

TÍNH TOÁN ĐIỆN TỪ TRƯỜNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP TÍCH PHÂN SỐ - ỨNG DỤNG CHO BÀI TOÁN CỐ CẤU TRÚC DẠNG DÂY

CALCULATION OF ELECTROMAGNETICS BY AN PARTIAL ELEMENT EQUIVALENT CIRCUIT METHOD - APPLICATION TO THE WINDING STRUCTURE

Phạm Hồng Hải, Lê Đức Tùng*,
Đặng Quốc Vương, Phạm Văn Bình

TÓM TẮT

Mô hình bài toán trường điện từ trong hệ thống điện, máy điện và thiết bị điện là một chủ đề thiết thực và mang tính thời sự với các nhà nghiên cứu và chế tạo, đặc biệt với bài toán với mô hình có cấu trúc dạng dây. Hầu hết các bài toán điện từ đều được mô tả bởi hệ phương trình Maxwell và các luật trạng thái. Đây là các phương trình đạo hàm riêng được viết dưới dạng tích và vi phân, mô tả sự phân bố của trường điện từ trong không gian và biến đổi theo thời gian. Để phân tích được bài toán điện từ, trong bài báo này, nhóm tác giả đã áp dụng phương pháp tích phân số để tính toán sự phân bố của từ trường và dòng điện cảm ứng trên vòng dây, nơi mà nếu áp dụng trực tiếp phương pháp phần tử hữu hạn hay phương pháp sai phân hữu hạn sẽ gặp rất nhiều khó khăn, vì số bậc tự do lớn dẫn đến kích thước ma trận lớn và thời gian tính toán lớn. Kết quả đạt được từ phương pháp sẽ được so sánh với kết quả mô phỏng từ phần mềm thương mại.

Từ khóa: Trường điện từ, dòng điện cảm ứng, phương pháp phần tử hữu hạn, phương pháp PEEC.

ABSTRACT

Modeling of electromagnetic problems in electrical systems, machines and devices are a practical subject and importance for researchers and manufactures, specially for the problem getting a line winding structure. The electromagnetic problems are almost presented the set of Maxwell equations and their behaviors. These are partial differential equations written as differential and integral, described distributions of electromagnetic fields in the space and variation in time. In order to analyze this problem, in this paper, a partial element equivalent circuit is applied to compute distributions of electromagnetic fields and induction currents in turn windings, where occurring some difficulties as applying directly by a finite element method or a finite difference method, because of the big degree of freedoms, leading to a big size of matrix and spending a lot of time for computation. The obtained results will be compared with the simulation results of commercial software.

Keywords: Electromagnetics, Induction current, finite element method, partial element equivalent circuit.

Viện Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: tung.leduc1@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 18/02/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 26/3/2020

Ngày chấp nhận đăng: 24/4/2020

KÝ HIỆU

FEM	Phương pháp phần tử hữu hạn
PEEC	Phương pháp mạch điện thay thế tương đương
MOM	Phương pháp mômen
BEM	Phương pháp phần tử biên

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Như chúng ta đã biết, các thiết bị điện có công suất lớn (trạm biến áp phân phối, trạm thu, trạm phát...) tồn tại khá phổ biến trong các khu đô thị, khu dân cư, khu công nghiệp. Các thiết bị điện này thường hoạt động ở điện áp lớn, dòng điện cao và sẽ sinh ra điện từ trường, gây nhiễu loạn, ảnh hưởng đến các thiết bị điều khiển, thiết bị điện tử..., thậm chí ảnh hưởng trực tiếp đến sức khỏe con người. Do đó, việc tính toán chính xác và mô phỏng được bức tranh điện từ trường, để từ đó để xuất các giải pháp giảm, ngăn ngừa chúng là câu trả lời cần thiết và có nhiều ý nghĩa trong thực tiễn.

Để phân tích, tính toán và mô phỏng các hiện tượng điện từ, các nhà nghiên cứu, thiết kế có thể sử dụng phương pháp giải tích và các phương pháp số khác nhau [1 - 3]. Với các thiết bị điện có cấu trúc hình học đơn giản, người ta có thể xác định được một đáp án giải tích chính xác. Tuy nhiên, thực tế chứng minh rằng với cấu trúc thiết bị điện phức tạp, phương pháp giải tích không thể thực hiện được mà phải giải tìm nghiệm gần đúng bằng phương pháp số.

