

NGHIÊN CỨU VÀ THỬ NGHIỆM ĐẶC TÍNH PHÓNG ĐIỆN Ô NHIỄM CỦA LỚP CÁCH ĐIỆN PHỦ TRÊN THIẾT BỊ ĐIỆN CAO ÁP DƯỚI TÀU THỦY

RESEARCH AND TESTING OF POLLUTION FLASHOVER CHARACTERISTICS OF COATED INSULATORS OF HIGH VOLTAGE ELECTRICAL EQUIPMENT ON SHIPS

NGUYỄN VĂN HÙNG*, NGUYỄN THANH VÂN

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: hung.ddt@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Hiện nay, hệ thống điện cao áp ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực Hàng hải. Các tàu biển hiện nay được trang bị, lắp đặt các thiết bị sử dụng điện áp cao để tăng công suất sử dụng và hiệu quả trong khi khai thác. Tuy nhiên, môi trường làm việc khắc nghiệt dẫn đến mức độ an toàn điện phải đảm bảo các yêu cầu khắt khe theo quy định của IMO. Bài báo này trình bày phương pháp thử nghiệm hiện tượng phóng điện trong môi trường làm việc giống với trên tàu biển với thiết bị của hãng TERCO. Kết quả thử nghiệm cho thấy với các môi trường làm việc nhiễm bẩn mức độ các tạp chất khác nhau, độ ẩm và nhiệt độ sẽ dẫn đến làm thay đổi các giá trị điện áp phóng điện khác nhau.

Từ khóa: Chất cách điện, an toàn điện cao áp, phân phối ô nhiễm, an toàn điện cho tàu biển, huấn luyện an toàn điện.

Abstract

Nowadays, high-voltage (HV) electrical systems are increasingly widely used in the maritime field. Ships are now equipped with high-voltage devices to increase capacity and efficiency. However, in harsh working environments, high-voltage electrical safety must meet strict requirements according to regulations. This article presents a method for testing the discharge phenomenon in a working environment similar to that on ships with TERCO equipment. The results show that working environments with different levels of impurities will give different discharge voltage values.

Keywords: Insulators, high voltage electrical safety, pollution distribution, electrical safety for ships, electrical safety training.

1. Mở đầu

Phạm vi ứng dụng của vật liệu cách điện điện áp cao (HV) thường tập trung vào các lĩnh vực như truyền tải, phân phối điện năng. Tuy nhiên, hiện nay công nghệ cách điện điện áp cao cũng đã xuất hiện trong một số lĩnh vực ngành giao thông vận tải như hàng hải, đường sắt [1]. Với mục đích sử dụng các động cơ điện công suất lớn để tăng hiệu quả vận hành và hoạt động khai thác trên tàu thủy, điện áp cao áp được sử dụng khoảng từ 6kV đến 11kV. Bên cạnh đó, đối với các thiết bị điện cao áp xảy ra các sự cố chủ yếu là do hệ thống cách điện gây hư hại và mất an toàn điện trên tàu thủy [2].

Trên thế giới, có nhiều công trình nghiên cứu tập trung vào các chất cách điện và thử nghiệm phóng điện đối với các thiết bị cao áp khác nhau trong môi trường nghiên cứu riêng biệt. Trong nghiên cứu [3], đã thực hiện phóng điện đối với chất cách điện polymer và kết quả thấy rằng trong môi trường khắc nghiệt chất cách điện này có đặc tính cách điện cao hơn so với một số chất khác như composite. Tác giả Yee Von Thien và cộng sự đã nghiên cứu thực nghiệm về điện áp đánh thủng do sét trong điện trường không đồng đều dựa trên hình dạng khác nhau của điện cực. Các phương pháp thay thế dầu khoáng (Mineral Oil-MO) bằng dầu thực vật là dầu cọ Palm Oil (PO) và dầu dừa Coconut Oil (CO). Dựa trên phương pháp phân tích và thống kê cho thấy điện áp đánh thủng của PO và CO thấp hơn khoảng 1% so với MO [4]. Một số nghiên cứu đề xuất các loại khí như R410 gas có thể thay thế khí Sulphur-hexafluoride (SF6) thân thiện với môi trường và ứng dụng điện áp cao, ngoài ra thử nghiệm khả năng tự phục hồi cách điện của R410A đạt kết quả cao [5, 6]. Thử nghiệm phóng điện thay đổi môi trường phóng điện có chứa một số tạp chất, dầu và khí với nồng độ khác nhau sẽ làm cho điện áp đánh thủng thay đổi và làm tăng khả năng phóng điện khi vi phạm khoảng cách an toàn. Các hỗn hợp khí khác nhau được đưa vào môi trường khe hở phóng điện không đổi hoặc

thay đổi cho thấy khả năng chịu cách điện tốt đối với các loại cách điện xoay chiều và một chiều.

Trong nước, các nghiên cứu thí nghiệm phóng điện điện áp cao đối với môi trường trên tàu thủy chưa có, tập trung nghiên cứu cách điện đối với hệ thống điện. Các mô hình huấn luyện an toàn điện quy trình làm việc với điện áp cao đang dừng lại ở lý thuyết [7].

Dựa trên các mô hình thử nghiệm phóng điện điện áp cao, nhóm tác giả đề xuất phương pháp thử nghiệm phóng điện đối với môi trường khác nhau có nhiệm vụ chất dựa trên môi trường làm việc trên tàu thủy và mô hình thử nghiệm phóng điện Terco từ đó đưa ra các cảnh báo đối với an toàn điện cao áp trên tàu thủy.

Cấu trúc của bài báo có bố cục như sau: Phần 2 cơ sở lý thuyết và cấu trúc mô hình thí nghiệm cao áp. Thuật toán phân tích, đánh giá mức độ rủi ro được đề xuất trong phần 3. Phần 4 là kết quả thử nghiệm phóng điện trong phòng thí nghiệm và cuối cùng là kết luận.

2. Cơ sở lý thuyết và xây dựng mô hình phóng điện cao áp

2.1. Cơ sở lý thuyết

Điện áp phóng điện giữa hai điện cực có thể được tính bằng định luật Paschen. Định luật này được mô tả điện áp đánh thủng trong môi trường chất khí khác nhau theo hàm số của áp suất, khoảng cách điện cực và đặc tính của chất khí. Công thức tính toán theo công thức sau [8, 9]:

$$V_{bd} = \frac{B.p.d}{\ln(A.p.d) - \ln(\ln(1 + \frac{1}{\gamma}))} \quad (1)$$

Trong đó: V_{bd} là điện áp phóng điện giữa hai bản cực, p là áp suất khí, d là khoảng cách giữa hai điện cực. A và B là hằng số riêng cho loại khí. γ là hệ số phát xạ nằm trong khoảng 0 đến 1.

$$A = \frac{\varepsilon_i \cdot \sigma}{k_B T} \quad (2)$$

$$B = \frac{\sigma}{k_B T} \quad (3)$$

Trong đó: ε_i là năng lượng ion hóa, σ là tiết diện ion hóa, T là nhiệt độ chất khí.

2.2. Các phương pháp thử nghiệm

Trong nghiên cứu này, Nhóm tác giả đề xuất ba phương pháp thử nghiệm phóng điện đối với điện áp

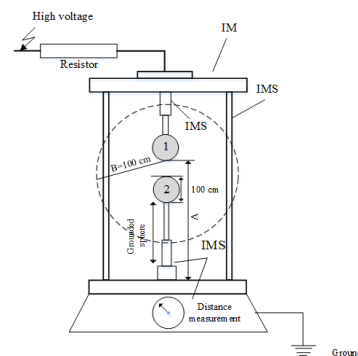
cao và đây cũng là ba phương pháp chủ yếu các nghiên cứu thực hiện phóng điện cho thiết bị điện với độ chính xác cao tới 97%.

- *Phương pháp tăng điện áp (Rising-voltage method)*: Phương pháp này cho phép thử nghiệm điện áp khác nhau như AC và xung. Với phương pháp này, điện áp sẽ tăng lên với tốc độ không đổi từ mức điện áp ban đầu đến điện áp phóng điện. Trong thí nghiệm này, điện áp ban đầu trong khoảng 5kV với khoảng thời gian $\Delta T = 60s$ và số lần thí nghiệm là 20 lần.

- *Phương pháp tăng giảm (Up-and-down method)*: Phương pháp dựa trên ước tính điện áp đánh thủng 50% điện áp phóng điện. Khi phóng điện lần đầu tiên điện áp sẽ giảm một bước ΔU khi đó sẽ không có sự phóng điện và tăng trở lại cho đến khi sự đánh thủng tiếp theo xảy ra. Phương pháp này điện áp áp ban đầu trong khoảng 5kV với khoảng thời gian $\Delta T = 60s$ và số lần thí nghiệm là 20 lần.

- *Phương pháp nhiều cấp (Multiple-level method)*: Là phương pháp giữ nguyên điện áp không đổi khe hở quả cầu sẽ thay đổi và ghi lại số lần phóng điện và xác suất xảy ra phóng điện với các cấp điện áp khác nhau. Trong lần thử nghiệm này, số lần thử nghiệm là 20 lần và với khoảng thời gian $\Delta T = 60s$. Theo kinh nghiệm trước đây, các mức điện áp ban đầu cho tất cả các mẫu được đặt ở mức 5kV, 8kV và 10kV với khoảng cách khe hở lần lượt là 2,5mm, 4,2mm và 5,8mm.

Tiếp theo, mô hình thí nghiệm xây dựng khe hở cầu được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Khoảng cách mô hình phóng điện hình cầu dạng đứng

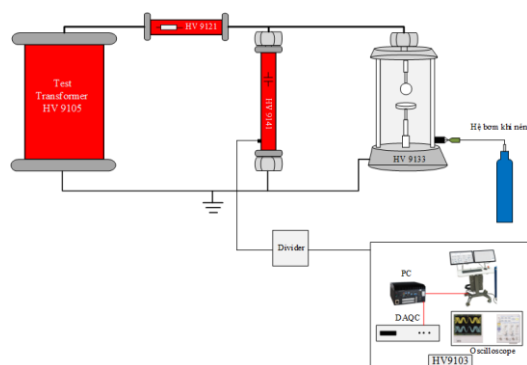
Hình 1 thể hiện khoảng cách hai quả cầu phóng điện 1 và 2. Trong đó, quả cầu 1 nối với một cực của máy biến áp còn quả cầu 2 sẽ nối với đất. IMS là vật liệu cách điện. Điểm phóng điện phụ thuộc vào khoảng cách giữa hai quả cầu và nằm trong giới hạn $6D \leq A \leq 8D$ với D là đường kính quả cầu. Để mô phỏng quá trình nhiễm bẩn trong môi trường, bề mặt

hai quả cầu được bôi dầu máy hoặc dầu mỡ. Ngoài ra, mức độ ô nhiễm dầu còn được phun trong không khí xung quanh trong mô hình phóng điện.

2.3. Xây dựng mô hình thí nghiệm phóng điện

Dựa trên hai tiêu chuẩn IEC 60270 và IEC 60060 xác định bằng phương pháp kỹ thuật lên xuống kết hợp với bộ thí nghiệm TERCO để tạo ra điện áp xoay chiều cao áp (HVAC) và điện áp một chiều cao áp (HVDC).

Bình thử nghiệm HV9133 được cho phép thay đổi để đáp ứng yêu cầu kỹ thuật về việc thay đổi khe hở không khí của điện cực. Vì mục đích này, một bộ truyền động tuyến tính được lắp đặt ở lớp dưới cùng của bình thử nghiệm. Bình thử nghiệm được cấu tạo bằng vật liệu cách điện và cho phép bơm khí vào khu vực phóng điện. Dưới bình có một van một chiều cho phép bơm và hút khí trong bình. Từ bàn điều khiển, khoảng cách khe hở không khí và điện áp xoay chiều cao áp có thể thay đổi để phù hợp với mục đích thí nghiệm. Sơ đồ cấu trúc lắp đặt mô hình thí nghiệm được thể hiện trên Hình 2.



Hình 2. Mô hình thí nghiệm phóng điện cao áp với môi trường nhiễm bẩn

Trong Hình 2, một mô hình bao gồm một máy biến áp HV 9105 có chức năng tạo ra điện áp xoay chiều cao áp dựa trên điện áp đầu vào hạ áp. HV 9141 là tụ đo lường có nhiệm vụ thu thập dữ liệu điện áp cao về

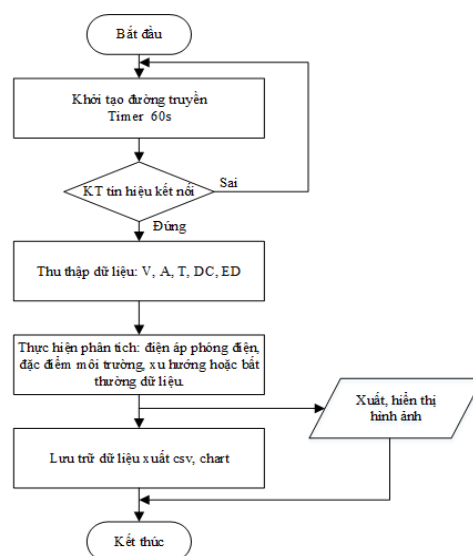
bàn điều khiển và máy tính. HV9133 là mô hình phóng điện và HV9103 là bàn điều khiển thí nghiệm. Bảng 1 thể hiện số lượng và thiết bị cho quá trình thí nghiệm.

HV9105 có thể tạo ra điện áp xoay chiều 220V/110kV. Giá trị điện áp cao áp đo được thể hiện trong đồng hồ HV9150. Kết quả phóng điện được ghi lại qua máy oscilloscope HV9159 và camera HV. Cả điện cực hình cầu và hình kim đều được làm từ thép không gỉ. Để bảo vệ mẫu và điện cực trong quá trình thử nghiệm, một điện trở giới hạn dòng điện 10MΩ đã được thêm vào mạch để giới hạn dòng điện đánh thủng.

3. Xây dựng thuật toán phân tích, đánh giá mức độ rủi ro

3.1. Xây dựng thuật toán phân tích dữ liệu

Phân tích hiện tượng phóng điện cao áp thường đề cập đến sự cố cách điện bị hỏng, ion hóa không khí và môi trường bị nhiễm bẩn. Để phân tích dữ liệu từ quá trình thí nghiệm, Nhóm tác giả đã xây dựng một thuật toán có nhiệm vụ thu thập dữ liệu từ bàn điều khiển và phân tích dữ liệu sau khi thí nghiệm.



Hình 3. Thuật toán nhận và phân tích dữ liệu

Hình 3 thể hiện thuật toán nhận và phân tích dữ liệu. Phần mềm phân tích và máy tính được kết nối với hệ thống qua mạng LAN và dây USB 3.0 cho phép kết nối liên tục và có dự phòng. Thời gian lấy dữ liệu là 2 giây. Tiếp theo, dữ liệu điện áp cao áp (V), dòng điện (A), thời gian (T), điện áp đánh thủng và điều kiện môi trường (ED) được thu thập vào đầu vào của phần mềm phân tích. Từ dữ liệu này phần mềm sẽ phân tích tìm kiếm điểm bất thường và xu hướng phóng điện theo

Bảng 1. Thiết bị thí nghiệm

Tên thiết bị	Ký hiệu	Số lượng
Máy biến áp	HV9105	1
Bàn điều khiển	HV9103	1
AC Peak	HV9150	1
Bộ điện cực	HV9133	1
Máy tính	HV9104	3
Điện trở	HV9121	1
Tụ đo lường	HV9141	1

luồng dữ liệu. Kết quả được lưu dưới dạng số liệu excel, hình ảnh các lần phóng điện để làm cơ sở dữ liệu. Các báo cáo tự động tóm tắt các phát hiện như điện áp đánh thủng, dòng điện lớn nhất và thời gian phóng điện được đưa đến người dùng.

3.2. Thuật toán đánh giá mức độ rủi ro an toàn điện cao áp

Sau khi xây dựng được thuật toán thu thập dữ liệu, để đánh giá mức độ rủi ro an toàn điện cao áp trong môi trường làm việc trên tàu thủy, Nhóm tác giả tiến hành xây dựng thuật toán đánh giá mức độ rủi ro dựa trên một số tiêu chuẩn quy định của công ước SOLAS được IMO thông qua như Điều 42-Chương II-1, Điều 10-Chương II-2, IMO Resolution A.1116(30) và IEC 60092-301 (Hệ thống điện trên tàu) và các tiêu chuẩn an toàn điện liên quan khác được các quốc gia thành viên IMO công nhận và áp dụng rộng rãi.

//Pseudo code: Thuật toán đánh giá rủi ro

START

//Bước 1: Thu thập, truy cập dữ liệu

Điện áp cao áp, nhiệt độ, độ ẩm, điều kiện cách điện

//Bước 2: Kiểm tra điều kiện điện áp với điện áp giới hạn:

Nếu điện áp > Ngưỡng điện áp an toàn: Tiến hành xác định rủi ro. Nếu không: điện áp an toàn

//Bước 3: Kiểm tra điều kiện dòng điện $I \leq I_{gh}$

Nếu dòng điện > Ngưỡng dòng điện an toàn: Tiến hành xác định rủi ro. Đánh giá điện áp

// Bước 4: Kiểm tra điều kiện môi trường

Nếu nhiệt độ > Ngưỡng nhiệt độ max hoặc độ ẩm > max_humidity_threshold:

Tiến hành xác định rủi ro

// Bước 5: Kiểm tra điều kiện cách điện

Nếu insulation_condition == "Kém":

Tiến hành xác định Rủi ro

// Bước 6: Xác định và tính toán rủi ro

RiskFactors: Danh sách lưu trữ các yếu tố rủi ro đã xác định

Nếu điện áp > điện áp an toàn:

Thêm nhãn "High Voltage" vào RiskFactors.

// Bước 7: Tính điểm rủi ro tổng thể

RiskScore = CalculateRiskScore(RiskFactors)

// Bước 8: Quyết định mức rủi ro

Nếu RiskScore > risk_threshold:

HighRisk = True

END

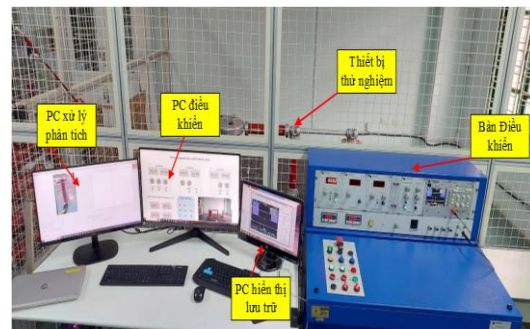
Thuật toán được mô tả như sau, khi đã lấy được dữ liệu từ thuật toán Mục 3.1 thuật toán sẽ đánh giá các thông số dựa trên giá trị điện áp phóng điện tiêu chuẩn đã được thí nghiệm. Các yếu tố môi trường, độ ẩm, nhiệt độ được coi như tác nhân xảy ra phóng điện trong môi trường đặc biệt. Sau khi phân tích thuật toán sẽ đưa ra điểm số và mức độ phóng điện đối với từng môi trường khác nhau và đưa ra cảnh báo như bước 7 và bước 8 trong thuật toán.

4. Kết quả và phân tích

4.1. Các bước tiến hành thử nghiệm

Trong quá trình thử nghiệm, nhiệt độ môi trường trên tàu thủy khu vực lắp đặt trong các mùa và theo khảo sát dao động khoảng từ 35°C-40°C, áp suất không khí 756,5mmHg và độ ẩm tuyệt đối 9,54g/cm³ và độ ẩm tương đối khoảng 65%. Với ba phương pháp đo được thực hiện giá trị cuối cùng của điện áp đánh thủng được xác định là giá trị trung bình của năm phép đo liên tiếp, với sai số nhỏ hơn 3,5%.

Tiếp theo, bề mặt quả cầu được phun dầu FO và dầu DO với các hạt nhỏ. Một phần dầu này được pha thêm các tạp chất như vụn kim loại, nước muối để thử nghiệm khả năng phóng điện. Điều kiện môi trường cũng thay đổi dựa trên độ ẩm và nhiệt độ thay đổi. Sự dụng một thiết bị phun sương, gia nhiệt vào khu vực mô phỏng giữa hai quả cầu như Hình 4.



Hình 4. Phân cứng mô hình thử nghiệm

Trường hợp 1: Tiến hành trong điều kiện bình thường trong phòng thí nghiệm với các thông số sau:

Nhiệt độ phòng và HV9133 là 35°C, áp suất không khí 756,5mmHg và độ ẩm tuyệt đối 9,54g/cm³ và độ ẩm tương đối khoảng 65%. Bề mặt hai quả cầu không bám dầu [10].

Trường hợp 2: Tiến hành trong điều kiện thay đổi trong phòng thí nghiệm với các thông số sau:

Nhiệt độ phòng 35°C, HV9133 là 37°C áp suất không khí 2280mmHg và độ ẩm tuyệt đối 10,54g/cm³ và độ ẩm tương đối khoảng 70%. Bề mặt hai quả cầu bám hạt dầu 30%.

Trường hợp 3: Tiến hành trong điều kiện thay đổi trong phòng thí nghiệm với các thông số sau:

Nhiệt độ phòng 35°C, HV9133 là 39°C, áp suất không khí 3024mmHg và độ ẩm tuyệt đối 11,54g/cm³ và độ ẩm tương đối khoảng 75%. Bề mặt hai quả cầu bám hạt dầu 70% và xung quanh hai quả cầu có dầu và độ ẩm cao.

4.2. Kết quả thử nghiệm và phân tích

Sau quá trình thử nghiệm các giá trị điện áp đánh thủng trong không khí đối với mô hình quả cầu có đường kính thay đổi và đã hiệu chỉnh các thông số nhiệt độ, áp suất và điều kiện môi trường theo công thức (1)-(3). Dữ liệu thử nghiệm được cho trong Bảng 2 với các trường hợp khác nhau: Trong Bảng 2 thể hiện giá trị điện áp phóng điện trong điều kiện môi trường 1. Với khoảng cách 20mm điện áp phóng điện thử nghiệm đạt 13,41kV trong khi giá trị điện áp theo tính toán là 14,21kV đạt tỉ lệ 94,2%. Chênh lệch điện áp khoảng 5,8% cho thấy mô hình thử nghiệm

khá chính xác trong điều kiện môi trường ổn định. Tiếp theo, khoảng cách 5mm thì điện áp đánh thủng thử nghiệm với điện áp đánh thủng lý thuyết chênh lệch không đáng kể chỉ khoảng 2%. Bảng 3 thể hiện kết quả thử nghiệm và lý thuyết điện áp đánh thủng với trường hợp 2 cho thấy điện áp đã giảm xuống rõ rệt chỉ đạt 11,78kV với khoảng cách là 20mm. Trường hợp 2, một lớp hạt dầu phủ trên bề mặt của cầu làm điện trường phân bố không đồng đều.

Bảng 4 mô tả kết quả thử nghiệm trong Trường hợp 3, cho thấy mức độ nhiễm bẩn tăng cao khoảng 70%, độ ẩm cao làm điện áp phóng điện của hai điện cực càng thấp chỉ khoảng 3,10kV với khoảng cách là 2mm-5mm thấp hơn nhiều so với điện áp làm việc.

Từ kết quả trên, với mức độ nhiễm bẩn với lớp hạt dầu làm cho sự phân bố không đồng đều điện trường từ đó giảm khả năng cách điện của môi trường. Nhiễm bẩn và độ ẩm cao (Trường hợp 3) làm giảm khả năng cách điện của không khí và hình thành đường dẫn điện giữa hai điện cực.

Bảng 2. Điện áp đánh thủng trong điều kiện thử nghiệm Trường hợp 1

Khoảng cách d [mm]	Điện áp đánh thủng thử nghiệm [kV _{max}]	Điện áp đánh thủng tiêu chuẩn [kV _{max}]	Điện áp đánh thủng lý thuyết [kV _{max}]
2	6,45	6,84	6,67
5	7,12	7,42	7,20
8	7,98	8,65	8,35
10	8,36	9,21	8,96
15	11,85	12,43	12,15
20	13,41	15,65	14,21

Bảng 3. Điện áp đánh thủng trong điều kiện thử nghiệm Trường hợp 2

Khoảng cách d [mm]	Điện áp đánh thủng thử nghiệm [kV _{max}]	Điện áp đánh thủng tiêu chuẩn [kV _{max}]	Điện áp đánh thủng lý thuyết [kV _{max}]
2	5,12	5,97	5,32
5	6,45	7,13	6,74
8	7,06	8,65	7,56
10	7,68	8,52	8,02
15	10,25	11,52	10,84
20	11,78	12,46	12,35

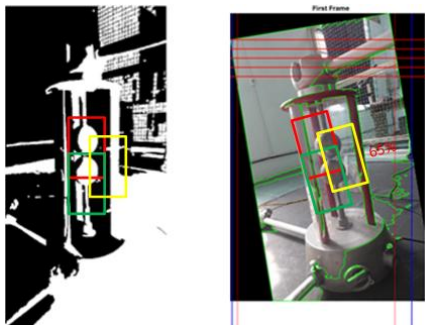
Bảng 4. Điện áp đánh thủng trong điều kiện thử nghiệm Trường hợp 3

Khoảng cách d [mm]	Điện áp đánh thủng thử nghiệm [kV _{max}]	Điện áp đánh thủng tiêu chuẩn [kV _{max}]	Điện áp đánh thủng lý thuyết [kV _{max}]
2	3,10	4,35	3,25
5	3,85	4,52	4,10
8	4,54	5,68	4,85
10	5,64	6,84	5,84
15	6,78	7,95	7,05
20	9,56	10,25	10,04

Tuy nhiên, với quá trình thử nghiệm 20 lần, nhóm tác giả nhận thấy mức độ ion hóa trong môi trường thử nghiệm phụ thuộc vào mức độ nhiễm tạp chất và độ ẩm. Tăng khoảng cách lên 30mm với môi trường ban đầu thì điện áp đánh thủng tăng cao khoảng 35,54kV. Như vậy, điện áp phóng điện tăng theo khoảng cách giữa hai quả cầu nhưng giá trị tăng bị phụ thuộc vào nhiệt độ, độ ẩm, tính chất và nhiễm bẩn bề mặt của môi trường, thiết bị.

Để phân tích mức độ nhiễm tạp chất trên bề mặt hai điện cực, Nhóm tác giả sử dụng phần mềm để phân tích và đánh giá mức độ nhiễm bẩn từ đó phục vụ dữ liệu dự báo mức độ phóng điện.

Hình 5 mô tả mức độ nhiễm bẩn bề mặt quả cầu với mức độ khác nhau. Dữ liệu đầu vào là hình ảnh trực tiếp từ thực tế đưa và phần mềm sau đó phân tích và đưa ra kết quả dự đoán khoảng 65% mức độ nhiễm bẩn.



Hình 5. Hình ảnh phân tích mức độ nhiễm bẩn bề mặt

5. Kết luận

Nghiên cứu hiện tượng phóng điện với điện áp cao áp trên tàu thủy là nhiệm vụ cấp thiết hiện nay. Thử nghiệm, tính toán và xác định được điện áp phóng điện trong môi trường đặc biệt giúp hạn chế được các rủi ro tai nạn an toàn điện trong thực tế. Nghiên cứu này bước đầu đã xây dựng được mô hình thử nghiệm phóng điện với các cấp điện áp cao cho phép làm việc dưới tàu thủy hiện nay. Kết quả nghiên cứu giúp hạn chế sự cố phóng điện xảy ra trên tàu thủy. Dữ liệu thu thập sẽ giúp cải thiện cách điện, tăng độ bền và là nền tảng cơ sở dữ liệu phục vụ nhằm dự đoán và phát triển các rủi ro trong tương lai.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT 24-25.66.**

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] O'Donovan, M., & Barry, N. (2013). *Shipboard high voltage operations and management*. In Proceedings of the Universities Power

Engineering Conference.

<https://doi.org/10.1109/UPEC.2013.6714921>

- [2] Im, M., & Sin, H.-S. (2015). *A Study on the Training of Maritime Cadets of Increasing High Voltage Ships*. Transactions of the KSME C: Industrial Technology and Innovation, Vol.3, pp.29-36.
<https://doi.org/10.3795/KSME-C.2015.3.1.029>
- [3] Varivodov, V. N., Kovalev, D. I., Golubev, D. V., Akinin, N. A., Timofeev, E. M., & Tarasova, T. P. (2024). *Selection of Methods and Standards for the High-Voltage Testing of Polymer Insulators*. Power Technology and Engineering, Vol.57(5), pp.795-800.
<https://doi.org/10.1007/s10749-024-01737-7>
- [4] Thien, Y., Azis, N., Jasni, J., Kadir, Z., Yunus, R., Ishak, M., & Yaakub, Z. (2016). *Evaluation on the Lightning Breakdown Voltages of Palm Oil and Coconut Oil under Non-Uniform Field at Small Gap Distances*. Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol.11, pp.184-191.
<https://doi.org/10.5370/JEET.2016.11.1.184>
- [5] Khan, B., Saleem, J., Khan, F., Faraz, G., Ahmad, R., Rehman, N. U., & Ahmad, Z. (2019). *Analysis of the dielectric properties of R410A Gas as an alternative to SF6 for high-voltage applications*. In High Voltage, Vol.4, Issue 1, pp.41-48.
<https://doi.org/10.1049/hve.2018.5068>
- [6] J. G. Owens. (2016). *Greenhouse gas emission reductions through use of a sustainable alternative to SF6*, IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Montreal, QC, Canada, pp.535-538.
<https://doi.org/10.1109/EIC.2016.7548658>
- [7] Hung, Đ., Huy, N., (2019). *Mô phỏng hiện tượng phóng điện trên bề mặt cách điện nhiễm bẩn không đồng nhất dưới điện áp xung*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ năng lượng, Số 19, tr.9-15.
<https://sti.vista.gov.vn/tw/Pages/tai-lieu-khcn.aspx?ItemID=284669>
- [8] Liu, X., Shi, Z., Yang, G., & Yan, X. (2017). *Experimental study on breakdown voltage of high pressure and high temperature helium gas between parallel electrodes*. Annals of Nuclear Energy, Vol.110, pp.1224-1231.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.08.031>

- [9] Palomares, J. C., & Reyes, P. G. (2022). *Experimental study of the modified Paschen's law: glow discharge of Ethanol (CH_3CH_2OH), Methanol (CH_3OH) and its mixture*. Rev. Mex. Fis., Vol.68, No.4 Jul-Aug, p.041502.
<https://doi.org/10.31349/RevMexFis.68.041502>.
- [10] Salem, A. A., Lau, K. Y., Rahiman, W., Al-Gailani, S. A., Abdul-Malek, Z., Rahman, R. A., Al-Ameri, S. M., & Sheikh, U. U. (2021). *Pollution flashover characteristics of coated insulators under different profiles of coating damage*. Coatings, Vol.11(10).
<https://doi.org/10.3390/coatings11101194>.

Ngày nhận bài:	20/12/2024
Ngày nhận bản sửa:	27/12/2024
Ngày duyệt đăng:	04/01/2025