

TÍNH TOÁN, THIẾT KẾ VÀ SẢN XUẤT MÁY BIẾN ÁP CÓ LỖI THÉP BẰNG VẬT LIỆU VÔ ĐỊNH HÌNH CÔNG SUẤT NHỎ

CALCULATION, DESIGN AND MANUFACTURING AMORPHOUS CORE SMALL POWER TRANSFORMERS

Đoàn Thanh Bảo¹, Đỗ Chí Phi²

¹Trường Đại học Quy Nhơn; dtbao@ftt.edu.vn

²Trường Cao đẳng Kỹ thuật Cao Thắng; dochiphi@gmail.com

Tóm tắt - Máy biến áp lõi thép vô định hình (MBA VĐH) có ưu điểm vượt trội là giảm tổn hao không tải lên đến 70%. Nhờ vào thành phần và cấu trúc vi mô đặc biệt, đó là lực kháng từ nhỏ, độ dày lá thép rất nhỏ và điện trở suất lớn. Nên khi sử dụng làm mạch từ cho MBA, đã giảm tổn hao không tải đáng kể so với MBA có lõi thép silic chất lượng cao. Bài báo này nhóm tác giả thực hiện tính toán thiết kế và sản xuất một MBA ba pha lõi thép VĐH công suất 3kVA, điện áp 380/127V. Các kết quả đo đạc thực nghiệm ở chế độ làm việc không tải và ngắn mạch như: dòng điện, điện áp, tổn thất được so sánh với kết quả mô phỏng bằng phần mềm Ansys Maxwell. Kết quả chứng minh, tổn hao không tải của MBA lõi thép VĐH giảm nhiều so với MBA lõi thép silic. Kết quả đã mở ra hướng tiết kiệm điện năng khi dùng MBA VĐH công suất nhỏ và trung bình cho thiết bị trường học, nhà máy xí nghiệp hay trong sinh hoạt khu dân cư.

Từ khóa - thiết kế; máy biến áp; vô định hình; tổn hao không tải; Ansys Maxwell.

1. Đặt vấn đề

Xu thế hiện nay người ta ưu tiên lựa chọn các MBA có hiệu suất cao. Các nhà sản xuất luôn tìm kiếm vật liệu mới, đồng thời hoàn thiện thiết kế để có khả năng chế tạo MBA có tổn hao thấp. Nói cách khác người kỹ sư luôn tìm các biện pháp cải tiến thiết kế và công nghệ chế tạo nhằm hoàn thiện về cấu trúc, hình dạng, thông số kỹ thuật, kinh tế... và quan trọng nhất sử dụng vật liệu mới để giảm tổn hao của MBA [1][2].

Khoảng những năm 80 của thế kỷ XX, thép vô định hình (VĐH) (thép biến áp siêu mỏng) ra đời. Nhờ vào thành phần và cấu trúc vi mô đặc biệt, thép VĐH đáp ứng cả 3 yêu cầu để giảm tổn hao lõi là: lực kháng từ rất nhỏ, $H_C \approx 5-10A/m$ (so với $\sim 50-100A/m$ của tôn silic); độ dày tự nhiên của lá thép rất nhỏ, $t_d \approx 0,03mm$ (so với $\sim 0,3-0,5mm$ của tôn silic) và điện trở suất rất lớn $\rho \approx 130-170\mu\Omega cm$ (so với $\sim 50-60\mu\Omega cm$ của tôn silic). Nhờ vào các tính chất trên mà tổn hao lõi của thép VĐH giảm mạnh so với thép silic loại tốt nhất [3]-[4].

Tổn hao sắt từ (tổn hao không tải) là tổn hao do hiện tượng dòng điện xoáy và hiện tượng từ trễ trong lõi thép gây ra. Tổn hao từ trễ phụ thuộc vào chất lượng vật liệu, còn tổn hao dòng điện xoáy phụ thuộc vào bề dày và hàm lượng silic chứa bên trong vật liệu đó. Tổn hao không tải là tổn hao suốt đời của MBA. Vì vậy, giảm tổn hao không tải trong MBA mang ý nghĩa rất quan trọng. Các nhà chế tạo luôn tìm cách giảm thiểu các tổn hao trong MBA, đồng thời họ cũng tìm cách nâng cao độ tin cậy trong vận hành [3].

Trong lĩnh vực thiết kế MBA VĐH đã có nhiều đóng góp của những nhóm tác giả như:

Abstract - The amorphous steel core transformer has the advantage of reducing the load loss by up to 70%. Thanks to the special microstructure and composition, it is a small magnetic resistance with very small steel sheet thickness and very high resistivity. Therefore, when used as a magnetic circuit for transformers, there is a significant reduction in no-load losses compared to high-quality silicon steel transformers. This paper presents the design and production of a three-phase transformer with 3kVA, 380/127V. Experimental results in no-load and short circuit modes such as current, voltage, and losses are compared with simulation results with the Ansys Maxwell software. Demonstration of no-load losses of core steel transformers decreases significantly compared with that of the silicon steel core transformer. The result has been the introduction of energy efficiency when using small and medium power amorphous transformers for school equipment, factories or in residential areas.

Key words - Design; transformer; amorphous; no load loss; Ansys Maxwell.

Nhóm tác giả [5] tiến hành nghiên cứu tổn thất không tải và có tải của MBA khô VĐH. Đặc biệt, bài báo đã tập trung phân tích, đánh giá tổn hao không tải của MBA phân phối khô lõi VĐH 630kVA, đưa ra phương pháp cải tiến trong thiết kế mạch từ MBA để tổn hao là thấp nhất. Đồng thời thông qua phương pháp PTHH khảo sát mạch từ để chứng minh đặc điểm thiết kế mạch từ mà tác giả đề ra.

Tác giả Yinshun Wang, Xiang Zhao [6], tiếp đó, đã xây dựng thiết kế và tính toán tổn thất của một MBA 3 pha với công suất trên 630kVA điện áp sơ cấp/thứ cấp là 10,5kV/0,4kV thông qua thí nghiệm ngắn mạch và không tải theo tiêu chuẩn.

Phân tích mô hình mạch từ của lõi thép VĐH để phân tích tổn hao không tải thấp thì có nhiều nhóm tác giả [7]-[11] với các phương pháp thực hiện khác nhau. Điển hình như nhóm tác giả D. Lin, P. Zhou, W. N. Fu, Z. Badics, and Z. J. Cendes tại Mỹ năm 2003 [12] phân tích mô hình tổn thất lõi bằng phương pháp PTHH 2D và 3D ở chế độ quá độ. Kết quả tổn hao không tải giữa tính toán là 119W và đo đạc là 126W được so sánh với nhau, trên một MBA VĐH có công suất 250kVA.

Nhóm tác giả [13], đã thực hiện tính toán, thiết kế và chế tạo một MBA ba pha công suất 10kVA, điện áp cao áp (CA)/hạ áp (HA) là 22/0,4kV, đấu Δ/Y . Đồng thời, tiến hành mô phỏng MBA làm việc ở chế độ không tải và ngắn mạch, kết quả có được: dòng điện, điện áp, tổn thất. Sau đó, kết quả này được so sánh với thực nghiệm, nhưng đo đạc thực nghiệm ở điện áp thấp sau đó mới quy đổi sang điện áp 22kV để có được các kết quả như mong muốn.

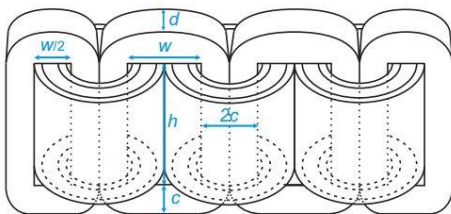
Nhìn chung, các công trình nghiên cứu trên đây đã trình

bày các kết quả về tổn hao điện - từ, tính toán thiết kế đến mô phỏng nhưng đi vào MBA phân phối có điện áp 22/0,4kV. Trong bài báo này, nhóm tác giả đã tính toán thiết kế MBA VDH công suất nhỏ, thường được dùng làm thiết bị ổn định điện áp, bộ nguồn hay bộ chuyển đổi điện áp trong sinh hoạt dân cư, thiết bị trường học, các làng nghề, khu công nghiệp - chế xuất, nhà máy - xí nghiệp.

Trên cơ sở đó, bài báo thực hiện tính toán, thiết kế và thi công một MBA VDH ba pha công suất 3kVA, điện áp sơ cấp 380V, điện áp thứ cấp 127V, đấu Y/Y_n. Đồng thời tiến hành mô phỏng bằng phần mềm Ansys Maxwell để tìm ra các thông số điện không tải, định mức, tổn hao không tải và ngắn mạch. Sau đó, kết quả mô phỏng được so sánh với kết quả thực nghiệm.

2. Tính toán thiết kế

2.1. Tính toán mạch từ



Hình 1. Hình dạng máy biến áp

Công suất máy biến áp $S_{dm} = 3000VA$

Tiết diện mặt cắt mạch từ: $T = c \times d$ (cm²)

Công suất biến áp phụ thuộc vào chất lượng của thép và tiết diện lõi thép, công thức tính gần đúng như sau [2, 3]:

$$T = C \sqrt{\frac{S_t}{f}} \quad (1)$$

Với thép vô định hình chọn $B = 1 T$ và $C = 9$

Quần MBA kiểu bọc, tức sơ cấp (SC) và thứ cấp (TC) đều quấn trên một trụ, có trụ bên ngoài bọc cạnh.

$S_t = S/3 = 1000VA$.

Vì bề rộng băng thép $d = 7$ cm.

Do đó, còn lại chiều dày của $c = 3$ cm (hay $2c = 6$)

Từ công thức (1), tiết diện lõi thép:

$T = 2c \times d = 6 \times 7 = 42$ cm²

2.2. Tính toán dây quấn

2.2.1. Tính số vòng dây quấn:

Gọi n_v là số vòng dây quấn /volt:

$$n_v = \frac{10^8}{4,44 \cdot B_t \cdot T \cdot f} = \frac{10^8}{4,44 \cdot 1,42 \cdot 10^4 \cdot 50} = 1,1 \quad (2)$$

Tính được: $W_1 = 250$ vòng và $W_2 = 83$ vòng

2.2.2. Tính kích thước dây quấn:

Chọn mật độ dòng điện $J = 5$ A/mm². Theo tài liệu [3],

đường kính dây tính theo công thức: $d = 2 \sqrt{\frac{I}{\pi \cdot J}}$

+ Tính dây quấn sơ cấp:

Kích thước dây quấn sơ cấp:

$$d_1 = 0,4 \sqrt{I_{1p}} = 0,4 \sqrt{4,56} = 0,9 \text{ mm}$$

Chọn dây: $d_1 = 0,8$ mm; tiết diện dây quấn sơ cấp:

$$s_1 = \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 \cdot \pi = \left(\frac{0,8}{2}\right)^2 \cdot \pi = 0,5 \text{ mm}^2$$

+ Tương tự, kích thước dây quấn thứ cấp: $d_2 = 1,2$ mm

Và tiết diện $s_2 = 1,1$ mm²

2.2.3. Diện tích cửa sổ mạch từ:

Theo Hình 1 và [3], tỉ lệ giữa chiều cao và chiều rộng cửa sổ nên chọn như sau:

$$k = \frac{h}{w} = 2 \div 3 \quad (3)$$

Với các điều kiện quấn dây và cách điện lớp ta chọn: $h = 10$ cm.

Theo (3) ta chọn $k = 2,5$ nên chiều rộng cửa sổ $w = 4$ cm.

2.2.4. Tính chiều dày dây quấn:

+ Tính chiều dày dây quấn sơ cấp Δ_1 :

$$\text{Số lớp dây quấn sơ cấp: } m_1 = \frac{W_1}{n_1} = \frac{250}{100} = 2,5 \quad (4)$$

chọn $m_1 = 3$ lớp

Bề rộng dây quấn sơ cấp:

$$\Delta_1 = m_1(d_1 + \gamma_1) = 3(0,8 + 2) = 8,4 \text{ mm}$$

γ_1 là chiều dày cách điện lớp; Chọn $\Delta_1 = 10$ mm

+ Tính chiều dày dây quấn thứ cấp Δ_2 :

Tương tự, tính chọn $m_2 = 2$ lớp

Bề rộng dây quấn thứ cấp:

$$\Delta_2 = m_2(d_2 + \gamma_2) = 2(1,2 + 2) = 6,4 \text{ mm}$$

γ_2 chiều dày cách điện lớp; Chọn $\Delta_2 = 8$ mm

2.2.5. Chiều rộng cửa sổ:

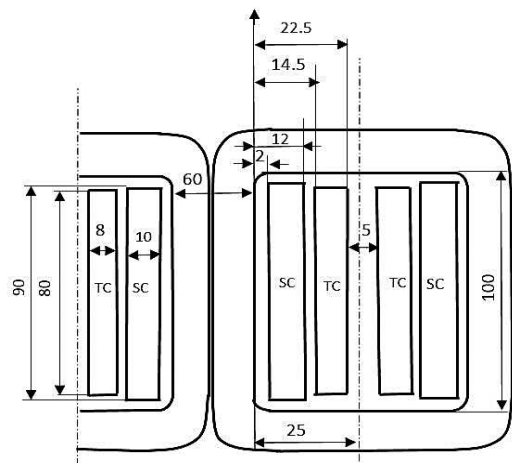
$$w = 2\delta_0 + 2\delta_2 + \delta_3 + 2\Delta_1 + 2\Delta_2 \quad (5)$$

$$= 2,2 + 2,1 + 5 + 2,10 + 2,8 = 47 \text{ mm}$$

Chiều rộng cửa sổ được tính hơn 20% - 30% do các lớp dây không thật phẳng. Nên chọn $w = 50$ mm.

Diện tích cửa sổ mạch từ: $S_c = h \times w = 10$ cm x 5 cm

Tất cả các kích thước thiết kế được cụ thể ở Hình 2.



Hình 2. Mô hình các kích thước của MBA

Các thông số điện cơ bản và thông số về kích thước thiết kế của MBA công suất 3kVA - 380/127V (Bảng 1).

Bảng 1. Các thông số điện cơ bản và kích thước thiết kế máy biến áp

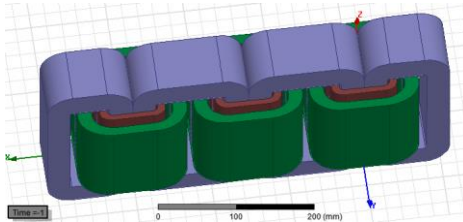
Thứ tự	Thông số	Giá trị
1	Số pha	3
2	Tần số [Hz]	50
3	Công suất [kVA]	3
4	Nối dây	Y/Y
5	Điện áp dây SC/TC [V]	380/127
6	Số vòng dây quấn/pha SC/TC [vòng]	250/83
7	Dòng điện pha SC/TC [A]	4,56/13,64
8	Đường kính dây SC/TC (V)	0,8/1,5
9	Mật độ dòng điện J [A/mm ²]	5
10	Chiều dày lõi c [mm]	30
11	Chiều rộng cửa sổ của lõi thép w[mm]	50
12	Chiều cao cửa sổ lõi thép h[mm]	100

3. Mô phỏng máy biến áp theo các thông số thiết kế

3.1. MBA lõi thép VDH thiết kế trong Maxwell

Các thông số về điện và kích thước thiết kế của MBA này là dữ liệu đầu vào phần mềm Ansys Maxwell V16.02

Hình 3 cho thấy hình dạng của một mô hình MBA trong môi trường phân tích Maxwell 3D.

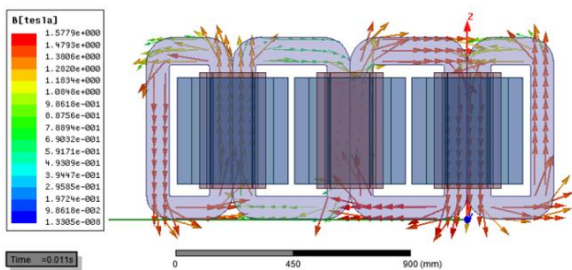


Hình 3. Mô hình MBAVDH trong phân tích Ansys Maxwell 3D

Trong tính toán Maxwell đã dùng phần mềm Maxwell Circuit Editor V16.02 để thiết kế mạch điện cho cuộn SC và TC nhằm mô phỏng quá trình làm việc của MBA trong 2 trường hợp: không tải, ngắn mạch thử nghiệm.

3.2. Mô phỏng ở chế độ không tải

3.2.1. Phân bố từ trường

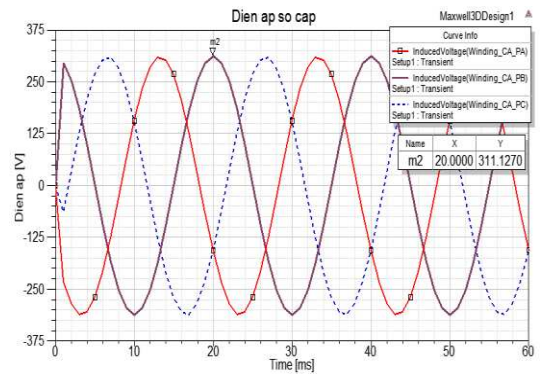


Hình 4. Phân bố từ cảm B trong mạch từ

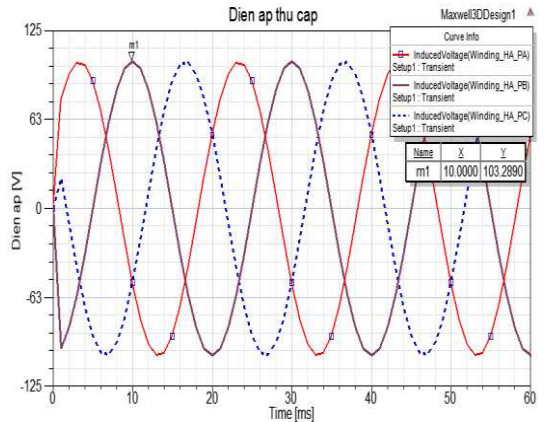
Từ cảm trong mạch từ B = 1,57T khi làm việc ở chế độ không tải và từ thông đi trong mạch từ và từ cảm tản trên cuộn SC và TC rất nhỏ và gần như bằng không.

3.2.2. Giá trị điện áp và dòng điện

Ta tiến hành đo đạc các giá trị điện áp SC và TC của MBA, được thể hiện ở Hình 5 và Hình 6 như sau:

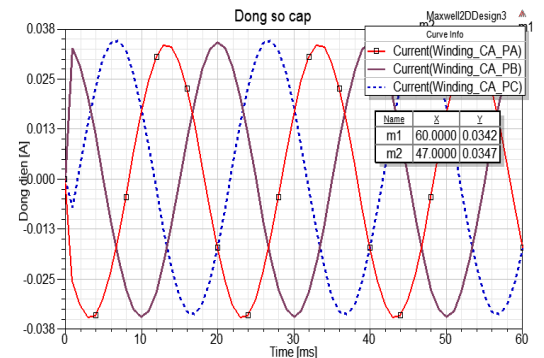


Hình 5. Điện áp sơ cấp định mức

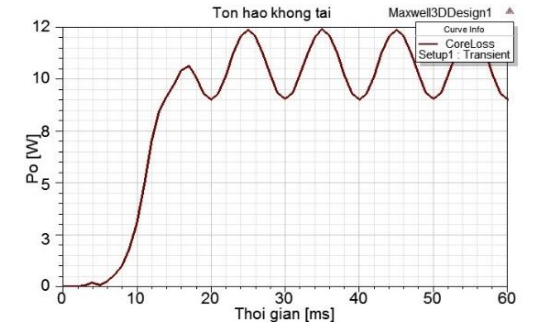


Hình 6. Điện áp thứ cấp định mức

Ở chế độ không tải, dòng điện TC bằng 0 và dòng điện SC có giá trị như Hình 7. Ta cũng có kết quả tổn hao không tải như Hình 8.



Hình 7. Dòng điện không tải sơ cấp



Hình 8. Tổn hao không tải

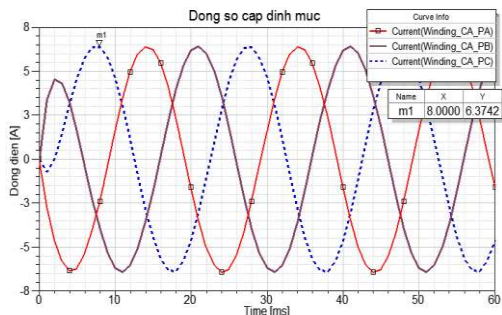
Hình 5 cho thấy giá trị điện áp pha hiệu dụng SC, mô phỏng là 219V so với giá trị điện áp pha là 220V. Tương tự, Hình 6 giá trị điện áp hiệu dụng pha TC, mô phỏng là

72,8V so với giá trị điện áp TC là 73V.

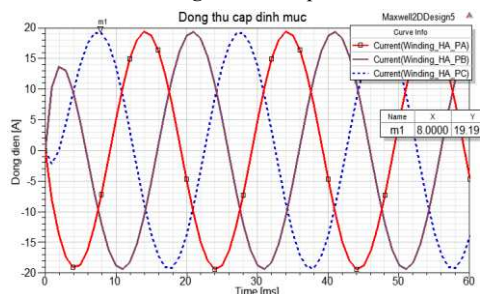
Ở Hình 7 và 8 ta thấy rằng dòng điện không tải SC là 0,034A và tổn hao không tải trung bình $P_0 = (8,5+12)/2 = 10,2W$.

3.3. Mô phỏng ở chế độ ngắn mạch thử nghiệm

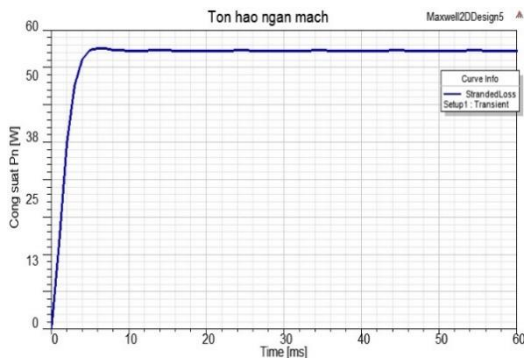
Ở chế độ ngắn mạch thử nghiệm, ta ngắn mạch 3 cuộn dây TC. Sau đó cấp điện áp $U_n = 27V$ vào cuộn SC. Ta được kết quả dòng điện định mức và tổn hao ngắn mạch của MBA như Hình 9 và 10.



Hình 9. Dòng điện sơ cấp định mức



Hình 10. Dòng điện thứ cấp định mức



Hình 11. Tổn hao công suất ngắn mạch

Hình 9 cho thấy, giá trị dòng điện định mức hiệu dụng SC, mô phỏng là 4,51A so với tính toán dòng điện định mức hiệu dụng SC là 4,56A. Tương tự, Hình 10, giá trị dòng điện định mức hiệu dụng TC, mô phỏng là 13,57A so với tính toán dòng điện TC là 13,64A.

4. Thi công chế tạo MBA

Tiến hành thi công chế tạo MBA ba pha lõi thép VĐH công suất 3kVA - 380/127V.

4.1. Chế tạo mạch từ

Theo thiết kế với chiều rộng mạch từ 7cm. Sau khi chuẩn bị lớp thép silic bên trong thì bắt đầu quấn băng từ VĐH lên trên và tiếp tục quấn đến chiều dày mạch từ là $c = 4cm$.



Hình 12. Công đoạn hoàn thiện mạch từ

Hình 12 thể hiện mạch từ sau khi đã quấn băng vải xong. Đến đây xem như quá trình chế tạo mạch từ đã hoàn tất. Việc còn lại là thực hiện quấn dây SC và TC lên mạch từ.

4.2. Quấn dây sơ cấp và thứ cấp

Quấn dây SC và TC



Hình 13. Công đoạn quấn dây cuộn SC và TC

Hình 13, thực hiện quấn dây cuộn SC và TC cho các pha A, B và C. Với số vòng cuộn SC $W_1 = 250$, quấn dây TC (nằm ngoài) với số vòng cuộn $W_2 = 83$ vòng.

4.3. Máy biến áp hoàn thiện

Tiếp tục thiết kế vỏ MBA như Hình 14, còn bên ngoài có aptomat, đèn báo, 6 đầu nối cuộn SC và 6 đầu nối cuộn TC.



Hình 14. MBA hoàn thiện

5. Thử nghiệm máy biến áp

Tiến hành đo đặc dòng không tải và tổn hao không tải của 3 MBA có cùng công suất $S = 3kVA$, $U_1/U_2 = 380/127V$.

- MBA lõi thép silic: tại phòng thí nghiệm máy điện gồm 2 máy, kí hiệu: MBA Si_1 và MBA Si_2
- MBA lõi thép VĐH: kí hiệu: MBA VĐH

5.1. Thử nghiệm không tải



Hình 15. Sơ đồ mạch điện thí nghiệm

Thực hiện nối mạch như sơ đồ [3], MBA thí nghiệm là MBA lõi thép VDH đã chế tạo.

Kết quả đo dòng điện không tải và công suất không tải như sau:

Bảng 2. Kết quả đo thực nghiệm MBA VDH

Thông số		Giá trị
I_0 (A) - Dòng điện không tải	Pha A	0,157
	Pha B	0,193
	Pha C	0,171
P_0 (W) - Công suất không tải		11W
U_1 (V) - Điện áp SC		380,8
U_2 (V) - Điện áp TC		126,3

5.2. Thí nghiệm ngắn mạch

Nối mạch theo sơ đồ ngắn mạch [3], tiến hành đo đặc dòng định mức và tổn hao ngắn mạch:

Kết quả đo thể hiện Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả đo thực nghiệm MBA VDH

$I_{nm} = I_{ldm}$ (A)	U_{nm} (V)	P_{nm} (W)
4,5	26	57

6. So sánh dòng điện và tổn hao không tải giữa các MBA

Với các số liệu thí nghiệm về dòng không tải và tổn hao không tải của 3 MBA có cùng công suất 3kVA; 380/127V: MBA Si₁; MBA Si₂ và MBA VDH. Ta làm phép so sánh để biết được MBA VDH thiết kế giảm tổn hao được bao nhiêu phần trăm. Kết quả so sánh cụ thể ở Bảng 4.

Bảng 4. Bảng kết quả so sánh tổn hao không tải các MBA

Thông số	MBA Si ₁	MBA Si ₂	MBA VDH	TL[3]
P_0 (W)	70	62	11	
I_0 (A)	0,86	0,55	0,17	
I_{ldm}	4,56	4,56	4,56	
$i_0\%$	18,8%	9,8%	3,7%	10%
So sánh	> TL[3]	≈ TL[3]	< TL[3]	

Bảng 4, MBA lõi thép VDH thiết kế có dòng điện $i_0\%$ nhỏ nhất trong 3 MBA và khi so sánh với TL [3]: $i_0\% = 3,7\% < 10\%$ thì MBA VDH thiết kế đã giảm được:

$$\Delta I = \frac{0,55 - 0,17}{0,55} \cdot 100\% = 69\%$$

7. Kết luận

Trong quá trình thiết kế, mô phỏng và thử nghiệm bài báo đã đạt được một số kết quả sau:

Bài báo đã tính toán, thiết kế MBA lõi thép VDH công suất 3kVA, điện áp 380/127V. Đồng thời, cũng tiến hành mô phỏng bằng phần mềm Maxwell, MBA VDH thiết kế trong hai chế độ: không tải và ngắn mạch thử nghiệm. Các

kết quả mô phỏng về điện áp định mức, dòng điện, tổn hao không tải và tổn hao ngắn mạch được so sánh với tính toán.

Bài báo đã thi công chế tạo thành công MBA lõi thép VDH ba pha công suất 3kVA, điện áp 380/127V. Đồng thời, tiến hành thử nghiệm và đã chứng minh được MBA chế tạo có tổn hao không tải thấp hơn 69% so với MBA lõi thép silic thông thường (hiện có tại phòng thí nghiệm Máy điện, khoa Kỹ thuật & Công nghệ, trường ĐH Quy Nhơn). Bên cạnh đó, các kết quả về điện áp, dòng điện và công suất ngắn mạch cũng được đo đạc.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Phạm Văn Bình, Lê Văn Doanh, “Máy biến áp lõi thép vô định hình giải pháp đột phá tiết kiệm điện”, *Tạp chí tự động hóa ngày nay*, số 126, 2011.
- [2] Winders John J., *Transformers Principles and Applications*, 2002.
- [3] 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, tr 1–619.
- [4] Materials Magic - Hitachi Metals, “*Amorphous Alloys for Transformer Cores*”, Metglas, Inc, 2014.
- [5] Steinmetz Thorsten, Bogdan Cranganu-Cretu, Jasmin Smajic, “Investigations of no-load and load losses in amorphous core dry-type transformers”, *XIX Int. Conf. Electr. Mach.* - ICEM, 2010, pp. 1–6.
- [6] Wang Yinshun, Xiang Zhao, Junjie Han, Huidong Li, Ying Guan, Qing Bao, Liye Xiao, Liangzhen Lin, Xi Xu, Naihao Song, Fengyuan Zhang, “Development of a 630 kVA Three-Phase HTS Transformer With Amorphous Alloy Cores”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, no. 2, 2007, pp. 2051–2054
- [7] Hsu Chang-hung, Chun-yao Lee, Yeong-hwa Chang, Faa-jeng Lin, Chao-ming Fu, Jau-grace Lin, “Effect of Magnetostriction on the Core Loss, Noise, and Vibration of Fluxgate Sensor Composed of Amorphous Materials”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 7, 2013, pp. 3862–3865.
- [8] Lenke R. U., S. Rohde, F. Mura, R. W. De Doncker, “Characterization of amorphous iron distribution transformer core for use in high-power medium-frequency applications”, *IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, 2009, pp. 1060–1066.
- [9] Li Deren, Liang Zhang, Guangmin Li, Zhichao Lu, Shaoxiang Zhou, “Reducing the core loss of amorphous cores for distribution transformers”, *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, vol. 22, no. 3, 2012, pp. 244–249.
- [10] Flur R. Ismagilov; Viacheslav E. Vavilov; Anton A. Mednov; Denis V. Gusakov, “The impact of amorphous steel on the increase of a transformer rectifier unit efficiency of an aircraft”, *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, 2017, page 1 – 5.
- [11] Gaurav Upadhyay; Amita Singh; Santanu Kumar Seth; R.K. Jarial, “FEM based no-load loss calculation of triangular wound core transformer”, *IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*, 2016, page 1-4.
- [12] Lin D., P. Zhou, W. N. Fu, Z. Badics, Z. J. Cendes, “A Dynamic Core Loss Model for Soft Ferromagnetic and Power Ferrite Materials in Transient Finite Element Analysis”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 2, 2004, pp. 1318–1321
- [13] Đỗ Chí Phi, Đoàn Thanh Bảo, Phùng Anh Tuấn, Lê Văn Doanh, “Thiết kế và đo đạc thực nghiệm máy biến áp có lõi thép bằng vật liệu vô định hình”, *Tạp chí Khoa học và công nghệ Đại học Đà Nẵng*, ISSN 1859 -1531, số. 11 (2), 2015, tr 42–43.