Các phương pháp số được ứng dụng khá phổ biến trong mô phỏng tính toán trường điện từ: Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), phương pháp sai phân hữu hạn (FDM), phương pháp phần tử biên (BEM) và phương pháp tích phân số (IEM)...

Trong đó, phương pháp FEM là một phương pháp rất thông dụng [1, 4]. Ưu điểm của phương pháp này là tính tổng quát, có khả năng mô phỏng thiết bị có cấu trúc khác nhau từ nhiều vật liệu (dẫn điện, cách điện, vật liệu từ...) ở

dạng bài toán tuyến tính lẫn phi tuyến. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp FEM là khó khăn trong việc tính toán với các loại thiết bị có cấu trúc dạng vỏ mỏng và đặc biệt là cấu trúc dạng dây.

Mô hình hóa dây dẫn: từ trường thay đổi rất nhiều ở vùng lân cận và bên trong dây dẫn, việc mô phỏng đúng trường điện từ ở gần vật dẫn có xét đến hiệu ứng bề mặt (skin effect) và hiệu ứng gần (proximity effect) tạo ra các phương trình phân tử hữu hạn với số bậc tự do lớn, dẫn tới cấu trúc ma trận tính toán rất lớn. Nếu áp dụng phương pháp FEM để giải, yêu cầu máy tính có hình rất lớn và chi phí khá tốn kém và thậm chí không thể thực hiện được.

Để khắc phục được những khó khăn này, nhóm tác giả đã áp dụng và phương pháp tích phân số, trong đó kể đến phương pháp PEEC để nghiên cứu điện từ trường trong các thiết bị có cấu trúc dạng dây [2, 3]. Ưu điểm của phương pháp nằm ở chỗ không phải chia lưới vùng không khí bao quanh (như phương pháp FEM) đối tượng tính toán giảm thời gian cũng như khối lượng tính toán. Mạch điện thu được sẽ được tiếp tục tính toán... từ đó hiện tượng điện từ của các thiết bị điện sẽ được nghiên cứu trong một hệ thống có tính đến các sự ảnh hưởng của những thiết bị điện khác.

2. MÔ HÌNH HOÁ TRƯỜNG ĐIỆN TỪ

2.1. Phương pháp tích phân số

Như đã phân tích ở phần 1, mặc dù phương pháp tích phân số không tổng quát như phương pháp FEM. Tuy nhiên, đây là phương pháp thích hợp khi mô phỏng những thiết bị điện có dạng phức tạp có nhiều không khí bao quanh. Một trong những phương pháp tích phân số được ưa thích đối với các nhà nghiên cứu là: phương pháp PEEC. Phương pháp PEEC được phát triển bởi Ruehli [5], đây là một trong những phương pháp số thích hợp cho bài toán trường điện từ có xét đến sự ảnh hưởng của tương thích điện từ (EMC) và nhiễu điện từ EMI... Phương pháp cũng cho phép mô phỏng hiện tượng điện từ bao gồm các thành phần điện trở, điện cảm, hồ cảm, điện dung (RLMC) mà các giá trị các phần tử RLMC được tính bằng tích phân [3].

Xét mô hình toán học của bức xạ điện trường E xét trên một thể tích dây dẫn N_b được đặt gần nguồn điện từ trong không khí, áp dụng phương pháp PEEC, ta có:

$$E^i(r, t) = \frac{J(r, t)}{\sigma} + \frac{\partial A(r, t)}{\partial t} + \nabla\Phi(r, t), \tag{1}$$

trong đó: E^i là cường độ điện trường, J là mật độ dòng điện trong vật dẫn, A véc tơ từ thế, Φ là véc tơ điện thế vô hướng và σ độ dẫn điện của vật dẫn.

Một dây dẫn có diện tích mặt cắt ngang không đổi dọc theo chiều dài của nó có thể được coi là một bó các sợi song song, mỗi sợi dẫn có diện tích mặt cắt ngang S_j và mang dòng điện I_j . Mật độ dòng J giả định là không đổi dọc theo chiều dài của sợi dẫn nhưng thay đổi từ sợi dẫn này sang sợi dẫn khác.

Phương trình của véc tơ từ thế A_j do dòng I_j của sợi dẫn j gây ra được xác định:

$$A_j(P) = A_j(P) = \frac{\mu_0 I_j}{4\pi S_j} \int_{V_j} \frac{1}{r} dV_j, \tag{2}$$

trong đó: r là khoảng cách giữa điểm lấy tích phân và điểm P (điểm xét sợi dẫn j), I_j là cường độ dòng điện trong vật dẫn j , S_j là diện tích mặt cắt sợi dẫn j và V_j là thể tích của sợi dẫn.

Điện thế tạo bởi dòng điện I_j qua phần sợi dẫn k được tính:

$$\Phi_{kj} = \frac{1}{S_k} \int_{V_k} A_j \cdot I_k dV_k = \frac{\mu_0 I_j}{4\pi S_j S_k} \int_{V_k} \int_{V_i} \frac{I_j I_k}{r} dV_k dV_j \tag{3}$$

Hệ số hồ cảm giữa 2 sợi dây dẫn được xác định bởi:

$$m_{kj} = \frac{\Phi_{kj}}{I_j} = \frac{\mu_0 I_j}{4\pi S_j S_k} \int_{V_k} \int_{V_i} \frac{I_j I_k}{r} dV_k dV_j \tag{4}$$

Hệ số hồ cảm m_{kj} chỉ phụ thuộc vào kích thước và vị trí của hai sợi dẫn k và j , có thể tính bằng giải tích. Điện áp trên dây dẫn k được xác định:

$$U_k = I_k \cdot R_k + j\omega \sum_{j=1}^{N_b} I_j m_{kj}, \tag{5}$$

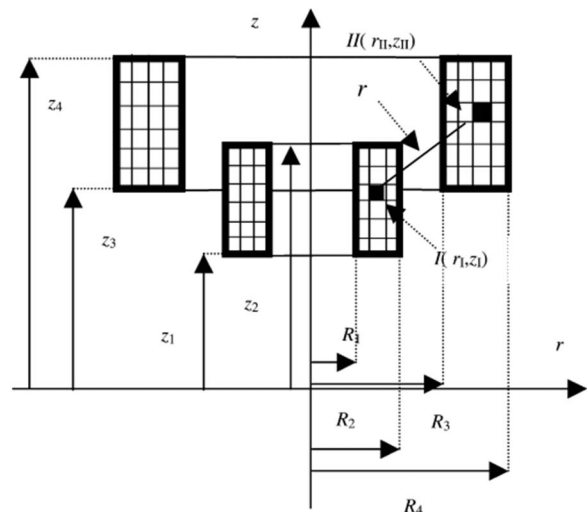
trong đó, ω là tần số góc, R_k là nội trở của sợi dẫn k .

2.2. Sự hồ cảm của hai sợi dây đồng trục

Xét hai cuộn dây đồng trục L_1 và L_2 (hình 1) mang điện và đặt gần nhau trong không khí. Công thức (4) cho thấy hồ cảm không bị ảnh hưởng bởi vật liệu mà chỉ phụ thuộc vào dòng điện và tính chất hình học của hệ thống. Ở tần số thấp, độ hồ cảm thay đổi rất ít trong mặt cắt ngang. Áp dụng công thức Neumann [6], độ hồ cảm M_{12} của hai dây dẫn L_1 và L_2 và được xác định:

$$M_{12} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_{L_1 L_2} \frac{dL_1 dL_2}{r}, \tag{6}$$

trong đó, r là khoảng cách giữa dL_1 và dL_2 và μ là độ từ thẩm của cuộn dây.



Hình 1. Hai cuộn dây đồng trục L_1 và L_2 với mặt cắt hình chữ nhật

Theo hệ tọa độ trụ, nếu 2 cuộn dây được quấn chặt chẽ và cách điện giữa các vòng dây là tương đối mỏng. Dòng điện trong cuộn dây có thể được xem là phân bố đều ở toàn bộ mặt cắt với mật độ dòng điện lần lượt là J_1 và J_2 . Khi đó, độ hồ cảm giữa 2 cuộn dây đồng trục có mặt cắt hình chữ nhật có số vòng là N_1 và N_2 được xác định:

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 \int_0^\pi \int_{R_1}^{R_2} \int_{R_3}^{R_4} \int_{z_1}^{z_2} \int_{z_3}^{z_4} \frac{r_1 r_{II} dr_1 dr_{II} dz_1 dz_{II} \cos \theta d\theta}{(R_2 - R_1)(R_4 - R_3)(z_2 - z_1)(z_4 - z_3)} \quad (7a)$$

$$r = \sqrt{(z_{II} - z_1)^2 + r_I^2 + r_{II}^2 - 2r_I r_{II} \cos \theta} \quad (7b)$$

Để đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy của công thức tính độ hồ cảm (7a-b) thu được từ phương pháp tích phân, sử dụng phương pháp Filament để chia cuộn dây thành nhiều sợi tròn đồng trục để tính độ hồ cảm của hai cuộn dây tròn có tiết diện hình chữ nhật, đó là:

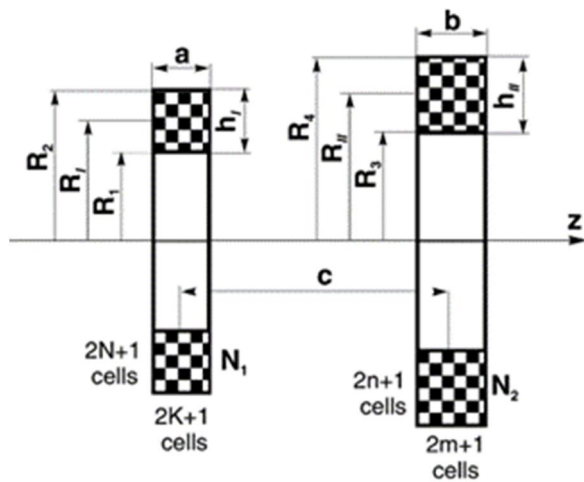
$$M = \frac{2\mu_0 \sqrt{R_I R_{II}}}{k} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right], \quad (8)$$

với $k^2 = \frac{4R_I R_{II}}{(R_I + R_{II})^2 + c^2}$.

Trong đó: E và K là tích phân đường elip loại một và loại hai lần lượt được xác định:

$$E = \int_0^{\pi/2} (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{1/2} d\theta,$$

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{(1 - k^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} d\theta. \quad (9a-b)$$



Hình 2. Mô hình chia lưới cuộn dây

Do kích thước của cuộn dây là hữu hạn, nên chia 2 cuộn thành các lưới gồm nhiều sợi dây như hình 2. Mặt cắt ngang của 2 cuộn được chia lần lượt thành $(2N + 1) \times (2K + 1)$ ô và $(2n + 1) \times (2m + 1)$ ô. Mỗi ô trên mặt cắt chứa 1 sợi và dòng điện trên mỗi sợi dây là như nhau.

Theo công thức (7a-b), sự hồ cảm của từng cặp sợi dây như công thức được xác định:

$$M = \frac{N_1 N_2 \sum_{g=-K}^{g=K} \sum_{h=-N}^{h=N} \sum_{s=-m}^{s=m} \sum_{l=-n}^{l=n} M_{12}(g, h, s, l)}{(2N+1)(2K+1)(2n+1)(2m+1)}, \quad (10)$$

trong đó:

$$M_{12} = \frac{2\mu_0 \sqrt{R_{11}(h)R_{22}(l)}}{k(g, h, s, l)} \left[\left(1 - \frac{k^2(g, h, s, l)}{2}\right) K(k(g, h, s, l)) - E(k(g, h, s, l)) \right],$$

$$k^2(g, h, s, l) = \frac{4R_{11}(h)R_{22}(l)}{(R_{11}(h) + R_{22}(l))^2 + z(g, s)^2}$$

$$R_{11}(h) = R_I + \frac{h_I}{(2N+1)} h, \text{ với } h = -N, \dots, 0, \dots, N,$$

$$R_{22}(l) = R_{II} + \frac{h_{II}}{(2n+1)} l, \text{ với } l = -n, \dots, 0, \dots, n,$$

$$R_I = \frac{R_1 + R_2}{2}, \quad R_{II} = \frac{R_3 + R_4}{2},$$

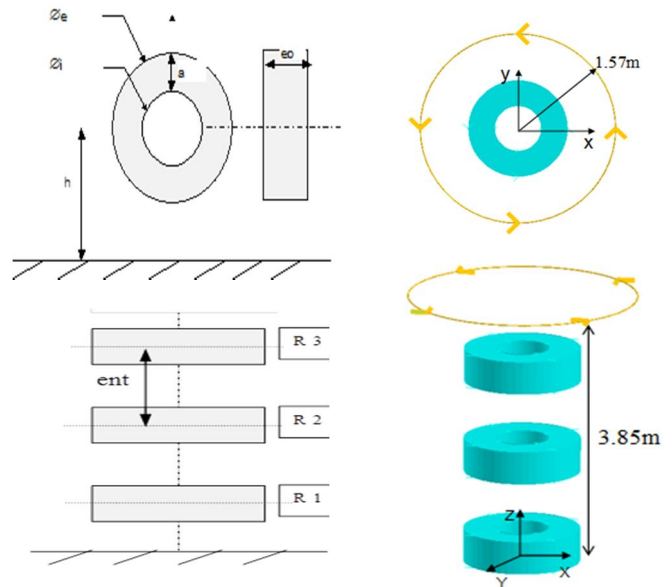
$$h_I = R_2 - R_1, \quad h_{II} = R_4 - R_3,$$

$$z(g, k) = c + \frac{a}{(2K+1)} g + \frac{b}{(2m+1)} s,$$

$$g = -K, \dots, 0, \dots, K, \text{ và } s = -m, \dots, 0, \dots, m.$$

3. BÀI TOÁN ÁP DỤNG

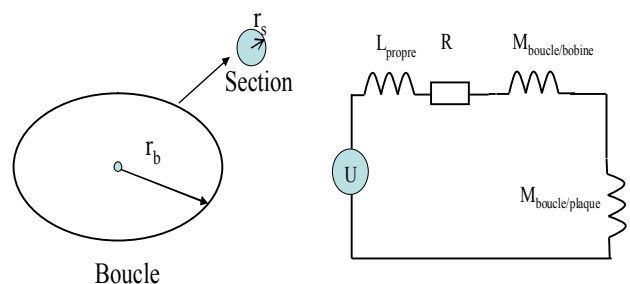
Xét một hệ thống gồm kháng điện 3 pha được sử dụng để hạn chế dòng điện ngắn mạch tại phía thứ cấp của trạm biến áp phân phối (hình 3).



Hình 3. Mô hình cuộn kháng 3 pha và vòng ngắn mạch

Các thông số của cuộn kháng được cho như sau: cuộn 1 có dòng điện $i_a = 1000 \sin \omega t$ (A), cuộn 2 có $i_b = 1000 \sin (\omega t + 120^\circ)$ (A), cuộn 3 có $i_c = 1000 \sin (\omega t - 120^\circ)$ (A), đường kính ngoài $\varnothing_e = 1,6\text{m}$, đường kính trong $\varnothing_i = 0,74\text{m}$, độ dày $e_0 = 0,5\text{m}$, khoảng cách giữa các cuộn $e_{nt} = 1,4\text{m}$. Thông số của vòng ngắn mạch (vòng chắn từ) có thông số: $r_s = 9,25\text{mm}$ (bán kính mặt cắt), điện trở suất $\rho = 3,03 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$.

Từ mô hình cuộn kháng, sơ đồ mạch điện thay thế tương đương được xác định theo hình 4.



Hình 4. Mạch điện thay thế tương đương

Nội trở vòng dây ngắn mạch được xác định:

$$R = \rho \frac{2\pi r_b}{\pi r_s^2} \quad (11)$$

Độ tự cảm của vòng dây:

$$L = \mu_0 \cdot r_b \left[\ln\left(\frac{8r_b}{r_s}\right) - 2 \right] + \frac{\mu_0}{8\pi} 2\pi \cdot r_b \quad (12)$$

Hỗ cảm giữa điện kháng với vòng dây chẵn từ [3]:

$$M_{\text{vòng/cuộn}} = \frac{N}{(2m+1)(2n+1)} \sum_{l=-n}^{l=n} \sum_{p=-m}^{p=m} M(l, p), \quad (13)$$

trong đó:

$$M(l, p) = \frac{\mu_0 \sqrt{R_1 \cdot R_{22}(l)}}{k(l, p)} \begin{bmatrix} (2 - k^2(l, p)) \cdot K(k) \\ -2 \cdot E(k) \end{bmatrix},$$

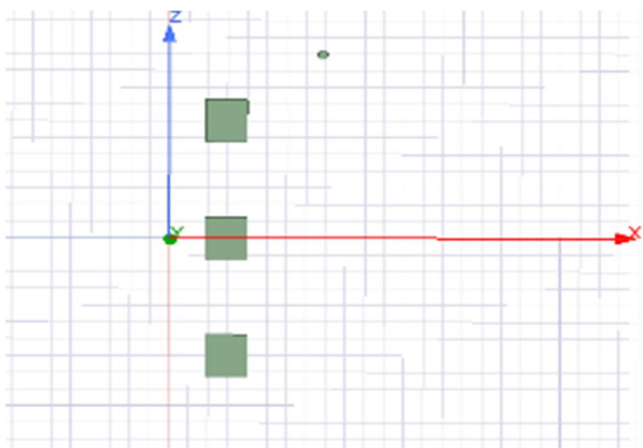
$$R_{22}(l) = R_{II} + \frac{h_{II}}{2n+1} l, \quad k^2(l, p) = \frac{4R_1 R_{22}(l)}{(R_1 + R_{22}(l))^2 + z(p)^2},$$

$$z(p) = c + \frac{b}{2m+1} p, \quad h_{II} = R_4 - R_3, \quad R_i = r_b.$$

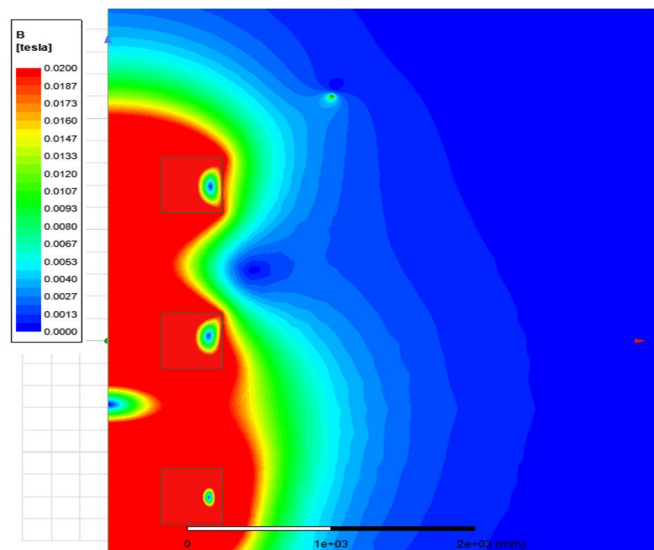
Mô hình toán của của cuộn kháng được thiết lập với hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} Z = R + i\omega L \\ U_{\text{hỗ cảm}} = i\omega(I_1 M_1 + I_2 M_2 + I_3 M_3) \\ I_{\text{vòng ngắn mạch}} = \frac{U - U_{\text{hỗ cảm}}}{Z} \end{cases} \quad (14)$$

4. ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ



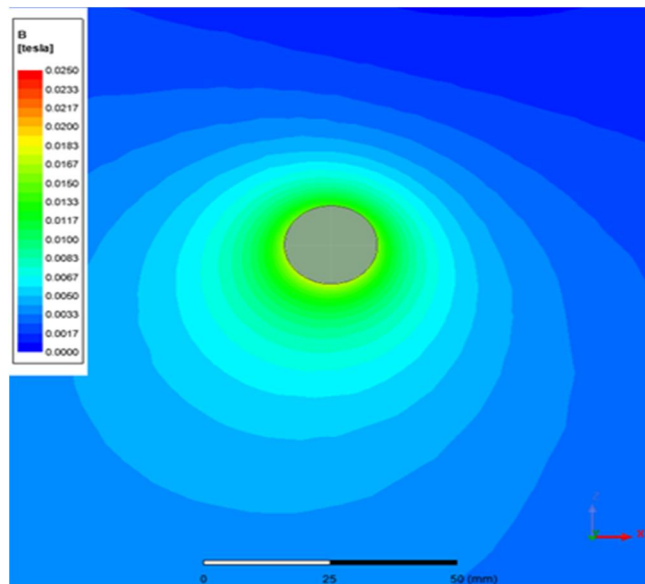
a)



b)

