thì trường điện từ có cường độ thấp hơn và hầu như không gây ảnh hưởng con người và môi trường.

Do đó, bài toán đặt ra là phân tích và tính toán trường điện từ của đường dây truyền tải nhằm cung cấp một công cụ tính toán để xây dựng một hệ thống điện bền vững, khoa học, đảm bảo an toàn cho người và môi trường xung quanh. Bên cạnh đó, việc phát triển lưới truyền tải đòi hỏi phải tính toán và mô phỏng trường điện từ của đường dây vì nó sẽ ảnh hưởng đến sức khỏe của con người sinh hoạt ở dưới các đường dây và các nhiễu do điện trường và từ trường của đường dây cao thế sinh ra cho các đường dây điện áp thấp hơn, các đường tín hiệu viễn thông,...[11], đặc biệt với kết quả tính toán được chúng ta có thể dễ dàng quản lý và đề xuất các phương án tốt nhất cho quá trình phát triển lưới điện nói riêng và phát triển hệ thống điện nói chung. Hiện nay, tính toán thiết kế đường dây tải điện được thực hiện chủ yếu bằng việc tính toán cơ học của đường dây, khả năng tải của đường dây, chúng ta chưa thực hiện đánh giá độ an toàn về điện từ trường do đường dây sinh ra và ảnh hưởng của chúng.

Cho đến nay, trong nước chưa có báo cáo nào về tính điện trường và từ trường của đường dây truyền tải bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Phương pháp phần tử hữu hạn là một phương pháp rất tổng quát và hữu hiệu cho lời giải số nhiều lớp bài toán kỹ thuật khác nhau. Từ việc phân tích trạng thái ứng suất, biến dạng trong các kết cấu cơ khí, các chi tiết trong ô tô, máy bay, tàu thủy, khung nhà cao tầng, dầm cầu, đến những bài toán của lý thuyết trường như: lý thuyết truyền nhiệt, cơ học chất lỏng, thủy đàn hồi, khí đàn hồi, điện-từ trường [6-9]...Ưu điểm của phương pháp này trong bài toán điện từ trường là có thể tính toán nhanh các bài toán đạo hàm riêng với các điều kiện biên và điều kiện cho trước phức tạp, xây dựng chương trình tính toán dễ dàng, có thể áp dụng cho nhiều trường hợp khác nhau, độ chính xác cao,...

Trong bài báo này sẽ áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích và tính toán điện trường và từ trường của đường dây truyền tải 500kV-AC mạch đơn và mạch kép của lưới điện 500kV khu vực Miền Tây, kết hợp với mô phỏng bằng phần mềm Matlab.

## 2 MÔ HÌNH HÓA CỦA TRƯỜNG ĐIỆN TỬ CỦA ĐƯỜNG DÂY TRUYỀN TẢI

Mô hình toán học của bức xạ điện trường ( $E$ ) trong không gian xung quanh đường dây truyền tải điện thường được biểu diễn dưới dạng các phương trình sóng (phương trình Helmholtz) như trong (1) [8], [15] bắt nguồn từ định luật Faraday.

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \sigma\mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Trong đó:  $\varepsilon$  là hằng số điện môi;  $\mu$ ,  $\sigma$  là độ thấm từ và độ dẫn điện của dây dẫn tương ứng.

Mô hình toán học của từ trường ( $H$ ) đối với đường dây truyền tải được thực hiện dưới hình thức của cường độ từ trường ( $H$ ), liên quan đến phương trình,  $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ . Mô hình này có thể được đặc trưng bằng cách sử dụng phương trình sóng (phương trình Helmholtz) như trong (2) [1], [2] bắt nguồn từ định luật của Ampere.

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \sigma\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

Ở đây có sự tương tự giữa (1) và (2), mô phỏng bằng FEM cho các vấn đề toán học của điện trường và từ trường là giống nhau.

