

Study the Influence of Magnetic Fields Due to Low Voltage Cables under the Operation Process of MEP System by Using the Finite Element Method

Bui Duc Hung¹, Do Chi Phi², Dang Quoc Vuong^{1*}

¹Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

²Cao Thang Technical College HCM, Vietnam.

*Corresponding author. Email: vuong.dangquoc@hust.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 15/03/2023
Revised: 31/03/2023
Accepted: 10/04/2023
Published: 28/04/2023

KEYWORDS

Cable tray;
Electromagnetic shielding;
Magnetic field;
Magnetic vector potential;
Finite element method.

ABSTRACT

Nowadays, along with the explosive development of economic sectors in general and the construction industry in particular, the management and operation (M&O) of mechanical, electrical and plumbing (MEP) systems in civil and industrial constructions such as factories, workshops, hospitals, hotels, high-rise buildings, shopping centers, etc. play a crucial role and are always of concern to investors. However, one of the important issues in the M&O of the MEP system is the impact of magnetic fields generated by low-voltage power cables on the surrounding environment. This can cause interference to the control system as well as directly affect human health. Therefore, it is essential to study, analyze and calculate the distribution of magnetic fields generated by low-voltage power cables for the M&O of the MEP system. To answer this question, in this paper, the finite element approach is developed with the magnetic vector potential formulation to study and analyze the impact of magnetic fields under two scenarios: low-voltage power cables installed in cable trays and not installed in cable trays. The development of this method will be applied to practical problems.

Nghiên Cứu sự Ảnh Hưởng của Từ Trường do Cáp Hạ Thế Sinh Ra Trong Quá Trình Vận Hành Hệ Thống Cơ Điện Bằng Phương Pháp Phần Tử Hữu Hạn

Bùi Đức Hùng¹, Đỗ Chí Phi², Đặng Quốc Vương^{1*}

¹Đại học Bách khoa Hà Nội, Việt Nam.

²Trường Cao Đẳng Kỹ Thuật Cao Thắng, HCM, Việt Nam.

* Tác giả liên hệ. Email: vuong.dangquoc@hust.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Received: 15/03/2023
Revised: 31/03/2023
Accepted: 10/04/2023
Published: 28/04/2023

TỪ KHOÁ

Máng cáp;
Màn chắn điện từ;
Từ trường;
Từ thế véc tơ;
Phương pháp phần tử hữu hạn.

TÓM TẮT

Ngày nay, cùng với sự phát triển bùng nổ của các nhóm ngành kinh tế nói chung và công nghiệp-xây dựng nói riêng, việc quản lý và vận hành (QL&VH) hệ thống cơ điện trong các công trình dân dụng và công nghiệp như các nhà máy, nhà xưởng, bệnh viện, khách sạn, tòa nhà cao tầng, trung tâm thương mại... đóng vai trò cực kỳ quan trọng và luôn được các chủ đầu tư quan tâm. Tuy nhiên, một trong những vấn đề quan trọng công tác QL&VH hệ thống cơ điện là sự ảnh hưởng của từ trường do cáp điện hạ thế sinh ra đối với môi trường xung quanh. Điều này sẽ gây nhiều đến hệ thống điều khiển cũng như ảnh hưởng trực tiếp tới sức khỏe của con người. Do đó, việc nghiên cứu, phân tích và tính toán sự phân bố của từ trường sinh ra bởi cáp điện hạ thế là rất cần thiết đối với công tác QL&VH. Để trả lời được câu hỏi trên, trong bài báo này, nhóm nghiên cứu phát triển phương pháp FEM với công thức từ thế véc tơ để nghiên cứu và phân tích sự ảnh hưởng của từ trường với hai kịch bản: cáp hạ thế đi trong máng cáp và không đi trong máng cáp. Sự phát triển của phương pháp sẽ được áp dụng vào bài toán thực tế.

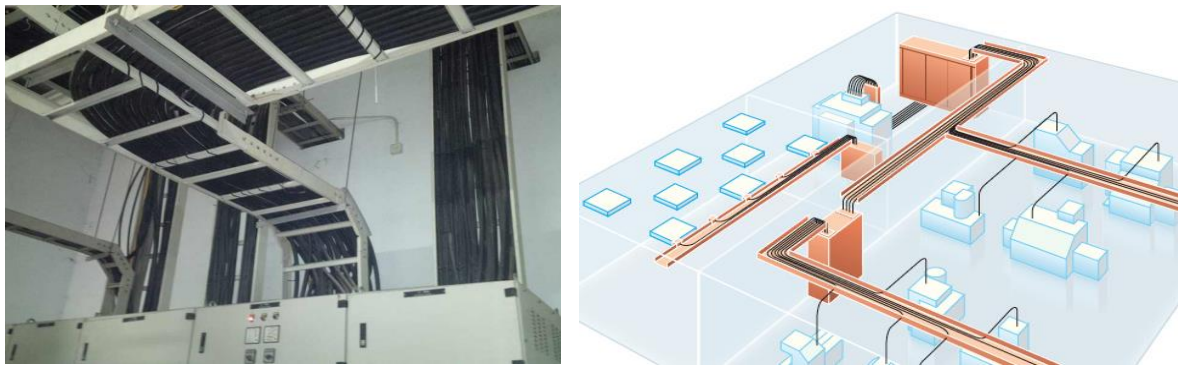
Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.76.2023.1364>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển không ngừng của các nhóm ngành kinh tế nói chung và công nghiệp-xây dựng nói riêng, việc thi công lắp đặt và đảm bảo an toàn hệ thống cơ điện (MEP) đóng vai trò cực kỳ quan trọng đối với các công trình dân dụng và công nghiệp. Trong đó, việc quản lý và vận hành (QL&VH) hệ thống MEP trong các công trình như các nhà máy, cơ sở sản xuất, toà nhà cao tầng, siêu cao tầng, bệnh viện, khách sạn, trung tâm thương mại... luôn đóng vai trò cực kỳ quan trọng và là bài toán được các chủ đầu tư quan tâm. Tuy nhiên, việc QL&VH hệ thống MEP trong các công trình cũng bị ảnh hưởng và tác động bởi nhiều nguyên nhân khác nhau như nhiễu do sóng hài sinh ra bởi các phụ tải tiêu thụ điện có sử dụng bộ biến tần như hệ thống bơm nước, hệ thống bơm cứu hoả, hệ thống điều hoà thông gió và các phụ tải phi tuyến khác; nhiễu do từ trường được sinh ra bởi hệ thống cáp điện hạ thế đi như hình 1. Bên cạnh đó, sự ảnh hưởng của từ trường đối với môi trường xung quanh, đặc biệt là đối với con người cũng rất được quan tâm.

Gần đây, cũng có một số công trình nghiên cứu và khảo sát sự ảnh hưởng của từ trường đối với cơ thể con người và môi trường xung quanh, đó là, trong các tài liệu [1]-[3], nhóm tác giả đã áp dụng kỹ thuật phân tử hữu hạn (PTHH) để nghiên cứu sự ảnh hưởng của từ trường do cáp ngầm cao thế sinh ra. Trong nghiên cứu này, bài báo đã tính toán được sự phân bố của từ trường ở các khoảng cách khác nhau khi xét đến các trường hợp khi có màn chắn và không có màn chắn điện từ. Trong các tài liệu [4], [5], bài báo sử dụng thuật toán tối ưu để tìm ra vị trí phù hợp của màn chắn điện từ đối với cáp ngầm cao thế. Trong các tài liệu [6]-[9], nhóm tác giả đã áp dụng phương pháp FEM để nghiên cứu màn chắn điện từ sử dụng các vật liệu khác nhau để giảm thiểu đối đa của từ trường trong miền tần số thấp.



Hình 1. Mô hình cáp điện hạ thế đi trong thang/máng cáp [Nguồn internet].

Trong bài báo này, nhóm tác giả tiếp tục kế thừa và phát triển phương pháp FEM với công thức véc tơ từ thế để phân tích và đánh giá sự ảnh hưởng của từ trường do cáp điện hạ thế sinh ra trong quá trình QL&VH hệ thống MEP trong các công trình xây dựng dân dụng và công nghiệp. Sự phát triển của phương pháp được thực hiện với hai kịch bản: cáp hạ thế đi trong máng cáp và không đi trong máng cáp.

2. Bài toán từ động

2.1. Cơ sở lý thuyết

Mô hình bài toán từ động trong miền nghiên cứu $\Omega = \Omega_c \cup \Omega_c^c$ được xác định với với biên $\partial\Omega = \Gamma = \Gamma_e \cup \Gamma_h$. Trong đó, Ω_c là miền dẫn điện và từ và Ω_c^c là miền không dẫn.

Hệ phương trình Maxwell trong không gian Eculidean \mathcal{R}^3 với các điều kiện biên được viết như sau [1]-[5]:

$$\text{curl } \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}, \text{ curl } \mathbf{H} = \mathbf{J}_s, \text{ div } \mathbf{B} = 0, \quad (1a-b-c)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}|_{\Gamma_e} = 0, \mathbf{n} \times \mathbf{H}|_{\Gamma_h} = 0. \quad (2a-b)$$

Các luật trạng thái thể hiện mối quan hệ giữa các thông số điện từ được xác định:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (3a-b)$$

Trong đó, \mathbf{E} là cường độ điện trường (V/m), \mathbf{B} là mật độ từ cảm (T), \mathbf{H} là cường độ từ trường (A/m), \mathbf{J}_s là mật độ dòng điện trong thanh dẫn (dây dẫn) (A/mm²) được xác định trong miền Ω_s , \mathbf{J} là mật độ

dòng điện dòng điện xoáy (A/mm^2) xác định trong miền dẫn Ω_c , μ là độ từ thẩm, σ độ dẫn điện và \mathbf{n} là véc tơ pháp tuyến.

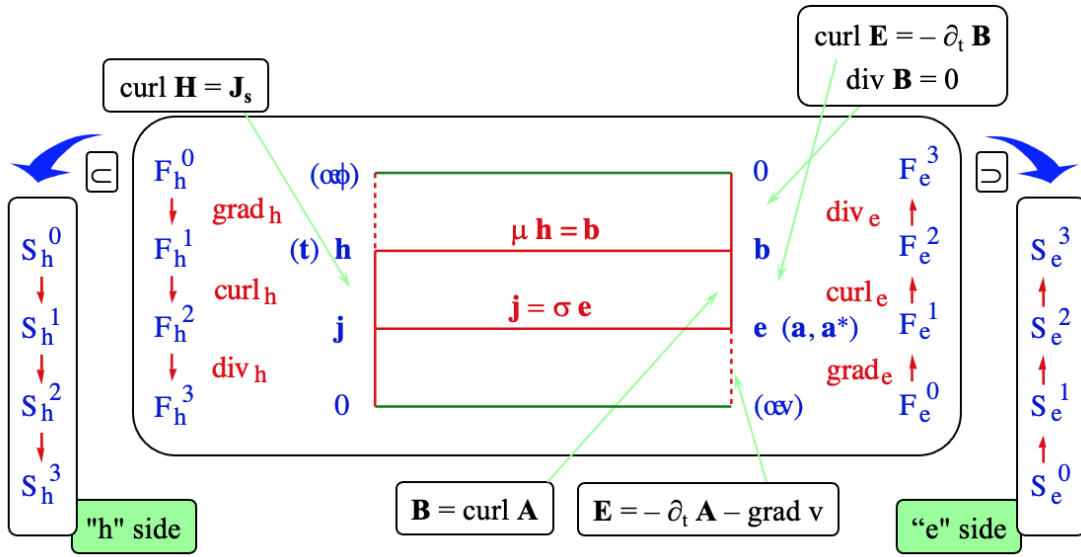
Các trường \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{J} thuộc các không gian hàm ($\mathbf{F}_h(\text{curl}; \Omega)$, $\mathbf{F}_e(\text{div}; \Omega)$ và $\mathbf{F}_e(\text{div}; \Omega)$). Các không gian hàm này được kiểm tra theo sườn trái ("h"-side) và sườn phải ("e"-side) của sơ đồ Tonti như trong hình 2 [17], đó là: $\mathbf{E} \in \mathbf{F}_e(\text{curl}; \Omega)$, $\mathbf{B} \in \mathbf{H}_e(\text{div}; \Omega)$, $\mathbf{H} \in \mathbf{F}_h(\text{curl}; \Omega)$ $\mathbf{J} \in \mathbf{F}_e(\text{div}; \Omega)$.

Từ phương trình (1 c), mật độ từ cảm \mathbf{B} được biểu diễn thông qua từ thế véc tơ \mathbf{A} :

$$\mathbf{B} = \text{curl } \mathbf{A} \quad (4)$$

Thay phương trình (4) vào phương trình (1 a), cường độ điện trường \mathbf{E} được biểu diễn thông qua điện thế vô hướng (v), đó là:

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} - \text{grad } v. \quad (5)$$



Hình 2. Sơ đồ Tonti với mô hình bài toán từ động [17].

2.2. Mô hình toán với phương trình rời rạc

Kết hợp giữa định luật Ampère (1 a) và luật trạng thái (3 a-b), phương trình rời rạc viết cho cho công thức từ thế véc tơ \mathbf{A} được thể hiện như sau [10]-[17]:

$$\int_{\Omega} \mu^{-1} \mathbf{B} \cdot \text{curl } \mathbf{A}' d\Omega + \int_{\Omega} (\sigma \mathbf{E} \cdot \mathbf{A}') d\Omega_c + \int_{\Gamma_h} (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{A}' d\Gamma_h = \int_{\Omega} (\mathbf{j}_s \cdot \mathbf{A}') d\Omega_s, \quad \mathbf{A}' \in \mathbf{F}_h^1(\text{curl}; \Omega) \quad (6)$$

trong đó, trường \mathbf{A}' là hàm thử được xác định trong không gian hàm $\mathbf{F}_h^0(\text{curl}; \Omega)$.

Kết hợp giữa phương trình (4), (5) và (6), phương trình (6) được viết lại như sau:

$$\int_{\Omega} \mu^{-1} \text{curl } \mathbf{A} \cdot \text{rot } \mathbf{A}' d\Omega + j\omega \int_{\Omega} (\sigma \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}') d\Omega_c + j\omega \int_{\Omega} (\sigma \text{grad } v \cdot \mathbf{A}') d\Omega_c + \int_{\Gamma_h} (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{A}' d\Gamma_h = \int_{\Omega} (\mathbf{j}_s \cdot \mathbf{A}') d\Omega_s, \quad \mathbf{A}' \in \mathbf{F}_h^0(\text{curl}; \Omega). \quad (7)$$

Trường \mathbf{A} và điện thế vô hướng v trong phương trình (7) được rời rạc thông qua phần tử cạnh và phần tử nút [17]:

$$\mathbf{A} = \sum_{e \in E(\Omega_c)} A_e \mathbf{s}_e + \sum_{e \in E(\Omega_c^c) \setminus E(\partial\Omega_c)} A_e \mathbf{s}_e, \quad (8)$$

$$v_s = \sum_{n \in N(\Omega)} v_n. \quad (9)$$

Trong đó, $E(\Omega_c)$ và $E(\Omega_c^c)$ trong (8) là tập hợp các phần tử cạnh của miền nghiên cứu Ω , \mathbf{s}_e là hàm nội suy ứng với phần tử cạnh, A_e là thông lượng của trường \mathbf{A} dọc theo cạnh e của miền nghiên cứu Ω . Ký hiệu $N(\Omega)$ trong (9) là tập hợp tất cả các nút trong miền nghiên cứu Ω . Thay các phương trình (8) và (9) vào phương trình rời rạc (7), phương trình 7 trở thành:

$$\int_{\Omega} \mu^{-1} \text{curl} \left(\sum_{e \in E(\Omega_c)} A_e s_e + \sum_{e \in E(\Omega_c^c) \setminus E(\partial\Omega_c)} A_e s_e \right) \cdot \text{curl} \mathbf{A}' d\Omega$$

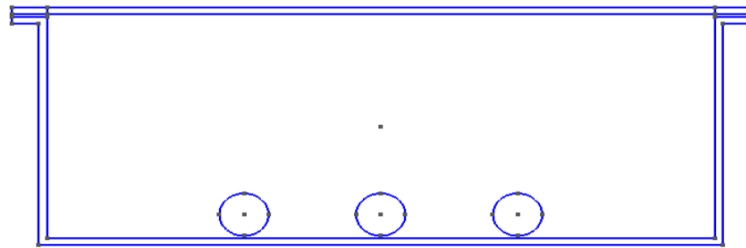
$$+ j\omega \int_{\Omega} \left(\sigma \left(\sum_{e \in E(\Omega_c)} A_e s_e + \sum_{e \in E(\Omega_c^c) \setminus E(\partial\Omega_c)} A_e s_e \right) \cdot \mathbf{A}' \right) d\Omega_c + \int_{\Gamma_h} (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{A}' d\Gamma_h$$

$$j\omega \int_{\Omega} (\sigma \text{grad} \sum_{n \in N(\Omega)} v_n \cdot \mathbf{A}') d\Omega_c = \int_{\Omega} (\mathbf{j}_s \cdot \mathbf{A}') d\Omega_s, \mathbf{A}' \in \mathbf{F}_e^0(\text{curl}; \Omega). \quad (10)$$

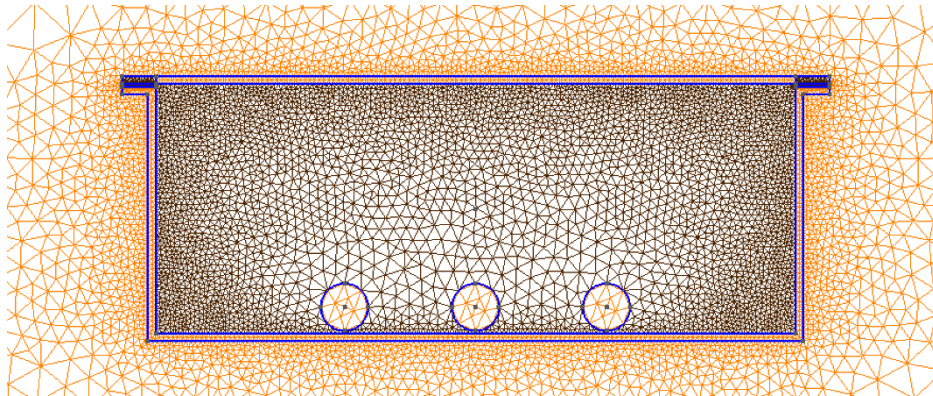
3. Bài toán ứng dụng

Trong phần này, bài toán thực tế với mô hình cáp điện hạ thế đi trong máng cáp được áp dụng để kiểm chứng mô hình lý thuyết đã phát triển ở phần trước. Mô hình 2D cáp điện hạ thế đi trong máng cáp như biểu diễn trong hình 3 có các thông số như sau:

- Dòng điện 3 pha (A, B, C) chạy trong cáp hạ thế có giá trị lần lượt là $I_A = 400\sqrt{2} \sin(\omega t)$, $I_B = 400\sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ)$ và $I_C = 400\sqrt{2} \sin(\omega t + 120^\circ)$;
- Tần số $f = 50$ Hz;
- Máng cáp có chiều dày 3 mm và được chế tạo bằng vật liệu có độ từ thẩm tương đối $\mu_r = 500$, độ dẫn điện $\sigma = 10^6$ S/m.



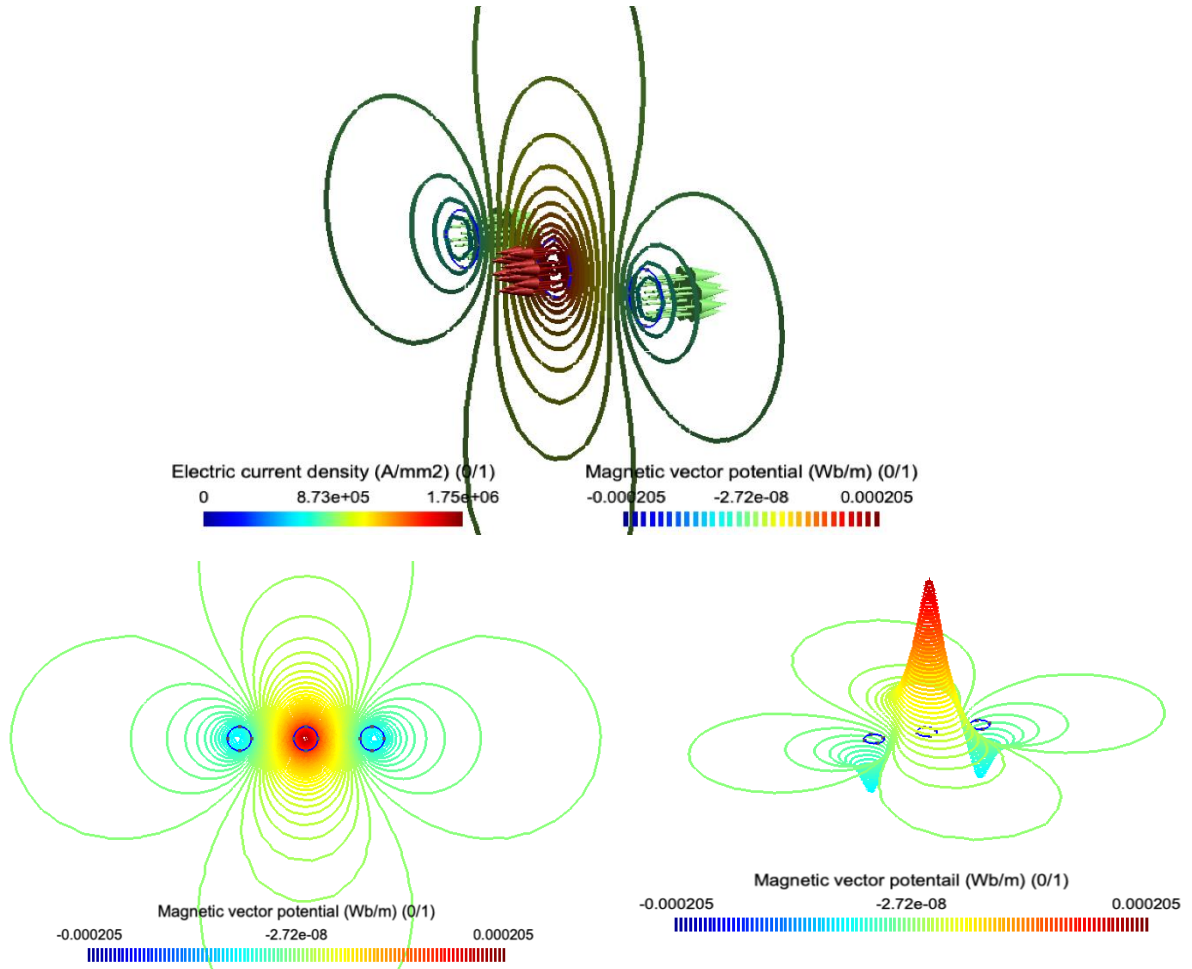
Hình 3. Mô hình 2D cáp điện hạ thế đi trong máng cáp.



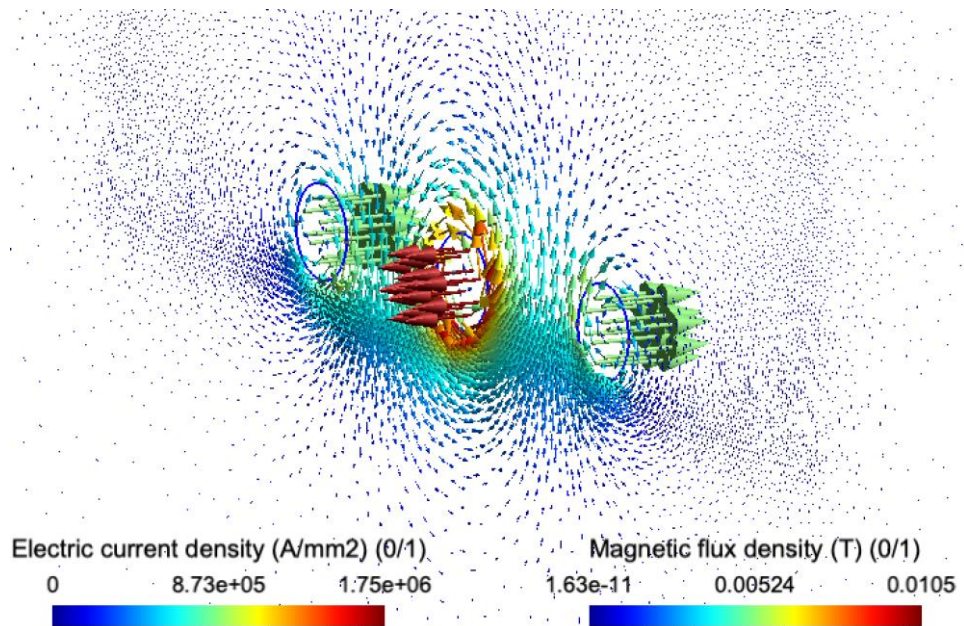
Hình 4. Mô hình chia lưới 2D cáp điện hạ thế đi trong máng cáp.

Mô hình lưới 2D với phần tử cạnh và nút của cáp điện hạ thế và máng cáp được biểu diễn trong hình 4. Bài toán được khảo sát với hai kịch bản khác nhau: Kịch bản thứ nhất, cáp điện 3 pha đi trực tiếp và không sử dụng máng cáp. Kịch bản thứ hai, cáp điện 3 pha được đi trong máng cáp (lưu ý: ở đây máng cáp đóng vai trò như là một màn chắn điện từ).

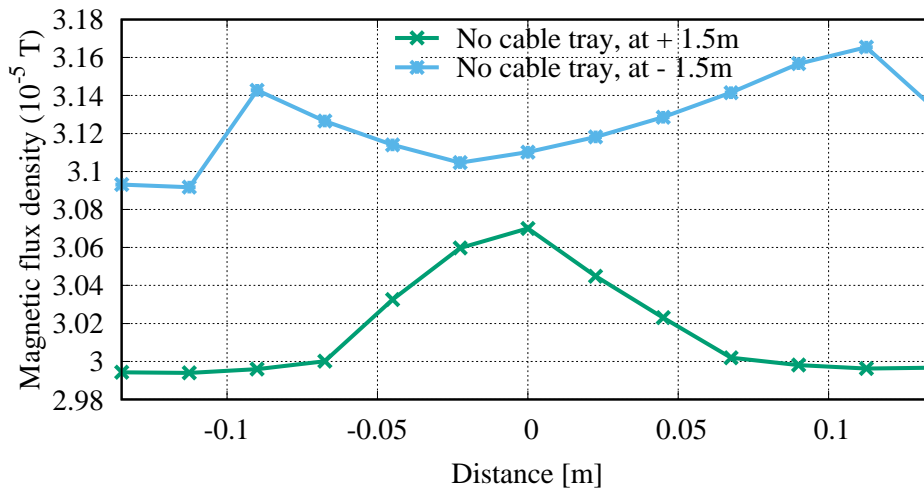
- **Đối với kịch bản thứ nhất:** Hình 5 và hình 6 mô tả sự phân bố của từ thế véc tơ và từ trường được sinh ra bởi cáp điện hạ thế 3 pha sinh ra khi không xét đến máng cáp.



Hình 5. Sự phân bố của từ thế véc tơ do dòng điện ba pha sinh ra khi không xét đến màng cáp.

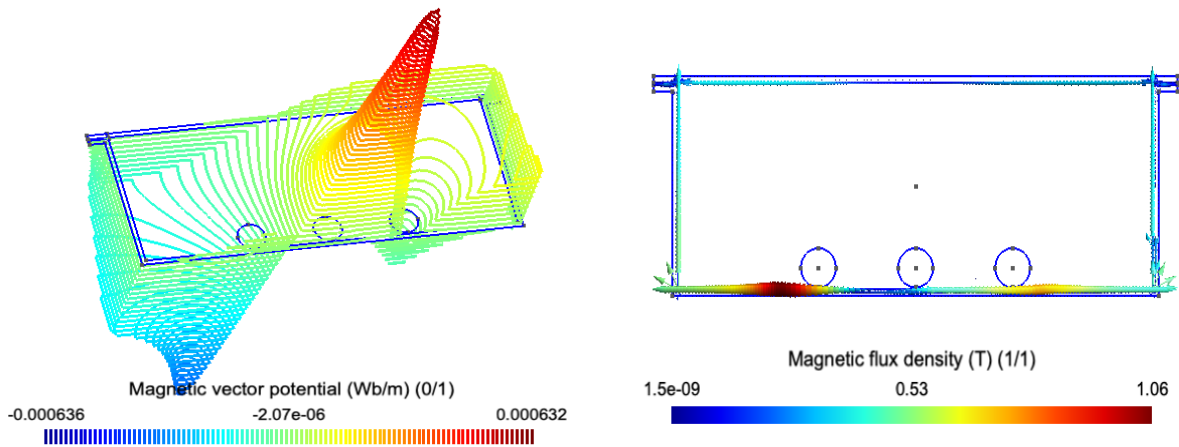


Hình 6. Sự phân bố của từ trường do dòng điện ba pha sinh ra khi không xét đến màng cáp.



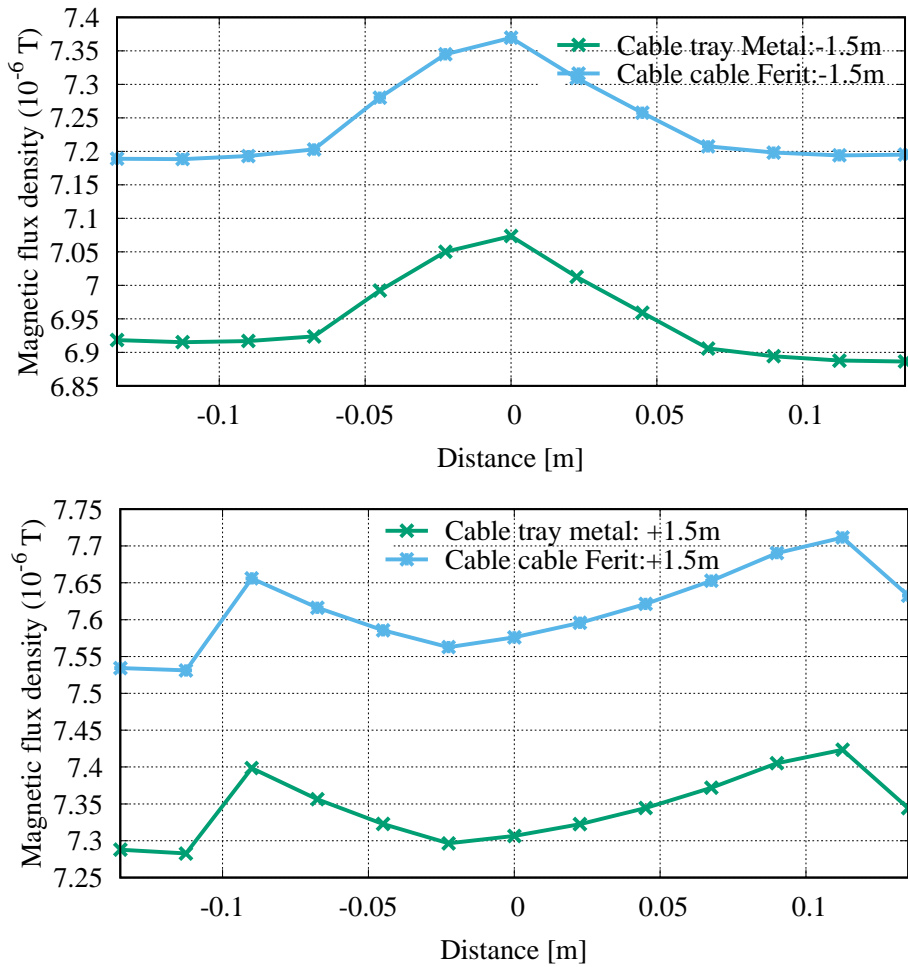
Hình 7. Sự phân bố của từ trường dọc theo mặt cắt ngang của cáp điện khi không có máng cáp ứng với hai vị trí khác nhau: +1.5m tính từ tim cáp điện lên trên; -1.5m tính từ tim cáp điện xuống dưới).

Sự phân bố của từ trường dọc theo mặt cắt ngang của cáp điện ứng với hai vị trí khác nhau (+1.5m tính từ tim cáp điện lên trên; -1.5m tính từ tim cáp điện xuống dưới) được mô tả trong hình 7. Kết quả cho thấy, tại vị trí phía trên +1.5m (so với tim cáp) của cáp, sự phân bố của từ trường nhỏ hơn so với giá trị tính toán tại vị trí phía dưới -1.5m (so với tim cáp) của cáp. Điều này chỉ ra rằng, nếu cáp điện chạy qua khu vực hành lang, hoặc trong phòng điều khiển trung tâm trong các tòa nhà hoặc bệnh viện, trung tâm thương mại..., khi không có máng cáp, tại vị trí cách cáp hạ thế -1.5m sẽ bị ảnh hưởng bởi từ trường với giá trị có thể đạt tới 3.17×10^{-5} (T) như biểu diễn trong hình 7. Sự phân bố của từ trường có thể ảnh hưởng trực tiếp tới sức khỏe của con người, cũng như có thể gây nhiễu đến hệ thống điều khiển trong quá trình QL&VH.

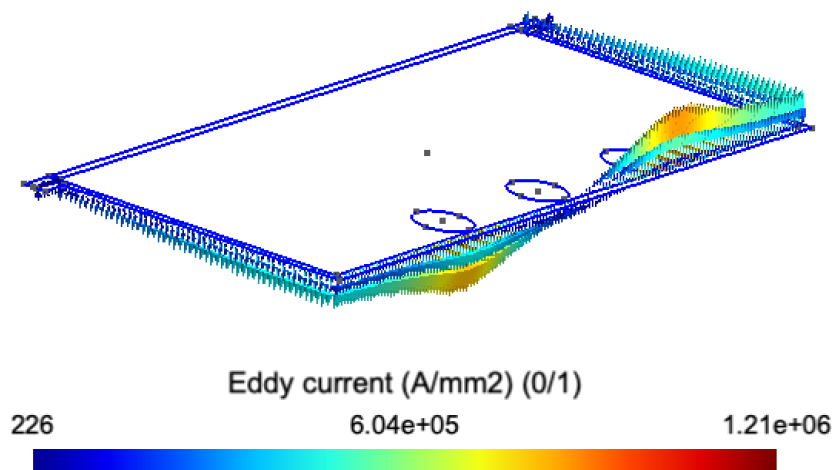


Hình 8. Sự phân bố của từ thế vectơ và từ trường do dòng điện ba pha sinh ra khi xét đến máng cáp.

- **Đối với kịch bản thứ hai:** Ở kịch bản này, máng cáp sẽ được sử dụng với hai loại vật liệu khác nhau, đó là, Metal và Ferrit. Hình 8 biểu diễn sự phân bố của từ thế véc tơ và từ trường sinh ra bởi dòng điện 3 pha chạy trong cáp điện khi xét đến máng cáp (màn chắn điện từ) được chèn tạo với hai loại vật liệu khác nhau. Thông qua các kết quả đạt được, ta nhận thấy, khi có máng cáp, do từ trở của máng cáp nhỏ hơn rất nhiều so với từ trở của không khí, do đó từ trường chủ yếu tập trung phân bố trong máng cáp, phần lớn là ở phía đáy của máng cáp. Tuy nhiên, tại vị trí tiếp xúc giữa mặt bích (nắp) và thân máng cáp, vẫn tồn tại khe hở không khí, nên vẫn có hiện tượng từ trường tản ra ngoài, nhưng giá trị của từ trường tản này rất nhỏ với giá trị từ trường đã khúc xạ vào máng cáp. Giá trị này được tính toán ở các trường hợp tiếp theo.



Hình 9. Sự phân bố của từ trường dọc theo mặt cắt ngang của cáp điện khi có máng cáp (sử dụng vật liệu Metal và Ferit) với hai vị trí khác nhau: +1,5m tính từ tim cáp điện lên trên; -1,5m tính từ tim cáp điện xuống dưới.



Hình 10. Sự phân bố của dòng điện xoáy (eddy current) trên máng cáp.

Một cách tương tự như hình 7, sự phân bố của từ trường dọc theo mặt cắt ngang của cáp điện khi xét đến máng cáp tại các hai vị trí khác nhau (+1,5m tính từ tim cáp điện lên trên; -1,5m tính từ tim cáp điện xuống dưới) được thể hiện trong hình 9. Kết quả cho thấy, tại vị trí phía trên +1,5m (so với tim cáp) và vị trí phía dưới -1,5m của cáp, sự phân bố của từ trường đã giảm được 5 lần so với trường hợp

khi không sử dụng máng cáp. Thông qua các kết quả này, có thể thấy rằng, đối với cáp điện hạ thế sử dụng trong công trình, khi sử dụng máng cáp, sự phân bố của từ trường đã giảm đi đáng kể, điều này sẽ đảm bảo cho con người và thiết bị điều khiển trong quá trình QL&VH của hệ thống. Sự phân bố của mật độ dòng điện xoáy do từ trường biến thiên và khúc xạ trong máng cáp được mô tả như trong hình 10. Kết quả cho thấy, giá trị dòng điện xoáy chủ yếu tập trung tại phía đáy và hai thành bên của máng. Sự phân bố của dòng điện xoáy trong máng cáp là nguyên nhân gây ra tổn hao và sinh ra nhiệt trong máng cáp. Bài toán nhiệt do dòng điện xoáy sinh ra trong máng cáp sẽ được nghiên cứu ở công trình tiếp theo mà không được đề cập chi tiết trong phạm vi của bài báo này.

4. Kết luận

Phương pháp FEM đã được phát triển thành công với công thức từ thể véc tơ để phân tích và tính toán sự ảnh hưởng của từ trường do dòng điện chạy trong cáp hạ thế sinh ra với hai kịch bản khác nhau: Khi có máng cáp và khi không có máng cáp. Thông qua các kết quả đạt được của bài báo, bài báo đã chứng minh và chỉ ra sự phân bố của từ trường ở các vị trí khác nhau. Cụ thể, khi không sử dụng máng cáp, tại khoảng cách -1.5m (tức là phía dưới tính từ tim cáp), trong khu vực này vẫn bị ảnh hưởng đáng kể của từ trường. Tuy nhiên, khi sử dụng máng cáp, từ trường tại khu vực này đã giảm đi 5 lần so với lúc không sử dụng máng cáp. Với kết quả như phân tích ở trên, sẽ là cơ sở để giúp cho công tác QL&VH hệ thống MEP được đảm bảo an toàn, cũng như giảm thiểu tối đa nhiều do tác động trực tiếp của từ trường đối với hệ thống điều khiển.

Lời cảm ơn

Bài báo đã được hỗ trợ kinh phí bởi đề tài cấp cơ sở (mã số: T2022-PC-009) của Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. D. Hung, T. C. Trinh, M. Q. Duong, and V. D. Quoc, "Study of Electromagnetic Shielding for Reduction of Magnetic Fields Generated by Underground Power Cables via a Finite Element Technique," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 20, pp. 31-36, Dec. 2022, doi:10.31130/ud-jst.2022.4781CT.
- [2] C. D. P. López, P. C. Romero, and P. Dular, "Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables," *RE&PQJ*, vol. 1, no. 5, pp. 519-526, Mar. 2007.
- [3] S. Koruglu, P. Sergeant, R. V. Sabariego, V. Q. Dang, and M. De Wulf, "Influence of contact resistance on shielding efficiency of shielding gutters for high-voltage cables," *IET Electric Power Applications*, vol. 5, no. 9, pp. 715-720, 2011.
- [4] M. E. Almeida, V. M. Machado, and M. G. Neves, "Mitigation of the magnetic field due to underground power cables using an optimized grid," *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 21, pp. 180-187, 2011.
- [5] K. Yamazaki *et al.*, "Optimal structure of magnetic and conductive layers of a magnetically shielded room," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 3524-3526, 2006.
- [6] M. D. Amore, E. Menghi, and M. Sarto, "Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines," *Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compatibil.*, vol. 1, pp. 203-208, 2003.
- [7] T. Barbarics *et al.*, "Electromagnetic field calculation for magnetic shielding with ferromagnetic material," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 4, pp. 986-989, 2000.
- [8] CIGRE, Work Group on Electric Power Systems, WG C4.204, "Mitigation techniques of power-frequency magnetic fields," *Electra*, vol. 242, pp. 75-83, Feb. 2009.
- [9] A. Farag, M. Dawoud, and I. Habiballah, "Implementation of shielding principles for magnetic field management of power cables," *Electric Power Syst. Res.*, vol. 48, pp. 193-209, 1999.
- [10] V. D. Q. Vuong, "Modeling of Magnetic Fields and Eddy Current Losses in Electromagnetic Screens by A Subproblem Method," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 194, no. 01, pp. 7-12, 2018.
- [11] T. Hieu *et al.*, "Analysis of Protective Solutions for Underground Cable System - Application for Danang Distribution Grid," in *2021 10th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/CIEM52821.2021.9614812.
- [12] National Radiological Protection Board, "Review of the scientific evidence for limiting exposure to electromagnetic fields (0-300GHz)," *Tech. Rep.*, vol. 15, no. 3, 2004.
- [13] International Council on Large Electric Systems (CIGRE), "Mitigation techniques of power frequency magnetic fields originated from electric power systems," *Tech. Rep. Working group C4.204*, 2009.
- [14] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz)," *Health Phys.*, vol. 99, no. 6, pp. 818-836, 2010.
- [15] A. Canova *et al.*, "Passive mitigation of stray magnetic fields generated by underground power line," in *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, 2017.
- [16] E. Mimos, D. Tsanakas, and A. Tzinevrakis, "Optimum phase configurations for the minimization of the magnetic fields of underground cables," *Electr. Eng.*, vol. 91, pp. 327-335, 2010.
- [17] V. D. Q. Vuong, "Modeling of Electromagnetic Systems by Coupling of Subproblems—Application to Thin Shell Finite Element Magnetic Models," *PhD Thesis, University of Liege*, 2013.



Dr Hung Bui Duc is currently working as a team leader of electrical machines's group, and also a lecturer of Department of Electrical Engineering, School of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology. He obtained the PhD degree in the Department of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, in 2000.



Dr Phi Do is a Dean Electrical-Electronic Engineering Cao Thang Technical College, Ho Chi Minh city, Vietnam. PhD, Hanoi University of Science and Technology in 2016. He is Studying in Electrical Engineering, electrical installation skills, design install a Solar or lighting system; ability to operate, assemble, maintain electrical equipment, electrical systems and solve problems related to electricity and equipment in the production.



Assoc. Prof. Dang Quoc Vuong received his PhD degree in 2013 from the Faculty of Applied Sciences at the University of Liege in Belgium. After that he came back to the Hanoi University of Science and Technology in September 2013, where he is currently working as a deputy director of Training Center of Electrical Engineering, School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi, University of Science and Technology. He became an Associate Professor in 2020. His research domain encompasses modeling of electrical machines and electromagnetic systems by coupling of subproblem methods.