

Nghiên cứu sự ảnh hưởng của lực điện từ lên các khối trụ cuộn kháng bù ngang bằng phương pháp giải tích và phương pháp phần tử hữu hạn Studying the influence of electromagnetic forces on core blocks of the shunt reactors by using the analytical model and finite element approach

Bùi Đức Hùng^{1,*}, Đặng Chí Dũng¹, Đỗ Chí Phi² và Đặng Quốc Vương¹

¹Khoa Điện, Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Khoa Điện - Điện tử, Trường CD Kỹ thuật Cao Thắng, TP HCM.

*Corresponding author: hung.buiduc@hust.edu.vn

Tóm tắt

Cuộn kháng bù ngang (CKBN) được sử dụng trong lưới điện truyền tải để hấp thụ công suất phản kháng (CSPK) và tránh hiện tượng quá điện áp ở cuối đường dây khi hệ thống vận hành không tải hoặc non tải. Để tránh hiện tượng bão hòa mạch từ, dọc theo trụ của cuộn CKBN được thiết kế các khe hở để chia khối trụ (lõi) lớn thành các phân đoạn (khối trụ) nhỏ hơn. Tuy nhiên, tại các khe hở xung quanh các khối trụ, sẽ xuất hiện các thành phần từ thông tản và từ thông rò thay đổi liên tục từ khối trụ này đến các khối trụ khác. Điều này làm cho sự phân bố mật độ từ cảm trên các khối trụ không đồng đều và sinh ra lực điện từ tác động lên các khối trụ. Lực điện từ có xu hướng đẩy/ép các khối trụ lại với nhau, làm cho các khối trụ bị dao động, rung lắc và gây ra tiếng ồn, làm ảnh hưởng đến chế độ vận hành của CKBN. Trong bài báo này, phương pháp giải tích và kỹ thuật phần tử hữu hạn được phát triển để khảo sát và tính toán sự phân bố của từ thông xung quanh các khe hở giữa các khối trụ và lực điện từ tác dụng lên các khối trụ của CKBN. Sự phát triển của phương pháp sẽ được áp dụng để tính toán CKBN 1 pha, công suất 40Mvar, điện áp $500/\sqrt{3}$.

Từ khóa: Cuộn kháng bù ngang (CKBN), từ thông tản, từ thông rò, mạch từ, phương pháp phần tử hữu hạn.

Abstract

The shunt reactor (SR) is widely used in power transmission systems of 110kV, 220kV and 500kV to absorb the reactive power and avoid overvoltage at the end of the line when the system is operating with no-load or low load. In order to avoid the phenomenon of circuit saturation, air gaps are often designed along the SR core to divide the large core into smaller segments (core blocks). However, the presence of air gaps around the core blocks will cause fringing flux and leakage flux components, which vary from this core to another. This makes the distribution of magnetic flux density uneven on the core blocks and will appear electromagnetic force acted directly on the core blocks. The electromagnetic force tends to push/press these core blocs together, causing them to vibrate, oscillate and generate noise, affecting the operation of the SR. In this study, the analytic model and finite element technique are developed to calculate the distribution of the flux around the slots/air gaps between the core blocks and the electromagnetic forces acting on the core blocks of the SR. The developed method will be applied to directly calculate a single-phase SR with a capacity of 40Mvar and a voltage of $500/\sqrt{3}$.

1. Đặt vấn đề

Để tránh hiện tượng quá điện áp và duy trì điện áp ổn định ở cuối đường dây truyền tải 110kV trở lên khi hệ thống vận hành non tải hoặc không tải, cuộn kháng bù ngang (CKBN) được sử dụng để hấp thụ và cân bằng công suất phản kháng (CSPK) [1]-[3]. Gần đây, có nhiều nhà nghiên cứu trong và ngoài nước đã nghiên cứu về CKBN, cụ thể như: trong tài liệu [1], nhóm tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để tính toán và phân tích điện kháng tản của CKBN để tìm ra mối liên hệ giữa điện kháng tổng và điện kháng rò giữa các khối trụ. Trong tài liệu [2], phương pháp giải tích được phát triển để tính toán các thông số kích thước mạch từ và dây quấn

của CKBN. Các kết quả đạt được từ phương pháp đề xuất được kiểm chứng qua phương pháp FEM. Trong tài liệu [4], nhóm tác giả đã áp dụng phương pháp FEM để đưa ra giải pháp giảm tổn hao do dòng điện xoáy sinh ra trong cuộn dây của CKBN bằng cách tối ưu khe hở không khí trong cuộn dây. Các tiếp cận của phương pháp được thực hiện thông qua 2 bước: đầu tiên tính toán tổn hao sinh ra trong cuộn dây, sau đó tính toán mật độ từ thông trung bình xung quanh khe hở không khí. Trong tài liệu [5], nhóm tác giả trình bày phương pháp tính toán từ trở của khe hở không khí trong mạch từ của CKBN thông qua sự biến đổi "Schwarz-Christoffel". Các giá trị đạt được sẽ được kiểm chứng thông qua kỹ thuật FEM.

Thông qua các công trình nghiên cứu như đã phân tích ở trên, mặc dù có nhiều công trình nghiên cứu đã áp dụng và phát triển phương pháp FEM để tính toán, phân tích và mô phỏng các thông số điện từ của CKBN. Tuy nhiên, việc khảo sát, đánh giá sự ảnh hưởng của lực điện từ lên các khối trụ của CKBN vẫn là một thách thức lớn đối với các nhà nghiên cứu và chế tạo cuộn kháng.

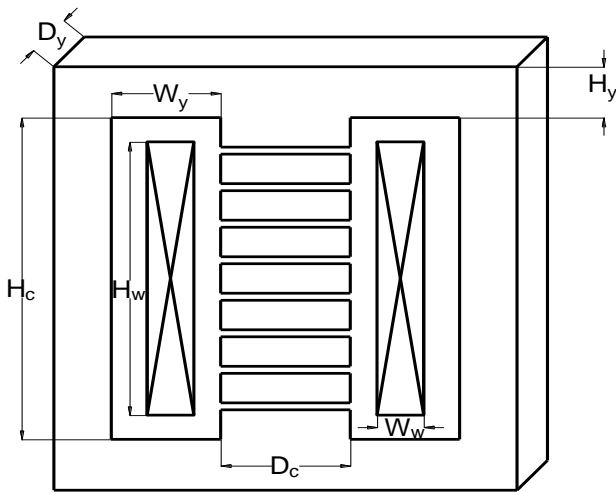
Trong nghiên cứu này, phương pháp giải tích và phương pháp FEM được tiếp tục kế thừa và phát triển để tính toán sự phân bố của từ thông xung quanh khe hở giữa các khối trụ, và lực điện từ lên các khối trụ của CKBN. Sự phát triển của phương pháp được áp dụng trực tiếp để tính toán cho CKBN 1 pha, công suất 40Mvar, điện áp $500/\sqrt{3}$.

Nội dung chính của bài báo được cấu trúc làm 4 phần: Trong đó, phần 1, đặt vấn đề như đã mô tả ở trên; phần 2, nghiên cứu về mô hình CKBN một pha bằng phương pháp giải tích và kỹ thuật phần tử hữu hạn; phần 3, áp dụng mô hình lý thuyết đã phát triển ở phần 2 để giải bài toán thực tế; phần 4, tóm tắt các kết quả đã đạt được.

2. Mô hình CKBN một pha bằng phương pháp giải tích và phương pháp phần tử hữu hạn

2.1. Mô hình CKBN một pha

Mô hình CKBN một pha sử dụng trong hệ thống lưới điện truyền tải được mô tả như hình 1 [4]. Như đã phân tích ở phần I, để giảm được từ thông trên trụ, tránh được hiện tượng bão hoà, trên trụ của CKBN thường thiết kế các khe hở với chiều dài khe hở lớn. Tuy nhiên, do chiều dài khe hở lớn, dẫn đến xung quanh khe hở sẽ tồn tại từ thông tản và từ thông rò lớn, dẫn đến từ thông chính lại giảm. Do vậy, để giảm được thành phần từ thông tản này, thay vì sử dụng một khe hở với chiều dài lớn, dọc theo khối trụ, cần chia nhiều khe hở với tổng chiều dài khe hở là không đổi. Điều này sẽ làm tăng được từ trở xung quanh khu vực khe hở và giảm được từ thông tản.



