

STUDY INFLUENCE OF AIR GAP NUMBERS TO INDUCTANCE VALUES OF SHUNT REACTORS

Pham Minh Tu, Bui Duc Hung*, Tran Van Thinh, Dang Quoc Vuong, Phung Anh Tuan, Dang Chi Dung

Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 01/7/2021	The shunt reactor is a device that plays an extremely important role in the transmission system. It is used to absorb the reactive power generated by the capacitive power on the transmission line when no-load or under-load operation. In addition, the shunt reactor is also to avoid the over-voltage at the end of the lines, maintenance of stabilize voltage at the specified level. One of the important parameters when calculating and designing the shunt reactors is the reactive power, where the inductance is a parameter directly related to the capacity of the device. In order to reduce the flux and avoid saturation of the magnetic circuit, it is necessary to increase the reluctance of the magnetic circuit by adding air gaps in the core. However, this makes an increase of the fringing flux around the air gap, leading to the increase of the inductance value. In order to overcome this challenge, the new idea of this research is to split a big air gap into sub- air gaps with smaller dimensions evenly distributed in the core, instead of using a large air gap like previous studies. Based on the obtained results, the paper will give the appropriate number of air gaps when calculating and designing the shunt reactors.
Revised: 27/8/2021	
Published: 27/8/2021	
KEYWORDS	
Shunt reactors	
Inductances	
Air gaps	
Magenetic Circuits	
Finite Element Method	

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA SỐ LƯỢNG KHE HỖ ĐẾN GIÁ TRỊ ĐIỆN CẢM CỦA CUỘN KHÁNG BÙ NGANG

Phạm Minh Tú, Bùi Đức Hùng*, Trần Văn Thịnh, Đặng Quốc Vương, Phùng Anh Tuấn, Đặng Chí Dũng

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 01/7/2021	Cuộn kháng bù ngang là thiết bị đóng vai trò cực kỳ quan trọng trong hệ thống lưới điện truyền tải. Nó được dùng để hấp thụ lượng công suất phản kháng dư thừa sinh ra bởi dung dẫn đường dây khi vận hành ở chế độ không tải hoặc non tải, nhằm cân bằng công suất phản kháng, tránh quá điện áp cuối đường dây, duy trì ổn định điện áp ở mức quy định. Một trong những thông số quan trọng khi tính toán thiết kế cuộn kháng bù ngang là công suất phản kháng, mà trong đó điện cảm là thông số liên quan trực tiếp đến công suất của thiết bị. 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 tăng từ trường tản xung quanh khe hở, dẫn đến làm tăng điện cảm tổng. Để vượt qua được thách thức trên, trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã nghiên cứu phân chia thành nhiều khe hở có kích thước nhỏ hơn và phân bố đều trên trụ, thay vì sử dụng một khe hở lớn như các nghiên cứu trước đây. Bài báo sử dụng phương pháp giải tích dựa trên lý thuyết về mô hình mạch từ và phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán và đưa ra mối quan hệ giữa giá trị điện cảm với số lượng khe hở khác nhau phân bố trên trụ. Trên cơ sở các kết quả đạt được, bài báo chỉ ra số lượng khe hở phù hợp khi tính toán thiết kế cuộn kháng.
Ngày hoàn thiện: 27/8/2021	
Ngày đăng: 27/8/2021	
TỪ KHÓA	
Cuộn kháng bù ngang	
Điện cảm	
Khe hở	
Mô hình mạch từ	
Phương pháp phần tử hữu hạn	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4719>

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

1. Giới thiệu

Trên hệ thống truyền tải và phân phối điện năng, bên cạnh thành phần công suất tác dụng, công suất phản kháng (CSPK) có ý nghĩa rất quan trọng trong việc điều chỉnh và giữ trạng thái cân bằng, nhằm giữ ổn định điện áp trong giới hạn cho phép. Ngoài ra, nó còn giúp tăng khả năng truyền tải, giảm tổn hao trên đường dây và tăng tính ổn định của hệ thống. Cuộn kháng bù ngang (CKBN) là phần tử cơ bản được sử dụng để cân bằng thành phần CSPK trong hệ thống truyền tải và phân phối điện năng. Mặt khác, đối với hệ thống lưới cao áp và siêu cao áp thường có chiều dài đường dây tương đối lớn. Khi không tải hoặc tải nhỏ, điện dung ký sinh trên đường dây có giá trị rất lớn, điều này 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].

Để duy trì ổn định điện áp ở phạm vi quy định, CKBN được sử dụng để hấp thụ lượng CSPK dư thừa được sinh ra bởi dung dẫn đường dây [3]. Cấu tạo CKBN cũng giống như máy biến áp (MBA), bao gồm mạch từ, dây quấn và vỏ máy. Tuy nhiên, ở CKBN, để giảm từ thông, nhằm tránh bão hòa mạch từ, cần tăng từ trở mạch từ bằng cách tạo khe hở ngang trụ, qua đó tăng năng lượng tích trữ khu vực khe hở. Thể tích của khe hở này phụ thuộc vào CSPK và từ cảm mạch từ được lựa chọn. Sự xuất hiện của khe hở trên trụ sẽ làm xuất hiện từ trường tản xung quanh khe hở [4], [5]. Điều này sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến các thông số điện cảm của CKBN.

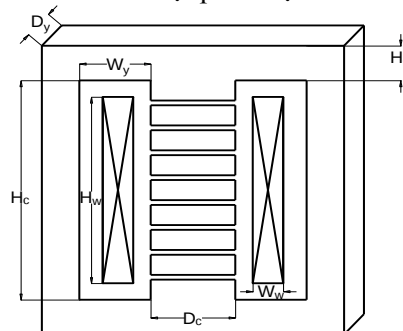
Để giảm ảnh hưởng của từ trường tản tại không gian xung quanh khe hở không khí, tức là giảm được độ lớn của điện cảm tản, cần phân chia khe hở với kích thước lớn thành nhiều khe nhỏ có kích thước nhỏ hơn phân bố dọc trên trụ. Ngăn cách giữa các khối trụ bằng vật liệu đá gốm không từ tính, đảm bảo độ cứng, chịu lực và chịu nhiệt, được ép chặt với các khối trụ bằng epoxy. Tuy nhiên, việc chia ra thành bao nhiêu khe trên tổng chiều dài khe hở là vấn đề mang tính thời sự mà các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước rất quan tâm, đặc biệt là các Công ty chế tạo CKBN tại Việt Nam hiện nay.

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã sử dụng phương pháp tính toán giải tích dựa trên lý thuyết về mô hình mạch từ. Sau đó, nhóm tác giả áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) [6] để tính toán và mô phỏng các tham số của điện cảm với số lượng khe hở khác nhau, từ đó đưa ra mối quan hệ giữa số lượng khe hở với giá trị điện cảm. Qua đó đề xuất ra số lượng khe hở phù hợp khi tính toán, thiết kế CKBN, nhằm nâng cao được hiệu suất và đạt được công suất thiết kế.

2. Xác định thông số điện cảm qua mô hình mạch từ

Trong phần này, nhóm tác giả dựa vào mô hình mạch từ để xác định thông số kích thước và điện cảm của CKBN. Để có được thông số dựng mô hình mô phỏng, đầu tiên sẽ thực hiện tính toán thông số thiết kế CKBN một pha có công suất 35 MVar, điện áp $500/\sqrt{3}$ kV và tần số 50 Hz. Với tổ ba CKBN này, được dùng trong lưới điện ba pha, công suất tổng là 105 MVar.

Thông số kích thước cơ bản của CKBN một pha được mô tả như hình 1.

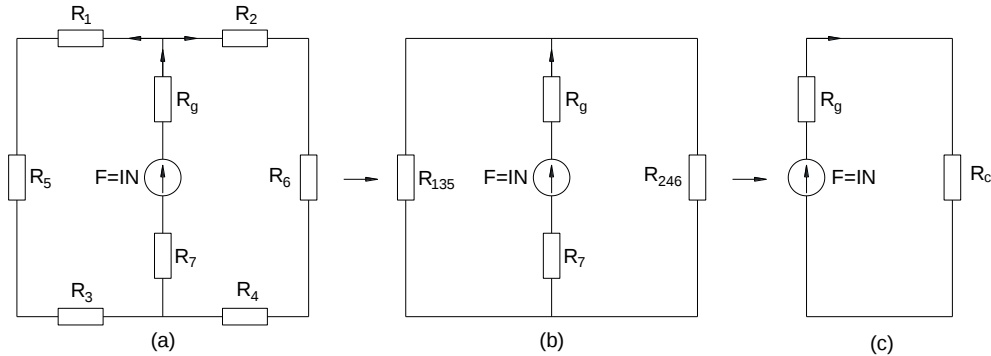


Hình 1. Các kích thước chủ yếu CKBN

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: CSPK, từ cảm mạch từ, tần số lưới điện, năng lượng tích trữ trong không gian dây quấn và khe hở, điện cảm dây quấn.

Từ cấu trúc cơ bản của CKBN, khi bỏ qua từ thông rò, có thể chia mạch từ thành các phần khác nhau để dựng mô hình mạch từ tương đương qua từ trở của các phần mạch từ như được mô tả trên hình 2a, biến đổi tương đương thành sơ đồ như hình 2b và 2c.



Hình 2. Sơ đồ mạch từ thay thế CKBN

Sức từ động do dòng điện I chạy trong N vòng dây sinh ra được biểu diễn bằng nguồn sức từ động F thể hiện trên mạch từ thay thế. Do tính đối xứng của mạch từ, nên từ trở từng phần gong trên, gong dưới, phần mạch từ hai bên và từ trở phần trụ được xác định theo phương trình.

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = \frac{1}{\mu} \frac{2W_y + D_c + H_y}{2.H_y.D_y} \quad (\text{H}^{-1}) \quad (1)$$

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

Trong đó, 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 1.

Sau khi biến đổi tương đương sơ đồ mạch từ, từ trở tương đương phần sắt từ được xác định:

$$R_c = \frac{4.(H_c + H_y - l_g)}{\mu.\pi.D_c^2} + \frac{2W_y + D_c + 2H_y + H_c}{2\mu.H_y.D_y} \quad (\text{H}^{-1}) \quad (3)$$

Từ trở phần khe hở trên trụ được xác định:

$$R_g = \frac{1}{\mu_0} \frac{4.l_g}{\pi.D_c^2} \quad (\text{H}^{-1}) \quad (4)$$

Từ phương trình (3) và (4) nhận thấy, thường từ thẩm vật liệu kỹ thuật điện làm mạch từ có giá trị rất lớn so với từ thẩm khe hở, nên từ trở R_c rất nhỏ so với R_g . Khi tính toán kích thước sơ bộ của CKBN, chúng ta có thể bỏ qua thành phần R_c trên sơ đồ mạch từ thay thế. 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 (5) dưới đây.

$$I = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \frac{B_m.l_g}{\mu_0.N} \quad (\text{A}) \quad (5)$$

Trong đó: N , B_m và μ_0 lần lượt là số vòng dây của dây quấn, từ cảm cực đại và độ từ thẩm của không khí.

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 được xác định theo phương trình dưới đây:

$$E = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \right) . f . N . B_m . A_g \quad (\text{V}). \quad (6)$$

Trong đó, A_g là tiết diện khe hở. Từ phương trình (5) và (6), thể tích của khe hở không khí được xác định theo phương trình:

$$V_g = \frac{Q}{\frac{\pi}{\mu_0} . f . B_m^2} \quad (\text{m}^3) \quad (7)$$

Trong công thức (7), Q là CSPK của CKBN. Khi CSPK, 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 kích thước quan trọng, ảnh hưởng đến tổng thể tổn hao công suất và kích cỡ CKBN. Chiều dài khe hở trên trụ được xác định qua thể tích và tiết diện khe hở theo phương trình (8).

$$l_g = \frac{V_g}{A_g} \quad (\text{m}) \quad (8)$$

Để giảm ảnh hưởng của từ trường tản, khi tính toán thiết kế CKBN cần tính chọn chiều dài khe hở phù hợp và chia nhỏ thành “g” khe hở phân bố trên trụ qua đó giảm điện cảm tản. Với thể tích khe hở là không đổi, muốn giảm chiều dài khe hở thì cần tăng tiết diện khe hở, tỉ lệ giữa tiết diện và chiều dài khe hở A_g/l_g giảm nên số vòng dây giảm. Nhưng tiết diện khe hở tăng sẽ khiến tăng lượng sắt và chu vi vòng dây.

Coi tiết diện khe hở bằng tiết diện trụ, có thể xác định đường kính trụ theo phương trình (9).

$$D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot A_g}{\pi}} \quad (\text{m}) \quad (9)$$

Từ tiết diện và đường kính của trụ, xác định được kích thước gông theo các phương trình sau.

$$D_y = D_c \quad (\text{m}); \quad H_y = \frac{A_g}{2 \cdot D_y} \quad (\text{m}) \quad (10a-b)$$

Điện cảm dây quấn được xác định thông qua mô hình mạch điện theo CSPK và điện áp hiệu dụng theo phương trình (11).

$$L = \frac{U^2}{\omega \cdot Q} \quad (\text{H}). \quad (11)$$

Trong đó: U (V) là điện áp pha đặt vào dây quấn, ω (rad/s) là tần số góc, Q (VAr) là CSPK của CKBN.

Điện cảm cũng có thể xác định qua mô hình mạch từ, được biến đổi từ phương trình (5) và (6).

$$L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \left(\frac{A_g}{l_g} \right) = N^2 \cdot P_g \quad (\text{H}) \quad (12)$$

Từ phương trình (12), có thể xác định sơ bộ số vòng dây theo phương trình (13).

$$N = \sqrt{\frac{L}{\mu_0 \cdot \left(\frac{A_g}{l_g} \right)}} \quad (\text{vòng}) \quad (13)$$

Xung quanh khe hở xuất hiện thành phần từ thông tản lan ra khỏi các khối trụ và quay về các khối trụ lân cận làm tăng từ dẫn phần khe hở, cần chia nhỏ thành “g” khe hở phân bố trên trụ. Từ dẫn khu vực xung quanh lân cận từng khe hở được xác định theo [4], được biến đổi với trụ có tiết diện tròn.

$$P_f = \mu_0 \cdot \frac{D}{\sqrt{\pi}} \left(1 + \ln \frac{\pi h}{2l_a} \right) \quad (\text{H}) \quad (14)$$

Từ dẫn khe hở có kể đến ảnh hưởng của từ thông tản xung quanh từng khe hở và giữa các khe được xác định theo phương trình (15)

$$P_{gf} = P_g + P_f \quad (\text{H}) \quad (15)$$

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

$$L = N^2 (P_c + P_{gf}) \quad (\text{H}) \quad (16)$$

Bảng 1. Thông số chính CKBN

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
CSPK	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 khe hở trên trụ	g	Xét từ 1 đến 30 khe
Số vòng dây quấn	N (vòng)	2020

Thông qua mô hình mạch từ và các phương trình đã nêu trên, có thể xác định được các thông số kích thước của CKBN có công suất bất kỳ dùng trong lưới điện cao áp và siêu cao áp. Với CKBN một pha có công suất 35 MVar, điện áp $500/\sqrt{3}$ kV và tần số 50 Hz, kết quả tính toán các thông số kích thước của CKBN được tổng hợp ở bảng 1. Bảng kết quả này được sử dụng để thực hiện mô hình mô phỏng bằng phương pháp FEM.

3. Phương pháp phần tử hữu hạn

Như chúng ta đã biết, phương pháp FEM là phương pháp số được sử dụng rộng rãi để giải các bài toán điện từ trong lĩnh vực kỹ thuật [6]. Hệ phương trình Maxwell cùng với các luật trạng thái được viết như sau:

$$\text{Định luật cảm ứng Faraday:} \quad \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (17)$$

$$\text{Định luật Gauss về từ trường:} \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (18)$$

$$\text{Định luật Ampere:} \quad \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (19)$$

$$\text{Định luật Gauss về điện trường:} \quad \nabla \cdot D = \rho \quad (20)$$

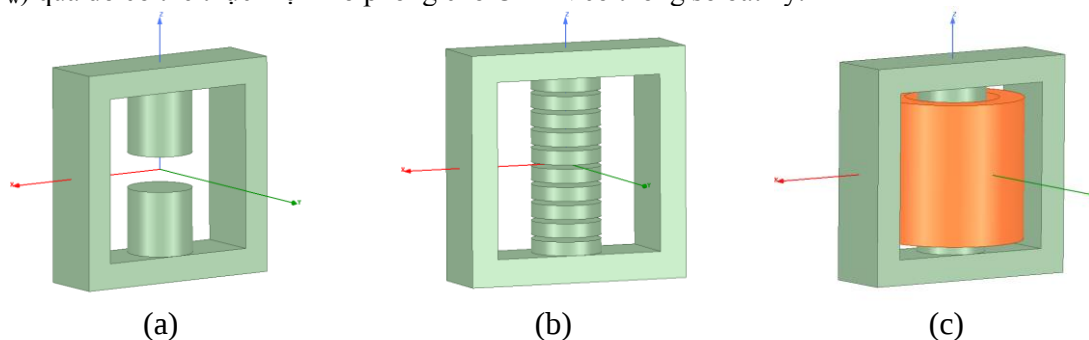
Trong phương pháp FEM, điện cảm được xác định thông qua năng lượng theo các phương trình sau:

$$w_m = \frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{B}, \quad W_m = \iiint w_m dv, \quad L = \frac{2W_m}{I^2} \quad (21a-b-c)$$

Trong đó: W_m , w_m , $\vec{B}$, $\vec{H}$ thứ tự là năng lượng, mật độ năng lượng trên đơn vị thể tích, vector từ cảm và vector cường độ từ trường.

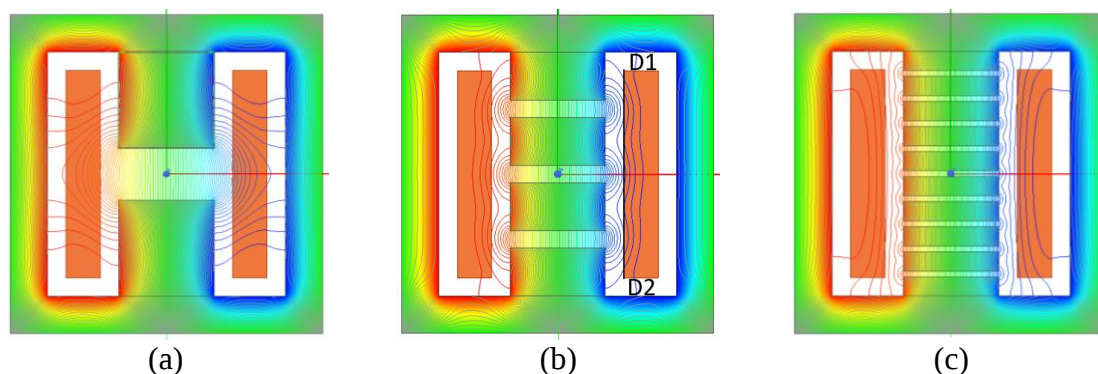
Nhóm tác giả sử dụng phương pháp FEM qua công cụ Ansys Maxwell 3D để thực hiện mô hình hóa và mô phỏng CKBN có thông số thiết kế trong bảng 1. Tính chính xác của phương pháp FEM qua công cụ Ansys Maxwell đã được xác thực và đối sánh qua các nghiên cứu trước đây [8]-[10]. Độ chính xác của kết quả phụ thuộc vào phương pháp và kích thước lưới chia. Sử dụng bộ giải "Magnetostatic" để khảo sát phân bố từ cảm và xác định giá trị điện cảm.

Để đánh giá tác động của sự phân chia khe hở trên trụ tới thông số điện cảm, nhóm nghiên cứu đã xây dựng mô hình hóa và mô phỏng cho các trường hợp số lượng khe hở khác nhau. Trên hình 3 là mô hình trường hợp không chia khe hở, chỉ có một khe hở giữa trụ và mô hình đối tượng có phân chia khe hở trên trụ. Tiết diện và chiều dài khe hở này được tính toán ở phần trước. Tất cả các thông số kích thước của đối tượng ở các trường hợp khe hở khác nhau đều được gán biến hay được xác định qua các biến độc lập (chiều dài khe hở l_g , đường kính trụ D_c , chiều cao mỗi khối trụ l_c , khoảng cách giữa dây quấn với trụ và gông b_{wc} , kích thước dây quấn H_w và W_w) qua đó có thể thực hiện mô phỏng cho CKBN có thông số bất kỳ.



Hình 3. Mô hình CKBN một pha khi không phân chia và chia khe hở trên trụ

Khe hở được thêm vào trên trụ để giảm từ thông nhằm tránh bão hòa mạch từ, tuy nhiên lại xuất hiện từ trường tản lớn xung quanh khe hở như trên hình 4, gây ra những ảnh hưởng tới thông số CKBN.



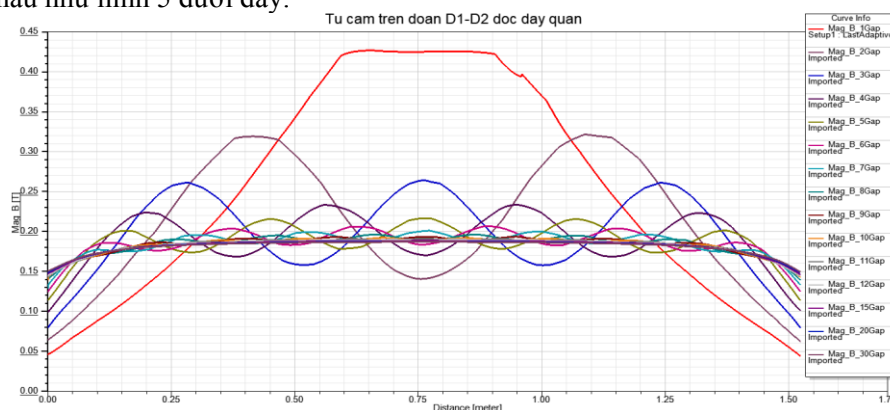
Hình 4. Phân bố từ thông tản xung quanh khe hở

Trên hình 4 có thể thấy, xuất hiện từ thông tản xung quanh khu vực khe hở, móc vòng giữa hai khối trụ. Thành phần từ thông này tản ra từ các khối trụ và quay về khối trụ lân cận, 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, làm gia tăng tổn hao sắt từ. Thêm nữa, thành phần từ thông tản này móc vòng với dây quấn xung quanh khe hở, gây tăng điện cảm và tổn hao do dòng điện xoáy trên dây quấn. Ở trường hợp không chia khe hở như hình 4a, do chỉ có một khe hở với chiều dài lớn, từ trường tản lớn móc vòng vào không gian dây quấn làm tăng thành phần điện cảm tản và do đó tăng điện cảm tổng lớn hơn giá trị tính toán theo yêu cầu từ phương trình (11). Do điện cảm lớn nên dòng điện chỉ đạt khoảng 63,5% dòng điện định mức, tương ứng là 63,5% giá trị CSPK theo yêu cầu. Để giảm ảnh hưởng của từ trường tản, 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 điện cảm tản và điện cảm tổng của CKBN. Như trên hình 4b chia thành 3 khe, từ trường tản có giảm nhưng vẫn cắt vào không gian dây quấn. Với trường hợp nhiều khe hở như trên hình 4c, từ trường tản giảm đáng kể so với trường hợp ít khe hở, thành phần từ trường này gần như không móc vòng tới không gian dây quấn, chỉ còn lại thành phần từ trường rò trên đó. Kết quả phân bố từ cảm và giá trị điện cảm của các trường hợp phân chia số lượng khe hở khác nhau được thể hiện ở phần tiếp theo.

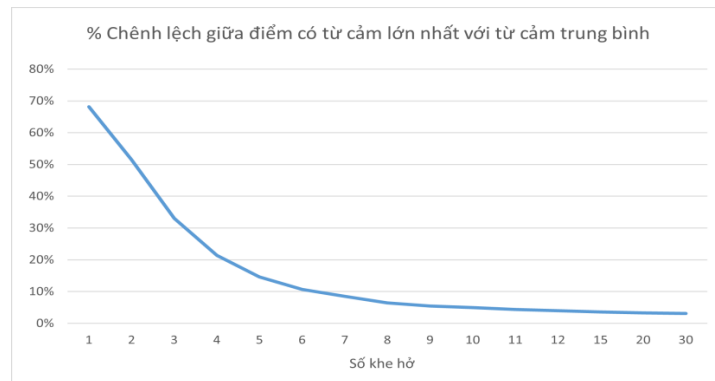
4. Kết quả và bàn luận

Thông qua công cụ Ansys Maxwell, thực hiện mô hình hóa và mô phỏng cho các trường hợp số lượng khe hở khác nhau, từ 1 cho đến 30 khe hở phân bố trên trụ, đưa ra phân bố biên độ từ cảm ở các vị trí khác nhau và xác định điện cảm trong từng trường hợp khe hở.

Phân bố biên độ từ cảm trên đoạn D1-D2 dọc theo chiều cao dây quấn ứng với số lượng khe hở khác nhau như hình 5 dưới đây.



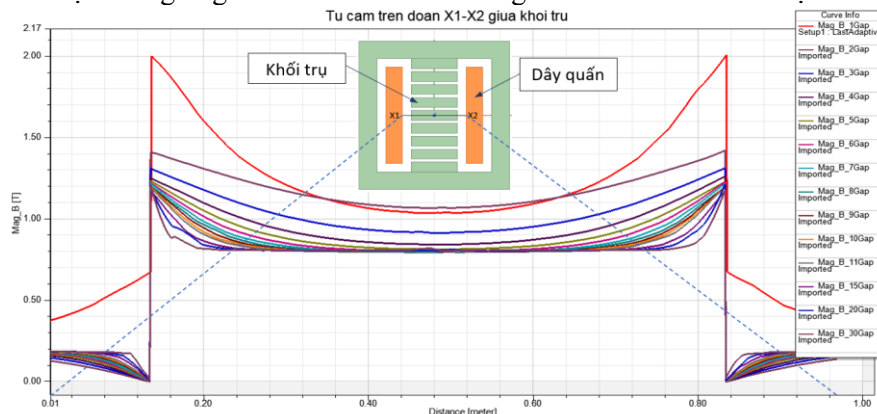
Hình 5. Phân bố từ cảm dọc đoạn D1-D2 theo chiều cao dây quấn



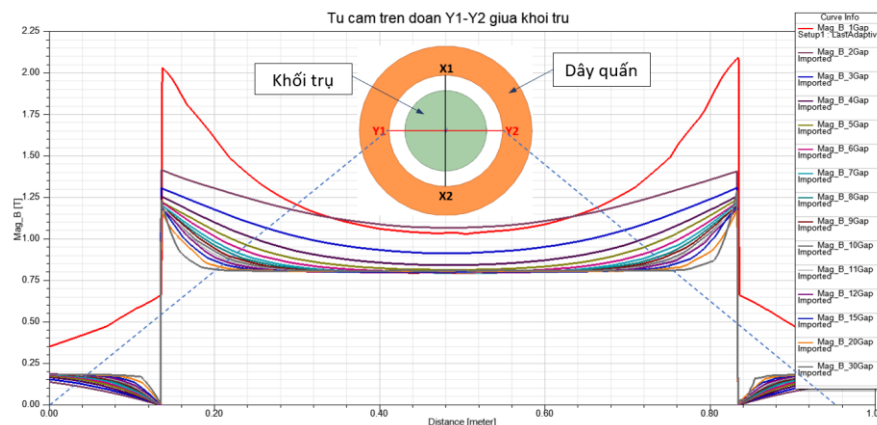
Hình 6. Chênh lệch giữa điểm có từ cảm lớn nhất với giá trị từ cảm trung bình

Từ hình 5 cho thấy, trường hợp không phân chia khe hở hoặc số khe hở ít, giá trị từ cảm có sự chênh lệch lớn dọc chiều cao cạnh dây quấn, điểm có từ cảm lớn nhất có từ cảm lớn gấp 1,7 lần giá trị trung bình. Từ cảm khu vực dây quấn gần khe hở có giá trị lớn hơn khu vực còn lại dọc theo chiều cao dây quấn. Khi tăng số lượng khe hở, từ cảm giảm đáng kể và phân bố đồng đều hơn tại mọi vị trí theo chiều cao dây quấn, qua đó giảm ảnh hưởng bởi từ trường tản lên dây quấn. Như trên hình 6, ở trường hợp chia thành 8 khe hở, sai khác giữa điểm có từ cảm lớn nhất với giá trị từ cảm trung bình là 6,4%. Sai khác còn 5,5% nếu chia thành 9 khe hở.

Để thấy được phân bố từ cảm ở các khối trụ, xét hai đoạn vuông góc với nhau X1-X2 và Y1-Y2 trên khối trụ, giá trị từ cảm trên hai đoạn xét ứng với từng trường hợp số lượng khe hở khác nhau được thể hiện tương ứng trên hai hình 7 và 8 cùng hình chú thích mô tả vị trí xét.



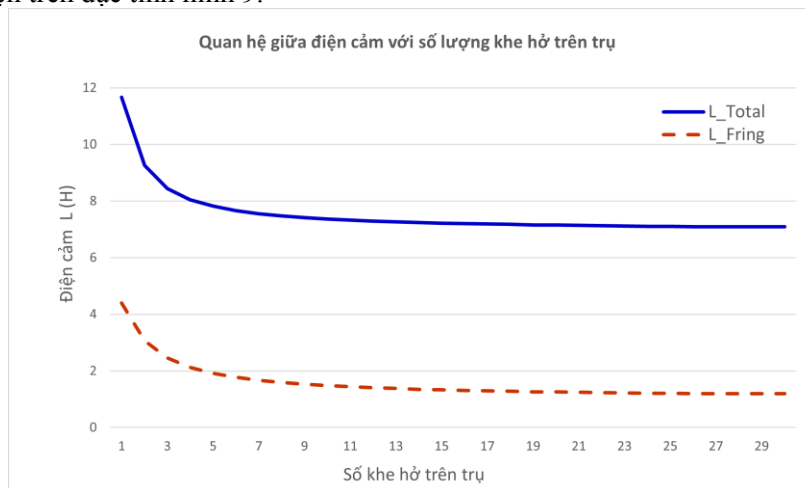
Hình 7. Phân bố từ cảm trên đoạn X1-X2 ngang khối trụ



Hình 8. Phân bố từ cảm trên đoạn Y1-Y2

Trên hình 7 và hình 8 cho thấy sự phân bố không đồng đều từ cảm trên các khối trụ, có sự chênh lệch giữa biên độ từ cảm ở xung quanh cạnh khối trụ với từ cảm trong lòng khối trụ, nguyên nhân do xuất hiện thành phần từ thông tản xung quanh lân cận các khe hở nên từ thông ở bề mặt cạnh ngoài của các khối trụ lớn hơn phía trong khối trụ. Khi tăng số lượng khe hở sẽ giảm độ chênh lệch biên độ từ cảm giữa bề mặt ngoài khối trụ với từ cảm trong lòng khối trụ.

Tiếp theo, dựa vào các phương trình (21a-b-c) để xác định các thành phần điện cảm thông qua năng lượng, đưa ra mối quan hệ giữa điện cảm tổng và điện cảm tản ứng với các trường hợp số lượng khe hở trên trụ khác nhau. Giá trị điện cảm quyết định dòng điện và CSPK khi hoạt động của CKBN. Kết quả các thành phần điện cảm ứng với các trường hợp khe hở thay đổi từ 1 đến 30 khe hở thể hiện trên đặc tính hình 9.



Hình 9. Mối quan hệ giữa điện cảm tổng và điện cảm tản với số lượng khe hở trên trụ

Từ đặc tính quan hệ giữa giá trị điện cảm tổng và điện cảm tản với số lượng khe hở phân bố trên trụ cho thấy, với số lượng khe hở nhỏ thì chiều dài mỗi khe hở lớn, thành phần từ thông tản và điện cảm tản lớn, dẫn đến điện cảm tổng lớn. Khi tăng số lượng khe hở từ 1 đến 8 khe điện cảm tản và điện cảm tổng giảm rõ rệt, do khi tăng số khe thì từ dẫn tổng vùng lân cận xung quanh khe hở giảm, hay ngược lại từ trở vùng xung quanh khe hở tăng, dẫn đến giảm từ trường tản và điện cảm tản. Tiếp tục tăng số khe hở lên tới 30 khe cho thấy điện cảm có giảm nhưng không đáng kể. Với kết quả trên, khi chia số khe hở từ 8 khe sẽ đạt được giá trị điện cảm theo yêu cầu. Kết quả nghiên cứu này cho ra bức tranh quan hệ giữa giá trị điện cảm với số lượng khe hở, từ đó giúp các nhà thiết kế chế tạo lựa chọn được số lượng khe hở phù hợp khi tính toán thiết kế CKBN.

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã sử dụng phương pháp giải tích dựa trên lý thuyết về mô hình mạch từ để đưa ra thông số kích thước CKBN, nhằm xây dựng mô hình mô phỏng và phương pháp phần tử hữu hạn qua công cụ Ansys Maxwell thuộc gói Ansys Electronics. Từ đó, đưa ra phân bố từ cảm trên trụ và từ cảm dọc chiều cao dây quấn, và xác định giá trị điện cảm ứng với các trường hợp phân chia số lượng khe hở khác nhau thông qua năng lượng. Khi không phân chia khe hở, điện cảm nhận được có giá trị lớn do điện cảm tản lớn, giảm lượng CSPK tiêu thụ từ lưới. Cần chia khe hở thành nhiều khe hở nhỏ phân bố dọc trụ để giảm từ trường tản, giảm điện cảm tản và điện cảm tổng của CKBN. Nhóm tác giả đã thực hiện mô hình hóa và mô phỏng cho các trường hợp phân chia khe hở để tính toán các thành phần điện cảm với số lượng khe hở khác nhau, đưa ra mối quan hệ giữa số lượng khe hở với giá trị điện cảm. Qua đó đề xuất số lượng khe hở phù hợp khi tính toán nhằm mục đích đạt được điện cảm hay công suất thiết kế của CKBN.

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.

Tác giả cũng xin được trân trọng cảm ơn Bộ môn Kỹ Thuật Điện, Trường Đại học Quy Nhơn đã tạo điều kiện cho phép sử dụng phần mềm bản quyền ANSYS MAXWELL thuộc gói ANSYS Electronics Desktop V19. R1.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] G. Deb, "Ferranti Effect in Transmission Line," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 2, no. 4, pp. 447-451, August 2012.
- [2] A. D. S. Sri, "Depiction and Compensation of Ferranti Effect in Transmission Line," *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, ISSN: 2321-9653, vol. 6, no. III, pp. 1522-1526, March 2018.
- [3] Z. Gajić, B. Hillström, and F. Mekić, "HV Shunt Reactor Secrets for Protection Engineers," *Proceedings of the 30th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, October 2003.
- [4] A. Balakrishnan, W. T. Joines, and T. G. Wilson, "Air-gap reluctance and inductance calculations for magnetic circuits using a Schwarz-Christoffel transformation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, pp. 654-663, 1997.
- [5] E. Nashawati, N. Fischer, B. Le, and D. Taylor, "Impacts of Shunt Reactors on Transmission Line Protection," *Proceedings of the 38th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, October 2011, pp. 1-16.
- [6] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08-095135-5, 2013.
- [7] W. M. Colonel and T. Mclyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, 3th edition, ISBN: 0-8247-5393-3, USA, 2004.
- [8] A. Y. Arabul, E. Kurt, I. Senol, and F. K. Arabul, "An investigation on flux density of three phase distributed Air-Gap 3-5 legged shunt reactor," *IRES-27th ICIET*, Amsterdam, Netherlands, 25 December 2015.
- [9] K. Dawood, "Modeling of Distribution Transformer for Analysis of Core Losses of Different Core Materials Using FEM," 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), Manama, Bahreyn, 2019.
- [10] M. Mu, F. Zheng, Q. Li, and F. C. Lee, "Finite Element Analysis of Inductor Core Loss Under DC Bias Conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 9, pp. 4414-4421, Sept. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2235465.