Bài viết này xem xét với hệ thống thời gian điều hòa miêu tả bởi điện trường dạng phức,  $\mathbf{E} = Ee^{j\omega t}$ , do đó:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = j\omega \mathbf{E} \quad \text{và} \quad \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \mathbf{E}$$

Trong đó:  $\omega$  là tần số góc

Từ biểu thức (1), bằng cách thay thế điện trường dạng phức, biểu thức (1) có thể được chuyển thành một dạng khác, như sau:

$$\nabla^2 E - j\varepsilon\sigma\mu E - \omega^2 \varepsilon\mu E = 0$$

Khi xem xét vấn đề của sóng điện trường trong không gian hai chiều bằng phương pháp Galerkin và các điều kiện biên [9], chúng ta có biểu thức (3), do đó:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial y} \right) - (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) E = 0 \quad (3)$$

Do không có giải pháp nào đơn giản để phân tích chính xác phương trình trên. Vì vậy, trong bài báo này, FEM được chọn là một công cụ chính cho việc tìm kiếm lời giải gần đúng điện trường cho phương trình vi phân được mô tả như trong (3).

Tương tự như điện trường chúng ta có phương trình tính toán cho từ trường như sau:

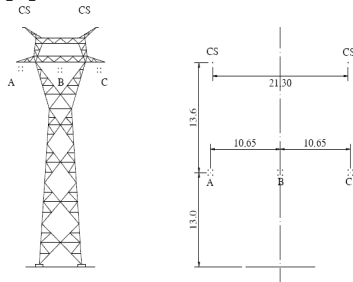
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial H}{\partial y} \right) - (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) H = 0 \quad (4)$$

### 3 MÔ TẢ HỆ THỐNG TRUYỀN TẢI BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

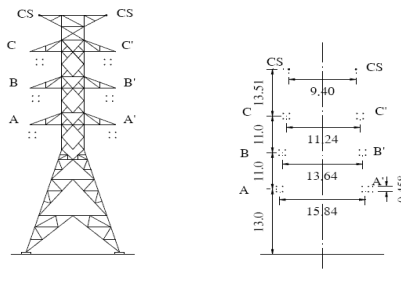
#### 3.1 Rời rạc hóa bài toán

Trong bài báo này xét hệ thống đường dây truyền tải điện mạch đơn và mạch kép 500kV, được thể hiện như trên Hình 1 và Hình 2.

Chiều cao của dây dẫn được hiển thị trong hình là ở vị trí có độ võng tối đa. Các dây dẫn thấp nhất ở độ cao 13,0 m so với mặt đất [12], [14]. Các thông số của đường dây được thể hiện ở Bảng 1. Hình 3 và Hình 4 hiển thị việc chia lưới của đường dây mạch đơn và mạch kép 500kV bằng phương pháp chia lưới thích nghi [6], [7].



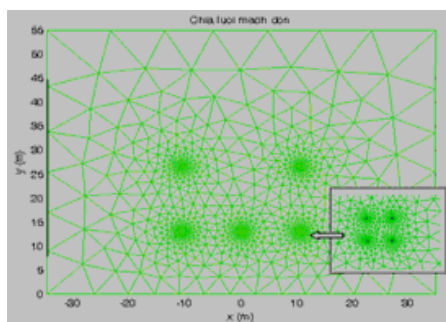
Hình 1: Kích thước của đường dây mạch đơn ở độ võng lớn nhất (m)



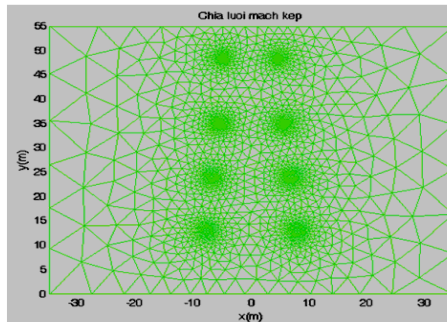
Hình 2: Kích thước của đường dây mạch kép ở độ võng lớn nhất (m)

Bảng 1: Thông số bản đường dây 500 kV

Thông số đường dây	Giá trị
Tần số nguồn	50 Hz
Bố trí dây dẫn của đường dây mạch đơn	3 pha nằm ngang
Bố trí dây dẫn của đường dây mạch kép	3 pha thẳng đứng
Khoảng cách giữa các pha nằm ngang	10.65 m
Khoảng cách giữa các pha của mạch kép	11.00 m
Chiều dài khoảng vượt	595 m
Số đường dây trong 1 pha	4
Dòng điện định mức	764 x 4 A
Khoảng cách giữa các dây trong 1 pha	0.458 m
Chiều cao nhỏ nhất	$h_{\min} = 13.00$ m
Dây dẫn 4xACSR666,6 MCM	Bán kính 0.0264 m
Bán kính tương đương của 4 sợi dây/1pha	0.317m



Hình 3: Chia lưới thích nghi đối với đường dây mạch đơn



Hình 4: Chia lưới thích nghi đối với đường dây mạch kép

### 3.2 Mô phỏng phần tử hữu hạn

Phương trình chi phối cho mỗi phần tử bắt nguồn từ hệ phương trình Maxwell bởi việc sử dụng phương pháp Galerkin, đây là phương pháp phần tử có trọng [3], [4]. Theo phương pháp này, điện trường được biểu diễn như sau:

$$E(x, y) = E_i N_i + E_j N_j + E_k N_k \quad (5)$$

Trong đó:

$N_n$ ,  $n = i, j, k$  là hàm dạng phần tử

$E_n$ ,  $n = i, j, k$  là xấp xỉ của điện trường ở mỗi nút của phần tử.

$$\text{Với: } N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2\Delta_e}$$

Trong đó:

$\Delta_e$  là diện tích của phần tử tam giác

Và:

$$a_i = x_j y_k - x_k y_j, \quad b_i = y_j - y_k, \quad c_i = x_k - x_j,$$

$$a_j = x_k y_i - x_i y_k, \quad b_j = y_k - y_i, \quad c_j = x_i - x_k,$$

$$a_k = x_i y_j - x_j y_i, \quad b_k = y_i - y_j, \quad c_k = x_j - x_i,$$

$$\int_{\Omega} N_n \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial y} \right) \right) d\Omega - \int_{\Omega} N_n (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) E d\Omega = 0$$

Hoặc viết dưới dạng ma trận rút gọn:

$$[M + K]\{E\} = 0$$

(6)

$$M = (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) \int_{\Omega} N_n N_m d\Omega$$

$$= \frac{(j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$K = \nu \int_{\Omega} N_n \left( \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial N_m}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial N_m}{\partial y} \right) d\Omega$$

$$= \frac{\nu}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ & b_j b_j + c_j c_j & b_j b_k + c_j c_k \\ & & b_k b_k + c_k c_k \\ \text{sym} & & \end{bmatrix}$$

Trong đó:  $\nu$  là độ từ trở ( $\nu = 1/\mu$ )

Cho một phần tử gồm có 3 nút, biểu thức xấp xỉ của phương pháp phần tử hữu hạn là ma trận 3x3. Tính toán cho tất cả các phần tử trong hệ thống có n nút, hệ phương trình có kích thước lớn với ma trận nxn.

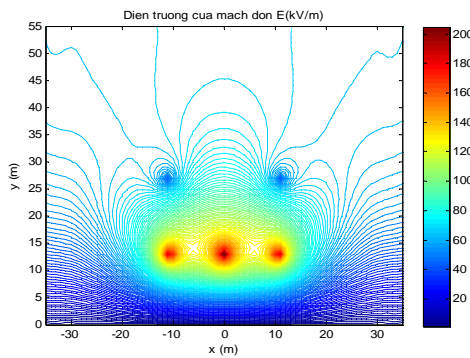
#### 4 ĐIỀU KIỆN BIÊN VÀ CÁC THÔNG SỐ MÔ PHỎNG

Các điều kiện biên áp dụng ở đây là điện trường và từ trường tại mặt đất và đường dây chống sét bằng không. Giả định phụ tải cân bằng. Các dây dẫn được sử dụng để thử nghiệm là dây nhôm lõi thép (ACSR) có các thuộc tính sau đây: điện dẫn ( $\sigma$ ) =  $0,8 \times 10^7$  S/m, độ thấm từ tương đối ( $\mu_r$ ) = 300, là hằng số điện môi tương đối ( $\epsilon_r$ ) = 3,5. Lưu ý hằng số điện môi của chân không ( $\epsilon_0$ ) =  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m và độ thấm từ của chân không ( $\mu_0$ ) =  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m

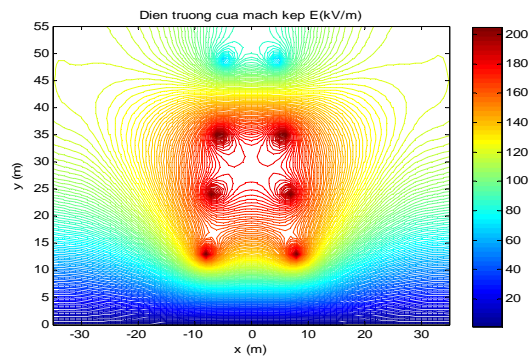
#### 5 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

##### 5.1 Điện trường

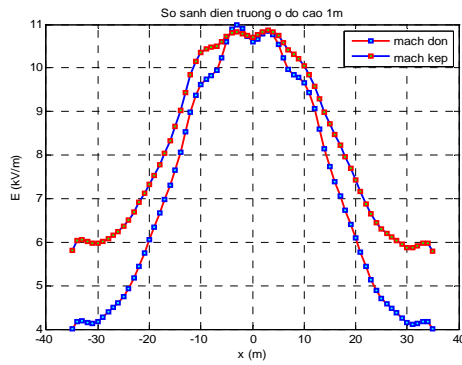
Với việc áp dụng FEM và kết hợp mô phỏng bằng phần mềm MATLAB của điện trường quanh đường dây truyền tải 500kV mạch đơn và mạch kép cho chúng ta các kết quả phân bố của điện trường trong không gian xung quanh đường dây truyền tải điện được thể hiện ở Hình 5 và Hình 6. Ở vị trí càng gần đường dây thì mức độ phân bố của điện trường càng dày đặc và độ lớn càng cao. Để đánh giá mức độ ảnh hưởng của điện trường đến cơ thể người cũng như môi trường dưới đường dây truyền tải và để có cơ sở đánh giá mức độ nguy hiểm của chúng, trong phần này chúng ta khảo sát điện trường phía dưới đường dây ở các độ cao khác nhau so với mặt đất và trong phạm vi xem xét 70x55m Hình 7 đến Hình 13. Đặc biệt là ở độ cao 1m so với đất vì ở vị trí này tương ứng với độ cao trung bình của con người khi làm việc ở phía dưới đường dây được thể hiện ở Hình 7.



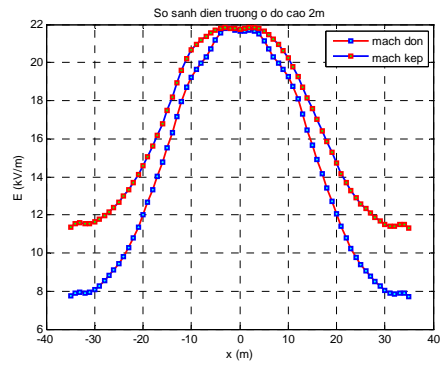
Hình 5: Phân bố điện trường theo mặt cắt ngang của đường dây mạch đơn



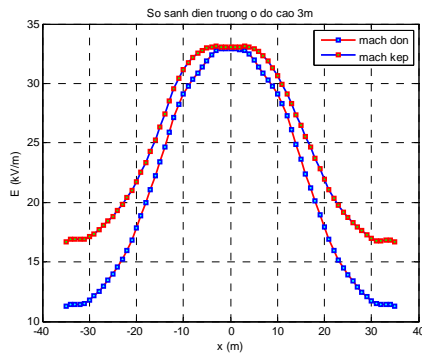
Hình 6: Phân bố điện trường theo mặt cắt ngang của đường dây mạch kép



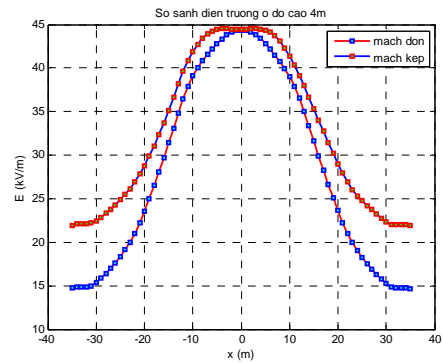
Hình 7: Điện trường ở độ cao 1m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép



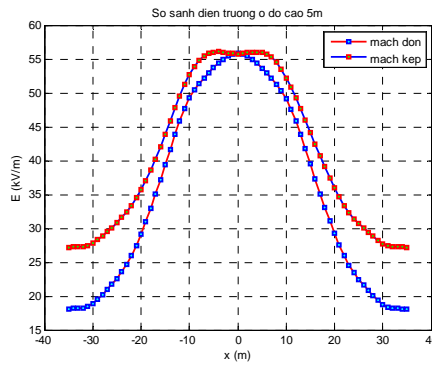
Hình 8: Điện trường ở độ cao 2m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép



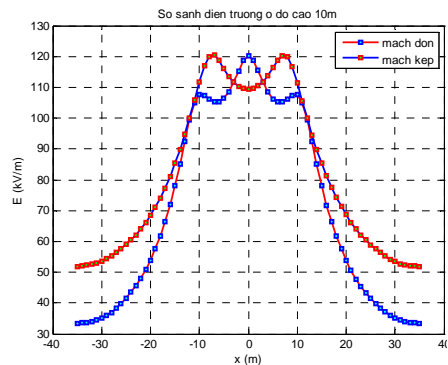
Hình 9: Điện trường ở độ cao 3m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép



Hình 10: Điện trường ở độ cao 4m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép



Hình 11: Điện trường ở độ cao 5m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép

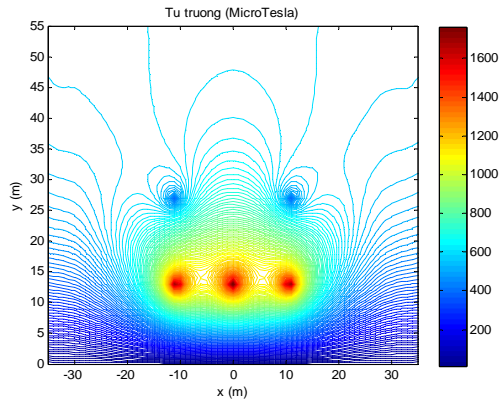


Hình 12: Điện trường ở độ cao 10m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép

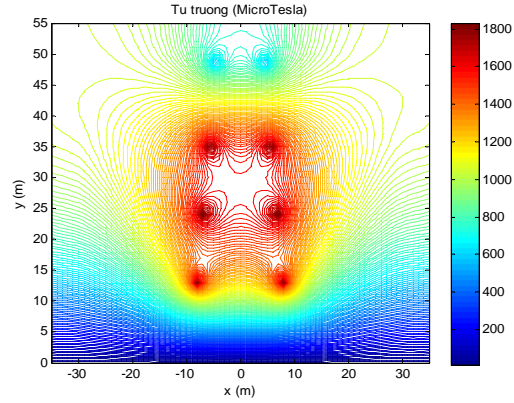
### 5.2 Từ trường

Các kết quả mô phỏng dưới đây trình bày tính phân bố của từ trường trong không gian xung quanh đường dây truyền tải mạch đơn và mạch kép, tương tự như kết

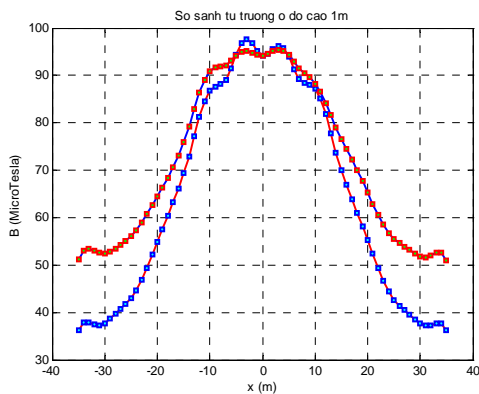
quả của điện trường. Từ trường của đường dây truyền tải ngoài phụ thuộc vào độ lớn của dòng điện của đường dây, nó còn phụ thuộc vào khoảng cách đối với đường dây. Các kết quả phân tích cho thấy từ trường của đường dây mạch đơn và đường dây mạch kép phân bố trong không gian xung quanh đường dây hình 14 và hình 15. Từ trường ở các khoảng cách khác nhau tính từ mặt đất đến đường dây đối với mạch đơn được thể hiện ở hình 16 đến hình 22. Tương tự như điện trường chúng ta nhận thấy rằng ở khoảng cách càng gần đường dây thì từ trường càng lớn và khả năng phân bố của đường dây mạch kép sẽ cao hơn so với mạch đơn.



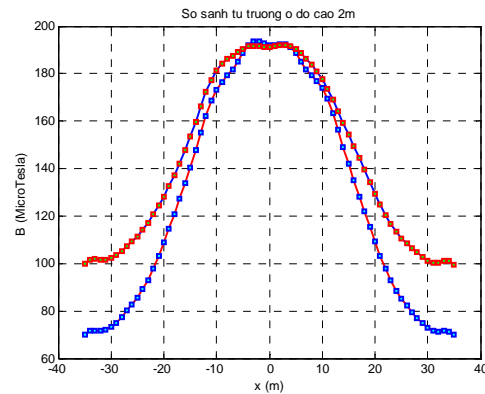
**Hình 13: Phân bố từ trường theo mặt cắt ngang của đường dây mạch đơn**



**Hình 14: Phân bố từ trường theo mặt cắt ngang của đường dây mạch kép**

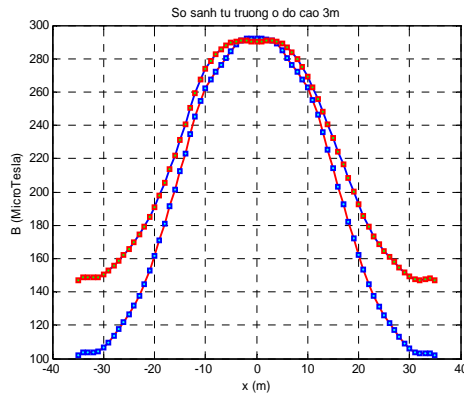


**Hình 15: Từ trường ở độ 1m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép**

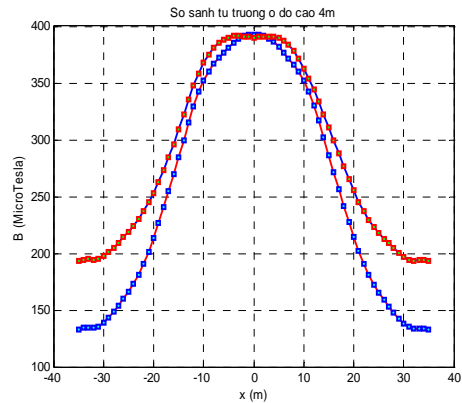


**Hình 16: Từ trường ở độ 2m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép**

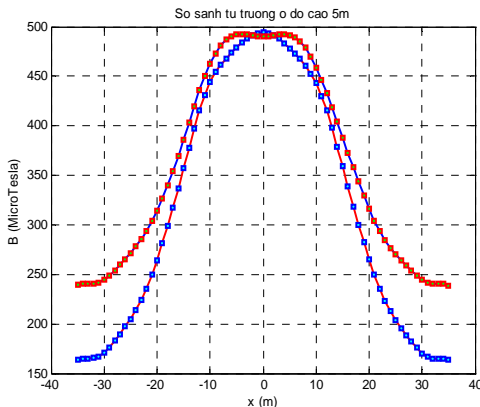




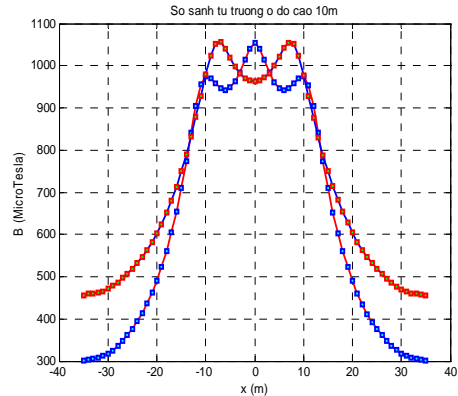
Hình 17: Từ trường ở độ 3m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép



Hình 18: Từ trường ở độ 4m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép



Hình 19: Từ trường ở độ 5m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép



Hình 20: Từ trường ở độ 10m dưới đường dây mạch đơn và mạch kép

## 6 KẾT LUẬN

Bài viết này đã nghiên cứu sự phân bố của điện trường và từ trường xung quanh đường dây truyền tải điện cao áp trong điều kiện dòng điện phụ tải bình thường. Sử dụng thông số của đường dây truyền tải 500kV của lưới điện Miền Tây. Các mô phỏng bằng máy tính được thực hiện bằng cách sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn kết hợp với lập trình MATLAB và kết quả cho thấy rằng điện từ trường của cả hai trường hợp mạch đơn và mạch kép của đường dây truyền tải 500 kV ở mức độ 1 m so với mặt đất được giả định là mức độ làm việc của con người ở dưới đường dây.

Điện trường trung bình của các khoảng cách  $x$  của đường dây mạch đơn và mạch kép khi xét ở chiều cao của đường dây tại giữa nhịp là 7.1375kV/m và 8.1969kV/m, đây là giá trị cao hơn mức giới hạn cho phép con người làm việc ở dưới đường dây trong 24 giờ/ngày [11], [13]. Mức giới hạn cho phép con người làm việc dưới đường dây trong 24 giờ/ngày là nhỏ hơn 5 kV/m theo tiêu chuẩn quy định của Việt Nam [13].

Từ trường trung bình của các khoảng cách  $x$  của đường dây mạch đơn và mạch kép khi xét chiều cao của đường dây tại giữa nhịp là  $64.2440 \mu\text{T}$  và  $72.0534 \mu\text{T}$ , những giá trị này thấp hơn so với mức giới hạn gây nguy hiểm đối với người khi làm việc dưới đường dây trong 24 giờ. [10], [11]. Theo Quy định của Ủy ban quốc tế Bảo vệ bức xạ không ion hóa (ICNIRP) [10], mức độ của từ trường an toàn để con người cho công chúng đến 24 giờ / ngày không được lớn hơn  $100 \mu\text{T}$  và cho cả ngày làm việc, nghề nghiệp không được hơn  $500 \mu\text{T}$ .

Điện trường và từ trường tần số thấp là một trong những trường điện từ bao quanh con người và các sinh vật. Các công trình nghiên cứu khoa học và thực tế lâm sàng đã chỉ ra những biểu hiện bệnh lý của con người khi bị tác động bởi cường độ bức xạ lớn hoặc kéo dài. Những nghiên cứu trong phòng thí nghiệm đã chứng minh rõ ràng tác động trên ion các đại phân tử của tế bào gây nên tín hiệu cho các chất dẫn truyền thần kinh, hormon, kháng nguyên và kháng thể [10].

Cường độ điện trường  $E$  xung quanh đường dây tải điện giảm rất nhanh tỷ lệ nghịch với khoảng cách, đạt giá trị lớn nhất ở phía dưới đường dây và tại sát đường dây, cường độ điện trường dưới đường dây cao áp phụ thuộc điện áp và khoảng cách đường dây so với đất, nhưng không vượt quá  $10 \text{kV/m}$ , ngoài khoảng cách an toàn không quá  $5 \text{kV/m}$ . Sự tác động của trường điện từ đối với cơ thể người: Tác động sinh học của trường điện từ lên cơ thể, tác động nhiệt, tác động gây rối loạn thần kinh, tác động gây rối loạn hệ thống tuần hoàn, tác động điện tĩnh, ...