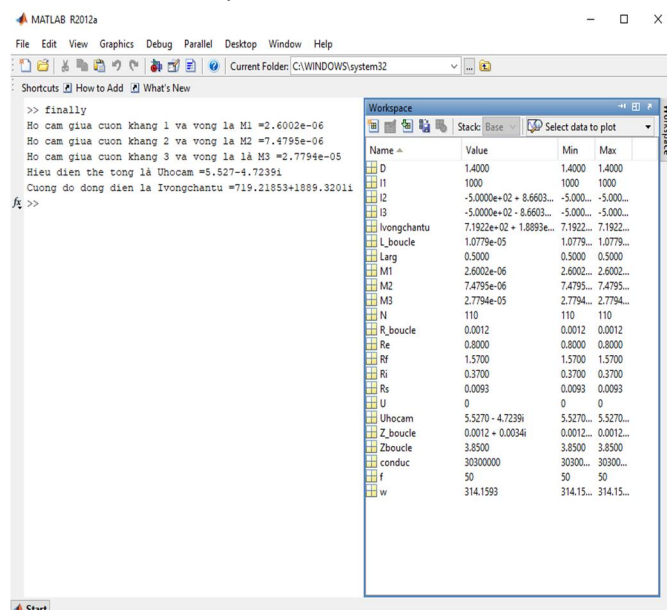
Hình 5. Mô hình cuộn dây 2D (a), và sự phân bố của từ trường bằng phương pháp FEM 2D (b)

Để giải được hệ phương trình (14), trước tiên, bài toán được kiểm tra bằng phương pháp phần tử hữu hạn mô hình 2D (hình 5a) để làm tham chiếu so sánh kết quả. Sự phân bố của từ trường do dòng điện chạy trong cuộn kháng tạo ra được biểu diễn trong hình 5b. Độ chính xác của kết quả sẽ phụ thuộc vào số lượng phần tử chia lưới trên mô hình hay còn gọi là số bậc tự do, khi số lượng phần tử càng lớn độ chính xác càng cao, nhưng đòi hỏi thời gian tính toán càng lớn. Hình 6 mô tả sự phân bố của từ trường trên mặt cắt vòng dây chẵn từ, giá trị dòng điện cảm ứng của vòng dây chẵn từ là 718,06 + j1890,66 (A).



Hình 6. Sự phân bố của từ trường trên mặt cắt vòng dây chẵn từ

Tiếp theo, bài toán được giải bằng phương pháp tích phân số PEEC, nhóm tác giả đã sử dụng ngôn ngữ Matlab để tính toán và mô phỏng kết quả. Giá trị dòng điện cảm ứng trên vòng chẵn từ đạt được bằng phương pháp PEEC (hình 7) là 719,21 + j1889,32 (A).



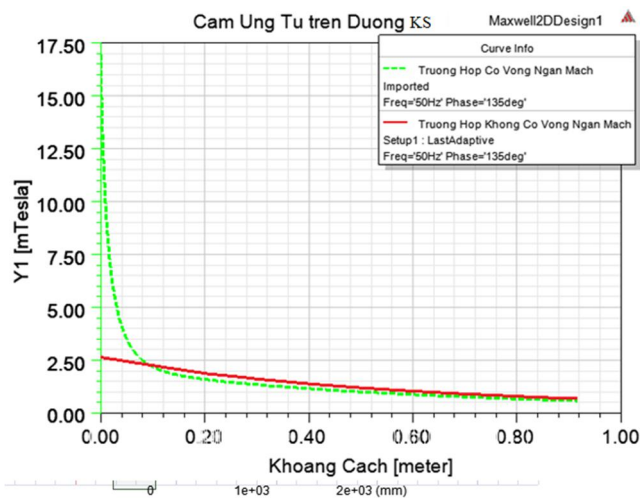
Hình 7. Kết quả áp dụng tính toán bằng phương pháp PEEC

Bảng 1. Kết quả so sánh của dòng điện cảm ứng trên vòng chắn bằng các phương pháp khác nhau

Dòng điện cảm ứng trên vòng chắn	Phương pháp FEM 2D	Phương pháp PEEC	Sai số	Thời gian tính toán (FEM 2D)	Thời gian tính toán (PEEC)
$I_{\text{vòng dây}}$	718,06 + j1890,66	719,21 + j1889,32	0,04%	2s	0,2s

Dựa vào bảng 1, có thể nhận thấy rằng, các kết quả đạt được từ phương pháp PEEC được kiểm chứng với kết quả đạt được từ phương pháp FEM với mô hình 2D. Giá trị sai số giữa hai phương pháp là nhỏ hơn 1%. Điều này chứng tỏ, giá trị đạt được từ phương pháp PEEC là đáng tin cậy.

Để khảo sát thêm, hình 8 thể hiện từ trường dọc trục cắt qua mặt phẳng có vòng ngắn mạch trong 2 trường hợp (có/không có vòng ngắn mạch) bằng phương pháp FEM với mô hình 2D. Có thể nhận thấy rằng, từ trường tập trung tại mặt phẳng có chứa vòng ngắn mạch và giảm nhanh khi khoảng cách tăng lên. Ở khoảng cách 1m xa khỏi mặt phẳng có vòng mạch, từ trường giảm về cỡ 1mT.



Hình 8. Sự phân bố của từ trường dọc trục cắt qua mặt phẳng có vòng chắn từ

5. KẾT LUẬN

Phương pháp tích phân số PEEC với “source code Matlab” đã được nhóm tác giả áp dụng thành công trong việc tính toán, mô phỏng từ trường và dòng điện cảm ứng trên vòng chắn (bảng 1). Phương pháp đã chỉ ra được ưu điểm là giảm thời gian cũng như khối lượng tính toán. Kết quả đạt được từ phương pháp sẽ cho các nhà nghiên cứu nhận biết được phạm vi ảnh hưởng của trường điện từ đối với các thiết bị xung quanh và đặc biệt là đối với cơ thể con người khi tham gia quản lý vận hành. Các kết quả cũng được so sánh với kết quả đạt được từ phần mềm thương mại dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn. Đây cũng là cơ sở để minh chứng cho hướng đi đúng đắn của nghiên cứu và tạo tiền đề cho các nghiên cứu tổng quát tiếp theo.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2018-BKA-11-CtrVL.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. B. Stoev, G. Todorov, P. Rizov, G. Pagiatakis, and L. Dritsas, 2017. *Finite element analysis of rotating electrical machines - An educational approach*. IEEE Glob. Eng. Educ. Conf. EDUCON, no. April, pp. 262–269.
- [2]. T. Le-Duc, O. Chadebec, J-M. Guichon, G. Meunier and Y. Lembeye, 2013. *Coupling between Partial Element Equivalent Circuit Method and Magnetic Moment Method*. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL), Vol. 32, No. 1, pp. 383-395.
- [3]. T. Le-Duc, G. Meunier, O. Chadebec, J-M. Guichon and L. Krähenbühl, 2013. *A Simple Integral Formulation for the Modeling of Thin Conductive Shells*. The European Physical Journal Applied Physics (EPJ-AP), Vol.62, Iss.2.
- [4]. V. S. - and G. S., 2011. *Calculation of Electromagnetic Fields in Electrical Machines using Finite Elements Method*. Int. J. Eng. Ind., vol. 2, no. 1, pp. 21–29.
- [5]. C. Hoer and C. Love, 1965. *Exact inductance equations for rectangular conductors with applications to more complicated geometries*. J. Res. Natl. Bur. Stand. Sect. C Eng. Instrum., vol. 69C, no. 2, p. 127.
- [6]. M. V. K. C. Salon, Sheppard, 1999. *Numerical Methods in Electromagnetism*.
- [7]. A. E. Ruehli, 1974. *Equivalent Circuit Models for Three-Dimensional Multiconductor Systems*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 22, no. 3, pp. 216–221.
- [8]. G. Zhong and C. K. Koh, 2002. *Exact closed form formula for partial mutual inductances of on-chip interconnects*. Proc. - IEEE Int. Conf. Comput. Des. VLSI Comput. Process., pp. 428–433.

AUTHORS INFORMATION

Pham Hong Hai, Le Duc Tung, Dang Quoc Vuong, Pham Van Binh
 School of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology