

MÔ PHỎNG VÀ TÍNH TOÁN ĐIỆN CẢM CUỘN KHÁNG CÓ XÉT ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA BẢO HOÀ MẠCH TỪ

SIMULATION AND CALCULATION OF REACTOR CONSIDERING THE EFFECTS OF MAGNETIC SATURATION

Lê Anh Tuấn^{1*}, Nguyễn Hữu Linh¹,
Nguyễn Tiến Trung¹, Phạm Văn Cương¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.232>

TÓM TẮT

Cuộn kháng là phần tử điện cảm, thường sử dụng để hạn chế dòng ngắn mạch và duy trì điện áp định mức khi có sự cố trong lưới điện. Bên cạnh đó, cuộn kháng phối hợp với tụ còn có khả năng lọc sóng hài trong lưới điện. Đối với cuộn kháng, thông số giá trị điện cảm là quan trọng nhất khi lựa chọn. Để tính toán giá trị điện cảm, người ta có thể dùng các công thức giải tích thông thường. Tuy nhiên hiện nay, nhờ công nghệ máy tính phát triển, điện kháng có thể được tính toán nhờ ứng dụng các phương pháp số, đặc biệt là phương pháp phần tử hữu hạn. Vì vậy, nghiên cứu này sử dụng phần mềm ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán điện cảm của một cuộn kháng thử nghiệm sẵn có trên thị trường. Bên cạnh đó, hiện tượng mạch từ bão hoà ảnh hưởng đến giá trị điện cảm cuộn kháng cũng được bài báo xét đến.

Từ khóa: Cuộn kháng; điện cảm; mô phỏng; bão hoà, phương pháp phần tử hữu hạn.

ABSTRACT

A reactor is an inductive element commonly used to limit short-circuit currents and maintain rated voltage during grid faults. Additionally, reactors, when combined with capacitors, have the ability to filter harmonic waves in the distribution network. When selecting a reactor, the most important parameter is the inductance value. Traditional analytical formulas can be used to calculate the inductance value. However, with the advancement of computing technology, inductance can now be computed using numerical methods, particularly the finite element method. Therefore, this study utilizes software applying the finite element method to calculate the inductance of an available reactor on the market. Furthermore, the paper also considers the saturation phenomenon and its impact on the inductance value of the reactor.

Keywords: Reactor; inductance; simulation; saturation; finite element methods.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: Leanhtuan0985@gmail.com

Ngày nhận bài: 08/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 18/5/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/7/2024

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
h_w	m	Chiều cao cửa sổ từ
w_w	m	Chiều rộng cửa sổ mạch từ
$w_0 = w_c$	m	Độ rộng của lõi từ
h_y	m	Độ rộng gông từ
d_c	m	Chiều sâu lõi từ
g	m	Chiều rộng khe hở không khí
N	vòng	Số vòng dây

CHỮ VIẾT TẮT

BHMT	Bảo hoà mạch từ
PTHH	Phần tử hữu hạn
MĐTT	Mật độ từ thông
PPGT	Phương pháp giải tích

1. GIỚI THIỆU

Cuộn kháng là một cuộn dây có điện cảm, cấu tạo thường bao gồm cuộn dây và lõi từ [1]. Cuộn kháng được sử dụng rất nhiều nơi vì có vai trò quan trọng trong việc kiểm soát dòng ngắn mạch và duy trì điện áp ổn định khi lưới điện có những sự cố bất thường. Để duy trì chất lượng điện áp của hệ thống điện, khi lọc sóng hài trong lưới cuộn kháng sẽ kết hợp với tụ điện để tạo ra các mạch lọc bảo vệ hệ thống điện khỏi những tần số không mong muốn. Ở trường hợp này nó được lựa chọn trên nguyên tắc loại bỏ các tần số không mong muốn [2].

Thông số quan trọng khi chọn cuộn kháng là giá trị điện cảm L . Thông số điện cảm này có thể được xác định bằng các công thức giải tích truyền thống. Tuy nhiên, với công nghệ tính toán áp dụng máy tính rất phát triển hiện

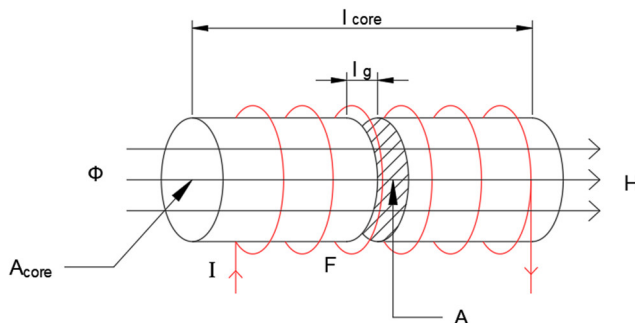
nay, người ta có thể tính toán điện cảm thông qua phương pháp số. Phương pháp số cũng đã được chứng minh với độ tin cậy, chính xác cao trong tính toán, đặc biệt trong bài toán vi tích phân của điện từ trường [4, 5]. Vì vậy, trong nội dung bài báo sẽ thực hiện tính toán điện cảm một cuộn kháng theo PPGT và phương pháp PTHH. Sự tương đồng giữa hai kết quả cho thấy sự phù hợp trong tính toán điện cảm áp dụng phương pháp PTHH và PPGT. Mặt khác, kết quả cũng cho thấy ưu điểm phương pháp PTHH so với PPGT thông thường như: tốc độ tính toán nhanh, khảo sát được giá trị của MĐTT tại từng điểm trong lõi sắt từ, điều chỉnh các thông số cuộn dây, mạch từ dễ dàng... Thêm vào đó, bài báo cũng ứng dụng phương pháp PTHH để mô phỏng khảo sát điện cảm CK khi có ảnh hưởng của bão hoà mạch từ. Khi xảy ra BHMT mối quan hệ giữa B-H trong mạch từ không còn tuyến tính như trạng thái không bão hoà [6, 7]. Khi mô phỏng cuộn kháng bằng phương pháp số sử dụng phương pháp PTHH, tương quan giữa B-H được xác định bằng đường cong đặc tính của vật liệu lõi từ được khai báo trong phần mềm tính toán.



Hình 1. Cuộn kháng xoay chiều 1 pha [3]

Để thực hiện nội dung, ở mục 2 sẽ trình bày tóm lược PPGT và phương pháp số để xác định điện cảm của một CK điển hình khi mạch từ chưa bão hoà. Ở mục 3 trình bày ứng dụng PPGT và phương pháp PTHH để xác định điện cảm cuộn kháng một pha có công suất 5,5kVA, $U_{dm} = 220V$, $f = 50Hz$. Giá trị điện cảm tính toán khi mạch từ không bão hoà thu được sẽ được so sánh từ đó bài báo đánh giá sự phù hợp và tương đồng giữa hai phương pháp. Bên cạnh đó, từ kết quả thu được bài báo cũng có một số nhận xét về ưu nhược điểm của hai phương pháp. Ở mục 4, nghiên cứu ứng dụng phương pháp số để khảo sát điện cảm cuộn kháng có xét đến ảnh hưởng của hiện tượng BHMT và từ đó có một số kết luận về đặc tính.

2. PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH TRUYỀN THỐNG XÁC ĐỊNH GIÁ TRỊ ĐIỆN CẢM CUỘN KHÁNG



Hình 2. Mô hình lõi từ

Thông thường, trong tính toán xác định điện cảm của một cuộn dây, điện cảm này được xác định theo PPGT. Dựa vào các thông số của CK như kích thước mạch từ, số vòng dây,... và thông qua các phương trình toán để tính toán giá trị điện cảm theo. Khi tính toán, giả thiết rằng lõi từ cuộn kháng không bão hoà. Cụ thể xét mô hình cuộn kháng có cuộn dây bao quanh lõi từ có dạng trụ như hình 2. Các tính toán điện cảm cuộn kháng như sau [8]:

Theo định luật Ohm cho mạch từ:

$$F = KI \tag{1}$$

Với F là từ thế, H là cường độ từ trường, I là chiều dài ống dây.

Giả sử, MĐTT B là đồng nhất, từ thông Φ có thể được tính bằng:

$$\Phi = BA \tag{2}$$

Với A là tiết diện cắt ngang ống dây. Từ (1) và (2) ta có:

$$F = R\Phi \tag{3}$$

Với R là từ trở tổng, bằng tổng của từ trở lõi R_{core} và từ trở khe hở không khí R_g :

$$R = R_{core} + R_g \tag{4}$$

Ta có thể tính hai đại lượng từ trở của lõi từ và khe hở không khí như sau [6]:

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot A} \text{ và } R_{core} = \frac{l_{core}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_{core}} \tag{5}$$

Với, l_g là khoảng cách khe hở không khí.

l_{core} là chiều dài lõi từ.

A_{core} là diện tích mặt cắt lõi.

μ_0 là độ từ thẩm chân không.

μ_r là độ từ thẩm vật liệu của lõi từ.

Khi mạch từ ở trạng thái chưa bão hoà độ từ thẩm lõi từ rất lớn nên từ trở của lõi từ rất nhỏ so với từ trở của không khí nên, nên $R_{core} \ll R_g$, lúc này:

$$R \approx R_g \tag{6}$$

Mặt khác ta có, từ thể trong cuộn dây do dòng điện i sinh ra:

$$F = N.i \tag{7}$$

Với i là cường độ dòng điện, N là số vòng dây.

Điện cảm của cuộn kháng được tính bởi [8]:

$$L = \frac{N^2}{R} \tag{8}$$

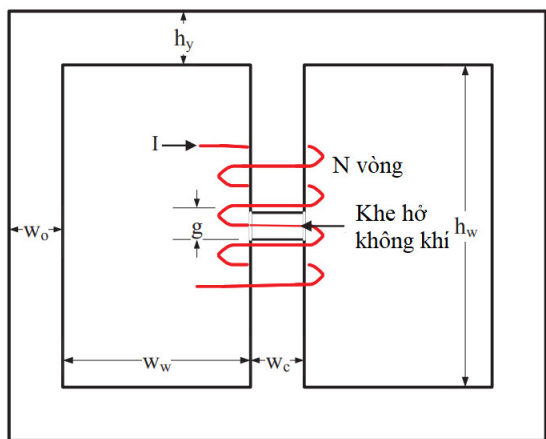
Trong trường hợp tính toán với mạch từ chưa bão hòa thì có thể bỏ qua từ trở của lõi mà chỉ tính toán theo từ trở của không khí. Lúc này điện cảm của cuộn kháng với lõi từ có khe hở không khí sẽ được xác định như sau:

$$L = \frac{N^2}{R_g} \tag{9}$$

3. ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH VÀ PHƯƠNG PHÁP SỐ XÁC ĐỊNH GIÁ TRỊ ĐIỆN CẢM CUỘN KHÁNG

3.1 Mô hình cuộn kháng thực nghiệm

Bài báo ứng dụng PPGT và phương pháp PTHH để xác định giá trị điện cảm cho một cuộn kháng thương mại 5,5kVA, $U_{dm} = 220V$, $f = 50Hz$. Cuộn kháng này đang được ứng dụng trong thực tế hiện nay. Hình dạng, mô hình và thông số kích thước của cuộn kháng như ở hình 3 [8].



Hình 3. Hình dạng cuộn kháng

Thông số chi tiết của cuộn kháng như ở bảng 1.

Bảng 1. Thông số cuộn kháng

Thông số	Kí hiệu	Giá trị
Chiều cao của sổ từ	h_w (m)	0,374
Chiều rộng của sổ mạch từ	w_w (m)	0,056
Độ rộng của lõi từ	$w_0 = w_c$ (m)	0,076
Độ rộng gông từ	h_y (m)	0,076
Chiều sâu lõi từ	d_c (m)	0,076

Chiều rộng khe hở không khí	g (m)	0,001524
Số vòng dây	N	39

3.2. Tính toán điện kháng cuộn kháng thực nghiệm theo phương pháp giải tích

Áp dụng PPGT để tính toán điện cảm cho cuộn kháng thử nghiệm, thông số của cuộn kháng như bảng 1, kết quả tính toán như sau:

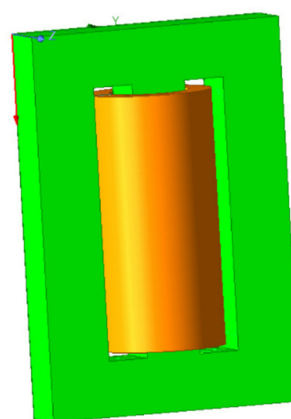
Từ (5), ta tính được từ trở của khe hở không khí:

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_o \cdot A} = \frac{0.001524}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,0762^2} = 2086475(\Omega)$$

Từ (9), ta tính được điện cảm của cuộn kháng theo PPGT:

$$L = \frac{N^2}{R_g} = \frac{39^2}{2086475} = 7,28(mH)$$

3.3. Tính toán điện kháng cuộn kháng theo phương pháp số

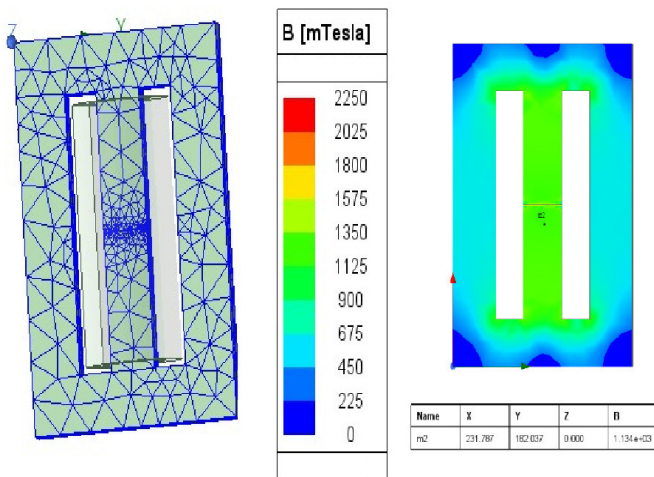


Hình 4. Mô hình 3D cuộn kháng

Bài báo sử dụng phần mềm ứng dụng phương pháp PTHH để tính toán giá trị điện cảm của cuộn kháng thực nghiệm. Hiện nay có rất nhiều các phần mềm ứng dụng PTHH để tính toán các bài toán về điện từ trường. Có thể liệt kê như: COMSOL là một phần mềm phân tích sử dụng PTHH. Phần mềm mô phỏng đối tượng dựa trên các cơ sở vật lý (Physics) được xây dựng sẵn, đồng thời có thể mở rộng, kết hợp các mô hình với nhiều cơ sở vật lý (Physics) để trở thành một mô phỏng đa mô hình (Multiphysics). COMSOL Multiphysics được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, trong đó có lĩnh vực về trường điện từ... [9, 10]. Opera là phần mềm của hãng Cobham. Opera bao gồm một bộ phần mềm chuyên sâu, ứng dụng phần mềm này có thể tính toán, xác định đặc tính của đối tượng vật lý sử dụng [11, 12]... Tuy nhiên, trong các phần mềm ứng dụng PTHH mô phỏng điện từ trường thì Ansys/Maxwell

là phần mềm phổ biến được sử dụng nhiều. Ansys/Maxwell được nhiều nhà nghiên cứu lựa chọn trong tính toán vì độ tin cậy cao [13, 14]. Do đó, trong nội dung bài báo sử dụng Ansys/Maxwell để mô phỏng và tính toán điện cảm của cuộn kháng thực nghiệm. Sau khi thiết lập mô hình CK trên phần mềm bằng các thông số cuộn kháng ở bảng 1 bằng phần mềm Ansys Maxwell, ta được mô hình cuộn kháng được thể hiện ở hình 4.

Ở mục này bài báo mô phỏng tính toán cuộn kháng với dòng điện $i = 25\sqrt{2}$ (36A-tương ứng giá trị đỉnh của dòng xoay chiều hiệu dụng 25A-dòng điện định mức của cuộn kháng thí nghiệm). Trong mô phỏng, sẽ không làm mất đi tính tổng quát khi lựa chọn lõi từ là thép kỹ thuật điện mã hiệu 1010. Đặc tính đường cong B-H của vật liệu lõi từ là thép 1010 trong thư viện của phần mềm Ansys/Maxwell (hình 7). Khi mô phỏng, cuộn kháng sẽ được chia các mắt lưới trong tính toán và kết quả MĐTT của lõi từ khi mô phỏng với Ansys/Maxwell như hình 5.



Hình 5. Phân bố từ trường B

Tại hình 5 có thể thấy rằng với dòng điện 36A theo mô phỏng, MĐTT tại lõi thép vị trí giữa đạt khoảng 1,134T. Như vậy, MĐTT trong lõi thép chưa vượt quá điểm bão hòa của vật liệu lõi từ (khoảng 1,7T). Với dòng điện này, giá trị điện cảm tính toán L của cuộn kháng là 7,33mH như hình 6.

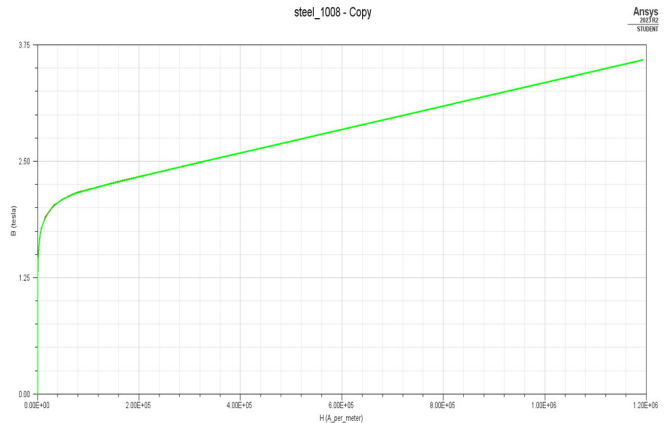
	X [mm]	Matrix1.L(Winding2,Winding2) [mH] Setup1 : LastAdaptive
1	0.000000	7.328827

Hình 6. Giá trị điện cảm trong phần mềm Ansys Maxwell

Kết quả giữa PPGT và phần mềm Ansys/Maxwell ứng dụng PTHH cho thấy: Giá trị theo giải tích và FEM tương ứng là 7,28/7,33mH, sai số là 0,7%. Như vậy có thể khẳng định, ở khi không bão mạch từ hoá kết quả tính toán giải tích và mô phỏng là tương đương nhau.

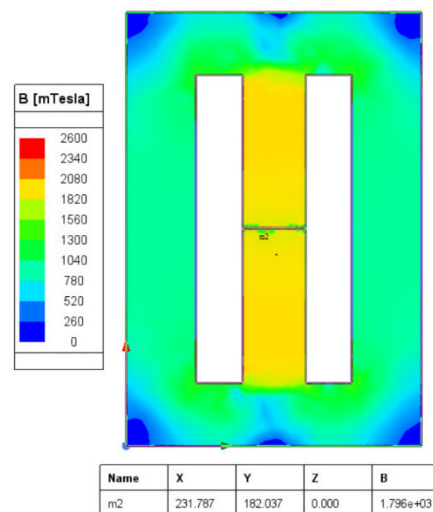
4. TÍNH TOÁN GIÁ TRỊ ĐIỆN CẢM Ở TRƯỜNG HỢP MẠCH TỪ BẢO HÒA VỚI PHƯƠNG PHÁP SỐ

Đối với vật liệu từ như thép kỹ thuật điện, tại vùng bão hòa của vật liệu khi MĐTT tăng một giá trị nhỏ sẽ kéo theo cường độ từ trường trong lõi từ tăng rất lớn. Vì vậy, khi làm việc với các thiết bị có mạch từ thì thường tránh để vật liệu từ đạt đến trạng thái bão hoà. Trong trường hợp đối với cuộn kháng có lõi là vật liệu từ, điểm làm việc của MĐTT lõi từ được lựa chọn với dòng định mức thì luôn nằm dưới điểm bão hoà [15].



Hình 7. Đặc tính B-H của lõi từ cuộn kháng

Để xác định ảnh hưởng của BHMT, bài báo tiếp tục ứng dụng mô hình mô phỏng cuộn kháng với phần mềm Ansys/Maxwell ở mục 3.2. Lúc này kịch bản mô phỏng sẽ thay đổi, cuộn dây CK được cấp dòng điện với giá trị khác nhau. Nếu dòng điện cấp lớn sẽ dẫn đến từ thế do cuộn dây sinh ra lớn. Từ thế lớn dẫn đến MĐTT trong lõi từ tăng, đến một giá trị nào đó đạt đến điểm bão hoà của vật liệu lõi từ. Để thành lập được đặc tính điện cảm theo dòng điện, khi mô phỏng dòng điện cuộn dây được đặt từ giá trị nhỏ đến giá trị gấp khoảng 5 lần dòng định mức (150A).



Hình 8. Phân bố MĐTT trong lõi thép với $i = 150$ A

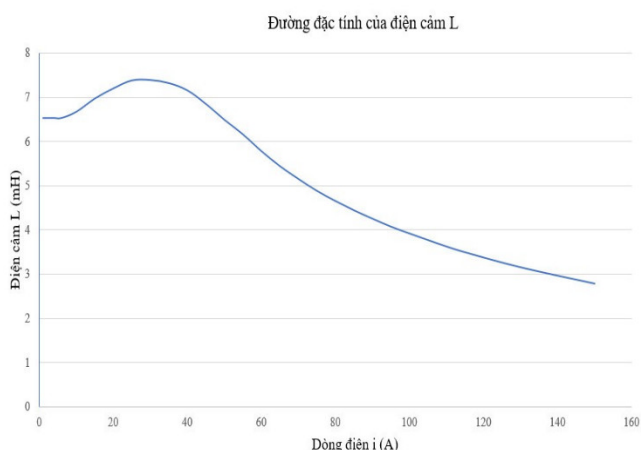
Ở dòng điện $i = 36A$ phân bố MĐTT khi mô phỏng cuộn cảm với Ansys/Maxwell như ở hình 5, mục 3.3, lõi từ lúc này không bão hoà. Với dòng $i = 150A$ khi mô phỏng phân bố MĐTT như ở hình 8. Ta có thể thấy rằng lúc này lõi từ lúc này đã bị bão hoà, giá trị MĐTT ở lõi thép giữa là lớn nhất. Giá trị của MĐTT lõi thép giữa đạt khoảng 1,8T và lớn hơn giá trị điểm bão hoà của thép kỹ thuật điện 1010 (1,7T). Tính toán giá trị điện cảm với $i = 150A$ là 2,78mH. Như vậy, điện cảm của cuộn kháng đã suy giảm đáng kể so với trường hợp không bị BHMT (giảm 2,64 lần)

Tổng hợp lại khi mô phỏng và tính toán điện cảm với các dòng điện cuộn dây khác nhau theo kịch bản đã xét ở trên ta thu được bảng sự phụ thuộc của điện cảm vào dòng điện cuộn dây tại bảng 2.

Bảng 2. Bảng giá trị điện cảm cuộn kháng theo dòng điện

i (A)	L (mH)
10	6,67
15	6,97
25	7,38
35	7,32
45	6,849
55	6,16
65	5,44
90	4,25
100	3,915
150	2,78

Từ số liệu bảng 2 thu được đặc tính của điện cảm cuộn kháng thực nghiệm theo dòng điện như hình 9.



Hình 9. Đường đặc tính điện cảm phụ thuộc dòng điện của cuộn kháng

Ta có thể thấy, chưa có BHMT, giá trị của điện cảm cuộn kháng biến đổi không nhiều. Trên đường đặc tính có thể thấy với $i < 45A$ ($B \approx 1,7T$ - giá trị bão hoà lõi thép),

giá trị điện cảm dao động quanh điểm giá trị điện cảm khi dòng định mức. Khi dòng điện lớn hơn 45A, lúc này mạch từ đã bị bão hoà, điện cảm của cuộn kháng suy giảm rất nhanh. Với dòng điện $i = 150A$ thì điện cảm bị giảm so với trường hợp định mức là 2,64 lần.

5. KẾT LUẬN

Qua nội dung tính toán điện cảm với PPGT và PTHH để tính toán điện cảm một cuộn kháng điện, ta có thể rút ra một số kết luận sau đây:

- Ở chế độ không BHMT, với dòng điện định mức thì điện cảm của cuộn kháng tính theo hai phương pháp PPGT và PTHH là tương đương nhau, sai số nhỏ ($< 1\%$). Như vậy, có thể khẳng định phương pháp PTHH khi ứng dụng khi mô phỏng là chính xác.

- Ở trường hợp mạch từ bão hoà, PPGT rất khó để thực hiện khi tính toán điện cảm. Tuy nhiên đối với phương pháp số, việc tính toán lúc này vẫn giữ nguyên mô hình CK chỉ thay đổi giá trị dòng điện để tính toán điện cảm. Khi mô phỏng nhận thấy hiện tượng BHMT ảnh hưởng đáng kể đến giá trị của điện cảm cuộn kháng. Khi cuộn kháng làm việc với dòng điện lớn, MĐTT trong mạch từ vượt điểm bão hoà, giá trị điện cảm cuộn kháng giảm mạnh. Với trường hợp $i = 150A$ ở trên thì giá trị điện cảm lúc này bị suy giảm rất nhiều (giảm 2,64 lần so với dòng điện định mức). Vì vậy, để tránh trường hợp lõi từ bị BHMT thì khi chọn lựa cuộn kháng người sử dụng cần chú ý về dòng làm việc của cuộn kháng.

Tóm lại, qua nghiên cứu cho thấy sự tương đồng khi tính toán điện cảm cuộn kháng từ hai phương pháp với trường hợp không bão hoà. Khi mạch từ bão hoà, với phương pháp PTHH người sử dụng vẫn có thể tính toán được điện cảm cuộn kháng. Khi có bão hoà, điện kháng cuộn kháng thay đổi rất lớn. Bên cạnh đó, với phương pháp PTHH người sử dụng có thể khảo sát phân bố MĐTT từng vị trí trên cuộn kháng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Phạm Văn Choi, Bùi Tín Hữu, Nguyễn Tiến Tôn, *Khi cụ điện*. Science and Technics Publishing House, Hanoi, 2006 (in Vietnamese).
- [2]. Bùi Đức Hưng, Đặng Chí Dũng, Đặng Quốc Vương, Đỗ Chi Phi, "Studying the influence of electromagnetic forces on core blocks of the shunt reactors by using the analytical model and finite element approach," *Measurement, Control, and Automation*, 4(1), 44-48, 2023.
- [3]. <https://deltavina.com/eagtop/>. Accessed 18 May 2024.
- [4]. Chari M. V. K., Salon S. J., *Numerical methods in electromagnetism*. Academic Press, California, USA, 2000.

[5]. Feng H., Cui X. Y., Li G. Y., "Coupled-field simulation of electromagnetic tube forming process using a stable nodal integration method," *International Journal of Mechanical Sciences*, 128: 332-344, 2017.

[6]. Petrushin V., Bendahmane B., Yahiaoui B., Yakimets, A., "Influence of magnetic circuit saturation and skin effects on the adjustable induction motor characteristics," *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(48), 29006-29013, 2017.

[7]. Polinder H., Sloopweg J. G., Hoeijmakers M. J., Compter J. C., "Modelling of a linear PM machine including magnetic saturation and end effects: Maximum force to current ratio," In *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2, 805-811, 2003.

[8]. Subash P., *Power Inductors: Design, Modeling and Analysis*. Doctoral Dissertations, University of Central Florida, USA, 2022.

[9]. Kamarudin M. S., Radzi N. H., Ponniran A., Abd-Rahman R., "Simulation of electric field properties for air breakdown using COMSOL multiphysics," In *4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*, 1-5, 2016.

[10]. Judáková Z., Janoušek L., Čarnecká L., Oreničová D., "Simulations of electromagnetic exposure system for irradiation of biological cultures: comparison of CST Studio Suite and COMSOL Multiphysics," In *2021 22nd International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 1-4, 2021.

[11]. Sawant N. P., Riley C. P., Venskus A., Vassilev D. H., Wale J. D., Wearing E., Michaelides, A.M., Topping, P.J., Matharu, H., "Multiphysics simulation tools for designing motors for traction applications in hybrid and electric vehicles," In *COUPLED VI: proceedings of the VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*, 428-439, 2015.

[12]. Jaski M., Dejus R., Moog E., "Magnetic Simulation of an Electromagnetic Variably Polarizing Undulator," In *PAC*, 11, 1289-1291, 2011.

[13]. Le Anh Tuan, Bui Duc Hung, Phung Anh Tuan, "Dimension determination of permanent magnets for improving performance of a low power three-phase line start permanent magnet synchronous motor," *Journal of Science and Technique, Le Quy Don Technical University*, 188(02), 135-146, 2018.

[14]. Bal S., Demirdelen T., Tümay M., "Three-phase distribution transformer modeling and electromagnetic transient analysis using ANSYS Maxwell," In *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 1-4, 2019.

[15]. S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, *Transformer engineering design, technology, and diagnostics, second edition*. Taylor & Francis Group, 50, 2013.

AUTHORS INFORMATION

**Le Anh Tuan, Nguyen Huu Linh, Nguyen Tien Trung,
Pham Van Cuong**

Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam