

# PHÂN TÍCH LỰC ĐIỆN TỪ NGẮN MẠCH TRONG DÂY QUẤN MÁY BIẾN ÁP BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN THEO MIỀN THỜI GIAN

## ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC FORCES IN TRANSFORMER WINDINGS WITH FINITE ELEMENT METHOD BASED ON THE TIME DOMAIN

Đoàn Thanh Bảo<sup>1</sup>, Đặng Thị Từ Mỹ<sup>1</sup>, Phạm Hồng Hải<sup>2</sup>, Phạm Văn Bình<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Quy Nhơn; dtbao@ftt.edu.vn; dtmy@ftt.edu.vn

<sup>2</sup>Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; phamvanbinh00@yahoo.com; hai.phamhong@hust.edu.vn

**Tóm tắt** - Máy biến áp (MBA) khi xảy ra ngắn mạch đột nhiên phía thứ cấp, lúc đó dòng điện ngắn mạch lớn sinh ra lực điện từ có cường độ cao có thể phá hỏng dây quấn và thậm chí làm nổ MBA. Do vậy, việc nghiên cứu và tính toán lực điện từ khi MBA ngắn mạch rất có ích trong thiết kế, sản xuất và thử nghiệm máy biến áp. Bài báo này đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn theo miền thời gian với phần mềm Maxwell mô phỏng MBA 3 pha công suất 250kVA, điện áp 35/0.4kV để phân tích và đưa ra kết quả từ trường tản, lực điện từ hướng kính và hướng trục tác dụng vào cuộn dây cao áp (CA) và hạ áp (HA). Từ đó tìm ra vị trí có ứng suất lực lớn nhất trên cuộn dây HA và CA trong trường hợp MBA bị ngắn mạch đột nhiên phía HA.

**Từ khóa** - ngắn mạch; dây quấn; lực điện từ; máy biến áp; phần tử hữu hạn.

### 1. Đặt vấn đề

Máy biến áp (MBA) khi làm việc trong điều kiện bình thường (có tải hay không tải), ta quan tâm nhiều đến phân bố từ trường trong lõi thép (từ trường chính), 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. 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 [1]. Lực điện từ trong cuộn dây của MBA được sinh ra là một sự kết hợp giữa dòng điện và từ thông tản trong các vùng dây quấn. Do vậy, khi MBA bị ngắn mạch dòng điện trong dây quấn và từ thông tản tăng rất lớn, lúc này sẽ sinh lực điện từ lớn tác dụng dây quấn [2, 3].

Các tác giả [4] sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) với phần mềm FEM để phân tích ứng suất lực trên cuộn dây CA và HA của máy biến áp 20MVA; 132/11,5 kV trong trường hợp ngắn mạch. Kết quả có được là các hình ảnh 2D của mật độ từ trường tản và lực điện từ. Kết quả này được so sánh với phương pháp giải tích kinh điển. Ngoài ra, ảnh hưởng của dòng điện ngắn mạch và lực không đối xứng ở các vị trí khác nhau trên dây quấn CA và HA của MBA cũng được tính đến. Các tác giả [5] phân tích tác dụng của dòng điện ngắn mạch trong từng phần của dây quấn của MBA sử dụng phương pháp kết hợp mạch từ và mạch điện. Dùng phương pháp PTHH để mô phỏng MBA 70MVA, 220/6,9/6,9 kV trong trường hợp ngắn mạch thử nghiệm, kết quả về dòng điện ngắn mạch, từ trường tản và lực điện từ hướng trục và hướng kính tác dụng lên dây quấn CA và HA trong trường hợp ngắn mạch một phần dây quấn hay cả dây quấn. Ngoài ra, các tác giả [6,7,8] đều sử dụng phương pháp PTHH để phân tích, tính toán phân bố từ trường tản, điện kháng tản và lực điện từ tác dụng lên dây

**Abstract** - When short circuit takes place at the secondary side in the transformer, the current will generate such powerful electromagnetic force that it can damage windings and crack the transformer. Therefore, studying and calculating the electromagnetic force in case of short circuit is very useful in designing, manufacturing and testing transformers. This paper has used the finite element method based on the time domain with simulation software Maxwell of a 250kVA - 35/0.4kV three phase transformer under short circuit conditions to analyze and provide results about the leakage field density, the radial and axial electromagnetic forces density acting on high-voltage (HV) and low voltage (LV) windings. Then the position of the greatest stress is found on HV and LV windings under sudden short circuit at the LV winding of the transformer.

**Key words** - Short circuit; winding; electromagnetic force; transformer; finite element.

quấn CA và HA của MBA trong trường hợp ngắn mạch. Đồng thời cũng đưa ra công thức tính toán dòng điện và lực điện từ quá độ trong trường ngắn mạch.

Nhìn chung, các công trình nghiên cứu trên đây trình bày rất chi tiết và cụ thể về phân tích, tính toán lực hướng kính và hướng trục tác dụng lên dây quấn trong nhiều trường hợp khác nhau, nhưng chưa chỉ ra vùng nào trên dây quấn có giá trị lực lớn nhất.

Bài báo này chúng tôi đã sử dụng PTHH với phần mềm Maxwell được hỗ trợ bản quyền của Viện Nghiên cứu quốc tế về Khoa học và Kỹ thuật tính toán, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Nghiên cứu và tính toán phân bố từ trường trong mạch từ cũng như phân bố từ trường tản trong cửa sổ mạch từ của MBA công suất 250 kVA, điện áp 35/0.4 kV lúc xảy ra ngắn mạch nguy hiểm nhất. Tính toán lực điện từ hướng kính, hướng trục và lực tổng tác dụng lên dây quấn MBA trong trường hợp ngắn mạch 3 pha nguy hiểm nhất. Từ đó chỉ ra vị trí có ứng lực lớn nhất để kiểm tra độ bền của dây quấn.

### 2. Từ trường tản, lực điện từ và dòng điện ngắn

#### 2.1. Lý thuyết lực điện từ

Phân bố lực điện từ trong MBA [6] là một hàm số của mật độ dòng điện và mật độ từ thông. Khi biết vector mật độ dòng điện  $\mathbf{J}$  (dòng dẫn và dòng dịch), vector cường độ điện trường  $\mathbf{H}$ , được biểu diễn thông qua định luật Maxwell-Ampere (1):

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

Mật độ từ thông theo công thức:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (2)$$

Ở đây,  $\mu_0$  và  $\mu_r$  là độ từ thẩm không khí và độ từ thẩm tương đối.

Lực Lorentz trên khối V ứng với mật độ dòng điện **J** hiện tại trong khối V là:

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{J} \times \mathbf{B}.dV \quad (3)$$

Khi đó, vector từ thế **A** được định nghĩa là:

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (4)$$

Từ (1) đến (4) ta có:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (5)$$

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{J} \times (\nabla \times \mathbf{A}).dV \quad (6)$$

Các biến **J** và **A** trong khối V có thể được tính bằng phương pháp giải tích hoặc phương pháp số. Phương pháp giải tích thường nhanh hơn, tuy nhiên không thể sử dụng được trong trường hợp của các mô hình với vật liệu phi tuyến, cấu trúc hình học và/hoặc điều kiện biên phức tạp. Chính vì vậy sử dụng PTHH có thể giải quyết các bài toán phức tạp nói trên và tính được ứng lực trên từng phần của cuộn dây.

**2.2. Dòng điện ngắn mạch**

Khi xảy ra sự cố ngắn mạch phía thứ cấp của MBA, lúc này sinh ra lực điện từ lớn có thể phá hỏng dây quấn MBA. Dòng điện quá độ gồm có hai thành phần: một thành phần biến thiên theo qui luật hình sin và một thành phần không chu kỳ [1]:

$$i = I_n \sqrt{2} \left[ \sin(\omega t - \psi - \varphi_n) + \sin(\psi + \varphi_n).e^{-\frac{R_n \omega t}{X_n}} \right] \quad (7)$$

Trong đó:

$I_n = \frac{U_{dm}}{Z_n}$ : dòng điện ngắn mạch [A];

$\varphi_n = \arctg \frac{X_n}{R_n}$ : góc lệch pha giữa  $I_n$  và điện áp [rad];

$U_{dm}$ : điện áp định mức [V];

$Z_n$ : tổng trở ngắn mạch [ $\Omega$ ];

t: thời gian [s];

$\psi$ : góc phụ thuộc vào thời điểm xảy ra ngắn mạch [rad];

$\omega$ : tần số góc dòng điện [rad/s];

$X_n, R_n$ : điện kháng và điện trở ngắn mạch [ $\Omega$ ].

Biểu thức (7) cho thấy rằng nguy hiểm nhất là ngắn mạch tại thời điểm điện áp bằng 0 ( $\psi = 0$ ), lúc này giá trị dòng điện cực đại xảy ra ở gần thời điểm  $t_0 = (\pi/2 + \varphi_n)/\omega$  và có độ lớn:

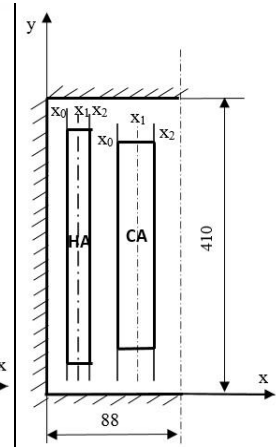
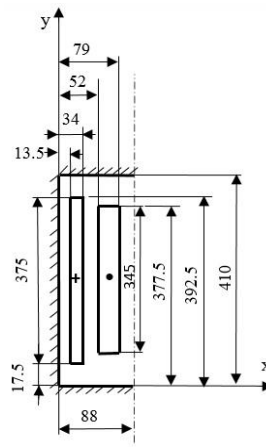
$$i_{max} = I_n \sqrt{2} \left[ 1 + \sin \varphi_n . e^{-\frac{R_n}{X_n} \left( \frac{\pi}{2} + \varphi_n \right)} \right] \quad (8)$$

**2.3. Phương pháp phần tử hữu hạn với phần mềm Maxwell**

**2.3.1. Mô hình máy biến áp**

Sử dụng một MBA 250kVA-35/0,4 kV có thông số kích thước lấy từ bản vẽ thiết kế của nhà máy chế tạo biến áp SANAKY Hà Nội, trong đó: đường kính trụ tôn:  $d = 161$  mm; chiều cao cửa sổ mạch:  $H_{cs} = 410$  mm;

khoảng cách giữa hai tâm trụ:  $M_0 = 315$  mm và các kích thước khác được thể hiện ở Hình 1.

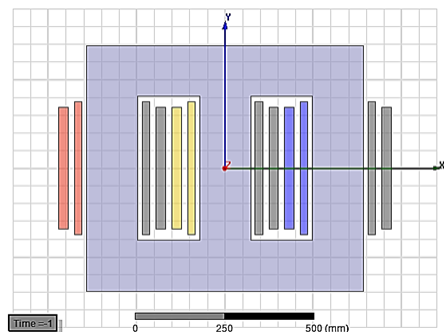


Hình 1. Mô hình cụ thể kích thước mạch từ và dây quấn MBA

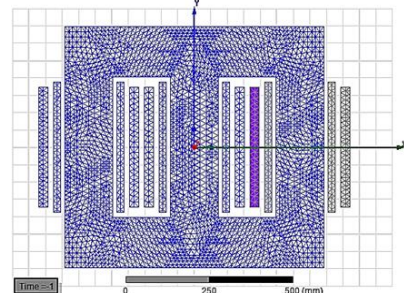
Hình 2. Tọa độ các điểm khảo sát theo chiều dày dây quấn HA và CA

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của MBA

Thứ tự	Thông số	Giá trị
1	số pha	3
2	tần số [Hz]	50
3	Công suất [kVA]	250
4	Điện áp cao áp/hạ áp [kV]	35/0,4
5	Dòng điện pha định mức cao áp/hạ áp [A]	4,1/360,8
6	Số vòng dây quấn cao áp/hạ áp [vòng]	2800/32



Hình 3. Mô hình MBA trong Maxwell



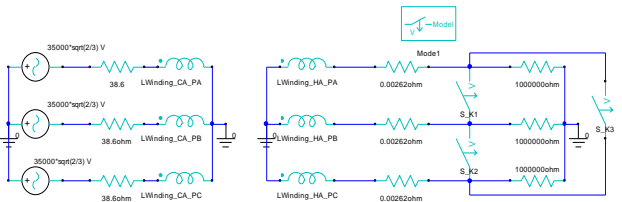
Hình 4. Mô hình chia lưới MBA trong Maxwell

Hình 3 cho thấy hình dạng của một mô hình MBA trong môi trường Maxwell. Để giảm thời gian tính toán hiệu quả, vật liệu cách điện và cấu trúc hỗ trợ đang bị bỏ qua trong mô hình này. Ngoài ra, dây quấn sắp xếp đồng tâm được xét trong mô hình

2.3.2. Dòng điện ở chế độ ngắn mạch của MBA

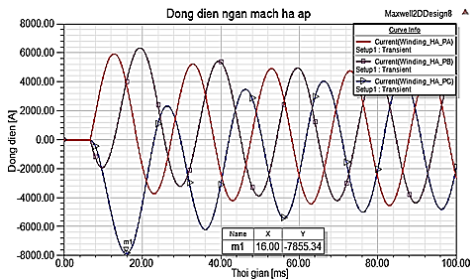
Các quá trình làm việc của MBA được điều khiển bằng khóa (SW) ở Hình 5, để thiết kế mạch điện này trong tính toán Maxwell đã dùng phần mềm Maxwell Circuit Editor. Phần đầu vào của MBA được cung cấp bởi nguồn điện xoay chiều công suất vô hạn điện áp 35 kV.

Trong đó, điện trở dây quấn CA là 38,62 Ω và hạ áp là 0,00262 Ω. Ở trạng thái ban đầu, mạch HA được đấu nối tiếp với một tải có điện trở rất lớn (có thể coi như mạch hở) là trạng thái không tải. Theo chu kì của nguồn điện xoay chiều 3 pha cung cấp, tại thời điểm  $t_0 = 0$ , điện áp pha B bằng 0 thì tại thời điểm  $t = 0,0067$  điện áp pha C bằng 0. Do đó, để chọn thời điểm ngắn mạch nguy hiểm nhất (mục 2.2) cần chọn thời điểm đóng các khóa tại  $t = 0,0067$ s. Bài toán phân tích theo miền thời gian với thời gian phân tích được thiết lập là 0,1s, với bước thời gian là 0,0001s.

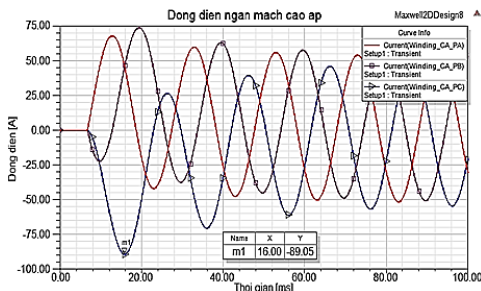


Hình 5. Sơ đồ mạch điện ở các chế độ làm việc của MBA

Kết quả phân tích dòng điện CA, HA được biểu diễn như Hình 6 và Hình 7. Các kết quả trên các đồ thị cho thấy rằng: giá trị biên độ của dòng điện cực đại trên pha C của dây quấn HA là  $I_{HA\_max} = 7855,34$  A tại thời điểm 0,016s, giá trị này lớn gấp 15.4 lần dòng định mức (biên độ của dòng điện định mức là  $I_{HA\_dm} = 510,24$  A). Tương tự, trên các dây quấn CA dòng điện ngắn mạch cực đại đạt được trên pha C với độ lớn cực đại là  $I_{CA\_max} = 89,05$  A, tại thời điểm 0,016 s.



Hình 6. Dòng điện ngắn mạch trên dây quấn HA

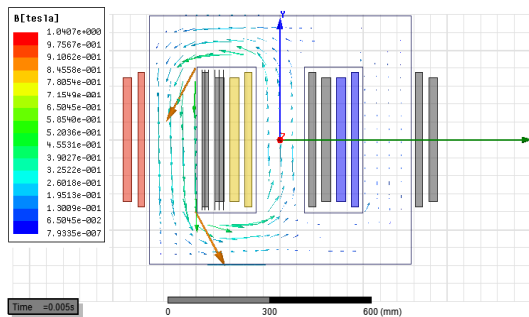


Hình 7. Dòng điện ngắn mạch trên dây quấn CA

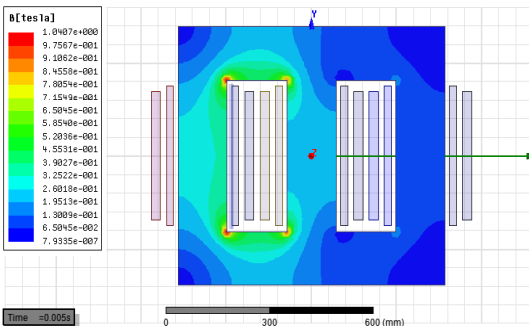
2.3.3. Phân bố từ trường tản và lực điện từ

Bài toán được phân tích theo miền thời gian, phân tích kết quả ta nhận được phân bố cường độ từ cảm trên mạch từ tại thời điểm  $t = 0,005$ s (khi MBA chưa ngắn mạch) như ở Hình 8 dạng vector, Hình 9 theo độ lớn, có giá trị lớn nhất

$B = 1,0407$  T và từ cảm tản trên dây quấn hầu như bằng không.

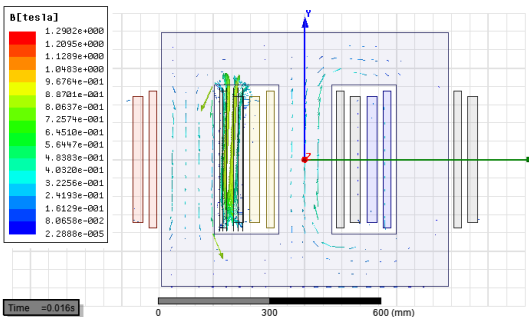


Hình 8. Vector từ cảm trong lõi thép khi chưa ngắn mạch

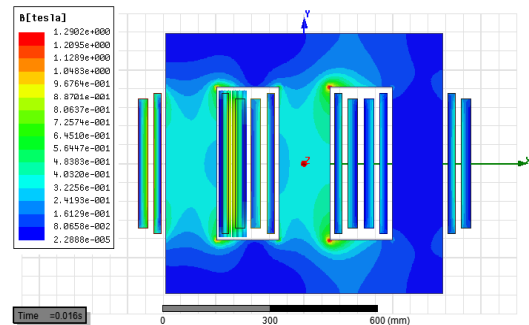


Hình 9. Độ lớn từ cảm tản trong lõi thép khi chưa ngắn mạch

Tiếp theo, tại thời điểm  $t = 0,016$ s (dòng điện ngắn mạch cực đại) ở Hình 10 và 11, ta thấy cường độ từ cảm tản trên vùng dây quấn tăng lên, còn từ cảm trong mạch từ giảm đi. Từ cảm tản trong cửa sổ mạch từ lớn nhất là 1,29T, phân bố tập trung ở khu vực giữa hai dây quấn CA và HA.



Hình 10. Vector từ cảm tản trên dây quấn khi ngắn mạch



Hình 11. Độ lớn từ cảm tản trên dây quấn khi ngắn mạch

Kết quả phân bố dạng vector cũng cho ta thấy từ cảm lớn nhất phân giữa hai dây quấn và có phương song song với trục dây quấn (phương y), giảm dần về hai phía và có xu hướng đối hướng khi đến phần đầu mỗi dây quấn, do tại đây xuất hiện thành phần từ cảm tản ngang (phương x).

2.3.4. Phân bố lực điện từ ngắn mạch cực đại trên dây quấn CA và HA

Lực điện từ 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  $B_y$ . 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  $B_x$  [9].

+ Lực hướng kính:  $F_x = B_y \cdot J_z$

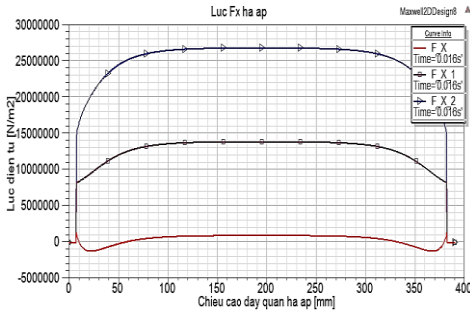
+ Lực hướng trục:  $F_y = B_x \cdot J_z$

Thành phần lực tổng:  $F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$  (9)

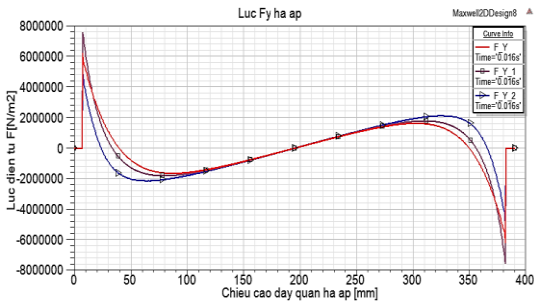
Ứng suất lực (hay gọi là ứng lực) là đại lượng biểu thị nội lực phát sinh trong dây quấn dưới tác dụng của lực điện từ. Công thức tính ứng suất:  $\sigma = f/A$  (N/m<sup>2</sup>); với  $f$  là lực (N) và  $A$  là diện tích bề mặt (m<sup>2</sup>). Để kiểm tra độ bền của dây quấn trong điều kiện ngắn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

Khảo sát ứng lực hướng kính và hướng trục cực đại theo chiều dày dây quấn HA và CA với các đường thẳng ở các tọa độ (ở Hình 2); vị trí biên trong ( $x_0$ ), ở giữa ( $x_1$ ) và biên ngoài ( $x_2$ ) dây quấn CA và HA tại thời điểm  $t = 0,016s$ .

Kết quả phân tích ta nhận được đồ thị phân bố ứng lực hướng kính và hướng trục cực đại theo chiều cao dây quấn HA như ở Hình 12, 13.



Hình 12. Phân bố ứng lực hướng kính  $F_x$  trên dây quấn HA

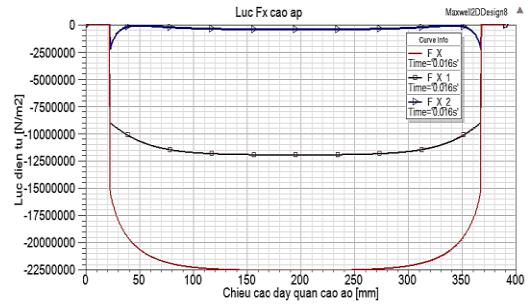


Hình 13. Phân bố ứng lực hướng trục  $F_y$  trên dây quấn HA

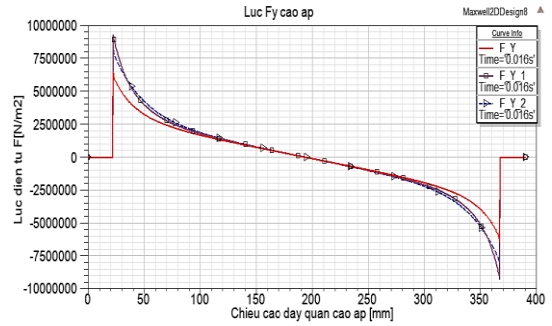
Ở Hình 12, 13 đồ thị biểu diễn phân bố ứng lực hướng kính  $F_x$  và hướng trục  $F_y$  cực đại theo chiều dày (trục  $x$ ) dây quấn HA. Hình 12 cho ta thấy tại vị trí biên ngoài ( $x_2$ ) của dây quấn, ứng lực hướng kính  $F_x$  có giá trị lớn nhất là 26811,5 kN/m<sup>2</sup>. Hình 13 cho ta thấy tại vị trí giữa ( $x_1$ ) của dây quấn, ứng lực hướng trục  $F_y$  có giá trị lớn nhất  $\pm 7546,6$  kN/m<sup>2</sup>.

Tương tự, ta cũng nhận được kết quả đồ thị phân bố ứng lực hướng kính và hướng trục cực đại theo chiều cao dây

quấn CA tại thời điểm  $t=0,016$  s như ở Hình 14, 15.



Hình 14. Phân bố ứng lực hướng kính  $F_x$  trên dây quấn CA



Hình 15. Phân bố ứng lực hướng trục  $F_y$  trên dây quấn CA

Ở Hình 14, 15 đồ thị biểu diễn phân bố ứng lực hướng kính  $F_x$  và hướng trục  $F_y$  cực đại theo chiều dày dây quấn CA. Hình 14 cho ta thấy tại vị trí biên trong ( $x_0$ ) của dây quấn, ứng lực hướng kính  $F_x$  có giá trị lớn nhất là - 22483 kN/m<sup>2</sup>. Hình 15 cho ta thấy tại vị trí giữa ( $x_1$ ) của dây quấn, ứng lực hướng trục  $F_y$  có giá trị lớn nhất  $\pm 9243,1$  kN/m<sup>2</sup>.

Mặt khác, khi xét theo chiều cao (trục  $y$ ) của một dây quấn thì lực  $F_x$  lớn nhất ở giữa dây quấn và nhỏ dần ở hai đầu dây quấn là vì từ trường tản hướng trục  $B_y$  có giá trị lớn nhất ở giữa dây quấn và nhỏ dần ở hai đầu dây quấn, còn lực  $F_y$  lớn nhất ở hai đầu dây quấn, nhỏ dần và bằng không khi vào giữa dây quấn là vì từ trường tản hướng kính  $B_x$ , có giá trị lớn nhất hai đầu dây quấn và phân bố nhỏ dần vào giữa dây quấn và ở chính giữa dây quấn thì bằng 0.

Từ các kết quả phân bố ứng lực lớn nhất này, ta tính tổng ứng lực  $F_{xy}$  trên cuộn dây CA và HA như Bảng 2

Bảng 2. Bảng kết quả phân bố ứng lực có giá trị lớn nhất

Phân bố ứng lực $F_{max}$	Cuộn dây HA	Cuộn dây CA
Tổng ứng lực $F_{xy}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	26811	22483

Thành phần ứng lực tổng  $F_{xy}$  lớn nhất này tại vị trí chính giữa biên ngoài của cuộn dây HA và biên trong của cuộn dây CA. Tổng ứng lực tác dụng dây quấn làm chúng bị kéo, ở Bảng 2 ứng suất lực là  $F_{max} = 2,6811 \cdot 10^7$  N/m<sup>2</sup>. Trường hợp dây quấn được xem là vật thể rắn, dây quấn cố định chặt, cách điện mềm ứng lực cho phép của dây đồng  $\sigma_{tbcp} = (5 \div 10) \cdot 10^7$  N/m<sup>2</sup> [1]. 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.

3. Kết luận

Trong bài báo, chúng tôi dùng phương pháp PTHH với phần mềm Maxwell để tìm ra phân bố từ trường tản và phân bố lực điện từ quá độ tác dụng lên cuộn dây của MBA trong

điều kiện ngắn mạch. Quá trình phân tích theo miền thời gian của một mô hình MBA 250 kVA-35/0,4 kV.

Đòng điện ngắn mạch quá độ cực đại của MBA đã được xác định tại thời điểm  $t = 0,016$  s, từ đó xác định ứng lực hướng kính và hướng trục cực đại trên các cuộn dây HA theo chiều dày  $x$  và theo chiều cao  $y$  dây quấn là  $26811,5 \text{ kN/m}^2$  và  $\pm 7546,6 \text{ kN/m}^2$ ; và trên cuộn dây CA là  $- 22483 \text{ kN/m}^2$  và  $\pm 9243,1 \text{ kN/m}^2$ . Đồng thời, xác định tổng ứng lực trên dây quấn HA là lớn nhất  $F_{xy\max} = 2,6811.10^7 \text{ N/m}^2$ , được so sánh với tiêu chuẩn và ứng lực chưa vượt qua giới hạn cho phép của dây quấn.

Các kết quả này bước đầu chỉ ra nguyên nhân gây ra phá hủy cuộn dây đề từ đó đưa ra phương án thiết kế MBA cho phù hợp. Việc mô phỏng tìm ứng lực lớn nhất trên cuộn dây trong điều kiện ngắn mạch là rất cần thiết trong thiết kế, sản xuất, thử nghiệm và vận hành MBA điện lực.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] 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, lần 2, năm 2011.
- [2] Đoàn Thanh Bảo, Đỗ Chí Phi, Phạm Văn Bình, Đoàn Đức Tùng, Võ Khánh Thoại, “Phân tích lực điện từ ngắn mạch của máy biến áp vô định hình”, *Tạp chí Khoa học & Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, số 11(84), Quyển 2, trang 1–9, 2014.
- [3] H. S. de Azevedo, A.C.; Rezende, I.; Delaiba, A.C.; de Oliveira, J.C.; Carvalho, B.C.; de Bronzeado, “Investigation of Transformer Electromagnetic Forces Caused by External Faults Using FEM”, *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006. TDC '06. IEEE/PES, pp. 1–6, 2006.
- [4] A. Ahmad, I. Javed, and W. Nazar, “Short Circuit Stress Calculation in Power Transformer Using Finite Element Method on High Voltage Winding Displaced Vertically”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, ijetae.com, vol. 3, no. 11, 2013.
- [5] G. B. Kumbhar and S. V. Kulkarni, “Analysis of Short-Circuit Performance of Split - Winding Transformer Using Coupled Field-Circuit Approach”, *IEEE transactions on power delivery*, vol. 22, no. 2, april 2007, pp.936-943
- [6] M. R. Feyzi and M. Sabahi, “Finite element analyses of short circuit forces in power transformers with asymmetric conditions”, 2008 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, no. 1, pp. 576–581, Jun. 2008.
- [7] M. B. B. Sharifian, R. Esmacilzadeh, M. Farrokhifar, J. Faiz, M. Ghadimi, and G. Ahrabian, “Computation of a Single-phase Shell-Type Transformer Windings Forces Caused by Inrush and Short-circuit Currents” Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran Azarbaijan Regional Electric Company, Tabriz, Iran Dep, vol. 4, no. 1, pp. 51–58, 2008.
- [8] A. M. Kashtiban, A. Vahedi, and A. Halvaei, “Investigation of Winding Type E ffect on Leakage Flux of Single Phase Shell Type Transformer Using FEM”, pp. 1755–1758.
- [9] Marcel Dekler, “Transformer\_Engineering\_Design\_and\_Practice - Chapter 6: Short Circuit Stresses and Strength”, no. year 2000, pp. 231–275.

(BBT nhận bài: 10/03/2015, phản biện xong: 26/04/2015)