

# Nghiên cứu phân bố nhiệt máy biến áp khô có cuộn dây đúc trong epoxy ở chế độ tải định mức và non tải

## Study on the thermal distribution of dry-type transformer with epoxy-cast windings at rated load and partial load

Phạm Hồng Hải<sup>1</sup>, Lê Đức Tùng<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> PTN Nghiên cứu Hệ thống điện thông minh, Trường Điện-Điện Tử, Đại học Bách khoa Hà Nội  
\*Corresponding author E-mail: tung.leduc1@hust.edu.vn

### Abstract

Dry transformers are increasingly widely used, present everywhere in our lives and especially used in places requiring fire and explosion safety such as apartment buildings, mines, important civil and industrial works. Thermal distribution research in dry transformers to find local hot spots in the coils is always a topic of interest to many researchers. This paper presents a study, applying the finite element method to simulate heat distribution in dry transformers, insulated with epoxy material. Simulations are performed at rated load and part load in two cases: the thermal parameter is constant and the thermal parameter varies with temperature. The simulation results are compared with the experimental measurement results to demonstrate the correctness of the calculation model.

**Keywords:** Dry type transformer; epoxy; thermal distribution; FEM.

### Tóm tắt

Máy biến áp (MBA) khô ngày càng được sử dụng rộng rãi, có mặt khắp mọi nơi trong cuộc sống của ta và đặc biệt sử dụng ở những nơi yêu cầu về an toàn phòng chống cháy nổ như khu chung cư, hầm lò, các công trình dân dụng và công nghiệp quan trọng. Việc nghiên cứu bài toán phân bố nhiệt trong MBA khô để tìm ra điểm phát nóng cục bộ trong cuộn dây luôn là chủ đề được rất nhiều các nhà nghiên cứu quan tâm. Bài báo này trình bày nghiên cứu, áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng phân bố nhiệt trong MBA khô, cách điện bằng vật liệu epoxy. Mô phỏng được thực hiện ở chế độ tải định mức và non tải trong hai trường hợp: thông số nhiệt là hằng số và thông số nhiệt biến thiên theo nhiệt độ. Các kết quả mô phỏng được so sánh với kết quả đo thực nghiệm minh chứng được tính đúng đắn của mô hình tính toán.

### 1. Giới thiệu

Máy biến áp là thiết bị có vai trò rất quan trọng trong việc truyền tải, phân phối điện năng. Trong hệ thống điện, tổng công suất của MBA rất lớn, thường gấp 3 đến 4 lần tổng công suất của nguồn điện. Do đó việc nghiên cứu, đảm bảo vận hành, giảm tổn hao MBA luôn được nhiều nhà khoa học quan tâm [1], [2], [3].

Để đáp ứng các yêu cầu về an toàn phòng chống cháy nổ, yêu cầu về mỹ quan, cho các khu vực địa điểm như các trung tâm thương mại, nhà ga, sân bay, ga tàu điện ngầm, các công trình cao tầng,... các chủ đầu tư thường phải sử dụng MBA khô. Một trong những đặc tính ưu việt của MBA khô so với MBA dầu truyền thống là MBA khô rất khó cháy nổ. Ngoài ra còn nhiều yếu tố khác khiến MBA khô càng ngày càng được ứng dụng rộng rãi: ngoại quan MBA khô đẹp hơn, lắp đặt dễ dàng hơn, gần như không phải bảo trì bảo dưỡng trong suốt quá trình sử dụng. Với sự tiến bộ của công nghệ chế tạo và của các loại vật liệu mới, MBA khô càng ngày càng có công suất cao hơn, điện áp cao hơn, hình thức đẹp hơn, và ngày càng

thân thiện hơn với môi trường. Hiện nay, MBA khô đã có thể chế tạo tới công suất vài chục MVA, điện áp tới 110kV. Tỷ lệ MBA khô trên tổng số MBA sử dụng ở các nước phát triển đang ngày càng tăng nhanh: ở châu Âu, ở Mỹ hiện nay là khoảng 30%, ở Trung Quốc khoảng 20%.

Tuy nhiên, MBA khô cũng có những hạn chế nhất định. Do điều kiện không gian lắp đặt thường rất chật hẹp, khả năng đối lưu của không khí làm mát thường rất kém kết hợp với khả năng dẫn nhiệt của lớp vật liệu cách nhiệt không tốt, một số điểm nóng cục bộ có thể xuất hiện trong quá trình vận hành máy gây ảnh hưởng lớn đến độ ổn định và an toàn của máy biến áp khô. Vì vậy, việc xác định phân bố nhiệt, tìm các điểm phát nóng cục bộ ở những máy biến áp khô là rất quan trọng. Vấn đề này có thể được xác định thông qua phương pháp thực nghiệm, tuy nhiên phương pháp này thường tiêu tốn rất nhiều thời gian và nguồn lực. Do đó, phương pháp mô phỏng số được sử dụng rộng rãi như là một giải pháp thay thế hiệu quả. Năm 2007, tác giả Rahimpour giới thiệu mô hình toán nghiên cứu về phân bố nhiệt MBA khô, mô hình này được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn và kết quả gần khớp thực nghiệm [4]. Nhiều tác giả cũng thực hiện nghiên cứu về phân bố nhiệt trong MBA khô bằng phương pháp phần tử hữu hạn [5], [6]. Để giải được các bài toán truyền nhiệt và mô phỏng phân bố nhiệt, các nhà nghiên cứu thường sử dụng các phương pháp nghiên cứu khác nhau, đó là: phương pháp giải tích hoặc “bán giải tích” (semi-analytic) như mạch nhiệt thay thế tương đương và các phương pháp số xây dựng mô hình trường nhiệt [7].

Mô hình trường nhiệt sử dụng phương pháp số để giải các phương trình vi phân của trường nhiệt được xây dựng từ mô hình vật lý của MBA. Ưu điểm của mô hình trường nhiệt là cho phép mô tả đầy đủ phân bố trường nhiệt trên MBA; đưa ra các thông tin chi tiết về quá trình truyền nhiệt trên từng phân vùng cục bộ của MBA bao gồm nhiệt độ tại phân vùng đó và tốc độ thay đổi nhiệt độ theo các hướng (gradient của

trường nhiệt). Những nhược điểm chính của mô hình trường là: cần nhiều thời gian để xây dựng mô hình phân tích và đưa ra lời giải, cần sử dụng các máy tính có khả năng tính toán mạnh mẽ mà không thể tính toán bằng tay, khó khăn với những người mới tiếp cận, và các kết quả vẫn cần phải hiệu chỉnh do còn phụ thuộc vào đặc tính vật liệu và mức độ chi tiết của mô hình. Hiện nay, mô hình trường nhiệt cho MBA điện thường sử dụng phương pháp giải số, cụ thể là áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) để giải hệ phương trình vi, tích phân trong động học chất lưu (ĐHCL) [7]. Trong nghiên cứu [8], Wang Ning sử dụng phương pháp PTHH thông qua phần mềm COMSOL Multiphysics mô phỏng 3D phân bố nhiệt MBA khô có kiểm chứng kết quả mô phỏng với đo đạc thực nghiệm để chứng minh tính đúng đắn của mô hình. Tuy nhiên, mô hình này vẫn sử dụng các thông số nhiệt là hằng số.

Ở trong nước, cũng có những nghiên cứu về phân bố nhiệt trong MBA khô. Trong [9], tác giả nghiên cứu về phân bố nhiệt MBA khô có lõi thép VĐH sử dụng các thông số nhiệt của vật liệu epoxy là hằng số và phân bố nhiệt được nghiên cứu trong mô hình 2D bằng phần mềm FlexPDE 2D, sử dụng phương pháp PTHH.

Bài báo này trình bày nghiên cứu mô hình hóa, mô phỏng 3D phân bố nhiệt trong MBA khô có cuộn dây đúc trong epoxy 320kVA 22/0,4kV bằng phương pháp PTHH và phương pháp ĐHCL thông qua các phần mềm Ansys. Mô phỏng, tính toán được áp dụng với cả trường hợp hệ số vật liệu biến đổi theo nhiệt độ kế thừa các kết quả của nhóm nghiên cứu trong [2]. Trong phần 2, tác giả trình bày lý thuyết nguồn nhiệt và truyền nhiệt trong MBA khô. Phần 3 trình bày mô hình hóa MBA khô có cuộn dây đúc trong epoxy 320kVA 22/0,4kV bằng phần mềm Ansys, quá trình thực nghiệm để xác định điều kiện biên cũng được giới thiệu trong phần này. Kết quả mô phỏng với trường hợp tải định mức, non tải được trình bày trong phần 4. Các kết quả mô phỏng với thông số nhiệt là hằng số, thông số nhiệt thay đổi theo nhiệt độ được so sánh với kết quả thực nghiệm. Phần 5 là kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.

## 2. Nguồn nhiệt trong MBA

Nguồn phát nhiệt chủ yếu trong MBA là mạch từ và dây quấn. Tổn hao lõi thép và tổn hao đồng gọi là tổn hao chính, ngoài ra còn các tổn hao phụ như tổn hao phụ dây quấn (do đầu nối, dòng Foucault trong dây dẫn), tổn hao phụ lõi thép (từ trường tản mọc vòng vật liệu kết cấu, vò thùng)... đều biến thành nguồn nhiệt trong MBA.

Kết nối điện bên trong các MBA có thể sinh ra điện trở tiếp xúc cao và gây ra nhiệt độ cao hơn. Nhiệt độ quá cao có thể làm hư hỏng các khớp nối và dẫn đến hư hỏng MBA. Ngoài ra, nhiệt độ cao còn làm vật liệu cách điện nhanh chóng hóa già, giảm tuổi thọ cách điện, ảnh hưởng nghiêm trọng đến tuổi thọ biến áp. Do đó, nhiệt sinh ra do các tổn hao phải được xác định và có giải pháp làm mát, truyền ra môi trường ngoài.

- *Tổn hao trong dây quấn:*

Tổn hao trong dây quấn  $\Delta P'_u$  gây ra bởi dòng điện xoay chiều sẽ lớn hơn giá trị tính theo công thức:

$$\Delta P'_u = mI_1^2 R_{1d} + mI_2^2 R_{2d} \quad (1)$$

Trong đó:

m – số pha

$R_{1d}, R_{2d}$  – điện trở pha dây quấn sơ cấp và thứ cấp đo với dòng một chiều

$I_1, I_2$  – giá trị hiệu dụng dòng điện sơ, thứ cấp MBA

Tổn hao  $\Delta P'_u$  trong công thức gọi là tổn hao chính, sai khác giữa tổn hao do dòng điện xoay chiều tạo nên và tổn hao chính  $\Delta P'_u$  được gọi là tổn hao phụ trong dây quấn. Tổn hao phụ do dòng điện cảm ứng trong kim loại do từ trường tản gây nên, và còn do dòng dây quấn song song không được hoán vị triệt để [10].

Tổn hao phụ thường được đặc trưng bằng hệ số tổn hao phụ k:

$$\Delta P_u = k_1 m_1 I_1^2 R_{1d} + k_2 m_2 I_2^2 R_{2d} \quad (2)$$

Hệ số k phụ thuộc vào độ dẫn điện và cách tạo dây quấn, vào tần số, vào vật liệu chế tạo dây dẫn và vào nhiệt độ. Vì vậy k được xác định riêng cho từng dây quấn.

Theo qui định nhà nước, đo tổn thất dây quấn ở nhiệt độ 75°C từng dây quấn phải thỏa mãn điều kiện [10]:

$$\Delta P_{u75^\circ\text{C}} = k_{75^\circ\text{C}} m I^2 R_{75^\circ\text{C}} = k_{75^\circ\text{C}} m I^2 \frac{l_{tb} N}{\gamma_{75^\circ\text{C}} \cdot S} \quad (3)$$

Trong đó:

$l_{tb}$ : Chiều dài trung bình vòng dây

N: Số vòng dây

S: tiết diện dây

$\gamma_{75^\circ\text{C}}$ : Điện dẫn suất dây dẫn ở 75 °C

- *Tổn hao trong lõi thép:*

Tổn hao lõi thép gồm có hai loại: tổn hao từ trễ và tổn hao do dòng điện xoáy (dòng Foucault). Tổn hao từ trễ phụ thuộc vào thành phần hóa học của lá thép, vào nhiệt độ và phương pháp gia công cơ khí. Tạp chất như cacbon, lưu huỳnh, oxy,... làm tăng tổn hao từ trễ. Không để các bon vượt quá 0,01% ở thép cán nguội. Tăng thành phần silic làm giảm tổn hao từ trễ, giảm tổn hao Foucault (do tăng điện trở suất của vật liệu). Nhưng lượng silic quá nhiều mau làm cùn dụng cụ cắt thép, vật liệu sắt từ hiện nay chỉ chứa khoảng 3% Si. Tổn hao từ trễ còn phụ thuộc vào chu kỳ từ trễ, từ là phụ thuộc vào tần số dòng điện từ hóa.

Tổn hao từ trễ có thể biểu diễn bằng công thức [10]:

$$P_h = \eta \cdot f \cdot B^x \quad (4)$$

Trong đó:

f: Tần số dòng từ hóa (Hz)

B: Trị số cực đại của cường độ từ cảm (T)

$\eta$ : Hằng số phụ thuộc vào thành phần hóa học và gia công mạch từ

Tổn hao Foucault được biểu diễn bằng công thức:

$$p_w = \frac{\Delta p_w}{m_t} = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{\gamma \cdot \rho} (d \sigma_k \cdot f \cdot B)^2 \quad (5)$$

Trong đó:

d: Chiều dày lá thép (m)

$m_t$ : Khối lượng lá thép (kg)

$\gamma$ : Khối lượng riêng (kg/m<sup>3</sup>)

$\sigma_k$ : Hệ số hình dáng (đối với dòng điện xoay chiều hình sin  $\sigma_k = 1,11$ )

$\rho$ : Điện trở suất ( $\Omega\text{m}$ )

Dòng Foucault cũng như tổn hao công suất do nó gây nên trong lõi thép MBA sẽ không thay đổi khi MBA có tải hay không tải. Vì vậy tổn hao sắt từ sau này sẽ tính tương ứng là tổn hao không tải MBA.

Ước tính chính xác của nhiệt độ trên tất cả các bề mặt là rất quan trọng trong thiết kế MBA để quyết định mật độ từ thông

hoạt động trong lõi và mật độ dòng điện trong cuộn dây. Nó giúp xác định, kiểm tra hiệu quả giải pháp làm mát lõi thép và cuộn dây. Nó cũng giúp trong việc đảm bảo vận hành tin cậy của MBA từ tuổi thọ cách điện có thể được ước tính cho phép điều kiện quá tải và các tính toán khác.

Cơ chế truyền nhiệt trong MBA diễn ra thông qua ba phương thức: dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ. Trong vật dẫn và cách điện thì dẫn nhiệt đóng vai trò quan trọng nhất. Đối với bề mặt cách điện epoxy của MBA khô, đối lưu đóng vai trò quan trọng nhất và việc dẫn nhiệt là ít quan trọng nhất. Với bề mặt làm mát tiếp xúc với môi trường không khí thì đối lưu và bức xạ đóng vai trò quan trọng hơn dẫn nhiệt. Xây dựng các phương trình toán học chính xác để mô tả đầy đủ các phương thức truyền nhiệt là khá khó khăn và do đó hiện nay chủ yếu là dựa vào công thức kinh nghiệm để tính toán [10].

Để xét các phương thức truyền nhiệt, người ta chia MBA làm hai nhóm: nhóm nguồn nhiệt (gồm dây quấn, lõi thép) và nhóm truyền nhiệt (gồm cách điện, không khí, epoxy, môi trường).

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng phương pháp PTTT để giải phương trình mô tả chuyển động chất lưu. Để xác định chính xác điều kiện biên, các thực nghiệm trên thiết bị thực tế cũng được thực hiện để xác định các hệ số đồng dạng của trao đổi nhiệt đối lưu tự nhiên. Mô hình hóa MBA được trình bày trong phần tiếp theo.

### 3. Mô hình hóa MBA khô có cuộn dây bọc trong epoxy

Đối tượng làm mẫu nghiên cứu là MBA khô, 03 pha, công suất 320 kVA, điện áp 22/0,4kV, có cuộn dây bọc trong epoxy. Các thông số nhiệt của epoxy (hệ số dẫn nhiệt, hệ số khuếch tán nhiệt và nhiệt dung riêng) có thể được xem xét là hằng số, hoặc là hàm biến thiên theo nhiệt độ sử dụng kết quả thực nghiệm trong bài báo [2].

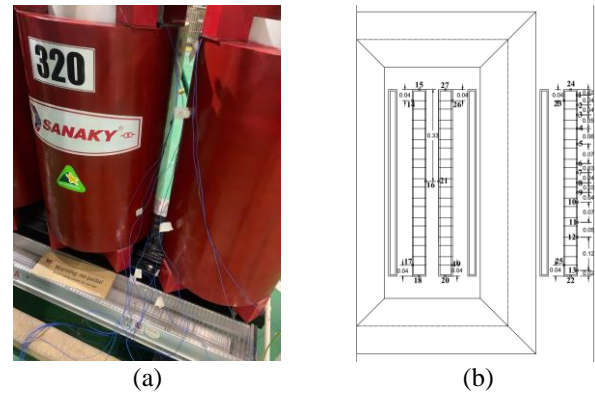
#### 3.1. Thực nghiệm xác định điều kiện biên nhiệt độ MBA

Kích thước hình học của MBA khô 3 pha 320 kVA – 22/0,4kV sử dụng làm thực nghiệm là: 1340 mm × 930 mm × 1550 mm. Trong quá trình thực nghiệm, MBA được làm mát tự nhiên. Các thông số khác của MBA được ghi lại trong bảng sau đây:

**Bảng 1:** Các thông số đo đặc thực nghiệm của MBA 320 kVA – 22/0,4 kV

TT	Thông số	Giá trị
1	Dòng điện không tải $i_0\%$	0,59
2	Tổn hao không tải: $P_0$ (W)	835
3	Tổn hao ngắn mạch $P_k$ (W)	3545
4	Điện áp ngắn mạch $u_k\%$	6

Nhiệt độ được đo tại 27 điểm như trên Hình 1. Can nhiệt loại T được dán vào các vị trí như trên hình và dữ liệu về nhiệt độ được ghi lại thông qua datalogger. Các thử nghiệm ở trạng thái: tải định mức, 70% tải và 50% tải được ghi lại khi nhiệt độ đạt đến trạng thái bình ổn nghĩa là trong 2h liên tiếp nhiệt độ không tăng quá 1°C



**Hình 1:** Hình ảnh đo nhiệt thực tế MBA (a) và sơ đồ điểm gắn can nhiệt trên cuộn CA và HA (b)

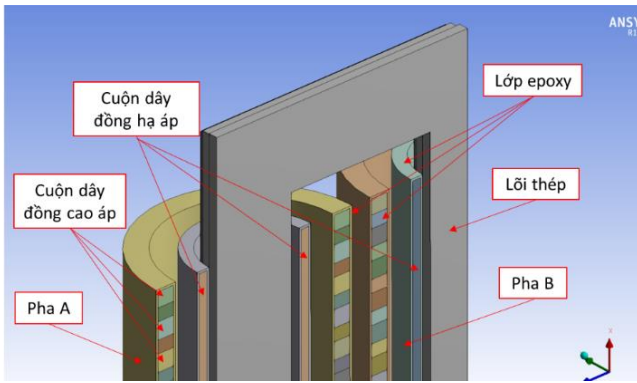
Kết quả đo nhiệt độ trên vỏ cuộn CA và HA được thể hiện ở Bảng 2.

**Bảng 2:** Kết quả đo nhiệt độ trên vỏ cuộn CA và HA MBA khô

Can nhiệt	Tải định mức	70% Tải định mức	50% Tải định mức
1	53,3	39,3	31,1
2	55,0	38,8	31,7
3	58,4	41,3	32,8
4	58,8	40,4	31,7
5	52,6	40	32,1
6	51,1	36,5	30,7
7	54,6	35,6	29,4
8	51,7	35,7	29,6
9	53,4	36,4	29,4
10	51,6	36,3	29,8
11	51,1	33,2	27,7
12	40,9	30,6	25,6
13	53,3	36,3	29,4
14	58,6	41,8	33,9
15	48	38	31,9
16	66,5	43,3	34
17	26,6	23,5	21,7
18	33,2	27,2	24,1
19	33,4	27	24,2
20	32,7	27,1	23,8
21	62,6	42,1	33,2
22	29,5	23,9	21,3
23	67,5	44,7	35,5
24	42,6	32,1	27,8
25	51,1	34,4	27,7
26	57,5	42,1	34,9
27	45,8	37,1	30,8

#### 3.2. Mô hình hóa 3D MBA khô trong phần mềm Ansys Workbench

Mô hình 3D MBA được xây dựng trên phần mềm ANSYS, với các kích thước thực của máy được nhà sản xuất cung cấp. Chi tiết mô hình được thể hiện trong Hình 2.

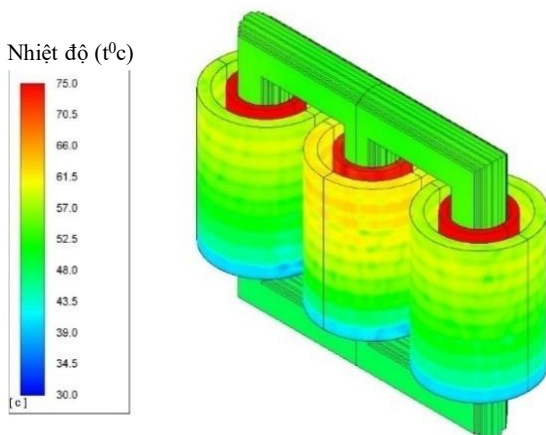


**Hình 2:** Mô hình mô phỏng MBA khô 320 kVA 22/0,4kV

Sau khi thiết kế mô hình 3D, tác giả thực hiện chia lưới mô hình. Số phần tử sau khi chia lưới mô hình là 17 triệu phần tử, các phần tử dạng đa diện 6 mặt. Khu vực lớp epoxy có chiều dày 5mm được chia thành 3 lớp, vùng tiếp xúc giữa lớp epoxy và không khí được chia 5 lớp biên. Các điều kiện đơn trị như tính chất nhiệt vật lý của vật liệu epoxy được biểu diễn gần đúng dưới dạng hàm theo nhiệt độ được nhập vào phần mềm. Các thông số nhiệt của vật liệu epoxy thu được từ thực nghiệm đã thực hiện ở bài báo [2]. Trong quá trình mô phỏng tác giả đã sử dụng máy tính Workstation HP Z440 có vi xử lý Xeon 2680V4: 14 cores, 28 threads, 64 Gb Ram. Thời gian để máy tính mô phỏng tính toán cho mỗi trường hợp khoảng 12 tiếng. Kết quả mô phỏng được trình bày chi tiết trong phần tiếp theo.

#### 4. Kết quả mô phỏng và so sánh với thực nghiệm

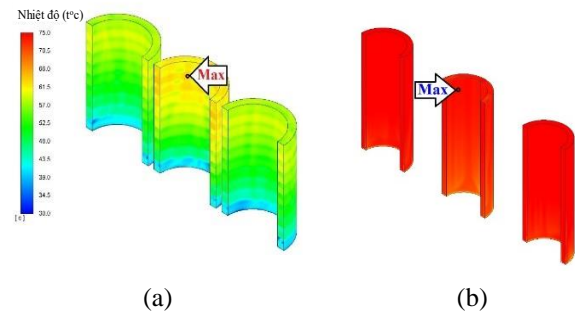
Ở chế độ hoạt động tải định mức thực hiện mô phỏng MBA với dòng điện hiệu dụng:  $I_{HA}=461,9A$  và  $I_{CA} = 8,4A$ . Phân bố nhiệt MBA qua mô phỏng bằng phần mềm ANSYS. Mô phỏng sử dụng các thông số nhiệt là hàm số biến thiên theo nhiệt độ.



**Hình 3:** Phân bố nhiệt độ MBA 320kVA 22/0,4kV ở chế độ tải định mức

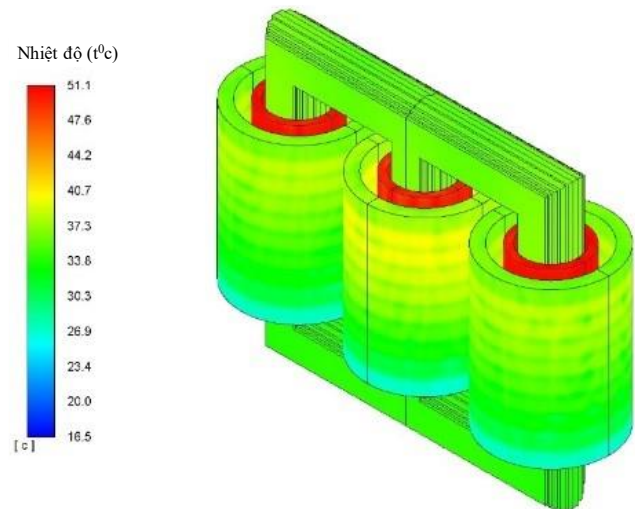
Qua phân bố nhiệt ở hình 3, ta thấy nhiệt độ phân bố không đồng đều trên các pha. Nhiệt độ cao tập trung ở phần trên các cuộn dây do hiện tượng đối lưu tự nhiên. Không khí nóng có xu hướng đi lên trên tạo lớp không khí nóng hơn bao quanh bề mặt trên của cuộn dây so với phần bên dưới từ đây làm cho nhiệt độ phần bên trên của cuộn dây MBA cao hơn. Do pha B nằm ở giữa MBA bị ảnh hưởng nhiệt độ từ 2 pha bên cạnh A,

C và cuộn dây hạ áp nằm trong cuộn dây cao áp khiến cho việc không khí giải nhiệt trong khe hẹp giữa cuộn cao áp và hạ áp khó khăn hơn. Nhiệt độ cuộn HA cao hơn nhiệt độ cuộn CA.



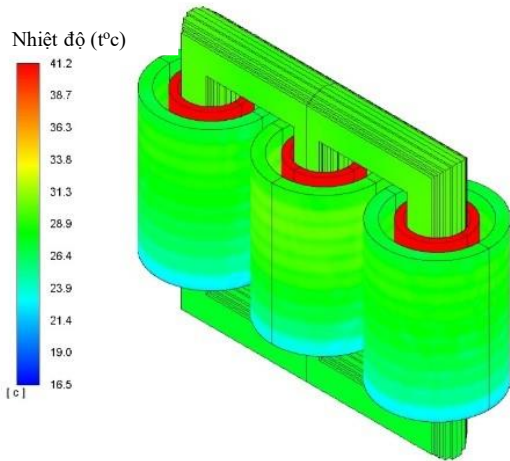
**Hình 4:** Phân bố nhiệt độ và điểm nóng nhất trên (a) cuộn CA và (b) cuộn HA tại trường hợp tải định mức

Kết quả mô phỏng cho thấy MBA khô 320 kVA khi làm việc với tải định mức nhiệt độ cao nhất cuộn CA là 66,8°C nằm ở lòng trong cuộn CA pha B độ cao  $z = 9$  cm tính từ đỉnh cuộn dây CA. Nhiệt độ nóng nhất của cuộn HA là 75°C nằm trong lòng cuộn HA pha B độ cao  $z = 8,2$ cm tính từ đỉnh cuộn HA xuống. Đây chính là ưu điểm của công cụ mô phỏng ANSYS. Phần mềm mô phỏng cho phép chúng ta xác định được phân bố nhiệt cũng như những điểm phát nóng cục bộ mà trong thực nghiệm khó có thể xác định được. Vậy với nhiệt độ như trên thì cách điện của dây quấn cấp F là hoàn toàn chịu được khi MBA làm việc lâu dài với tải định mức.



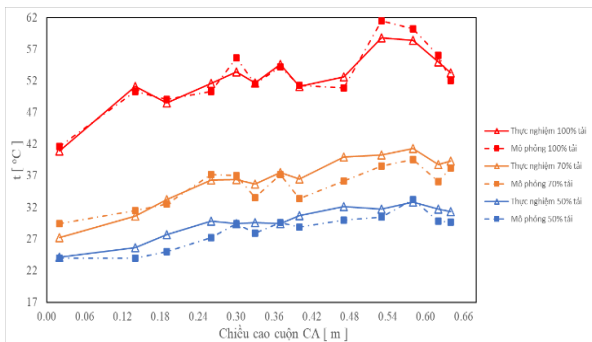
**Hình 5:** Phân bố nhiệt độ MBA 320kVA ở chế độ 70% tải định mức

Tương tự như trên, chúng ta thực hiện mô phỏng phân bố nhiệt độ MBA tại điều kiện 70% tải định mức (Hình 5) và 50% tải định mức (Hình 6).



**Hình 6:** Phân bố nhiệt độ và điểm nóng nhất trên cuộn CA (a) và trên cuộn HA (b) tại trường hợp 50% tải định mức

Sau khi thực hiện mô phỏng phân bố nhiệt MBA khô 320kVA tại 3 trường hợp tải khác nhau và so sánh với dữ liệu đo đạc thực tế các điểm nhiệt theo chiều cao cuộn CA pha A thực hiện tại nhà máy sản xuất MBA Sanaky. Kết quả cho thấy mô hình mô phỏng cho kết quả sát với thực nghiệm (Hình 7).



**Hình 7:** So sánh giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm tại các điều kiện tải khác nhau

Sai số giữa kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm ở các điểm nhiệt theo chiều cao cuộn CA pha A trong điều kiện tải định mức thể hiện trong Bảng 3.

**Bảng 3:** Sai số giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng nhiệt độ theo chiều cao cuộn CA ở điều kiện tải định mức

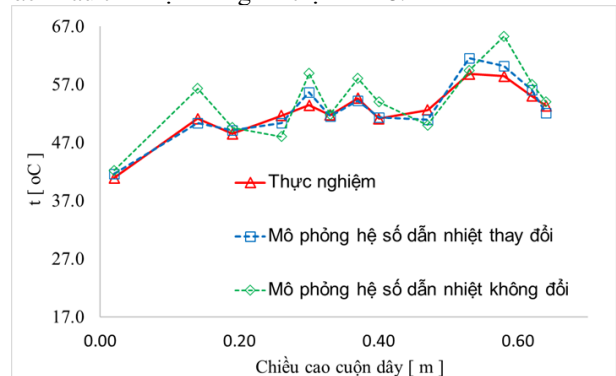
Chiều cao cuộn CA (m)	t°C thực nghiệm	t°C mô phỏng	Sai số (%)
0,02	40,9	41,6	1,79
0,14	51,1	50,3	1,57
0,19	48,5	49,1	1,15
0,26	51,6	50,3	2,5
0,30	53,4	55,6	4,12
0,33	51,7	51,5	0,43
0,37	54,6	54,2	0,73
0,40	51,1	51,3	0,38
0,47	52,6	50,9	3,24
<b>0,53</b>	<b>58,8</b>	<b>61,5</b>	<b>4,59</b>
0,58	58,4	60,2	3,08
0,62	55,0	56,0	1,82
0,64	53,3	52,1	2,25

Chúng ta nhận thấy sai số trong trường hợp này không vượt quá 5%. Kết quả này chứng tỏ tính đúng đắn của mô hình mô phỏng với các thông số về nhiệt của vật liệu epoxy thay đổi theo nhiệt độ.

Tiếp tục thực hiện mô phỏng MBA 320 kVA với các thông số về nhiệt của vật liệu epoxy là hằng số để so sánh với kết quả mô phỏng MBA với các thông số vật liệu epoxy là hàm theo nhiệt độ xây dựng từ thực nghiệm. Các hệ số nhiệt là không đổi và có giá trị như sau:

- Khối lượng riêng  $D = 1640 \text{ kg/m}^3$
- Nhiệt dung  $C_{100^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}} = 1500 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{K}$
- Hệ số dẫn nhiệt  $\lambda_{100^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}} = 0,32 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{K}$
- Modun đàn hồi của epoxy  $E1 = 3,6 \text{ (GN/m}^2\text{)}$
- Hệ số poisson epoxy  $\nu_1 = 0,34$
- Độ giãn ở nhiệt của epoxy  $= 0,7 \times 10^{-4} \text{ (1/}^{\circ}\text{K)}$

Ta có kết quả so sánh giữa các phân bố nhiệt theo chiều cao cuộn CA pha A ở điều kiện tải định mức với các trường hợp khác nhau thể hiện trong đồ thị Hình 8.



**Hình 8:** So sánh giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng với thông số nhiệt thay đổi và không đổi

Sai số giữa kết quả mô phỏng phân bố nhiệt MBA với các hệ số về nhiệt vật liệu epoxy là hằng số và kết quả thực nghiệm ở các điểm nhiệt theo chiều cao cuộn CA pha A ở điều kiện tải định mức thể hiện trong Bảng 4.

**Bảng 4:** Sai số giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng với hệ số về nhiệt vật liệu epoxy là hằng số ở điều kiện tải định mức

Chiều cao cuộn CA (m)	t°C thực nghiệm	t°C mô phỏng hệ số nhiệt epoxy là hằng số	Sai số (%)
0,02	40,9	42,2	3,1
0,14	51,1	56,3	10,2
0,19	48,5	49,6	2,2
0,26	51,6	48,0	7,0
0,30	53,4	58,9	10,3
0,33	51,7	51,8	0,2
0,37	54,6	58,0	6,2
0,40	51,1	54,0	5,7
0,47	52,6	50,0	4,9
0,53	58,8	59,4	1,1
0,58	58,4	64,2	9,9
0,62	55,0	50,0	9,1
<b>0,64</b>	<b>53,3</b>	<b>47,5</b>	<b>10,9</b>

So sánh kết quả giữa mô phỏng 3D phân bố nhiệt MBA với các hệ số về nhiệt của epoxy là hằng số và thực nghiệm ở điều kiện tải định mức, sai số có thể lên đến 10,9%. Sai số này cao gấp 2 lần sai số khi mô phỏng phân bố nhiệt MBA với các hệ số về nhiệt của epoxy thay đổi theo nhiệt độ.

Như vậy, việc sử dụng các hệ số nhiệt biến thiên theo nhiệt độ sẽ cho kết quả mô phỏng chính xác và gần với kết quả thực nghiệm hơn so với trường hợp chúng ta sử dụng các hệ số nhiệt là hằng số.

## 5. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả đã trình bày nghiên cứu mô phỏng phân bố nhiệt trong MBA khô bằng phương pháp PTHH giải bài toán động lực học chất lưu. Thông số đầu vào của mô hình như thông số nhiệt, điều kiện biên được xác định bằng phương pháp thực nghiệm để tăng tính chính xác của mô hình mô phỏng. Kết quả mô phỏng tính toán với MBA khô, cách điện bằng epoxy 320kVA 22/0,4kV trong trường hợp tải định mức và non tải được so sánh với thực nghiệm đã minh chứng được tính chính xác của mô hình và khả năng áp dụng trong thiết kế, chế tạo cũng như vận hành MBA trong hệ thống điện. Trong các nghiên cứu tiếp theo, tác giả sẽ tập trung vào mô phỏng phân bố nhiệt MBA trong chế độ sự cố, xác định ứng suất ngắn mạch tổng hợp trên cuộn dây MBA.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST) trong đề tài mã số T2023-PC-044.

Tác giả xin trân trọng cảm ơn Nhà máy sản xuất MBA Sanaky đã hỗ trợ thực hiện các thực nghiệm tại Nhà máy.

## Tài liệu tham khảo

- [1] S. Enache, A. Campeanu, I. Vlad and M. -A. Enache (2021) *Optimization of Design of Very High Power Transformers in Power System*. 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2021, pp. 1-6.
- [2] Phạm Hồng Hải, Lê Đức Tùng, Đặng Quốc Vương, Đặng Chí Dũng, Lê Kiều Hiệp, Đỗ Tiến Công (2021) *Nghiên cứu đặc tính nhiệt của vật liệu Epoxy Trong máy biến áp Khô*. Tạp Chí Khoa học Và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, vol 19, số p.h 7, tr 29-34.
- [3] Le Duc Tung, Pham Hong Hai (2020) *Áp dụng phương pháp tích phân số Mô phỏng điện từ trường của trạm biến áp*. Tạp Chí Khoa học Và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, vol 18, số p.h 5.1, tr 1-5.
- [4] E. Rahimpour and D. Azizian (2007) *Analysis of temperature distribution in cast-resin dry-type transformers*. Electr. Eng., vol. 89, no. 4, pp. 301–309.
- [5] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, and T. Noori (2008) *Three- and Two-Dimensional Finite-Element Computation of Inrush Current and Short Circuit Electromagnetic Forces on Windings of a Three-Phase Core-Type Power Transformer*. IEEE Trans. Magn. ISSN 0018-9464, vol. 44, no. 5, pp. 590–597.
- [6] Z. Dianchun and Y. Jiaxiang (2000) *Thermal Field and Hottest Spot at the Ventilated Dry-type Transformer*. IEEE Conf. Publ., vol. 1, pp. 141–143.
- [7] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, and C. Mejjuto (2009) *Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 3, pp. 871–882.
- [8] W. Ning and X. Ding (2012) *Three-Dimensional Finite Element Analysis on Fluid Thermal Field of Dry-Type Transformer*. Instrumentation, Meas. Comput. Commun. Control (IMCCC), 2012 Second Int. Conf., pp. 516–519.
- [9] Hoàng Tháp Mười (2015) *Nghiên cứu phân bố nhiệt trong máy biến áp khô có lõi thép vô định hình..* Luận văn thạc sĩ kỹ thuật, Đại Học Bách Khoa Hà Nội.

- [10] 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.