Ảnh hưởng nghiêm trọng của điện trường và từ trường ở tần số thấp có thể ảnh hưởng đến hệ thần kinh con người như kích thích thần kinh ở mức độ cao. Ở mức độ thấp hơn bao gồm sự thay đổi trong tế bào thần kinh của hệ thần kinh trung ương có thể ảnh hưởng đến trí nhớ, nhận thức và các chức năng não khác [17].

Tổ chức ICNIRP (International Commission for Non-Ionising Radiation Protection-19998) đã đưa ra ngưỡng mật độ hiện tại  $100 \text{mA/m}^2$  cho sự thay đổi nghiêm trọng trong chức năng của hệ thần kinh trung ương (não, dây cột sống ở đầu và thân) [18].

Gần đây IEEE (2002) xác định rằng ngưỡng cường độ mạnh của điện trường là  $53 \text{mV/m}$  tại tần số  $20 \text{Hz}$  làm thay đổi chức năng của não trong 50% người khỏe mạnh. IEEE đề nghị rằng giới hạn căn bản cho não là  $17,7 \text{mV/m}$  trong môi trường nghề nghiệp và  $5,9 \text{mV/m}$  cho cộng đồng.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. Wassef, V.V. Varadan and V.K. Varadan, 1998, Magnetic Field Shielding Concepts for Power Transmission Lines, in: IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 3, pp.649-654.
- [2] R.G. Olsen, D. Deno, R.S. Baishiki, J.R. Abbot, R. Conti, M. Frazier, K. Jaffa, G.B. Niles, J.R. Stewart, R. Wong and R.M. Zavadil, Magnetic Fields from Electric Power Lines Theory and Comparison to Measurements. in IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp.2127-2136, 1988.
- [3] Ngô Nhật Ánh, Trương Trọng Tuấn Mỹ, 2007, Trường điện từ. Nxb Trường Đại học Bách Khoa TP. HCM.
- [4] M.V.K. Chari and S.J. Salon 2000. Numerical Methods in Electromagnetism. in: Academic Press, USA.

- [5] M. Weiner, 2001. Electromagnetic Analysis Using Transmission Line Variables. Ii: World Scientific Publishing, Singapore.
- [6] David V.Hutton, 2004. Fundamentals of finite element analysis. in: Mc Graw Hill.
- [7] M.V.K. Chari, 2000. Numerical Methods in Electromagnetism. in: Academic Press.
- [8] P.P Silvester, 1996. Finite Elements for Electrical Engineer. in: Cambridge Univ. Press.
- [9] Jianming Jin, 2002. The Finite Element Method in Electromagnetic. in: New York Wiley.
- [10] ICNIRP, April 1998. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300GHz), Health Physics. in: Vol 74, No 4: 494-522.
- [11] CIGRE Position Statement, Jun 2001. Power-frequency Electromagnetic Fields (EMF) and Health (on behalf of the Technical Committee, Nov 2000. in: Electra No 196.
- [12] Nghị định 106/2005/NĐ-CP
- [13] Nghị định 54/1999/NĐ-CP
- [14] Quyết định 183NL/KHKT ngày 12/4/1994
- [15] A. Isaramongkolrak, T. Kulworawanichpong, and P. Pao-la-or, October 2008. Finite Element Approach to Electric Field Distribution Resulting from Phase-sequence Orientation of a Double-Circuit High Voltage Transmission Line. in: *Wseas Transaction on Power Systems*, ISSN: 1790-5060, Issue 10, Volume 3 .
- [16] Jr.W.H. Hayt and J.A. Buck, “*Engineering Electromagnetics*” (7th edition), McGraw-Hill, Singapore, 2006.
- [17] WHO, October 2001. Electromagnetic Fields and Public health: extremely low frequency fields and cancer. in: Fact sheet N°263.
- [18] NIEHS-NIH, 2002. Questions and Answers: Electric and Magnetic Fields Associated with the Use of Electric Power. in: US National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS).