

VỊ TRÍ ỨNG SUẤT NGẮN MẠCH LỚN NHẤT TRÊN DÂY QUẮN CỦA MÁY BIẾN ÁP LỖI THÉP VÔ ĐỊNH HÌNH

THE POSITION OF THE MAXIMUM SHORT CIRCUIT STRESS ON THE WINDINGS OF THE AMORPHOUS CORE TRANSFORMER

Đoàn Thanh Bảo², Đỗ Chí Phi³, Phạm Hùng Phi¹, Phạm Văn Bình¹

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; phamvanbinh00@yahoo.com; phi.phamhung@hust.edu.vn

²Trường Đại học Quy Nhơn; dtbao@ftt.edu.vn;

³Trường Cao đẳng Kỹ thuật Cao Thắng HCM; dochiphi@gmail.com

Tóm tắt - Bài báo sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn với phần mềm Ansys Maxwell theo miền thời gian để mô phỏng máy biến áp (MBA) 3 pha có lõi thép bằng vật liệu từ mềm vô định hình công suất 630 kVA, điện áp 22/0,4 kV. Kết quả tổn hao không tải và ngắn mạch được so sánh với thực nghiệm. Sau đó, thực hiện ngắn mạch sự cố đồng thời 3 pha phía hạ áp mà phương pháp thực nghiệm rất khó thực hiện được. Các kết quả phân tích về: từ trường tản, ứng suất lực điện từ hướng kính và hướng trục tác dụng vào cuộn dây cao áp (CA) và hạ áp (HA) trên mô hình MBA ở 2D và 3D được so sánh và đánh giá với nhau. Từ đó khẳng định ưu điểm của mô hình 3D để tìm ra vị trí và giá trị ứng suất lực lớn nhất trên vòng dây CA và HA.

Từ khóa - ngắn mạch; dây quấn; ứng suất; máy biến áp; vô định hình; phần tử hữu hạn.

1. Đặt vấn đề

Máy biến áp (MBA) phân phối lõi thép bằng tôn silic gây ra tổn hao điện năng ngay cả khi vận hành ở chế độ không tải. Có hai loại tổn hao điện từ tồn tại trong khi MBA vận hành: Tổn hao có tải (tổn hao đồng) thay đổi theo mức tải của MBA và tổn hao không tải (tổn hao sắt từ) phát sinh trong lõi từ và xảy ra suốt cuộc đời vận hành của MBA, không phụ thuộc vào tải. Với MBA có lõi từ bằng vật liệu vô định hình (VDH), tổn hao trong lõi từ có thể giảm xuống từ 60-70% so với MBA lõi từ bằng tôn cán lạnh định hướng [1], [2], [3], [4].

Khi MBA hoạt động trong điều kiện bình thường, tác dụng của lực điện từ lên các dây quấn nhỏ do dòng điện và từ thông tản là tương đối nhỏ. Tuy nhiên, khi ngắn mạch, dòng điện trong dây quấn và từ thông tản tăng lớn, lúc này sẽ sinh lực điện từ lớn tác dụng lên dây quấn [4], [5], [6]. 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 [7], [8].

Nhóm tác giả [9], [10] đã phân tích, tính toán lực điện từ ngắn mạch của máy biến áp lõi thép silic có tiết diện trụ tròn bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) và thực hiện trên các MBA khô 1 pha với công suất 50 kVA và 1 MVA, phân tích từ trường tản bằng phương pháp PTHH với phần mềm Maxwell. Khảo sát lực hướng kính trên cuộn dây CA ở 16 vị trí khác nhau trên cuộn dây, kết quả giá trị lực trên 16 điểm tương ứng đồng đều nhau do phân bố từ thông tản trên cuộn dây của MBA lõi thép silic có tiết diện tròn.

MBA lõi thép bằng vật liệu VDH do có cấu trúc đặc biệt của lõi thép và cuộn dây là hình chữ nhật, nên phân bố điện trường, từ trường tản và phân bố lực tác dụng lên

Abstract - This paper employed the finite element method with the simulation software Ansys Maxwell based on time domain to simulate a 630 kVA-22/0.4 kV three-phase amorphous core transformer. The results of no-load loss and short circuit load loss were then compared with experimental findings. Afterwards, the authors made a sudden short circuit at the low voltage winding of the transformer, which had been very difficult to determine via experiments. The results of the leakage field, the radial and axial of electromagnetic stress acting on high-voltage (HV) and low voltage (LV) windings on 2D and 3D model transformers were compared and evaluated. All these serve as bases for the affirmation of the superiority of the 3D model which helps to locate to the position and the the maximum stress value on HV and LV windings.

Key words - short circuit; winding; stress; transformer; amorphous; finite element.

cuộn dây cũng sẽ không đối xứng trên cùng một vòng dây. Đặc biệt hơn là lúc xảy ra ngắn mạch thì lực này lớn sẽ rất nguy hiểm đối với cuộn dây [11].

Các tác giả [12] đã nghiên cứu, phân tích khả năng chịu ngắn mạch của một MBA VDH có công suất 800KVA/10KV. Từ đó, đề xuất một kết cấu kẹp các cuộn dây MBA để có thể chịu được lực ngắn mạch lớn gây ra và chứng minh tính khả thi của phương pháp kết cấu mới của mình dưới sự hỗ trợ của phần mềm ANSYS. Nhóm tác giả đề cập đến ưu điểm của MBA phân phối có lõi hợp kim VDH là khả năng giảm tổn hao và sử dụng rộng rãi nhưng rất nhạy cảm với lực cơ khí, từ trường tác động lên, mức độ tiếng ồn cao hơn và khả năng chịu đựng ngắn mạch kém hơn MBA lõi tôn silic. Do đó, cần được sự quan tâm nhiều đến thiết kế về cuộn dây cũng như các cấu trúc hỗ trợ khác.

Nhóm tác giả B. Tomczuk, D. Koterak [13] đã tính toán lý thuyết và thực nghiệm về thành phần từ trường và điện kháng ngắn mạch của MBA 3 pha lõi VDH công suất S = 10kVA. Nhóm tác giả K. Zakrzewski, B. Tomczuk, D. Koterak [14] tiến hành sản xuất 2 loại MBA 10kVA: MBA không đối xứng (AAT) là MBA mạch từ phẳng và MBA đối xứng (AST) là MBA mạch từ không gian. Sau đó, kiểm tra việc tính toán phân bố từ trường trong các MBA VDH trong trạng thái ngắn mạch, phân tích từ thông móc vòng ψ và từ thông ϕ bằng phương pháp PTHH 3D (FEM). Đồng thời, phương pháp tính toán từ thông đã được kiểm chứng bằng thực nghiệm. Tính toán và kiểm tra phân bố từ thông tản lúc ngắn mạch AST và AAT. Kết quả loại MBA AAT thấp hơn và tốt hơn cho sản xuất và sửa chữa.

Tác giả Malick Mouhamad [11] đã đưa ra kết quả thử nghiệm ngắn mạch MBA VDH sử dụng lõi thép vật liệu

2605SA1, mạng lưới phân phối có công suất từ 250 đến 630 kVA. Đồng thời tính toán dòng điện ngắn mạch và lực điện động tác dụng lên cuộn dây hình chữ nhật có xét đến chiều dày cuộn dây.

Với những phân tích ở trên, ta thấy rằng nghiên cứu về lực điện từ tác dụng lên dây quấn ở MBA VĐH đã chưa tính đến phân bố của từ trường tản trong vùng không gian dây quấn của MBA VĐH có cuộn dây hình chữ nhật, cũng chưa tìm ra vị trí có ứng suất lớn nhất hay lực tại chỗ góc mạch từ trên cuộn dây hình chữ nhật. Chưa chỉ ra giá trị tại vị trí trên cuộn dây có ứng suất lớn nhất hay nhỏ nhất để từ đó đưa ra khuyến cáo kỹ thuật.

Bài báo này đã sử dụng phương pháp PTHH với phần mềm Ansys Maxwell theo miền thời gian để mô phỏng MBA 3 pha có lõi thép bằng vật liệu từ mềm VĐH công suất 630 kVA, điện áp 22/0,4 kV theo sơ đồ thuật toán. Đầu tiên, thực hiện mô phỏng ở chế độ không tải và ngắn mạch, thí nghiệm để so sánh các kết quả tổn hao không tải và ngắn mạch với giá trị thực nghiệm. Sau đó, thực hiện ngắn mạch sự cố đồng thời 3 pha phía hạ áp mà phương pháp thực nghiệm rất khó thực hiện được. Các kết quả phân tích về từ trường tản, ứng suất lực điện từ hướng kính và hướng trục tác dụng vào cuộn dây CA và HA trên mô hình MBA ở 2D và 3D được so sánh và đánh giá với nhau. Từ đó tìm ra vị trí và giá trị ứng suất lực lớn nhất trên vòng dây CA và HA ở mô hình phân tích 3D. Qua đó giúp nhà thiết kế tăng, giảm kích thước cách điện của cuộn dây MBA một cách phù hợp.

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

2.1. Lý thuyết lực điện từ

Lực điện từ trong cuộn dây của MBA được sinh ra là một sự kết hợp giữa các dòng điện quá độ và từ trường tản trong các vùng dây quấn. Lực điện từ này được viết theo công thức lực Lorentz (1) hay dạng vi phân (2) như sau [8], [10]:

$$F_{dt} = \int_L I \cdot B \sin(\vec{I}, \vec{B}) dl \quad (1)$$

Hay:

$$d\vec{F} = \vec{B} \times \vec{I} dl = \vec{B} \times \vec{J} \cdot ds \cdot dl \quad (2)$$

Trong đó:

- I [A] và J [A/m²] là cường độ và mật độ dòng điện trong dây dẫn;
- B [T] và F [N] là từ cảm và lực điện từ tác động lên dây dẫn;
- ds, dl là các thành phần vi phân diện tích và chiều dài.

Vậy để có thể xác định được lực điện từ tác động lên dây dẫn, ta cần phải xác định các thành phần của từ cảm B trong kết cấu khung dây dẫn và mật độ dòng điện trong dây dẫn đó.

2.2. Từ trường trong khung dây

Xuất phát từ hệ phương trình Maxwell, ta viết phương trình riêng đối với trường điện từ dừng ($\partial/\partial t = 0$) trong vùng không gian dây quấn của MBA, có mật độ dòng điện nguồn J. Phương trình này được viết cho từ thế vectơ A có dạng phương trình Laplace-Poisson như sau [15]:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \begin{cases} -\mu \mathbf{J} & \text{trong dây dẫn} \\ 0 & \text{điện môi} \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: \mathbf{A} : từ thế vectơ; μ : độ từ thẩm [H/m]; \mathbf{J} : mật độ dòng điện [A/m²].

Khi đó, vector từ thế \mathbf{A} được định nghĩa là:

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

Hay:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \vec{i}B_x + \vec{j}B_y + \vec{k}B_z \quad (5)$$

Khi đó lực điện từ cũng bao gồm các thành phần:

$$\vec{F} = \int_V (\vec{J} \times \vec{B}) dv = \vec{i}F_x + \vec{j}F_y + \vec{k}F_z \quad (6)$$

Trong đó: B_x, B_y, B_z và F_x, F_y, F_z là các thành phần từ cảm và lực theo 3 phương x, y, z.

Các biến \mathbf{J} và \mathbf{B} 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.

2.3. 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 [8], [15]:

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

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 [Ω];
- t: thời gian [s];
- ψ : góc phụ thuộc vào thời điểm xảy ra ngắn mạch [rad];
- ω : tần số góc dòng điện [rad/s];
- X_n, R_n : điện kháng và điện trở ngắn mạch [Ω];

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:

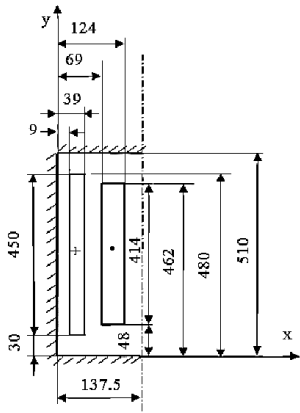
$$i_{max} = I_n \sqrt{2} \left[1 + \sin \varphi_n \cdot e^{-\frac{R_n}{X_n} \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_n \right)} \right] \quad (8)$$

3. Phương pháp phần tử hữu hạn với phần mềm Maxwell

3.1. Mô hình máy biến áp

Sử dụng một MBA VĐH 630 kVA-22/0,4 kV có các thông số điện cơ bản ở Bảng 1 và thông số kích thước lấy từ

bản vẽ thiết kế của nhà máy chế tạo biến áp SANAKY Hà Nội. Tiết diện lõi thép VDH có kích thước hình chữ nhật, có bề dày: $a = 180$ mm; bề rộng: $b = 292$ mm; chiều cao của sổ mạch: $H_{cs} = 510$ mm; khoảng cách giữa hai tâm trụ: $M_0 = 415$ 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

Bảng 1. Thông số điện cơ bản của MBA VDH

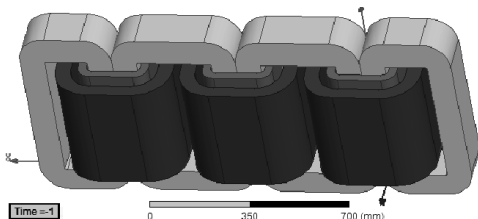
STT	Thông số	Giá trị
1	Số pha	3
2	Tần số [Hz]	50
3	Công suất [kVA]	630
4	Nối dây	Δ/Y
5	Điện áp dây CA/HA [kV]	22/0,4
6	Dòng điện pha định mức CA/HA [A]	9,55/909,33
7	Số vòng dây quấn CA/HA [vòng]	1715/18

Lõi thép bằng vật liệu từ mềm VDH, mã hiệu 2605SA1, có từ cảm bão hòa là 1,63 T. Hình 2 là hình ảnh thực tế của MBA VDH sau khi bố trí lắp đặt dây quấn.



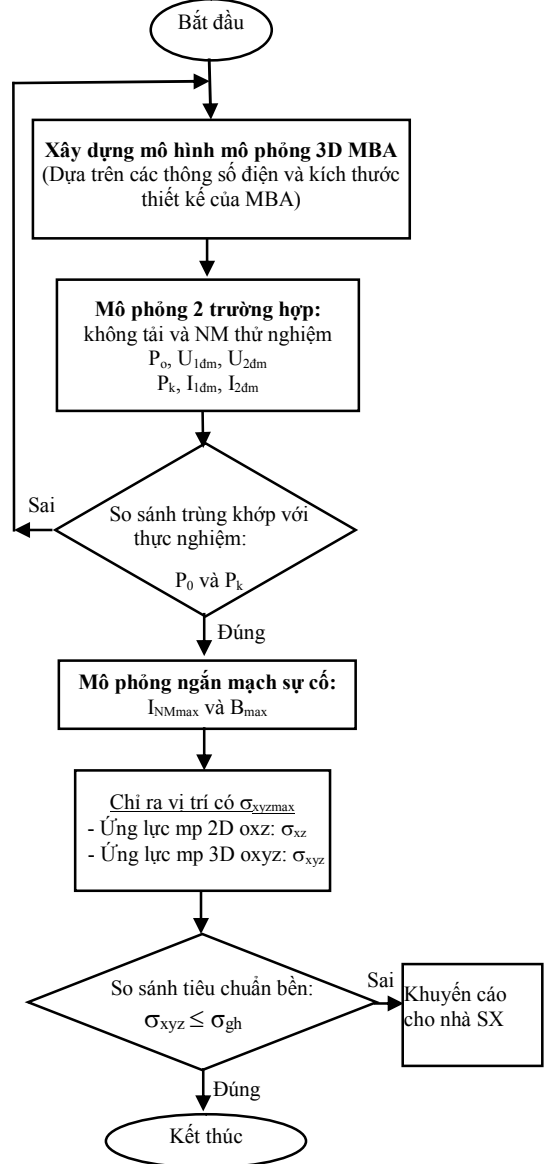
Hình 2. Mô hình MBA trong thực tế

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 bị bỏ qua trong mô hình này. Ngoài ra, dây quấn sắp xếp đồng tâm được xét trong mô hình.



Hình 3. Mô hình MBA trong Maxwell

3.2. Thuật toán mô phỏng

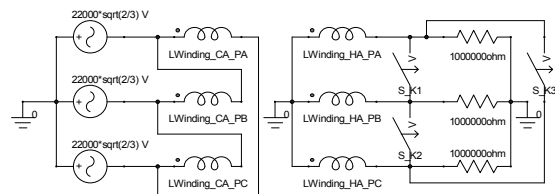


Hình 4. Sơ đồ thuật toán mô phỏng

3.3. Chế độ không tải và ngắn mạch thử nghiệm

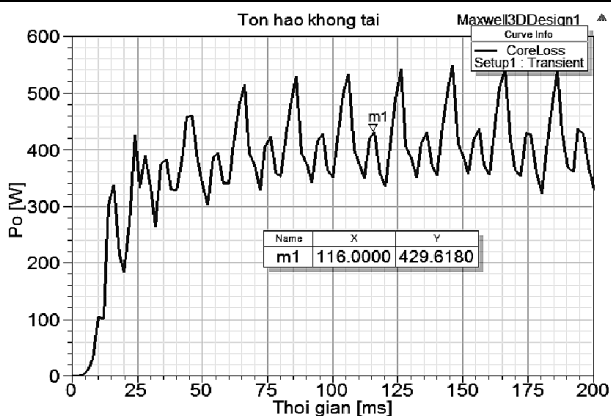
Các quá trình làm việc của MBA được điều khiển bằng khóa (SW) ở Hình 5. Để thiết kế mạch điện này, trong tính toán Maxwell đã dùng phần mềm Maxwell Circuit Editor. Phần đầu vào của MBA được cung cấp bởi nguồn điện xoay chiều công suất vô hạn, điện áp 22 kV.

Bài toán phân tích theo miền thời gian, với thời gian phân tích được thiết lập là 0,1s, với bước thời gian là 0,001s.

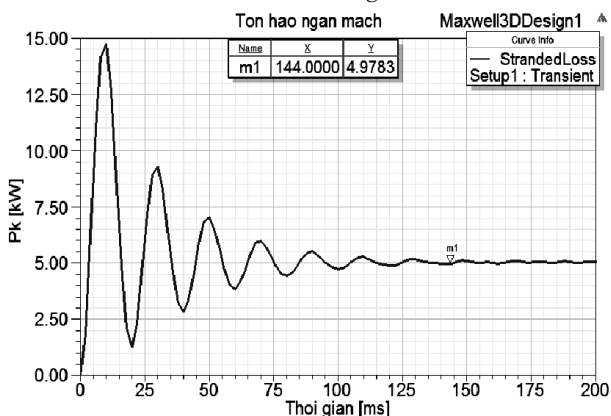


Hình 5. Sơ đồ mạch điện ở các chế độ làm việc của MBA

Phân tích mô hình, ta có kết quả mô phỏng về tổn hao không tải P_0 và tổn hao ngắn mạch P_k ở Hình 6 và Hình 7.



Hình 6. Tồn hao không tải của MBA



Hình 7. Tồn hao ngắn mạch của MBA

Các kết quả tổn hao được so sánh với giá trị đo đạc thực tế ở Bảng 2.

Bảng 2. So sánh các giá trị mô phỏng và thực tế

STT	Thông số	Mô phỏng	Thực tế	Sai số %
1	Tồn hao không tải P_0 [W]	429,618	439,9	2,4
2	Tồn hao ngắn mạch P_k [W]	4978,3	5039,0	1,2

Từ kết quả so sánh ở Bảng 2, ta thấy số dĩ giá trị mô phỏng nhỏ hơn giá trị thực tế, bởi vì bản thân phương pháp PTHH là phương pháp gần đúng và mô phỏng đã bỏ qua các vật liệu cách điện và cấu trúc hỗ trợ MBA đang bị bỏ qua trong mô hình.

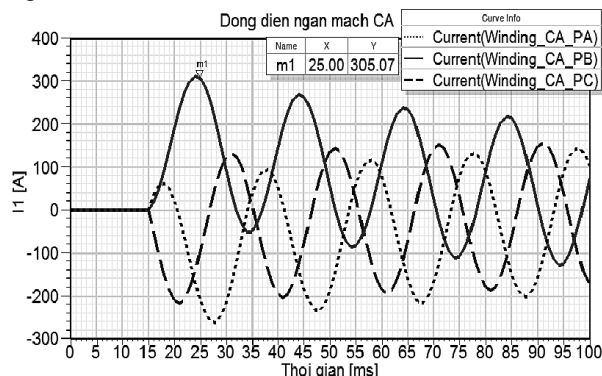
3.4. Chế độ ngắn mạch sự cố

Trên cơ sở đúng đắn của mô hình MBA, được thực hiện trong trường hợp thử nghiệm không tải và ngắn mạch, mô hình tiếp tục thực hiện cho ngắn mạch sự cố phía hạ áp MBA mà thực nghiệm không thực hiện được, để phân tích và đưa ra kết quả từ trường tản, ứng suất lực điện từ hướng kính σ_x và hướng trục σ_y tác dụng vào cuộn dây CA và HA.

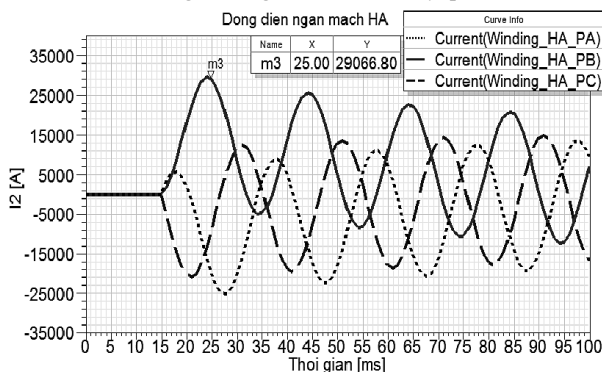
Quá trình ngắn mạch sự cố phía HA trên được điều khiển bằng khóa S ở Hình 5. Thời điểm đóng các khóa để tạo trạng thái ngắn mạch được thực hiện tại thời điểm 15 ms vì tại thời điểm này giá trị điện áp của pha B bằng 0, khi đó dòng điện ngắn mạch có giá trị lớn nhất. Phân tích theo miền thời gian được thiết lập với thời gian phân tích là 0,1s, với bước thời gian là 0,001s.

Kết quả phân tích dòng điện ngắn mạch cuộn CA, HA được biểu diễn như Hình 8 và Hình 9 cho thấy rằng: Tại thời điểm 25 ms, giá trị biên độ của dòng điện ngắn mạch

cực đại trên pha B của dây quấn CA là $I_{CA_max} = 305,07$ A và của dây quấn HA $I_{HA_max} = 29066,8$ A. Do đó, độ lớn dòng điện ngắn mạch cực đại này lớn gấp 22,6 lần biên độ dòng điện định mức.



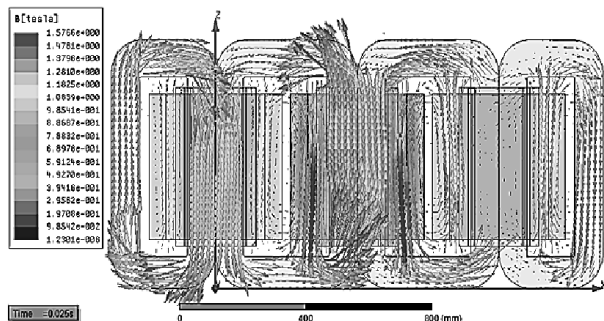
Hình 8. Dòng điện ngắn mạch trên dây quấn CA



Hình 9. Dòng điện ngắn mạch trên dây quấn HA

3.4.1. Phân bố từ trường tản

Bài toán được phân tích theo miền thời gian, ta nhận được kết quả phân bố từ cảm trên mạch từ và cuộn dây khi ngắn mạch như ở Hình 10.

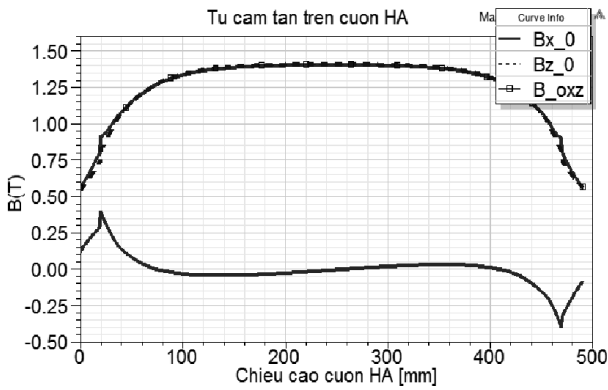


Hình 10. Vector từ cảm trong cuộn dây khi ngắn mạch

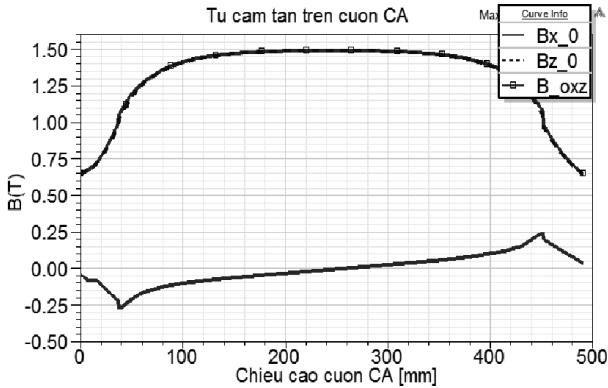
Tại thời điểm $t = 25$ ms (dòng điện ngắn mạch trên pha B đạt cực đại) ở Hình 10, ta thấy từ cảm tản trên vùng cuộn dây tăng lên $B = 1,5356$ T, còn từ cảm trong mạch từ giảm đi và lúc này từ trường tản phân bố tập trung ở khu vực giữa hai cuộn quấn CA và HA là lớn nhất.

Phân tích từ cảm tản của cuộn dây pha B, tại cạnh ngoài cùng HA và tại cạnh trong cùng CA trình bày ở Hình 11 và Hình 12.

Kết quả phân tích ở Hình 11 và Hình 12 ta được từ trường tại cạnh ngoài cùng HA: $B_{z_max} = 1,454$ T, $B_{x_max} = 0,393$ T và $B_{xzmax} = 1,454$ T. Từ trường tại cạnh trong cùng CA: $B_{z_max} = 1,492$ T, $B_{x_max} = 0,248$ T và $B_{xzmax} = 1,492$ T.

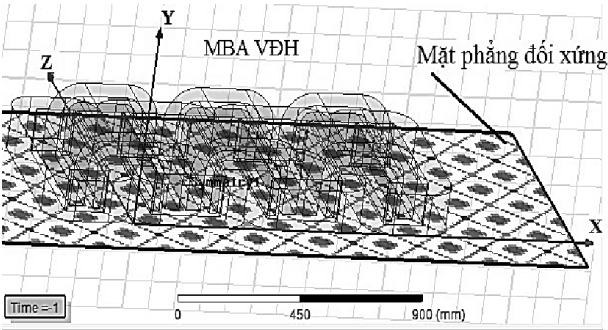


Hình 11. Từ trường tại cạnh ngoài cùng HA



Hình 12. Từ trường tại cạnh trong cùng CA

3.4.2. Phân tích ứng suất lực ngắn mạch ở mô hình 2D



Hình 13. Mặt cắt đối xứng của mô hình 1/2 MBA 3D

Xét ứng suất lực tác dụng lên cuộn dây tại mặt cắt của MBA trên mặt phẳng 0xz ở Hình 13, lúc này thành phần từ cảm tán B_y (trùng phương với dòng điện) bằng 0. Do đó, ứng suất lực này được chia làm hai thành phần:

+ Hướng kính: $\sigma_x = B_z \cdot J_y$

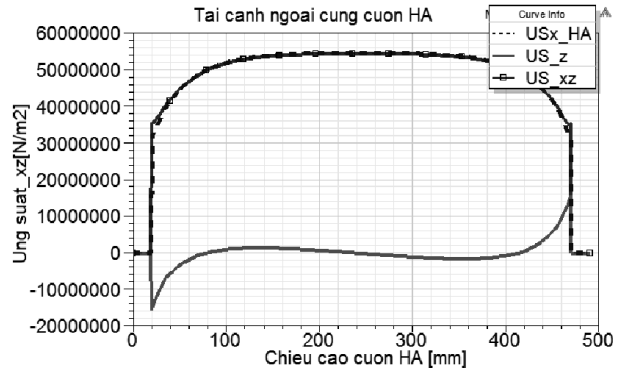
+ Hướng trục: $\sigma_z = B_x \cdot J_y$

Thành phần tổng: $\sigma_{xz} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2}$ (N/m²)

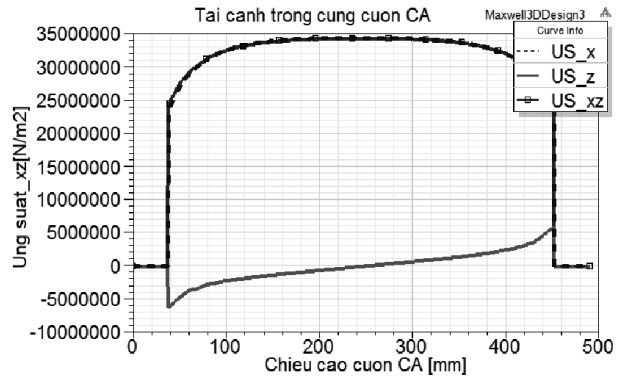
Do từ trường tản phân bố tập trung ở khu vực giữa hai cuộn quấn CA và HA. Cho nên, ta chỉ khảo sát các thành phần ứng suất lực: hướng kính σ_x , hướng trục σ_z và tổng σ_{xz} tại vị trí biên ngoài cùng của cuộn dây HA và biên trong cùng của cuộn dây CA. Kết quả các thành phần này thể hiện ở Hình 14 và Hình 15.

Từ Hình 14 và Hình 15 ta nhận thấy ứng suất lực hướng kính σ_x của cuộn dây HA và CA, lớn hơn nhiều lần hướng trục σ_z ; tại giữa cuộn dây thì σ_x đạt giá trị lớn nhất còn σ_z thì bằng 0. Cho nên thành phần ứng suất lực tổng

lớn nhất σ_{xzmax} trên cuộn dây HA và CA tại vị trí giữa cuộn dây và có giá trị ở Bảng 3.



Hình 14. Tổng ứng suất σ_{xz} trên cuộn HA



Hình 15. Tổng ứng suất σ_{xz} trên cuộn CA

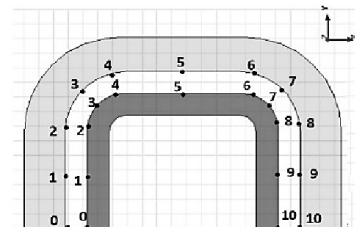
Bảng 3. Ứng suất lực tổng σ_{xzmax} trên cuộn dây HA và CA

Ứng suất σ_{max} [N/m ²]	Cuộn dây HA	Cuộn dây CA
Tổng ứng suất σ_{xzmax}	$5,444 \cdot 10^7$	$3,427 \cdot 10^7$
So sánh σ_{xzmax} với σ_{tbc}	$5,444 \cdot 10^7 < (5 \div 10) \cdot 10^7$	

Kết quả cho thấy: Thành phần ứng lực tổng σ_{xz} 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 3 ứng suất lực lớn nhất trên cuộn HA là $\sigma_{xzmax2D} = 5,444 \cdot 10^7$ N/m². Trường hợp dây quấn được xem là vật thể rắn, dây quấn cố định chặt, cách điện mềm ứng suất lực cho phép của dây đồng $\sigma_{tbc} = (5 \div 10) \cdot 10^7$ N/m² [8]. 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.

3.4.3. Phân tích ứng suất lực ngắn mạch ở mô hình 3D

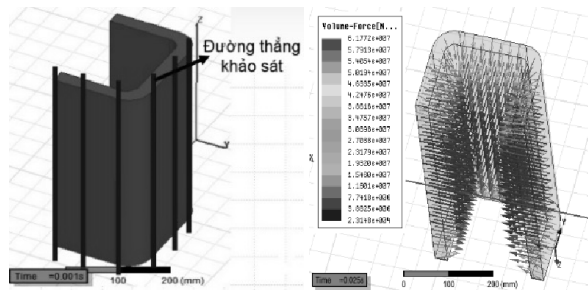
Để tìm vị trí nào trên cuộn HA và CA có giá trị ứng suất lực lớn nhất, ta khảo sát 10 đường thẳng dọc biên ngoài cùng cuộn HA và 10 đường dọc biên trong cùng cuộn CA, các vị trí khảo sát nhìn từ hình chiếu bằng như Hình 16.



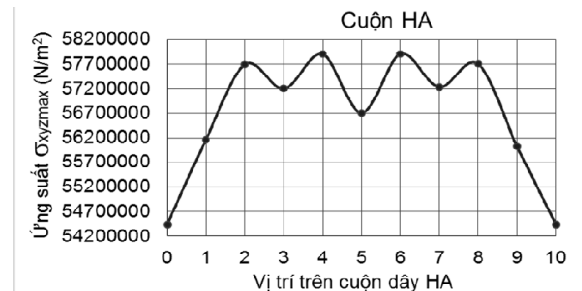
Hình 16. Các vị trí khảo sát nhìn từ hình chiếu bằng trên cuộn HA và CA

a. Cuộn hạ áp

Trên mỗi đường thẳng khảo sát, ứng lực tổng lớn nhất nằm tại vị trí giữa của đường thẳng (tức giữa cuộn dây theo chiều cao) và thể hiện 10 giá trị ứng lực tổng này ở Hình 19.



Hình 17. Đường thẳng khảo sát trên cuộn HA **Hình 18.** Phân bố ứng lực trên cuộn HA trong Maxwell

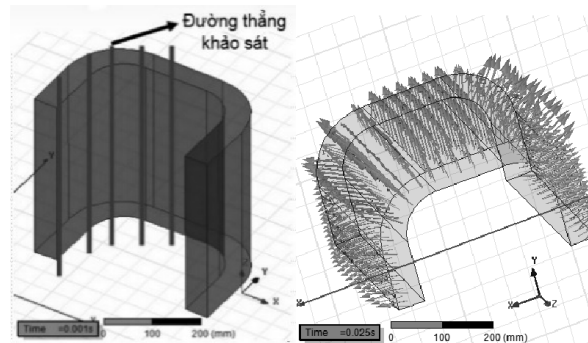


Hình 19. Phân bố ứng lực trên vòng dây HA

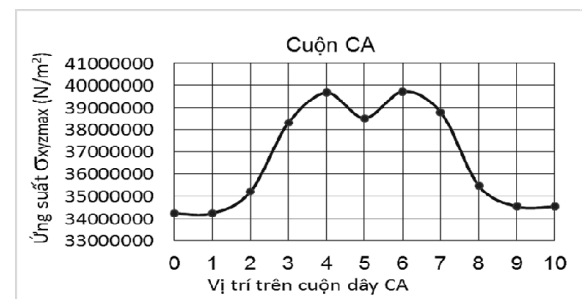
Nhìn Hình 19, ta thấy rõ vị trí có ứng suất lực lớn nhất ở vị trí 4 và 6 và có giá trị là: $\sigma_{xyzmax} = 5,789.10^7$ (N/m²).

b. Cuộn cao áp

Tương tự, trên mỗi đường thẳng khảo sát, ứng lực tổng lớn nhất nằm tại vị trí giữa của đường thẳng (tức giữa cuộn dây theo chiều cao) và thể hiện lấy 10 giá trị ứng lực tổng này ở Hình 22.



Hình 20. Đường thẳng khảo sát trên cuộn CA **Hình 21.** Phân bố ứng lực trên cuộn CA trong Maxwell



Hình 22. Phân bố ứng lực trên vòng dây HA

Nhìn Hình 22, ta thấy rõ vị trí có ứng suất lực lớn nhất ở vị trí 4 và 6 và có giá trị là: $\sigma_{xyzmax} = 3,975.10^7$ (N/m²).

3.4.4. So sánh và thảo luận giữa phân tích 2D và 3D

Ở phân tích mô hình 3D, không những tìm được 1 vị trí ứng suất (như 2D), mà còn tìm được nhiều vị trí ứng suất trên cuộn dây. Kết quả giữa phân tích mô hình 2D và 3D thể hiện ở Bảng 4.

Bảng 4. Bảng kết quả giá trị ứng suất lớn nhất giữa 2D và 3D

Ứng suất σ_{max} [N/m ²]		Phân tích 2D	Phân tích 3D
Tổng ứng suất σ_{xyzmax}	Cuộn dây HA	5,444.10 ⁷	5,789.10 ⁷
	Cuộn dây CA	3,427.10 ⁷	3,975.10 ⁷

Tổng ứng lực tác dụng dây quấn làm chúng bị kéo, ở Bảng 4 ứng suất lực lớn nhất là $\sigma_{xyzmax3D} = 5,789.10^7$ N/m². So sánh với ứng lực cho phép của dây đồng: $\sigma_{tbcp} = (5 \div 10).10^7$ N/m² [8]. 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.

Ở phương pháp PTHH 3D, có thể tìm được ứng suất lực tại bất kì điểm nào trên vị trí của cuộn dây. Từ đó tìm được vị trí có ứng suất lớn nhất trên vòng dây, giúp ta đánh giá đúng giới hạn chịu lực của dây quấn, cũng như phân bố ứng suất không đồng đều của cuộn dây hình chữ nhật.

4. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng phương pháp PTHH với phần mềm Ansys Maxwell 3D theo miền thời gian để mô phỏng MBA lõi thép bằng vật liệu từ mềm VDH 3 pha công suất 630 kVA, điện áp 22/0.4 kV trong trường hợp không tải và ngắn mạch thử nghiệm, kết quả tổn hao không tải và ngắn mạch sai lệch lớn nhất 2,4% so với các kết quả thử nghiệm của nhà sản xuất.

Trên cơ sở đúng đắn của sơ đồ thuật toán mô phỏng, thực hiện cho ngắn mạch sự cố đồng thời cả 3 pha phía hạ áp MBA, tại thời điểm 15 ms, vì tại thời điểm này giá trị điện áp của pha B bằng 0, khi đó dòng điện ngắn mạch có giá trị lớn nhất. Kết quả dòng điện ngắn mạch trên pha B của cuộn CA và HA đạt giá trị cực đại tại thời điểm 25 ms, giá trị này lớn gấp 22,6 lần biên độ dòng điện định mức.

Tại thời điểm $t = 25$ ms, phân tích kết quả từ cảm tán, ứng suất lực điện từ hướng kính và hướng trục tác dụng vào cuộn dây CA và HA. Kết quả phân bố từ trường tản tập trung ở khu vực giữa hai cuộn CA và HA là lớn nhất, từ cảm tán tại cạnh ngoài cùng HA: $B_{xzmax} = 1,454T$ và từ cảm tán tại cạnh trong cùng CA: $B_{xzmax} = 1,492T$. Sau đó, phân tích mô hình 2D, tổng ứng suất lực lớn nhất tại cạnh ngoài cùng cuộn HA: $\sigma_{xzmax2D} = 5,444.10^7$ N/m², tại cạnh trong cùng cuộn CA: $\sigma_{xzmax2D} = 3,427.10^7$ N/m². Kết quả của phân tích mô hình 2D mặt cắt 0xz đã chỉ ra vùng giữa cuộn HA và CA có ứng lực lớn nhất, sau đó so sánh với tiêu chuẩn giới hạn phá hủy của dây quấn thì khi xảy ra ngắn mạch với dòng điện cực đại, ứng suất lớn nhất của dây quấn chưa vượt quá giới hạn cho phép.

Ta thấy rằng về khả năng phân tích ứng suất lực của mô hình 2D trên mặt cắt 0xz, chỉ thường áp dụng cho các MBA có tiết diện tròn hoặc vật thể có chiều dài lớn. Do đó không thể áp dụng cho cấu trúc đặc biệt của MBA lõi thép VDH có dây quấn tiết diện hình chữ nhật. Chính vì vậy, cần khảo sát

và phân tích ở mô hình 3D. Trong mô hình 3D này, khảo sát 10 vị trí trên vòng dây tại vùng biên ngoài cùng của cuộn HA và biên trong cùng của cuộn CA, vị trí có ứng suất lực lớn nhất ở vùng mép cong của vòng dây, tức là tại vị trí 4 và 6 có giá trị lớn nhất. Cuộn HA: $\sigma_{xyzmax3D} = 5,789.10^7$ (N/m²); cuộn CA: $\sigma_{xyzmax3D} = 3,975.10^7$ (N/m²).

Điều này cho thấy rằng, ưu điểm phương pháp PTHH 3D không những tìm được một vị trí ứng suất, mà còn tìm được nhiều vị trí ứng suất trên cuộn dây và chỉ ra đúng vị trí có ứng suất lực lớn nhất, để từ đó đưa ra khuyến cáo cho kỹ thuật chế tạo dây quấn cân gia tăng và giảm cách điện cho phù hợp.

Các kết quả này bước đầu chỉ ra nguyên nhân gây ra phá hủy cuộn dây, để từ đó đưa ra phương án thiết kế MBA cho phù hợp. Việc tính toán 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 VĐH.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] W. N. Harry, R. Hasegawa, L. Albert, and L. A. Lowdermilk, (1991) "Amorphous Alloy Core Distribution Transformers", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no. 11, pp. 1608–1623.
- [2] T. Steinmetz, B. Cranganu-Cretu, and J. Smajic (2010) "Investigations of no-load and load losses in amorphous core dry-type transformers", *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, pp.1–6.
- [3] Đoàn Thanh Bảo, Đỗ Chí Phi, Phạm Văn Bình, Đoàn Đức Tùng, Võ Khánh Thoại, (2014) "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.
- [4] Bahmani, M. A.(2011) "Core Loss Calculation in Amorphous High Frequency High Power Transformers with Different Topologies", *Master of Science Thesis in Electric Power Engineering - Chalmers university of technology Sweden*, pp. 1–65.
- [5] Hyun-mo Ahn - Yeon-ho Oh and - Joong-kyoung Kim - Jae-sung Song - Sung-chin Hahn (2012), "Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force for Dry-Type Transformer", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 2, pp. 819–822.
- [6] Marcel Dekler, (2000) "Transformer Engineering Design and Practice - Chapter 6: Short Circuit Stresses and Strength", pp. 231–275.
- [7] Hajiaghahi, S. and K. Abbaszadeh, (2013) "Analysis of Electromagnetic Forces in Distribution Transformers Under Various Internal Short-Circuit Faults", *CIREC Regional - Iran, Tehran*, vol. 13–14, pp. 1–9.
- [8] Phạm Văn Bình, Lê Văn Doanh, (2011), *Máy biến áp – lý thuyết – vận hành – bảo dưỡng – thử nghiệm*, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, lần 2.
- [9] Hyun-mo Ahn, Ji-yeon Lee, Joong-kyoung Kim, and Yeon-ho Oh - Sang-yong Jung (2011) "Finite-Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 3, pp. 1267–1272.
- [10] J. Y. Lee - H.M Ahn -J. K. Kim and - Y. H. Oh - S. C. Hahn, (2009) "Finite element analysis of short circuit electromagnetic force in power transformer", *2009 International Conference on Electrical Machines and Systems*, no. 4, pp. 1–4.
- [11] Mouhamad, M., C. Elleau, F. Mazaleyrat, C. Guillaume, and B. Jarry, (2011) "Short-Circuit Withstand Tests of Metglas 2605SA1-Based", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, pp. 4489–4492.
- [12] Haifeng Zhong – WenhaoNiu - Tao Lin - Dong Han - Guo qiang Zhang, (2012) "The Analysis of Short-Circuit Withstanding Ability for A 800KVA/10KV Shell-Form Power Transformer with Amorphous Alloy Cores", *2012 IEEE International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, no. 2161–7481, pp. 1–5.
- [13] Tomczuk, B., K. Zakrzewski, and D. Koterak, (2003) "Magnetic Field and Short-Circuit Reactance Calculation of the 3-phase Transformer with Symmetrical Amorphous Core", *International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering ISEF 2003 – 11th*, pp. 227–230.
- [14] Zakrzewski, K., B. Tomczuk, and D. Koterak, (2009) "Amorphous modular transformers and their 3D magnetic fields calculation with FEM", *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 583–592.
- [15] M. R. Feyzi and M. Sabahi, (2008) "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.

(BBT nhận bài: 02/08/2015, phân biện xong: 27/09/2015)