

TÍNH TOÁN ĐỘ BỀN VÀ TỐI ƯU HÓA KẾT CẤU KHUNG DÂY QUẤN CỦA MÁY BIẾN ÁP

CALCULATION OF DURABILITY AND OPTIMIZATION OF WINDING FRAME STRUCTURE OF TRANSFORMERS

Đoàn Đức Tùng

Trường Đại học Quy Nhơn; dtung@ftt.edu.vn

Tóm tắt - Sự cố ngắn mạch các pha ở đầu cực máy biến áp (MBA) gây ra lực cơ khí rất nguy hiểm, nó có thể uốn cong, xô dịch, phá hủy cuộn dây và thậm chí làm nổ MBA. Do vậy việc đánh giá và tính toán độ bền cơ học dây quấn MBA dưới tác động lực điện từ trong trường hợp ngắn mạch rất cần thiết. Bài báo này đã sử dụng phương pháp giải tích và phần tử hữu hạn để tính toán độ bền dây quấn hạ áp (HA) của MBA 3 pha công suất 250kVA-35/0,4kV trong trường hợp ngắn mạch sự cố đồng thời 3 pha. Kết quả của hai phương pháp được so sánh với nhau nhằm chọn ra một quy trình phân tích tính toán với thời gian là nhỏ nhất và tin cậy nhất. Sau đó, tiến hành tối ưu hóa kết cấu khung dây dẫn sao cho thỏa mãn được các điều kiện lực ngắn mạch, nhưng đồng thời giảm được chi phí thiết kế và chế tạo.

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

Abstract - Short circuit at ultra-phase transformers causes a very dangerous mechanical force; it can bend, move, destroy the winding and even breaks transformers. In case of short circuits, the assessment and calculation of mechanical strength under the action of electromagnetic force is essential. This paper uses the analytical and finite element methods to calculate reliability of low voltage winding of 3-phase 250KVA-35/0.4 kV in the case of short circuit at three phases. The results of two methods are compared in order to pick out a computational analysis process with minimal time and greatest reliability. Then, optimizing the winding frame structure is done to satisfy the conditions for short circuit and at the same time reduce the cost of design and manufacture.

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

1. Đặt vấn đề

Máy biến áp (MBA) khi 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. Khi đó sinh ra lực cơ khí làm uốn cong hoặc phá hủy dây quấn và vật liệu cấu trúc khác của MBA [1, 2, 3, 4].

Năm 2007, A. C. De Azevedo và các cộng sự đã phân tích từ trường của MBA khi xảy ra ngắn mạch, dùng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) theo miền thời gian để tính toán lực cơ học xảy ra trong cuộn dây biến áp trong điều kiện ngắn mạch. Tác giả sử dụng tính toán bằng giải tích và mô phỏng số để khảo sát MBA hai trường hợp bình thường và ngắn mạch, kết quả lực hướng trục và hướng kính giữa hai phương pháp này được so sánh và đánh giá với nhau [5].

Nhóm tác giả: Hyun-Mo Ahn và Ji-Yeon Lee đã phân tích, tính toán lực điện từ ngắn mạch của MBA lõi thép silic có tiết diện tròn bằng phương pháp PTHH [6, 7]. Nhóm tác giả khẳng định khi MBA bị ngắn mạch vào lúc đang hoạt động trong hệ thống điện, các dòng điện ngắn mạch tương tác với từ thông tản gây ra ứng suất cơ học rất nghiêm trọng đối với dây quấn MBA.

Năm 2004, Tang Yun-Qiu đã tính toán lực ngắn mạch trên dây quấn MBA, trình bày tính toán lực hướng kính và hướng trục khi ngắn mạch ba pha trên một MBA 72 MVA, phân tích từ trường tản và lực theo phương pháp PTHH. Các kết quả tính toán được so sánh với thử nghiệm [8].

Nhóm tác giả [9] đã phân tích, tính toán lực điện từ ngắn mạch của MBA lõi thép silic bằng phương pháp 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 cao áp (CA) ở 16 vị trí khác nhau trên cuộn dây.

Các công trình nghiên cứu ở trên chưa đưa ra quy trình cụ thể để tính toán, đánh giá độ bền dây quấn, cũng như chưa đề cập đến tối ưu hóa kết cấu khung dây quấn dưới tác động lực điện từ trong trường hợp ngắn mạch.

Bài báo đã ứng dụng đồng thời cả hai phương pháp: giải tích số và mô phỏng số để nghiên cứu và tính toán độ bền của dây quấn MBA có công suất 250kVA-35/0,4kV. Kết quả của hai phương pháp được so sánh với nhau nhằm chọn ra một quy trình phân tích tính toán, tác động của lực điện từ ngắn mạch lên dây quấn MBA sao cho thời gian tính toán ngắn nhất mà vẫn đảm bảo được tính tin cậy của các kết quả phân tích. Sau khi lựa chọn được một quy trình phù hợp, tiến hành tối ưu hóa kết cấu khung dây quấn sao cho vẫn thỏa mãn được các điều kiện lực ngắn mạch, nhưng đồng thời giảm được chi phí chế tạo và thời gian gia công.

2. Lực điện từ, từ trường tản và ứng suất biến dạng

2.1. Lực điện từ

Lực điện từ này được viết theo công thức lực Lorentz (1) hay dạng vi phân (2) như sau [1,4]:

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

Hay:

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

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 tính 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, 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 vector A có dạng phương trình Laplace-Poisson như sau [10, 11]:

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

Trong đó, A: từ thế vector; μ : độ từ thẩm [H/m]; J: mật độ dòng điện [A/m²].

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

$$\nabla \times A = B \quad (4)$$

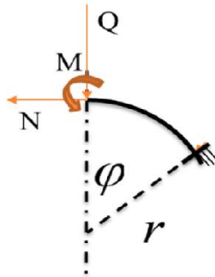
Từ (4) ta thấy, để có thể xác định được phân bố từ tán trong cửa sổ mạch từ, ta không thực hiện trực tiếp mà thông qua đại lượng từ thế vector A.

$$B = \nabla \times A = iB_x + jB_y + kB_z \quad (5)$$

Trong đó: B_x, B_y, B_z là 3 thành phần từ trường theo 3 phương (x,y,z).

2.3. Ứng suất biến dạng trên thanh cong siêu tĩnh chịu lực phân bố

Tương tự như thanh thẳng chịu lực, tại mặt cắt ngang của thanh cong cũng có các thành phần nội lực là: Mômen uốn M, lực cắt Q và lực dọc trục N như Hình 1.



Hình 1. Biểu diễn lực cắt Q, lực dọc trục N và mômen uốn M

Để tính ứng suất của thanh cong trong trường hợp đồng thời chịu kéo và uốn, ta có thể sử dụng phương pháp cộng ứng suất pháp [12]:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M}{F(r_0 - r_{th})} \left(1 - \frac{r_{th}}{r} \right) \quad (6)$$

Trong đó:

- F là diện tích mặt cắt ngang;
- r_0 bán kính đường trung bình hình học của mặt cắt ngang;
- r_{th} bán kính đường trung hòa;
- r bán kính đường cần xét.

Khi kết cấu thanh cong chịu thêm thành phần ứng suất cắt do lực cắt tạo ra một cách gần đúng, ta áp dụng công thức Giurapxki đối với thanh thẳng:

$$\tau_{cat} = \frac{QS_x^{cat}}{J_x b_{cat}} \quad (7)$$

Trong đó: x là trục trung tâm của mặt cắt, J_x là momen quán tính hình học ứng với trục x, các thành phần S và b là hình dạng của mặt cắt.

Để tính chuyển vị của của thanh cong, ta sử dụng công thức của Morh có dạng như [12].

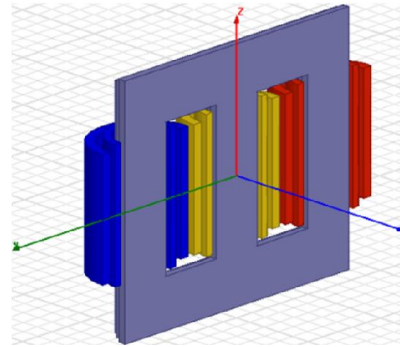
$$\Delta_{kp} = \int_s \frac{M \cdot \overline{M}_k}{EJ} + \int_s \frac{N \cdot \overline{N}_k}{EF} + \int_s \frac{\gamma Q \cdot \overline{Q}_k}{GF} \quad (8)$$

Trong đó: M_k, N_k, Q_k là momen, lực kéo, lực cắt sinh ra do lực suy rộng (lực tập trung).

3. Phân tích ứng suất và tính toán độ bền dây quấn

3.1. Mô hình máy biến áp

Ứng dụng Maxwell xây dựng mô hình 3D như Hình 2 với thông số điện cơ bản của MBA phân phối 3 pha 250 kVA-35/0,4 kV ở Bảng 1 và các thông số kích thước lấy từ bản vẽ thiết kế của nhà máy chế tạo biến áp Sanaky Hà Nội.

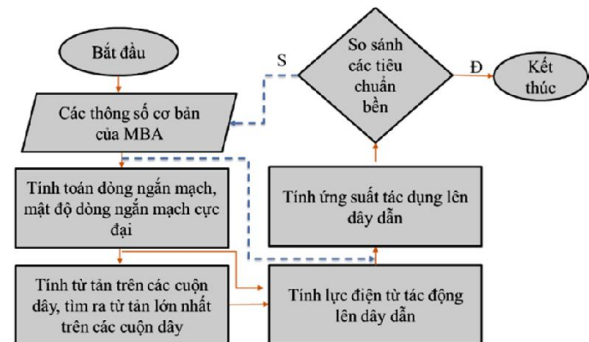


Hình 2. Mô hình 3D của MBA trong Maxwell

Bảng 1. Thông số điện cơ bản của MBA VDH

Thứ tự	Thông số	Giá trị
1	Số pha	3
2	Tần số [Hz]	50
3	Công suất [kVA]	250
4	Nối dây	Δ/Y
5	Điện áp dây CA/HA [kV]	35/0,4
6	Tổn hao không tải [W]	600
7	Tổn hao ngắn mạch [W]	2700

3.2. Tính ứng suất trên dây bằng phương pháp giải tích



Hình 3. Lưu đồ tính toán giải tích

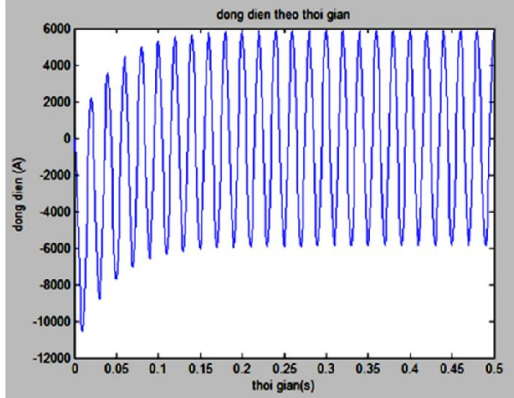
Để tính ứng suất trên dây dẫn MBA, đầu tiên tính dòng quá độ ngắn mạch cho trường hợp nguy hiểm nhất (có biên độ dòng ngắn mạch là lớn nhất) và từ tán trong cửa sổ mạch từ. Sau đó, tính toán phân bố mật độ lực điện từ tác động lên các dây dẫn. Cuối cùng là tính toán ứng suất trên dây quấn. Toàn bộ quy trình tính toán được biểu diễn như Hình 3.

3.2.1. Dòng điện ngắn mạch cực đại

Ta xét trạng thái quá độ của pha mà tại đó có dòng điện quá độ cực đại là lớn nhất. Giá trị tức thời của dòng quá độ được thiết lập bởi công thức [1, 6, 9]:

$$i = I_n \sqrt{2} \left[\sin(\omega t - \varphi_n) + \sin(\varphi_n) \exp\left(-\frac{R_n}{X_n} \omega t\right) \right] \quad (9)$$

Thay các giá trị từ thông số của MBA vào và khảo sát dòng điện trong 0,5s sau thời điểm ngắn mạch, ta được đồ thị Hình 4:



Hình 4. Dòng điện quá độ ngắn mạch trên dây quấn HA

Kết quả khảo sát chỉ ra rằng dòng điện quá độ cực đại trên cuộn HA là $I_{HA_max}=10551$ A trong khi biên độ của dòng điện định mức là $I_{HAdm}=510$ A. Tương tự, dòng điện quá độ cực đại trên cuộn CA là $I_{CAadm}=120,6$ A. Giá trị này lớn gấp 20,67 lần dòng định mức.

3.2.2. Tính từ tán trong cửa sổ mạch từ

Khai triển từ thế vector A (3) dưới dạng chuỗi điều hòa vô hạn ta có:

$$A = \sum_j \sum_k A_{jk} \cos m_j x \cdot \cos n_k y \quad (10)$$

Thực hiện phép lấy tích phân và biến đổi hệ phương trình, ta thu được giá trị $A_{j,k}$ cho trường hợp với $j \neq 1, k \neq 1$:

$$A_{j,k} = \frac{4 \mu_0}{d \cdot h \cdot m_j \cdot n_k (m_j^2 + n_k^2)} \times \sum_{s=1}^g J_s \left(\sin m_j d_2^s - \sin m_j d_1^s \right) (\sin n_k h_2^s - \sin n_k h_1^s) \quad (11)$$

Với $k=j=1$ thì $A_{0,0}$ là hằng số; do đó ta bỏ qua khi tính từ thế vector A.

Trong đó: g là số dây quấn của MBA; J_s mật độ dòng điện của dây quấn thứ s.

Khi đó từ thế vecto A được viết dưới dạng tổng:

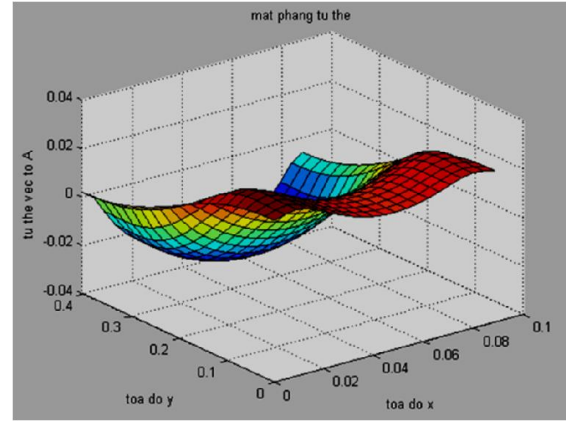
$$A = A_{1,k} + A_{j,1} + A_{j,k} \quad (12)$$

Từ biểu thức (12) với A là tổng của các chuỗi số $A_{1,k}$; $A_{j,1}$ và $A_{j,k}$ là các chuỗi hội tụ có đạo hàm. Khi đó giá trị cảm ứng từ tại cửa sổ mạch từ được tính như sau:

$$\begin{cases} B_x = \frac{\partial A}{\partial y} = \frac{\partial (A_{1,k} + A_{j,1} + A_{j,k})}{\partial y} \\ B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} = -\frac{\partial (A_{1,k} + A_{j,1} + A_{j,k})}{\partial x} \end{cases} \quad (13)$$

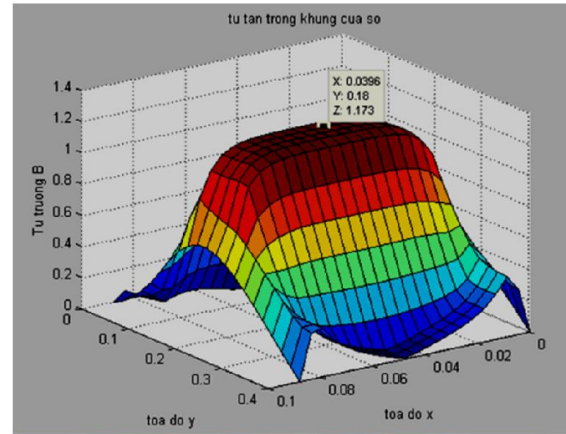
$$\begin{cases} B_x = -\sin(n_k y) \sum_{k=1}^g \frac{2\mu_0}{n_k^2 d h} \sum_{s=1}^g J_s a_s (\sin(n_k h_2^s) - \sin(n_k h_1^s)) \\ \quad - \sin(n_k y) \cdot \cos(m_j x) \\ \quad \sum_{k=2}^g \sum_{j=2}^g \frac{4\mu_0}{d h m_j (m_j^2 + n_k^2)} \sum_{s=1}^g J_s (\sin m_j d_2^s - \sin m_j d_1^s) (\sin n_k h_2^s - \sin n_k h_1^s) \\ B_y = \sin(m_j x) \sum_{j=1}^g \frac{2\mu_0}{m_j^2 d h} \sum_{s=1}^g J_s a_s (\sin(m_j d_2^s) - \sin(m_j d_1^s)) \\ \quad + \cos(n_k y) \cdot \sin(m_j x) \\ \quad \sum_{k=2}^g \sum_{j=2}^g \frac{4\mu_0}{d h n_k (m_j^2 + n_k^2)} \sum_{s=1}^g J_s (\sin m_j d_2^s - \sin m_j d_1^s) (\sin n_k h_2^s - \sin n_k h_1^s) \end{cases} \quad (14)$$

Với việc khai triển chuỗi với j, k tiến đến n = 40 bằng code Matlab ta thu được hàm phân bố từ thế vector A ở Hình 5.



Hình 5. Phân bố từ thế vector A trong cửa sổ mạch từ

Khai triển B_x, B_y theo (14) ta thu được phân bố từ tán trong cửa sổ mạch từ được biểu diễn ở Hình 6.



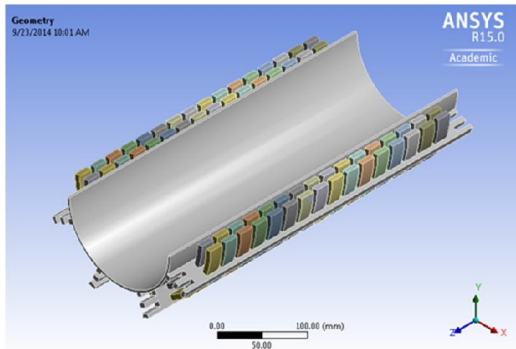
Hình 6. Phân bố cảm ứng từ trong cửa sổ mạch từ

Từ đồ thị Hình 6 ta thấy phân bố từ trường tán tập trung lớn nhất tại khu vực giữa hai cuộn dây với giá trị lớn nhất lên đến 1,173 T.

Từ trường tại cạnh ngoài cùng cuộn dây thành phần hướng trục B_y là lớn hơn nhiều lần B_x với giá trị cực đại của từ trường là $B_y=1,153$ T. Với sự phân bố là lớn nhất ở giữa và giảm dần sang hai bên. Còn từ trường theo phương hướng kính $B_x = 0,177$ T phân bố tập trung ở hai đầu cuộn dây và bằng 0 tại chính giữa cuộn dây.

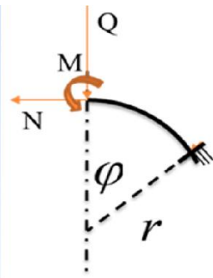
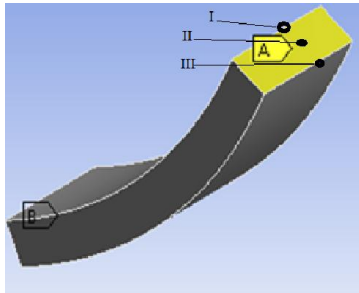
3.2.3. Tính ứng suất trên các vòng dây quấn

Mô hình cuộn dây HA được thể hiện ở Hình 7



Hình 7. Mô hình cuộn dây HA

Mô hình tính toán là mô hình hai đầu ngàm đối xứng A và B ở Hình 8 với ứng suất trên khung dây tại 3 vị trí: mặt trong cùng (I), giữa (II) và mặt ngoài cùng (III) tại mặt cắt sắt ngàm của dây dẫn. Để đơn giản hóa bài toán trong quá trình tính toán, ta mô hình hóa bài toán dưới dạng đối xứng $\frac{1}{2}$ có mô hình tương đương như ở Hình 9.



Hình 8. Mô hình 3D đoạn dây Hình 9. Mô hình tương đương

Trong mô hình này, để đảm bảo tính tương đương của mô hình tại mặt cắt đối xứng ta có 3 thành phần ngoại lực thay thế là N, Q, M. Trong đó: N là lực kéo (nén) có phương luôn tiếp tuyến với khung dây; Q là lực cắt có phương luôn hướng qua tâm; M là mômen uốn.

Áp dụng các công thức tính ứng suất cho dầm cong, ta có:

$$\sigma_{keo} = \frac{F_{keo}}{F}; \sigma_{uon} = \frac{M}{F \cdot a} \cdot \frac{y}{r_{th} + y}; \text{ và } \tau_{cat} = \frac{6Q}{bh^3} \cdot \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) \quad (10)$$

Trong đó: y là khoảng cách từ vị trí xét tới vị trí đường trung hòa; y > 0 nếu nằm phía ngoài vị trí đường trung hòa và ngược lại; r_{th} là bán kính đường trung hòa.

Theo Vom-Mises, ta có ứng suất tương đương của dây dẫn tại các vị trí (I), (II), (III) là [12]:

$$\sigma_{td} = \sqrt{(\sigma_{keo} + \sigma_{uon})^2 + \frac{3}{4} \tau_{cat}^2} \quad (11)$$

Bảng 3. Kết quả các ứng suất trên ba vị trí

Kết quả	Vị trí (I) với $y=-h/2$	Vị trí (II) với $y=0$	Vị trí (III) với $y=h/2$
Ứng suất σ (MPa)	19,305	4,133	11,038

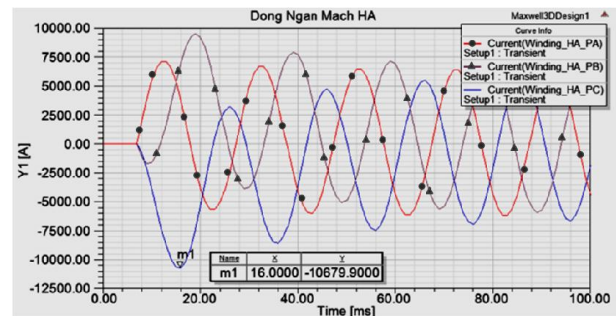
Thực hiện tính toán, ta được kết quả như Bảng 3. Từ kết quả này, ta nhận thấy ứng suất lớn nhất trên dây dẫn là ở vị trí (I), vị trí trong cùng tại mặt cắt ngàm với độ lớn là $\sigma_1 = 19,305$ Mpa.

3.3. Tính ứng suất trên dây dẫn sử dụng phương pháp PTHH bằng phần mềm ANSYS

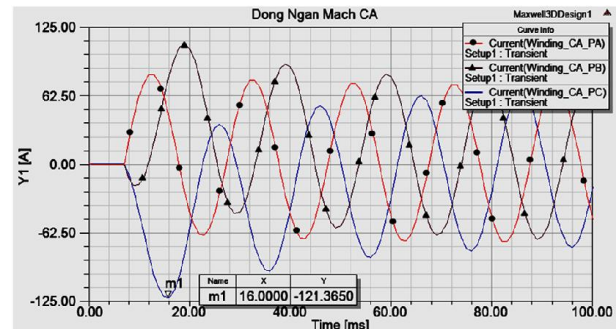
Trong mục này, tập trung vào việc xây dựng mô hình

mô phỏng các hiện tượng điện từ - cơ của hệ. Quá trình mô phỏng sử dụng phương pháp PTHH được tích hợp trong phần mềm ANSYS.

3.3.1. Kết quả phân tích dòng điện ngắn mạch trên cuộn dây CA, HA



Hình 10. Dòng điện quá độ trên các cuộn HA

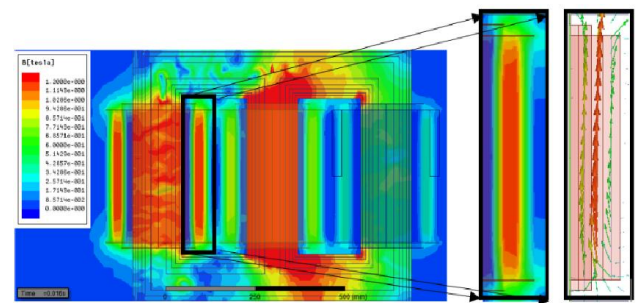


Hình 11. Dòng điện quá độ trên các cuộn CA

Nhìn Hình 10 và Hình 11 cho thấy tại thời điểm 0,016s, dòng điện quá độ cực đại lớn nhất trên các cuộn dây HA là dòng điện pha C với giá trị là $I_{HA_max} = 10679$ A. Tương tự, dòng điện ngắn mạch cực đại cuộn CA là $I_{CA_max} = 121,35$ A.

3.3.2. Kết quả phân tích từ trường tản

Kết quả phân bố từ trường tại thời điểm 0,016s được mô tả ở Hình 12.



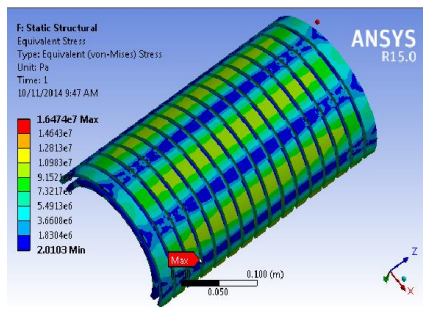
Hình 12. Biểu đồ màu đồng mức cảm ứng từ

Kết quả về từ thông tản trong cửa sổ mạch từ lớn nhất là 1,2T, phân bố tập trung ở khu vực giữa hai cuộn dây CA và HA.

Kết quả phân bố dạng vector cũng cho ta thấy cảm ứng lớn nhất phân giữa hai cuộn dây và có phương song song với trục cuộn dây, giảm dần về hai phía và có xu hướng đối hướng khi đến phân đầu mỗi cuộn dây.

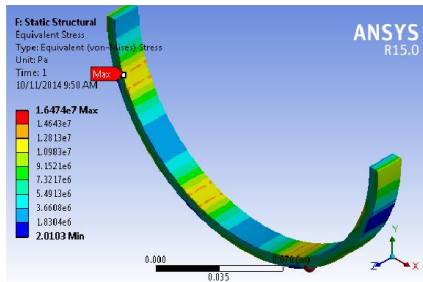
3.3.3. Phân tích ứng suất trên dây quấn với công cụ Mechanical

Mô hình mô phỏng áp dụng cho kết cấu khung dây thực, xét với mô hình đối xứng $\frac{1}{2}$ ở Hình 13.



Hình 13. Phân tích ứng suất trên 1/2 cuộn dây HA

Mô hình phân tích là một đoạn dây cong vật liệu đồng với góc cong là 0,78 rad. Các điều kiện về lực được nhập từ phần mềm Maxwell, tại thời điểm 0,016s là thời điểm dòng ngắn mạch pha C đạt cực đại. Các kết quả về phân bố lực được lấy từ phân bố lực trên cuộn HA pha C.



Hình 14. Kết quả về phân tích ứng suất trên vòng dây

Kết quả của quá trình phân tích ứng suất cho ta thấy ứng suất lớn nhất của khung dây dẫn là tại vị trí sát ngàm và mặt trong của dây dẫn với giá trị lớn nhất đạt được là $\sigma_{\max} = 16,47$ Mpa.

3.4. So sánh và đánh giá kết quả

Kết quả phân tích dòng ngắn mạch, từ trường tản và ứng suất lớn nhất trên dây dẫn của hai phương pháp giải tích và PTHH được so sánh với nhau ở Bảng 2.

Bảng 2. So sánh các kết quả giữa hai phương pháp

Thông số	Giải tích	PTHH	Sai lệch (%)
$I_{\max_HA}$ (A)	10551	10679	1,2
$I_{\max_CA}$ (A)	120,6	121,35	0,6
$B_{\max}$ (T)	1,173	1,2	2,3
$\sigma_{\max}$ (Mpa)	19,305	16,47	14,7

Nhìn từ Bảng 2, ta thấy kết quả dòng ngắn mạch, từ trường tản của hai phương pháp là không lệch nhau nhiều. Nhưng ở kết quả ứng suất lớn nhất lệch nhau là 14,7%, sở dĩ lệch nhau nhiều là do trong mô phỏng đã kể đến ảnh hưởng của vật liệu và kết cấu làm giá dây.

Từ đây, ta thấy rằng với mô hình mô phỏng số cho phép ta xây dựng được hình dạng hình học 3D giống với thực tế hơn. Đồng thời, quá trình phân tích có xét đến các hiện tượng trễ và có kể đến được sự không đối xứng trong mô hình phân tích, điều mà trong mô hình giải tích giả sử là đối xứng. Qua đó có thể nhận định rằng với mô phỏng số cho được kết quả chính xác hơn so với giải tích. Tuy nhiên, về mặt thời gian phân tích thì mô phỏng số yêu cầu về thời gian cũng như tài nguyên máy tính là lớn hơn nhiều so với

phương pháp giải tích.

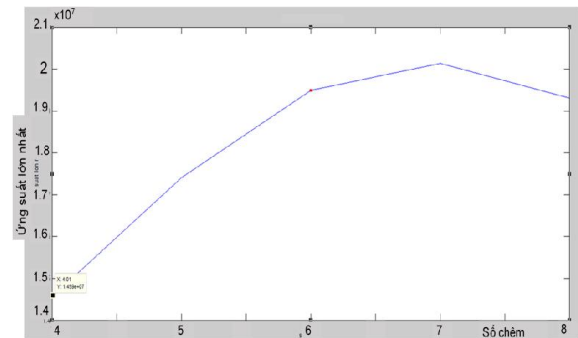
Như kết quả phân tích ở trên, ứng suất lớn nhất trên kết cấu dây dẫn là 16,4 Mpa, là nhỏ hơn tiêu chuẩn an toàn đối với vật liệu đồng rất nhiều ($[\sigma_{cp}] = 160$ MPa). Do vậy ta tiến hành tối giảm số gá khung dây xuống để cải thiện đặc tính làm mát cho hệ.

3.5. Tối ưu hóa kết cấu khung dây

Phương án nghiên cứu tối ưu tiếp theo là sử dụng mô hình giải tích để tìm ra số lượng gá phù hợp nhỏ nhất, nhưng vẫn đảm bảo độ bền. Sau đó nghiệm lại kết quả tối ưu đó bằng mô phỏng số để đánh giá kết quả.

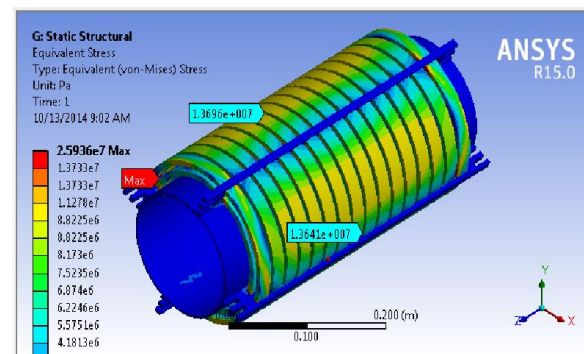
Phân tích tập trung khảo sát số gá trong phạm vi từ 4-8 gá của khung dây HA. Toàn bộ quy trình tính thực hiện bằng chương trình lập trình Matlab.

Kết quả phân tích với các trường hợp số gá thay đổi, ta được biểu đồ ứng suất theo số gá ở Hình 12.



Hình 15. Giá trị ứng suất lớn nhất theo số thanh gá

Hình 15 cho thấy giá trị ứng suất với trường hợp số thanh gá là 4 đạt được là 14,59 MPa.



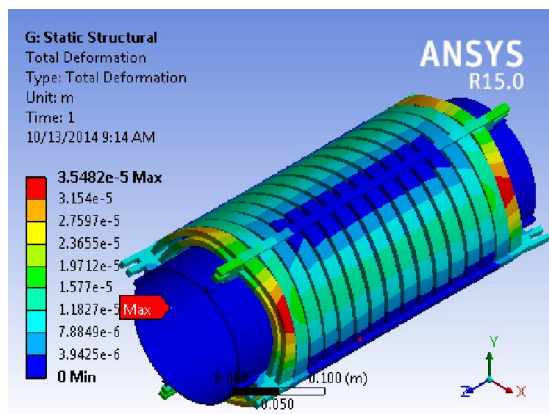
Hình 16. Kết quả phân bố trường ứng suất trên toàn bộ khung dây dẫn

Tuy nhiên, khi số chêm giảm cánh tay đòn với lực hướng trục lại tăng lên, do vậy lúc này ta cần khảo sát lại ảnh hưởng của lực hướng trục.

Tiến hành kiểm nghiệm lại toàn bộ ứng suất trên khung dây cho trường hợp số gá là 4 bằng công cụ mô phỏng số.

Kết quả phân bố ứng suất trên toàn bộ cuộn dây Hình 16 cho thấy giá trị ứng suất lớn nhất trên khung dây dẫn đạt là 25,94 MPa tại vị trí hai đầu cuộn dây. Trong trường hợp giảm số thanh gá thì ứng suất lớn nhất tăng lên, nhưng vẫn đạt yêu cầu vì nhỏ hơn $[\sigma_{cp}] = 160$ MPa.

Kết quả phân tích về chuyển vị của hệ được mô tả ở Hình 17.



Hình 17. Hình ảnh chuyển vị tổng của hệ

Nhìn Hình 17, ta thấy chuyển vị lớn nhất của hệ là 0,0355mm. Từ kết quả phân tích trên ta nhận thấy, với kết cấu khung dây dẫn HA của MBA đã cho, ta có giảm số gá liên kết xuống còn 4 thanh thì vẫn đảm bảo an toàn cho MBA hoạt động trong tình trạng ngắn mạch.

4. Kết luận

Bài báo đã xây dựng một quy trình phân tích điện từ - cơ học cho một hệ chịu tác động của lực điện từ. Ứng dụng phương pháp giải tích và PTHH được tích hợp trên phần mềm Matlab và ANSYS để tính ứng suất ngắn mạch trên cuộn dây HA trong điều kiện ngắn mạch ba pha của MBA phân phối 250kVA.

Xây dựng một quy trình tính toán tối ưu số thanh gá của khung dây quấn cuộn HA kết hợp giữa phương pháp giải tích số và PTHH để rút ngắn được thời gian phân tích tính toán, đồng thời đảm bảo yêu cầu về độ chính xác và quá trình làm mát của MBA.

Việc tìm ra ứng suất lực lớn nhất trên cuộn dây, độ bền dây quấn trong điều kiện ngắn mạch, đồng thời tối ưu số gá của khung dây quấn nhằm mang lại hiệu quả về kinh tế và đảm bảo các tiêu chuẩn kỹ thuật khác là rất cần thiết trong thiết kế, sản xuất, thử nghiệm và vận hành MBA.

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, 2011.
- [2] Hajiaghahi, S. and K. Abbaszadeh, "Analysis of Electromagnetic Forces in Distribution Transformers Under Various Internal Short-Circuit Faults," *CIREN Regional - Iran, Tehran*, vol. 13–14, pp. 1–9, 2013.
- [3] 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
- [4] Marcel Dekler, "Transformer_Engineering - Design and Practice - Chapter 6: Short Circuit Stresses and Strength," no. year 2000, pp. 231–275.
- [5] 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.
- [6] Hyun-mo Ahn - Yeon-ho Oh and - 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, pp. 819–822, February, 2012.
- [7] J. Y. Lee - H.M Ahn -J. K. Kim and - Y. H. Oh - S. C. Hahn, "Finite element analysis of short circuit electromagnetic force in power transformer," *2009 International Conference on Electrical Machines and Systems*, no. 4, 2009, pp. 1–4.
- [8] Ho S. L., Y. Li, H. C. Wong, S. H. Wang, R. Y. Tang, "Numerical Simulation of Transient Force and Eddy Current Loss in a 720-MVA Power Transformer," *Electromagnetic Field*, vol. 40, no. 2, 2004, pp. 687–690.
- [9] Hyun-mo Ahn - Ji-yeon Lee, - Joong-kyoung Kim, and Yeon-ho Oh - Sang-yong Jung, "Finite-Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 3, pp. 1267–1272, May 2011.
- [10] Đặng Văn Đào - Lê Văn Doanh, *Các phương pháp hiện đại trong nghiên cứu tính toán thiết kế kỹ thuật điện*, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, tr 1–291, 2001.
- [11] Gerard Meunier, *The Finite Element Methods for Electromagnetic Modeling*, John Wiley. London, p. 618, 2008.
- [12] Vũ Đình Lai, Nguyễn Xuân Lữ, Bùi Đình Nghi, *Sức bền vật liệu*, Nxb Giao thông vận tải, 2008.

(BBT nhận bài: 31/08/2016, phân biện xong: 12/09/2016)