

TÍNH TOÁN VÀ MÔ PHỎNG CUỘN KHÁNG BÙ NGANG BẰNG PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH VÀ PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN - ỨNG DỤNG TRÊN LƯỚI ĐIỆN CAO ÁP VÀ SIÊU CAO ÁP

Phạm Minh Tú*, Bùi Đức Hùng, Đặng Chí Dũng, Phùng Anh Tuấn,
Phan Hoài Nam, Trương Công Trình, Đặng Quốc Vương

Tóm tắt: Cuộn kháng bù ngang là thiết bị đóng vai trò quan trọng trong hệ thống điện, đặc biệt đối với lưới điện cao áp và siêu cao áp. Khi chiều dài đường dây lớn, cuộn kháng bù ngang được dùng để hấp thụ lượng công suất phản kháng dư thừa được sinh ra bởi dung dẫn đường dây khi 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. Để giảm từ thông, nhằm tránh bão hòa mạch từ, cần tăng từ trở mạch từ bằng cách thêm khe hở trên trụ, tuy nhiên, điều này sẽ làm xuất hiện từ trường tản xung quanh lân cận khe hở. Để giảm ảnh hưởng của từ trường tản xung quanh khe hở đến tổn hao công suất trong máy, một khe hở lớn được chia thành nhiều khe hở nhỏ phân bố dọc trên trụ và tại các khe hở này thường dùng vật liệu không từ tính để ngăn cách giữa các khối trụ.

Từ khóa: Cuộn kháng bù ngang; Phương pháp phần tử hữu hạn; Từ cảm; Điện cảm; Tổn hao sắt; Tổn hao đồng.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cuộn kháng bù ngang (CKBN) là phần tử quan trọng và được sử dụng rộng rãi để nâng cao tính ổn định, hiệu quả trong hệ thống truyền tải điện năng. Hệ thống truyền tải điện cao áp và siêu cao áp thường có chiều dài đường dây tương đối lớn, nên khi không tải hoặc tải nhỏ, 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. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng “Ferranti” [1, 2]. Do đó, để 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 [3].

Đối với CKBN, để giảm từ thông và tránh bão hòa mạch từ, cần tăng từ trở mạch từ bằng cách tạo ra khe hở ngang trụ, qua đó tăng năng lượng tích trữ khu vực khe hở. Thể tích của khe hở này phụ thuộc vào công suất phản kháng và từ cảm mạch từ được lựa chọn. Sự cần thiết có khe hở trên trụ làm xuất hiện từ trường tản xung quanh khe hở [4], làm gia tăng tổn hao công suất trong máy, tùy thuộc vào kích thước khe hở cần phân chia thành nhiều khe hở để giảm ảnh hưởng của từ trường tản này, qua đó giảm tổn hao công suất trong máy.

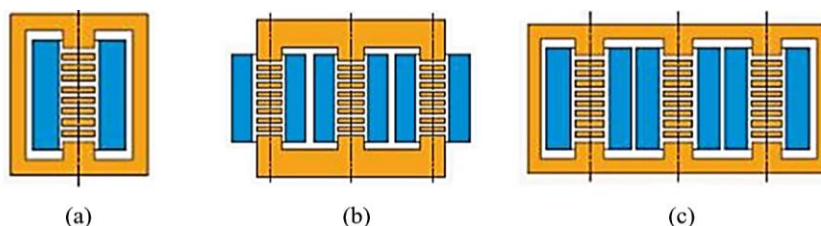
Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã sử dụng phương pháp tính toán giải tích dựa trên lý thuyết về mô hình mạch từ để đưa ra các thông số kích thước mạch từ và dây quấn của CKBN. Sau đó, áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để tính toán và mô phỏng CKBN ứng với các thông số đã được thiết kế từ phương pháp giải tích.

2. TÍNH TOÁN THIẾT KẾ CKBN

2.1. Cấu trúc mạch từ

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).

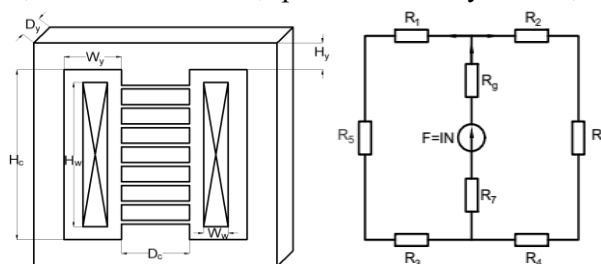
CKBN ở hình 1(a) là cuộn kháng một pha, thường được nối thành tổ cuộn kháng ba pha. Cuộn kháng ba pha năm trụ ở hình 1(c) có dạng trụ bọc, giảm tiết diện gông và chiều cao mạch từ so với kiểu ba pha ba trụ như hình 1(b) [6]. Với khe hở trên trụ có chiều dài lớn, xung quanh khe hở tồn tại từ thông tản 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.



Hình 1. (a) Cuộn kháng một pha; (b) Cuộn kháng ba pha ba trụ; (c) Cuộn kháng ba pha năm trụ [5].

2.2. Sơ đồ mạch từ thay thế

Mô hình và thông số mạch từ của CKBN một pha và sơ đồ thay thế được mô tả như trên hình 2.



Hình 2. Mô hình mạch từ CKBN (trái) và sơ đồ thay thế (phải).

Trên hình 2: D_c , H_c , H_y , D_y , W_y , H_w , W_w thứ tự là đường kính trụ, chiều cao trụ, chiều cao gông, chiều dày gông, chiều rộng cửa sổ mạch từ, chiều cao và chiều rộng dây quấn.

Trong đó, F là sức từ động. Do tính đối xứng của mạch từ nên từ trở từng phần gông trên, gông dưới, phần mạch từ hai bên và từ trở phần trụ được xác định theo phương trình sau:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = \frac{1}{\mu} \frac{2W_y + D_c + H_y}{2 \cdot H_y \cdot D_y} \quad (1)$$

$$R_5 = R_6 = \frac{1}{\mu} \frac{H_c + H_y}{H_y \cdot D_y}, \quad R_7 = \frac{1}{\mu} \frac{4 \cdot (H_c + H_y - l_g)}{\pi D_c^2} \quad (2a-b)$$

Trong các công thức trên, μ (H/m) là từ thẩm của vật liệu sắt từ, l_g (m) là tổng chiều dài khe hở trên trụ, W_y , D_c , H_y , D_y (m) là các thông số kích thước như được mô tả trên hình 2.

Từ trở tương đương phần sắt từ sau khi biến đổi tương đương được xác định:

$$R_c = R_7 + \frac{R_2 + R_4 + R_6}{2} = \frac{4 \cdot (H_c + H_y - l_g)}{\mu \cdot \pi \cdot D_c^2} + \frac{2W_y + D_c + 2H_y + H_c}{2\mu \cdot H_y \cdot D_y} \quad (3)$$

Từ trở phần khe hở trên trụ được xác định theo công thức:

$$R_g = \frac{1}{\mu_0} \frac{4 \cdot l_g}{\pi \cdot D_c^2} \quad (4)$$

Từ (3) và (4) nhận thấy, thường từ thẩm vật liệu kỹ thuật điện làm mạch từ $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ có giá trị rất lớn so với từ thẩm khe hở là μ_0 , nên từ trở R_c rất nhỏ so với R_g . Khi tính toán kích thước sơ bộ CKBN có thể bỏ qua thành phần R_c trên sơ đồ mạch từ thay thế.

2.3. Tính toán thông số thiết kế

Trong phần này, nhóm tác giả thực hiện tính toán thông số thiết kế CKBN một pha có công suất 35 MVar, 500/ $\sqrt{3}$ kV, 50 Hz. Với tổ ba CKBN này dùng trong lưới điện ba pha, công suất tổng là 105 MVar. Thông số thiết kế và các chỉ tiêu kỹ thuật của CKBN sẽ được tính toán sơ bộ bằng phương pháp giải tích qua các công thức tính toán điện từ cơ bản. Kết quả này (tổn hao đồng, tổn hao sắt, điện cảm, công suất phản kháng) sau đó được so sánh với phương pháp phần tử hữu hạn FEM để hiệu chỉnh thiết kế.

Bước đầu tiên để thiết kế CKBN là xác định kích thước mạch từ, như đã trình bày, cần tăng từ trở mạch từ bằng cách thêm khe hở trên trụ. 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.

Thành phần điện trở dây quấn rất nhỏ so với điện kháng, có thể bỏ qua khi xác định thông số mạch từ. Quan hệ giữa sức điện động cảm ứng trên dây quấn với thông số mạch từ theo phương trình:

$$E = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}}\right) \cdot f \cdot N \cdot \Phi_m = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}}\right) \cdot f \cdot N \cdot B_m \cdot A_g \quad (5)$$

Tại sơ đồ mạch từ hình 2 có 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, do từ trở mạch từ R_c rất nhỏ so với từ trở khe hở nên có thể bỏ qua khi xác định dòng điện. Dòng điện được xác định như phương trình dưới đây:

$$I = \frac{\Phi \cdot R_g}{N} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \frac{B_m \cdot l_g}{\mu_0 \cdot N} \quad (6)$$

Thể tích khe hở V_g xác định qua tiết diện A_g và chiều dài của khe hở l_g . Từ (5) và (6) xác định được thể tích của khe hở theo phương trình:

$$V_g = A_g \cdot l_g = \frac{Q}{\frac{\pi}{\mu_0} \cdot f \cdot B_m^2} \quad (7)$$

Trong các phương trình trên: f , N , Φ_m , B_m , A_g , l_g , R_g và μ_0 lần lượt là tần số lưới điện, số vòng dây của dây quấn, từ thông cực đại, từ cảm cực đại, tiết diện khe hở, chiều dài khe hở, từ trở vùng khe hở và độ từ thẩm của không khí.

Khi công suất phản kháng, mật độ từ thông và tần số lưới điện không đổi thì thể tích khe hở cần tính toán là không đổi. 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 tổn hao công suất và kích cỡ CKBN.

Điện cảm được xác định qua mô hình mạch từ, đó là:

$$L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \left(\frac{A_g}{l_g}\right) = N^2 \cdot P_g \quad (8)$$

Từ (8) có thể xác định sơ bộ số vòng dây theo phương trình (9).

$$N = \sqrt{\frac{L}{\mu_0 \cdot \left(\frac{A_g}{l_g}\right)}} \quad (9)$$

Kích thước cuộn dây trong cửa sổ mạch từ được xác định theo phương trình (10).

$$A_w = W_w \cdot H_w = \frac{N \cdot I}{k_u \cdot J} \quad (10)$$

Trong đó: k_u là hệ số điền đầy dây quấn trong cửa sổ mạch từ; J là mật độ dòng điện.

Từ thông tản lân cận xung quanh khu vực khe hở được xác định theo [6], xét với trụ có tiết diện tròn.

$$\Phi_f = \int B \cdot dA = \int_0^{\frac{H_c - l_g}{2}} \frac{\mu_0 \cdot F}{l_g + \pi \cdot r} \cdot \pi \cdot D_c \cdot dr \quad (11)$$

Từ quan hệ giữa từ thông tản với sức từ động qua từ dẫn phần từ thông tản, từ dẫn tản khu vực xung quanh lân cận khe hở được xác định:

$$P_f = \mu_0 \cdot D_c \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi(H_c - l_g)}{2 \cdot l_g} \right) \quad (12)$$

Từ dẫn khe hở có kể đến ảnh hưởng của từ thông tản xung quanh khe hở được xác định theo phương trình:

$$P_{gf} = P_g + P_f \quad (13)$$

Phương trình quan hệ giữa điện cảm và số vòng dây khi xét đến từ dẫn mạch từ và từ dẫn khe hở.

$$L = N^2(P_c + P_{gf}) \quad (14)$$

Tổn hao đồng được tính toán thông qua các phương trình sau:

$$P_{Cu} = I^2 \cdot k_f \cdot R_{dc} \quad (15)$$

$$R_{dc} = \rho \cdot \frac{l_{tb}}{A_{Cu}} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot N \cdot (D_c + W_w + 2 \cdot b_{cw})}{A_{Cu}} \quad (16)$$

Trong đó: k_f là hệ số gia tăng tổn hao do hiệu ứng bề mặt và dòng điện xoáy; R_{dc} là điện trở dây quấn; ρ là điện trở suất của dây dẫn; b_{cw} là khoảng cách cách điện từ trụ đến dây quấn; A_{Cu} là tiết diện của dây dẫn.

Tổn hao sắt từ được xác định bằng phương trình:

$$P_{Fe} = k_p \cdot (p_t \cdot G_t + p_g \cdot G_g) \quad (17)$$

Trong đó: k_p là hệ số tổn hao phụ; p_t và p_g tương ứng là suất tổn hao sắt ở trụ và gông; G_t và G_g tương ứng là khối lượng của trụ và gông.

Sau khi tính toán các thông số qua các phương trình đã nêu trên, kết quả tính toán các thông số kích thước của CKBN được tổng hợp ở bảng 1 dưới đây. Bảng kết quả này được sử dụng để thực hiện mô hình mô phỏng bằng phương pháp FEM.

Bảng 1. Thông số chính CKBN.

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Công suất phản kháng	Q (MVAr)	35
Điện áp định mức	U (kV)	$500/\sqrt{3}$
Dòng điện định mức	I (A)	121,24
Điện cảm tổng	L (H)	7,5788
Đường kính trụ	D_c (mm)	698
Chiều cao trụ	H_c (mm)	1793
Tổng chiều dài khe hở trên trụ	l_g (mm)	390
Số vòng dây quấn	N (vòng)	2020
Chiều rộng dây quấn	W_w (mm)	254
Chiều cao dây quấn	H_w (mm)	1523
Tổn hao đồng	P_{Cu} (kW)	58,6457
Tổn hao sắt	P_{Fe} (kW)	22,3420

3. MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP FEM

Hệ phương trình Maxwell cùng với luật trạng thái cho bài toán điện từ được xác định như sau [7-10]:

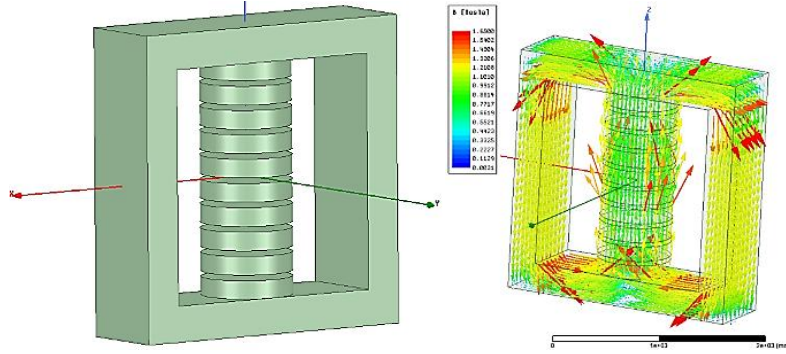
$$\text{curl } \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}, \quad \text{curl } \mathbf{H} = \mathbf{J}_s, \quad \text{div } \mathbf{B} = 0, \quad (18a-b-c)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (19a-b)$$

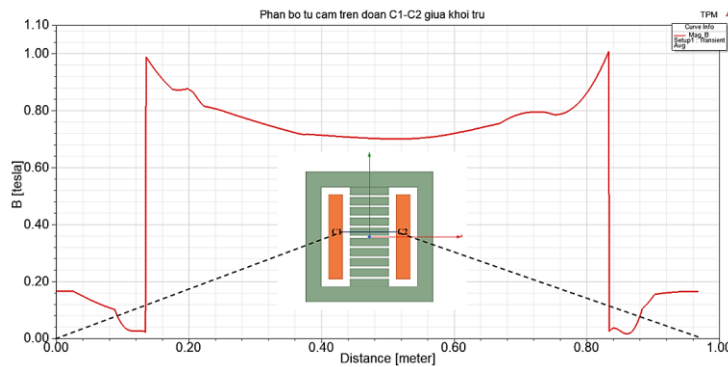
Giá trị điện cảm (L) được xác định thông qua năng lượng theo các phương trình sau:

$$w_m = \frac{1}{2} H \cdot B, \quad W_m = \iiint w_m dv, \quad L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2} \quad (20)$$

Trong đó: E, B, H, 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, σ lần lượt là độ từ thẩm và độ dẫn điện của vật liệu; W_m, w_m là năng lượng, mật độ năng lượng trên đơn vị thể tích.



Hình 3. Mô hình CKBN một pha (trái), sự phân bố của mật độ từ cảm (phải).

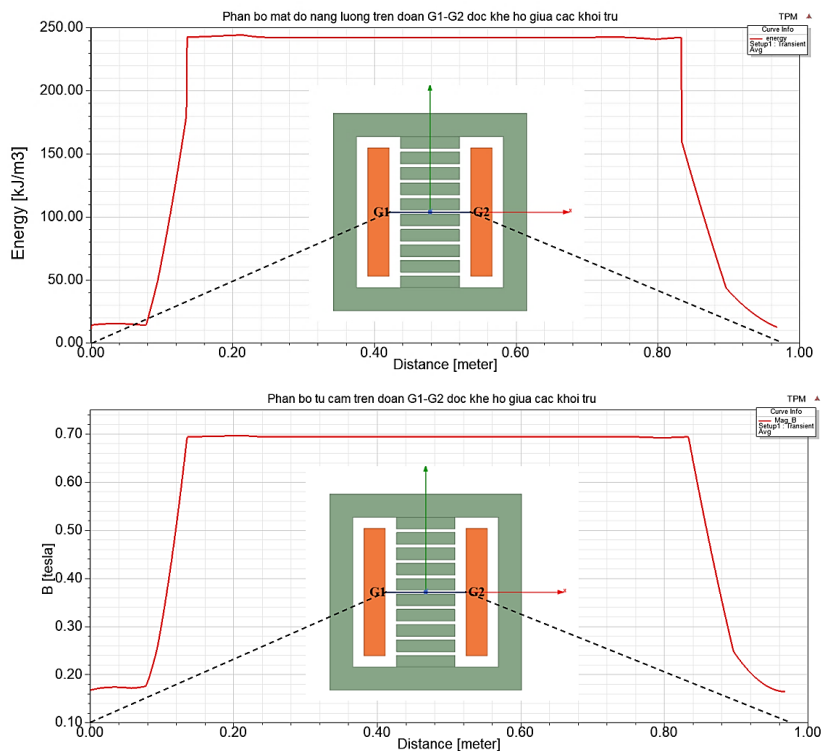


Hình 4. Phân bố từ cảm trên đoạn C1-C2 giữa khối trụ.

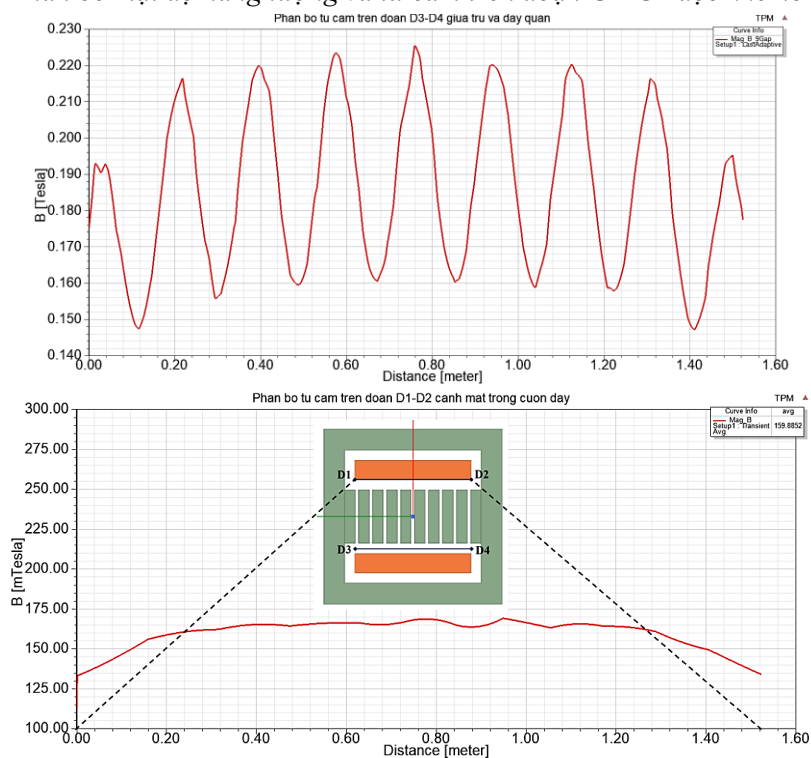
Mô hình đối tượng CKBN được tạo trong Ansys Maxwell như hình 3 (trái). Sự phân bố từ cảm trên mạch từ và trên khối trụ được mô tả trên hình 3 (phải) và hình 4. Từ cảm phân bố không đồng đều trên mạch từ, đặc biệt trên các khối trụ. Từ thông tập trung ở bề mặt ngoài của các khối trụ nên giá trị từ cảm ở xung quanh cạnh khối trụ lớn hơn ở trong lòng khối trụ. Nguyên nhân của vấn đề này là do đặc điểm của CKBN cần thêm khe hở trên trụ để tăng từ trở mạch từ, làm xuất hiện thành phần từ thông tản xung quanh lân cận các khe hở gây gia tăng từ thông xung quanh khối trụ.

Phân bố mật độ năng lượng và từ cảm trên đường dọc khe hở giữa trụ tương ứng như hình 5 dưới đây. Phân bố từ cảm trên đoạn D1-D2 theo chiều cao mặt trong dây quấn và đoạn D3-D4 giữa trụ và dây quấn được biểu thị trên hình 6. Hình 6 (dưới) cho thấy, từ cảm dọc chiều cao mặt trong cuộn dây tương đối nhỏ và đồng đều, từ cảm trung bình 0,160T. Kết quả này đạt được là do đã thực hiện chia nhỏ phần khe hở thành 9 khe bố trí dọc trên trụ, qua đó tránh được ảnh hưởng của từ trường tản lên các phần dây quấn lân cận khe hở, giảm từ cảm khu vực dây quấn xung quanh khe hở về giá trị đồng đều so với các vị trí khác dọc cuộn dây.

Tổn hao đồng trên dây quấn được được mô tả như trong hình 7. Giá trị tổn hao đạt được là 59,0174 kW, như vậy, sai số 0,63% so với kết quả tính giải tích là 58,6457 kW. Để tránh gia tăng tổn hao do thành phần từ trường tản tác động lên dây quấn lân cận khu vực khe hở, cần chia nhỏ khe hở qua đó giảm bán kính từ trường tản nhỏ hơn khoảng cách giữa dây quấn và trụ, giảm ảnh hưởng đến dây quấn.



Hình 5. Phân bố mật độ năng lượng và từ cảm trên đoạn G1-G2 dọc khe hở giữa trụ.



Hình 6. Phân bố từ cảm giữa trụ và dây quấn (trên) và theo chiều cao mặt trong dây quấn (dưới).

Tổn hao sắt từ trên mạch từ được mô tả trong hình 8. Giá trị 27,9521 kW so với kết quả tính toán giải tích là 22,3420 kW, như vậy, sai số 25,11% so với kết quả tính giải tích. Sai khác này là

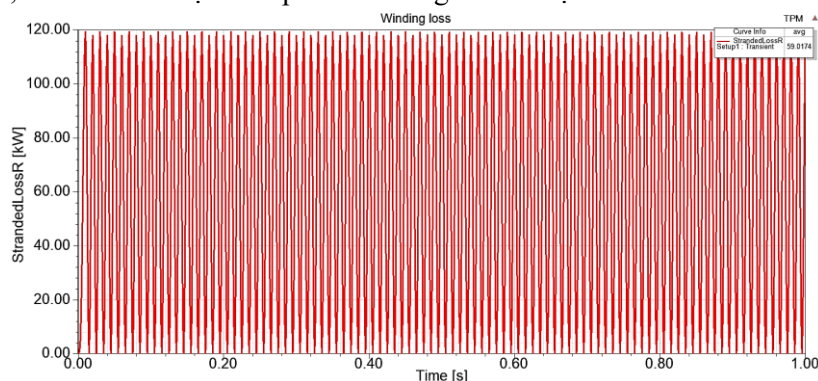
do phương pháp giải tích không xác định được sự phân bố từ cảm trên trụ và gông, từ cảm tại các vị trí khác nhau dẫn đến suất tổn hao và do đó tổn hao khác nhau. Thêm nữa, thành phần từ trường tản khu vực khe hở này hướng vào lá thép hợp với hướng từ hóa các góc khác nhau gây ra dòng điện xoáy làm gia tăng thêm tổn hao trên các khối thép trụ.

Giá trị điện cảm khe hở và điện cảm tổng giữa phương pháp giải tích và phương pháp FEM được cho trong bảng 2.

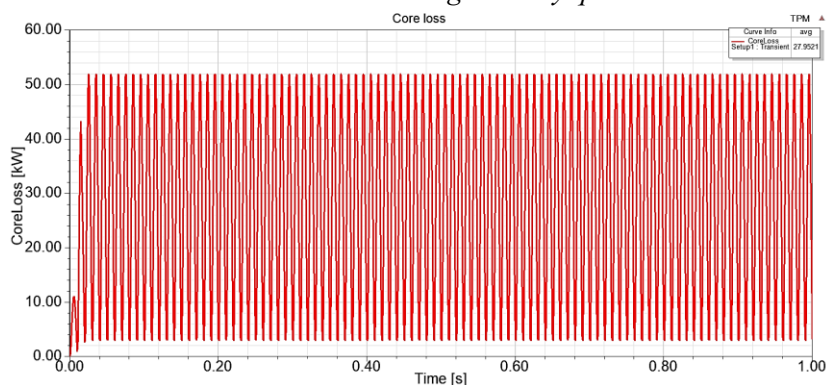
Bảng 2. Bảng so sánh giá trị điện cảm tổng và điện cảm khe hở bằng các phương pháp khác nhau.

Thông số	FEM	Giải tích	Sai số
Điện cảm tổng L (H)	7,4935	7,5788	1,13%
Điện cảm phần khe hở giữa trụ L_g (H)	4,9638	5,0263	1,24%

Ứng với dòng điện trong dây quấn đạt giá trị 121,46A, sai số chỉ 1,13% đối với giá trị điện cảm tổng và 1,24% đối với điện cảm phần khe hở giữa các trụ.



Hình 7. Tổn hao đồng trên dây quấn.



Hình 8. Tổn hao sắt trong mạch từ.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã thực hiện tính toán thiết kế bằng giải tích dựa trên sơ đồ mạch từ thay thế tương đương để tính toán thông số kích thước mạch từ, dây quấn và các thành phần tổn hao công suất trên CKBN. Dựa trên kích thước đã tính toán, thực hiện dựng mô hình hóa và mô phỏng CKBN bằng phương pháp FEM, khảo sát phân bố từ cảm trên mạch từ, năng lượng tích lũy trong khu vực khe hở, xác định các thành phần tổn hao công suất trong máy. So sánh kết quả tính toán giữa hai phương pháp, đạt các thông số kỹ thuật, điện cảm tổng sai lệch chỉ 1,13%, công suất phản kháng đạt như yêu cầu thiết kế, cho thấy độ tin cậy của phương pháp tính toán thiết kế qua sơ đồ mạch từ CKBN.

Lời cảm ơn: Tác giả xin chân thành cảm ơn trường Đại học Bách khoa Hà Nội đã hỗ trợ kinh phí nghiên cứu của đề tài nghiên cứu khoa học Mã số T2021-PC-006 năm 2021.

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]. Nguyễn Văn Đại “*Nghiên cứu tính chọn thông số cho cuộn kháng bù ngang đường dây 500 kV*” luận văn thạc sĩ - Đại học Đà Nẵng
- [4]. Arun Balakrishnan “*Air-Gap Reluctance and Inductance Calculations for Magnetic Circuits Using a Schwarz-Christoffel Transformation*” IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 12, NO. 4, JULY 1997.
- [5]. Shunt reactors for medium and high voltage networks, <https://new.siemens.com/>
- [6]. S. Pokharel and A. Dimitrovski, “*Analytical Modeling of A Ferromagnetic Core Reactor*,” 2019 North American Power Symposium (NAPS), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/NAPS46351.2019.9000352.
- [7]. Arabul AY, Kurt E, Senol I, Arabul FK. “*An investigation on flux density of three phase distributed Air-Gap 3-5 legged shunt reactor*”. IRES-27th ICIET, Amsterdam, Netherlands, 25 December 2015.
- [8]. 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).
- [9]. M. Mu, F. Zheng, Q. Li and F. C. Lee, “*Finite Element Analysis of Inductor Core Loss Under DC Bias Conditions*,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 9, pp. 4414-4421, Sept. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2235465.
- [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.

TÓM TẮT

COMPUTATION AND SIMULATION OF SHUNT REACTORS BY AN ANALYTIC METHOD AND FINITE ELEMENT METHOD-APPLICATION TO TRANSMISSION LINES OF HIGH AND SUPPER HIGH VOLTAGES

Shunt reactors are important components in electrical systems for high - and supper high voltage systems. When the length of cables is large, they are used to absorb excess reactive powers generated by capacitive powers on the lines when no-load or under-load. It is also to balance reactive powers in systems and avoid over voltages at the end of lines, maintain a regulated voltage. In order to reduce magnetic fluxes and avoid magnetic circuit saturation, it is necessary to increase the reluctance of the magnetic circuit by adding air gaps in the iron core. The air gaps are arranged along the iron core to decrease the influence of fringing fluxes around the air gaps on total losses in shunt reactors. Non-magnetic materials are often used at the air gaps to separate between iron cores.

Keywords: Shunt reactors; Air gaps; Inductance; Joule power losses; Copper losses; Finite element method.

Nhận bài ngày 11 tháng 6 năm 2021

Hoàn thiện ngày 10 tháng 7 năm 2021

Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 7 năm 2021

Địa chỉ: Viện Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

**Email:* tu.phamminh@hust.edu.vn.