

Nghiên cứu số lượng và kích thước khe hở trên trụ của cuộn kháng bù ngang dùng trong lưới điện cao áp và siêu cao áp

Phạm Minh Tú, Đặng Quốc Vương, Bùi Đức Hùng*

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

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

Nhận bài: 26/4/2022; Hoàn thiện: 16/5/2022; Chấp nhận đăng: 18/5/2022; Xuất bản: 28/6/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.80.2022.23-30>

TÓM TẮT

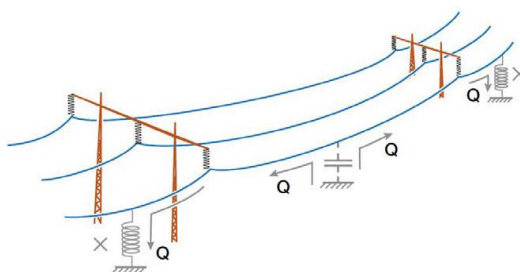
Các khe hở được thiết kế trên trụ của cuộn kháng bù ngang để tăng từ trở mạch từ, tăng năng lượng tích trữ và đạt công suất phản kháng theo yêu cầu. Thể tích của khe hở phụ thuộc vào công suất của cuộn kháng bù ngang. Trong thực tế, máy có công suất càng lớn thì thể tích và chiều dài khe hở càng lớn. Tuy nhiên, từ trường tản xung quanh khe hở xuất hiện ảnh hưởng trực tiếp đến các thông số điện cảm, điều này sẽ ảnh hưởng đến công suất phản kháng của cuộn kháng hấp thụ từ lưới điện. Đối với khe hở có chiều dài lớn, từ thông tản xung quanh khe hở sẽ có bán kính lớn và sẽ móc vòng vào cuộn dây, dẫn đến giá trị điện cảm tổng lớn. Do đó, việc chia khe hở có chiều dài lớn thành các khe hở nhỏ hơn phân bố trên trụ sẽ giảm được giá trị điện cảm tổng. Số lượng khe hở cần chia nhỏ phụ thuộc vào công suất của cuộn kháng và điện áp lưới điện. Trong bài báo này, nhóm tác giả kết hợp giữa phương pháp giải tích dựa trên lý thuyết về mô hình mạch từ để xác định các thông số chính của cuộn kháng, sau đó áp dụng phương pháp phân tử hữu hạn để xác định số lượng và kích thước khe hở phù hợp trên trụ của cuộn kháng bù ngang.

Từ khóa: Cuộn kháng bù ngang; Phương pháp phân tử hữu hạn; Điện cảm; Số lượng khe hở; Kích thước khe hở.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong thực tế, các hệ thống truyền tải điện cao áp và siêu cao áp do có chiều dài đường dây lớn, nên điện dung giữa dây dẫn với đất sinh ra công suất phản kháng rất lớn. Thông thường, ở chế độ vận hành vừa và đầy tải, lượng công suất phản kháng (CSPK) được tiêu thụ bởi các phụ tải điện cảm và điện cảm đường dây. Tuy nhiên, khi vận hành không tải hoặc tải nhỏ, trên đường dây sẽ xuất hiện hiện tượng tăng điện áp trên dọc tuyến đường dây, gây ra quá áp tại các thiết bị nổi trên đó, đặc biệt là các thiết bị cuối đường dây [1–3]. Để ổn định điện áp hệ thống ở mức quy định, cuộn kháng bù ngang (CKBN) được thiết kế để hấp thụ lượng CSPK dư thừa được sinh ra bởi dung dẫn đường dây [4–7]. Trong các nghiên cứu gần đây [8–12], kết quả đạt được đã chứng minh rằng, số lượng khe hở trên trụ sẽ ảnh hưởng đến từ trường tản xung quanh khe hở. Điều này sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến các thông số điện cảm của CKBN. Với khe hở trên trụ có chiều dài lớn, thành phần từ thông tản xung quanh khe hở sẽ lớn và móc vòng và các vòng dây của cuộn dây. Điều này sẽ làm cho từ dẫn tản lớn, điện cảm tản lớn, dẫn đến điện cảm tổng lớn. Do đó, để khắc phục được nhược điểm trên, việc chia khe hở có chiều dài lớn thành các khe hở nhỏ hơn để giảm bán kính từ trường tản xung quanh khe hở, giảm từ dẫn tản và điện cảm tản để đạt công suất phản kháng theo yêu cầu sẽ được nghiên cứu trong nội dung của bài báo này.

Tuy nhiên, số lượng khe hở quá nhiều sẽ giảm tính bền vững và tăng chi phí trong chế tạo. Do vậy, việc xác định số lượng khe hở và chiều dài khe hở phù hợp là vấn đề mang tính thời sự mà



Hình 1. Công suất phản kháng trên đường dây [4].

các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước rất quan tâm, đặc biệt là các Công ty chế tạo Máy điện hiện nay.

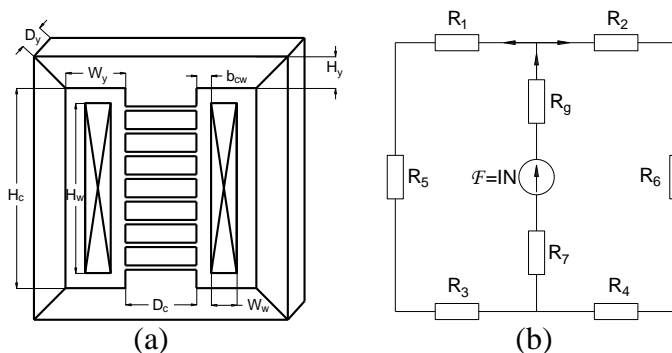
Tiếp tục phát triển từ các nghiên cứu trước đó [13–15], trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã kết hợp hai phương pháp: phương pháp tính toán giải tích dựa trên lý thuyết về mô hình mạch từ và phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) để đưa ra thông số kích thước của các CKBN có công suất khác nhau, và xác định các thành phần điện cảm thông qua năng lượng. Trên cơ sở đó, bài báo sẽ đề xuất số lượng khe hở và dải lựa chọn chiều dài khe hở phù hợp. Các kết quả đạt được của bài báo, sẽ khuyến cáo và giúp các nhà nghiên cứu, thiết kế và các hãng chế tạo có cơ sở lựa chọn tra cứu khi thiết kế chế tạo CKBN.

2. BÀI TOÁN NGHIÊN CỨU

Trong phần này, thông qua phương pháp giải tích và phương pháp PTHH, các thông số điện cảm của các CKBN một pha với công suất khác nhau sử dụng trên lưới điện cao áp 110 kV, 220 kV và siêu cao áp 500 kV được xác định. Trên cơ sở đó, bài báo thực hiện nghiên cứu xác định số lượng và chiều dài khe hở trên trụ của CKBN. Trong phạm vi của bài báo, nhóm tác giả đề xuất nghiên cứu mô hình CKBN một pha.

2.1. Mô hình giải tích

Thông số kích thước cơ bản của CKBN một pha như mô tả trên hình 2a. Thể tích của phần khe hở cần thêm vào trên trụ phụ thuộc vào các thông số chính của cuộn kháng: CSPK, từ cảm mạch từ, tần số lưới điện. Việc xác định thể tích khe hở không khí được thực hiện thông qua các phương trình dựa trên mô hình mạch từ. Do tính đối xứng của mạch từ, nên từ trở từng phần gông trên (R_1, R_2), gông dưới (R_3, R_4), phần mạch từ hai bên (R_5, R_6) và từ trở phần trụ R_7 được xác định theo phương trình sau:



Hình 2. (a) Thông số kích thước CKBN - (b) Mô hình mạch từ.

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

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

Trong đó: μ là độ từ thẩm của vật liệu sắt từ, l_g là tổng chiều dài khe hở trên trụ, W_y, D_c, H_y, D_y lần lượt là các thông số kích thước của CKBN như được mô tả trên hình 2a.

Từ trở tương đương phần sắt từ xác định theo phương trình:

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

Từ trở phần khe hở trên trụ tính theo phương trình dưới đây:

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

Bằng cách so sánh phương trình (3) và (4), ta nhận thấy, từ trở R_c của mạch từ bé hơn rất

nhiều so với từ trở của khe hở R_g . Do đó, khi tính toán kích thước sơ bộ CKBN, từ trở của mạch từ R_c có thể được bỏ qua. Từ quan hệ giữa sức từ động với từ thông và từ trở, quan hệ dòng điện với thông số khe hở trên trụ được xác định:

$$I = \frac{\Phi \cdot R_g}{N} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \frac{B_m \cdot l_g}{\mu_0 \cdot N} \quad (5)$$

Thể tích của khe hở cần thêm trên trụ của CKBN [13]:

$$V_g = A_g \cdot l_g = \frac{Q}{\frac{\pi}{\mu_0} \cdot f \cdot B_m^2} \quad (6)$$

Trong đó: f , N , 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 cảm cực đại, tiết diện khe hở, chiều dài khe hở, từ trở vùng khe hở và độ từ thẩm của không khí.

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 quan trọng, ảnh hưởng đến tổng thể CKBN. Điện cảm dây quấn được xác định thông qua CSPK và điện áp hiệu dụng theo các phương trình dưới đây:

$$L = \frac{U^2}{\omega \cdot Q}; L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \left(\frac{A_g}{l_g} \right) = N^2 \cdot P_g \quad (7a-b)$$

Trong đó: P_g là từ dẫn phần khe hở trên trụ.

Từ phương trình (7b), số vòng dây quấn có thể xác định theo biểu thức:

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

Mặt khác, ta nhận thấy rằng, xung quanh khe hở sẽ xuất hiện thành phần từ thông tản tại các vùng lân cận bao quanh các khe hở làm tăng từ dẫn phần khe hở. Do đó, dọc trên trụ, cần chia nhỏ khe hở lớn thành “g” khe hở nhỏ hơn. Từ dẫn khu vực xung quanh lân cận từng khe hở được xác định theo [16]. Đối với trụ có tiết diện tròn, từ dẫn được xác định:

$$P_{1f} = \mu_0 \cdot \frac{D}{2} \left(1 + \ln \frac{\pi h_{1c}}{2l_{1g}} \right) \quad (9)$$

Trong đó: $l_{1g} = l_g/g$ là chiều dài mỗi khe hở trên trụ.

Từ dẫn của khe hở khi kể đến ảnh hưởng của từ thông tản xung quanh khe hở:

$$P_{gf} = \frac{P_{1g} + P_{1f}}{g} \quad (10)$$

Phương trình quan hệ giữa điện cảm và số vòng dây khi xét đến từ dẫn mạch từ và từ dẫn khe hở có kể đến ảnh hưởng của từ thông tản được xác định:

$$L = N^2 (P_c + P_{gf}) \quad (11)$$

2.2. Mô hình bài toán từ động

Trong phần này, mô hình toán học của bài toán từ động được phát triển trên cơ sở của hệ phương trình Maxwell với công thức từ thể véc tơ, kết hợp với các luật trạng thái và điều kiện biên. Hệ phương trình Maxwell được viết trong miền tần số trong không gian Euclidean \mathbb{R}^3 được viết như sau:

$$\text{curl } \mathbf{H} = \mathbf{J}_s, \text{curl } \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B}, \text{div } \mathbf{B} = 0. \quad (11a-b-c)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (12a-b)$$

Trong đó: \mathbf{H} là cường độ từ trường (A/m), \mathbf{B} là mật độ từ thông (T), \mathbf{E} là cường độ điện trường (V/m), \mathbf{J}_s là mật độ dòng điện (A/m²), μ là độ từ thẩm và σ là độ dẫn điện (S/m).

Điều kiện biên của bài toán nghiên cứu được xác định như sau:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H}|_{\Gamma_h} = \mathbf{j}_f, \mathbf{n} \cdot \mathbf{B}|_{\Gamma_e} = \mathbf{b}_f, \quad (13a-b)$$

Trong đó: \mathbf{n} là véc tơ pháp tuyến hướng ra ngoài miền nghiên cứu (Ω), với $\Omega = \Omega_c \cup \Omega_c^c$. Trong đó, miền Ω_c và Ω_c^c lần lượt là các miền dẫn và không dẫn trong vùng nghiên cứu. Các phương trình (11a) và (11b) được giải với điều kiện biên có kể đến thành phần tiếp tuyến của cường độ từ trường \mathbf{H} trong phương trình (13a) và thành phần pháp tuyến của mật độ từ cảm \mathbf{B} trong phương trình (13b).

Các thành phần cường độ từ trường, mật độ từ thông được xác định từ việc giải hệ phương trình Maxwell và các điều kiện biên như trên. Việc xác định mật độ năng lượng và giá trị điện cảm được xác định thông qua bước post-processing, cụ thể như sau:

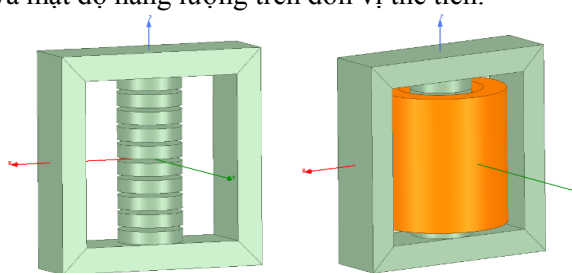
$$w_m = \frac{1}{2} \mathbf{H} \cdot \mathbf{B}; W_m = \iiint w_m dv; L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2} \quad (14a-b-c)$$

Trong đó: W_m , w_m lần lượt là năng lượng và mật độ năng lượng trên đơn vị thể tích.

2.3. Các thông số chính

Trên cơ sở tính toán từ phương pháp giải tích và phương pháp PTHH, mô hình CKBN được mô tả trên hình 3.

Các thông số kích thước của các CKBN một pha có công suất 128/3 MVar dùng trong lưới điện cao áp 110 kV, 220 kV và siêu cao áp 500 kV được đưa ra như trong bảng 1.



Hình 3. Mô hình CKBN một pha.

Bảng 1. Thông số chính CKBN.

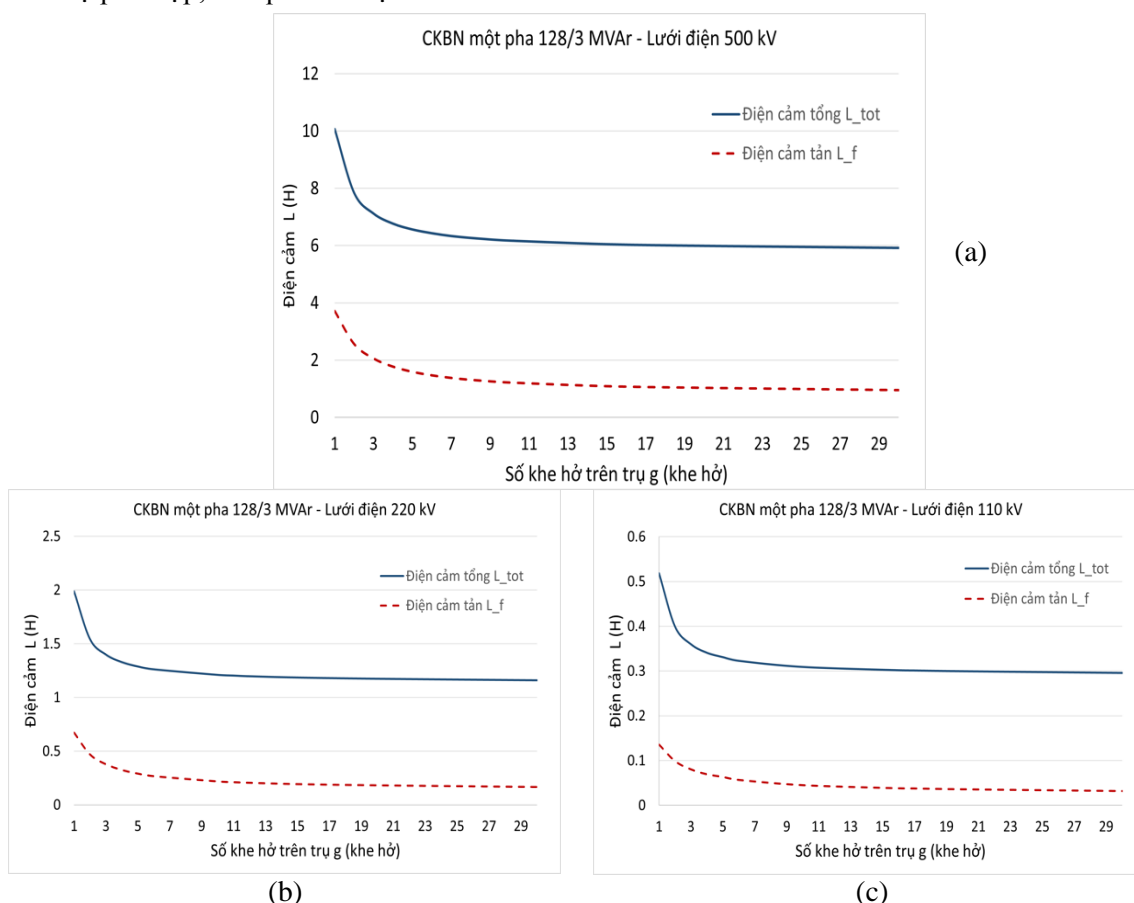
Thông số	Ký hiệu	Giá trị		
Công suất phản kháng	Q (MVar)	128/3		
Điện áp định mức	U (kV)	$110/\sqrt{3}$	$220/\sqrt{3}$	$500/\sqrt{3}$
Dòng điện định mức	I (A)	671,83	335,91	147,80
Điện cảm tổng	L (H)	0,3009	1,2036	6,2170
Đường kính trụ	D_c (mm)	737	737	737
Chiều cao trụ	H_c (mm)	1849	1929	1929
Tổng chiều dài khe hở trên trụ	l_g (mm)	426	426	426
Số vòng dây quấn	N (vòng)	428	825	1841

3. XÁC ĐỊNH SỐ LƯỢNG VÀ KÍCH THƯỚC KHE HỖ TRÊN TRỤ

Với các CKBN có công suất, điện áp và các thông số kích thước đã xác định được, nhóm tác giả thực hiện nghiên cứu với từng trường hợp có số lượng khe hở khác nhau. Xác định các

thành phần điện cảm thông qua năng lượng, đưa ra mối quan hệ giữa điện cảm tổng và điện cảm tản theo số lượng khe hở trên trụ. Giá trị điện cảm quyết định dòng điện và CSPK nhận từ lưới điện của CKBN. Kết quả quan hệ giữa điện cảm tản và điện cảm tổng theo số lượng khe hở của CKBN có công suất 128/3 MVar, trên lưới điện áp 110kV, 220 kV và 500 kV tương ứng trên hình 4.

Từ đặc tính quan hệ trên hình 4a giữa giá trị điện cảm tản và điện cảm tổng với số lượng khe hở phân bố trên trụ của CKBN 128/3 MVar dùng trên lưới 500 kV 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 9 khe sẽ đạt được giá trị điện cảm theo yêu cầu. Cùng công suất này, CKBN dùng trên lưới điện 220 kV cần chia thành 11 khe hở còn CKBN dùng trên lưới điện 110 kV cần chia thành 17 khe hở trên trụ. Nhóm tác giả thực hiện nghiên cứu tương tự với các CKBN một pha có công suất khác nhau dùng trong lưới điện cao áp và siêu cao áp để xác định số lượng khe hở hợp lý. Từ đặc tính quan hệ giữa điện cảm tản hay điện cảm tổng ứng với các máy có công suất và điện áp khác nhau đưa ra cơ sở lựa chọn số khe hở cần chia trên trụ phù hợp, kết quả thể hiện trên hình 5.



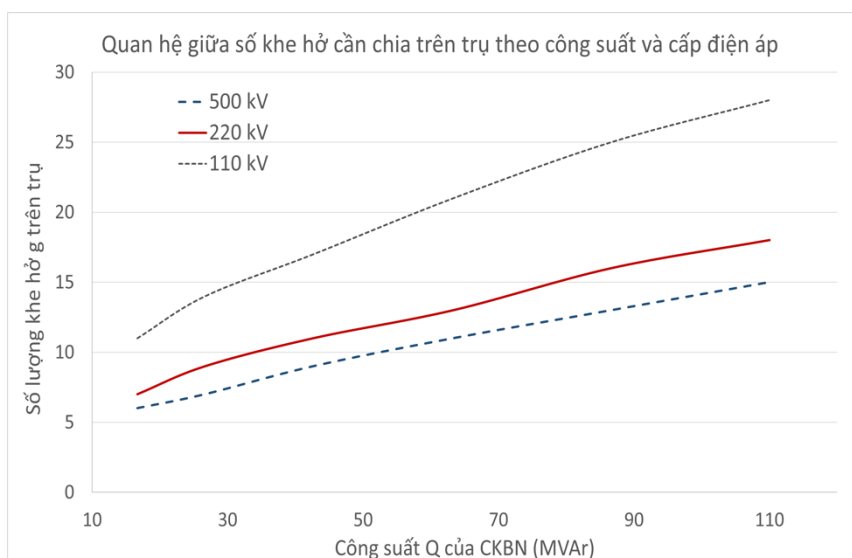
Hình 4. Quan hệ giữa điện cảm với số khe của CKBN 128/3 MVar:

(a) Lưới 500 kV; (b) Lưới 220 kV; (c) Lưới 110 kV.

Kết quả nghiên cứu chỉ ra trên hình 5 cho thấy cùng một cấp điện áp, do khoảng cách giữa

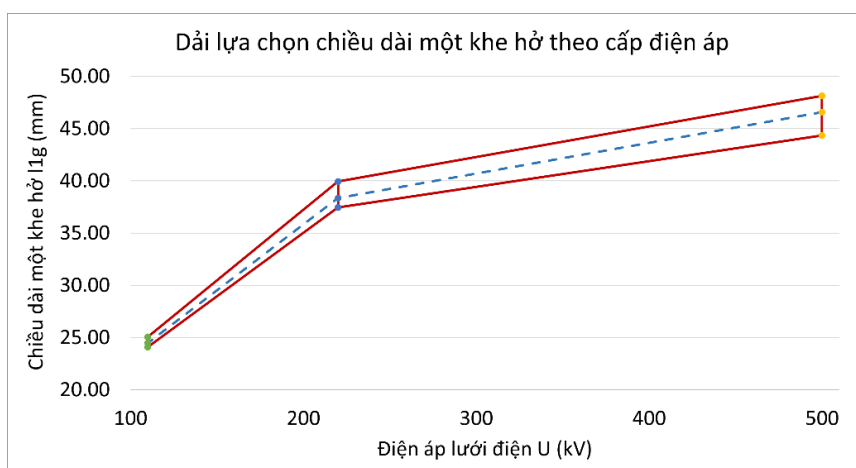
dây quấn và trụ như nhau, được xác định theo khoảng cách cách điện tối thiểu nên máy có công suất càng lớn thì số lượng khe hở cần chia nhỏ trên trụ càng nhiều. Tại cùng một giá trị công suất, CKBN có điện áp nhỏ hơn sẽ có khoảng cách giữa dây quấn và trụ ngắn hơn, do đó cần chia nhỏ thành nhiều khe hở hơn. Từ kết quả đạt được, thực hiện thiết lập đa thức quan hệ giữa số lượng khe hở cần chia trên trụ tại các dải công suất khác nhau từ 50/3 MVar đến 330/3 MVar trong lưới điện cao áp 110 kV, 220 kV và siêu cao áp 500 kV, kết quả được lấy theo giá trị nguyên từ phương trình dưới đây:

$$g = f(U, Q) = -(7,331 \cdot 10^{-9}U^2 - 5,626 \cdot 10^{-6}U + 12,17 \cdot 10^{-4})Q^2 + (2,261 \cdot 10^{-6}U^2 - 17,39 \cdot 10^{-4}U + 0,4305) \cdot Q + 4,528 \cdot 10^{-5}U^2 - 35,46 \cdot 10^{-3}U + 10,33 \quad (15)$$



Hình 5. Số lượng khe hở trên trụ theo công suất và cấp điện áp.

Từ chiều dài tổng của khe hở và số khe hở cần chia nhỏ với các dải công suất và các cấp điện áp cao áp và siêu cao áp, đưa ra khoảng lựa chọn chiều dài mỗi khe hở ứng với các cấp điện áp như trên hình 6.



Hình 6. Dải lựa chọn chiều dài một khe hở theo cấp điện áp lưới điện.

Kết quả nghiên cứu này cho ra bức tranh quan hệ giữa số lượng khe hở trên trụ theo công suất và điện áp lưới điện cùng với dải lựa chọn chiều dài một khe hở theo cấp điện áp lưới điện, từ đó

giúp các nhà thiết kế chế tạo có cơ sở lựa chọn được số lượng khe hở phù hợp khi thiết kế chế tạo CKBN.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, thông qua phương pháp tính toán giải tích dựa trên lý thuyết về mô hình mạch từ và phương pháp phần tử hữu hạn, nhóm tác giả đưa ra thông số kích thước của các CKBN có công suất khác nhau dùng trong lưới điện cao áp và siêu cao áp. Xác định các thành phần điện cảm tản và điện cảm tổng thông qua năng lượng, từ đó đưa ra đặc tính và đa thức quan hệ giữa số lượng khe hở phù hợp cần chia nhỏ trên trụ theo công suất tại các cấp điện áp khác nhau. Tiếp theo, đưa ra dải lựa chọn chiều dài mỗi khe hở theo cấp điện áp lưới điện. Kết quả nghiên cứu giúp các nhà thiết kế và các hãng chế tạo có cơ sở lựa chọn được số lượng khe hở và chiều dài mỗi khe hở phù hợp khi thiết kế chế tạo CKBN.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu 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. 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

- [1]. N. Petcharakas, C. Yu, and C. Panprommin, "A study of Ferranti and energization overvoltages case of 500 kV line in Thailand," in 1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, vol. 1, pp. 291–294 vol.1. doi: 10.1049/cp:19990564, (1999).
- [2]. G. Chavan, S. Acharya, S. Bhattacharya, D. Das, and H. Inam, "Application of static synchronous series compensators in mitigating Ferranti effect," in 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741380, (2016).
- [3]. Reshma Tarannum and Rashmi Singh, "Reducing Ferranti Effect in Transmission Line using Dynamic Voltage Restorer," International Conference on Science and Engineering for Sustainable Development (ICSESD-2017), pp. 45–50, (2017).
- [4]. Zahra Norouzian, "Shunt Reactors: Optimizing Transmission Voltage System," ABB Transformers and Reactors. ABB Transformers and Reactors, (2016).
- [5]. Jinhao Hu, Pei Yuan, Xin Li, and Yun Liu, "Analysis on the Necessity of High-Voltage Shunt Reactors in Power Grid," 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), 2020, pp. 83-87, doi: 10.1109/ICPES51309.2020.9349640., (2020).
- [6]. C. S. Indufiar, "Required Shunt Compensation for an EHV Transmission Line Sending-end System," in IEEE Power Engineering Review, vol. 19, no. 9, pp. 61-62, doi: 10.1109/MPER.1999.1236746, (1999).
- [7]. J. Hu, P. Yuan, X. Li, and Y. Liu, "Analysis on the Necessity of High-Voltage Shunt Reactors in Power Grid; Analysis on the Necessity of High-Voltage Shunt Reactors in Power Grid," 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), doi: 10.1109/ICPES51309.2020.9349640/20/, (2020).
- [8]. R. Jez, "Influence of the Distributed Air Gap on the Parameters of an Industrial Inductor," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 11, doi: 10.1109/TMAG.2017.2699120, (2017).
- [9]. M. Christoffel, "The Design and Testing of EHV Shunt Reactors," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, no. 6, pp. 684–692, doi: 10.1109/TPAS.1967.291879, (1967).
- [10]. A. Ayachit and M. K. Kazimierczuk, "Sensitivity of effective relative permeability for gapped magnetic cores with fringing effect," IET Circuits, Devices and Systems, vol. 11, no. 3, pp. 209–215, doi: 10.1049/iet-cds.2016.0410, (2017).
- [11]. L. M. Escribano, R. Prieto, J. A. Oliver, J. A. Cobos, and J. Uceda, "New modeling strategy for the fringing energy in magnetic components with air gap," APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.02CH37335), vol. 1, pp. 144–150, doi: 10.1109/APEC.2002.989240, (2002).
- [12]. V. Valchev, A. van den Bossche, and T. Filchev, "2-D FEM Tuned Analytical Approximation for Fringing Permeances," Scientific Computing in Electrical Engineering. Mathematics in Industry, vol. 4, doi: doi.org/10.1007/978-3-642-55872-6_44, (2004).

- [13]. T. P. Minh et al., "Finite Element Modeling of Shunt Reactors Used in High Voltage Power Systems," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 11, no. 4, pp. 7411–7416, doi: 10.48084/etasr.4271, (2021).
- [14]. Phạm Minh Tú, Bùi Đức Hùng, Trần Văn Thịnh, Đặng Quốc Vương, Phùng Anh Tuấn, and Đặng Chí Dũng, "Nghiên cứu ảnh hưởng của số lượng khe hở đến giá trị điện cảm của cuộn kháng bù ngang," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Thái Nguyên*, vol. 226, no. 11, pp. 268–276, (2021).
- [15]. Phạm Minh Tú, Bùi Đức Hùng, Trần Văn Thịnh, Đặng Chí Dũng, and Đặng Quốc Vương, "Investigating Effects of Distance Air-Gaps on Iron-Core Shunt Reactors," in *Advances in Engineering Research and Application*, pp. 545–557, (2022).
- [16]. A. Balakrishnan, W. T. Joines, and T. G. Wilson, "Air-Gap Reluctance and Inductance Calculations for Magnetic Circuits Using a Schwarz-Christoffel Transformation," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, doi: 10.1109/63.602560., vol. 12, no. 4, pp. 654–663, (1997).

ABSTRACT

Study of number and size of air-gaps in core of shunt reactors in transmission lines of high and super high voltages

The air-gaps are designed on the core of shunt reactors to increase the reluctance of the magnetic circuit, to increase the stored energy and to obtain the required reactive power. The volume of the air-gaps depends on the capacity of the shunt reactors. In fact, the more reactive power the shunt reactor has, the more volume and length of the air-gap the shunt reactor needs. However, the leakage flux appearing around the air-gap will directly affect to the inductance parameters and the reactive power of the shunt reactor. For a large air-gap, the leakage flux appearing around the air-gap will have a large radius and will loop into the winding, resulting in a large total inductance. Therefore, dividing a large length air-gap into smaller air-gaps distributed on the core will reduce the total inductance value. The number of the air-gaps to be splitted depends on the capacity of the shunt reactor and the mains voltage. In this paper, the authors combine the analytical method based on the theory of magnetic circuit model to determine the main parameters of the shunt reactor, then the finite element method is used to determine the number of the air-gaps and the appropriate air-gaps size on the core of the shunt reactors.

Keywords: Shunt reactors; Air-gaps; Inductance; Finite element method; The number of the air-gaps; The size of the air-gaps.