

Hệ thống tự động giám sát dòng rò trên thiết bị chống sét van

Hoàng Ngọc Nhân, Đặng Quang Thạch*, Lê Mạnh Hùng

Viện Ứng dụng Công nghệ, Bộ Khoa học và Công nghệ, 25 Lê Thánh Tông, phường Phan Chu Trinh, quận Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 26/7/2024; ngày chuyển phản biện 1/8/2024; ngày nhận phản biện 21/8/2024; ngày chấp nhận đăng 23/8/2024

Tóm tắt:

Chống sét van là thiết bị được sử dụng phổ biến trong các trạm biến áp để bảo vệ lưới điện, thiết bị điện trước tác động của sét. Chất lượng của thiết bị chống sét van chủ yếu được đánh giá thông qua đo và phân tích dòng rò qua thiết bị chống sét. Độ lớn của thành phần điện trở trong dòng điện rò được coi là tỷ lệ với mức độ xuống cấp của khối ZnO, hoặc thiết bị chống sét van bị bẩn trên bề mặt. Thiết bị không đảm bảo yêu cầu phải được vệ sinh bề mặt hoặc thay thế, nhằm đảm bảo an toàn và tránh tổn hao cho lưới điện. Bài báo này đề xuất một giải pháp giám sát, cảnh báo trực tuyến cho thiết bị chống sét trên cơ sở số hóa tín hiệu tương tự, truyền thông, phân tích, lưu trữ giá trị dòng điện rò qua thiết bị chống sét van. Giải pháp này đã được thử nghiệm trong dải đo từ 0÷30mA, cho sai số tương đối lớn nhất 3%. Truyền thông LoRa năng lượng thấp kết hợp với mạng 4G giúp giám sát từ xa giá trị dòng rò, đáp ứng nhu cầu cảnh báo sớm, hỗ trợ công tác vận hành các trạm biến áp, đặc biệt tại các trạm biến áp không người trực.

Từ khóa: chống sét van, đo dòng rò, IoT, LoRa, mạng cảm biến không dây, 4G.

Chỉ số phân loại: 1.3, 2.2

Automatic system for monitoring leakage current on valve surge arrester

Ngoc Nhan Hoang, Quang Thach Dang*, Manh Hung Le

National Center for Technological Progress, Vietnam Ministry of Science and Technology,
25 Le Thanh Tong Street, Phan Chu Trinh Ward, Hoan Kiem District, Hanoi, Vietnam

Received 26 July 2024; revised 21 August 2024; accepted 23 August 2024

Abstract:

A valve surge arrester is a device commonly used in substations to protect power grids and electrical equipment from the effects of lightning. The quality of the valve surge arrester is evaluated by measuring and analysing the leakage current of the surge arrester. The magnitude of the resistive component in the leakage current is considered proportional to the degree of degradation of the ZnO block, or dirty's surface of the valve surge arrester. Equipment that does not meet the requirements must have its surface cleaned or replaced to ensure safety and avoid loss to the power grid. This article proposes an online monitoring and warning solution for surge arrester devices based on digitising analogue signals, communicating, analysing, and storing the value of the leakage current of the surge arrester device. This solution got a maximum relative error of 3% when tested in the measurement range from 0÷30 mA. Low power long-range (LoRa) communication and 4G networks allow the leakage current value to be monitored remotely, meeting the needs of early warning and support for the operation of transformer stations, especially at unmanned substations.

Keywords: IoT, leakage current measurement, long-range (LoRa), valve surge arrester, wireless sensor networks, 4G.

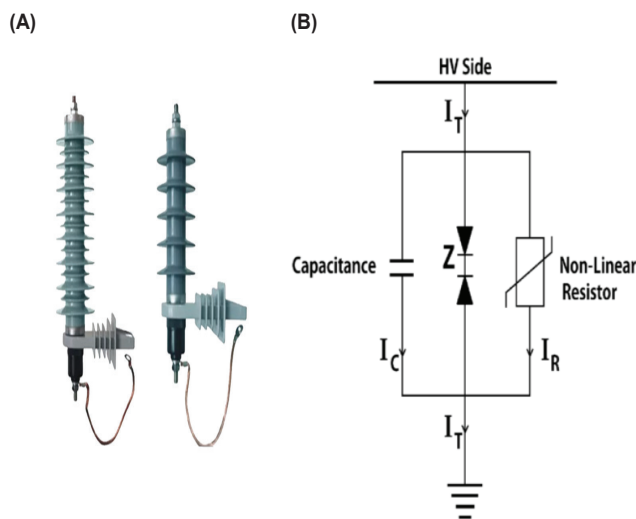
Classification numbers: 1.3, 2.2

*Tác giả liên hệ: Email: dangquangthach@gmail.com

1. Đặt vấn đề

Chống sét van ZnO không khe hở được sử dụng phổ biến ở các trạm biến áp 110÷500kV. Ở trạng thái làm việc bình thường, khối vật liệu ZnO trong chống sét van có giá trị điện trở rất lớn, khi đó dòng rò xoay chiều chạy qua nó có giá trị rất bé (khoảng vài trăm micro Ampe). Khi có sét, nhờ tính chất nhiệt điện của vật liệu, khối ZnO chuyển sang chế độ dẫn điện giúp đưa dòng điện sét về vị trí tiếp địa nhằm bảo vệ lưới điện [1].

Trong quá trình vận hành, chất lượng của thiết bị chống sét van được đánh giá thông qua đo và phân tích dòng rò tổng (I_T) qua khối ZnO (hình 1). Dòng điện rò nói trên là tổng của 2 dòng thành phần: điện dung (I_C) và điện trở (I_R), ($I_T = I_C + I_R$). Độ lớn của thành phần điện trở trong dòng điện rò tổng, đặc biệt là thành phần hài bậc ba, được xác định là tỷ lệ với mức độ xuống cấp của khối ZnO [1]. Khi dòng rò tăng sẽ dẫn đến các vấn đề như: tăng tổn hao trên lưới, nghiêm trọng hơn, nếu dòng rò tăng quá giới hạn cho phép sẽ làm hỏng thiết bị do tác động của nhiệt dẫn đến sự cố như nổ vỏ bọc bằng gốm, sự cố chạm đất.



Hình 1. Mô hình dòng điện qua chống sét van. (A) Chống sét van thực tế; (B) Mô hình dòng điện rò qua chống sét van.

Thông thường, ở cấp điện áp 220 kV, chống sét van mới xuất xưởng có giá trị dòng điện rò xoay chiều tổng <1 mA. Trong giai đoạn hoạt động bình thường, giá trị dòng rò ≤1,5 mA. Khi dòng rò nằm trong phạm vi từ 1,5÷3 mA, là lúc thiết bị làm việc ở vùng cảnh báo, đây cũng là dấu hiệu của sự suy giảm chất lượng các phần tử ZnO, khi đó thiết bị cần được kiểm tra để xác định nguyên nhân thay đổi tính chất dẫn điện. Các chống sét van có dòng rò >3 mA cần phải thay thế ngay để đảm bảo điều kiện vận hành của lưới điện.

Trong thực tế, việc kiểm tra dòng rò qua chống sét van được tiến hành định kỳ, tuy nhiên vẫn tiềm ẩn nguy cơ thiết bị suy giảm chất lượng không được phát hiện, thay thế kịp

thời giữa các lần kiểm tra. Do đó, vấn đề đặt ra là cần có giải pháp giám sát, cảnh báo dòng rò theo thời gian thực, giải pháp này cần có một số tính năng chính sau:

- Đo dòng rò qua chống sét van theo thời gian thực và số hóa kết quả đo phục vụ truyền thông, xử lý, lưu trữ trên máy tính.

- Gửi kết quả đo dòng rò, trạng thái hoạt động của thiết bị đo và bản tin cảnh báo sự cố đến người vận hành qua mạng truyền thông không dây cục bộ và mạng Internet.

- Để đơn giản và thuận lợi cho việc lắp đặt, thiết bị đo nên sử dụng pin làm nguồn cung cấp, vì vậy cần lựa chọn giải pháp thiết kế phần cứng và chế độ làm việc tối ưu cho tiết kiệm năng lượng để thiết bị có thể hoạt động độc lập trong thời gian dài.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1 Đối tượng, vật tư phục vụ nghiên cứu

- *Đối tượng nghiên cứu:* Hệ thống giám sát dòng rò qua chống sét van ZnO, được sử dụng tại các trạm biến áp 110÷500kV.

- *Vật tư phục vụ nghiên cứu:* Vật tư phục vụ chế tạo thiết bị gồm một số linh kiện điện tử chính sau:

- + IC chuyển đổi tương tự/số: Độ phân giải 12 bit, tốc độ lấy mẫu 200 ksp/s;

- + Vi điều khiển: 32 bit, tích hợp các giao diện: I²C, SPI, UART/USART;

- + Module SIM: Mạng 3G/4G LTE-TDD/ LTE-FDD/ HSPA+/GSM/GPRS/EDGE, tốc độ truyền dữ liệu LTE 10 Mbps, HSPA 40 Mbps, UART 115200 bps;

- + Module truyền thông LoRa: Giao diện SPI, tốc độ truyền dữ liệu 300 Kbps, tần số làm việc: 433 MHz

- + PIN lithium 18650 điện áp 3.7 V/3500 mA;

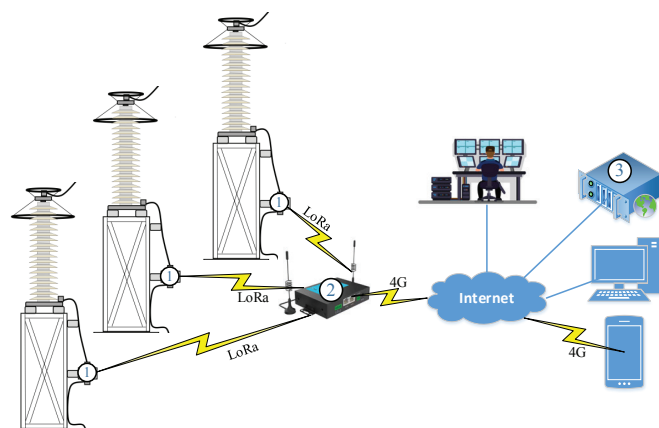
- + Một số linh kiện điện tử thông dụng khác.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Để giải quyết vấn đề giám sát dòng rò qua chống sét van nêu trên, có nhiều phương pháp khác nhau được sử dụng để giám sát chất lượng chống sét van, ví dụ: phương pháp đo trường điện từ [2, 3], phương pháp đo và kiểm tra nhiệt độ [4, 5], phương pháp phân tích đặc tuyến điện áp-dòng điện [6], phương pháp tổn thất điện năng [7, 8], giám sát từ xa và tính toán thành phần điện trở trong dòng điện rò [9], phương pháp đo các thành phần điện trở và điện dung của dòng rò [10-13].

Trong quy trình vận hành thực tế, các hoạt động giám sát, kiểm tra chống sét van chủ yếu căn cứ vào giá trị dòng rò tổng để quyết định thực hiện các hoạt động về bảo trì, sửa

chữa, thay thế thiết bị. Trên cơ sở đó, trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã chế tạo và thử nghiệm hệ thống giám sát, cảnh báo dòng rò có cấu trúc như trong hình 2.

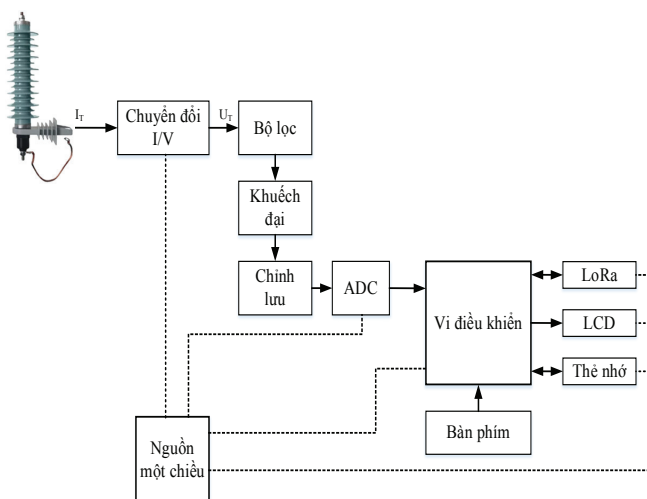


Hình 2. Cấu trúc hệ thống giám sát dòng rò chống sét van.

Hệ thống gồm các thành phần chính sau: (1) Thiết bị đo dòng rò; (2) Thiết bị trung tâm; (3) Phần mềm giám sát.

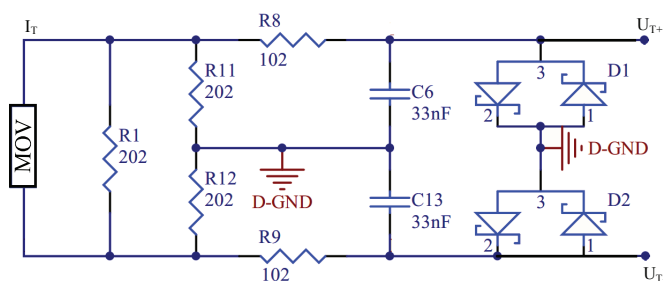
Thiết bị đo dòng rò:

Cấu trúc thiết bị đo dòng rò được minh họa trong hình 3.



Hình 3. Sơ đồ khối thiết bị đo dòng rò.

Dòng rò xoay chiều (I_r) chạy qua chống sét van được chuyển đổi thành tín hiệu điện áp xoay chiều U_{T+} , U_{T-} (hình 4).



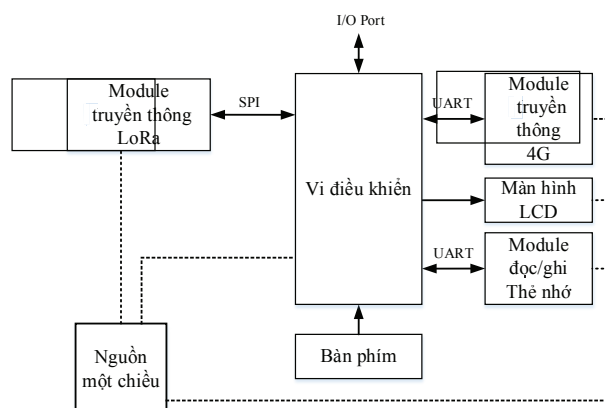
Hình 4. Mạch chuyển đổi dòng điện thành điện áp.

Tín hiệu xoay chiều U_{T+} , U_{T-} được đưa qua bộ lọc tần số, mạch khuếch đại, mạch chỉnh lưu để chuyển đổi thành điện áp một chiều, sau khi được chuẩn hóa, tín hiệu một chiều được chuyển đổi thành dữ liệu số nhờ bộ ADC. Kết quả số hóa được vi điều khiển tính toán để xác định giá trị dòng rò tương ứng. Giá trị của dòng rò được đưa đến các giao diện đầu ra gồm: màn hình LCD, module truyền thông LoRa và bộ điều khiển lưu trữ thẻ nhớ.

Mạch chuyển đổi dòng điện/điện áp sử dụng điện trở (metal oxide varistor - MOV), trong điều kiện bình thường, giá trị điện của MOV là vô cùng lớn (tương đương trạng thái hở mạch), khi có sét, giá trị điện của MOV chuyển về mức rất nhỏ (tương đương trạng thái ngắn mạch) để dẫn dòng điện sét chạy qua nhánh này về đất.

Thiết bị đo được thiết kế để làm việc ở chế độ tiết kiệm năng lượng, các thiết bị ngoại vi chỉ làm việc khi được yêu cầu: LCD hiển thị tại chỗ chỉ được bật khi người dùng nhấn nút; module truyền thông chuẩn LoRa sử dụng năng lượng thấp, đồng thời được cấu hình để truyền dữ liệu đến thiết bị trung tâm theo tần suất phù hợp; việc lưu trữ vào thẻ nhớ chỉ được thực hiện đối với các gói dữ liệu không gửi được đến thiết bị trung tâm do lỗi truyền thông của mạng LoRa... Mạch sử dụng pin, trong điều kiện bình thường, mạch có thể làm việc liên tục trong 6 tháng.

Thiết bị trung tâm



Hình 5. Sơ đồ khối thiết bị trung tâm.

Thiết bị trung tâm có cấu trúc như hình 5, được lắp đặt trong phòng điều khiển tại các trạm biến áp, kết nối với các thiết bị đo dòng rò qua mạng không dây LoRa, thu nhận số liệu từ các thiết bị đo sau đó chuyển tiếp về phần mềm giám sát qua mạng Internet. Ngoài đóng vai trò gateway, thiết bị trung tâm còn có thể thực hiện các chức năng giám sát cục bộ tại trạm biến áp.

Màn hình LCD hiển thị các số liệu nhận từ thiết bị đo dòng rò, gồm: giá trị dòng rò, mức điện áp của pin, trạng thái làm việc của các thiết bị, trạng thái mạng truyền thông... Thiết bị có giao diện kết nối với màn hình HMI, cho phép theo dõi dữ liệu trực quan tại phòng điều khiển trung tâm.

Bàn phím kết hợp với màn hình LCD là kênh giao tiếp với người sử dụng, hỗ trợ người dùng cài đặt cấu hình thiết bị trung tâm. Bình thường, trên màn hình LCD sẽ hiển thị các thông số đo và trạng thái hoạt động hiện thời của các thiết bị, người sử dụng có thể chọn các chế độ hiển thị khác nhau bằng cách nhấn phím tương ứng, ví dụ yêu cầu đọc số liệu hiện thời từ một thiết bị đo cụ thể.

Module truyền thông LoRa thu nhận dữ liệu từ các thiết bị đo qua mạng LoRa, sau đó đưa về vi điều khiển qua giao diện kết nối SPI. Tại vi điều khiển, dữ liệu được đưa đến các giao diện đầu ra gồm: module truyền thông 4G, màn hình LCD và bộ điều khiển lưu trữ thẻ nhớ.

Thiết bị trung tâm được trang bị nguồn dạng UPS, gồm pin có thể sạc lại được và bộ sạc tự động, nguồn điện cho phép thiết bị làm việc ngay cả trong tình huống mất điện lưới trong 24 giờ.

Module truyền thông 4G được dùng để truyền dữ liệu về phần mềm giám sát qua mạng Internet.

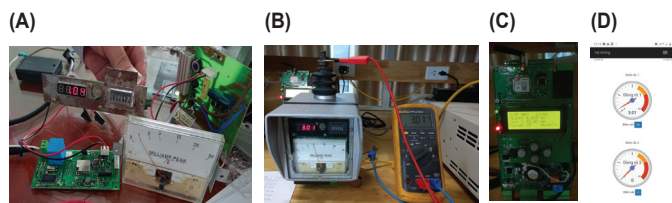
Lưu trữ dữ liệu vào thẻ nhớ được thực hiện đồng thời với việc gửi dữ liệu về phần mềm giám sát như một hình thức lưu trữ dự phòng. Khi thẻ nhớ đầy, các tệp dữ liệu cũ sẽ bị ghi đè. Trung bình dữ liệu được lưu trữ trên thẻ nhớ khoảng 30 ngày trước khi bị xóa.

Phần mềm giám sát

Phần mềm giám sát điều khiển được phát triển trên cơ sở ứng dụng nền tảng IoT mã nguồn mở thingsboard. Các chức năng chính của phần mềm bao gồm: thu nhận, lưu trữ, xử lý dữ liệu từ các thiết bị trung tâm qua mạng Internet; trực quan hóa dữ liệu; cảnh báo sự cố; quản lý thiết bị và quản lý người sử dụng. Thiết bị trung tâm và phần mềm giám sát trao đổi dữ liệu bằng giao thức MQTT. Dữ liệu và các thông tin quản lý hệ thống được lưu trữ trong cơ sở dữ liệu MongoDB. Số liệu dòng rò và trạng thái của thiết bị đo, thiết bị trung tâm được hiển thị bằng nhiều dạng trực quan như đồ thị, biểu tượng... Các dấu hiệu bất thường và sự cố được cảnh báo theo các kịch bản được định nghĩa trên ứng dụng. Người sử dụng có thể truy nhập phần mềm bằng trình duyệt web trên máy tính PC hoặc điện thoại thông minh.

3. Kết quả

Hình 6 thể hiện một số kết quả thiết kế, chế tạo, thử nghiệm hệ thống giám sát dòng rò chống sét van, trong đó: hình 6A là bản mạch thiết bị đo. Hình 6B là thiết bị đo dòng rò đã lắp ráp hoàn thiện và đang được kiểm tra; hình 6C là bản mạch thiết bị trung tâm; hình 6D là phần mềm giám sát trên nền tảng web có giao diện tương thích điện thoại thông minh chạy hệ điều hành android hoặc IOS.



Hình 6. Thiết bị giám sát dòng rò chống sét van.

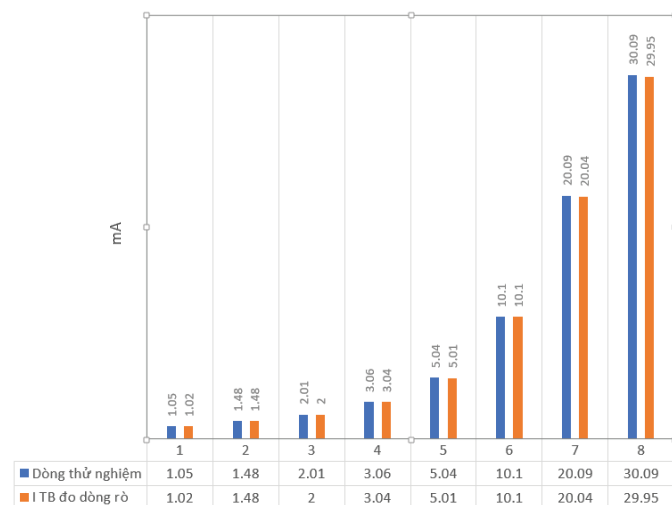
Hệ thống trên được chế tạo, thử nghiệm thực hiện tốt các chức năng yêu cầu, kết quả cụ thể như sau:

- *Chức năng đo dòng rò*: Kết quả thử nghiệm bằng máy tạo dòng chuẩn cho thấy, ở dải đo 0-30 mA sai số đo dòng rò của thiết bị đo < 3%.

Số liệu trong bảng 1 là kết quả thử nghiệm đo dòng rò. Trong phép thử này, cột “Dòng điện thử nghiệm” (1) được tạo bằng bộ nguồn chuẩn California instruments AMETEK model 2001RP; cột “Kim chỉ” (2) là giá trị quan sát được trên đồng hồ kim chỉ; cột “TB đo dòng rò” (3) là kết quả đo bằng thiết bị chế tạo trong nghiên cứu này; các cột “TB trung tâm” (4) và “Phần mềm giám sát” (5) lần lượt là giá trị hiển thị tại thiết bị trung tâm và phần mềm giám sát. Hình 7 là đồ thị so sánh kết quả đo dòng điện bằng thiết bị chế tạo trong nghiên cứu này và giá trị dòng điện tạo ra bằng bộ nguồn chuẩn.

Bảng 1. Kết quả thử nghiệm đo dòng rò.

TT	Dòng điện thử nghiệm	Kim chỉ	TB đo dòng rò	TB trung tâm	Phần mềm giám sát
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	1,05	1,02	1,02	1,02	1,02
2	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48
3	2,01	2	2	2	2
4	3,06	3	3,04	3,04	3,04
5	5,04	5	5,01	5,01	5,01
6	10,1	10	10,1	10,1	10,1
7	20,09	20	20,04	20,04	20,04
8	30,09	29	29,95	29,95	29,95



Hình 7. So sánh kết quả thử nghiệm đo dòng điện.

- Chức năng truyền thông LoRa: Ở khoảng cách [100 m] tỷ lệ mất gói tin < 0,1%.
- Chức năng truyền thông 4G: Tỷ lệ gói tin phải truyền lại < 0,1%.
- Các chức năng hiển thị, tương tác với người sử dụng hoạt động đúng yêu cầu.
- Chức năng ghi thẻ nhớ hoạt động đúng yêu cầu.
- Mức tiêu thụ pin của thiết bị đo dòng rò ở mức như tính toán ban đầu.

4. Bàn luận

Hệ thống giám sát, cảnh báo dòng rò qua thiết bị chống sét van trong nghiên cứu này được thiết kế, chế tạo trên cơ sở tích hợp kỹ thuật đo và số hóa dòng điện rò tổng cùng với các giải pháp truyền thông LoRa, IoT bước đầu chứng minh được khả năng hỗ trợ, nâng cao hiệu quả hoạt động kiểm tra, bảo trì, sửa chữa thiết bị chống sét van tại các trạm biến áp. Kết quả nghiên cứu này là cơ sở để triển khai các bước tiếp theo như ứng dụng các phương pháp phân tích và tách thành phần dòng rò điện trở, điện dung nhằm xác định chính xác nguyên nhân dẫn đến suy giảm chất lượng chống sét van, từ đó có biện pháp xử lý phù hợp nhất.

Bằng việc ứng dụng các giải pháp IoT, trong quá trình hoạt động, hệ thống giám sát, cảnh báo dòng rò chống sét van sẽ tạo ra lượng dữ liệu đủ lớn, khi đó có thể ứng dụng các giải pháp học máy giúp triển khai các phương pháp chẩn đoán, dự báo nhằm xác định chế độ bảo trì phù hợp cho hệ thống.

5. Kết luận

Hệ thống giám sát, cảnh báo dòng rò chống sét van được thiết kế, chế tạo trong nghiên cứu này đóng góp một giải pháp ứng dụng công nghệ, kỹ thuật thu thập, số hóa, truyền thông, xử lý, lưu trữ dữ liệu theo thời gian thực để giải quyết một bài toán trong thực tế. Các tính năng hữu ích mà giải pháp đem lại có thể kể đến bao gồm:

- Xác định được tình trạng làm việc của chống sét van theo thời gian thực, hỗ trợ xử lý kịp thời, phòng tránh sự cố liên quan đến chống sét van, hạn chế xảy ra sự cố đột ngột gây nổ ở thiết bị chống sét, tránh những rủi ro, nguy hiểm cho người vận hành, giảm thiểu hư hỏng đến các thiết bị lân cận.
- Thu thập, lưu trữ số liệu trong cả quá trình hoạt động, giúp chẩn đoán, tìm nguyên nhân, phát hiện sớm các dấu hiệu nhiễm bẩn, ẩm hoặc thoái hóa của các phần tử ZnO trong chống sét van. Từ đó thực hiện các hoạt động phù hợp như: kiểm tra online, thử nghiệm bổ trợ offline, bảo dưỡng hoặc thay thế.
- Trên cơ sở xác định được trạng thái làm việc của thiết bị chống sét, giúp đơn vị vận hành chủ động xây dựng kế hoạch bảo trì, bảo dưỡng phù hợp, tối ưu hóa chi phí, thời gian, nhân lực, đồng thời góp phần nâng cao độ tin cậy, an toàn cho mạng lưới điện.

LỜI CẢM ƠN

Giải pháp giới thiệu trong bài báo này là một số kết quả nghiên cứu thuộc nhiệm vụ khoa học và công nghệ cấp Bộ “Nghiên cứu thiết kế chế tạo hệ thống giám sát trực tuyến dòng rò cho chống sét van” do Viện Ứng dụng Công nghệ chủ trì. Tập thể tác giả xin trân trọng cảm ơn Bộ Khoa học và Công nghệ đã tạo điều kiện thuận lợi để nhóm tác giả thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Khodsuz, M. Mirzaie (2015), “Evaluation of ultraviolet ageing, pollution and varistor degradation effects on harmonic contents of surge arrester leakage current”, *IET Sci. Measurement Technol.*, **9**(8), pp.979-986.
- [2] K.L. Wong (2006), “Electromagnetic emission based monitoring technique for polymer ZnO surge arresters”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **13**(1), pp.181-190, DOI: 10.1109/TDEI.2006.1593416.
- [3] J. Xu, A. Kubis, K. Zhou, et al. (2013), “Electromagnetic field and thermal distribution optimisation in shell-type traction transformers”, *IET Electr. Power Appl.*, **7**(8), pp.627-632, DOI: 10.1049/iet-epa.2013.0112.
- [4] C.A.L. Almeida, A.P. Braga, S. Nascimento, et al. (2009), “Intelligent thermographic diagnostic applied to surge arresters: A new approach”, *IEEE Trans. Power Delivery*, **24**(2), pp.751-757, DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2013375.
- [5] E.T.W. Neto, E.G.D. Costa, M.J.A. Maia (2009), “Artificial neural networks used for ZnO arresters diagnosis”, *IEEE Trans. Power Delivery*, **24**(3), pp.1390-1395, DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2013402.
- [6] C. Heinrich, V. Hinrichsen (2001), “Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks-comparison of existing and newly developed procedures”, *IEEE Trans. Power Delivery*, **16**(1), pp.138-143, DOI: 10.1109/61.905619.
- [7] L.T. Coffeen, J.E. McBride (1991), “High voltage AC resistive current measurements using a computer-based digital watts technique”, *IEEE Trans. Power Delivery*, **6**(2), pp.550-556, DOI: 10.1109/61.131111.
- [8] K.P. Pramod, U.L. Bombale (2017), “Leakage current measurement and health monitoring of surge arresters”, *Int. J. Latest Trends Eng. Technol.*, **8**(4-1), pp.143-148, DOI: 10.21172/1.841.25.
- [9] V. Vončina, J. Pihler, M. Milanović (2021), “Extracting the resistive current component from a surge arrester’s leakage current without voltage reference”, *Sensors*, **21**(4), DOI: 10.3390/s21041257.
- [10] I.A. Metwally (2011), “Performance of distribution-class surge arresters under dry and artificial pollution conditions”, *Electr. Eng.*, **93**, pp.55-62, DOI: 10.1007/s00202-010-0193-z.
- [11] Z.N. Stojanović, Z.M. Stojković (2013), “Evaluation of MOSA condition using leakage current method”, *Electrical Power and Energy Syst.*, **52**, pp.87-95, DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.03.027.
- [12] B. Dolnik, J. Briančin (2017), *Monitoring of Leakage Current on HV Surge Arrester as Pollution Indicator of External Insulation*, 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), IEEE, Piscataway, NJ, pp.1-6.
- [13] M.H. Teymourian, S. Seyyedbarzegar, M. Khodsuz (2023), “Harmonic analysis of metal oxide surge arrester leakage current considering fan-shaped type pollution effect”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **31**(3), pp.1547-1556, DOI: 10.1109/TDEI.2023.3343677.