PHƯƠNG PHÁP XÂY DỰNG ĐẶC TÍNH TỪ HÓA CỦA MÁY BIẾN ÁP ĐIỆN LỰC THÔNG QUA THÍ NGHIỆM KHÔNG TẢI VÀ GIẢI TÍCH

BUILDING MAGNETIZATION CHARACTERISTIC METHOD FOR POWER TRANSFORMER BY NO-LOAD EXPERIEMENT AND ANALYTICAL CALCULATION

Nguyễn Đức Quang[1,*], Trần Tuấn Vũ[2]

TÓM TẮT

Máy biến áp (MBA) là một phần tử rất quan trọng trong hệ thống truyền tải điện năng. Thực tế trong hệ thống điện, muốn truyền tải và phân phối công suất từ nhà máy điện đến các hộ tiêu thụ một cách hợp lý phải qua nhiều lần tăng và giảm điện áp. Vì vậy, việc nghiên cứu MBA luôn có ý nghĩa thiết thực trong sản xuất và vận hành hệ thống điện. Mạch từ giữ vai trò không thể thiếu trong vận hành MBA tuy nhiên trong một số trường hợp đặc tính từ hóa của mạch từ không phải lúc nào cũng được cung cấp đầy đủ và chính xác. Bài báo đề xuất phương pháp xác định đặc tính từ hóa của mạch từ MBA dựa trên kết hợp thí nghiệm không tải và giải tích. Phương pháp nghiên cứu được áp dụng tính toán chi tiết với một MBA cụ thể của hãng ABB. Bài toán điện từ trường phần tử hữu hạn trong một cấu trúc MBA ba chiều đã được phân tích và tính toán để xác thực phương pháp đề xuất.

***Từ khóa**: Máy biến áp lực, đặc tính từ hóa của mạch từ, phương pháp phần tử hữu hạn, chế độ không tải, mạch thay thế hình T.*

ABSTRACT

The transformer is a very important element in the power transmission system. In fact, it is necessary to increase or decrease several times the voltage when transmitting the energy from the power station to the consumption. Consequently, the transformer's research plays a crucial role in conception and operation. Magnetic circuit plays an indispensable role in the operation of the transformer, but in some cases the its magnetization characteristic is not always provided fully and accurately. The paper proposes a method to build the magnetization characteristic of the transformer magnetic circuit based on a combination of no-load experiment and analytic calculation. The research principle is applied in detail with a ABB distribution transformer. The finite element electromagnetic field problem in a 3D transformer structure was analyzed and calculated to validate the proposal method.

***Keywords:** Power transformers, magnetization characteristic of magnetic circuit, finite element method, no-load mode, T-shaped equivalent circuit.*

[1]Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực
[2]Viện Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
[*]Email: quangndhtd@epu.edu.vn
Ngày nhận bài: 20/02/2021
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/4/2021
Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2021

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Máy biến áp (MBA) là một trong những phần tử quan trọng nhất trong hệ thống điện khi chịu trách nhiệm liên kết phần nguồn, truyền tải và phân phối điện năng. Vì vậy, việc nghiên cứu MBA là rất cần thiết và là một trong những mối quan tâm lớn trong lĩnh vực kỹ thuật điện. Trên thế giới, việc nghiên cứu MBA đã được thực hiện từ lâu, theo nhiều hướng khác nhau. Những nghiên cứu có thể tập trung vào việc giải quyết các vấn đề bên trong máy như giảm tổn hao của MBA [1-2]. Hoặc như nghiên cứu về ảnh hưởng của các tác động của môi trường đến quá trình vận hành và tuổi thọ của MBA. Bagheri [3] đã tính toán những tác động của nhiệt độ đến cách điện trong MBA khô. Kết quả cho thấy, dưới tác dụng của nhiệt độ cao, lớp cách điện bị xuống cấp và lão hóa nhanh hơn. Qua đó, tác giả đã xây dựng một hệ thống có thể tiên lượng nhiệt độ của MBA thông qua nhiệt độ môi trường. Các nghiên cứu chuyên sâu về cấu tạo, vật liệu sử dụng để sản xuất MBA cũng là một hướng nghiên cứu quan trọng. Keflas [4] đã đề cập đến việc giảm tổn thất tiêu hao trong MBA bằng cách sử dụng lõi từ composite. Bài báo đã chứng minh rằng khi sử dụng lõi từ composite, nhà sản xuất sẽ thu được điểm tối ưu giữa chi phí chế tạo máy mà vẫn đảm bảo được chất lượng tiêu chuẩn.

Bài báo trình bày phương pháp nghiên cứu có thể xác định đặc tính từ hóa của mạch từ MBA dựa trên sự kết hợp thí nghiệm không tải và giải tích. Thí nghiệm không tải [5,10] là một trong những thí nghiệm chủ chốt của MBA nói riêng và máy điện nói chung. Kết quả thu được từ thí nghiệm không tải sẽ được phát triển theo các hàm giải tích để tính xấp xỉ đặc tính từ hóa của mạch từ MBA nghiên cứu. Ngoài ra, thí nghiệm MBA là rất cần thiết, tuy nhiên điều này cũng sẽ kéo theo những đòi hỏi về cơ sở vật chất và chi phí thực hiện. Vì vậy, trước khi áp dụng các thuật toán giải tích nghiên cứu, các tác giả sẽ xây dựng mô hình mô phỏng MBA trong chế độ không tải qua đó xác định các tham số đầu vào. Các kết quả mô phỏng này sẽ được kết hợp với phương pháp giải tích đề xuất để xác định đặc tính mạch từ hóa của đối tượng nghiên cứu. Phương pháp

nghiên cứu sẽ được áp dụng tính toán với một máy biến áp phân phối thực tế của hãng ABB nhằm so sánh và xác thực mô hình.

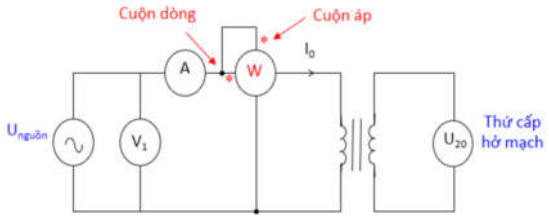
2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Bài báo đề xuất phương pháp kết hợp thí nghiệm không tải MBA và giải tích để xác định đặc tính từ khóa B(H) của mạch từ MBA. Tính toán không tải MBA có thể được thực hiện bằng thí nghiệm hoặc bằng mô phỏng.

2.1. Phương pháp xác định đặc tính từ hóa MBA

Thí nghiệm không tải

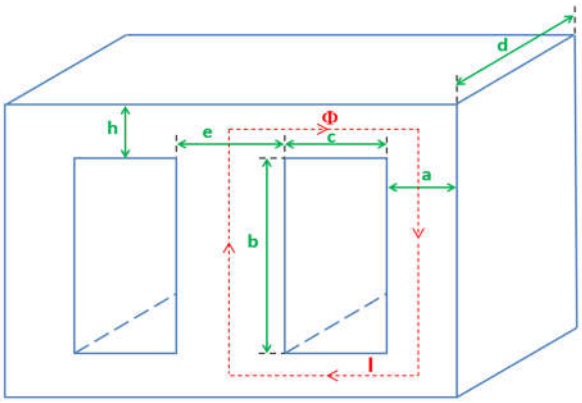
Sơ đồ thí nghiệm được thể hiện như hình 1.



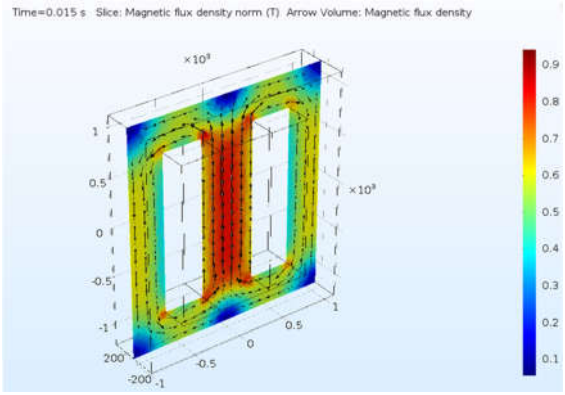
Hình 1. Sơ đồ thí nghiệm không tải MBA

Đặt vào cuộn sơ cấp điện áp U_1 bằng điện áp định mức của MBA, phía thứ cấp để hở mạch. MBA cũng sẽ được thí nghiệm hoặc mô phỏng ở chế độ hở mạch để tính toán các giá trị tương ứng trong sơ đồ mạch I_0, P_0, U_{20} qua đo đạc thí nghiệm hoặc bằng phương pháp phần tử hữu hạn.

Phương phá xác định đường cong từ hóa của mạch từ



a)



b)

Hình 2. Kích thước mạch từ (a) và ví dụ kết quả mô phỏng mạch từ MBA (b)

Sau khi thành lập mô hình phần tử hữu hạn MBA nghiên cứu, mô phỏng tính toán trong trường hợp thí nghiệm không tải sec được thực hiện. Kết quả tính toán mô phỏng thu được các cặp giá trị (U_1,I_0), lần lượt là điện áp đặt vào dòng điện thu được trên cuộn sơ cấp trong thí nghiệm không tải.

Sức điện động trên cuộn sơ cấp:

$$E_1 = U_1 - I_o.R_1 = 4,44.f_1.n_1.\phi_m \quad (1)$$

Trong đó: $f_1, I_o, R_1, n_1, \phi_m$ lần lượt là tần số nguồn điện, dòng điện, điện trở, số vòng dây cuộn sơ cấp và từ thông cực đại chạy trên mạch từ MBA.

Từ thông cực đại chạy trong mạch từ:

$$\phi_m = B_m.S = B_m.e.d \quad (2)$$

Trong đố: B_m, S, e, d lần lượt là từ trường cực đại, diện tích mặt cắt từ thông truyền qua và các kích thước tương ứng.

Thay (2) vào (1) ta có:

$$E_1 = 4,44.f_1.n_1.B_m.e.d \Rightarrow B_m = \frac{E_1}{4,44.f_1.n_1.e.d} \quad (3)$$

Chiều dài mạch từ:

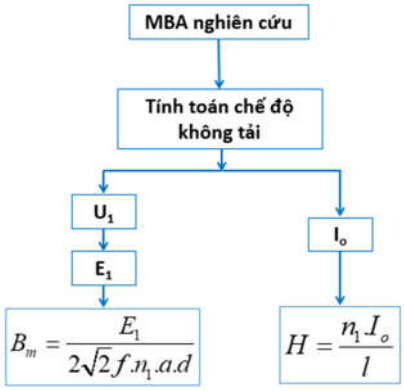
$$l = 2\times(b+c) + a + e + 2\times h \quad (4)$$

Do đó, cường độ từ trường mạch từ MBA thu được là:

$$n_1.I_o = H.l \Rightarrow H = \frac{n_1.I_o}{l} \quad (5)$$

Trong đó, I_o, H, l làn lượt là dòng điện sơ cấp, cường độ từ trường và chiều dài mạch từ MBA.

Dựa vào kết quả (U_1, I_0) thu được từ chế độ không tải của MBA kết hợp các phân tích biến đổi giải tích, giá trị cảm ứng từ B và mật độ từ trường H chạy trong mạch từ sẽ được xác định.



Hình 3. Phương pháp xác định đường cong B(H) bằng mô phỏng và giải tích

Hình 3 biểu diễn phương pháp xác định đặc tính mạch từ của MBA bằng mô phỏng phần tử hữu hạn và biến đổi giải tích.

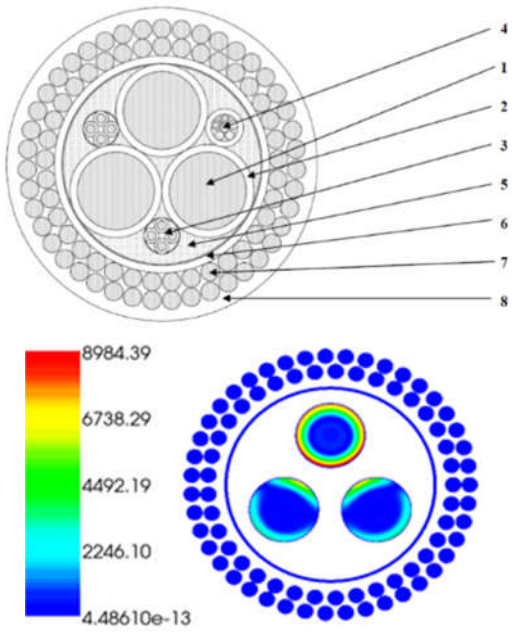
Để thuận tiện trong quá trình xác thực độ chính xác của phương pháp đề xuất, trong trường hợp không sẵn có các thiết bị thí nghiệm với MBA cụ thể, bài báo sẽ sử dụng

phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng đầy đủ kích thước, tính chất của MBA trong thí nghiệm không tải. Các kết quả mô phỏng thu được sẽ được tính toán tiếp theo phương pháp giải tích đề xuất để xây dựng đường cong đặc tính mạch từ của MBA.

2.2. Phương pháp phần tử hữu hạn mô phỏng thiết bị điện

Phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method-FEM) [6] là phương pháp số gần đúng để giải các bài toán được mô tả bằng các phương trình vi phân đạo hàm riêng trên miền xác định có hình dạng và điều kiện biên bất kỳ mà nghiệm chính xác không thể tìm được bằng phương pháp giải tích.

FEM là một phương pháp đặc biệt có hiệu quả để tìm dạng gần đúng của một hàm chưa biết trong miền xác định của nó. FEM sẽ tìm dạng xấp xỉ của hàm cần tìm trong từng miền con thuộc miền xác định. Phương pháp này rất tổng quát và hữu hiệu cho lời giải nhiều bài toán về kỹ thuật khác nhau, từ cơ học đến những bài toán của lý thuyết trường.



Hình 4. Phân rã phần tử hữu hạn một cấp điện lực [7]

Hình 4 là một ví dụ kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn một cáp điện lực ba lõi. Cáp nghiên cứu được phân rã thành một số hữu hạn các miền con hay còn gọi là các phần tử. Các phần tử này được liên kết với nhau tại các điểm định trước trên biên của nó gọi là nút. Trong phạm vi mỗi phần tử đại lượng cần tìm được lấy xấp xỉ trong dạng một hàm đơn giản gọi là các hàm xấp xỉ. Các hàm xấp xỉ này được biểu diễn qua các giá trị của hàm tại các điểm nút trên phần tử. Các giá trị này gọi là các bậc tự do của phần tử và được xem là ẩn số cần tìm của bài toán.

2.3. Phương trình điện từ trường Maxwell

Trường điện từ xuất hiện trong MBA được mô tả bằng hệ phương trình Maxwell như sau:

$$\text{rot}\mathbf{B} = -\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J}$$

Trong đó: **E** là cường độ điện trường (V/m); **B** là từ cảm (T); **H** là cường độ từ trường (A/m); **J** là mật độ dòng điện (A/m).

Kết hợp với phương trình biểu diễn đặc tính vật liệu: $\mathbf{B} = \mu_o.\mu_r\mathbf{H}$ Giải phương trình $\text{div}\mathbf{B} = 0$ => $\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A}$ trong đó **A**: là vector từ thế. Từ đó, ta thu được:

$$\text{rot}\mathbf{E} + \frac{\partial(\text{rot}\mathbf{A})}{\partial t} = \text{rot}\left[\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\right] = 0$$

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\text{grad}\phi$$

Từ phương trình trên, mật độ dòng điện **J(t)** trong dây dẫn sẽ được tính là:

$$\mathbf{J}(t) = -\sigma.\frac{\partial \mathbf{A}(t)}{\partial t} + \mathbf{J}_0(t) = -\sigma.\frac{\partial \mathbf{A}(t)}{\partial t} + \sigma\mathbf{E}_0(t) \quad (7)$$

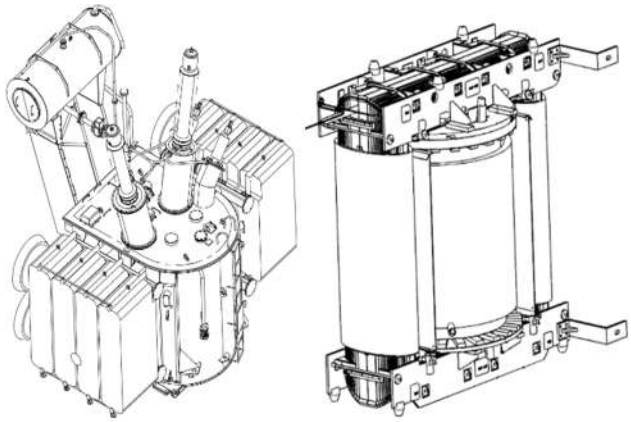
Trong đó: σ: là độ dẫn điện của dây dẫn; $\mathbf{E}_0$: là điện trường kích thích, $\mathbf{E} = -\text{grad}\phi$.

Việc giải các phương trình vi phân biểu diễn quan hệ điện từ trường trong một cấu trúc ba chiều như MBA là vô cùng khó. Vì vậy, nhóm tác giả sẽ sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn và giải quyết bài toán bằng công cụ số với phần mềm Comsol Multiphysics [8].

3. ÁP DỤNG TÍNH TOÁN MÁY BIẾN ÁP ABB

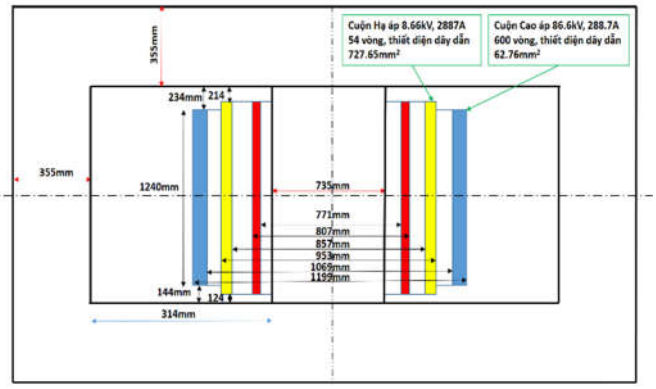
3.1. Giới thiệu MBA nghiên cứu

MBA nghiên cứu là MBA phân phối một pha có cấp điện áp 86,6/8,66kV, công suất 25MVA, do hãng ABB sản xuất với mã hiệu thiết kế VN1246 (hình 5). Hiện máy đang được sử dụng tại Nhà máy thủy điện Yate tại New Caledonia, Pháp. MBA được làm mát bằng dầu, cấu tạo gồm 3 phần chính: phần vỏ máy, phần lõi thép mạch từ và dây quấn [9].



Hình 5. Thiết kế mặt ngoài và mạch từ - cuộn dây của MBA ABB VN1246

MBA có mặt cắt sơ đồ quấn dây trong lõi như hình 6. Mạch từ kiểu ba trụ, chiều ngang tổng 2073mm, chiều cao 2328mm. Trụ giữa rộng 735mm cao 1618mm, hai trụ bên rộng 355mm. Độ dày mạch từ 735mm.

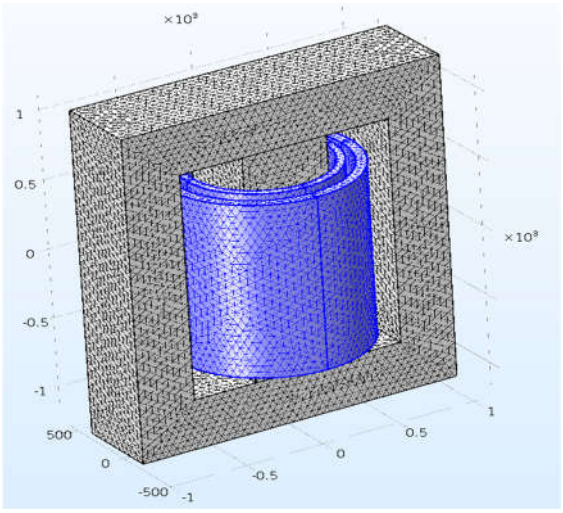


Hình 6. Mặt cắt sơ đồ quấn dây trong lõi MBA nghiên cứu

Cuộn hạ áp được làm bằng đồng, điện áp định mức 8,66kV, dòng điện định mức 2887A, gồm 54 vòng dây, tiết diện dây dẫn 727,65mm^2. Cuộn cao áp làm bằng đồng điện áp định mức 86,6kV, dòng điện định mức 260A, gồm 600 vòng dây, dây dẫn có tiết diện 62,76mm^2.

3.2. Mô hình phần tử hữu hạn mô phỏng MBA

Dựa vào thông số cấu hình cụ thể của MBA nghiên cứu, mô hình của máy sẽ được phân tích và tính toán chi tiết. MBA ABB VN1246 được vận hành thực tế ở chế độ hạ áp, cuộn cao áp đóng vai trò cuộn sơ cấp và cuộn hạ áp đóng vai trò cuộn thứ cấp.



Hình 7. Mô hình lưới hóa MBA nghiên cứu

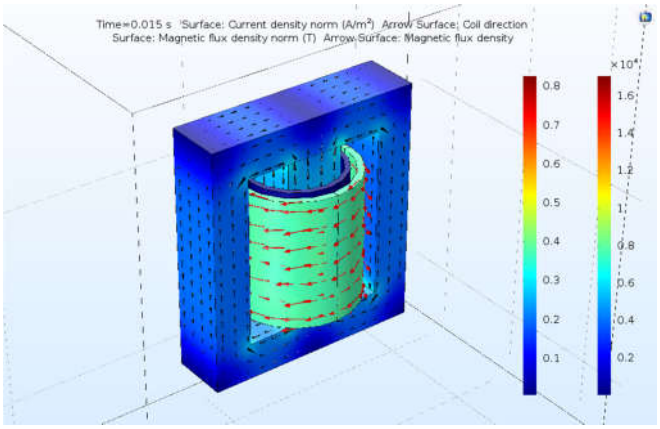
Dây quấn trong MBA được quấn kiểu đồng tâm, cuộn dây hạ áp ở trong và cao áp ở ngoài. Số vòng dây, độ dày và vị trí tương ứng của các cuộn dây đã được miêu tả chi tiết ở phần trên. Cuộn dây sơ cấp và thứ cấp được mô hình hóa là các cuộn dây mỏng với số vòng dây lần lượt là N_p và N_s tương ứng. Lõi sắt của MBA được làm bằng vật liệu sắt từ với đường đặc tính từ hóa B-H phi tuyến.

Để giải các phương trình vi phân điện từ trường tương ứng đã trình bày trong phần 2.2 của bài báo, nhóm tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, chia nhỏ MBA nghiên cứu thành các miền nhỏ bằng cách lưới hóa như hình 7. Mô hình được phân rã thành 72325 miền phần tử, số bậc tự do cần tính toán là 97780.

3.3. Tính toán chế độ không tải

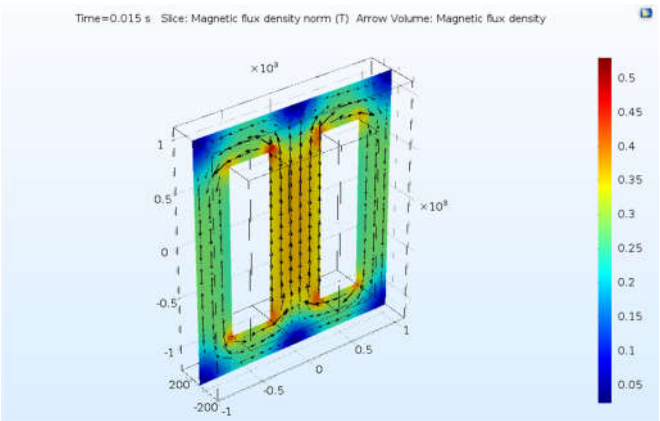
Đặt vào cuộn sơ cấp dòng xoay chiều tần số 50Hz, nguồn $u_1 = U_1\sin(100\pi t)$kV, cuộn thứ cấp để hở mạch như sơ đồ hình 1. Trong tính toán mô phỏng, mô hình phần tử hữu hạn của MBA phía thứ cấp cũng sẽ được nối với một mạch hở.

Mô hình tính toán theo trục thời gian, hình 8 biểu diễn phân bố mật độ dòng điện trên cuộn dây và từ trường chạy trong mạch từ của MBA nghiên cứu khi đặt nguồn $u_1 = 20\sin(100\pi t)$kV tại thời điểm t = 0,015s. Ta nhận thấy rằng dưới tác dụng của dòng sinh ra trong cuộn sơ cấp, từ thông cảm ứng sinh ra chạy trong mạch từ và đi xuyên, móc vòng qua cuộn thứ cấp. Từ trường cảm ứng này sẽ sinh ra dòng điện cảm ứng trên cuộn thứ cấp. Phân bố từ trường và mật độ dòng điện được tính toán và biểu diễn chi tiết, cả về phương chiều và độ lớn. Nhận thấy rằng từ trường cảm ứng xuất hiện trên mạch từ phân bố nhiều ở gần cuộn dây, đặc biệt tập trung ở phần đỉnh nhọn do đây là phần từ thông khép vòng với quãng đường ngắn nhất. Điều này hoàn toàn tương hợp với lý thuyết.



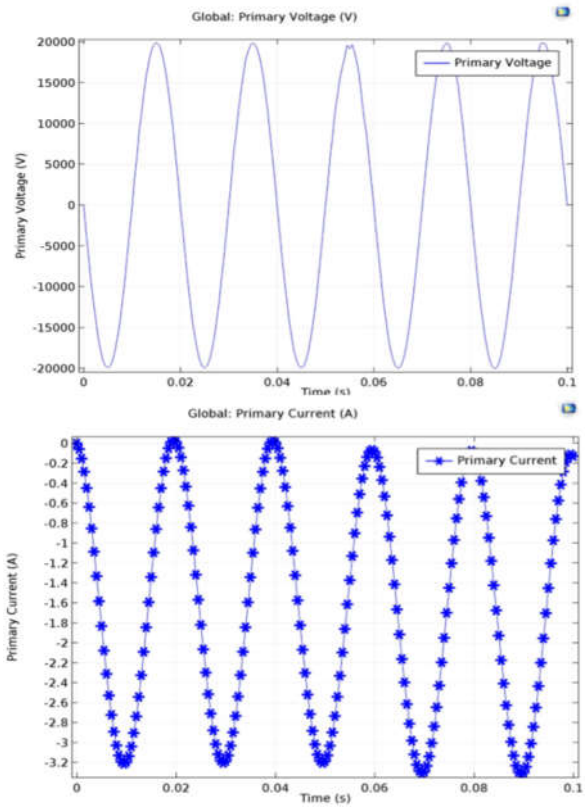
Hình 8. Phân bố điện từ trường trong MBA nghiên cứu tại t = 0,015s ở chế độ không tải khi đặt nguồn $u_1 = 20\sin(100\pi t)$kV

Phân bố từ trường cảm ứng trong mạch từ được hiển thị rõ nét ở hình 9.

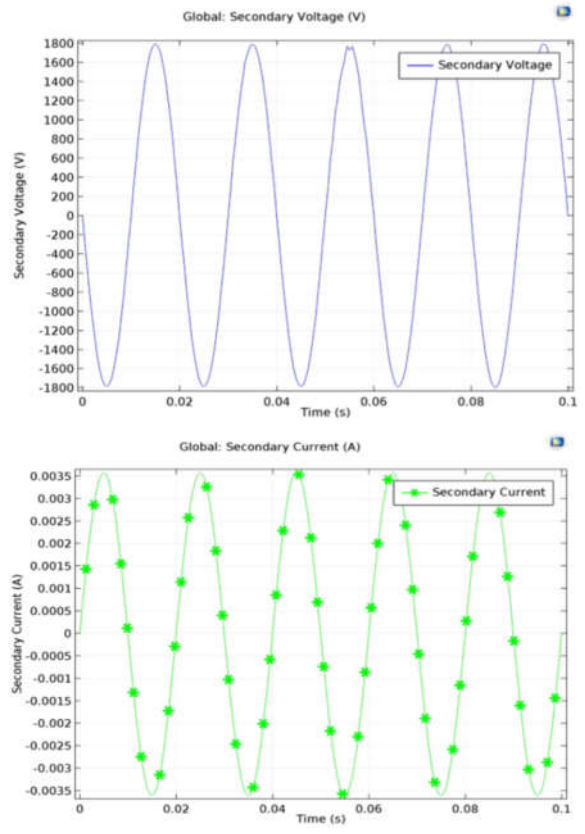


Hình 9. Phân bố từ trường trên mặt cắt mạch từ của MBA nghiên cứu tại t = 0,015s ở chế độ không tải khi đặt nguồn $u_1 = 20\sin(100\pi t)$kV

Các giá trị điện áp, dòng điện và công suất tính toán được trong chế độ không tải lần lượt là:



Hình 10. Điện áp đặt vào và dòng điện thu được trên cuộn sơ cấp ở chế độ không tải MBA



Hình 11. Điện áp và dòng điện thu được trên cuộn thứ cấp ở chế độ không tải MBA

Khi hở mạch thứ cấp MBA, dòng điện phía thứ cấp thu được phải bằng 0. Như vậy kết quả mô phỏng hoàn toàn phù hợp.

4. XÂY DỰNG ĐẶC TÍNH TỪ HÓA MẠCH TỪ MBA ABB

Để xác định mối quan hệ từ hóa B(H) của mạch từ MBA VN1246 nghiên cứu, bài báo tính toán mô phỏng MBA trong chế độ ngắn mạch với nhiều giá trị điện áp đặt vào khác nhau nhằm thu được các cặp giá trị (U_1, I_o). Phương pháp và mô hình mô phỏng đã được trình bày chi tiết trong phần 3.

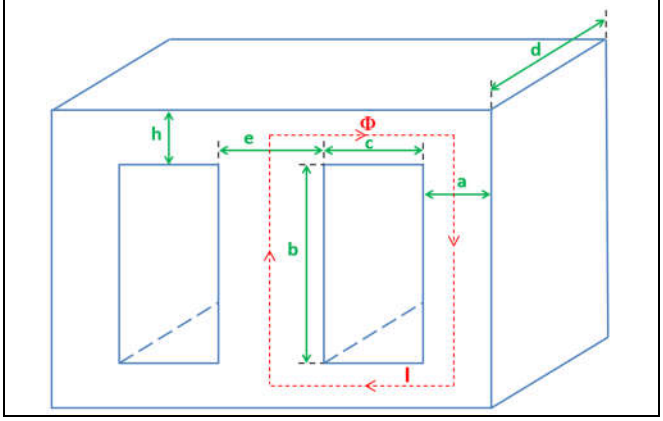
Tính toán giải tích

Từ cặp giá trị (U_1, I_o) xác định được từ mô phỏng, kết hợp điện trở của cuộn dây sơ cấp R_1 thu được từ kết quả của [10], sức điện động cuộn sơ cấp E_1 được xác định từ công thức (1).

Kích thước MBA nghiên cứu được trình bày chi tiết ở bảng 1.

Bảng 1. Kích thước mạch từ MBA ABB VN1246 nghiên cứu

Kích thước	Ký hiệu	Giá trị (mm)
Trụ bên	a	355
Trụ giữa	e	735
Cửa sổ mạch từ	b	1618
	c	314
	h	355
Độ dày mạch từ	d	735



Từ (4), chiều dài mạch từ được xác định như sau:

$$l = 2\times(b+c)+a+e+2\times h$$
$$= 2\times(1618+314)+355+735+2\times 355 = 5664(mm)$$

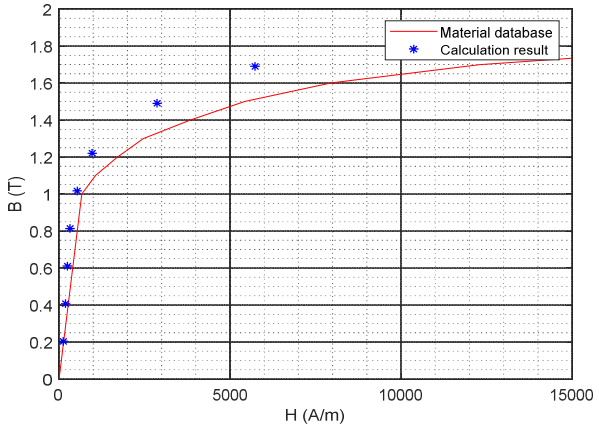
Kết quả tính toán kết hợp mô phỏng và giải tích qua phương trình (3-5) thu được cường độ từ trường H và từ cảm B của mạch từ MBA nghiên cứu như bảng 2.

Để xác thực phương pháp nghiên cứu, kết quả tính toán sẽ được so sánh với thông số vạt liệu của nhà sản xuất.

Từ đồ thị so sánh hình 12 ta nhận thấy: kết quả thu được từ phương pháp nghiên cứu biểu diễn sự biến thiên có xu hướng giống với kết quả từ nhà sản xuất. Trong vùng cường độ từ trường thấp (H < 5000A/m), sai số tương đối nhỏ. Sai số này tăng dần trong dải cường độ từ trường cao.

Bảng 2. Kết quả tính toán phần tử hữu hạn MBA ABB VN1246 trong chế độ không tải

U_1 (V)	7071,01	14142,14	21213,20	28284,27	35355,34	42426,41	51618,81	59396,97
I_0 (A)	1,20	1,84	2,33	3,04	5,02	9,16	27,08	54,09
E_1 (V)	7070,19	14140,79	21211,5	28282,05	35351,67	42419,72	51599,02	59357,48
H (A/m)	127,34	194,75	247,19	322,09	531,82	970,02	2868,88	5730,26
B (T)	0,20	0,41	0,61	0,81	1,02	1,22	1,49	1,83



Hình 12. So sánh đặc tính từ hóa mạch từ MBA ABB VN1246 thu được từ phương pháp nghiên cứu và thông số nhà sản xuất cung cấp

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày phương pháp nghiên cứu đề xuất xác định đường cong từ hóa của mạch từ MBA thông qua mô phỏng không tả và giải tích. Mối quan hệ điện từ trường trong MBA được mô tả bằng các phương trình Maxwell. Việc áp dụng và giải các phương trình vi phân này bằng phương pháp giải tích là vô cùng khó, do đó phần đầu bài báo đã đề xuất tính toán mô phỏng theo phương pháp phần tử hữu hạn bằng công cụ số Comsol Multiphysics. Phương pháp nghiên cứu đã được áp dụng vào tính toán một MBA phân phối thực tế do ABB sản xuất. Phân bố điện từ trường trong cuộn dây và mạch từ của MBA được tính toán mô hình hóa chi tiết ở chế độ không tải. Sự phân bố về mật độ cũng như chiều dịch chuyển của điện từ trường trong các cuộn dây và mạch từ của MBA, cùng với các kết quả tính toán được về điện áp và dòng điện cảm ứng, đều tương hợp với lý thuyết. Các kết quả mô phỏng này sẽ được dùng làm tham số đầu vào kết hợp với phương pháp giải tích đề xuất để xác định đặc mạch từ hóa của đối tượng. Kết quả thu được từ phương pháp nghiên cứu được so sánh với tham số vật liệu được cung cấp bởi nhà sản xuất. Dáng đường cong đặc tính thu được từ phương pháp tính toán và từ nhà sản xuất là tương hợp. Giá trị từ hóa của mạch từ thu được có sự sai số chấp nhận được ở dải cường độ từ trường nhỏ và sai số tăng dần khi cường độ từ trường lớn. Điều này có thể giải thích là kết quả nghiên cứu thu được phải chịu hai nội dung sai số bao gồm tỷ lệ sai số khi tính toán mô phỏng MBA thực tế và sai số trong tính toán giải tích. Tuy nhiên đường cong đặc tính thu được qua tính toán đã thể hiện được đặc tính của vật liệu mà không cần thực hiện đo đạc. Điều này có ý nghĩa lớn với cán bộ vận hành đặc biệt trong những trường hợp không sẵn sàng các thiết bị đo cũng như tài iệu thực tế thông số máy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. A. Al-Abadi, A. Gamil, F. Schatzl, 2019. *Optimum Shielding Design for Losses and Noise Reduction in power transformer.* 6th International Advanced Research Workshop on Transformer.

[2]. Yan Wu, Lan Liu, Changkai Shi, Kui Ma, Yang Li, Haibao Mu, 2019. *Research on Measurement Technology of Transformer No-load Loss Based on Internet of Things.* IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection.

[3]. M. Bagheri, A. Subraman, S. Bhandari, S. Chandar, S. Nadarajan, A. K. Gupta, S. K. Panda, 2015. *Thermal Prognosis of Dry-type Transformer: Simulation Study on Load and Ambient Temperature Impacts*. IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.

[4]. Themistoklis D. Kefalas, Antonios G. Kladas, 2014. *Reduction of cost and losses of transformers by using composite magnetic cores*. International Conference on Electrical Machines (ICEM).

[5]. IEEE Guide for Transformer Loss Measurement - IEEE Std C57.123-2019.

[6]. N. Ida, J. P. A. Bastos, 1999. *Electromagnetics and Calculation of Fields*. Springer-Verlag New York..

[7]. Nguyen Duc Quang, 2017. *Study of Electromagnetic behavior in multiconductor system by finite element method.* EPU Journal of Science and Technology for Energy, ISSN 1859-4557, 2017.

[8]. "Comsol Multiphysics User's Guide", This documentation and the programs described here are furnished under the Comsol Software License, 5/2012.

[9]. ABB Ltd., 2016. *Test report No. VN1246*. Applied Standards IEC 60076, date of issue 07/2016.

[10]. Nguyen Duc Quang, 2018. *A study of electromagnetic distribution and establishing the T equivalent circuit of power transformers by finite element method*. Journal of Science and Technology - The University of Danang, ISSN 1859-1531.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Duc Quang[1], Tran Tuan Vu[2]

[1]Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University

[2]School of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology