

MÔ HÌNH TOÁN TỪ TRƯỜNG TẢN TRONG CỬA SỔ MẠCH TỪ MÁY BIẾN ÁP

MATHEMATICAL MODEL OF LEAKAGE FIELD IN A TRANSFORMER WINDOW

Huỳnh Đức Hoàn

Trường Đại học Quy Nhơn; hddhoan@gmail.com

Tóm tắt - Để tính toán lực điện từ tác dụng lên dây quấn của máy biến áp (MBA) khi bị sự cố ngắn mạch, chúng ta cần quan tâm phân bố từ trường tản nằm trên cuộn dây hạ áp (HA) và cao áp (CA). Từ trường tản này là nguyên nhân sinh ra lực điện từ làm uốn cong, xô dịch, phá hủy cuộn dây. Bài báo này đã xây dựng mô hình toán tổng quát với từ thế vec-tơ **A** để tính từ trường tản trong cửa sổ mạch từ MBA. Sau đó, sử dụng phần mềm Matlab để giải mô hình toán, tính ứng suất lực hướng kính và hướng trục trên dây quấn CA và HA của MBA công suất 630 kVA - 22/0,4 kV, với dòng điện ngắn mạch cực đại. Nghiên cứu, tính toán này đã chỉ ra nguyên nhân phá hủy dây quấn MBA để từ đó nhà sản xuất đưa ra phương án thiết kế và thử nghiệm phù hợp.

Từ khóa - máy biến áp; dây quấn; ngắn mạch; từ trường tản; lực điện từ; vec-tơ từ thế.

1. Đặt vấn đề

Sự phân bố hợp lý từ trường trong máy biến áp (MBA) ảnh hưởng quyết định đến cải thiện các đặc tính của MBA như giảm tổn hao năng lượng, phân bố lực điện từ tác dụng lên dây quấn, giảm kích thước, trọng lượng và tăng độ tin cậy [1, 2].

Từ trường của MBA bao gồm từ trường chính, từ trường tản và từ trường rò. Khi MBA làm việc trong điều kiện bình thường, ta quan tâm đến phân bố từ trường trong lõi thép vì nó liên quan nhiều đến tổn hao, nhiệt độ phát nóng hay trọng lượng lõi thép của MBA và lúc này từ trường tản rất nhỏ [3]. Nhưng khi MBA bị sự cố ngắn mạch thì vấn đề quan tâm chủ yếu là lực cơ học (lúc này là từ trường tản lớn) gây nên tác dụng nguy hiểm đối với dây quấn MBA. Trong tất cả các sự cố của MBA thì sự cố về dây quấn chiếm tỉ lệ 33%. Khi đó sinh ra lực cơ khí, làm uốn cong hoặc phá hủy dây quấn và vật liệu cấu trúc khác của MBA [4, 5].

Lực điện từ này được chia làm hai thành phần: lực hướng kính (F_x) và lực hướng trục (F_y). Lực F_x có chiều vuông góc với trục dây quấn, nó sinh ra do sự tác dụng của dòng điện trong dây quấn nằm trong từ trường tản dọc trục By. Lực F_y có chiều song song với trục dây quấn, nó sinh ra do sự tác dụng của dòng điện trong dây quấn nằm trong từ trường tản ngang Bx [6, 7].

Các tác giả trong bài báo [8] đã phân tích, tính toán mật độ từ thông tản, lực dọc trục tác dụng lên dây quấn bằng phương pháp giải tích sử dụng từ thế vec-tơ. Sau đó sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) áp dụng cho MBA 3 pha 30 MVA - 63/22 kV để tìm ra phân bố lực dọc trục, trong đó có tính đến kích thước bất đối xứng và không thẳng hàng của dây quấn HA và CA.

Tính toán mật độ từ trường tản, lực điện từ hướng kính và hướng trục khi MBA làm việc bình thường và khi ngắn mạch, bằng phương pháp giải tích và sử dụng phương pháp PTHH, kết quả có được là các hình ảnh 2D của phân bố mật độ từ trường tản và lực điện từ hướng kính và hướng

Abstract - When calculating the electromagnetic force acting on the transformer winding in short circuit faults, we need to consider distribution from the field of dissipation on the low-voltage and high-voltage windings because magnetic field is the cause of the electromagnetic force to bend, move or destroy the coil. This paper has constructed a general mathematical model with the magnetic potential vector **A** to calculate the leakage field in the transformer window. Then, Matlab software is used to solve the mathematical model, calculating the maximum short circuit, the radial and axial forces on the high-voltage and low-voltage winding of transformer 630 kVA - 22/0.4 kV. This study has shown the cause of damage to the windings so that manufacturers will make appropriate planning for design and testing.

Key words - transformer; winding; short circuit; leakage field; electromagnetic force; magnetic potential vector.

trục tác dụng lên dây quấn ở giá trị hiệu dụng trung bình, đồng thời so sánh tính tương đồng của kết quả trong hai phương pháp trên [6, 7, 9].

Do vậy, để phân tích và tính toán sự phân bố mật độ từ trường tản trong vùng không gian dây quấn hay phân bố lực điện từ tác dụng lên dây quấn, cần phải xây dựng một mô hình chính xác và kể đến các điều kiện cụ thể của MBA.

Bài báo tiến hành xây dựng mô hình giải tích từ thế vec-tơ để tìm ra phân bố từ trường tản trong cửa sổ mạch từ và phân bố lực tác dụng lên dây quấn MBA bằng phương pháp giải tích. Bài báo đã tìm ra phân bố từ trường tản và lực điện từ trên mô hình MBA 3 pha có công suất 630 kVA - 22/0,4 kV trong điều kiện ngắn mạch sự cố. Nghiên cứu, tính toán này là bước đầu chỉ ra nguyên nhân phá hủy dây quấn MBA để từ đó đưa ra phương án thiết kế đặt vị trí giá nẹp trên cuộn dây và cách thức thử nghiệm một cách phù hợp.

2. Xây dựng mô hình toán với từ thế vec-tơ A

2.1. Phương trình từ thế vec-tơ A

Mọi quá trình biến đổi trường điện từ xảy ra trong máy điện nói chung và MBA nói riêng đều được mô tả bởi hệ phương trình Maxwell như sau [1, 2, 10]:

$$\begin{cases} \text{rot}\mathbf{H}=\mathbf{J}+\frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} \\ \text{rot}\mathbf{E}=-\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \\ \text{div}\mathbf{B}=0 \\ \text{div}\mathbf{D}=\rho \end{cases} \quad (1)$$

Hệ phương trình Maxwell (1) gồm hai phương trình chứa phép tính rot đối với **H**, **E**, và hai phương trình chứa phép div đối với **B**, **D**. Phương trình chứa cả phép $\partial/\partial t$ trong thời gian đối với **D**, **B**.

Khi miền nghiên cứu từ trường là trong vùng cửa sổ mạch từ có mật độ dòng điện của nguồn ngoài **J**, giả thiết rằng, MBA được đặt trong môi trường không tồn tại điện

trường, do vậy, chỉ tồn tại thành phần dòng điện chảy trong các cuộn CA và HA mà không tồn tại dòng điện dịch, hay:

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Lúc này, từ hệ phương trình Maxwell (1) được viết theo phương trình từ trường dừng ở trong cũng như ngoài vật dẫn như sau:

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3)$$

$$\text{div} \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (5)$$

Ta sử dụng từ thế vec-tơ $\mathbf{A}$

Từ phương trình (4) ta có:

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A} \text{ hay } \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (6)$$

Do đó:

$$\text{div}(\text{rot} \mathbf{A}) = 0 \quad (7)$$

Thế (5) và (6) vào (3), ta có phương trình viết cho từ thế vec-tơ có dạng phương trình Laplace-Poisson [8, 11]:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \begin{cases} -\mu \mathbf{J} & \text{trong dây dẫn} \\ 0 & \text{điện môi} \end{cases} \quad (8)$$

Hoặc:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial z^2} = -\mu \mathbf{J} \quad (9)$$

Khảo sát từ thế vec-tơ $\mathbf{A}$ trong cửa sổ MBA theo tọa độ Descartes (x,y), lúc này, từ trường và từ thế biến thiên theo phương vuông góc với mặt phẳng bị triệt tiêu:

$$\begin{cases} B_z = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Phương trình (9) viết lại như sau:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial y^2} = -\mu \mathbf{J} \quad (11)$$

Phương trình (11) là phương trình đạo hàm riêng cấp hai với biên số x, y độc lập.

Từ phương trình (6) và (10) ta suy ra:

$$\begin{cases} B_x = \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \\ B_y = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \\ B_z = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Xét một MBA và bỏ qua dòng điện từ hóa, tổng sức từ động sẽ được viết:

$$\sum_{s=1}^g W_s \cdot i_s = 0 \quad (13)$$

Trong đó: g là số dây quấn của MBA;

W_s là số vòng của dây quấn thứ s;

i_s là dòng điện của dây quấn thứ s.

Nếu ta bỏ qua cách điện mỏng ở dây quấn, khi đó, tổng mặt

cắt của cuộn dây thứ s sẽ là $a_s b_s$ và mật độ dòng (không xét hiệu ứng dòng xoáy) có độ lớn và hướng theo công thức sau:

$$\mathbf{J}_s = \pm \frac{W_s i_s}{a_s b_s} \quad (14)$$

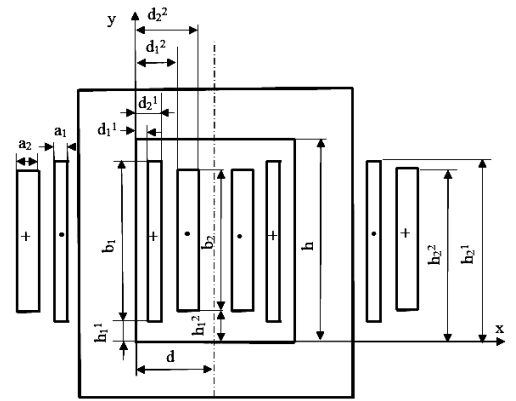
Theo công thức (13) thì:

$$\sum_{s=1}^g \mathbf{J}_s \cdot a_s b_s = 0 \quad (15)$$

2.1.1. Điều kiện biên

Độ đặc tính của vật liệu làm lõi MBA có độ từ thẩm lớn hơn rất nhiều lần so với độ từ thẩm của không khí, nên tại lớp tiếp xúc giữa hai bề mặt này, thành phần từ cảm theo phương tiếp tuyến bị triệt tiêu. Điều này được thể hiện như sau:

$$\begin{cases} B_{x(y=0,h)} = 0 \\ B_{y(x=0,d)} = 0 \end{cases} \quad (16)$$



Hình 1. Các kích thước của sổ mạch từ của MBA

Tại cửa sổ mạch từ của MBA có 2 dây quấn, thể hiện ở Hình 1. Tại trục đối xứng mà $x = d$, thành phần từ cảm B_y là:

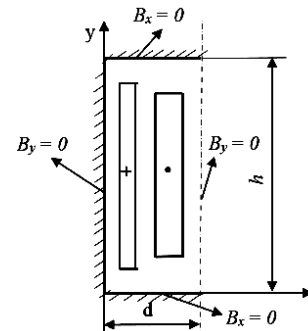
$$B_{y(x=d)} = \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right)_{x=d} = 0 \quad (17)$$

Thành phần từ cảm theo trục x, y tại các đường biên của cửa sổ mạch từ MBA: $y = 0$; $y = h$ và $x = 0$; $x = d$.

$$B_x = \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right)_{y=0} = \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right)_{y=h} = 0 \quad (18)$$

và

$$B_y = \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right)_{x=0} = \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right)_{x=d} = 0 \quad (19)$$



Hình 2. Thành phần từ cảm theo trục x, y tại các đường biên của cửa sổ mạch từ MBA

2.1.2. Tính hằng số tích phân $A_{j,k}$

Để giải phương trình (11), giả thiết **A** có nghiệm tổng quát dạng chuỗi điều hòa như sau:

$$\mathbf{A}(x, y) = \sum_j \sum_k \mathbf{A}_{j,k} \cos m_j x \cos n_k y \quad (20)$$

Để thỏa mãn ở (18) với $y = 0$ và (19) với $x = 0$ thì điều kiện cần là:

$$\sin m_j d = 0 \text{ với } m_j = (j-1) \frac{\pi}{d} \quad (21)$$

$$\sin n_k h = 0 \text{ với } n_k = (k-1) \frac{\pi}{h} \quad (22)$$

Trong đó: j và k là số nguyên từ $1 \rightarrow \infty$

Từ (20), (11) và thực hiện phép đạo hàm cấp 2, ta có được phương trình từ thế trong vùng dây quấn thứ s :

$$\sum_j \sum_k (m_j^2 + n_k^2) \mathbf{A}_{j,k} \cos m_j x \cos n_k y = \mu_0 \mathbf{J}_s \quad (23)$$

Sau đó, tích phân phương trình (23) theo vùng dây quấn của 1/2 cửa sổ mạch từ, trên trục x từ $0 \div d$, trên trục y từ $0 \div h$ ở Hình 1. Xét các trường hợp như sau:

+ Trường hợp 1: Tính cho cửa sổ mạch từ có 2 dây quấn:

$$\begin{aligned} & (m_j^2 + n_k^2) \mathbf{A}_{j,k} \int_0^d \cos^2 m_j x \, dx \int_0^h \cos^2 n_k y \, dy \\ &= \mu_0 \left(\mathbf{J}_1 \int_{d_1^l}^{d_1^h} \cos m_j x \, dx \int_{h_1^l}^{h_1^h} \cos n_k y \, dy + \mathbf{J}_2 \int_{d_2^l}^{d_2^h} \cos m_j x \, dx \int_{h_2^l}^{h_2^h} \cos n_k y \, dy \right) \end{aligned} \quad (24)$$

+ Trường 2: Tính cho cửa sổ mạch từ có g dây quấn:

$$\begin{aligned} & (m_j^2 + n_k^2) \mathbf{A}_{j,k} \int_0^d \cos^2 m_j x \, dx \int_0^h \cos^2 n_k y \, dy \\ &= \sum_{s=1}^g \mu_0 \mathbf{J}_s \int_{d_s^l}^{d_s^h} \cos m_j x \, dx \int_{h_s^l}^{h_s^h} \cos n_k y \, dy \end{aligned} \quad (25)$$

Xét hằng số tích phân $A_{j,k}$ trong hai trường hợp sau:

+ Trường hợp 1:

Với $j = 1, k \neq 1$ ta có: $m_j = 0, n_k = (k-1) \frac{\pi}{h}$, từ (25) ta

có giá trị hằng số tích phân $A_{1,k}$ là:

$$\mathbf{A}_{1,k} = \frac{2 \mu_0}{n_k^3 d \cdot h} \sum_{s=1}^g \mathbf{J}_s a_s (\sin n_k h_2^s - \sin n_k h_1^s) \quad (26)$$

+ Trường hợp 2: Tương tự, với $j \neq 1, k = 1$ ta có:

$$\mathbf{A}_{j,1} = \frac{2 \mu_0}{m_j^3 d \cdot h} \sum_{s=1}^g \mathbf{J}_s b_s (\sin m_j d_2^s - \sin m_j d_1^s) \quad (27)$$

Trường hợp tổng quát hằng số tích phân $A_{j,k}$ như sau:

$$\mathbf{A}_{j,k} = \frac{4 \mu_0}{d \cdot h} \frac{1}{m_j n_k (m_j^2 + n_k^2)} \quad (28)$$

$$\sum_{s=1}^g \mathbf{J}_s (\sin m_j d_2^s - \sin m_j d_1^s) (\sin n_k h_2^s - \sin n_k h_1^s)$$

Trường hợp khi $j = k = 1$ và $m_1 = n_1 = 0$, suy ra chuỗi dao động là hằng số.

2.1.3. Nhận xét

- Để biết sự phân bố mật độ từ thông, ta phải biết các từ

thể vec-tơ khác nhau. Hình dạng của đường sức từ được xác định bởi giá trị hằng số $A_{j,k}$ của từ thể vec-tơ.

- Sự phân bố của từ cảm tản của 2 dây quấn sẽ khác nhau khi chiều cao d và h của 2 dây quấn khác nhau.

2.2. Phương trình ứng suất lực trên dây quấn viết theo từ thể vec-tơ $A(x, y)$

Theo định luật Lorentz, công thức tính ứng suất lực được xác định như sau [1, 2]:

+ Ứng suất lực theo trục x trên một đơn vị chiều dài của dây quấn thứ s :

$$\sigma_{x,s} = \int_{d_1^l}^{d_1^h} \int_{h_1^l}^{h_1^h} \mathbf{J}_s B_y \, dx \, dy = -\mathbf{J}_s \int_{d_1^l}^{d_1^h} \int_{h_1^l}^{h_1^h} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \, dx \, dy \quad (29)$$

Tính $\frac{\partial \mathbf{A}(x, y)}{\partial x}$ theo công thức (20) ta được:

$$\sigma_{x,s} = -\mathbf{J}_s \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mathbf{A}_{j,k}}{n_k} (\sin n_k h_2^s - \sin n_k h_1^s) (\cos m_j d_2^s - \cos m_j d_1^s) \quad (30)$$

+ Tương tự, ứng suất lực theo trục y :

$$\sigma_{y,s} = \mathbf{J}_s \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mathbf{A}_{j,k}}{n_k} (\cos n_k h_2^s - \cos n_k h_1^s) (\sin m_j d_2^s - \sin m_j d_1^s) \quad (31)$$

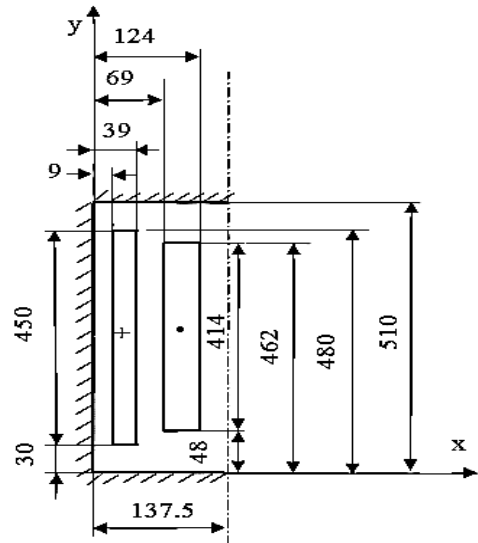
Trong đó, $A_{j,k}$ từ công thức (28)

Ta thấy rằng, công thức (30) để tính ứng suất lực theo trục x (hướng kính $\sigma_{x,s}$) trên một đơn vị chiều dài của dây quấn thứ s . Công thức (31) để tính ứng suất lực theo chiều y (hướng trục: $\sigma_{y,s}$) trên một đơn vị chiều dài của dây quấn thứ s .

3. Tính toán từ trường tản trên cuộn dây HA và CA

3.1. Kích thước máy biến áp

Sử dụng một MBA 3 pha, công suất 630 kVA - điện áp 22/0,4 kV, nối dây Δ/Y , số vòng dây cuộn HA/CA: 18/1715 và các thông số kích thước được thể hiện ở Hình 3.



Hình 3. Mô hình cụ thể kích thước mạch từ và cuộn dây MBA

3.2. Tính toán từ trường tản trên cuộn dây HA và CA

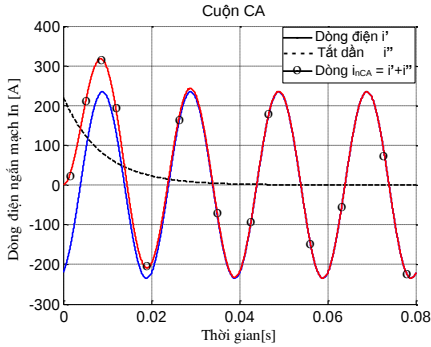
Giá trị của dòng điện quá độ được thiết lập bởi công thức (32) [3, 5, 7].

$$i = I_n \sqrt{2} \left[\sin(\omega t - \varphi_n) + \sin(\varphi_n) \cdot e^{-\frac{R_n \omega t}{X_n}} \right] \quad (32)$$

Với các thông số đã có của MBA, ta tính được dòng điện quá độ cực đại trên cuộn HA và CA như sau:

- Dòng điện ngắn mạch cuộn CA:

$$i_{nCA} = 167,5\sqrt{2} \left[\sin(100\pi t - 1,225) + \sin(1,225) \cdot e^{-\frac{15,74}{43,77} 100\pi t} \right] \quad (33)$$

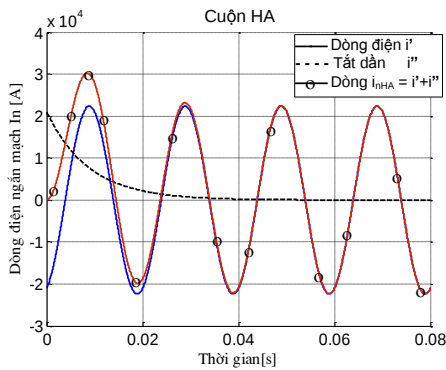


Hình 4. Dòng điện ngắn mạch trên cuộn CA

- Dòng điện ngắn mạch cuộn HA:

$$i_{nHA} = 15953\sqrt{2} \left[\sin(100\pi t - 1,225) + \sin(1,225) \cdot e^{-\frac{15,74}{43,77} 100\pi t} \right] \quad (34)$$

Kết quả Hình 4 và Hình 5 cho thấy dạng sóng của dòng điện ngắn mạch của cuộn CA và HA. Dòng điện đạt giá trị cực đại ở chu kì đầu tiên và giảm dần ở những chu kì sau cho đến khi đạt giá trị xác lập, với giá trị cực đại trên cuộn HA và CA ở Bảng 1.



Hình 5. Dòng điện ngắn mạch trên cuộn HA

Bảng 1. Bảng kết quả dòng điện ngắn mạch cực đại

Thông số	Cuộn CA	Cuộn HA
Dòng điện ngắn mạch cực đại	317,59	30 256
$I_{max} (A)$		

Từ (14) với các dữ liệu dòng điện ngắn mạch cực đại, mật độ dòng điện trên cuộn HA và CA được tính như sau:

$$J_1 = \frac{W_{i1}}{a_1 b_1} = \frac{18.30256}{30.450} \cdot 10^6 = 40,28.10^6 A / m^2 \quad (35)$$

$$J_2 = \frac{W_{i2}}{a_2 b_2} = \frac{1715.317,59}{55.414} \cdot 10^6 = 23,89.10^6 A / m^2$$

Theo (26, 27, 28), phương trình từ thế vec-tơ $\mathbf{A}$ được viết lại dưới dạng:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \mathbf{A}_{1,k} + \mathbf{A}_{j,1} + \mathbf{A}_{j,k} \\ \mathbf{A}_{1,k} = \sum_{k=1} \cos(n_k x) \frac{2 \mu_0}{n_k^3 d.h} \left[J_1 (d_1^2 - d_1^1) (\sin n_k h_1^1 - \sin n_k h_1^1) \right. \\ \left. + J_2 (d_2^2 - d_1^1) (\sin n_k h_2^2 - \sin n_k h_1^1) \right] \\ \mathbf{A}_{j,1} = \sum_{j=1} \cos(m_j x) \frac{2 \mu_0}{m_j^3 d.h} \left[J_1 (h_1^2 - h_1^1) (\sin m_j d_1^1 - \sin m_j d_1^1) \right. \\ \left. + J_2 (h_2^2 - h_1^1) (\sin m_j d_2^2 - \sin m_j d_1^1) \right] \\ \mathbf{A}_{j,k} = \sum_{k=2} \sum_{j=2} \left\{ \cos(n_k y) \cdot \cos(m_j x) \frac{4 \mu_0}{d.h m_j n_k (m_j^2 + n_k^2)} \cdot \right. \\ \left. \left[J_1 (\sin m_j d_1^1 - \sin m_j d_1^1) (\sin n_k h_2^2 - \sin n_k h_1^1) \right. \right. \\ \left. \left. + J_2 (\sin m_j d_2^2 - \sin m_j d_1^1) x (\sin n_k h_2^2 - \sin n_k h_1^1) \right] \right\} \end{cases} \quad (36)$$

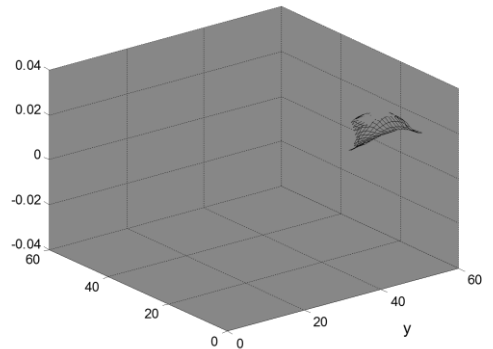
Công thức (37) được triển khai dưới dạng (38):

$$\begin{cases} B_x = - \sum_{k=1} \sin(n_k y) \frac{2 \mu_0}{n_k^3 d.h} \left[J_1 (d_1^2 - d_1^1) (\sin n_k h_1^1 - \sin n_k h_1^1) \right. \\ \left. + J_2 (d_2^2 - d_1^1) (\sin n_k h_2^2 - \sin n_k h_1^1) \right] \\ - \sum_{k=2} \sum_{j=2} \left\{ \sin(n_k y) \cdot \cos(m_j x) \frac{4 \mu_0}{d.h m_j n_k (m_j^2 + n_k^2)} \cdot \right. \\ \left. \left[J_1 (\sin m_j d_1^1 - \sin m_j d_1^1) (\sin n_k h_2^2 - \sin n_k h_1^1) \right. \right. \\ \left. \left. + J_2 (\sin m_j d_2^2 - \sin m_j d_1^1) x (\sin n_k h_2^2 - \sin n_k h_1^1) \right] \right\} \\ B_y = \sum_{j=1} \sin(m_j x) \frac{2 \mu_0}{m_j^3 d.h} \left[J_1 (h_1^2 - h_1^1) (\sin m_j d_1^1 - \sin m_j d_1^1) \right. \\ \left. + J_2 (h_2^2 - h_1^1) (\sin m_j d_2^2 - \sin m_j d_1^1) \right] \\ + \sum_{k=2} \sum_{j=2} \left\{ \cos(n_k y) \cdot \sin(m_j x) \frac{4 \mu_0}{d.h m_j n_k (m_j^2 + n_k^2)} \cdot \right. \\ \left. \left[J_1 (\sin m_j d_1^1 - \sin m_j d_1^1) (\sin n_k h_2^2 - \sin n_k h_1^1) \right. \right. \\ \left. \left. + J_2 (\sin m_j d_2^2 - \sin m_j d_1^1) x (\sin n_k h_2^2 - \sin n_k h_1^1) \right] \right\} \end{cases} \quad (38)$$

Từ biểu thức (36), với $\mathbf{A}$ là tổng của các chuỗi số $A_{1,k}$, $A_{j,1}$, $A_{j,k}$ là các chuỗi hội tụ. Khi đó, giá trị thành phần từ cảm theo hướng x và y tại cửa sổ mạch từ được viết lại như sau:

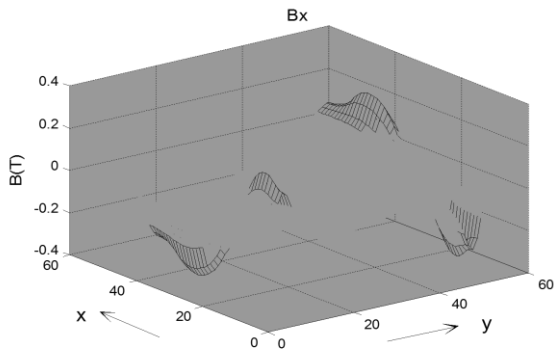
$$\begin{cases} B_x = \frac{\partial A}{\partial y} = \frac{\partial (A_{1,k} + A_{j,1} + A_{j,k})}{\partial y} \\ B_y = - \frac{\partial A}{\partial x} = - \frac{\partial (A_{1,k} + A_{j,1} + A_{j,k})}{\partial x} \end{cases} \quad (37)$$

Thay tất cả những dữ liệu có được vào biểu thức (36) và việc khai triển chuỗi với j, k tiến đến $n = 30$, thực hiện giải bằng phương pháp giải tích số với phần mềm Matlab, ta được kết quả biểu diễn dưới dạng đồ thị vec-tơ từ thế $\mathbf{A}$ như Hình 6.



Hình 6. Đồ thị vector từ thế $\mathbf{A}(x,y)$ trong cửa sổ mạch từ

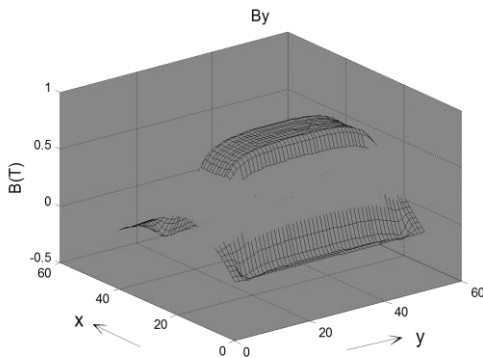
Từ kết quả của vectơ từ thế $\mathbf{A}(x, y)$ cửa sổ mạch từ, khai triển theo công thức (38), ta có được kết quả phân bố của từ cảm tản B_x và B_y trên cuộn HA và CA như Hình 7 và Hình 8.



Hình 7. Đồ thị từ cảm hướng kính B_x

Nhìn đồ thị Hình 7, ta thấy sự phân bố từ cảm hướng kính B_x theo trục y tập trung lớn ở hai đầu dây quấn có $B_{x\max} = 0,324$ T và nhỏ dần khi vào giữa dây quấn (do từ trường bị bẻ cong ở hai đầu dây quấn, và vào giữa dây quấn thì từ trường đi thẳng), còn theo trục x thì bị đối chiều, do dòng điện trong 2 dây quấn ngược chiều nhau.

Nhìn đồ thị Hình 8, ta thấy sự phân bố từ cảm hướng trục B_y theo trục y có giá trị nhỏ ở hai đầu dây quấn và lớn ở giữa dây quấn (ngược so với B_x); còn theo trục x thì tăng dần khi vào giữa hai dây quấn CA và HA, đến vùng giữa hai dây quấn thì có giá trị lớn nhất $B_{y\max} = 1,491$ T.

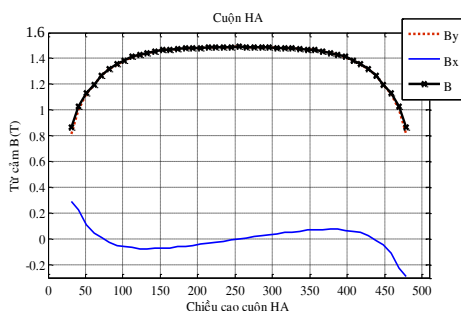


Hình 8. Đồ thị từ cảm hướng trục B_y

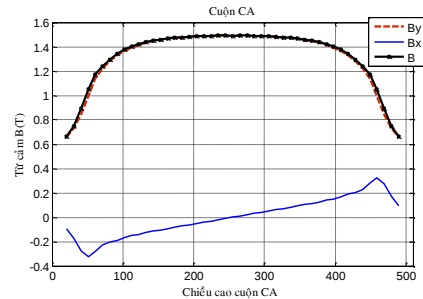
Từ cảm tại cửa sổ mạch từ được xác định bằng biểu thức:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (39)$$

Từ cảm tản này là nguyên nhân làm sinh ra lực điện từ, nên khi tính toán lực điện từ tác dụng lên dây quấn, ta chỉ quan tâm phân bố từ cảm tản trên nam trên cuộn HA và CA. Các giá trị cũng như phân bố từ cảm tản trên cạnh ngoài cùng của cuộn HA và cạnh trong cùng của cuộn CA được thể hiện ở Hình 9 và Hình 10.



Hình 9. Từ cảm tản cạnh ngoài cùng cuộn HA



Hình 10. Từ cảm tản cạnh trong cùng cuộn CA

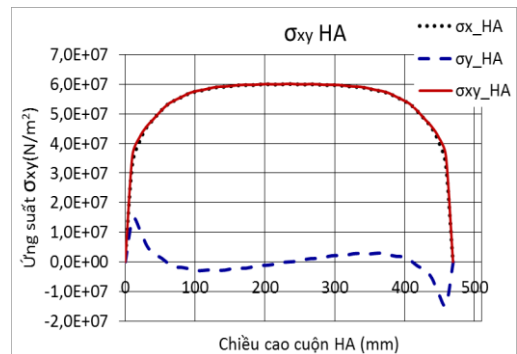
Nhìn đồ thị Hình 9, ta thấy từ cảm tản tại cạnh ngoài cùng cuộn HA: thành phần hướng trục B_y là lớn hơn nhiều lần hướng kính B_x với sự phân bố là ở giữa và có giá trị lớn nhất $B_{y\max} = 1,49$ T, và giảm dần sang hai bên. Đồng thời, từ cảm tản theo phương hướng kính B_x phân bố tập trung ở hai đầu cuộn dây, có giá trị $B_{x\max} = 0,293$ T và bằng 0 tại chính giữa cuộn dây.

Tương tự, nhìn đồ thị Hình 10, ta thấy từ cảm tản tại cạnh trong cùng cuộn CA, từ cảm B_y với sự phân bố ở giữa cuộn dây có giá trị lớn nhất $B_{y\max} = 1,491$ T; còn từ cảm tản B_x phân bố tập trung ở hai đầu cuộn dây, có giá trị lớn nhất $B_{x\max} = 0,324$ T.

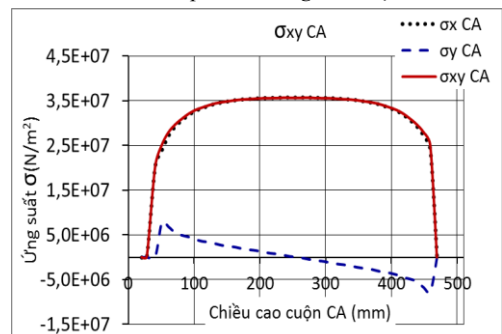
3.3. Phân bố ứng suất lực trên cuộn HA và CA

Ứng suất lực là đại lượng biểu thị nội lực phát sinh trong dây quấn dưới tác dụng của lực điện từ. Công thức tính ứng suất: $\sigma = F/A$ (N/m^2); với F là lực (N) và A là diện tích bề mặt (m^2) [5]. Để kiểm tra độ bền của dây quấn trong điều kiện ngắn mạch nguy hiểm, ta cần tính ứng suất trên dây quấn sau đó so sánh với ứng suất cho phép của dây quấn.

Kết quả phân bố ứng suất trên cuộn HA và CA được thể hiện trên các Hình 11, 12 sau đây:



Hình 11. Đồ thị phân bố ứng suất σ_{xy} cuộn HA



Hình 12. Đồ thị phân bố ứng suất σ_{xy} cuộn CA

Nhìn Hình 11 và Hình 12 cho thấy, vị trí có giá trị ứng

suất tổng lớn nhất nằm ở giữa cuộn dây (theo chiều cao y) và bằng giá trị ứng suất lực hướng kính, vì tại vị trí này ứng suất lực hướng trục bằng 0.

Các giá trị ứng suất tổng lớn nhất $\sigma_{xy\max}$ tại vị trí giữa cuộn HA và cuộn CA được thể hiện ở Bảng 2.

Ở Bảng 2, ta thấy ứng suất kéo lớn nhất là $\sigma_{xy\max} = 6,0138.10^7 \text{ N/m}^2$, so với ứng suất cho phép của dây đồng $\sigma_{tbcp} = (5 \div 10).10^7 \text{ N/m}^2$ [5]. Do đó, khi xảy ra ngắn mạch với dòng điện cực đại thì ứng suất lớn nhất của dây quấn chưa vượt quá giới hạn cho phép.

Bảng 2. Ứng suất lực tổng $\sigma_{x\max}$ trên cuộn HA và CA

Ứng suất lực tổng $\sigma_{\max} [\text{N/m}^2]$	Cuộn HA	Cuộn CA
Hướng kính $\sigma_{x\max}$	$6,0138.10^7$	$3,567.10^7$
Hướng trục $\sigma_{y\max}$	$1,889.10^7$	$1,124.10^7$
Tổng $\sigma_{xy\max}$	$6,0138.10^7$	$3,567.10^7$
Cho phép σ_{cp}	$(5 \div 10).10^7$	
So sánh $\sigma_{xyz\max}$ với σ_{tbcp}	$5.10^7 < 6,0138.10^7 < 10.10^7$	

4. Kết luận

Bài báo đã xây dựng mô hình toán của từ trường tản trong cửa sổ mạch từ với từ thể vec-tơ **A**, để tính toán ứng suất lực tác dụng lên dây quấn MBA. Phương trình từ thể vec-tơ **A** được viết có dạng phương trình Laplace-Poisson; trong đó, hằng số tích phân $A_{j,k}$ là nghiệm của phương trình từ thể vec-tơ **A**. Phương trình từ thể vec-tơ **A** được viết cho trường hợp tổng quát, MBA có số dây quấn là: 1, 2, 3, ..., s ; các dây quấn này có tỉ lệ chiều cao bằng nhau và không bằng nhau.

Bài báo đã sử dụng một MBA 630 kVA - 22/0,4 kVA làm điển hình tính toán, tác giả viết chương trình thông qua phần mềm Matlab tính toán phân bố vec-tơ từ thể **A**(x, y) và từ cảm B_x, B_y và từ cảm tổng B_{xy} trên cuộn dây CA và HA.

Kết quả cho thấy, sự phân bố từ cảm hướng kính B_x theo trục y tập trung lớn ở hai đầu dây quấn có $B_{x\max} = 0,324 \text{ T}$ và nhỏ dần khi vào giữa dây quấn. Từ cảm hướng trục B_y theo trục x thì tăng dần khi vào giữa hai dây quấn CA và HA, đến vùng giữa hai dây quấn thì có giá trị lớn nhất $B_{y\max} = 1,491 \text{ T}$.

+ *Về từ cảm tản* (hướng trục y ; hướng kính x) tại cạnh ngoài cùng cuộn HA có giá trị lớn nhất $B_{y\max} = 1,49 \text{ T}$ và $B_{x\max} = 0,293 \text{ T}$. Từ cảm tản tại cạnh trong cùng cuộn CA có giá trị lớn nhất $B_{y\max} = 1,491 \text{ T}$ và $B_{x\max} = 0,324 \text{ T}$.

+ *Về ứng suất lực*: Ứng suất lực hướng kính σ_x và hướng trục σ_y theo bề dày cuộn HA và CA thì tập trung lớn nhất tại khu vực cạnh ngoài của cuộn HA và cạnh trong của

cuộn CA. Ứng suất tổng trên cuộn HA $\sigma_{xy\max_HA} = 6,0138.10^7 \text{ N/m}^2$; và cuộn CA $\sigma_{xy\max_CA} = 3,567.10^7 \text{ N/m}^2$. Kết quả giá trị ứng suất tổng $\sigma_{xy\max} = 6,0138.10^7 \text{ N/m}^2$ chưa vượt quá giới hạn bền cho phép của dây quấn.

Việc tìm ra một mô hình, chương trình cụ thể để tính toán nhanh từ trường tản trong vùng không gian dây quấn cũng như xác định vị trí lực tác dụng lên dây quấn trong trường hợp ngắn mạch là rất cần thiết trong thiết kế, sản xuất, thử nghiệm và vận hành MBA. Từ đó, xác định vị trí nào nguy hiểm nhất trên dây quấn và đưa ra khuyến cáo kỹ thuật phù hợp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hyun-mo Ahn, Yeon-ho Oh, Joong-kyoung Kim, Jae-sung Song, Sung-chin Hahn, "Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force for Dry-Type Transformer", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 2, 2012, pp. 819–822.
- [2] Zhang Haijun, Bin Yang, Weijie Xu, Shuhong Wang, Guolin Wang, Youpeng Huangfu, Jingyin Zhang, "Dynamic Deformation Analysis of Power Transformer Windings in Short Circuit Fault by FEM", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 24, Issue. 3, 2014, pp. 3–6.
- [3] Marcel Dekker, *Transformer Engineering - Design and Practice - Chapter 6: Short Circuit Stresses and Strength*, No., 2000, pp. 231–275.
- [4] Hajiaghahi Salman, Karim Abbaszadeh, "Analysis of Electromagnetic Forces in Distribution Transformers Under Various Internal Short-Circuit Faults", *CIRET Regional - Iran, Tehran*, Vol. 13–14, 2013, pp. 1–9.
- [5] Phạm Văn Bình, Lê Văn Doanh, *Máy biến áp – Lý thuyết – Vận hành – Bảo dưỡng – Thử nghiệm*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, L.2, 2011, trang. 1–619.
- [6] Azevedo A. C. De, A. C. Delaiba, J. C. De Oliveira, B. C. Carvalho, H. De S. Bronzeado, *Transformer mechanical stress caused by external short-circuit: A time domain approach*, Presented at the International Conference on Power Systems Transients (IPST'07), in Lyon, France, June 4–7, 2007, pp. 1–6.
- [7] Ahn Hyun-mo, Ji-yeon Lee, Joong-kyoung Kim, Yeon-ho Oh, Sang-yong Jung, "Finite-Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer", Vol. 47, No. 3, 2011, pp. 1267–1272.
- [8] Allahbakhshi M., K. Abbaszadeh, A. Akbari, *Effect of asymmetrical dimensions in short circuit forces of power transformers*, IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol. 3, No. 1, 2005, pp. 1746–1749.
- [9] Feyzi M. Reza, M. Sabahi, "Finite Element Analyses of Short Circuit Forces in Power Transformers with Asymmetric Conditions", No. 1, 2008, pp. 576–581.
- [10] Gerard Meunier, *The Finite Element Methods for Electromagnetic Modeling*, in John Wiley, London, 2008, pp. 618.
- [11] Quan Yu-sheng, Jiang Shan, *Mechanical forces and magnetic field simulation of transformer with finite element method*, 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2011, pp. 1390–1393.

(BBT nhận bài: 29/9/2017, hoàn tất thủ tục phân biên: 30/10/2017)