

ẢNH HƯỞNG CỦA CẤU HÌNH ĐIỆN CỰC TỚI HỒ QUANG ĐIỆN TRONG TỦ ĐÓNG CẮT TRUNG ÁP VÀ CÁC GIẢI PHÁP HẠN CHẾ

EFFECTS OF ELECTRODE CONFIGURATIONS ON ARC FLASH IN MEDIUM-VOLTAGE SWITCHGEAR AND MITIGATION SOLUTIONS

Ma Thị Thương Huyền, Nguyễn Phúc Huy, Vũ Hoàng Giang*

Trường Đại học Điện lực, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: giangvh@epu.edu.vn

(Nhận bài / Received: 23/9/2024; Sửa bài / Revised: 11/12/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 26/12/2024)

DOI: 10.31130/ud-jst.2025.413

Tóm tắt - Hồ quang điện là một trong những nguyên nhân gây ra tai nạn điện phổ biến nhất trong quá trình vận hành, sửa chữa và bảo trì các tủ điện. Sự cố do hồ quang điện có thể dẫn đến cháy nổ, hư hỏng thiết bị điện, gây nguy hiểm cho nhân viên làm việc gần đó. Mức độ nguy hiểm của hồ quang điện phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau, điển hình là trị số dòng điện, kích thước tủ và cấu hình của điện cực. Bài báo này phân tích ảnh hưởng của cấu hình điện cực tới dòng điện hồ quang, năng lượng hồ quang (E), và ranh giới hồ quang điện (AFB) trong tủ đóng cắt trung áp điện áp 11 kV. Kết quả tính toán cho thấy, cấu hình điện cực khác nhau sẽ cho dòng điện hồ quang và năng lượng hồ quang khác nhau. Do đó, cần lựa chọn chính xác cấu hình điện cực khi thực hiện phân tích hồ quang điện, từ đó đưa ra các biện pháp giảm thiểu nguy cơ hồ quang và lựa chọn thiết bị bảo hộ phù hợp cho nhân viên vận hành.

Từ khóa - Cấu hình điện cực; hồ quang điện; năng lượng hồ quang; ranh giới hồ quang; tủ điện.

1. Đặt vấn đề

Hồ quang điện là hiện tượng phóng điện tự duy trì trong chất khí với mật độ dòng điện rất lớn, nhiệt độ rất cao kèm theo ánh sáng mạnh. Phần lớn năng lượng hồ quang chuyển hóa thành nhiệt năng và quang năng. Trong thời gian rất ngắn (tính bằng mili giây), nhiệt độ tại tâm hồ quang có thể đạt từ 5.000°C tới 20.000°C. Nhiệt độ cao như vậy khiến các kim loại như đồng, nhôm, thép bay hơi, tạo ra dòng plasma duy trì hồ quang. Nhiệt độ cao, áp suất lớn có thể gây cháy, nổ tủ điện, làm hư hỏng các thiết bị, gây thương tích cho người ở trong khu vực chịu ảnh hưởng [1], [2].

Nhiều nghiên cứu lý thuyết và thử nghiệm đã được thực hiện nhằm định lượng năng lượng sự cố hồ quang để xác định trang bị bảo hộ cá nhân (PPE) phù hợp bảo vệ các nhân viên làm việc trên thiết bị điện hoặc đề xuất các giải pháp hạn chế hồ quang điện [3], [4]. Tiêu chuẩn IEEE 1584-2002 đã đưa ra mô hình và quy trình tính toán năng lượng sự cố và ranh giới hồ quang cho trường hợp điện cực đặt thẳng đứng trong tủ kín (VCB) và ngoài không khí (VOA) [5]. Tuy nhiên, kết quả thí nghiệm phân tích hiệu ứng nhiệt trên các dạng điện cực khác nhau với các mức điện áp 600 V, 2700 V và 14,3 kV cho thấy, việc tính toán chỉ dựa trên cấu hình điện cực theo chiều dọc như trong tiêu chuẩn IEEE-1584-2002 không đảm bảo an toàn

Abstract - Arc flash is one of the most common causes of electrical hazards encountered during the operation and maintenance of electrical panels. Incidents caused by arc flash can lead to severe consequences, including fires, explosions, equipment damage, and risks to nearby personnel. The severity of an arc flash is influenced by several factors, especially current values, enclosure dimensions, and electrode configurations. This paper examines how electrode configurations and medium-voltage enclosure dimensions affect arcing current, incident energy (E), and arc flash boundary (AFB) in 11 kV enclosures. The calculation results show that different electrode configurations result in varying arc currents and energy levels. Consequently, arc flash analysis is crucial during system design and operation to implement effective risk mitigation strategies and select suitable personal protective equipment for operators.

Key words - Electrode configuration; arc flash; incident energy; arc flash boundary; enclosure

khi áp dụng với các dạng điện cực khác [6]. Phiên bản cập nhật IEEE 1584-2018 đã cải tiến về mô hình tính toán hồ quang điện, các yếu tố như cấu hình điện cực, khoảng cách giữa các điện cực, kích thước tủ được xem xét tới trong mô hình [7], [8] giúp cho việc định lượng năng lượng hồ quang chính xác hơn. Trong bài báo [9], các tác giả đã phân tích ảnh hưởng của cấu hình điện cực tới năng lượng và ranh giới hồ quang cho lưới điện hạ áp điện áp dưới 600 V theo tiêu chuẩn IEEE 1584-2018. Xem xét các cấu hình điện cực ở cùng một vị trí thiết bị cho thấy, cấu hình có năng lượng hồ quang lớn nhất có thể không cho ranh giới hồ quang lớn nhất. Thực tế, các thiết bị điện có thể có nhiều cấu hình điện cực khác nhau, thậm chí trong một số trường hợp có thể có nhiều cấu hình trong cùng một ngăn. Hơn nữa, xuất hiện trường hợp yêu cầu phân tích hồ quang điện khi không biết chắc chắn về cấu hình điện cực và kích thước của tủ điện. Các hướng dẫn chi tiết về quá trình phân tích này bằng thực nghiệm được trình bày trong tài liệu [10].

Để hạn chế ảnh hưởng của hồ quang điện tới nhân viên vận hành và thiết bị điện, nhiều giải pháp đã được đề xuất và thực hiện. Đánh giá ảnh hưởng của hồ quang điện từ đó đề xuất giải pháp hạn chế hồ quang điện cho tủ điện hạ áp bằng cách sử dụng máy cắt điện được trình bày trong bài báo [11]. Trong bài báo [12], các tác giả đề xuất giải pháp

¹ Electric Power University, Vietnam (Huyen Ma-Thi-Thuong, Phuc-Huy Nguyen, Hoang-Giang Vu)

dùng ứng dụng di động để tính toán hồ quang điện cho lưới điện hạ áp và sử dụng các vật liệu cách điện để hạn chế sự xuất hiện hồ quang điện. Bài báo [13] đề xuất sử dụng thiết bị khử hồ quang bằng thyristor để giảm năng lượng hồ quang. Ứng dụng đặc tính thời gian – điện áp trong bảo vệ quá dòng điện để giảm năng lượng hồ quang điện trong lưới điện có tích hợp nguồn điện phân tán được đề xuất trong tài liệu [14].

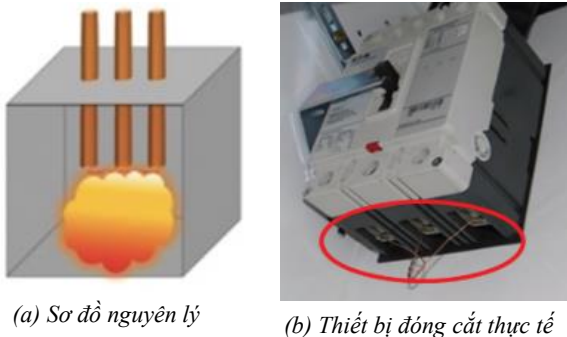
Bài báo này sẽ nghiên cứu ảnh hưởng của các cấu hình điện cực tới dòng điện, năng lượng và ranh giới hồ quang cho các tủ đóng cắt điện áp 11 kV theo tiêu chuẩn IEEE 1584-2018 từ đó đề xuất các giải pháp hạn chế ảnh hưởng của hồ quang điện.

2. Ảnh hưởng của cấu hình điện cực tới hồ quang điện

2.1. Cấu hình điện cực tủ điện

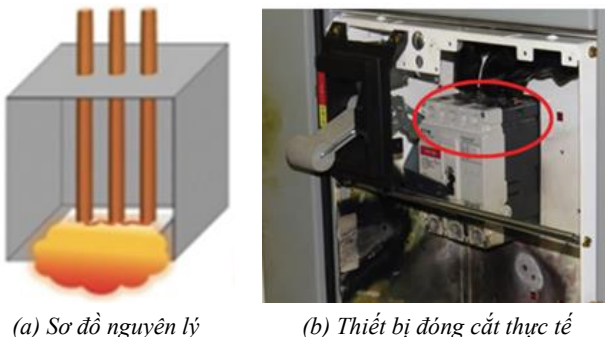
Các tủ điện kín bằng kim loại như tủ thanh góp, tủ thiết bị đóng cắt, tủ điều khiển động cơ, ... có thể chứa các dây dẫn, thanh dẫn được sắp xếp theo 3 dạng: cấu hình điện cực thẳng đứng (VCB - Vertical conductors/ electrodes inside a metal box/ enclosure), cấu hình điện cực thẳng đứng có vách ngăn cách điện (VCBB - Vertical conductors/ electrodes terminated in an insulating barrier inside a metal box/ enclosure) và cấu hình điện cực nằm ngang (HCB - Horizontal conductors/electrodes inside a metal box/ enclosure) [8].

- Với cấu hình điện cực thẳng đứng, khi hồ quang điện xuất hiện trong tủ điện, dòng hồ quang sẽ di chuyển ra xa nguồn, dọc theo các điện cực xuống đáy tủ và tràn ra phía trước (Hình 1).



Hình 1. Cấu hình VCB [8]

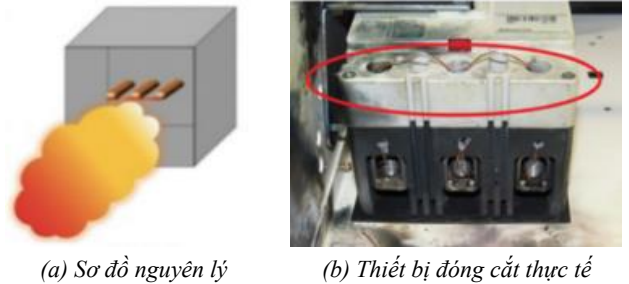
- Các điện cực có cấu hình thẳng đứng có vách ngăn cách điện, hồ quang sẽ va chạm vào vách ngăn và đám mây plasma sẽ hướng nhiều hơn về phía cửa mở của tủ điện (Hình 2).



Hình 2. Cấu hình VCCB [8]

- Hình 3 cho thấy, các điện cực được đặt nằm ngang. Khi đó, đám mây plasma của hồ quang sẽ được hướng ra ngoài từ đầu của điện cực.

Tuy nhiên, trong thực tế khi vận hành và bảo dưỡng, ngay cả trong cùng một thiết bị, vị trí sự cố có thể thay đổi hướng plasma và đường đi của hồ quang. Do đó, các vị trí bên trong một thiết bị có thể bố trí dây dẫn với nhiều hơn một cấu hình điện cực.



Hình 3. Cấu hình HCB [8]

2.2. Các thông số của hồ quang điện

Mức độ nguy hiểm của hồ quang điện được đánh giá dựa trên các đại lượng: dòng điện, năng lượng và ranh giới hồ quang. Theo tiêu chuẩn IEEE 1584 – 2018 các đại lượng đó tương ứng với 3 mức điện áp 14,3 kV; 2,7 kV và 600 V được xác định như sau [8]:

+ Dòng điện hồ quang (arc current): là dòng điện chạy qua hồ quang điện khi xảy ra sự cố giữa các phần mang điện. Dòng điện hồ quang phụ thuộc chủ yếu vào dòng điện ngắn mạch, mức điện áp, cấu hình các điện cực và khoảng cách giữa các điện cực, được xác định theo công thức [8]:

$$I_{arc} = 10^{(k_1 + k_2 \lg(I_{bf}) + k_3 \lg(G))} (k_4 I_{bf}^6 + k_5 I_{bf}^5 + k_6 I_{bf}^4 + k_7 I_{bf}^3 + k_8 I_{bf}^2 + k_9 I_{bf} + k_{10}) \quad (1)$$

Trong đó:

I_{arc} (kA) là dòng điện hồ quang tính toán;

I_{bf} (kA) là giá trị hiệu dụng dòng điện ngắn mạch 3 pha lớn nhất;

G (mm) là khoảng cách giữa các điện cực;

k_1 tới k_{10} là các hệ số phụ thuộc cấu hình điện cực tương ứng với 3 mức điện áp 14,3 kV; 2,7 kV và 600 V (Bảng 1 trong [8]).

+ Năng lượng hồ quang (incident energy): là lượng nhiệt năng được sinh ra từ một sự cố hồ quang điện và tác động lên một bề mặt ở một khoảng cách nhất định so với nguồn hồ quang điện. Năng lượng này được đo bằng đơn vị J/cm² hoặc cal/cm². Năng lượng hồ quang càng cao, mức độ nguy hiểm càng lớn. Việc tính toán năng lượng hồ quang là yếu tố quan trọng nhằm xác định khoảng cách an toàn và các biện pháp bảo vệ nhân viên làm việc một cách phù hợp, cũng như đưa ra các biện pháp hạn chế hồ quang khi thông số này vượt quá mức an toàn cho phép. Năng lượng hồ quang được xác định theo công thức [8]:

$$E = \frac{3}{50} T \times 10^{(k_1 + k_2 \lg(G) + f(I_{bf}, I_{arc}, D) + \lg(\frac{1}{CF}))} \quad (2)$$

Trong đó: E (cal/cm²) là năng lượng hồ quang tính toán;

T (ms) là thời gian tồn tại hồ quang;

D (mm) là khoảng cách làm việc;

CF là hệ số hiệu chỉnh theo kích thước tủ điện.

$$f(I_{bf}, I_{arc}) = k_{11}lg(I_{bf}) + k_{12}lg(D) + k_{13}lg(I_{arc}) + \frac{k_3 I_{arc}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}}$$

k_1 tới k_{13} là các hệ số phụ cấu hình điện cực tương ứng với 3 mức điện áp 14,3 kV; 2,7 kV và 600 V (Bảng 3, 4, 5 trong [8]). Chú ý các hệ số này có cùng ký hiệu với các hệ số ở công thức (1) nhưng giá trị khác nhau do được tra ở các bảng khác nhau.

+ Ranh giới hồ quang điện (arc flash boundary): là khoảng cách an toàn tính từ nguồn hồ quang điện mà tại đó năng lượng hồ quang giảm xuống còn 1,2 cal/cm² - mức đủ để gây bỏng cấp độ 2 cho người tiếp xúc. Xác định ranh giới hồ quang để đảm bảo nhân viên làm việc trong khu vực này được trang bị đủ bảo hộ an toàn, giảm thiểu các rủi ro do hồ quang điện gây ra. Ranh giới hồ quang điện được tính từ công thức [8]:

$$lgAFB = \frac{k_1 + k_2 lg G + g(I_{bf}, I_{arc}) + lg \frac{1}{CF} lg \frac{20}{T}}{-k_{12}} \quad (3)$$

Trong đó: AFB là ranh giới hồ quang điện;

$$g(I_{bf}, I_{arc}) = k_{11}lg I_{bf} + k_{13}lg I_{arc} + \frac{k_3 I_{arc}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}}$$

Các hệ số k_1 tới k_{13} cũng được tra trong Bảng 3, 4, 5 trong [8].

Để phân tích ảnh hưởng của cấu hình điện cực tới năng lượng hồ quang và ranh giới hồ quang trong tủ điện 11 kV, các công thức (4) – (6) được đưa ra trên cơ sở áp dụng cách tính theo tiêu chuẩn cho điện áp 11 kV của trường hợp nghiên cứu. Các bước tính toán như sau:

Bước 1: Xác định dòng điện ngắn mạch.

Bước 2: Tính dòng điện hồ quang ở điện áp 11 kV:

$$I_{arc_{11}} = \frac{I_{arc_{14,3}} - I_{arc_{2,7}}}{11,6} (V - 14,3) + I_{arc_{14,3}} \quad (4)$$

Trong đó, $I_{arc_{14,3}}$ và $I_{arc_{2,7}}$ (kA) tương ứng là dòng điện hồ quang ở điện áp 14,3 kV và 2,7 kV, được tính theo (1); V là mức điện áp, trong trường hợp này $V=11$ kV.

Bước 3: Xác định thời gian tồn tại hồ quang:

Thời gian tồn tại của hồ quang điện chính là thời gian cắt hồ quang thường được xác định bằng thời gian bảo vệ rơ le tác động cộng thời gian máy cắt tác động có xét đến độ trễ của thiết bị.

Bước 4: Tính năng lượng hồ quang ở điện áp 11 kV:

$$E_{11} = \frac{E_{14,3} - E_{2,7}}{11,6} (V - 14,3) + E_{14,3} \quad (5)$$

Trong đó: $E_{14,3}$ và $E_{2,7}$ (cal/cm²) tương ứng là năng lượng hồ quang ở điện áp 14,3 kV và 2,7 kV, được xác định theo (2).

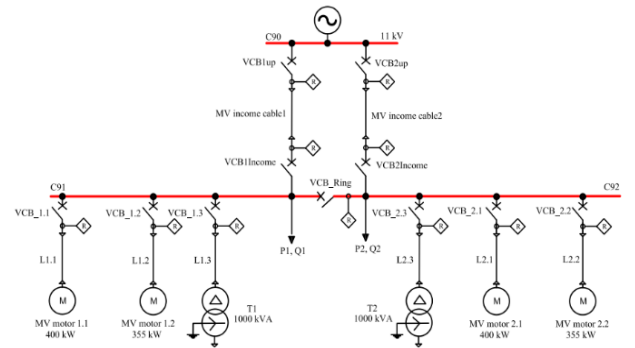
Bước 5: Xác định ranh giới hồ quang ở điện áp 11 kV:

$$AFB_{11} = \frac{AFB_{14,3} - AFB_{2,7}}{11,6} (V - 14,3) + AFB_{14,3} \quad (6)$$

với $AFB_{14,3}$ và $AFB_{2,7}$ (mm) tương ứng là ranh giới hồ quang ở điện áp 14,3 kV và 2,7 kV, được xác định theo (3).

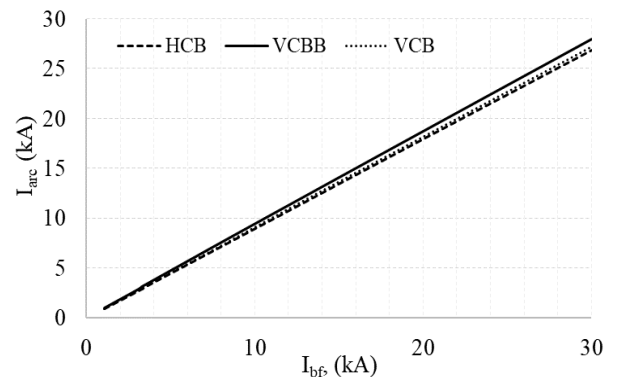
2.3. Phân tích ảnh hưởng của cấu hình điện cực tới hồ quang điện trong tủ điện 11 kV

Để đánh giá ảnh hưởng của cấu hình điện cực tới hồ quang điện, mục này sẽ thực hiện phân tích hồ quang điện trong các tủ điện 11 kV của hệ thống cung cấp điện tự dùng trong nhà máy nhiệt điện. Sơ đồ cung cấp điện được thể hiện trên Hình 4. Tủ có kích thước tiêu chuẩn là 1143 mm x 762 mm x 762 mm và khoảng cách giữa các điện cực là 152 mm được lựa chọn để tính toán phân tích. Các bảo vệ quá dòng có thời gian (51) và bảo vệ quá dòng cắt nhanh (50) được sử dụng bảo vệ cho các thiết bị trong sơ đồ.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý cấp điện

Hình 5 minh họa sự thay đổi của dòng điện hồ quang theo dòng điện ngắn mạch ứng với 3 cấu hình điện cực trong tủ điện. Nhận thấy dòng điện hồ quang trong trường hợp cấu hình điện cực theo chiều dọc lớn hơn trường hợp cấu hình điện cực theo chiều ngang, trong đó, cấu hình VCBB cho dòng điện hồ quang lớn nhất.



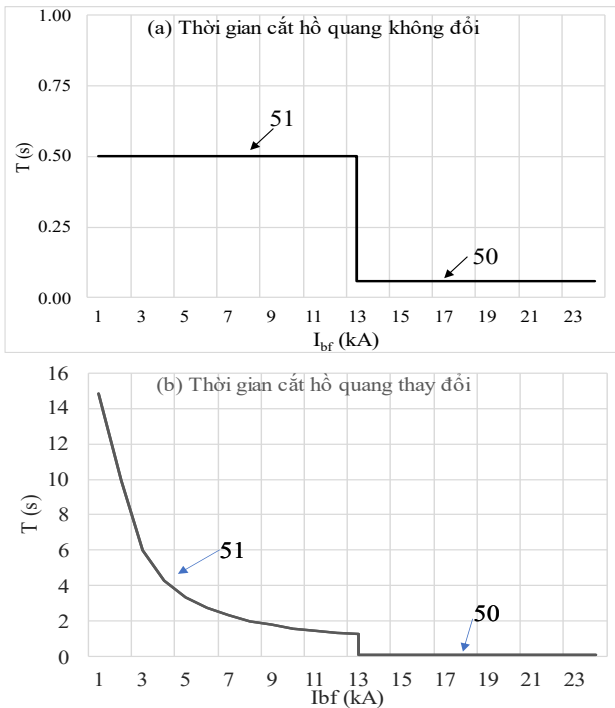
Hình 5. Dòng điện hồ quang tương ứng với 3 cấu hình điện cực trong tủ điện

Hai trường hợp tính toán, phân tích chi tiết trong mục này bao gồm:

- Trường hợp 1: bảo vệ (51) có đặc tính thời gian độc lập;
- Trường hợp 2: bảo vệ (51) có đặc tính thời gian phụ thuộc.

Trong từng trường hợp, tính toán các thông số của hồ quang theo các bước đã trình bày tại mục 2.2 với các cấu hình điện cực và dòng ngắn mạch khác nhau ta có kết quả được thể hiện trên Hình 6 tới Hình 8.

Trong trường hợp 1, bảo vệ (51) có đặc tính thời gian độc lập với thời gian loại trừ sự cố là 0,5 s và bảo vệ quá dòng cắt nhanh (50) có thời gian cắt 0,06 s. Đặc tính thời gian tồn tại hồ quang (T) được thể hiện trong Hình 6a. Kết quả tính toán hồ quang điện ứng với các cấu hình điện cực khác nhau được minh họa trên Hình 7. Có thể thấy, khi thời gian T là không đổi, phần lớn dạng đặc tính của E và AFB có dạng tuyến tính và tăng dần theo dòng điện hồ quang (hay dòng ngắn mạch). Năng lượng hồ quang (E) và ranh giới hồ quang (AFB) ứng với cấu hình điện cực VCB là nhỏ nhất trong khi đó các giá trị này của cấu hình HCB là lớn nhất do toàn bộ năng lượng hướng ra ngoài phía cửa mở của tủ điện theo phương ngang.

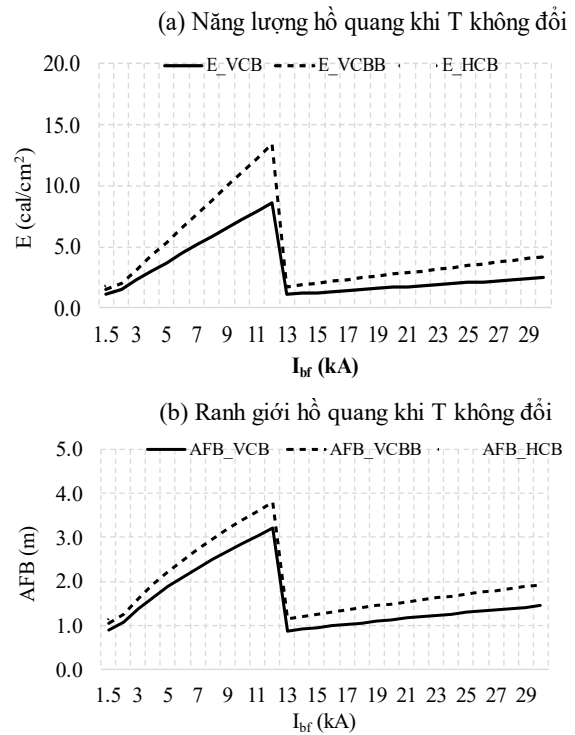


Hình 6. Thời gian cắt hồ quang

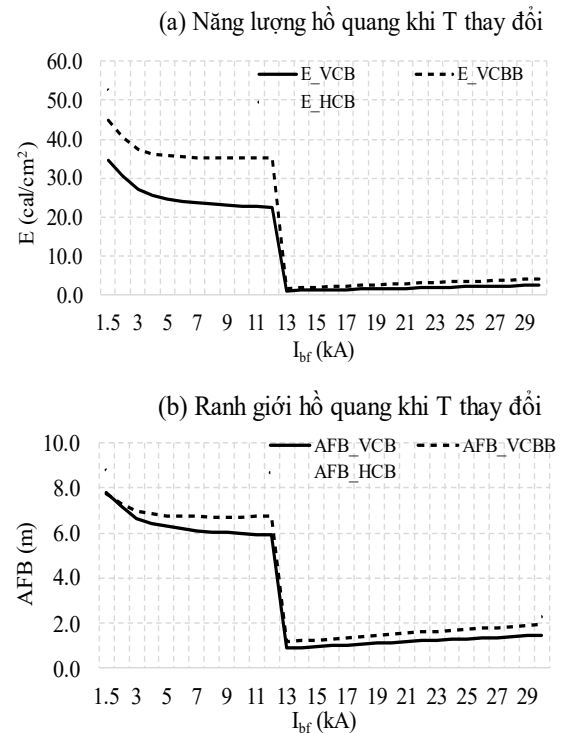
Trường hợp 2 thường được áp dụng trong thực tế để đảm bảo phối hợp bảo vệ. Xét trường hợp bảo vệ (51) theo tiêu chuẩn IEC loại rất dốc với các thông số cài đặt như trong Phụ lục, kết hợp với bảo vệ quá dòng cắt nhanh (50). Đặc tính thời gian cắt của bảo vệ theo dòng điện được thể hiện trên Hình 6b. Có thể thấy, trong vùng làm việc của bảo vệ 51, thời gian cắt hồ quang giảm dần theo sự tăng lên của dòng điện ngắn mạch kéo theo sự thay đổi năng lượng và ranh giới hồ quang. Kết quả tính toán hồ quang điện khi thời gian tồn tại hồ quang thay đổi được thể hiện trên Hình 8.

Vì thời gian cắt hồ quang của thiết bị bảo vệ tỷ lệ nghịch với dòng điện, dòng hồ quang nhỏ hơn sẽ có thời gian cắt hồ quang dài hơn và dẫn đến mức năng lượng sự cố và ranh giới hồ quang cao hơn. Trường hợp dòng điện hồ quang nhỏ, thời gian cắt của bảo vệ rơi le được xác định theo đặc tính quá dòng có thời gian có giá trị lớn nên năng lượng và ranh giới hồ quang cũng lớn. Hai giá trị này giảm dần theo sự tăng lên của dòng điện hồ quang. Nếu dòng dòng điện hồ quang lớn hơn giá trị khởi động của bảo vệ quá dòng cắt nhanh với thời gian cắt của bảo vệ rơi le không đổi (0,06 s) thì năng lượng hồ quang và ranh giới hồ quang sẽ giảm

manh, sau đó tăng dần theo dòng điện ngắn mạch. Trong trường hợp này năng lượng hồ quang và ranh giới hồ quang của điện cực nằm ngang HCB vẫn lớn nhất, sau đó tới cấu hình VCCB.



Hình 7. Năng lượng hồ quang và ranh giới hồ quang khi thời gian tồn tại hồ quang không thay đổi



Hình 8. Năng lượng hồ quang và ranh giới hồ quang khi thời gian tồn tại hồ quang điện thay đổi

Kết quả tính toán cho thấy, cấu hình điện cực HCB luôn tạo ra năng lượng và ranh giới hồ quang lớn nhất ngay cả

khi có sự thay đổi về thời gian cắt hồ quang. Mặc dù, hầu hết các trường hợp ghi nhận cấu hình VCBB cho năng lượng và ranh giới hồ quang lớn hơn so với cấu hình VCB, nhưng vẫn xuất hiện trường hợp năng lượng và ranh giới hồ quang của cấu hình VCBB nhỏ hơn. Do đó, khi tính toán hồ quang điện cần thiết lập lựa chọn cấu hình điện cực theo sơ đồ thực tế.

3. Giải pháp giảm ảnh hưởng của hồ quang điện

3.1. Lựa chọn trang bị bảo hộ lao động chống hồ quang điện

Trang bị bảo hộ lao động (PPE) nhằm đảm bảo an toàn cho người vận hành khỏi những tia hồ quang hay những vụ nổ hồ quang được quy định trong Tiêu chuẩn về an toàn điện tại nơi làm việc NFPA70E của OSHA [15]. Tiêu chuẩn NFPA 70E năm 2018 chỉ ra các cấp độ danh mục PPE chống hồ quang điện như trong Bảng 1.

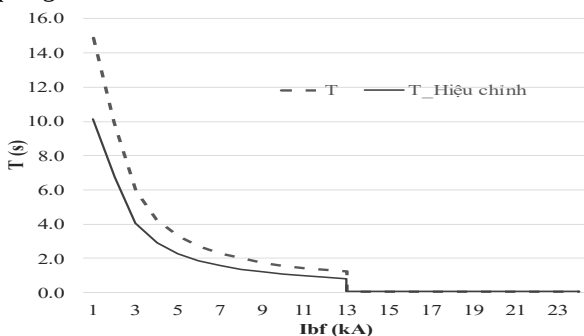
Căn cứ vào kết quả tính toán năng lượng hồ quang để lựa chọn trang bị bảo hộ cá nhân phù hợp khi làm việc với tủ điện. Khi năng lượng hồ quang lớn hơn 40 cal/cm^2 , tương ứng với cấp độ nguy hiểm, thì cần phải thực hiện các biện pháp hạn chế năng lượng hồ quang điện.

Bảng 1. Các cấp độ danh mục PPE chống hồ quang điện

Cấp độ danh mục PPE	Năng lượng hồ quang (cal/cm^2)	
0	$\leq 1,2$	
1	$> 1,2$	≤ 4
2	> 4	≤ 8
3	> 8	≤ 25
4	> 25	≤ 40
NGUY HIỂM	> 40	

3.2. Giảm năng lượng hồ quang bằng cách điều chỉnh đặc tính của rơ le bảo vệ

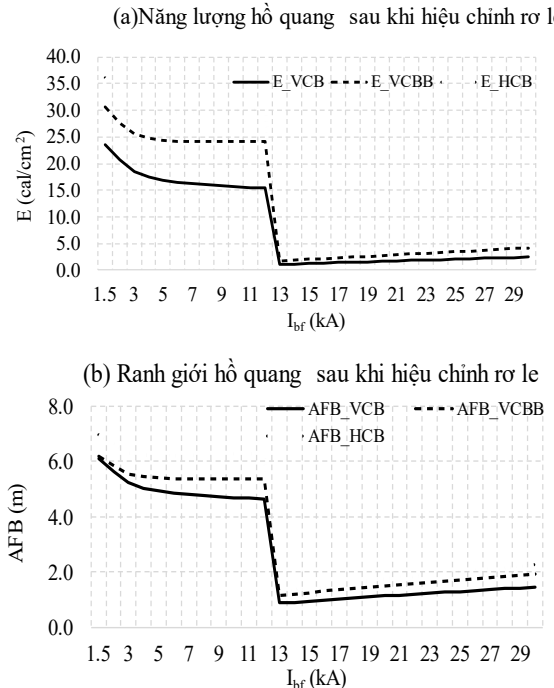
Theo kết quả tính toán ở mục 2.3 có thể thấy, khi thời gian tác động của bảo vệ rơ le không đổi thì năng lượng hồ quang tăng khi dòng điện hồ quang tăng. Ngược lại, nếu thời gian tác động thay đổi theo đặc tính phụ thuộc, trong vùng dòng hồ quang có giá trị nhỏ, thời gian cắt hồ quang lớn nên năng lượng hồ quang sinh ra rất lớn. Để giảm năng lượng hồ quang điện cần phải giảm thời gian tồn tại của hồ quang.



Hình 9. Thời gian cắt hồ quang trước và sau khi hiệu chỉnh

Theo kết quả ở Hình 8a năng lượng hồ quang trong trường hợp cấu hình VCBB và HCB vượt quá 40 cal/cm^2 nên cần áp dụng biện pháp hạn chế hồ quang điện. Giải pháp được lựa chọn là điều chỉnh đặc tính làm việc của bảo vệ quá dòng có thời gian (51) với thông số cài đặt hiệu chỉnh như trong Phụ lục nhằm giảm thời gian cắt hồ quang

điện (Hình 9). Kết quả sau khi hiệu chỉnh năng lượng hồ quang và ranh giới hồ quang của cả 3 trường hợp cấu hình điện cực trong tủ điện kín đều giảm (Hình 10). Năng lượng hồ quang ứng với các dòng điện ngắn mạch đều nhỏ hơn 40 cal/cm^2 , đảm bảo điều kiện làm việc dưới mức nguy hiểm.



Hình 10. Năng lượng hồ quang và ranh giới hồ quang sau khi hiệu chỉnh đặc tính làm việc của rơ le quá dòng có thời gian

4. Kết luận

Cách xác định loại cấu hình điện cực trong tủ điện kín điện áp 11 kV và đặc điểm phóng hồ quang điện tương ứng với từng loại điện cực đã được phân tích chi tiết trong bài báo. Từ đó cho thấy sự ảnh hưởng của cấu hình điện cực tới hồ quang điện. Một số kết luận có thể rút ra là:

- Cấu hình điện cực HCB luôn tạo ra năng lượng và ranh giới hồ quang lớn nhất;
- Năng lượng hồ quang và ranh giới hồ quang phụ thuộc nhiều vào thời gian tồn tại hồ quang và có quan hệ chặt chẽ với thời gian làm việc của bảo vệ.

- Các thông số hồ quang cần được tính toán chi tiết có xét đến cấu hình của điện cực để lựa chọn trang bị bảo hộ phù hợp cũng như có biện pháp hạn chế khi năng lượng hồ quang vượt quá mức quy định.

Nghiên cứu này làm cơ sở cho các kỹ sư điện nắm được phương pháp lựa chọn đúng cấu hình điện cực khi phân tích hồ quang trong trường hợp không có đầy đủ dữ liệu tính toán và giải pháp giảm hồ quang điện bằng cách điều chỉnh đặc tính làm việc của bảo vệ rơ le.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Gammon, W. J. Lee, Z. Zhang, and B. C. Johnson, "Arc Flash Hazards, Incident Energy, PPE Ratings, and Thermal Burn Injury - A Deeper Look", *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 51, no. 5, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2431644.
- [2] Z. Zhang, S. H. Rau, W. J. Lee, T. Gammon, and B. C. Johnson,

“Arc Flash Pressure Measurement System Design”, *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 52, no. 6, 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2587775.

[3] T. Gammon, W. J. Lee, Z. Zhang, and B. C. Johnson, “Electrical Safety, Electrical Hazards, and the 2018 NFPA 70E: Time to Update Annex K?”, *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 51, no. 4, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2406852.

[4] P. E. Faried and W. Hakelberg, “Arc Flash – IEEE 1584-2018, NFPA 70E 2018, & OSHA Final Rule Highlights and Arc Flash Mitigation Technologies”, *2019 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference (IAS/PCA)*, 2019, pp. 1–10. doi: 10.1109/CITCON.2019.8729110.

[5] IEEE Industry Applications Society, “*IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations*”, IEEE Std 1584-2002, pp. 1–113, 2002, doi: 10.1109/IEEESTD.2002.94138.

[6] Z. Zhang, P. Wang, S. H. Rau, and W. J. Lee, “Effect of electrode geometry on arc flash protection boundary”, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020. doi: 10.1109/TIA.2019.2947858.

[7] D. Mohla, W. J. Lee, J. Phillips, and A. Marroquin, “Introduction to IEEE Standard 1584: Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, 2018 Edition”, *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 26, no. 5, pp. 64-76, 2020. doi: 10.1109/MIAS.2020.2982574.

[8] IEEEExplore, “*IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations - Redline*”, IEEE Std 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002) - Redline, pp. 1–341, 2018.

[9] A. Reeves, M. Freyenberger, and M. Hodder, “Understanding the Effect of Electrode Configuration on Incident Energy and Arc-Flash Boundary”, *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 56, no. 6, 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3023918.

[10] K. Zia, A. Papasani, D. Rosewater, and W. J. Lee, “Determine the Electrode Configuration and Sensitivity of the Enclosure Dimensions When Performing Arc Flash Analysis”, *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 56, no. 6, 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3020531.

[11] I. Gal and N. Choulet, “ARC flash mitigation on main LV switchboards by protecting HV/LV transformers using circuit breakers”, in *IET Conference Proceedings, Institution of Engineering and Technology*, vol. 2023, no. 6, pp. 1320–1324, 2023. doi: 10.1049/icp.2023.0704.

[12] A. Gamage, S. Jackson, and P. Therrien, “347/600 Volt Arc Flash Mitigation at British Columbia Hydro”, in *IEEE IAS Electrical Safety Workshop, IEEE Computer Society*, 2023, pp. 86–92. doi: 10.1109/ESW49992.2023.10188315.

[13] K. Nowak, J. Janiszewski, and G. Dombek, “The possibilities to reduce arc flash exposure with arc fault eliminators”, *Energies* (Basel), vol. 14, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/en14071927.

[14] F. Alasali *et al.*, “Application of time-voltage characteristics in overcurrent scheme to reduce arc-flash incident energy for safety and reliability of microgrid protection”, *Energies* (Basel), vol. 14, no. 23, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14238074.

[15] NFPA, “NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace Handbook, 2015 Edition”, NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace Handbook, 2015 Edition.

PHỤ LỤC

Thông số cài đặt của bảo vệ quá dòng có đặc tính thời gian phụ thuộc:

Loại đặc tính	IEC – Rất dốc
Dòng khởi động (A)	520
TMS trước hiệu chỉnh	2,2
TMS sau hiệu chỉnh	1,5