

NGHIÊN CỨU SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA TỪ GIẢO ĐẾN ĐỘ BIẾN DẠNG TRONG LỖI THÉP MÁY BIẾN ÁP VÔ ĐỊNH HÌNH

A STUDY OF THE EFFECT OF MAGNETOSTRICTION ON THE DEFORMATION OF THE STEEL CORE IN AMORPHOUS TRANSFORMERS

Đỗ Chí Phi², Đoàn Thanh Bảo³, Phùng Anh Tuấn¹, Lê Văn Doanh¹

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

²Trường Cao đẳng Kỹ thuật Cao Thắng; dochiphi@gmail.com

³Trường Đại học Quy Nhơn; dtbao@fit.edu.vn

Tóm tắt - Bài báo đã xây dựng mô hình toán tổng quát tính lực từ và lực từ giảo dựa trên tenxơ ứng suất, tenxơ biến dạng, tenxơ suất từ trở và hàm mật độ năng lượng, thông qua mô hình toán khảo sát mối liên hệ cơ từ trong lõi thép vô định hình (VĐH) của máy biến áp (MBA) do hiện tượng từ giảo gây ra bằng phương pháp lặp Newton-Raphson. Những khảo sát cụ thể sự biến dạng và chuyển vị trong lõi thép VĐH của MBA ba pha bằng phần mềm ANSYS Maxwell cũng được thực hiện, qua đó xác định được những vị trí chịu biến dạng và chuyển vị lớn nhất trên lõi thép. Kết quả trên làm nền tảng cho nghiên cứu về sự rung ồn của lõi thép MBA VĐH. Đây là vấn đề kinh tế và kỹ thuật mà các nhà thiết kế, vận hành MBA rất quan tâm.

Từ khóa - máy biến áp; vô định hình; lực từ; lực từ giảo; biến dạng từ giảo.

1. Đặt vấn đề

Thép vô định hình được sử dụng sản xuất biến áp ngày càng rộng rãi do đặc tính từ tốt hơn hẳn thép silic định hướng tinh thể cán nguội. Do vật liệu là những dải băng mỏng, có độ dày từ 0.02mm đến 0.03mm, nên rất nhạy cảm với sự biến dạng bởi từ trường ngoài. Lực từ giảo mãnh liệt có thể phá vỡ các kết cấu cơ khí của lõi thép trong máy biến áp. Do vậy, việc nghiên cứu hiện tượng từ giảo gây ra biến dạng trong lõi thép vô định hình của máy biến áp cần được nghiên cứu chuyên sâu.

Những năm gần đây, vấn đề từ giảo được quan tâm nghiên cứu. Các tác giả [1], [2], [3] đưa ra phương pháp tính lực từ giảo dựa trên ma trận độ cứng, nhưng chưa đề xuất mô hình tính toán cụ thể, các tác giả [4], [5] đã xây dựng mô hình toán tính lực từ và lực từ giảo để khảo sát sự biến dạng trong lõi thép stato của động cơ do hiệu ứng từ giảo gây ra. Gần đây nhất, các tác giả [6], [7] đã xây dựng mô hình tính lực từ và lực từ giảo dựa trên suất từ trở và biến dạng từ giảo theo cảm ứng từ B, nhưng khảo sát chủ yếu trên lõi cuộn kháng với vật liệu là thép silic, tập trung chủ yếu vào biến dạng do ứng suất ngoài. Để giải quyết các vấn đề nêu trên, nhóm tác giả đã xây dựng được một mô hình toán tổng quát, thông qua mô hình toán khảo lực cơ từ, độ biến dạng và chuyển vị trong lõi thép VĐH do từ giảo gây ra. Bên cạnh đó, phần mềm ANSYS Maxwell có ưu điểm là đã chỉ ra được vị trí chịu biến dạng và chuyển vị lớn nhất trong lõi thép nhằm khuyến cáo các nhà sản xuất cần quan tâm đến kết cấu và hình dạng của lõi thép khi chế tạo MBA lõi thép VĐH.

Abstract - This paper constructs a general mathematical model to calculate magnetic force and magnetostrictive force based on the stress tensor, the magnetostriction strain tensor, and the magnetostriction reluctivity tensor and energy density function. Based on mathematical models, the paper investigates the magnetomechanical coupling in amorphous steel cores of the transformer caused by the magnetostrictive phenomenon by Newton-Raphson iterative method. The specific investigations into the deformation of amorphous steel core of three phase transformers by ANSYS Maxwell software are carried out. The positions where the largest deformation and displacement are located on the steel core are pointed out. The results are fundamental for the studies of vibration of amorphous steel core transformers and the generated noises. These economic and technical issues have attracted the attention of transformer designers and operators.

Key words - transformer; amorphous; magnetic force; Magnetostrictive force; Magnetostriction deformation

2. Nội dung

2.1. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng

Theo định luật Hook tổng quát, quan hệ giữa ứng suất và biến dạng viết dưới dạng ma trận như sau [2]:

$$[\sigma] = [C][\varepsilon] \quad (1)$$

$[\sigma]$: Tenxơ ứng suất (N/m²) như hình 1;

$[\varepsilon]$: Tenxơ biến dạng;

$[C]$: Ma trận độ cứng (N/m²);

E: Mô đun đàn hồi Young (N/m²);

ν : Tỷ số Poisson không thứ nguyên;

τ_{ij} : Ứng suất trượt, γ_{ij} : Biến dạng trượt.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}; [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (2)$$

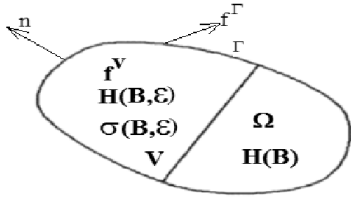
$$[C] = \begin{bmatrix} \lambda_L + 2G & \lambda_L & \lambda_L & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_L & \lambda_L + 2G & \lambda_L & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_L & \lambda_L & \lambda_L + 2G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trong đó:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ là mô đun đàn hồi trượt;}$$

$$\lambda_L = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \text{ là hằng số Lamé.}$$

2.2. Tính toán suất từ trở [3]



Hình 1. Miền khảo sát

Xét mẫu vật liệu như Hình 1;

Trong đó:

f_v : Mật độ lực thể tích (N/m³)

B : Cảm ứng từ (T);

H : Lực kháng từ (A/m);

f_r : Mật độ lực diện tích (N/m²).

Điều kiện biên:

Điều kiện biên từ trường:

$$\begin{cases} B \cdot n = 0 \\ H \times n = 0 \end{cases} \quad \text{Trên miền } \Gamma_B, \Gamma_H$$

Điều kiện biên đàn hồi:

$$\begin{cases} \sigma \cdot n = f^r \\ u = 0 \end{cases} \quad \text{Trên miền } \Gamma_\sigma, \Gamma_u$$

Trong đó:

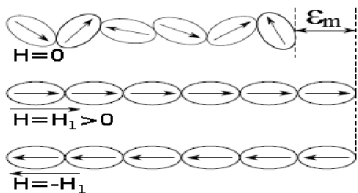
$$\begin{cases} \partial\Omega = \Gamma_B \cup \Gamma_H \\ \partial V = \Gamma_\sigma \cup \Gamma_u \end{cases} \quad (3)$$

Tenxơ biến dạng tổng khi xét đến biến dạng do từ trường ngoài gây ra (Hình 2) sẽ là:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_m \quad (4)$$

ε_e : Tenxơ biến dạng đàn hồi;

ε_m : Tenxơ biến dạng từ giảo.



Hình 2. Mô tả biến dạng từ giảo dưới tác dụng của từ trường ngoài [2]

Ứng suất khi có sự biến dạng dưới tác dụng của từ trường ngoài như sau:

$$[\sigma(B, \varepsilon)] = [c](\varepsilon_e + \varepsilon_m(B)) = [c][\varepsilon(B, \varepsilon)] \quad (5)$$

Tenxơ biến dạng từ giảo được cho bởi công thức [6]:

$$\varepsilon_m(B) = \lambda S \quad (6)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2B^2} (3B_i B_j - \delta_{ij} B^2) \quad (7)$$

Trong đó, $\lambda = \lambda(B, \sigma)$ là thông số của từ giảo, S là tenxơ hướng từ giảo, δ_{ij} là hàm Delta Kronecker.

Trong phạm vi bài báo không xét đến ứng suất ngoài, nên $\lambda = \lambda(B)$.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases} \quad (8)$$

Khai triển phương trình (8) ta được tenxơ S như sau:

$$[S] = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} (\frac{B_{xx}^2}{B^2} - \frac{1}{3}) & \frac{B_x B_y}{B^2} & \frac{B_x B_z}{B^2} \\ \frac{B_y B_x}{B^2} & (\frac{B_{yy}^2}{B^2} - \frac{1}{3}) & \frac{B_y B_z}{B^2} \\ \frac{B_z B_x}{B^2} & \frac{B_z B_y}{B^2} & (\frac{B_{zz}^2}{B^2} - \frac{1}{3}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Hàm λ được cho bởi công thức [7], [8]:

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_s \left(\frac{M}{M_s} \right)^2 \quad (10)$$

Trong đó:

M : Độ từ hóa (A/m);

M_s : Độ từ hóa bão hòa (A/m);

λ_s : Hệ số từ giảo bão hòa (μm/m).

Hàm mật độ năng lượng khi có từ trường ngoài như sau:

$$w(B, \varepsilon) = \int_0^B H(B, \varepsilon) dB + \int_0^\varepsilon \sigma(B, \varepsilon) d\varepsilon \quad (11)$$

Nếu xét biến dạng cơ học không phụ thuộc vào từ trường thì phương trình (12) sẽ là:

$$w(B, \varepsilon) = \int_0^B H(B, \varepsilon) dB + \int_0^\varepsilon \sigma(0, \varepsilon) d\varepsilon \quad (12)$$

Khi xét đến sự tham gia của từ trường gây ra biến dạng trong vật liệu thì hàm mật độ năng lượng sẽ là:

$$w(B, \varepsilon) = \int_0^B H(B, 0) dB + \int_0^\varepsilon \sigma(B, \varepsilon) d\varepsilon \quad (13)$$

$$H(B, \varepsilon) = \frac{\partial w(B, \varepsilon)}{\partial B} = \frac{\partial}{\partial B} \int_0^B H(B, 0) dB + \frac{\partial}{\partial B} \left(\frac{1}{2} [c] \varepsilon^2 (B, \varepsilon) \right) \quad (15)$$

Cuối cùng ta có:

$$H(B, \varepsilon) = H(B, 0) + \frac{\partial}{\partial B} \left(\frac{1}{2} [c] \varepsilon^2 \right) \quad (14)$$

Mặc khác:

$$H(B, \varepsilon) = v(B, \varepsilon) B \quad (15)$$

Ta giả sử rằng:

$$v(B, \varepsilon) = v(B, 0) + v_m(B, \varepsilon) \quad (16)$$

Trong đó:

$v(B, \varepsilon)$: Tenxơ suất từ trở tổng;

$v_0 = v(B, 0)$: Tenxơ suất từ trở khi không có ứng suất;

$v_m = v_m(B, \varepsilon)$: Tenxơ suất từ trở từ giảo (thay đổi do ứng suất hoặc biến dạng cơ học dưới tác dụng của từ trường ngoài).

Trong đó:

$$v_m = \frac{1}{B} \sigma S \left(\frac{\partial \lambda}{\partial B} \right) + \frac{1}{B} \lambda \sigma \frac{\partial S}{\partial B} \quad (17)$$

Tenxơ suất từ trở tổng viết dưới dạng ma trận như sau:

$$[v(B, \varepsilon)] = [v_0] + [v_m] = \begin{bmatrix} v_{xx} & v_{xy} & v_{xz} \\ v_{yx} & v_{yy} & v_{yz} \\ v_{zx} & v_{zy} & v_{zz} \end{bmatrix} \quad (18)$$

2.3. Mô hình tính toán lực từ và lực từ giao

Năng lượng tổng khi xét trên toàn bộ miền nghiên cứu là:

$$\begin{aligned} \prod(B, \varepsilon) = & \iint_{\Omega} H(B, \varepsilon) dB d\Omega + \int_V \int_0^\varepsilon \sigma(0, \varepsilon) d\varepsilon dV \\ & - \int_{\Omega} J A d\Omega - \int_V u^T f^V dV - \int_{\Gamma} u^T f^T d\Gamma \end{aligned} \quad (19)$$

Trong đó:

J: Mật độ dòng điện;

A: Từ thế vectơ.

$$\begin{cases} B = \nabla \times A \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \cdot A = 0 \end{cases} \quad (20)$$

Theo định luật Ampere ta có:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J \\ \nabla \times v(B, \varepsilon) \nabla \times A = J \end{cases} \quad (21)$$

$$\nabla \times v(B, \varepsilon) \nabla \times A =$$

$$\nabla \times \begin{bmatrix} v_{xx} \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} - \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + v_{xy} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + v_{xz} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \\ v_{yx} \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} - \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + v_{yy} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + v_{yz} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \\ v_{zx} \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} - \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + v_{zy} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + v_{zz} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$J_x = \frac{\partial}{\partial y} \left[v_{zx} \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} - \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + v_{zy} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + v_{zz} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[v_{yx} \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} - \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + v_{yy} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + v_{yz} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right] \quad (24)$$

$$J_y = \frac{\partial}{\partial z} \left[v_{xx} \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} - \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + v_{xy} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + v_{xz} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[v_{zx} \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} - \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + v_{zy} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + v_{zz} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right] \quad (25)$$

$$J_z = \frac{\partial}{\partial x} \left[v_{yx} \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} - \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + v_{yy} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + v_{yz} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[v_{xx} \left(\frac{\partial A_y}{\partial y} - \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + v_{xy} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + v_{xz} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \right] \quad (26)$$

Từ phương trình (23)-(28) viết lại dưới dạng ma trận như sau:

$$[S] \cdot [A] = [J] \quad (27)$$

Trong đó: [S]: là ma trận độ cứng từ.

Từ phương trình (21), năng lượng cơ từ được viết lại như sau:

$$\prod(B, \varepsilon) = \iint_{\Omega} H(B, \varepsilon) dB d\Omega \quad (28)$$

$$F_{ma-ms} = - \frac{\partial \Pi(B, \varepsilon)}{\partial u} = - \frac{\partial}{\partial u} \iint_{\Omega} H(B, \varepsilon) dB d\Omega \quad (29)$$

$$\begin{aligned} F_{ma-ms} = & - \frac{\partial \Pi(B, \varepsilon)}{\partial u} \\ = & - \underbrace{\left(\int_{R_e} H^T(B, \varepsilon) \frac{\partial B}{\partial u} \right) |J_{CB}| dR - \int_{R_e} \left(\int_0^B H^T(B, \varepsilon) dB \right) \frac{\partial |J_{CB}|}{\partial u} dR}_{F_{ma}} \\ & - \underbrace{\left(\int_{R_e} \left(\int_0^B \frac{\partial H^T(B, \varepsilon)}{\partial \sigma} dB \right) \frac{\partial \sigma}{\partial u} \right) |J_{CB}| dR}_{F_{ms}} \end{aligned} \quad (30)$$

Phương trình (33) dùng để giải bài toán 2D:

$$dR = d\zeta d\eta \quad (31)$$

Để giải bài toán 3D ta có phương trình sau:

$$dR = d\zeta d\eta d\zeta \quad (32)$$

$$\begin{aligned} F_{ma-ms} = & - \frac{\partial \Pi(B, \varepsilon)}{\partial u} \\ = & - \underbrace{\int_{R_e} \left(B \frac{\partial H}{\partial u} \right) |J_{CB}| dR - \int_{R_e} \left(\int_0^H B dH \right) \frac{\partial |J_{CB}|}{\partial u} dR}_{F_{ma}} \end{aligned} \quad (33)$$

$$- \underbrace{\int_{R_e} \left(\int_0^H \frac{\partial B}{\partial \sigma} dH \right) \frac{\partial \sigma}{\partial u} |J_{CB}| dR}_{F_{ms}}$$

Như vậy:

$$F_{ma-ms} = F_{ma} + F_{ms} \quad (34)$$

Khi đó từ (29) và (36) ta có hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} [S][A] = [J] \\ [K][u] = [F_{ma-ms}] \end{cases} \quad (35)$$

$|J_{CB}|$: Định thức ma trận Jacobian;

[K]: Ma trận độ cứng cơ;

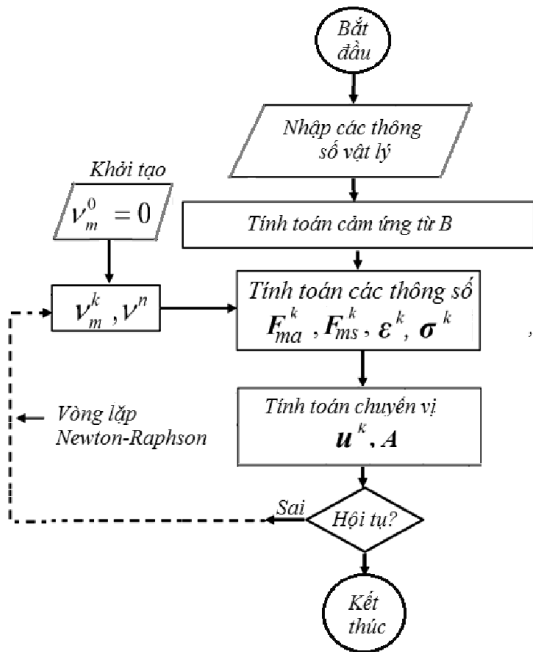
[u]: Ma trận chuyển vị.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (36)$$

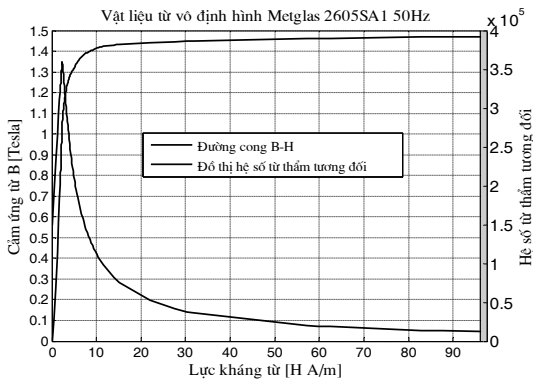
Giải hệ phương trình (37) bằng phương pháp lặp Newton-Raphson sẽ cho ta kết quả của chuyển vị, và từ thế vector A.

3. Kết quả tính toán và mô phỏng

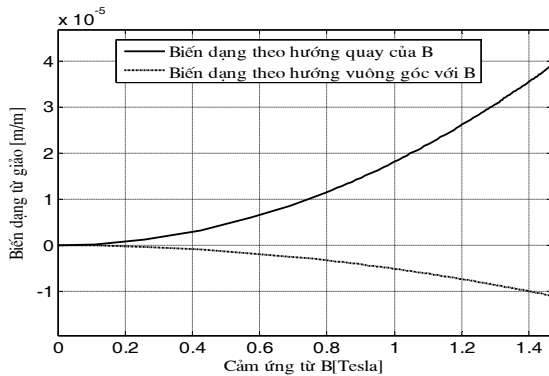
3.1. Kết quả tính toán



Hình 3. Lưu đồ giải thuật tính toán theo phương pháp lặp Newton - Raphson



Hình 4. Đường cong từ hóa và hệ số từ thẩm tương đối của vật liệu vô định hình mã hiệu 2605 SA1 50Hz, Hitachi Metals, USA dùng cho lõi máy biến áp



Hình 5. Đồ thị biến dạng của vật liệu theo cảm ứng từ B [T]

Mật độ dòng $J=2,5A/mm^2$; Lực kháng từ $H[A/m]$ và cảm ứng từ $B [Tesla]$ được cho trên Hình 4; Mô đun đàn hồi Young của vật liệu $E=120[GPa]$; Tỉ số Poisson $\nu=0,28$; $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}[T.m/A]$; $\lambda_s=27[\mu m/m]$.

Trên Hình 5 ta thấy biến dạng từ giao theo hướng quay và hướng vuông góc với cảm ứng từ B quan hệ với

nhau theo công thức sau:

$$\varepsilon_{yy} = -\nu \varepsilon_{xx} \quad (37)$$

ε_{xx} : Biến dạng theo hướng quay của B [T]

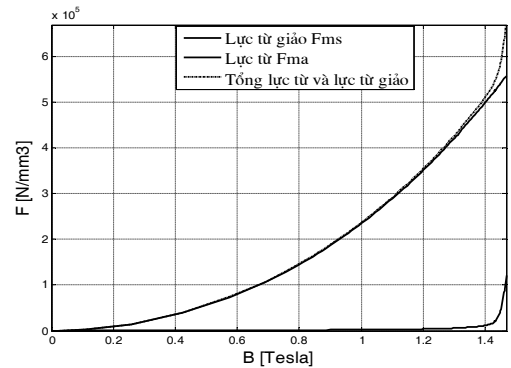
ε_{yy} : Biến dạng theo hướng vuông góc với B [T]

Khi $B=1,1T$ thì: $\varepsilon_{xx}=23\mu m/m$; $\varepsilon_{yy}=-0,28 \times 23=-6,44\mu m/m$.

Bảng 1. So sánh biến dạng lõi thép vô định hình và lõi thép tôn silic theo B [T] dùng để tính toán thiết kế máy biến áp [9]

Vật liệu	Cảm ứng từ [Tesla]	Biến dạng [$\mu m/m$]
Thép vô định hình	1,1	23
Thép silic định hướng	1,6	17

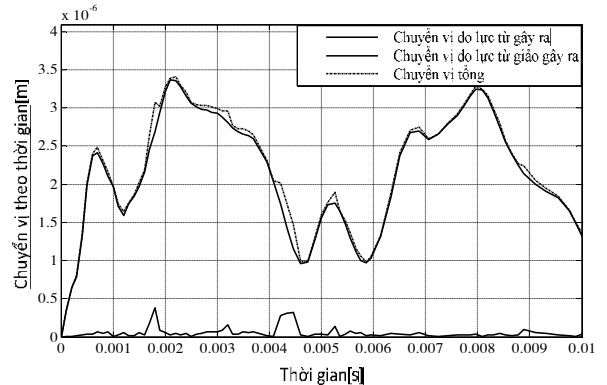
Như vậy, độ biến dạng của thép vô định hình cao hơn thép silic định hướng cân nguội khoảng $6\mu m/m$.



Hình 6. Lực từ và lực từ giao theo cảm ứng từ B [Tesla]

Trên Hình 6 ta thấy với $B = 1,2[T]$ lực khối từ $F_{ma} = 3763 [N/m^3]$ rất nhỏ, lực khối từ giao $F_{ms} = 352 \times 10^3 [N/m^3]$ lớn hơn rất nhiều lần. Nguyên nhân lực khối từ trường nhỏ là do lõi thép vô định hình có vòng từ trễ hẹp, lực kháng từ $H < 2.5A/m$, hệ số từ thẩm tương đối rất lớn khoảng 350000 (Hình 4), dẫn đến mật độ năng lượng dự trữ nhỏ, dẫn đến lực khối từ trong lõi thép rất nhỏ.

Trên Hình 7 cho thấy chuyển vị lớn nhất khoảng $3,41\mu m$, chủ yếu do hiệu ứng từ giao gây ra, thành phần lực từ gây nên chuyển vị trong lõi thép rất nhỏ khoảng $0,376\mu m$.

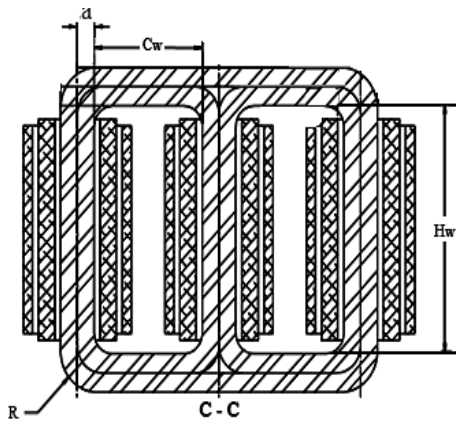


Hình 7. Chuyển vị u [m] theo thời gian t [s], khảo sát tại giữa lõi vật liệu

3.2. Kết quả mô phỏng trên phần mềm ANSYS Maxwell

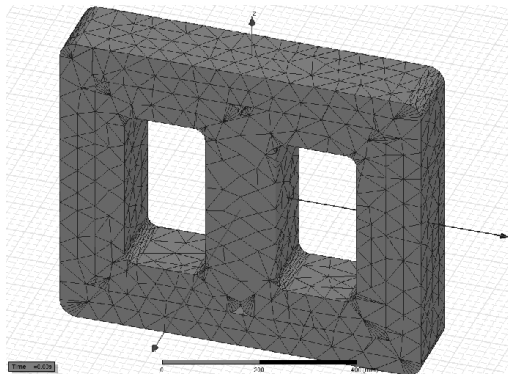
Bảng 2. Kích thước lõi biến áp

Kích thước lõi [mm]	a [mm]	C _w [mm]	H _w [mm]	d [mm]
	22	63	176,3	142

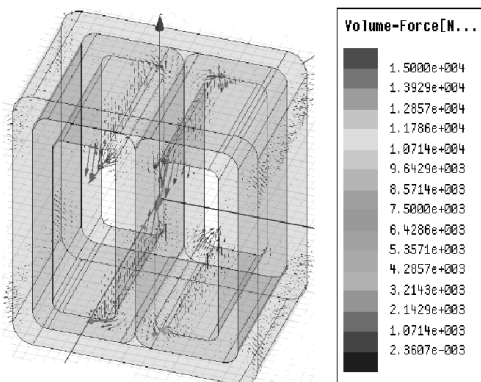


Hình 8. Lối máy biến áp dùng để mô phỏng

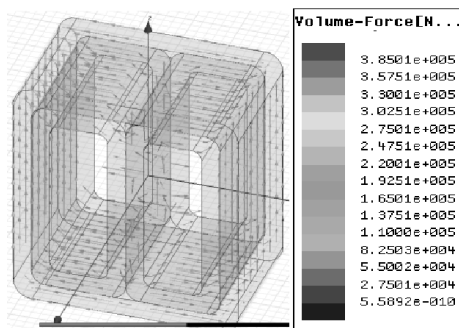
d: Chiều rộng lá thép [mm], chiều dày lá thép 0,023mm.



Hình 9. Chia lưới lõi máy biến áp để mô phỏng trên phần mềm ANSYS Maxwell

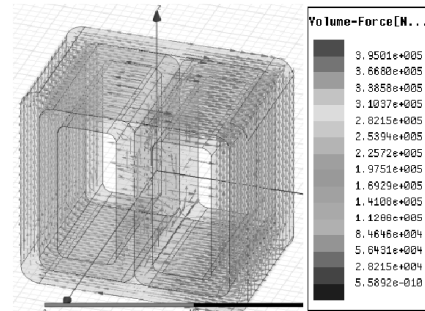


Hình 10. Thành phần lực từ trong lõi máy biến áp mô phỏng trên phần mềm ANSYS Maxwell

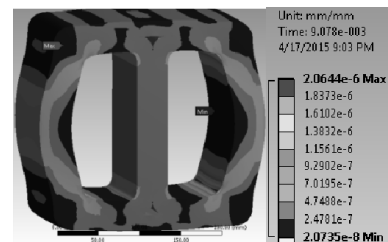


Hình 11. Thành phần lực từ giữa trong lõi máy biến áp mô phỏng trên phần mềm ANSYS Maxwell

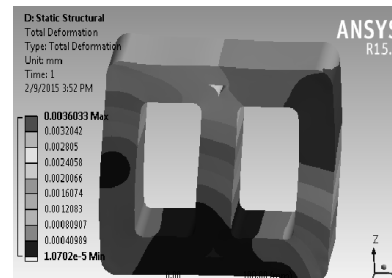
Hình 10 ta thấy vector lực từ chỉ xuất hiện tại các góc của lõi thép với mật độ lực thưa, không đáng kể, giá trị lớn nhất khoảng $0,15 \times 10^5$ [N/m³]. Hình 11 cho thấy vector lực từ giữa tại các trụ từ, gông từ và các góc của lõi thép có mật độ dày hơn, giá trị lớn nhất khoảng $3,85 \times 10^5$ [N/m³], gấp 25,6 lần lực từ. Độ lớn tổng lực khối trong lõi chủ yếu do lực khối từ giữa Hình 12.



Hình 12. Tổng các thành phần lực từ và lực từ giữa trong lõi máy biến áp mô phỏng trên phần mềm ANSYS Maxwell



Hình 13. Khảo sát sự biến dạng trong lõi máy biến áp mô phỏng trên phần mềm ANSYS Maxwell đã được khuếch đại



Hình 14. Khảo sát chuyển vị trong lõi máy biến áp mô phỏng trên phần mềm ANSYS Maxwell

Trên Hình 13 cho thấy rằng biến dạng lớn nhất xảy ra tại các góc của lõi thép khoảng $2,0644$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]; trên trụ từ có biến dạng nhỏ nhất, khoảng $2,0735 \times 10^{-2}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$] và ngược lại chuyển vị trên trụ từ lớn nhất, khoảng $3,6033 \mu\text{m}$; tại các góc của lõi thép có chuyển vị nhỏ nhất khoảng $0,01702 \mu\text{m}$.

4. Kết luận

Trong bài báo, nhóm tác giả đã xây dựng được mô hình toán tính lực từ, lực từ giữa, biến dạng và chuyển vị trên lõi thép vô định hình.

Thông qua mô hình toán và mô hình mô phỏng, nhóm nghiên cứu có những kết luận như sau:

- Lực khối từ trường trong lõi thép vô định hình nhỏ hơn lực khối từ giữa nhiều lần, nên khi khảo sát sự biến dạng và chuyển vị trong lõi thép vô định hình, có thể bỏ qua lực khối từ trường. Đây chính là điểm khác biệt so với lõi thép tôn silic.

- Với ưu điểm của phần mềm mô phỏng ANSYS Maxwell đã xác định được mật độ lực từ, lực từ giảo lớn nhất tập trung tại các góc của lõi thép và biến dạng tại đây là lớn nhất. Các nhà thiết kế cần quan tâm đến kết cấu và hình dạng của lõi thép khi chế tạo.

- Vị trí chuyển vị lớn nhất trong lõi thép vô định hình của máy biến áp ba pha nằm ở giữa trụ từ của lõi thép, nên khi nghiên cứu về sự rung ồn trong lõi máy biến áp do hiệu ứng từ giảo, cần đặt cảm biến đo tại các vị trí trên để khảo sát.

- Đối với kết quả này, ảnh hưởng của kết cấu cuộn dây và vị trí tương đối của chúng so với lõi chưa được xét đến. Bên cạnh đó, yếu tố tần số cũng là một tham số có thể có những ảnh hưởng đáng kể đến bức xạ âm học của máy biến áp. Đây sẽ là nội dung cần được xét đến trong khuôn khổ của một nghiên cứu khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Gao, K. Muramatsu, M. J. Hatim, M. Nagata, and A. M. F. Analysis, "The Effect of Laminated Structure on Coupled Magnetic Field and Mechanical Analyses of Iron Core and Its Homogenization Technique," vol. 47, no. 5, pp. 1358–1361, 2011.
- [2] M. K. Master and S. T. Stockholm, *Modelling of Core Noise from Power Transformers Master of Science Thesis Modelling of Core Noise from Power Transformers*. 2011.
- [3] M. Besbes, Z. Ren, S. Member, and A. Razeq, "A Generalized Finite Element Model of Magnetostriction Phenomena," vol. 37, no. 5, pp. 3324–3328, 2001.
- [4] P.-S. Shin and H.-J. Cheung, "A Magnetostrictive Force and Vibration Mode Analysis of 3 kW BLDC Motor by a Magneto-Mechanical Coupling Formulation," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 76–80, Jan. 2011.
- [5] L. Bernard, X. Mininger, L. Daniel, G. Krebs, and F. Bouillault, "Effect of Stress on Switched Reluctance Motors: A Magneto-Elastic Finite-Element Approach Based on Multiscale Constitutive Laws," vol. 47, no. 9, pp. 2171–2178, 2011.
- [6] H. Ebrahimi, Y. Gao, A. Kameari, H. Dozono, and K. Muramatsu, "Coupled Magneto-Mechanical Analysis Considering Permeability Variation by Stress Due to Both Magnetostriction and Electromagnetism," vol. 49, no. 5, pp. 1621–1624, 2013.
- [7] L. Daniel, "An Analytical Model for the Effect of Multiaxial Stress on the Magnetic Susceptibility of Ferromagnetic Materials," vol. 49, no. 5, pp. 2037–2040, 2013.
- [8] M. J. Dapino, R. C. Smith, and F. T. Calkins, "A magnetoelastic model for villari-effect magnetostrictive sensors," pp. 1–17.
- [9] T. Hilgert, L. Vandevelde, and J. Melkebeck, "Comparison of Magnetostriction Models for Use in Calculations of Vibrations in Magnetic Cores," vol. 44, no. 6, pp. 874–877, 2008.

(BBT nhận bài: 27/06/2015, phản biện xong: 27/07/2015)