



RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL SAFETY TRAINING MODEL FOR SHIPS BASED ON VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Nguyen Van Hung*, Nguyen Thanh Van

Vietnam Maritime University, No 484 Lach Tray Street, Haiphong, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 11/05/2025

Revised: 25/09/2025

Accepted: 06/10/2025

Published online: 15/10/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.8.1>

* *Corresponding author*

Email: hung.ddt@vimaru.edu.vn

Abstract. Currently, waterway transportation accounts for a significant share of global import and export trade. Additionally, high-voltage electrical equipment is increasingly being deployed on newly built ships to enhance their load capacity. However, working with high-voltage electrical systems poses potential hazards to crew members, requiring specialized skills and knowledge. This paper proposes the development of a realistic flashover voltage test model within a shipboard environment using the TERCO equipment. A model has been developed to evaluate and simulate high-voltage electrical safety training in accordance with IMO standards, utilizing Virtual Reality (VR) technology on the Unity 3D platform integrated with Artificial Neural Networks (ANN) and Bootstrapping techniques. This system enables crew members to engage in realistic and interactive training scenarios that enhance life safety awareness during high-voltage operations. Preliminary research results demonstrate significant advantages over conventional training methods, including enhanced realism and flexible scenario customization. Evaluation of crew performance using the system indicates a training effectiveness rate of 90 %, effectively fulfilling the core requirements for high-voltage electrical safety training among crew members.

Keywords: high-voltage electrical safety, artificial neural network, high-voltage discharge, ship electrical safety, virtual reality simulation.



NGHIÊN CỨU, PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH HUẤN LUYỆN AN TOÀN ĐIỆN CAO ÁP TRÊN TÀU THỦY DỰA TRÊN CÔNG NGHỆ THỰC TẾ ẢO VÀ MẠNG NƠ-RON NHÂN TẠO

Nguyễn Văn Hùng*, Nguyễn Thanh Vân

Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam, Số 484 Lạch Tray, Hải Phòng, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 11/05/2025

Ngày nhận bài sửa: 25/09/2025

Ngày chấp nhận đăng: 06/10/2025

Ngày xuất bản Online: 15/10/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.8.1>

* Tác giả liên hệ

Email: hung.ddt@vimaru.edu.vn

Tóm tắt. Hiện nay, vận chuyển hàng hóa bằng đường thủy chiếm tỷ trọng cao và đóng vai trò quan trọng trong thương mại xuất khẩu, nhập khẩu trên thế giới và Việt Nam. Bên cạnh đó, xu hướng hiện đại hóa đội tàu dẫn đến các thiết bị điện sử dụng điện cao áp đang triển khai trên các tàu thủy đóng mới với mục đích tăng cường khả năng tải trọng. Tuy nhiên, việc tiếp xúc và làm việc với các thiết bị điện cao áp tiềm ẩn các nguy cơ mất an toàn đối với thuyền viên và yêu cầu họ phải có các kỹ năng, kiến thức chuyên môn về an toàn điện. Bài báo này đề xuất phương pháp thử nghiệm, thu thập tạo bộ dữ liệu điện áp phóng điện cao áp trên thiết bị TERCO dựa trên điều kiện môi trường thực tế trên tàu thủy. Đồng thời, xây dựng một mô hình đánh giá, mô phỏng huấn luyện an toàn điện cao áp theo tiêu chuẩn IMO dựa trên công nghệ thực tế ảo trên nền tảng Unity 3D kết hợp với mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) Bootstrapping cho phép thuyền viên thực hành đảm bảo an toàn tính mạng trong quá trình huấn luyện. Kết quả bước đầu nghiên cứu đã cho thấy các tính năng vượt trội hơn so với phương pháp đào tạo truyền thống hiện nay như sát với thực tế, cho phép điều chỉnh kịch bản đào tạo. Dựa trên kết quả đào tạo thuyền viên có thể đánh giá hiệu suất của hệ thống đạt 90 % đáp ứng hiệu quả các tiêu chí cơ bản trong đào tạo an toàn điện cao áp cho thuyền viên hiện nay.

Từ khóa: an toàn điện cao áp, mạng nơ-ron nhân tạo, điện áp phóng điện cao áp, an toàn điện cho tàu thủy, mô phỏng thực tế ảo.

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, vận chuyển hàng hóa bằng đường thủy đang ngày càng phát triển với quy mô lớn. Phương thức vận chuyển này mang lại hiệu quả cao và chi phí thấp với khối lượng vận chuyển lớn, thời gian giao hàng nhanh. Bên cạnh đó, xu hướng đóng tàu mới ứng dụng nhiều công nghệ, thiết bị điện hiện đại giúp tăng cường khả năng tải trọng hàng hóa. Các thiết bị điện này sử dụng điện áp cao áp với mục đích nâng cao công suất sử dụng [1]. Thông thường, điện áp cao áp trên tàu hiện nay từ 6 kV đến 11 kV để cung cấp năng lượng cần thiết cho các thiết bị làm việc hiệu quả. Thực tế, một số tàu phục vụ điện gió ở Việt Nam với động cơ điện công suất lớn đã sử dụng điện áp lên tới 22 kV và 25 kV [2]. Do đó, việc sử dụng thiết bị điện phổ biến này trên tàu khiến nhiều thuyền viên nguy cơ tiếp xúc với các mối nguy hiểm về điện. Vì vậy cần phải có các biện pháp như việc trang bị các kiến thức chuyên môn về an toàn điện khi làm việc với thiết bị điện cao áp để đảm bảo an toàn tính mạng cho con người trong quá trình vận hành [3]. Các nghiên cứu liên quan đến lĩnh vực điện cao áp chủ yếu thử nghiệm các vật liệu cách điện để tăng cường khả năng cách điện trong môi trường làm việc khác nhau trong hệ thống điện. Các phương pháp dự báo điện áp phóng điện dựa trên các mô hình mạng nơ-ron nhân tạo để dự báo hư hỏng cách điện, điện áp phóng điện có thể xảy ra trong quá trình làm việc [4]. Trong công trình [5], H. Stefan, M. Mortimer, B. Horan, S. McMillan đã xây dựng phần mềm mô phỏng thực tế ảo để đào tạo an toàn điện với điện áp thấp và đánh giá học viên. Kết quả nghiên cứu này cho thấy rằng hiệu quả sau khi học viên được tiếp cận với công nghệ thực tế ảo đã rút ngắn được thời gian và khả năng ghi nhớ kỹ năng an toàn của học viên tốt hơn tạo tâm lý tích cực trong thời gian đào tạo. Mạng nơ-ron nhân tạo ANN Bootstrapping đã được sử dụng trong đào tạo, phân loại các trường hợp hư hỏng cách điện và phát hiện lỗi đối với thiết bị điện cao áp [6, 7]. Môi trường làm việc trên biển khắc nghiệt bao gồm nước mặn, độ ẩm cao và chuyển động liên tục khiến thuyền viên phải đối mặt với nhiều rủi ro. Do đó, nhiệm vụ quan trọng của các biện pháp an toàn điện hiệu quả, đào tạo phù hợp, kiểm tra an toàn thường xuyên và diễn tập để giảm thiểu rủi ro liên quan đến công việc điện trên tàu.

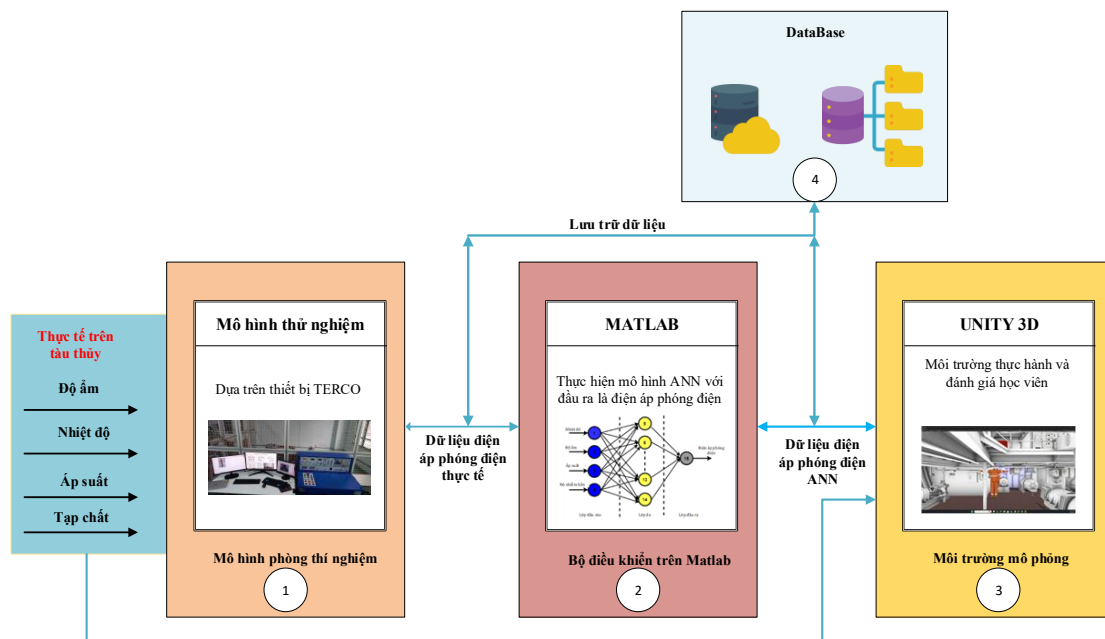
Trong ngành hàng hải, các công nghệ mô phỏng thực tế ảo và trí tuệ nhân tạo được ứng dụng như hệ thống mô phỏng hàng hải, hệ thống chống cháy, chống chìm và hệ thống mô phỏng thực tế ảo chữa cháy [8, 9]. Các phần mềm này giúp người học tiếp cận công nghệ mới và an toàn đến tính mạng khi đào tạo trong các môi trường nguy hiểm. Nhược điểm của các hệ thống mô phỏng mua từ nước ngoài là chi phí giá thành cao, khó mở rộng và can thiệp sâu để thay đổi hệ thống sau này. Trong lĩnh vực an toàn điện, một số nghiên cứu tập trung xây dựng các phần mềm mô phỏng nhưng chưa ứng dụng các thuật toán và công nghệ trí tuệ nhân tạo để phát triển và nâng cao hiệu suất của hệ thống [10, 11]. Trong nước, các nghiên cứu tập trung cho hệ thống điện và đặc biệt chưa có hệ thống mô phỏng, đào tạo an toàn điện cao áp trên tàu thủy ở Việt Nam. Các phương pháp đào tạo truyền thống chủ yếu tập trung vào lý thuyết thông qua bài giảng, tài liệu video với ưu điểm là hệ thống kiến thức rõ ràng nhưng thiếu khả năng thực hành, tiếp cận tình huống thực tế. Bên cạnh đó, phương pháp đào tạo thực hành tại chỗ được tiếp xúc với các thiết bị thực tế nhưng đòi hỏi người dạy giàu kinh nghiệm, dễ dàng gây tai nạn nếu không kiểm soát tốt. Từ lý do trên, Nhóm tác giả đề xuất xây dựng một hệ thống mô phỏng an toàn điện cao áp trên tàu thủy dựa trên kết quả thử nghiệm thực tế với thiết bị mô phỏng cao áp TERCO. Các kịch bản mô phỏng ứng dụng ANN-Bootstrapping dựa trên các quy định của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) được xây dựng trên phần mềm UNITY 3D và công nghệ thực tế ảo tăng cường. Kết quả nghiên cứu, học viên sẽ được đánh giá dựa theo điểm số, thời gian và các bước thực hiện an toàn điện. Điểm mới của nghiên cứu này là phát triển mô hình huấn luyện an toàn điện cao áp chuyên cho môi trường trên tàu thủy.

Khác với các nghiên cứu trước đây chủ yếu mô phỏng VR cho hệ thống điện áp thấp hoặc mang tính lý thuyết, nghiên cứu này xây dựng được bộ dữ liệu điện áp phóng điện cao áp thực nghiệm trên thiết bị TERCO với điều kiện môi trường gần thực tế. Bộ dữ liệu này được sử dụng để huấn luyện ANN kết hợp Bootstrapping, có vai trò quan trọng trong việc dự đoán điện áp phóng điện và điều chỉnh động các kịch bản VR. Nhờ đó, hệ thống đảm bảo tính thích ứng cao, vượt trội hơn phương pháp đào tạo truyền thống và có tính ứng dụng thực tiễn cho huấn luyện thuyền viên. Đây là nguồn dữ liệu mở giúp làm chủ công nghệ trong nghiên cứu hiện nay.

Cấu trúc của bài báo như sau: Phần 2 trình bày cấu trúc của mô hình thực nghiệm điện áp cao áp dựa trên thí nghiệm TERCO. Mô hình mạng nơ-ron nhân tạo và phần mềm mô phỏng thực tế ảo đánh giá rủi ro được đề xuất trong Phần 3. Phần 4 trình bày kết quả thử nghiệm hệ thống và đánh giá kết quả và cuối cùng là kết luận, hướng nghiên cứu trong tương lai.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỬ NGHIỆM PHÓNG ĐIỆN

2.1. Đề xuất cấu trúc mô hình thử nghiệm



Hình 1. Cấu trúc tổng quan của hệ thống

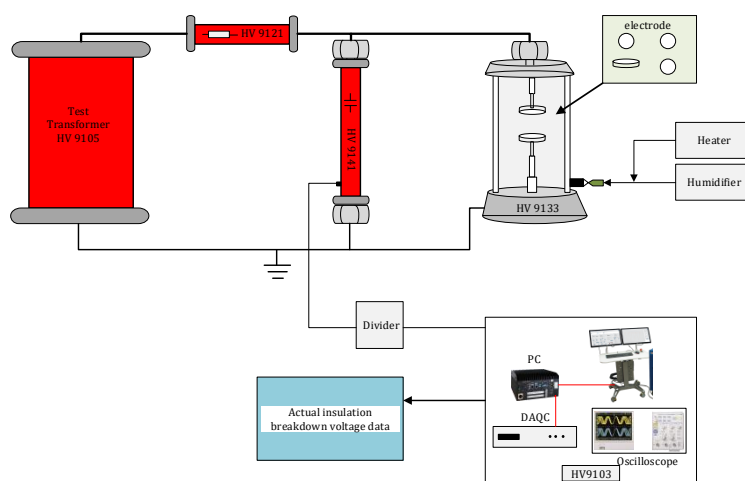
Hình 1 thể hiện cấu trúc của hệ thống thử nghiệm dựa trên cấu trúc được mô tả như sau:

Khối 1: là thiết bị thử nghiệm điện cao áp với nhiều modul có chức năng khác nhau trong đó có thử nghiệm phóng điện trong môi trường đặc biệt. Kết quả của mô hình là điện áp phóng điện dựa trên dữ liệu thực tế từ môi trường trên tàu. Khối 2: là mô hình mạng nơ-ron nhân tạo được xây dựng trên Matlab có chức năng dự báo điện áp phóng điện với dữ liệu ở khối 1 và so sánh với giá trị điện áp phóng điện thực tế. Ngoài ra, kết quả của khối này được gửi dữ liệu sang phần mềm mô phỏng an toàn điện cao áp. Kết quả học viên thực hành sẽ đưa vào mô hình để điều chỉnh các kịch bản và đánh giá học viên. Khối 3: là môi trường mô phỏng VR được xây dựng dựa trên một con tàu thực tế, tại đây học viên sẽ thao tác các bước

huấn luyện an toàn điện cao áp giống với môi trường trên tàu. Khối 4: có chức năng lưu lại quá trình đào tạo, thực hành từ đó đưa ra các phương pháp đào tạo thực tế.

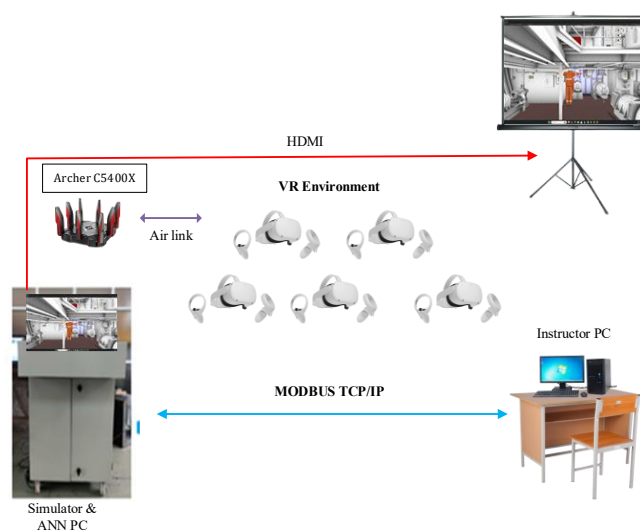
2.2. Phương pháp thử nghiệm

Trong nghiên cứu thử nghiệm hiện tượng phóng điện cao áp hiện nay có một số phương pháp thử nghiệm điển hình là phương pháp tăng điện áp với bước cố định. Thiết bị thử nghiệm điện áp của hãng TERCO cho phép thử nghiệm với mỗi lần tăng điện áp là $DU = 0,5 kV$ phụ thuộc vào tốc độ mỗi lần tăng điện áp đầu ra của máy biến áp tự ngẫu [7, 12]. Xung quanh điện khu vực này được bọc cách điện kín và tạo môi trường giống trên tàu thủy. Điều kiện xảy ra phóng điện trong môi trường tàu thủy dựa trên nguyên nhân như tàu chở dầu, tích phóng năng lượng gây cháy hỗn hợp khí hydrocarbon trong không khí [13]. Ngoài ra, nguyên nhân khác do độ ẩm cao, môi trường nhiễm muối, dầu mỡ, cách điện đối với thiết bị cao áp suy giảm, già hóa. Nhóm tác giả sử dụng nhiệt độ, độ ẩm và tạp chất dầu, muối để có thể tạo ra môi trường phóng điện cao áp như Hình 2.



Hình 2. Mô hình khe hở phóng điện HV9133

2.3. Đề xuất xây dựng mô hình mô phỏng phóng điện cao áp trên tàu thủy



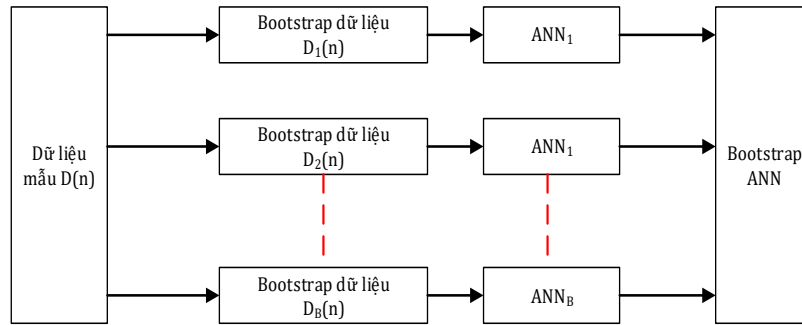
Hình 3. Mô hình hệ thống mô phỏng thực tế ảo huấn luyện an toàn điện cao áp.

Sau khi thử nghiệm điện áp phóng điện trên mô hình TERCO, nhóm tác giả thu được dữ liệu là điện áp phóng điện thực tế. Dữ liệu này là đầu vào của mạng nơ-ron nhân tạo và điện áp phóng điện trong môi trường thực tế ảo. Hình 3 thể hiện cấu trúc giao tiếp của hệ thống mô phỏng phóng điện cao áp.

Các mô hình mạng nơ-ron nhân tạo được xây dựng trên Matlab Simulink với thời gian thực có thể điều khiển và thay đổi trạng thái kích bản thay đổi với mỗi đối tượng đào tạo. Hình 3 mô tả sơ đồ kết nối với hệ thống mô phỏng thực tế ảo.

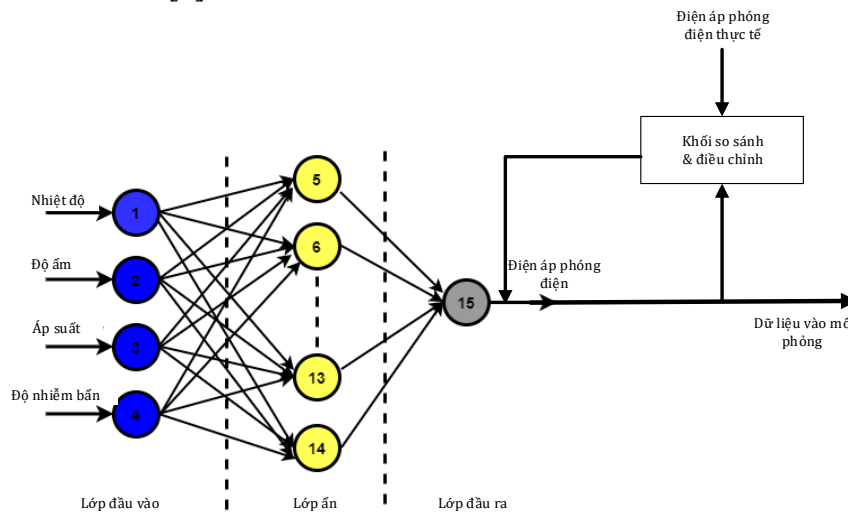
3. THIẾT KẾ PHẦN MỀM MÔ PHỎNG THỰC TẾ ẢO KẾT HỢP MẠNG NƠ-RON NHÂN TẠO

3.1. Mô hình ANN Bootstrapping



Hình 4. Mô hình hệ thống mô phỏng thực tế ảo huấn luyện an toàn điện cao áp.

Mô hình Bootstrapping là một kỹ thuật thống kê để tăng không gian mẫu khi số lượng mẫu dữ liệu có sẵn để đào tạo các thuật toán học máy có hạn. Ngoài việc tăng số lượng quan sát, bootstrapping còn mang lại lợi thế là cải thiện độ chính xác cũng như tăng hiệu quả của ước tính phần trăm. Mẫu bootstrap là mẫu ngẫu nhiên được thực hiện với sự thay thế, số lần một quan sát ngẫu nhiên được chọn từ dữ liệu thực. Ngoài ra, mô hình ANN kết hợp với Bootstrapping có phản hồi sẽ làm cho kết quả dự đoán điện áp phóng điện chính xác hơn. Số lượng nơ-ron trong lớp ẩn, số lượng lớp ẩn cũng như tốc độ học được thay đổi để có được các tham số tối ưu như Hình 4 [7].



Hình 5. Mô hình ANN Bootstrap được đề xuất.

Mô hình ANN được đề xuất có bốn đầu vào (nhiệt độ, độ ẩm, áp suất, tạp chất) và một đầu ra (điện áp phóng điện), như thể hiện trong Hình 5.

Hình 5 thể hiện cấu trúc lớp của mô hình ANN được áp dụng trong hệ thống dự báo điện áp phóng điện cao áp trên tàu. Lớp đầu vào có 4 nơ-ron tương ứng với các tham số môi trường. Mô hình bao gồm hai lớp ẩn, trong đó lớp ẩn thứ nhất có 2 nơ-ron và lớp ẩn thứ hai có 2 nơ-ron, sử dụng hàm kích hoạt ReLU. Lớp đầu ra gồm 1 nơ-ron với hàm kích hoạt tuyến tính để dự đoán giá trị điện áp phóng điện. Quá trình huấn luyện sử dụng thuật toán tối ưu Adam với tốc độ học 0.001, số vòng lặp (epoch) là 500, batch size là 32, đồng thời áp dụng cơ chế dừng sớm nhằm tránh quá khớp. Cấu trúc này đảm bảo tính gọn nhẹ, huấn luyện nhanh và phù hợp để tích hợp vào phần mềm mô phỏng VR trong thời gian thực. Lớp đầu vào bao gồm dữ liệu cần thiết được biểu diễn dưới dạng ma trận trong công thức (1):

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_3, x_4] \quad (1)$$

Trong đó: $x_1, x_2, \dots, x_3, x_4$ là thông số của các đầu vào như nhiệt độ, độ ẩm, áp suất và độ nhiễm bẩn. Tổng trọng số của nơ-ron được tính theo công thức (2):

$$z_j = \sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + b_j \quad (2)$$

Trong đó: w_{ij} trọng số giữa đầu vào và nơ-ron, b_j là Độ lệch của nơ-ron, z_j tổng trọng số đầu vào tại nơ-ron.

3.2. Xây dựng môi trường mô phỏng thực tế ảo

Nhóm tác giả xây dựng trên phần mềm Unity 3D với đối tượng là con tàu, môi trường biển, buồng điện và mô hình con người thể hiện trong Hình 6. Mô hình ANN Bootstrapping được triển khai trên máy tính “Simulator & ANN PC” (MATLAB/Simulink). Ở mỗi bước thời gian, ANN nhận 4 tham số môi trường (nhiệt độ, độ ẩm, áp suất, độ nhiễm bẩn) và xuất giá trị dự báo điện áp phóng điện được truyền sang Unity 3D (VR Environment) qua Modbus TCP/IP.



Hình 6. Giao diện thiết kế đối tượng 3D trong môi trường ảo.

Mô phỏng đặc tính phóng điện nên bỏ qua một số hoạt động của thiết bị trong buồng máy. Công cụ Particle Systems có thể tạo ra với các tia ánh sáng giống hồ quang điện. Nhóm tác giả xây dựng các tập lệnh điều khiển dựa trên ngôn ngữ c# như sau:

- ForceLightningPath.cs: cho phép tạo ra quỹ đạo của tia lửa điện;
- ForceLightningStart.cs: phụ thuộc vị trí xuất hiện tia lửa điện;
- ForceLightningEnd.cs: dữ liệu từ MATLAB;
- ForceLightningImpactParticle.cs: tạo hiệu ứng ánh sáng tia lửa điện;

Đặc biệt, dữ liệu điện áp từ mô hình ANN Bootstrapping trên Matlab được gửi đến phần mềm qua đó mô phỏng được chính xác hiện tượng phóng điện.

3.3. Đánh giá mô hình

- Sai số bình phương trung bình (MSE)

Phần quan trọng nhất trong quá trình huấn luyện mạng nơ-ron là đo mức độ sai lệch giữa giá trị dự đoán của mô hình. Nó đóng vai trò là hướng dẫn cho quá trình tối ưu hóa, giúp điều chỉnh trọng số và độ lệch để giảm lỗi và cải thiện hiệu suất mạng thể hiện trong công thức (3).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 \quad (3)$$

Trong đó: n là số lượng mẫu dữ liệu, y_i là giá trị liên quan đến điện áp phóng điện thực tế i , y'_i là giá trị liên quan đến điện áp dự đoán i .

- Sai số tuyệt đối trung bình (MAE)

Công thức (4) trình bày cách tính MAE giúp đánh giá độ chính xác của mô hình trong việc dự đoán các thông số liên quan đến điện áp phóng điện thực tế, điều này quan trọng đối với huấn luyện trong môi trường ảo.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y'_i| \quad (4)$$

- Hệ số xác định (R^2)

Hệ số xác định cho biết mức độ dự đoán điện áp phóng điện khi các môi trường bị thay đổi và được xác định bởi công thức (5):

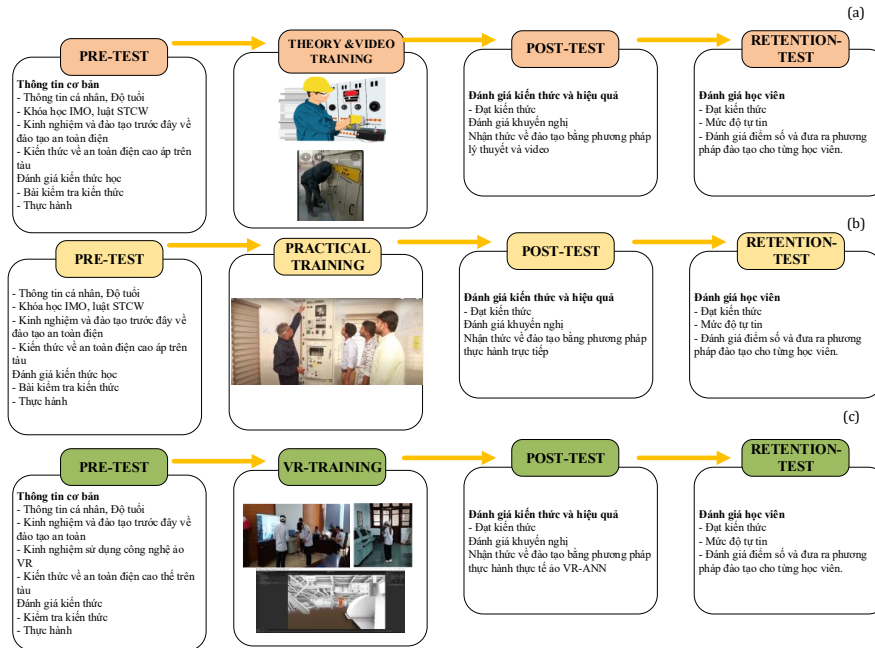
$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{(y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

4. THỬ NGHIỆM, MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

4.1. Xây dựng kịch bản thử nghiệm

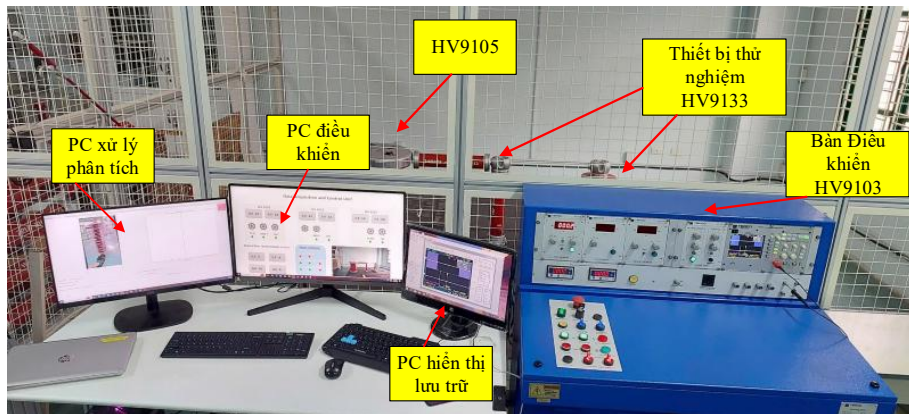
Hình 7 thể hiện các bước thực hiện kịch bản trong đó Hình 7(a) thực hiện phương pháp đào tạo truyền thống kết hợp quan sát thông qua video, Hình 7(b) thực hiện bằng phương

pháp đào tạo trực tiếp và Hình 7(c) đào tạo bằng phương pháp kết hợp thực tế ảo kết hợp ANN. Sau khi đào tạo, học viên thực hiện bài kiểm tra kỹ năng và đánh giá mức độ của hệ thống. Số lượng học viên là 120 người được chia vào các nhóm dựa theo ba phương pháp trên.



Hình 7. Kịch bản thử nghiệm lý thuyết và video (a) và thực hành trực tiếp (b) và thực hành qua VR-ANN (c).

4.2. Thử nghiệm mô hình phóng điện



Hình 8. Phần cứng thiết bị thử nghiệm điện áp phóng điện HV9000.

Sau khi xây dựng được mô hình thử nghiệm phóng điện, dữ liệu mẫu thử nghiệm được mô tả như sau: tại thời điểm thử nghiệm điều kiện môi trường nhiệt độ phòng 35 °C, HV9133 là 37 °C, áp suất không khí 2280 mmHg và độ ẩm tuyệt đối 10,54 g/cm³ độ ẩm tương đối 60 %. Điện áp đầu ra của máy biến áp HV 9105 lên tới 110 kV. Bề mặt điện cực được làm sạch. Tiến hành thí nghiệm để lấy mẫu bằng cách tăng nhiệt độ, độ ẩm, áp suất và độ bám bẩn của

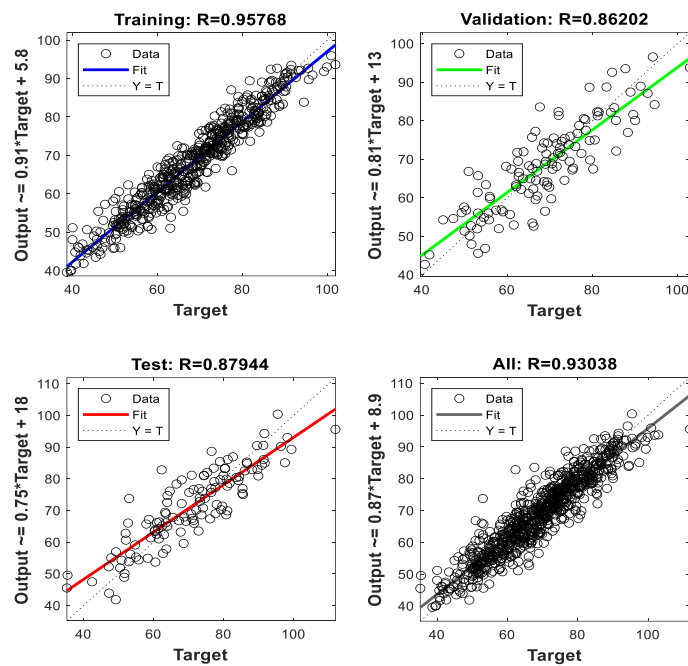
điện cực thông qua tạp chất như dầu, hơi muối biển. Mô hình thí nghiệm thể hiện trong Hình 8. Kết quả thử nghiệm điện áp được lưu trữ trước khi đưa vào mô hình ANN bootstrapping.

4.3. Kết quả và phân tích

Bảng 1 thể hiện giá trị điện áp phóng điện trong điều kiện thử nghiệm với mức độ nhiễm bẩn tăng dần tương ứng với điều kiện thực tế trên tàu được khảo sát bởi chuyên gia đang vận hành trên tàu. Khi xuất hiện dầu, hơi muối trên bề mặt điện cực, điện trường không đều xuất hiện dẫn đến xảy ra hiện tượng vàng quang dương. Giá trị điện áp phóng điện giảm xuống từ 15,60 kV đến 10,40 kV ở khoảng cách 25 mm. Trong nghiên cứu này chỉ dừng lại ở một số phạm vi thử nghiệm nhất định do môi trường thử nghiệm tại phòng thí nghiệm không cho phép. Dữ liệu thử nghiệm thu thập với số lượng mẫu là 2000 mẫu.

Bảng 1. Dữ liệu điện áp phóng điện cách điện không khí với môi trường nhiễm bẩn.

Khoảng cách [mm]	Thông số điện áp phóng điện		
	Điện áp phóng điện thực tế [kVmax]	Điện áp phóng điện tiêu chuẩn [kVmax]	Điện áp phóng điện lý thuyết [kVmax]
5	6.35	6.65	6.61
10	8.46	9.15	8.63
15	10.80	11.10	11.60
20	11.40	11.90	12.45
25	10.40	10.72	10.80

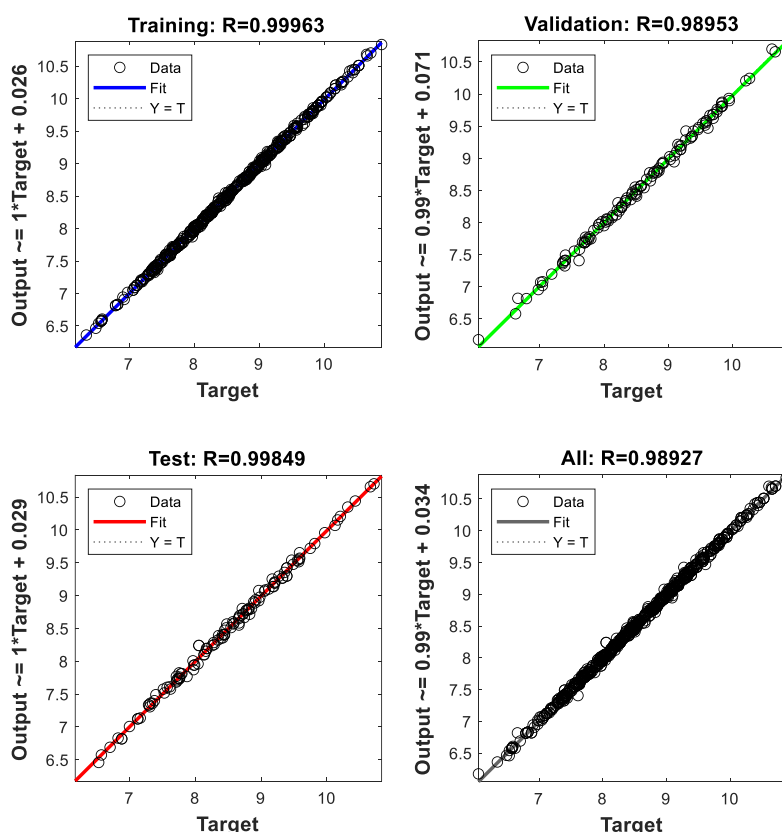


Hình 9. Kết quả đầu ra dự báo mô hình ANN thông thường

Tiếp theo, Nhóm tác giả xây dựng mô hình ANN Bootstrapping bằng phần mềm Matlab 2023a, Visual Studio 2022, với Bộ xử lý Intel(R) Core i7-10700 có tốc độ 2,90 GHz và RAM 128 GB. Hình 9 cho thấy mối quan hệ giữa các giá trị đầu ra dự đoán của mô hình và các giá trị mục tiêu thực tế.

Hình 9 thể hiện mối quan hệ giữa đầu ra và mục tiêu tương ứng với đường dự đoán lý tưởng. Kết quả cho thấy giá trị điện áp phóng điện dự đoán với giá trị điện áp phóng điện thực tế chưa cao do dữ liệu huấn luyện chưa đa dạng và phong phú. Giá trị sai số trung bình (RMSE) đạt 0,614 cho thấy độ chính xác của mô hình chưa cao. Một mô hình ANN Bootstrapping cải thiện hiệu suất hệ thống với bộ dữ liệu mẫu sẵn thu được kết quả như Hình 10. Kết quả dự báo đầu ra của mô hình đã cải thiện hơn với mô hình ANN trước đó với $R = 0,98927$. Bên cạnh đó, bộ so sánh cho phép điều chỉnh đầu ra của điện áp dựa trên dữ liệu thực tế từ mục 4.2.

Bảng 2 thể hiện kết quả so sánh giữa một số mô hình khác mà Nhóm tác giả thực hiện dựa trên bộ dữ liệu thu thập được bao gồm mô hình thuật toán học máy giám sát (Support Vector Machine), mô hình LSTM mạng nơ-ron hồi tiếp (Long Short-Term Memory) [15].



Hình 10. Kết quả đầu ra dự báo mô hình ANN Bootstrapping (Target: mục tiêu, Output: đầu ra, training: huấn luyện, validation: kiểm chứng, test: kiểm tra, all: tất cả).

Dựa trên dữ liệu trên Bảng 2 cho thấy mô hình ANN Bootstrapping có độ ổn định cao hơn so với các mô hình khác. Trong khi đó mô hình LSTM có khả năng hoạt động mạng hơn với chuỗi thời gian. Mặc dù mô hình LSTM đạt chỉ số R^2 (0,96) và độ chính xác (89,5%) cao hơn so với ANN Bootstrapping có chỉ số $R^2 = 0,95$ và độ chính xác (88,2%) Nhóm tác giả lựa chọn ANN Bootstrapping cho hệ thống VR do có tốc độ huấn luyện nhanh hơn 32,5s thuận

lợi khi tích hợp với mô phỏng VR yêu cầu xử lý gần thời gian thực. Bên cạnh đó, kết quả nhiều lần huấn luyện lại cho thấy ANN Bootstrapping ổn định hơn, với sai số RMSE và MAE ít dao động hơn so với LSTM. Thực tế, kết quả đầu ra của mô hình mạng này sẽ được đưa vào phần mềm mô phỏng để tạo ra các kịch bản mô phỏng nguy cơ mất an toàn điện trên tàu thủy. Cuối cùng, đánh giá hiệu quả cả mô hình dựa trên hoạt động đào tạo, huấn luyện học viên đối với ngành hàng hải phải có quá trình trải nghiệm của học viên. Nhóm tác giả triển khai mô hình cho 120 học viên đối với ngành Điện tàu thủy để thực hành với các phương pháp khác nhau. Số lượng học viên đào tạo với phương pháp lý thuyết và video là 30 người, phương pháp lý thuyết và thực hành trực tiếp là 30 người và 30 người là đào tạo bằng phương pháp kết hợp công nghệ thực tế ảo. Ngoài ra, 30 học viên chỉ học lý thuyết và không thực hành như Hình 11. Kết quả cuối cùng được đánh giá qua bài kiểm tra sau khi kết thúc khóa đào tạo [16-19].

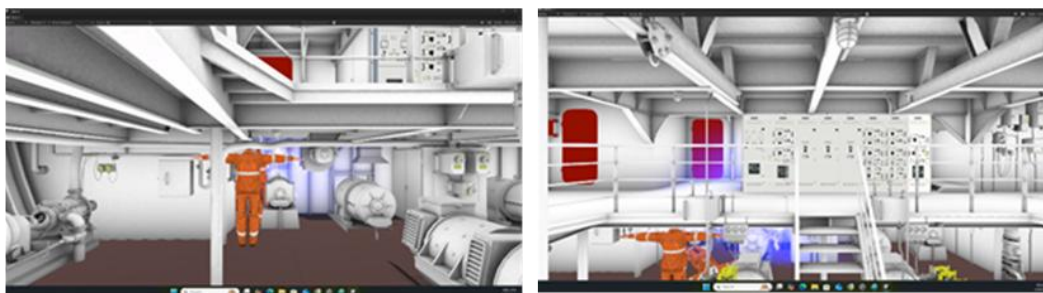
Bảng 2. So sánh hiệu suất các mô hình học máy trong dự báo điện áp phóng điện.

Thông số đánh giá mô hình mạng nơ-ron nhân tạo					
Mô hình	RMSE	R ²	MAE	Thời gian huấn luyện (s)	Chính xác (%)
SVM	0,158	0,81	0,82	15,3	82,7
LSTM	0,112	0,96	0,98	56,4	89,5
ANN Bootstrapping	0,105	0,95	0,94	32,5	88,2
ANN	0,121	0,93	0,90	20,8	85,6
Random	0,140	0,93	0,91	15,7	84,7

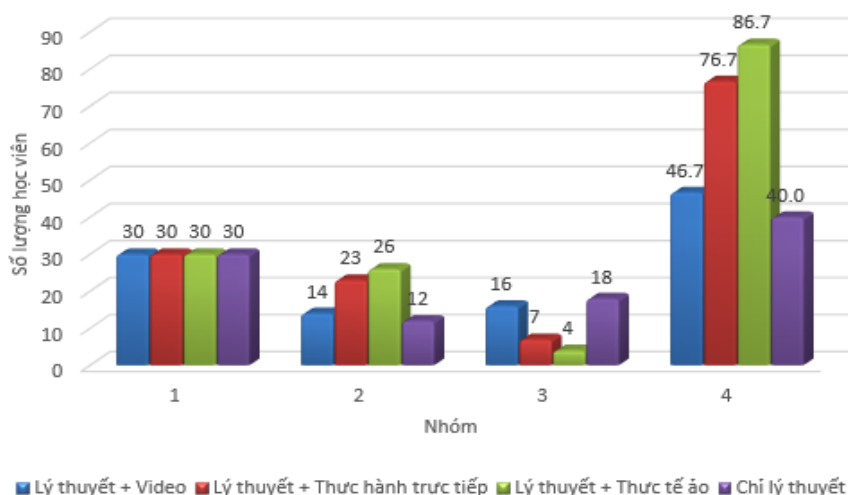


Hình 11. Quá trình đào tạo bằng công nghệ thực tế ảo theo nhóm (a) và thực hành độc lập (b)

Hình 12 mô tả quá trình xảy ra phóng điện với môi trường giả lập từ máy tính giáo viên và mô hình ANN Bootstrapping. Người học phải nắm được các quy tắc an toàn và phương pháp sơ cấp cứu để thực hiện. Sau khi hoàn thành quá trình đánh giá phần mềm tổng hợp và phân tích dữ liệu người học để đưa ra giải pháp hiệu quả cho quá trình đào tạo sau này. Hình 13 thể hiện kết quả sau quá trình thử nghiệm với các phương pháp khác nhau.



Hình 12. Giao diện trong quá trình đào tạo bằng công nghệ VR kết hợp ANN Bootstrapping



Hình 13. So sánh kết quả post-test của học viên theo các phương pháp đào tạo khác nhau.

Kết quả đánh giá cho thấy mức độ học viên ứng dụng công nghệ thực tế ảo đạt tỷ lệ cao nhất khoảng 86,7 % vượt trội so với phương pháp khác. Trong khi đó, phương pháp chỉ học lý thuyết đạt thấp nhất khoảng 40 %. Qua đó, hệ thống đánh giá mức độ rủi ro an toàn điện cao áp cho thấy khả năng vượt trội, dữ liệu từ thực tế được đưa vào mô hình với các kịch bản khác nhau tăng tính đa dạng trong quá trình huấn luyện nhưng vẫn đảm bảo được độ tin cậy của hệ thống. Tuy nhiên, kết quả trong Hình 13 phản ánh tỷ lệ học viên đạt yêu cầu trong post-test sau khi huấn luyện bằng VR-ANN. Thực tế, hệ thống được đánh giá trên nhiều tiêu chí khác nhau, bao gồm post-test, retention-test, mức độ tự tin khi thao tác và thời gian xử lý tình huống. Kết quả trung bình của các chỉ số này đạt xấp xỉ 90%, phản ánh hiệu quả tổng thể của mô hình huấn luyện và được phát triển hơn trong tương lai. Mô hình mô phỏng thực tế ảo an toàn điện cao áp đáp ứng được 85 % các yêu cầu cơ bản của an toàn điện do IMO quy định [18, 19]. Hiện nay, điện cao áp được sử dụng nhiều trên các con tàu đóng mới sẽ dẫn đến yêu cầu về kiến thức, kinh nghiệm an toàn điện khi làm việc với thiết bị cao áp phải đảm bảo và ngày càng khắt khe. Mô hình này đang được ứng dụng trong giảng dạy sinh viên ngành điện và đào tạo an toàn điện cao áp cho sỹ quan điện hiện nay tại trung tâm huấn luyện thuyền viên Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

5. KẾT LUẬN

Đào tạo an toàn điện cao áp trên bờ và trên tàu thủy hiện nay đang được quan tâm và tập trung nguồn lực, nhân lực trong ngành Hàng hải. Hiện nay, các kỹ thuật liên quan đến cách điện thiết bị cao áp đang được nghiên cứu và thử nghiệm, các hệ thống mô phỏng được triển khai đào tạo nhằm nâng cao năng lực đào tạo trong nước so với quốc tế. Bài báo này đã đề xuất xây dựng được một mô hình huấn luyện đào tạo an toàn điện cao áp dựa trên một số thiết bị thử nghiệm phóng điện thực tế. Tạo được bộ dữ liệu điện áp phóng điện dựa trên điều kiện môi trường trên tàu thủy khi hoạt động trên biển. ANN với Bootstrapping đóng vai trò cốt lõi trong việc dự báo điện áp phóng điện và hỗ trợ điều chỉnh kịch bản VR theo thời gian thực, qua đó tạo ra môi trường đào tạo an toàn điện cao áp sát thực tế và linh hoạt hơn so với các phương pháp trước đây. Hệ thống có thể mở rộng kết nối với một số mô hình phần cứng tạo ra các tình huống hợp luyện trên tàu. Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ phát triển loại bỏ nhiễu tốt hơn trong mô hình mạng nơ-ron để có thể dự đoán chính xác. Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong huấn luyện an toàn điện cao áp trên tàu thủy hứa hẹn tạo ra đột phá và góp phần phát triển bền vững cho đào tạo ngành Hàng hải Việt Nam.

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]. B. Bei *et al.*, Challenges and Solutions of Ship Power System Electrification, *Energies*, 17 (2024) 13. <https://doi.org/10.3390/en17133311>
- [2]. G. Ling, C. Han, Z. Yang, J. He, Energy consumption and emission analysis for electric container ships, *Ocean and Coastal Management*, 261 (2025) 107505. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107505>
- [3]. J. Wen, Y. Liu, M. Zhang, X. Li, Intelligent control for rapidity and security of all-electric ships gas turbine under complex mutation load using optimized neural network, *Applied Thermal Engineering*, 248 (2024) 123120. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123120>
- [4]. M. Im, H.-S. Sin, A study on the training of maritime cadets of increasing high voltage ships, *Transactions of KSME C Industrial Technology Innovation*, 3 (2015) 29–36. <https://doi.org/10.3795/KSME-C.2015.3.1.029>
- [5]. H. Stefan, M. Mortimer, B. Horan, S. McMillan, How effective is virtual reality for electrical safety training? Evaluating trainees' reactions, learning, and training duration, *Journal of Safety Research*, 90 (2024) 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2024.06.002>
- [6]. A. Haiba, A. Eliwa, Artificial neural network analysis for classification of defected high voltage ceramic insulators, *Scientific Reports*, 14 (2024) 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51860-8>
- [7]. M. T. K. Niazi, A. Arshad, J. Ahmad, F. Alqahtani, F. Baothman, F. Abu-Amara, Prediction of critical flashover voltage of high voltage insulators leveraging bootstrap neural network, *Electronics*, 9 (2020) 1620. <https://doi.org/10.3390/electronics9101620>
- [8]. F. Bracco, M. Masini, D. Glowinski, T. Piccinno, S. Schaeerlaeken, Simulation as a training method for electricity workers' safety, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (2021) 4. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041591>

- [9]. H. J. Seo, G. M. Park, M. Son, A.-J. Hong, Establishment of virtual-reality-based safety education and training system for safety engagement, *Education Sciences*, 11 (2021) 12. <https://doi.org/10.3390/educsci11120786>
- [10]. Wärtsilä, High Voltage Training Breaker. <https://www.wartsila.com/marine/products/simulation-and-training/technological-simulators/high-voltage-training-breaker/>, 2024, truy cập ngày 05 tháng 5 năm 2025
- [11]. Sensorama, VR Simulator for High Voltage Electrical Safety. <https://vr.sensoramalab.com/case-studies/virtual-reality-simulator-for-high-voltage-electrical-safety-training>, 2024, truy cập ngày 06 tháng 5 năm 2025
- [12]. Trần Văn Tóp, Phạm Thành Chung, Vật liệu kỹ thuật điện, NXB Bách Khoa Hà Nội, Hà Nội, 2025.
- [13]. Hoàng Việt, Kỹ Thuật Điện Cao Áp Tập 1 - Kỹ Thuật Cách Điện, NXB Đại Học Quốc Gia, 2003
- [14]. K. Belhouchet, A. Bayadi, M. E. Bendib, Artificial neural networks (ANN) and genetic algorithm modeling and identification of arc parameter in insulators flashover voltage and leakage current, *Proceedings of the 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2015, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416698>
- [15]. A. Arshad, A. Nekahi, S. G. McMeekin, M. Farzaneh, Flashover characteristics of silicone rubber sheets under various environmental conditions, *Energies*, 9 (2016) 683. <https://doi.org/10.3390/en9090683>
- [16]. B. Zegnini, A. H. Mahdjoubi, M. Belkheiri, A least squares support vector machines (LS-SVM) approach for predicting critical flashover voltage of polluted insulators, *Proceedings of the 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, IEEE, Montréal, Canada, 2011, pp. 403–406. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2011.6232652>
- [17]. Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO), Hướng dẫn tạm thời MSC.1/Circ.1675 – An toàn kết nối nguồn điện bờ (OPS) cho tàu thủy, <https://www.skanregistry.com/uploads/download-directory/pdf/319/document.pdf>, 2023, truy cập ngày 08 tháng 5 năm 2025
- [18]. Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO), Quy định 45 SOLAS – Phòng ngừa sóc, cháy và các nguy cơ điện khác, <https://www.imorules.com/GUID-CF22521F-7754-48E5-B2E2-A99490CE7D4B.html>, 2024, truy cập ngày 08 tháng 5 năm 2025
- [19]. Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO), Hướng dẫn về huấn luyện an toàn trên tàu thủy sử dụng công nghệ thực tế ảo (VR), <https://www.imo.org/en/MediaCentre/Pages/WhatsNew-1811.aspx>, 2023, truy cập ngày 08 tháng 5 năm 2025