

Nghiên cứu ảnh hưởng của cách ghép lá thép tới phân bố từ cảm trên các khối trụ của cuộn kháng bù ngang bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Studying the influence of steel arrangements on magnetic flux density distributions in core blocks of the shunt reactors via a finite element method

Phạm Minh Tú¹, Bùi Đức Hùng¹, Dũng Đặng Chí¹, Trần Văn Thịnh¹, Phùng Anh Tuấn¹ and Đặng Quốc Vương¹

¹Khoa Điện, Trường Điện – Điện tử, Trường đại học Bách Khoa Hà Nội
E-mail: hung.buiduc@hust.edu.vn

Tóm tắt

Cuộn kháng bù ngang dùng để hấp thụ lượng công suất phản kháng dư thừa được sinh ra bởi dung dẫn đường dây khi vận hành không tải hoặc non tải, cân bằng công suất phản kháng trên hệ thống, tránh quá điện áp cuối đường dây, duy trì ổn định điện áp ở mức quy định. Cuộn kháng bù ngang được thiết kế với các khe hở phân bố trên trụ để tăng từ trở mạch từ, tăng năng lượng tích trữ khu vực khe hở. Tuy nhiên, xung quanh các khe hở luôn tồn tại và phát sinh thành phần từ trường tản, các thành phần từ trường tản hướng từ khối trụ này tới khối trụ khác và hợp với hướng cán của các lá thép theo các góc khác nhau làm ảnh hưởng đến các thông số của cuộn kháng, dẫn đến sự phân bố từ cảm trên các khối trụ không đồng đều. Trong bài báo này, phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng để khảo sát các kiểu ghép lá thép khác nhau, cắt vát góc xung quanh khối trụ để tránh bão hòa mạch từ tồn tại ở vùng góc mép của các lá thép. Thông qua kết quả đạt được, bài báo đưa ra đề xuất kiểu ghép phù hợp cho các khối trụ của cuộn kháng bù ngang ứng dụng trong lưới điện cao áp và siêu cao áp tại Việt Nam.

Từ khóa: Cuộn kháng bù ngang, mật độ từ cảm, mạch từ, cách ghép các lá thép, phương pháp phần tử hữu hạn.

Abstract

The shunt reactor is used to absorb excess reactive powers generated by capacitive powers on the lines for no-load or low-load operations, balance of reactive powers in electrical systems, avoiding the over-voltage at the line end and maintaining the voltage stability at the specified level. The shunt reactor is designed with air gaps in the iron core to increase reluctances, more energy is stored in the air gaps. However, the fringing flux always appears and exist around air gaps. This component orients from this core block to another that is suitable to the direction of laminations with different angles, making influence to the shunt reactor parameters, where appearing the fringing flux around the iron core blocks, leading to uneven distribution of the magnetic flux in the iron cores. In this paper, a finite element method is applied to investigate different types of lamination matching, cutting the bevel around the iron cores to avoid saturation of the magnetic circuit existing in the edge corner of the steel sheets. Through the obtained results, the paper proposes a suitable coupling type for the core blocks of shunt reactors applied in high and super-high voltage systems in Vietnam.

1. Đặt vấn đề

Cuộn kháng bù ngang (CKBN) là phần tử quan trọng, được sử dụng rộng rãi để nâng cao tính ổn định, hiệu quả trong hệ thống truyền tải và phân phối điện năng. Khi vận hành không tải hoặc non tải, điện dung ký sinh trên đường dây, đặc biệt ở đường dây dài có giá trị khá lớn sẽ làm tăng điện áp dọc tuyến đường dây, gây quá áp cuối đường dây. Để có thể duy trì ổn định điện áp ở mức quy định, CKBN được sử dụng để

hấp thụ lượng công suất phản kháng dư thừa được sinh ra bởi dung dẫn đường dây, cân bằng công suất phản kháng trên hệ thống [1]-[3]. Các CKBN thường được thiết kế với các khe hở phân bố trên trụ nhằm tăng từ trở mạch từ, tăng năng lượng tích trữ khu vực khe hở, giảm kích thước mạch từ. Thể tích của các khe hở này phụ thuộc vào công suất phản kháng và từ cảm mạch từ được lựa chọn. Hơn nữa, sự có mặt của các khe hở trên trụ làm xuất hiện từ trường tản xung quanh [4]-[6], từ trường tản này hướng vào các lá thép theo các góc khác nhau làm ảnh hưởng đến các thông số của CKBN, trong đó có sự gia tăng từ cảm xung quanh các khối trụ, dẫn đến sự phân bố từ cảm trên khối trụ không đồng đều. Phân bố từ cảm liên quan trực tiếp tới phân bố ứng suất và lực điện từ trên các khối trụ, là một trong những nguyên nhân chính gây rung ồn trong CKBN. Sự phân bố từ cảm trên khối trụ phụ thuộc vào các cách ghép lá thép có hướng ghép khác nhau.

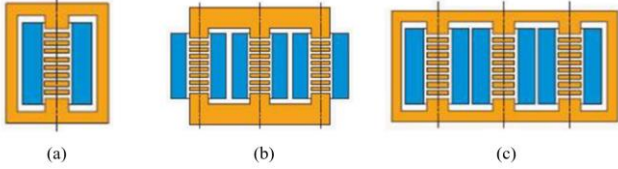
Trong bài báo này, nhóm tác giả áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để khảo sát và xác định phân bố từ cảm trong các khối trụ với các kiểu ghép lá thép khác nhau.

Để xây dựng được mô hình mô phỏng đối tượng và xác định hướng ghép lá thép cho các khối trụ, hệ tọa độ lá thép được thiết lập theo các hướng: hướng cán lá thép (RD), ngang với hướng cán (TD) và hướng ghép lá thép (LD) tương ứng với hệ tọa độ OXYZ. Việc khảo sát phân bố từ cảm ứng với các cách ghép lá thép khác nhau là cần thiết và là vấn đề mang tính thời sự đối với các nhà nghiên cứu, chế tạo trong và ngoài nước.

2. Các kiểu ghép lá thép trụ CKBN

2.1. Cấu trúc mạch từ

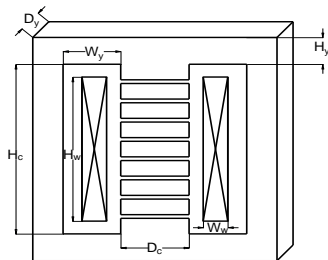
Các CKBN thường được phân làm hai loại: cuộn kháng khô và cuộn kháng dầu. Trong lưới điện ba pha, CKBN ba pha có thể được ghép từ tổ ba cuộn kháng một pha hoặc CKBN ba pha ba trụ, ba pha năm trụ (kiểu trụ bọc) (hình 1).



Hình 1. a- cuộn kháng một pha; b- cuộn kháng ba pha ba trụ; c- cuộn kháng ba pha năm trụ [4].

Hình 1(a) mô tả cuộn kháng một pha, thường được nối thành tổ cuộn kháng ba pha. Hình 1(b) mô tả cấu trúc cuộn kháng ba pha ba trụ, từ thông được khép kín giữa các trụ bởi phần gông trên và gông dưới do đó các phần gông này có tiết diện tối thiểu bằng tiết diện các trụ. Trong khi cuộn kháng ba pha năm trụ ở hình 1(c) có dạng trụ bọc, từ thông trên từng trụ cơ bản độc lập và được khép mạch qua gông và hai trụ ngoài cùng, từ thông trên gông và hai trụ ngoài bằng một nửa trên các trụ giữa, do đó giảm tiết diện gông và hai trụ bên, giảm chiều cao tổng thể của mạch từ [4]. Với khe hở trên trụ có chiều dài lớn, xung quanh khe hở tồn tại từ thông tản lớn. Để giảm ảnh hưởng của từ thông tản này, cần chia thành nhiều khe hở phân bố dọc trên trụ, với tổng chiều dài khe hở không thay đổi, qua đó tăng từ trở tổng vùng lân cận xung quanh khe hở, giảm ảnh hưởng của từ thông tản. Các khối trụ được ghép từ các lá thép kỹ thuật điện thành dạng trụ tròn.

Thông số kích thước cơ bản của CKBN một pha như mô tả trên hình 2. Thể tích của phần khe hở cần thêm vào mạch từ là thông số quan trọng cần tính toán, có thể được xác định thông qua các phương trình dựa trên mô hình mạch từ. Thể tích khe hở phụ thuộc vào các thông số chính của cuộn kháng: công suất phản kháng, từ cảm mạch từ, tần số lưới điện, năng lượng tích trữ trong không gian dây quấn và khe hở, điện cảm dây quấn.



Hình 2. Thông số kích thước CKBN.

Độ từ thẩm $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ của lá thép kỹ thuật điện có giá trị rất lớn so với từ thẩm khe hở là μ_0 , nên từ trở phần mạch từ rất nhỏ so với từ trở phần khe hở, có thể bỏ qua. Từ quan hệ giữa sức từ động F với từ thông và từ trở mạch từ, xác định được quan hệ dòng điện với thông số khe hở trên trụ. Dòng điện được xác định như phương trình (1) dưới đây:

$$I = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \frac{B_m \cdot l_g}{\mu_0 \cdot N} \quad (1)$$

Quan hệ giữa sức điện động cảm ứng trên dây quấn với thông số mạch từ theo phương trình (2).

$$E = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}}\right) \cdot f \cdot N \cdot B_m \cdot A_g \quad (2)$$

Mối quan hệ giữa từ cảm trên trụ với thể tích khe hở thêm vào trên trụ theo phương trình (3).

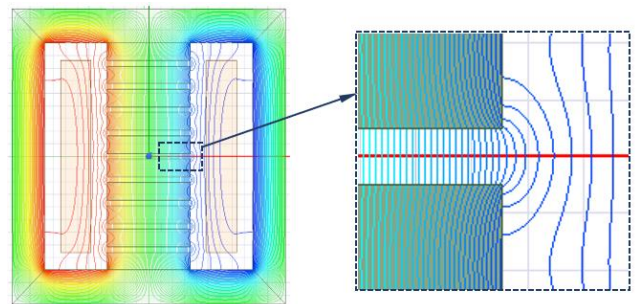
$$B_m = \sqrt{\frac{Q}{\mu_0 \cdot f \cdot N \cdot l_g}} \quad (3)$$

Trong các phương trình (1), (2) và (3): các tham số $f, N, \Phi_m, B_m, A_g, l_g$ và μ_0 lần lượt là tần số lưới điện (Hz), số vòng dây (vòng) của dây quấn, từ thông cực đại (Wb), từ cảm cực đại (T), tiết diện khe hở (m^2), chiều dài khe hở (m) và độ từ thẩm của không khí.

Tùy thuộc vào loại thép kỹ thuật điện lựa chọn làm mạch từ, sẽ xác định thể tích khe hở cần thêm trên trụ theo giá trị từ cảm được lựa chọn trong vùng tuyến tính của đặc tính B(H). Từ thể tích khe hở này, sẽ xác định tiết diện và chiều dài khe hở, đây là hai thông số quan trọng, ảnh hưởng đến tổng thể kích cỡ CKBN.

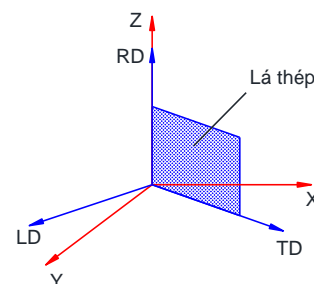
2.2. Các kiểu ghép lá thép và hệ tọa độ tương ứng

Do có các khe hở được thêm vào trên trụ của CKBN, nên xuất hiện thành phần từ trường tản xung quanh khe hở. Thành phần từ trường tản hướng từ khối trụ này tới khối trụ khác như mô tả trên hình 3 sẽ hợp với hướng cán lá thép theo các góc khác nhau.



Hình 3. Từ trường tản khu vực xung quanh khe hở.

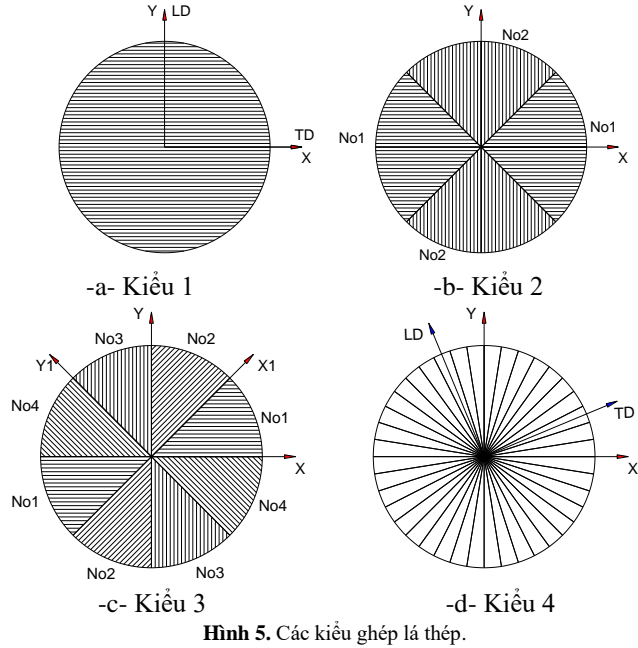
Do tính chất của vật liệu sắt từ dùng chế tạo CKBN, đặc tính từ theo các hướng hợp với hướng cán các góc khác nhau sẽ khác nhau, tại hướng vuông góc bề mặt lá thép có từ thẩm rất nhỏ so với hướng cán [7]. Để xây dựng được mô hình mô phỏng đối tượng và xác định hướng ghép lá thép cho các khối trụ trên mô hình, cần thiết lập hệ tọa độ lá thép với các hướng RD, TD và LD vuông góc với nhau, qua đó xác định quan hệ tương ứng với hệ tọa độ OXYZ khi dựng mô hình đối tượng như mô tả trên hình 4.



Hình 4. Hệ tọa độ lá thép RD-TD-LD.

Thông qua hệ tọa độ với các hướng RD, TD và LD có thể xác định vị trí tương đối của các lá thép trong không gian khảo sát. Từ thông tán hướng vào lá thép theo các hướng có đặc tính từ khác nhau làm ảnh hưởng đến các thông số của CKBN, trong đó có sự gia tăng từ cảm xung quanh các khối trụ, khiến phân bố từ cảm trên khối trụ không đồng đều. Sự phân bố từ cảm trên khối trụ thay đổi đáng kể ứng với các cách ghép lá thép có hướng ghép khác nhau.

Mạch từ của CKBN gồm phần trụ và gông, cả hai phần này đều được ghép từ các lá thép kỹ thuật điện. Riêng phần gông có cách ghép xếp lớp giống như cách ghép lá thép ở máy biến áp (MBA), phần trụ gồm các khối trụ có thể ghép theo các cách khác nhau như mô tả trên hình 5.



Hình 5. Các kiểu ghép lá thép.

Cách ghép các khối trụ như trên hình 5 (a) giống như cách ghép lá thép phần gông và như cách ghép xếp lớp lá thép MBA. Kiểu ghép thứ hai ở hình 5(b) chia khối trụ thành bốn phần ghép theo hai hướng theo trục X và Y. Sang kiểu ghép thứ 3 ở hình 5 (c) chia khối trụ thành 8 phần ghép theo nhiều hướng theo trục X, Y, X1 và Y1. Ở kiểu ghép này, cần tạo hệ tọa độ 0X1Y1Z1 xoay góc 45⁰ so với hệ tọa độ 0XYZ. Sau cùng là kiểu ghép như mô tả trên hình 5 (d), ghép các lá thép có kích thước khác nhau theo hướng kính kiểu hình quạt xung quanh trục Z, là trục của các khối trụ. Các lá thép ở các kiểu ghép được ép định hình, băng đai bằng vải thủy tinh và được ngâm tẩm kết dính bằng epoxy thành các khối trụ.

Bảng 1. Quan hệ trục tọa độ tương ứng giữa các hệ tọa độ.

Kiểu ghép	Bộ phận	RD	TD	LD
	Gông trên và dưới	Trục X	Trục Z	Trục Y
	Mạch từ 2 bên	Trục Z	Trục X	Trục Y
Kiểu 1	Khối trụ	Trục Z	Trục X	Trục Y
Kiểu 2	Khối trụ-No1	Trục Z	Trục X	Trục Y
	Khối trụ-No2	Trục Z	Trục Y	Trục X
Kiểu 3	Khối trụ-No1	Trục Z	Trục X	Trục Y
	Khối trụ-No2	Trục Z1	Trục X1	Trục Y1

	Khối trụ-No3	Trục Z	Trục X	Trục Y
	Khối trụ-No4	Trục Z1	Trục Y1	Trục X1
Kiểu 4	Khối trụ	Trục Z	Vuông góc với trục Z	Ghép hình quạt hướng kính

Kiểu ghép đầu tiên có thành phần từ thông tán hướng vuông góc với bề mặt phẳng của lá thép, là hướng có đặc tính từ kém nhất. Hướng ghép lá thép của phần gông trên, gông dưới và mạch từ hai bên giống nhau trong tất cả các kiểu ghép, riêng các khối trụ sẽ được xác định cụ thể với từng kiểu ghép. Mối quan hệ giữa hệ tọa độ RD, TD và LD của từng bộ phận gông và các khối trụ với hệ tọa độ không gian 0XYZ và 0X1Y1Z1 ứng với từng cách ghép lá thép được thể hiện trong bảng 1.

Như mô tả trong bảng 1, ứng với mỗi bộ phận trên mạch từ, vector Q bất kỳ trong hệ tọa độ tương ứng được xác định theo phương trình 4a cho phần gông trên và gông dưới, phần gông hai bên xác định theo phương trình 4b.

$$\begin{cases} Q_{RD} = Q_X \\ Q_{TD} = Q_Z \\ Q_{LD} = Q_Y \end{cases} \quad \begin{cases} Q_{RD} = Q_Z \\ Q_{TD} = Q_X \\ Q_{LD} = Q_Y \end{cases} \quad (4a-b)$$

Với các khối trụ ghép hướng kính theo kiểu 4, vector Q bất kỳ được xác định theo phương trình 5.

$$\begin{cases} Q_{RD} = Q_Z \\ Q_{TD} = \sqrt{Q_X^2 + Q_Y^2} \\ Q_{LD} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

3. Mô hình hóa CKBN bằng phương pháp FEM

Phương pháp FEM là một trong các phương pháp số được sử dụng rộng rãi để giải các bài toán điện từ mà mô hình toán học được viết dưới dạng hệ phương trình vi tích phân. Hệ phương trình Maxwell và luật trạng thái được viết như sau [8]:

$$\text{curl } \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}, \text{curl } \mathbf{H} = \mathbf{J}_s, \text{div } \mathbf{B} = 0, \quad (6a-b-c)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (7a-b)$$

Trong đó: \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{J} lần lượt là cường độ điện trường, mật độ từ thông, cường độ từ trường và mật độ dòng điện. Các tham số μ và σ lần lượt là độ từ thẩm và độ dẫn điện của vật liệu.

Từ thông qua mặt cắt các khối trụ hay gông được xác định qua phương trình sau:

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot \vec{n} ds \quad (8)$$

Thông số kích thước CKBN để thực hiện mô hình mô phỏng bằng phương pháp FEM được tổng hợp ở bảng 2.

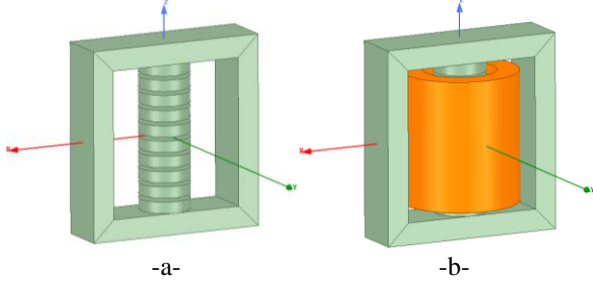
Bảng 2. Thông số chính CKBN.

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Công suất phản kháng	Q (MVar)	35
Điện áp định mức	U (kV)	500/ $\sqrt{3}$
Đường kính trụ	D _c (mm)	653
Chiều cao trụ	H _c (mm)	1907
Tổng chiều dài khe hở	l _g (mm)	446
Số khe hở trên trụ	g (khe)	9

Kích thước dây quấn	H _w x B _w (mm)	1637 x 273
Số vòng dây quấn	N (vòng)	2262

Nhóm tác giả sử dụng phương pháp FEM qua công cụ Ansys Maxwell 3D để thực hiện mô hình hóa và mô phỏng CKBN có thông số thiết kế trong bảng 2. Tính chính xác của phương pháp FEM qua công cụ Ansys Maxwell đã được xác thực và đối sánh qua các nghiên cứu trước đây [9,10].

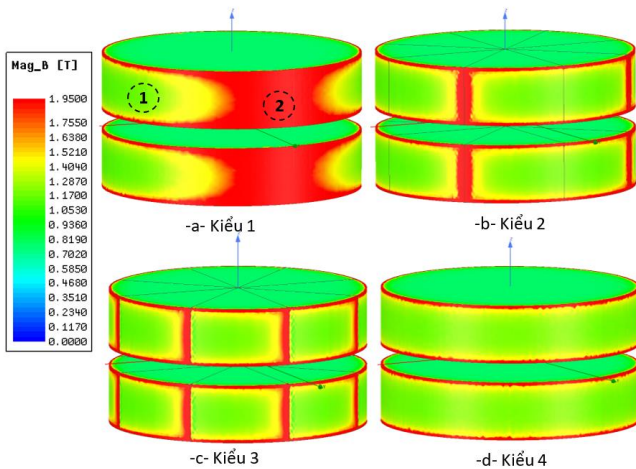
Mô hình hóa của CKBN được thiết lập trên hệ tọa độ chính OXYZ, trục của các khối trụ trùng với trục Z như trên hình 6.



Hình 6. Mô hình CKBN một pha.

Thực hiện nghiên cứu phân bố từ cảm ứng với từng kiểu ghép các lá thép trụ như mô tả trên hình 5 và bảng 1. Khi dựng mô hình mô phỏng, giữ nguyên các thông số kích thước, điều kiện biên hay nguồn cấp như nhau trong từng trường hợp nghiên cứu cách ghép trụ tương ứng.

Phân bố từ cảm trên các khối trụ ứng với các kiểu ghép lá thép trụ khác nhau thể hiện trên hình 7



Hình 7. Phân bố từ cảm trên khối trụ với các kiểu ghép lá thép.

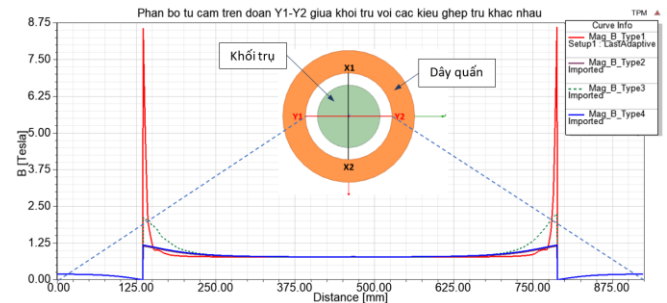
Hình 7 cho thấy, từ cảm phân bố không đồng đều trên các khối trụ, từ cảm xung quanh khối trụ lớn hơn trong lòng khối trụ và có sự chênh lệch lớn giữa các kiểu ghép trụ khác nhau, là do có khe hở ngăn cách giữa các khối trụ nên xuất hiện thành phần từ thông tản xung quanh khe hở hướng vào lá thép theo các phương khác nhau. Trên hình 7 (a), là phân bố từ cảm trên khối trụ ứng với kiểu ghép xếp lớp trên hình 5 (a), kiểu ghép này giống như cách ghép truyền thống ở MBA, thành phần từ thông tản hướng vào các lá thép ở vùng 1 theo phương RD, TD và hướng vào lá thép ở vùng 2 theo phương LD gây nên chênh lệch từ cảm lớn giữa vùng 2 với vùng 1 và trong lòng của khối trụ. Chênh lệch từ cảm giảm dần theo các kiểu ghép theo hình 5(b), 5(c), 5(d), kết quả tương ứng như mô tả trên hình 7(b), 7(c) và 7(d). Từ kết quả phân bố từ cảm này cho thấy, không nên áp dụng cách ghép xếp lớp như kiểu 1

được mô tả trên hình 5(a) cho các khối trụ của CKBN có công suất lớn dùng trong lưới điện cao áp. Cách ghép lá thép hướng kính theo hình quạt xung quanh trục Z như kiểu 4 trên hình 5(d) sẽ tránh được thành phần từ thông tản hướng vào lá theo phương LD, là phương có đặc tính từ xấu nhất, nên phân bố từ cảm đồng đều hơn so với các phương ghép lá thép còn lại. Mặc dù từ cảm phân bố không đồng đều giữa các kiểu ghép lá thép, giá trị từ thông và từ cảm trung bình trên bề mặt khối trụ tương đối giống nhau giữa các kiểu ghép lá thép, kết quả thể hiện trong bảng 3.

Bảng 3. Từ thông và từ cảm trung bình trên bề mặt khối trụ.

Các kiểu ghép lá thép	Từ thông qua bề mặt khối trụ (Wb)	Từ cảm trung bình trên bề mặt khối trụ (T)
Kiểu 1	0,2955	0,8825
Kiểu 2	0,2932	0,8757
Kiểu 3	0,2941	0,8782
Kiểu 4	0,2936	0,8768

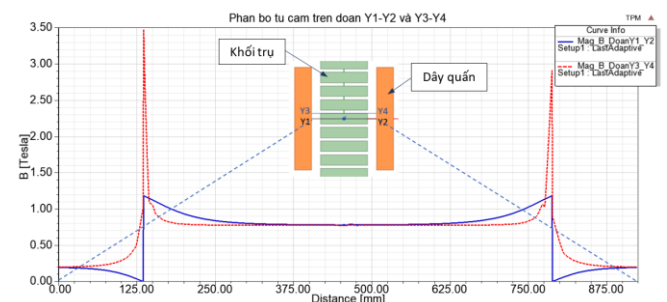
Giá trị từ cảm trên đoạn Y1-Y2 giữa khối trụ ứng với từng kiểu ghép được biểu thị trên hình 8.



Hình 8. Từ cảm trên đoạn Y1-Y2 giữa khối trụ với các kiểu ghép lá thép.

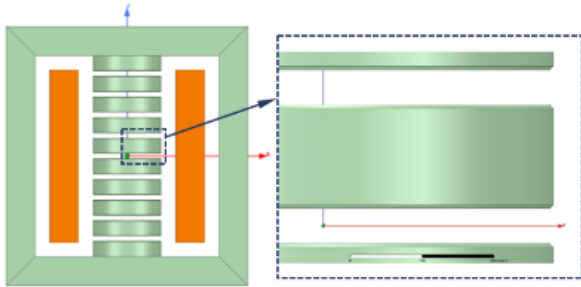
Từ cảm trong lòng khối trụ cơ bản có giá trị như nhau với cả bốn cách ghép lá thép trụ. Như đã phân tích kết quả phân bố từ cảm ở hình 7(d) với cách ghép lá thép theo kiểu 4 ở hình 5(d), kiểu ghép lá thép trụ hướng kính theo hình quạt xung quanh trục Z có từ cảm phân bố đồng đều hơn trên khối trụ. Với kiểu ghép này, từ cảm lớn nhất trên đoạn Y1-Y2 tại mặt ngoài khối trụ là 1,1835 (T), lớn hơn 38% so với giá trị trung bình đoạn xét trong khối trụ là 0,8574 (T).

Mặc dù kiểu ghép ở hình 5(d) có từ cảm phân bố đồng đều hơn trên khối trụ so với ba kiểu ghép lá thép đầu, nhưng từ cảm xung quanh góc mép ngoài trên khối trụ vẫn lớn hơn phần còn lại như thể hiện qua giá trị từ cảm trên hai đoạn Y1-Y2 giữa khối trụ và đoạn Y3-Y4 trên mặt khối trụ thể hiện trên hình 9.



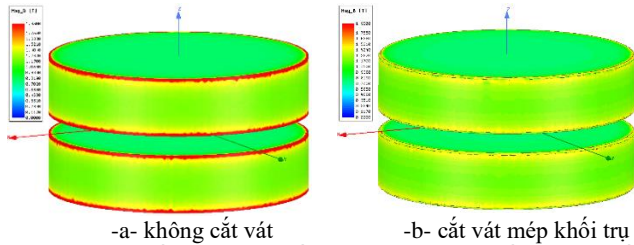
Hình 9. Từ cảm trên đoạn Y1-Y2 giữa khối trụ và Y3-Y4 trên mặt khối trụ.

Để giảm chênh lệch từ cảm xung quanh góc mép khối trụ, nhóm tác giả đã thực hiện mô hình nghiên cứu trường hợp cắt vát góc các khối trụ, mô hình đối tượng sau khi cắt vát góc như mô tả trên hình 10. Các lá thép trụ cũng được ghép theo hướng kính kiểu hình quạt xung quanh trục Z.



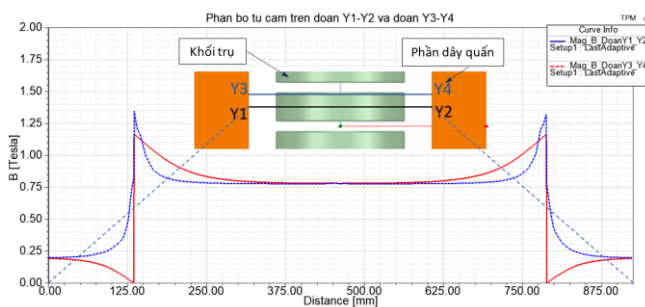
Hình 10. Mô hình CKBN một pha có các khối trụ được cắt vát góc.

Phân bố từ cảm trên các khối trụ trong trường hợp cắt vát góc khối trụ so với trường hợp không cắt vát góc thể hiện trên hình 11.



Hình 11. Phân bố từ cảm trên khối trụ trong trường hợp cắt vát mép khối trụ so với trường hợp không cắt vát.

Phân bố từ cảm trên khối trụ hình 11(b) cho thấy từ cảm phân bố đồng đều trên toàn bộ khối trụ. Khi cắt vát góc cạnh mép xung quanh khối trụ, chênh lệch từ cảm ở vùng góc cạnh mép so với các vùng còn lại trên khối trụ giảm đáng kể, không còn vùng bị bão hòa mạch từ ở mép khối trụ như ở trường hợp không cắt vát góc khối trụ hình 11(a). Giá trị từ cảm trung bình trên mặt trên khối trụ giảm còn 0,8248 (T), giảm 5,93% so với trường hợp không cắt vát góc khối trụ là 0,8768 (T), kết quả này là cơ sở để có thể thay đổi tiết diện mạch từ khi tính toán hiệu chỉnh thiết kế CKBN. Phân bố từ cảm trên đoạn Y1-Y2 giữa khối trụ và trên đoạn Y3-Y4 sát mép vát cạnh như trên hình 12.



Hình 12. Từ cảm trên đoạn Y1-Y2 giữa khối trụ và trên đoạn Y3-Y4 sát mép vát cạnh.

Kết quả nghiên cứu này cho ra bức tranh phân bố từ cảm trên các khối trụ ứng với từng kiểu ghép lá thép, từ đó lựa chọn được kiểu ghép phù hợp khi thiết kế chế tạo CKBN. Kiểu ghép lá thép trụ hướng kính theo hình quạt xung quanh trục Z, là trục của các khối trụ, do tránh được thành phần từ thông tản hướng vào lá thép theo phương LD, là phương có đặc tính từ

xấu nhất, nên phân bố từ cảm đồng đều hơn so với các phương pháp ghép lá thép còn lại, phù hợp để chế tạo các khối trụ CKBN. Kiểu ghép này sau đó được cắt vát góc cạnh mép xung quanh khối trụ, cho kết quả phân bố từ cảm đồng đều hơn so với trường hợp không cắt vát góc khối trụ.

4. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả áp dụng thành công phương pháp phần tử hữu hạn qua công cụ Ansys Maxwell 3D để tính toán và mô phỏng với các kiểu ghép lá thép trụ khác nhau. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đã xác định sự phân bố từ cảm trong các khối trụ với từng kiểu ghép lá thép. Mô hình các khối trụ với từng kiểu ghép lá thép xác định qua hệ tọa độ OXYZ khi dựng mô hình đối tượng. Kết quả phân bố từ cảm trên các khối trụ với từng kiểu ghép lá thép cho thấy, mặc dù giá trị từ thông và từ cảm trung bình trên bề mặt khối trụ tương đối giống nhau giữa các kiểu ghép lá thép, nhưng ở kiểu ghép đầu tiên với cách ghép xếp lớp lá thép theo cách ghép trụ truyền thống có thành phần từ thông tản hướng vào khối thép theo phương LD gây chênh lệch từ cảm lớn và bão hòa mạch từ tại khu vực đó. Do đó kiểu ghép này không phù hợp để ghép các khối thép trụ cho CKBN dùng trên lưới điện cao áp. Với kiểu ghép các lá thép ghép hướng kính theo hình quạt xung quanh trục Z có phân bố từ cảm đồng đều hơn so với các phương pháp ghép lá thép còn lại. Kiểu ghép này sau đó được cắt vát góc cạnh mép xung quanh khối trụ, cho kết quả không còn bị bão hòa mạch từ ở vùng mép khối trụ, từ cảm phân bố đồng đều trên toàn bộ khối trụ.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST) trong đề tài mã số **T2021-PC-006**. Tác giả xin chân thành cảm ơn Nhà trường đã hỗ trợ kinh phí nghiên cứu thông qua đề tài này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Gagari Deb "Ferranti Effect in Transmission Line" International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol.2, No.4, August 2012, pp. 447~451 ISSN: 2088-8708.
- [2] A. Divya Swarna Sri "Depiction and Compensation of Ferranti Effect in Transmission Line" International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET) ISSN: 2321-9653; Volume 6 Issue III, March 2018
- [3] H. Amreiz, A. Janbey and M. Darwish, "Emulation of Series and Shunt Reactor Compensation" 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209786.
- [4] Shunt reactors for medium and highvoltage networks, <https://new.siemens.com/>
- [5] D. I. Zaikin, S. Jonasen and S. L. Mikkelsen, "An Air-Gap Shape Optimization for Fringing Field Eddy Current Loss Reductions in Power Magnetics" in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 5, pp.

- 4079-4086, May 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2868289.
- [6] A. Balakrishnan, W.T. Joines, T.G. Wilson, “*Air-gap reluctance and inductance calculations for magnetic circuits using a Schwarz-Christoffel transformation*” IEEE Transactions on Power Electronics 12 (July (4)) (1997) 654–663
- [7] Lü, Fangcheng & Guo, Jiayi & Niu, Leilei & Geng, Jianghai & Pan, Yirui “*A New 3D Method for Reactor Core Vibration Based on Silicon Steel Lamination Rules and Application in UHV Shunt Reactors*” Mathematical Problems in Engineering. 2019. 1-11. 10.1155/2019/7290536.
- [8] S. Koruglu, P. Sergeant, R.V. Sabariego, Vuong. Q. Dang, M. De Wulf “*Influence of contact resistance on shielding efficiency of shielding gutters for high-voltage cables,*” IET Electric Power Applications, Vol.5, No.9, (2011), pp. 715-720.
- [9] Najafi, A., Iskender, I. “*Comparison of core loss and magnetic flux distribution in amorphous and silicon steel core transformers.*” Electr Eng 100, 1125–1131 (2018). doi:10.1007/s00202-017-0574-7
- [10] K. Dawood, G. Komurgoz and F. Isik, “*Modeling of Distribution Transformer for Analysis of Core Losses of Different Core Materials Using FEM,*” 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICMSAO.2019.8880392.