

ỨNG DỤNG MÔ PHỎNG SỐ PHÂN TÍCH LỰC TỪ TÁC ĐỘNG LÊN HỒ QUANG TRONG BỘ TIẾP ĐIỂM CHÂN KHÔNG

Đỗ Văn Vang^{1,*}, Nguyễn Văn Trung¹

Vũ Tài Tú²

¹Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

²Viện Vũ khí, Bộ Công nghiệp Quốc phòng

*Email: Vangdkh1@gmail.com

TÓM TẮT

Hiện nay tiếp điểm chân không được lắp đặt bên trong các khởi động từ và sử dụng rộng rãi trong các mô hình lò có khí bụi nổ. Để đảm bảo an toàn điện giật và phòng chống nổ mìn, các cơ cấu đóng cắt thường được đặt trong các buồng dập hồ quang chân không để tránh phát sinh hồ quang trong quá trình đóng cắt điện. Bộ ngắt mạch chân không có chức năng ngắt dòng điện khi dòng điện lớn xuất hiện do ngắn mạch hoặc do các chế độ làm việc không bình thường khác trong mạng điện gây ra. Khi bộ ngắt mạch chân không ngắt dòng điện, hơi kim loại được phóng ra từ các tiếp điểm và trở thành plasma, tạo ra hồ quang. Sự co thắt hồ quang có thể làm tăng thông lượng nhiệt và nhiệt độ cục bộ trên các điện cực và dẫn đến nóng chảy bề mặt, có ảnh hưởng không mong muốn đến tuổi thọ của thiết bị. Để khắc phục ảnh hưởng này, từ trường dọc trục được áp dụng nhằm khuếch tán hồ quang đều trên bề mặt tiếp điểm, giúp giảm mật độ nhiệt và hạn chế hiện tượng hàn dính.

Trong bài báo này ứng dụng phần mềm JMAG mô phỏng lực điện từ tác dụng lên hồ quang dạng cột và mật độ dòng điện trong không gian buồng dập hồ quang. Hồ quang chân không được mô hình hoá bằng phương pháp ghép nối tuần tự của hai trường khác nhau.

Từ khóa: Buồng dập hồ quang, JMAG, Từ trường dọc trục (AMF).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cụm tiếp điểm chân không (Vacuum Interrupter) là thành phần trung tâm trong khởi động từ phòng nổ, chịu trách nhiệm thực hiện thao tác đóng – ngắt mạch động lực của động cơ trong môi trường hầm lò. Khi ngắt mạch, điện cực động tách ra tạo khe hở, điện trường lớn sinh ra hồ quang kim loại. Trong quá trình này, lõi tiếp xúc đốt cháy hồ quang điện giữa hai điện cực phải được dập tắt càng nhanh càng tốt. Dưới tác dụng của từ trường dọc trục (Axial Magnetic Field – AMF) hồ quang bị kéo dài và di chuyển trên bề mặt điện cực, giúp phân bố nhiệt đều, tránh cháy cục bộ [1]. Hồ quang trong môi trường chân không có thể được chia thành nhiều giai đoạn nối tiếp nhau, phản ánh sự tương tác phức tạp giữa hiện tượng phát xạ điện tử, động học plasma kim loại, quá trình khuếch tán và phục hồi điện môi. Do đó quá trình dập tắt hồ quang phụ thuộc vào nhiều yếu tố như các thông số hình học, vật liệu, điều kiện

chân không và đặc tính nhiệt bề mặt [2], [3]. Mục tiêu chính của nghiên cứu này là ứng dụng mô phỏng số để phân tích các hiện tượng co thắt hồ quang chân không với từ trường dọc trục (AMF).

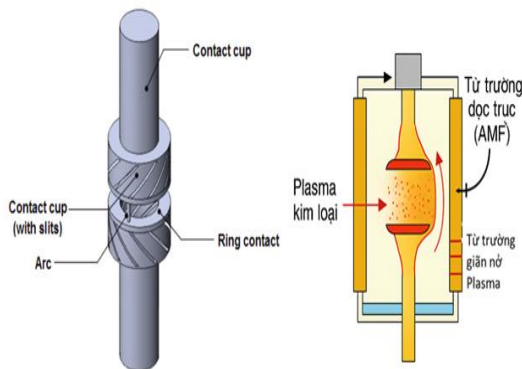
Để phân tích các hiện tượng co thắt hồ quang cho các điện cực dọc trục, tác giả đã sử dụng hai loại tiếp điểm dọc trục khác nhau. Như đã biết, bộ ngắt mạch chân không có chức năng ngắt dòng điện lớn khi có ngắn mạch, áp suất tiếp xúc được đặt vào các tiếp điểm trong bộ ngắt mạch chân không vì nó là cần thiết để các tiếp điểm của bộ ngắt mạch chân không phải tiếp xúc và mạch điện phải được đóng khi dòng điện bình thường đang chạy, không giống như dòng điện lớn từ ngắn mạch. Lực đẩy điện từ được tạo ra bởi dòng điện chạy trong các tiếp điểm của bộ ngắt mạch chân không khi dòng điện chạy qua bộ ngắt mạch chân không. Do đó, cần đánh giá lực đẩy điện từ và đặt áp suất tiếp xúc cao hơn lực đẩy điện từ để duy trì trạng thái

đóng trong dòng điện bình thường.

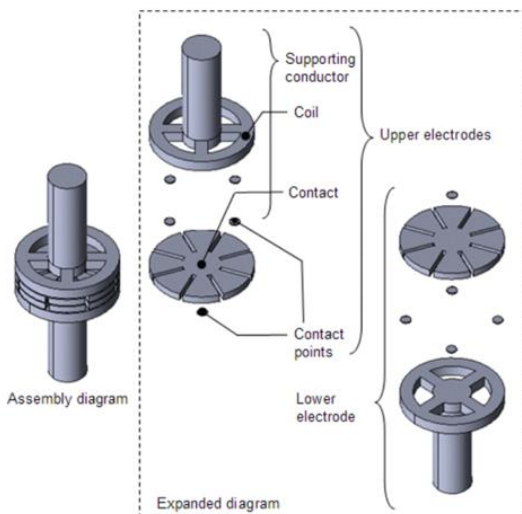
2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình mô phỏng của bộ ngắt chân không

Mô hình tiếp điểm chân không gồm: Tiếp điểm tĩnh và động; Ống xếp kim loại; Thân buồng; Lớp phủ điện cực. Điện cực động và tĩnh: làm từ hợp kim chịu hồ quang (CuCr30% hoặc CuW55%), có hình dạng dạng đĩa hoặc côn xoắn để tạo từ trường phân bố đều, tránh tập trung hồ quang. Ống xếp kim loại: cho phép điện cực động di chuyển dọc trục khi đóng cắt mà vẫn đảm bảo độ kín chân không tuyệt đối. Thân buồng: là ống gốm chịu chân không, có độ bền cơ học cao (>15 kV/mm), được hàn kín với các nắp kim loại ở hai đầu. Lớp phủ điện cực: mạ bạc hoặc hợp kim chống hàn dính, giúp làm giảm điện trở tiếp xúc và tăng khả năng phục hồi điện môi.



Hình 1. Mô hình hình học của bộ ngắt chân không đơn điểm



Hình 2. Mô hình hình học của bộ ngắt chân không đa điểm

Mô hình mô phỏng: chọn cấu trúc đối xứng trục, trục đối xứng là trục Z, mô hình được thực hiện trong mặt phẳng XZ, với tất cả các đối tượng nằm trong phần X > 0 của mặt phẳng, các thông số hình học tính bằng milimet. Cột hồ quang trong mô hình được giả thiết có dạng hình trụ, với độ dẫn nhiệt tương ứng với plasma ở nhiệt độ khoảng 15000 K tại bề mặt cathode và vận tốc trung bình của dòng plasma khoảng 400 m/s.

2.2. Sử dụng phần mềm JMAG mô phỏng lực điện từ

Chương trình JMAG cung cấp hai loại phương pháp mô hình cấu trúc rắn từ trên xuống dưới hoặc từ dưới lên trên. Để mô phỏng lực điện từ tác dụng lên cột hồ quang, tác giả tập trung vào phân tích sự phân bố lực Lorentz và mật độ dòng điện trong không gian buồng dập hồ quang.

Lực Lorentz F tác dụng lên plasma của hồ quang được xác định theo [4]:

$$F = j \cdot B \tag{1.1}$$

Trong đó:

j - là mật độ dòng điện (A/m²); B - là mật độ cảm ứng từ (T), được sinh ra bởi từ trường dọc trục (AMF). Mối quan hệ giữa cảm ứng từ B và vector từ thế A được biểu diễn bởi:

$$B = \nabla \cdot A \tag{1.2}$$

Hiệu ứng nhiệt Joule sinh ra trong plasma được xác định bởi:

$$Q = j \cdot E \tag{1.3}$$

Trong đó:

Q - là mật độ công suất nhiệt (W/m³), công suất nhiệt phản ánh mức năng lượng tỏa ra trong quá trình dẫn dòng hồ quang.

Vận tốc của plasma v trong cột hồ quang chịu ảnh hưởng trực tiếp của lực Lorentz và được mô tả theo phương trình cân bằng động lượng:

$$\rho_p \frac{\partial v}{\partial t} + \rho_p (v \cdot \nabla)v = -\nabla + j \cdot B \tag{1.4}$$

Trong đó:

ρ_p - là mật độ khối lượng của plasma (kg/m^3); p - là áp suất trong cột hồ quang (Pa).

Quá trình truyền nhiệt T trong plasma được xác định theo phương trình cân bằng năng lượng:

$$\rho_p c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_p c_p \cdot v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + Q \quad (1.5)$$

Trong đó:

c_p - là nhiệt dung riêng của plasma (J/kg.K); k - là hệ số dẫn nhiệt (W/m.K); Q - nguồn nhiệt do hiệu ứng Joule sinh ra. Phương trình này mô phỏng phân bố nhiệt trong toàn vùng hồ quang, có thể đánh giá cụ thể hiện tượng co thắt hoặc phát tán hồ quang dưới tác dụng của từ trường dọc trục AMF.

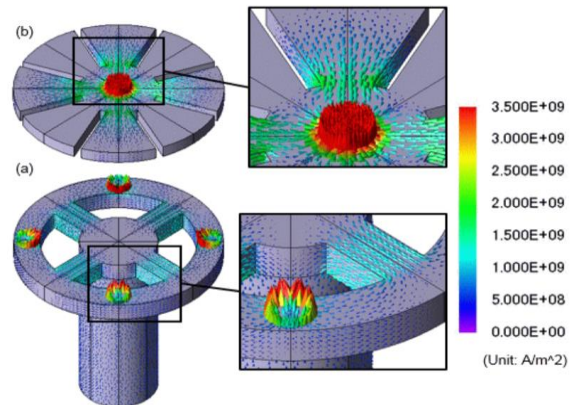
2.3. Kết quả mô phỏng

Chương trình JMAG cung cấp hai phương pháp mô hình cấu trúc rắn từ trên xuống dưới hoặc từ dưới lên trên. Khi thiết lập mô hình rắn từ trên xuống dưới, người ta dùng xác định đơn vị hình ảnh cấp cao nhất cho mô hình. Chương trình sẽ tự động xác định bề mặt và đường thẳng tương đối tách rời từ điểm quan trọng. Người dùng sử dụng các đơn vị hình ảnh độ phân giải cao này để xây dựng các mô hình hình học, chẳng hạn như hình tròn, hình chữ nhật 2 chiều và các khối 3 chiều như hình cầu, hình nón và hình trụ. Dù sử dụng phương pháp xây dựng từ trên xuống dưới hay từ dưới lên trên người dùng đều có thể tạo ra tập dữ liệu thông qua phép tính Boer, từ đó mô phỏng một mô hình vật rắn. Phân bố mật độ dòng điện được thể hiện trong hình 3, 4, 5. Dòng điện đi vào dây dẫn đỡ của điện cực dưới sẽ phân chia trong cuộn dây và truyền đến điểm thông qua các điểm tiếp xúc như minh họa trong hình (a). Sau đó, dòng điện đã đi vào tiếp điểm sẽ bị tập trung tại các điểm tiếp xúc như thể hiện trong hình (b). Khi dòng điện đi vào tiếp điểm của điện cực trên từ các tiếp xúc hẹp, nó có xu hướng lan rộng ra xung quanh như minh họa trong hình 3.

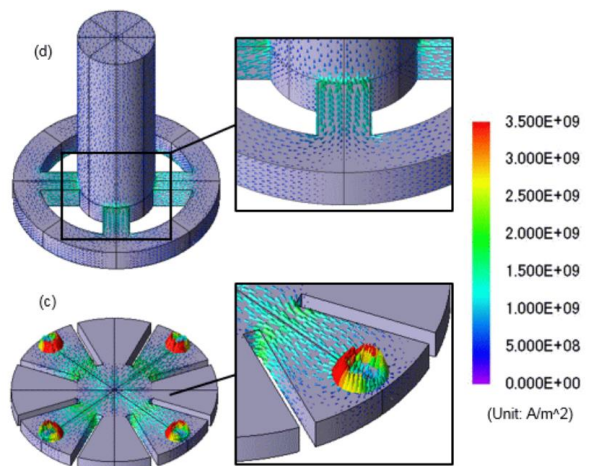
Hình 3 thể hiện các vùng mật độ dòng điện phục vụ cho phân tích điện từ, bao gồm: phần dây dẫn, điện cực, bản tiếp điểm và cột hồ quang. Mô hình sử dụng điều kiện biên, điều

kiện nối đất và điều kiện dòng điện đặt vào được áp dụng lần lượt tại phía thanh tiếp điểm. Điều kiện từ thông song song ($AZ=0$) được áp dụng để ràng buộc tất cả các bậc tự do (DOFs) tại các biên ngoài. Bộ giải phương trình vi phân Jacobi Conjugate Gradient (JCG) đã được sử dụng với tiêu chí hội tụ được thiết lập là 10^{-9} .

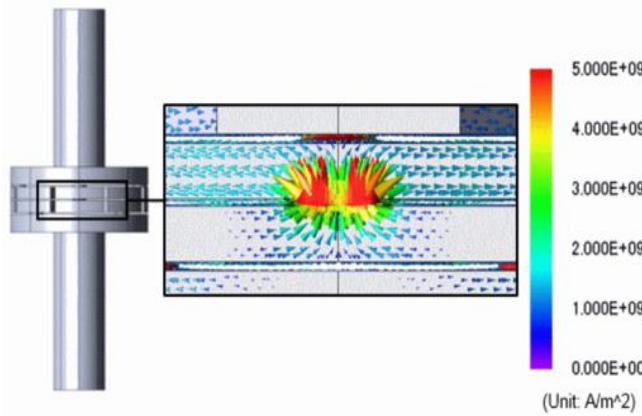
Dòng điện đi vào dây dẫn đỡ của điện cực dưới sẽ phân nhánh trong cuộn dây và truyền đến tiếp điểm thông qua các điểm tiếp xúc như thể hiện trong hình (a). Sau đó, dòng điện đã đi vào tiếp điểm sẽ bị tập trung tại các điểm tiếp xúc như trong hình (b). Khi dòng điện đi vào tiếp điểm của điện cực trên từ các điểm tiếp xúc hẹp, nó có xu hướng lan rộng ra như thể hiện trong hình 5.



Hình 3. Phân bố mật độ dòng điện của bộ tiếp điểm dưới

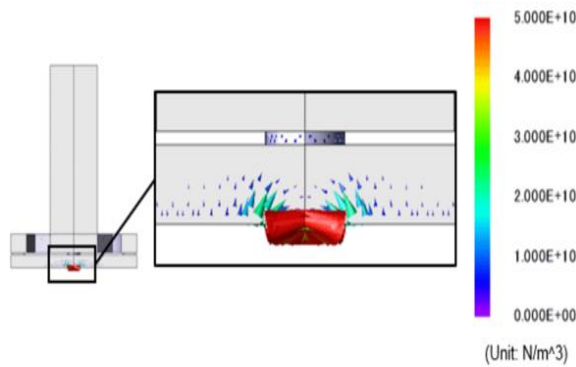


Hình 4. Phân bố mật độ dòng điện của bộ tiếp điểm trên



Hình 5. Phân bố mật độ dòng điện theo hướng Z

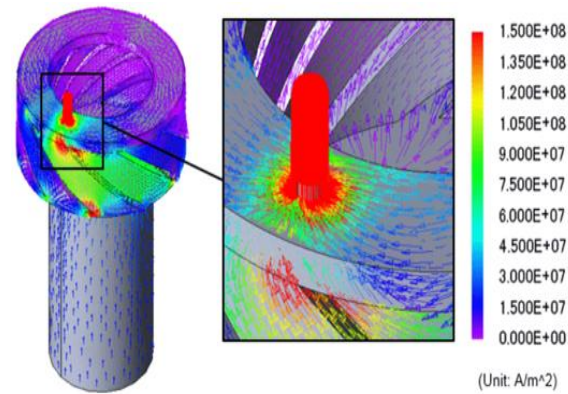
Hình 6 thể hiện sự phân bố mật độ lực Lorentz. Lực đẩy theo phương thẳng đứng được sinh ra trong các tiếp điểm do dòng điện chạy qua như thể hiện trong hình 6. Lực đẩy điện từ tạo ra tại các tiếp điểm có giá trị xấp xỉ 700 N.



Hình 6. Phân bố mật độ lực Lorentz

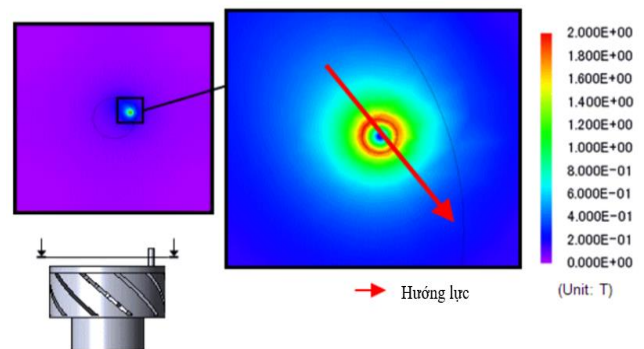
Vùng cột hồ quang chỉ được sử dụng cho phân tích nhiệt động lực học sau khi đã thực hiện phân tích điện từ. Trong mô hình này, cột hồ quang được giả thiết có dạng hình trụ với đường kính bằng đường kính của điện cực và có hệ số dẫn nhiệt không đổi. Lực Lorentz và nhiệt lượng Joule thu được từ bài toán phân tích điện từ trước đó được sử dụng làm các tham số đầu vào cho phân tích dòng nhiệt. Trong vùng cột hồ quang sử dụng 142 phần tử chất lỏng, với tổng số phần tử xấp xỉ 21000 phần tử. Điều kiện tính toán được thiết lập như sau: vận tốc plasma là 400 m/s và nhiệt độ tại bề mặt cực âm là 15000 K, bề mặt nút được coi là biên thoát thụ động, do đó áp suất $p=0$ được áp dụng cho điều kiện biên đầu ra. Biên tự do được định nghĩa là biên tiếp xúc với môi trường chân

không bên ngoài và được xem là cách nhiệt.



Hình 7. Các trường phân bố nhiệt của biến thể

Để nghiên cứu sự co thắt hồ quang trên plasma hồ quang, các kết quả về đặc tính lực Lorentz và phân bố nhiệt độ được mô tả. Ngoài ra, nhóm tác giả đã tiến hành mô phỏng để xác định mối quan hệ để dự đoán giữa lực Lorentz và sự gia nhiệt Joule trên plasma hồ quang.



Hình 8. Sự thay đổi lực

Đặc tính lực Lorentz (thành phần r) được tính toán ở 30 kA cho điện cực AMF dạng cốc như thể hiện trong hình 8. Vùng lực nén tồn tại theo hướng xuyên tâm trên bề mặt cực dương và cực âm do từ trường phương vị và mật độ dòng điện dọc trục. Ngoài ra, vùng lực giãn nở tồn tại theo hướng xuyên tâm trên cả hai bề mặt do mật độ dòng điện theo phương tiếp tuyến và từ trường dọc trục. Trên hình 8, chúng ta thấy rằng có vùng lực nén ở khu vực trung tâm (màu xám) trên cả hai bề mặt trong trường hợp dạng cốc. Lực nén trên bề mặt trung tâm của plasma hồ quang giữa các điện cực tăng dọc theo hướng xuyên tâm. Cũng trên hình 8, đặc tính lực Lorentz (thành phần s) trên cả hai bề mặt ở dòng điện 30 kA đối với loại hình cốc. Lực

Lorentz (thành phần s) tác dụng theo chiều kim đồng hồ lên bề mặt cực âm. Sự quay ngược chiều của lực Lorentz (thành phần s) trên mỗi bề mặt gây ra hiện tượng xoắn trên plasma hồ quang giữa các điện cực, và nó tạo ra lực nén ở bề mặt trung tâm trên plasma hồ quang giữa các điện cực. Từ kết quả này chúng ta có thể dự đoán rằng, trong trường hợp loại hình cốc, sự phân bố nhiệt độ trên bề mặt anode (cực dương) bị thu hẹp ở khu vực trung tâm do lực Lorentz.

3. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Trong bài báo này, hồ quang chân không được mô phỏng bằng phương pháp ghép nối tuần tự hai trường khác nhau, đó là trên lực điện từ. Việc sử dụng điện cực AMF giúp tạo ra từ trường dọc để điều khiển hồ quang giúp nó phân bố đều hơn trên bề mặt tiếp giáp từ đó giảm thiểu sự mài mòn và tăng khả năng ngắt dòng của thiết bị. Sự co thắt hồ quang khi có dòng điện đặt vào được dự đoán dựa trên kết quả đặc tính lực Lorentz và phân bố nhiệt độ

bằng cách sử dụng phần mềm JMAG. Kết quả mô phỏng cho thấy: Vùng lực nén tồn tại bởi từ trường phương vị và mật độ dòng điện dọc trục. Ngoài ra, vùng lực giãn nở tồn tại do mật độ dòng điện phương vị và từ trường dọc trục trên bề mặt cực dương và cực âm; Trong trường hợp loại hình cốc, lực từ tồn tại trên bề mặt trung tâm của plasma hồ quang giữa các điện cực và lực này là do mô men xoắn gây ra bởi lực Lorentz. Chúng ta nhận thấy rằng hiệu suất ngắt dòng điện cao có thể bị hạn chế do sự co thắt hồ quang và sự tăng nhiệt độ tùy thuộc vào mô hình. Có thể kết luận rằng lực Lorentz là yếu tố chính ảnh hưởng đến hiện tượng plasma hồ quang chảy. Việc phân tích hồ quang giúp ích rất lớn cho việc cải tiến và lựa chọn phù hợp vật liệu làm tiếp điểm, tối ưu hoá thiết kế tiếp điểm đảm bảo dòng điện phân bố đều tránh hiện tượng thắt nút cổ chai gây nóng chảy tiếp điểm. Trong hướng nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả sẽ nghiên cứu ảnh hưởng của vật liệu đến nhiệt độ và sự ổn định của hồ quang.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Tan J G .The usage JMAG 6.0 proceeds analysis of finite element. (2002). Beijing: University of Beijing press.
- [2] Q. Wang, H. Wang, Z. Peng, P. Liu, T. Zhang, and W. Hu, (Feb 2017). "3-D coupled electromagnetic-fluid-thermal analysis of epoxy impregnated paper converter transformer bushings," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 1, pp. 630–638.
- [3] M. T. Dhotre, J. Korbel, X. Ye, J. Ostrowski, S. Kotilainen, and M. Kriegel, (Dec 2017) "CFD simulation of temperature rise in high-voltage circuit breakers," IEEE Trans. Power Del., vol. 32, no. 6, pp. 2530–2536.
- [4] W. H. Lee, J. H. An, Y. J. Kim, and J. C. Lee, (Sep 2016). "Study on temperature-rise of a 72.5kV vacuum circuit breaker for the higher rated current," in Proc. 27th Int. Symp. Discharges Elect. Insul. Vac. (ISDEIV), vol. 2, , pp. 1–4.

Thông tin của tác giả:

ThS. Đỗ Văn Vang

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84).356.078.954 - Email: Vangdkh1@gmail.com

TS. Vũ Tài Tú

Viện Vũ khí, Bộ Công nghiệp Quốc phòng

Điện thoại: +(84).914.789.699 - Email: vutaitu@gmail.com

TS. Nguyễn Văn Trung

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84).98.894.1166 - Email: ngvtrung1982@gmail.com

APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION TO ANALYZE THE FORCE ACTING ON THE ARC IN A VACUUM CONTACT

Information about authors:

Vang Do Van, M.Eng., Quang Ninh University of Industry, email: vangdkh1@gmail.com

Tu Vu Tai, Doc.Eng., Institute of Weapons, General Department of Defence Industry

Trung Nguyen Van, PhD.Eng., Quang Ninh University of Industry.

ABSTRACT:

Currently, vacuum contacts are installed inside contactors and widely used in underground mines with explosive dust and gases. To ensure safety against electric shock and prevent mine explosions, switching mechanisms are often placed in vacuum arc extinguishing chambers to avoid arcing during power switching. Vacuum circuit breakers are designed to interrupt the flow of electricity when a large current occurs due to a short circuit or other abnormal operating conditions in the electrical network. When a vacuum circuit breaker interrupts the current, metal vapor is released from the contacts and turns into plasma, creating an arc. Arc contraction can increase heat flux and local temperature across the electrodes, leading to surface melting and undesirable effects on equipment lifespan. To overcome this, an axial magnetic field is applied to evenly diffuse the arc across the contact surface, reducing heat density and limiting weld sticking.

This paper applies JMAG software to simulate the electromagnetic force acting on a column arc and the current density in the arc extinguishing chamber. The vacuum arc is modeled using a sequential coupling method of two different fields.

Keywords: Arc extinguishing chamber, JMAG, Axial magnetic field (AMF).

REFERENCES

- [1] Tan J G .The usage JMAG 6.0 proceeds analysis of finite element. (2002). Beijing: University of Beijing press.
- [2] Q. Wang, H. Wang, Z. Peng, P. Liu, T. Zhang, and W. Hu, Feb. (2017). "3-D coupled electromagnetic-fluid-thermal analysis of epoxy impregnated paper converter transformer bushings," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 1, pp. 630–638.
- [3] M. T. Dhotre, J. Korbel, X. Ye, J. Ostrowski, S. Kotilainen, and M. Kriegel, Dec. (2017). "CFD simulation of temperature rise in high-voltage circuit breakers," IEEE Trans. Power Del., vol. 32, no. 6, pp. 2530–2536.
- [4] W. H. Lee, J. H. An, Y. J. Kim, and J. C. Lee, Sep. (2016). "Study on temperature-rise of a 72.5kV vacuum circuit breaker for the higher rated current," in Proc. 27th Int. Symp. Discharges Elect. Insul. Vac. (ISDEIV), vol. 2, pp. 1–4.

Ngày nhận bài: 01/04/2026;

Ngày nhận bài sửa: 14/04/2026;

Ngày chấp nhận đăng: 17/04/2026.