

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA LỰC ĐIỆN TỪ ĐẾN ỨNG SUẤT CÁC CUỘN DÂY MÁY BIẾN ÁP MỎ

TS. BÙI MINH ĐỊNH, ThS. PHẠM MINH TÚ
Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Trong quá trình đóng cắt máy biến áp (MBA) đang mang tải, các sự cố quá dòng, quá áp và ngắn mạch một pha, 3 pha thường hay xảy ra. Điều này có thể dẫn tới phá hủy các cuộn dây của MBA dưới tác dụng của lực điện từ. Khi ngắn mạch dòng điện tăng lên vài chục lần dòng định mức, lực điện từ tỷ lệ bình phương với dòng điện sẽ tăng lên vài trăm lần định mức. Nếu kết cấu dây quấn không chịu được, lực cơ kéo điện từ sẽ phá hủy kết cấu dây quấn MBA. Do vậy, liệu kết cấu cơ khí của cuộn dây MBA có đủ độ bền chịu được lực điện từ lớn nhất khi sự cố ngắn mạch xảy ra trong khoảng thời gian mà các thiết bị đóng ngắt chưa kịp hoạt động? Việc nghiên cứu vấn đề này gặp nhiều khó khăn cả về lý thuyết cũng như thực nghiệm, bởi vì các quá trình biến đổi về điện từ-cơ-nhiệt khi MBA đang hoạt động là phức tạp, đồng thời các thử nghiệm ngắn mạch cũng rất tốn kém. Đã có nhiều tác giả thực hiện việc khảo sát lực điện từ bằng phương pháp phần tử hữu hạn [1]-[5]. Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu tính toán và mô phỏng lực điện từ và ứng suất trong kết cấu các cuộn dây MBA trong trường hợp này.

1. Xây dựng mô hình toán của MBA

Mô hình áp dụng là mô hình MBA phân phối 3 pha điện áp 35/0,4 kV; công suất - 400k VA; Tổng hao không tải (P_0) - 800 W; Tổng hao ngắn mạch (P_n) - 3100 W; Dòng không tải (I_0) - 6 %; Điện áp ngắn mạch (U_n) - 8 %;

1.1. Lực điện từ

Lực hướng kính là kết quả tác dụng của dòng điện với từ trường dọc trục song song với trục dây quấn MBA; từ trường ngang làm xuất hiện lực dọc trục của MBA;. Trong phần này trình bày phân bố đường sức từ trường tản của dây quấn đồng tâm đối xứng. Nếu đường sức từ trường song song với trục, lúc đó chỉ có lực hướng kính. Lực này kéo dây quấn bên ngoài và nén dây quấn bên trong, làm tăng khoảng cách giữa 2 dây quấn. Trong thực tế bao giờ cũng tồn tại khoảng cách giữa hai dây quấn và giữa dây quấn với gông, làm đường sức

từ trường ở cuối dây quấn bị cong. Vì vậy, ngoài lực hướng kính còn có lực hướng trục. Trong H.1 mô tả tách riêng từ trường ngang trục ở đầu dây quấn (dây quấn cùng chiều). Từ trường ngang ở dây quấn sát mạch từ sẽ lớn hơn. Độ lớn của lực điện từ được xác định theo định luật Lorenz được cho bởi công thức (1) hay dạng vi phân như (2):

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

$$dF = B \cdot I \cdot dl = B \cdot J \cdot s \cdot ds \quad (2)$$

Trong đó: I, J - Cường độ và mật độ dòng điện chảy trong dây dẫn; B - Cảm ứng từ; F - Lực điện từ tác động lên dây dẫn; ds, dl - Các thành phần vi phân diện tích và chiều dài.

1.2. 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 cửa sổ mạch từ của MBA, có mật độ dòng điện của nguồn σ . Phương trình này được viết cho vectơ từ thế A có dạng phương trình Laplace-Poisson như (3) hoặc (4) [6]:

$$\nabla^2 A = \mu \sigma \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = \mu \sigma \quad (4)$$

Trong đó: A - Từ thế véc tơ; μ - Độ từ thẩm; σ - Mật độ dòng điện.

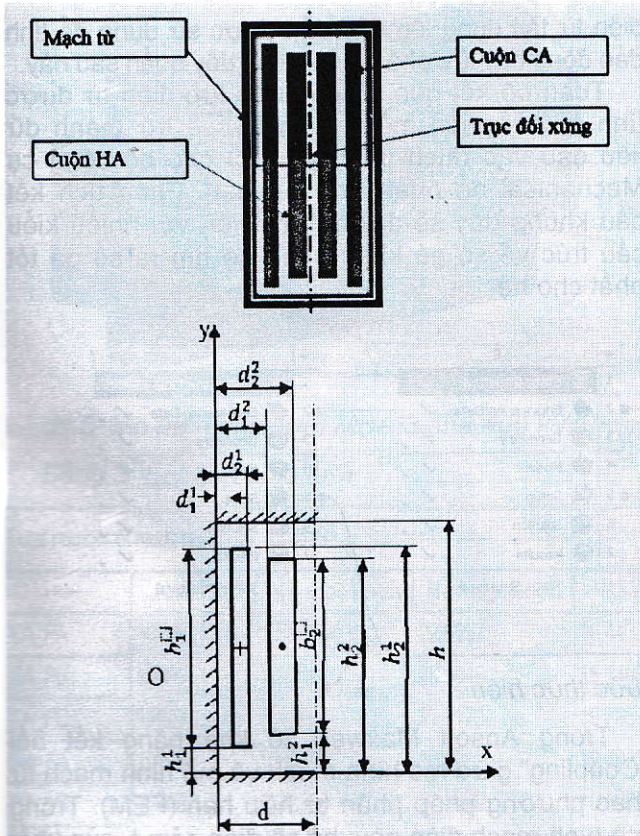
Khi đó cảm ứng từ B được xác định bởi công thức:

$$B = \nabla \cdot A \quad (5)$$

1.3. Mô hình toán từ trường trong MBA

Để xác định lực điện từ tác động lên dây quấn nằm trong cửa sổ mạch từ MBA, các kích thước hình học của MBA được quy định như trong H.1. Do tính chất mặt đối xứng nên tại mặt cắt dòng điện trên cả cuộn dây cao áp và hạ áp có phương vuông góc với mặt phẳng. Đồng thời từ trường, và từ thế biến thiên theo phương vuông góc với mặt phẳng bị triệt tiêu, đây chính là điều kiện biên khi mô phỏng:

$$B_z = \frac{\partial A}{\partial z} = 0. \quad (6)$$



H.1. Kích thước hình học cửa sổ mạch từ

Do tính chất đối xứng của trục mô hình tại (x=0) nên tại đó từ trường theo phương vuông góc với trục đối xứng và bằng 0.

$$\begin{cases} B_x(y=h) = -\sum_j \sum_k A_{jk} \cos m_j x \sin n_k h = 0 \quad \forall x \\ B_x(x=y) = -\sum_j \sum_k A_{jk} \sin m_j d \cos n_k h = 0 \quad \forall x \end{cases} \quad (7)$$

Bảng 1. Kích thước hình học của MBA

Các thông số cơ bản	Kí hiệu	Đơn vị tính	Giá trị
Đường kính lõi trụ	D _{trụ}	mm	160
Chiều cao trụ	h _{trụ}	mm	550
Khoảng cách tâm trụ	C _{trụ}	mm	320
Vật liệu tôn silic	27GH100		
Chiều cao cửa sổ mạch từ	H _{CS}	mm	410
Chiều cao cuộn cao áp	H _{CA}	mm	345
Đường kính trong cuộn CA	D _{in-CA}	mm	248
Đường kính ngoài cuộn CA	D _{out-CA}	mm	302
Số vòng dây cuộn cao áp	n _{CA}	vòng	2800
Chiều cao cuộn hạ áp	H _{HA}	mm	375
Đường kính trong cuộn HA	D _{in-HA}	mm	171
Đường kính ngoài cuộn HA	D _{out-HA}	mm	212

Véc tơ từ thế xác định dựa theo phân bố từ trường trên toàn bộ mạch từ và được xác định như sau:

Với j=1, k≠1

$$A_{1,k} = \frac{2 \cdot \mu_0}{n_k^3 d \cdot h} \sum_{s=1}^g \sigma_s a_s (\sin n_k h_2^s - \sin n_k h_1^s) \quad (8)$$

Với k=1, j≠1

$$A_{j,1} = \frac{2 \cdot \mu_0}{m_j^3 d \cdot h} \sum_{s=1}^g \sigma_s b_s (\sin m_j d_2^s - \sin m_j d_1^s) \quad (9)$$

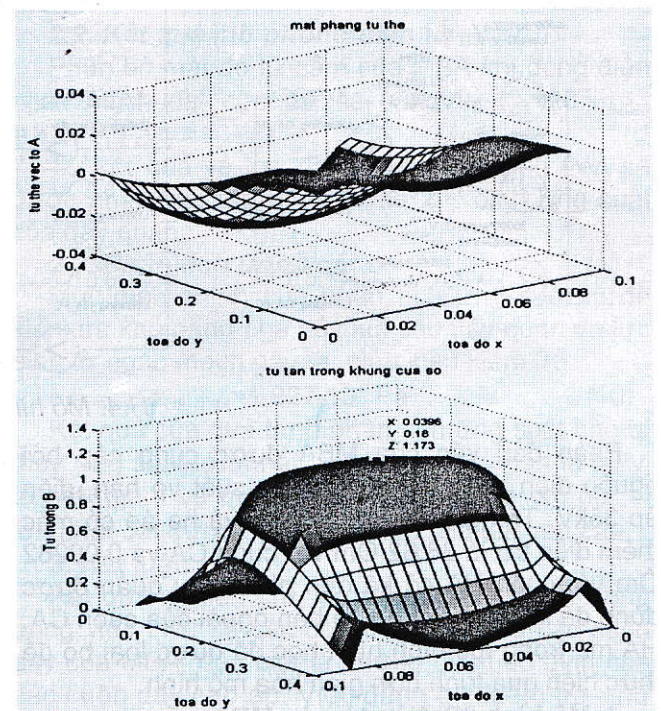
Với k≠1, j≠1

$$A_{j,k} = \frac{4 \cdot \mu_0}{m_j n_k d \cdot h \cdot (m_j^2 + n_k^2)} \cdot \sum_{s=1}^g \sigma_s (\sin m_j d_2^s - \sin m_j d_1^s) (\sin n_k h_2^s - \sin n_k h_1^s) \quad (10)$$

Với k=j=1 thì A_{0,0}=hằng số; trong phần này ta chỉ quan tâm tới phân bố của từ trường. Do vậy, ta chỉ cần quan tâm tới thành phần đạo hàm của A mà không quan tâm tới giá trị của A. Do đó, thành phần A_{0,0} có thể bỏ qua khi tính từ thế véc tơ A.

$$\begin{cases} B_x = \frac{\partial A}{\partial y} = \frac{\partial (A_{i,k} + A_{j,1} + A_{j,k})}{\partial y} \\ B_y = \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{\partial (A_{i,k} + A_{j,1} + A_{j,k})}{\partial x} \end{cases} \quad (11)$$

Khai triển B_x, B_y theo (11) ta thu được phân bố từ tản trong cửa sổ mạch từ được biểu diễn như trên đồ thị H.2.



H.2. Phân bố từ thế A và mật độ từ cảm B

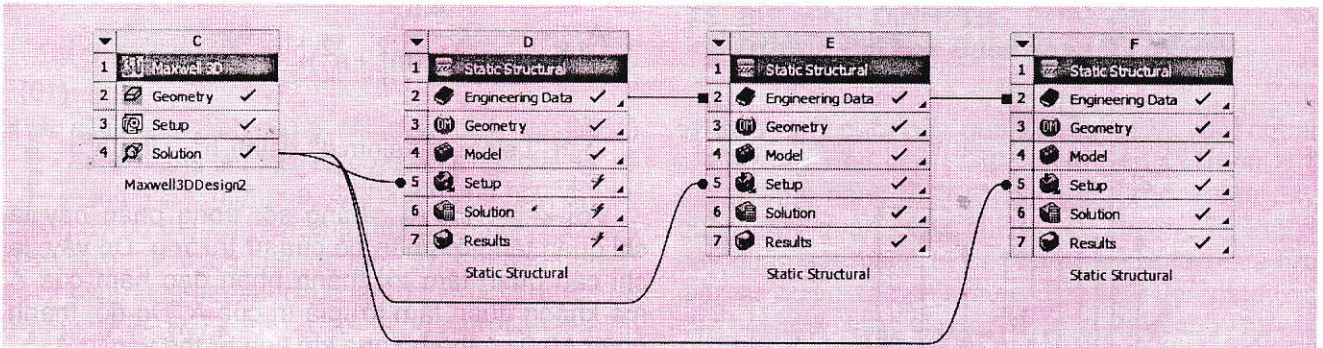
Từ đồ thị phân bố từ trường tần (H.2) ta nhận thấy từ trường tần tập trung lớn nhất tại khu vực giữa hai cuộn dây với giá trị lớn nhất lên đến 1.173 T.

2. Mô hình mô phỏng lực điện từ 3D Maxwell

Trước hết quá trình phân tích điện từ sẽ được thực hiện trên phần mềm Maxwell. Sau đó, kết quả phân bố điện áp, dòng điện, từ trường của MBA sẽ được tiến hành tiếp theo. Các kết quả về phân bố lực

điện từ tác dụng lên dây dẫn được sử dụng để tính dao động hay lực phá hủy kết cấu dây quấn sau này.

Toàn bộ kết quả về phân bố lực điện từ được tính ra bởi phần mềm Maxwell, sẽ trở thành dữ liệu đầu vào (kích thích về lực) cho bộ công cụ Mechanical để phân tích kết cấu. Phân tích kết cấu khung dây sẽ được thực hiện với nhiều kiểu cấu trúc về số gá khác nhau để tìm ra số gá tốt nhất cho hệ.



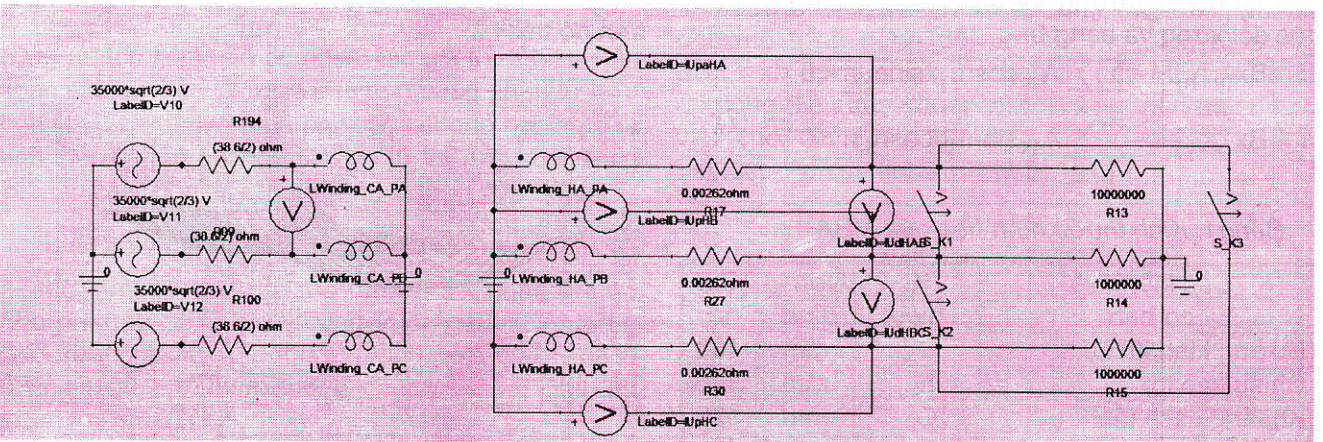
H.3. Lưu đồ các bước thực hiện

2.1. Xây dựng mô hình

Kết thúc quá trình phân tích ta tìm ra được số gá hợp lý đồng thời thấy rõ được hình ảnh phân bố của ứng suất trên toàn bộ kết cấu dây dẫn trên cuộn HA của MBA.

❖ Mô hình mạch điện MBA

Trong Ansoft Maxwell có khả năng kết nối "Coupling" giữa mô hình mạch và mô hình mạch từ theo phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Trong mô hình mạch điện này, hệ số điện cảm L của khối cuộn dây CA và HA được lấy từ mô hình mô phỏng 3D cho từng giá trị dòng điện và điện áp đầu vào.



H.4. Mô hình mạch điện

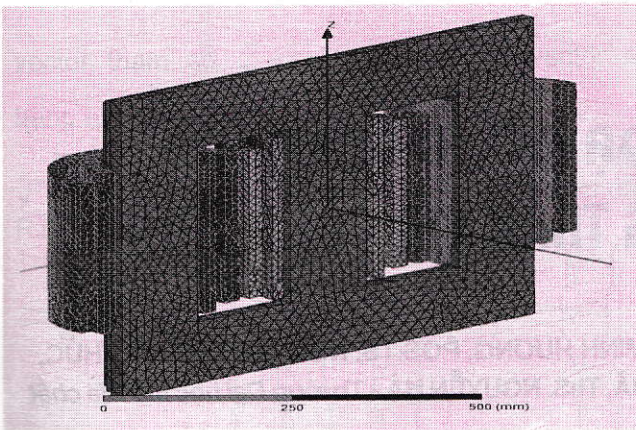
Phần đầu vào của MBA được cung cấp bởi nguồn điện xoay chiều có công suất vô hạn, điện áp 35kV. Trong cả mạch cao áp và hạ áp có mắc thêm điện trở là 38,62 Ôm với cuộn CA và 0,00262 Ôm với cuộn HA có kể đến phần dây quấn được dùng để liên kết, kết nối ra bên ngoài của cuộn CA, HA mà trong mô hình hình học đã được loại bỏ để thực hiện quá trình đơn giản hóa mô hình.

❖ Mô hình 3D điện từ của MBA

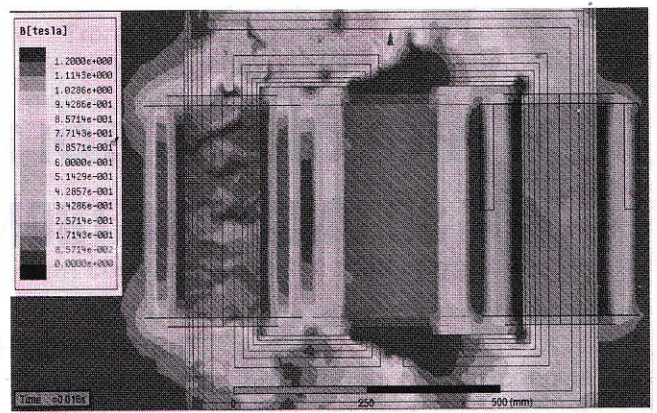
Sau khi định nghĩa các vật liệu dẫn từ, dẫn điện và

dòng điện kích thích cho cuộn dây sơ cấp và thứ cấp trường hợp ngắn mạch 1 pha. Lưới chia sử dụng phần tử tứ diện với kết quả lưới được mô tả như trong H.5. Kết quả chia lưới được ghi trong Bảng 3. Tổng số phần tử lưới chia là 232.559 phần tử.

Số lượng phần tử lưới trên cuộn HA pha C là 83.100 phần tử, nhiều gấp 4,22 lần so với cuộn HA pha B và A do trong mô hình này các kết quả về phân bố lực trên pha C sẽ được sử dụng cho phân tích kết cấu sau này.



H.5. Mô hình chia lưới MBA 3 pha 400 kVA

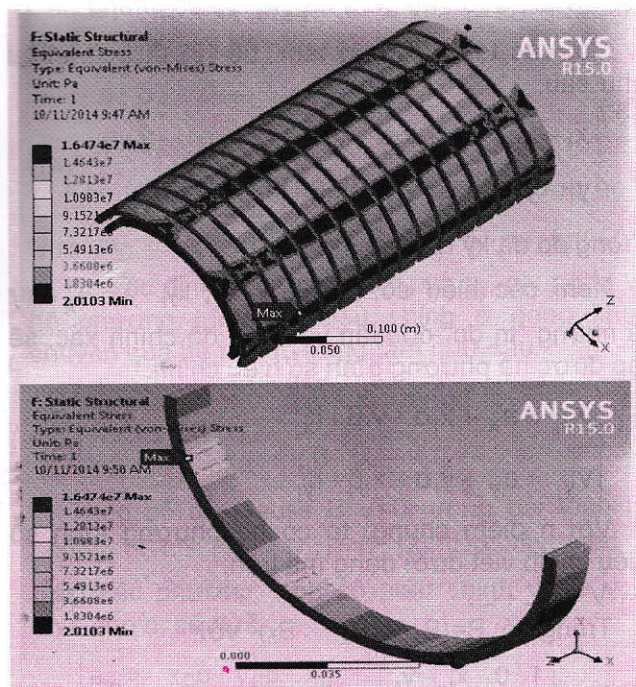


H.6. Phân bố mật độ từ cảm MBA khi I_{HA-max}

Bảng 3. Kết quả chia lưới

Total number of mesh elements: 232559

	Num Tets	Min edge length	Max edge length	RMS edge length	Min tet vol	Max tet vol	Mean tet vol	Std Devn (vol)
CA_PA	18798	9.56916	22.6557	16.4433	27.907	671.693	214.411	77.5857
CA_PB	19686	10.0746	25.0046	16.2408	31.7805	691.707	204.583	76.3129
CA_PC	17521	8.73785	21.7172	16.7659	34.8196	734.149	229.958	86.6386
HA_PA	10709	9.95236	20.6717	16.4829	37.9592	570.736	215.45	77.0014
HA_PB	10603	9.02071	21.0455	16.5601	27.6575	594.8	217.657	78.483
HA_PC	83100	4.49576	11.4814	8.07129	1.8247	89.2413	27.812	9.85332
Region	57204	6.49264	582.072	48.8469	0.232966	9.80816e+00...	9621.4	136258
TransCore1	14938	12.9761	195.717	40.088	67.8542	25004	1532.14	1729.57



H.7. Phân bố ứng suất trên dây quấn MBA

2.2. Kết quả mô phỏng điện từ

Phân bố mật độ từ cảm của MBA khi dòng điện ngắn mạch đạt cực đại sẽ bằng $I_{HA-max}=20.I_{HA-dm}=10679,9 A$.

Từ kết quả về lực điện được xác định trên sẽ được nhập vào mô hình cơ để xác định ứng suất của dây quấn.

2.3. Phân tích ứng suất cơ

Mục đích chính của phân tích ứng suất là để kiểm tra khả năng phá hủy kết cấu dây quấn do lực điện từ ngắn mạch gây ra, điều kiện kiểm tra:

$$\sigma_{HA-max} \leq \sigma_{HA-max} = 1,927 \cdot 10^7 Pa. \quad (10)$$

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 $\sigma_{HA-max}=1,6 \cdot 10^7 Pa$ đạt yêu cầu.

3. Kết luận

Kết quả nghiên cứu có ý nghĩa rất quan trọng trong việc thiết kế các đồ gá cơ khí cho các cuộn dây của MBA, đặc biệt là những điểm cố định của các cuộn dây cao áp. Việc đánh giá kiểm tra ứng

(Xem tiếp trang 32)

+ Tiến hành trồng cây, cải tạo phục hồi môi trường trên bãi thải đối với những khoảnh khai thác đã kết thúc trước đó;

❖ Ngoài các giải pháp về công nghệ-kỹ thuật trên, nhóm tác giả cũng kiến nghị các cơ quan, đơn vị phải thường xuyên đào tạo nâng cao trình độ, ý thức, trách nhiệm của công nhân và cán bộ quản lý về kiến thức và kỹ năng an toàn trong quá trình khai thác; Thanh kiểm tra thường xuyên và có chế độ khen thưởng, xử phạt hợp lý đối với công tác an toàn trên các mỏ hiện nay. □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Sỹ Hội (2010). Bài giảng Khai thác bằng sức nước. Trường Đại học Mỏ-Địa chất.

Người biên tập: Nguyễn Bình

SUMMARY

In Vietnam, demand for Titanium in the domestic industries as well as exports are increasing. Titanium mineral in coastal areas of Bình Định-Phú Yên-Khánh Hòa have ilmenit content is about 40 kg/m³ or 200 kg/m³ in particular. Bình Định province have the ilmenit reserves is about 1.571 thousand tons, rutil is about 1.98 thousand tons. Khánh Hòa Province has resources and reserves of ilmenite are about 2 million tons and zircon is about 52 thousand tons.

Currently, the technology of mining for the Titanium mineral sand is using hydraulic king with the floats processing. However, some of the Titanium alluvial in Bình Định coastal have characteristics and geological structure were the barge have alluvium from sand dunes with size of sand are small and friable, the middle layer is argillaceous sandstone and the below layer is sand of large size. In the mining process, the pit slop is instability and remote by natural falling. Therefore, the falling volumes is difficult for control, cause falling of pit slop with large volume and create the large wave to destroy the system of floats and latent mortal danger for worker in the float.

The paper studies the solutions to ensure slop stability, safety and effective for some of the Titanium alluvial in Bình Định province.

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG...

(Tiếp theo trang 39)

suất phá hủy sau khi gia công dây quấn là rất quan trọng và có ý nghĩa cho kỹ sư thiết kế MBA. □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Marcel Dekler, "Transformer_Engineering_-_Design_and_Practice - Chapter 6: Short Circuit Stresses and Strength", year 2000, pp. 231-275.

2. H. Ahn, Y. Oh, J. Kim, J. Song, and S. 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.

3. S. Hajiaghasi and K. Abbaszadeh, "Analysis of Electromagnetic Forces in Distribution Transformers Under Various Internal Short-Circuit Faults," CIREC Regional - Iran, Tehran, pp. 13-14, 13-14 Jan 2013.

4. 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.

5. A. C. De Azevedo, A. C. Delaiba, J. C. De Oliveira, B. C. Carvalho, and 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.

6. 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. 2006.

Người biên tập: Đào Đắc Tạo

SUMMARY

When short circuit occurs, the short circuit current will generate electromagnetic forces hundreds of times larger than the norm, which could destroy the transformer winding structure caused by the effect of these forces. The paper presents some results of research and simulation of electromagnetic and structural stress in the windings of the transformer in this case.