Hình 1. Mô hình cuộn kháng 1 pha [4]

Tuy nhiên, việc chia một khe hở lớn thành các khe hở nhỏ, điều này đồng nghĩa với việc một khối trụ có chiều dài lớn được phân đoạn thành các khối trụ có chiều dài nhỏ hơn, sẽ ảnh hưởng đến kết cấu của mạch từ của CKBN. Các khe hở không khí dọc theo khối trụ phụ thuộc vào các thông số chính của cuộn kháng (như: CSPK, mật độ từ cảm, điện cảm, năng lượng tích trữ trong không gian dây quấn và khe hở) và có thể được xác định thông qua mô hình giải tích.

2.2. Mô hình lực điện từ bằng phương pháp giải tích

Xét mô hình cuộn kháng 1 pha như mô tả tại hình 1. Độ từ thẩm của các khối trụ ($\mu = \mu_r \cdot \mu_0$) có giá trị rất lớn so với từ thẩm khe hở là μ_0 , nên từ trở phần mạch từ có thể bỏ qua [6], [7]. Dựa vào mối quan hệ giữa sức từ động (F), từ thông và từ trở mạch từ, dòng điện được xác định như sau [11], [12]:

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

Trong đó, l_g là chiều dài của khe hở không khí (m), N là số vòng dây (vòng) và B_m là mật độ từ cảm cực đại trên trụ (T).

Giá trị của B_m được xác định theo phương trình sau:

$$B_m = \sqrt{\frac{Q}{\frac{\pi}{\mu_0} \cdot f \cdot V_g}}, \quad (2)$$

trong đó, f là tần số lưới điện (Hz) và V_g là thể tích khe hở không khí.

Lực điện từ tác dụng lên các khối trụ được tính toán thông qua mật độ năng lượng [8], [9].

$$F = \frac{\Delta W}{\Delta x} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} A_c(N), \quad (3)$$

trong đó, A_c là mặt cắt của khối trụ và Δx là sự dịch chuyển của khối trụ. Mật độ lực điện từ tác động lên bề mặt khối trụ được xác định:

$$F_s = \frac{F}{A_c} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \left(\frac{N}{m^2} \right). \quad (4)$$

Trong (4), mật độ từ cảm có thể được xác định thông qua sức từ động, đó là:

$$B = \frac{F}{A_c} = \mu_0 \frac{I \cdot N}{l_g} (T) \quad (5)$$

Thay (5) vào (4), mật độ lực điện từ tác động lên bề mặt khối trụ trở thành:

$$F_s = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 I^2 N^2}{l_g} (N/m^2) \quad (6)$$

Một cách tiếp cận khác, lực điện từ được xác định thông qua Tensor ứng suất, đó là [12]-[15]:

$$F = \frac{1}{\mu_0} \iint dA \mathbf{S} \cdot \mathbf{n} (N) \quad (7)$$

Trong đó, S là ma trận Tensor ứng suất được xác định:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} B_x^2 - \frac{B^2}{2} & B_x B_y & B_x B_z \\ B_x B_y & B_y^2 - \frac{B^2}{2} & B_y B_z \\ B_x B_z & B_y B_z & B_z^2 - \frac{B^2}{2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

Trong đó, $B^2 = B_x^2 + B_y^2 + B_z^2$.

Biểu thức lực điện từ tại phương trình (7) gồm 02 thành phần: thành phần tiếp tuyến (F_t) và thành phần pháp tuyến (F_n). Hai thành phần này lần lượt được xác định:

$$F_t = B_n H_t \quad F_n = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} B_n^2 - \mu_0 H_t^2 \right), \quad (9a - b)$$

Trong đó B_n và H_t lần lượt là các thành phần pháp tuyến và tiếp tuyến của véc tơ mật độ từ cảm và véc tơ cường độ từ trường.

2.3. Mô hình lực điện từ bằng kỹ thuật FEM

Trong phần này, phương pháp FEM được phát triển để tính toán và mô phỏng các tham số điện từ của CKBN. Trong đó, lực điện từ tác dụng lên các khối trụ sẽ được thực hiện ở tiến trình "post-processing". Hệ phương trình Maxwell và luật trạng thái xác định trong miền nghiên cứu Ω ($\Omega = \Omega_c \cup \Omega_c^c$) và biên $\partial\Omega \equiv \Gamma$ được viết [10]:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}, \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}_s, \text{div } \mathbf{B} = 0, \quad (10a-b-c)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (11a-b)$$

Điều kiện biên (ĐKB) trên Γ được xác định:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}|_{\Gamma_e} = 0, \mathbf{n} \times \mathbf{H}|_{\Gamma_h} = 0, \quad (12a-b)$$

Trong đó \mathbf{n} là véc tơ pháp tuyến.

Ω_c là miền dẫn và Ω_c^c là miền không dẫn. Các trường \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{J} lần lượt là cường độ điện trường, mật độ từ cảm, cường độ từ trường và mật độ dòng điện. Các trường này được xác định để thoả mãn sơ đồ Tonti [16], đó là: $\mathbf{H} \in \mathbf{H}_h(\text{rot}; \Omega)$, $\mathbf{E} \in \mathbf{H}_e(\text{rot}; \Omega)$, $\mathbf{J} \in \mathbf{H}(\text{div}; \Omega)$ và $\mathbf{B} \in \mathbf{H}_e(\text{div}; \Omega)$, trong đó $\mathbf{H}_h(\text{rot}; \Omega)$, $\mathbf{H}(\text{div}; \Omega)$ và $\mathbf{H}_e(\text{div}; \Omega)$ là không gian hàm chứa các điều kiện biên và các hàm thử. Các tham số μ và σ lần lượt là độ từ thẩm và độ dẫn điện của các miền dẫn và không dẫn.

Dựa vào hệ phương trình Maxwell's equations (10a-b-c) và các luật trạng thái (11a-b), mật độ từ cảm \mathbf{B} được biểu diễn thông qua từ thế véc tơ \mathbf{A} :

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (13)$$

Thay phương trình (13) vào phương trình (10 a), ta có:

$$\text{rot}(\mathbf{E} + j\omega \mathbf{A}) = 0. \quad (14)$$

Cường độ điện trường \mathbf{E} được biểu diễn thông qua điện thế vô hướng (v), i.e.

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} - \text{grad}v. \quad (15)$$

Từ các phương trình (13), (14) và (15), phương trình rời rạc viết cho từ thế véc tơ \mathbf{A} thông qua định luật Ampère (10 a) và luật trạng thái (11 a) như sau [10]:

$$\int_{\Omega} \mu^{-1} \mathbf{B} \cdot \text{rot} \mathbf{A}' d\Omega + \int_{\Omega} (\sigma \mathbf{E} \cdot \mathbf{A}') d\Omega_c + \int_{\Gamma_h} (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{A}' d\Gamma_h = \int_{\Omega} (\mathbf{J}_s \cdot \mathbf{A}') d\Omega_s, \quad \mathbf{A}' \in \mathbf{H}_h^1(\text{rot}; \Omega) \quad (16)$$

Thay phương trình (13), (15) vào (16), phương trình (16) trở thành:

$$\int_{\Omega} \mu^{-1} \text{rot } \mathbf{A} \cdot \text{rot } \mathbf{A}' d\Omega + j\omega \int_{\Omega} (\sigma \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}') d\Omega_c + j\omega \int_{\Omega} (\sigma \text{grad}v \cdot \mathbf{A}') d\Omega_c + \int_{\Gamma_h} (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{A}' d\Gamma_h = \int_{\Omega} (\mathbf{J}_s \cdot \mathbf{A}') d\Omega_s, \quad \mathbf{A}' \in \mathbf{H}_e^0(\text{curl}; \Omega). \quad (17)$$

Trong phương trình (17), trường \mathbf{A}' là hàm thử được xác định trong không gian hàm $\mathbf{H}_e^0(\text{curl}; \Omega)$.

Lực điện từ tác động lên bề mặt các khối trụ được xác định thông qua tiến trình "post-processing", đó là:

$$\mathbf{F} = \int_{\Omega} \text{rot } \mathbf{A} \times \mathbf{j} \cdot d\Omega_{kt} \quad (N). \quad (18)$$

Trong đó, Ω_{kt} là thể tích của khối trụ.

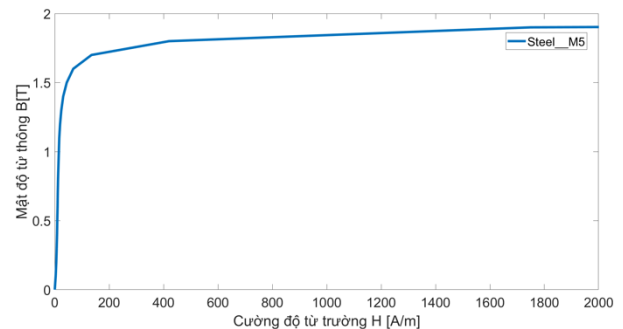
3. Bài toán áp dụng

Để kiểm chứng được mô hình lý thuyết đã phát triển ở phần 2, trong phần này, bài toán áp dụng được đề xuất là CKBN 1 pha, công suất 40Mvar, điện áp $500/\sqrt{3}$. Các thông số chính của CKBN được tính toán bằng phương pháp giải tích và cho trong bảng 1. Cấu trúc hình học của cuộn kháng được mô tả trong hình 1. Hình 2 mô tả đặc tính đường cong B-H của lõi thép, ứng với tần số 50 Hz. Đặc tính mô tả suất tổn hao theo mật độ từ cảm được biểu diễn tại hình 3.

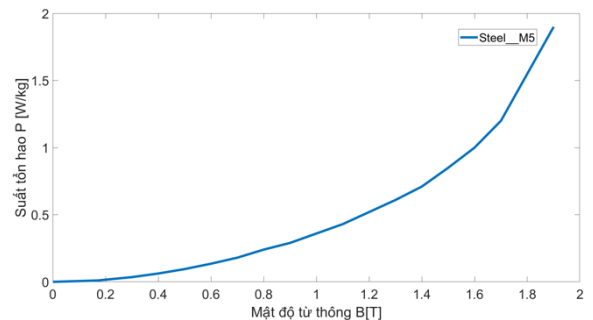
Mô hình chia lưới của các khối trụ và mạch từ của CKBN được biểu diễn tại hình 4. Mục đích của bài báo chủ yếu tập trung tính toán từ thông tại các khối trụ và vùng khe hở không khí giữa các khối trụ, do đó các phần tử lưới mịn (thin mesh) chủ yếu tập trung ở các khối trụ, đối với các vị trí khác, sử dụng các phần tử lưới thưa có kích thước lớn hơn. Tổng số phần tử lưới để đạt được sự hội tụ của nghiệm là: 205213 phần tử.

Bảng 1. Thông số chính của CKBN.

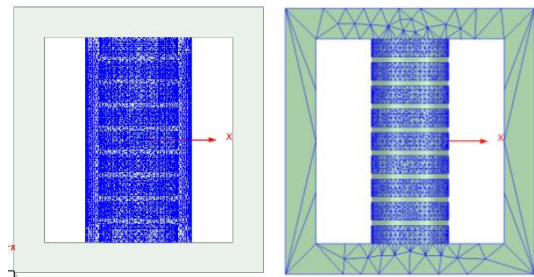
Thông số	Ký hiệu	Thông số
Công suất phản kháng	Q (MVar)	40
Điện áp định mức	U (kV)	$500/\sqrt{3}$
Dòng điện định mức	I (A)	138,4
Điện cảm tổng	L_total (H)	6,63
Điện cảm tản	L_fringing (H)	1,9154
Điện cảm khe hở không khí	L_gap (H)	4,1489
Đường kính trụ	Dc (mm)	735
Chiều cao trụ	Hc (mm)	1944
Tổng chiều dài khe hở trên trụ	l _g (mm)	425
Số vòng dây quấn	N (vòng)	1834
Chiều rộng dây quấn	W _w (mm)	254
Chiều cao dây quấn	H _w (mm)	1674
Tổn hao đồng	P _{Cu} (kW)	63,8
Tổn hao sắt	P _{Fe} (kW)	31,4



Hình 2. Đặc tính B-H của lõi thép CKBN, ứng với tần số 50Hz.



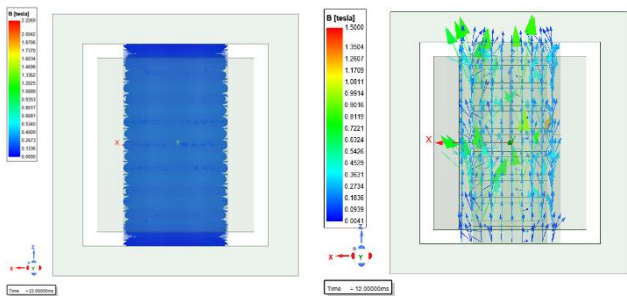
Hình 3. Đặc tính suất tổn hao của thép theo mật độ từ cảm, ứng với tần số 50Hz.



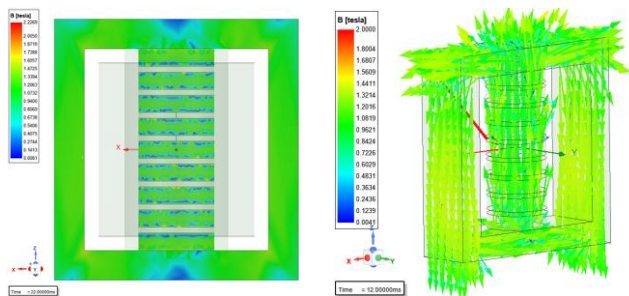
Hình 4. Mô hình chia lưới của các khối trụ và mạch từ của CKBN.

Sự phân bố của mật độ từ cảm xung quanh khe hở không khí dọc theo các khối trụ, trong khối trụ và trong mạch từ được biểu diễn trong hình 5 và hình 6. Giá trị phân bố của mật độ từ cảm tại vị trí giữa và trên bề mặt khối trụ được mô tả tại hình 7. Ta nhận thấy rằng, do các khối trụ không được vát góc, nên trên đoạn Y1Y2, từ thông tản chủ yếu tập trung ở hai mép góc của khối trụ và sẽ có giá trị lớn nhất là 1.03T. Do hiệu ứng bề mặt (skin effect), nên khi tần số càng cao thì giá trị này

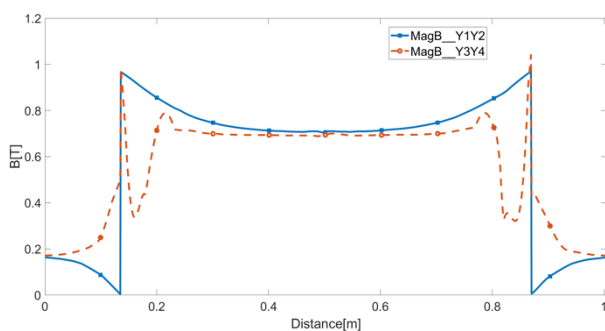
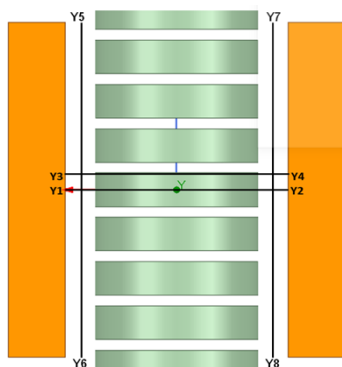
càng lớn. Tại đoạn Y3Y4, do không giáp khe hở không khí, nên phân tử thông tản có giá trị nhỏ hơn.



Hình 5. Sự phân bố của mật độ từ cảm xung khe hở không khí dọc theo các khối trụ.



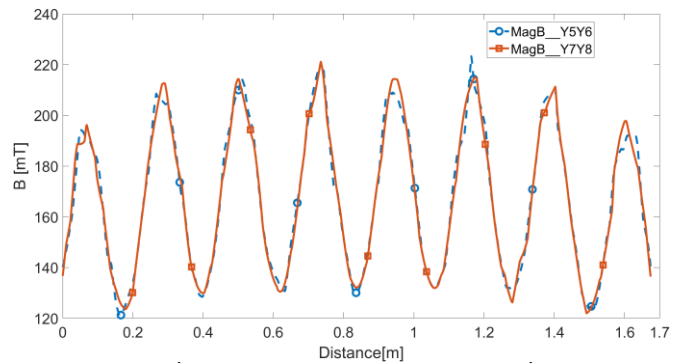
Hình 6. Sự phân bố của mật độ từ cảm trong các khối trụ và lõi thép.



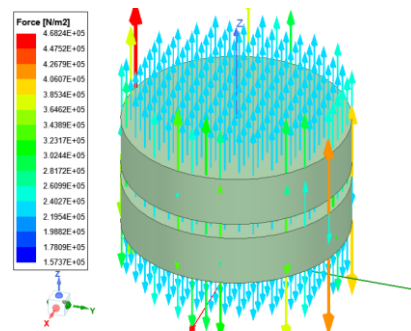
Hình 7. Sự phân bố của mật độ từ cảm tại vị trí giữa khối trụ (Y1Y2) và trên bề mặt khối trụ (Y3Y4).

Sự phân bố của từ trường dọc theo khối trụ phân đoạn Y5Y6 và Y7Y8 được thể hiện như trong hình 8. Do tính chất đối xứng, nên sự phân bố của từ thông là khá đồng đều và có giá trị xấp xỉ bằng nhau. Sự phân bố của lực điện từ trên bề mặt của các khối trụ cũng được biểu diễn trong hình 9. Ta nhận thấy rằng, giá trị lực điện từ tác động trên các khối trụ cùng phương nhưng ngược chiều và có xu hướng đẩy và ép các tâm ngăn cách giữa các khối trụ dọc theo khe hở không khí. Điều này sẽ làm xô lệch các khối trụ, ảnh hưởng đến kết

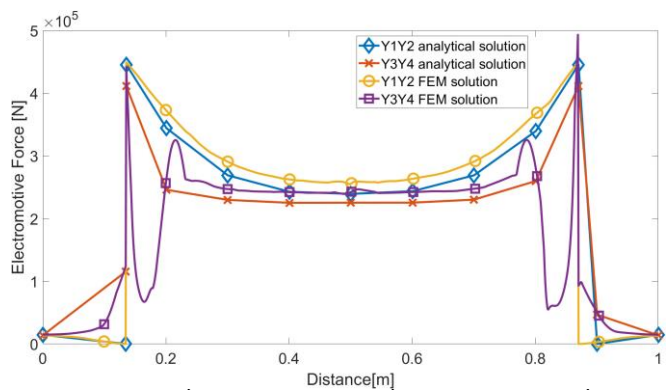
cấu của mạch từ CKBN và gây ra tiếng ồn trong suốt quá trình vận hành. Hình 10 mô tả sự phân bố của lực điện từ tác động trên bề mặt khối trụ (Y3Y4) và giữa khối trụ (Y1Y2). Như đã phân tích, tại vị trí hai mép góc của khối trụ, do thành phần từ thông tản lớn, do đó lực điện từ tại khu vực này có giá trị lớn. Khi giá trị mật độ từ cảm đạt tới 1.03T, ứng suất lực hướng trực tác động trên bề mặt khối trụ lên tới 480kN, điều này sẽ nguy hiểm đến kết cấu của CKBN, thậm chí sẽ phá hủy kết cấu của CKBN.



Hình 8. Sự phân bố của mật độ từ cảm tại vị trí dọc theo khối trụ (Y5Y6) và (Y7Y8).



Hình 9. Sự phân bố của lực điện từ trên bề mặt của các khối trụ



Hình 10. Sự phân bố lực điện từ tại giữa khối trụ (Y1Y2) và trên bề mặt khối trụ (Y3Y4).

4. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã tiếp cận bằng hai phương pháp (phương pháp giải tích và phương pháp FEM) để tính toán, mô phỏng sự phân bố của mật độ từ cảm trong và xung quanh khe hở các khối trụ, lực điện từ tác động lên bề mặt khối trụ của CKBN. Trong cả hai phương pháp, các kết quả đạt được cho thấy, các lực điện từ tác động lên bề mặt trên và mặt dưới của khối trụ cùng phương nhưng ngược

chiều và có độ lớn xấp xỉ bằng nhau. Điều này sẽ tác động trực tiếp tới các tấm ngăn cách giữa các khối trụ, sẽ làm xô lệch kết cấu của các khối trụ và mạch từ do phải chịu lực nén rất lớn. Các kết quả đạt được từ nghiên cứu, sẽ là cơ sở để giúp cho các nhà thiết kế và chế tạo CKBN đưa ra giải pháp tăng cường/gia cố kết cấu của các tấm ngăn cách giữa các khối trụ trước khi sản xuất. Đặc biệt, đưa ra sự lựa chọn phù hợp của mật độ từ cảm trong lõi thép để có thể giảm được lực điện từ tác động trên bề mặt của khối trụ và bề mặt của các tấm ngăn cách giữa các khối trụ. Điều này sẽ giúp cho việc thiết kế và vận hành CKBN được tối ưu hóa để đảm bảo tính ổn định và hiệu suất của hệ thống điện.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả bài báo xin trân trọng cảm ơn Trường Đại học Quy Nhơn đã cho phép sử dụng phần mềm để tính toán, mô phỏng và kiểm tra kết quả.

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 (IRASET) 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] T. P. Minh, H. B. Duc, and V. D. Quoc, "Analysis of Leakage Inductances in Shunt Reactors: Application to High Voltage Transmission Lines", *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 8488-8491, Jun. 2022.
- [5] Pham Minh, T. "Computation and Simulation of Shunt Reactor by an Analytical method and Finite element Method-Application to transmission lines of high and super high voltages". *Journal of Military Science and Technology*, no. 74, Aug. 2021, pp. 36-43,
- [6] 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.2018.28682 89.
- [7] 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
- [8] 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. 10.1155/2019/72 90536.
- [9] S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde "Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics" Second Edition, ISBN 9781439853771, Published October 10, 2012 by CRC Press
- [10] S. Koruglu, P. Sergeant, R.V. Sabarieqo, 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.
- [11] 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
- [12] 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.
- [13] Kamran Dawood "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)
- [14] F. Yuan et al., "Thermal Optimization for Dry Type Air Core Reactor Base on FEM," 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2018, pp. 1726-1730, doi: 10.23919/ICEMS.2018.8549257.
- [15] S. Magdaleno-Adame, R. Escarela-Perez, J. C. Olivares-Galvan, E. Campero-Littlewood and R. Ocon-Valdez, "Temperature Reduction in the Clamping Bolt Zone of Shunt Reactors: Design Enhancements," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 6, pp. 2648-2655, Dec. 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2322994.
- [16] Modeling of electromagnetic systems by coupling subproblems method with application to thin shell models, PhD Thesis, Dang Quoc Vuong, 2013.

Author's Biography



Dr Hung Bui Duc is currently working as a team leader of electrical machines's group, and also a lecturer of Department of Electrical Engineering, School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology. He obtained the PhD degree in the Department of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, in 2000.



M.Sc. Dang Chi Dung is currently working as a deputy of Office Head, School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology. He obtained the Master degree in the Department of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, in 2003.



Dr Do Chi Phi is a Dean Electrical-Electronic Engineering Cao Thang Technical College, Ho Chi Minh city, Vietnam. PhD, Hanoi University of Science and Technology in 2016. He is Studying in Electrical Engineering, electrical installation skills, design install a Solar or lighting system; ability to operate, assemble, maintain electrical equipment, electrical systems and solve problems related to electricity and equipment in the production.



Assoc. Prof. Dang Quoc Vuong received his PhD degree in 2013 from the Faculty of Applied Sciences at the University of Liege in Belgium. After that he came back to the Hanoi University of Science and Technology in September 2013, where he is currently working as a deputy director of Training Center of Electrical and Electronic Engineering, School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi, University of Science and Technology. He became an Associate Professor in 2020. His research domain encompasses modeling of

electrical machines and electromagnetic systems by coupling of subproblem methods.