

Điều khiển và giám sát lưới điện hạ thế dựa trên nền tảng công nghệ IoT

IoT-based control and monitoring system for low-voltage power distribution networks

> TS NGUYỄN CHÍ KIÊN^{1*}, TS PHẠM XUÂN BÁCH², TS NGUYỄN DUY HƯNG³

¹Bộ môn Kỹ thuật điện, Trường Đại học Giao thông vận tải

²Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Nam Định

³Trường Đại học Công nghiệp Việt - Hung

*Email: kiennc@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh chuyển đổi số trong ngành điện và xu hướng xây dựng lưới điện thông minh (Smart Grid), việc áp dụng công nghệ Internet of Things (IoT) trong giám sát và điều khiển lưới điện hạ thế trở nên cần thiết và hứa hẹn nhiều tiềm năng. Trong lĩnh vực phân phối điện năng, đặc biệt là ở cấp điện áp hạ thế, việc ứng dụng IoT vào giám sát tủ điện phân phối đang mang lại hiệu quả rõ rệt trong việc nâng cao độ an toàn, tính linh hoạt và khả năng quản lý tập trung. Bài báo trình bày thiết kế và triển khai một mô hình tủ điện hạ thế tích hợp các cảm biến đo lường (dòng, điện áp, nhiệt độ) kết hợp với bộ vi điều khiển nhằm thu thập dữ liệu theo thời gian thực và truyền về nền tảng Web API thông qua giao thức MQTT. Hệ thống cho phép người dùng giám sát trạng thái hoạt động của tủ điện qua giao diện web, đồng thời hỗ trợ điều khiển từ xa thông qua mô-đun relay. Qua quá trình thử nghiệm, hệ thống cho thấy khả năng hoạt động ổn định, độ chính xác cao, phản hồi nhanh và dễ dàng triển khai với chi phí thấp. Mô hình này phù hợp để áp dụng tại các khu dân cư, tòa nhà thương mại hoặc nhà máy, góp phần xây dựng lưới điện thông minh và thúc đẩy chuyển đổi số trong lĩnh vực năng lượng.

Từ khóa: IoT; lưới điện hạ thế; Web API; MQTT; giám sát từ xa.

ABSTRACT

The rapid development of Internet of Things (IoT) technology is opening new approaches to monitoring and controlling electrical systems. In power distribution, especially at the low-voltage level, the application of IoT in monitoring distribution cabinets has proven effective in enhancing safety, flexibility, and centralized management. This paper presents the design and implementation of a low-voltage distribution cabinet model integrated with measurement sensors (current, voltage, temperature) and a microcontroller, which collects real-time data and transmits it to the Web API platform via the MQTT protocol. The system enables users to monitor the cabinet's operational status through a web interface and supports remote control using a relay module. Experimental results show that the system operates reliably, offers high accuracy, fast response time and is easy to deploy at low cost. This model is suitable for residential areas, commercial buildings or factories, contributing to the development of smart grids and promoting digital transformation in the energy sector.

Keywords: IoT; low-voltage grid; Web API; MQTT; remote monitoring.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển mạnh mẽ của khoa học công nghệ trong những năm gần đây đã làm thay đổi cách thức quản lý và vận hành các hệ thống kỹ thuật, trong đó có lĩnh vực cung cấp và phân phối điện năng. Trong bối cảnh đó, việc ứng dụng các công nghệ hiện đại như Internet of Things (IoT) vào lưới điện hạ thế mang lại cơ hội lớn trong việc nâng cao chất lượng dịch vụ, tăng cường hiệu suất vận

hành, cũng như đảm bảo an toàn cho người và thiết bị. Việc ứng dụng công nghệ IoT trong lĩnh vực kỹ thuật điện đã được nghiên cứu trong một số công trình trước đây [1-3].

Tủ điện phân phối hạ thế là thành phần thiết yếu trong hệ thống điện, đóng vai trò điều phối và bảo vệ các nhánh phụ tải trong khu dân cư, tòa nhà hoặc xưởng sản xuất. Tuy nhiên, hầu hết các tủ điện hiện nay chỉ được kiểm tra định kỳ thủ công, gây khó

khẩn trong việc phát hiện sớm các sự cố như quá tải, sụt áp, nhiệt độ tăng bất thường hay mất pha.

Giải pháp ứng dụng IoT vào tủ điện phân phối hạ thế giúp thu thập và truyền tải dữ liệu từ các cảm biến đo điện áp, dòng điện, nhiệt độ về nền tảng đám mây. Người dùng có thể theo dõi trạng thái thiết bị theo thời gian thực thông qua dashboard trực quan, đồng thời thực hiện các thao tác điều khiển như đóng/ngắt phụ tải từ xa bằng relay. Điều này không chỉ giúp tối ưu hóa việc giám sát mà còn góp phần phòng tránh sự cố và giảm thiểu rủi ro vận hành. Công nghệ IoT cho phép thu thập dữ liệu liên tục từ các cảm biến, truyền dữ liệu qua mạng không dây và hiển thị thông tin trực quan trên nền tảng điện toán đám mây. Với khả năng tích hợp các thiết bị phần cứng giá rẻ và phần mềm mã nguồn mở, hệ thống IoT dễ dàng triển khai ở quy mô nhỏ như hộ gia đình, tòa nhà, nhà máy mà vẫn đảm bảo độ tin cậy và khả năng mở rộng [4].

2. NỘI DUNG

2.1. Tổng quan hệ thống

Hệ thống giám sát và điều khiển lưới điện hạ thế ứng dụng IoT được thiết kế dựa trên kiến trúc phân lớp gồm ba tầng chính:

- Tầng cảm biến và thu thập dữ liệu: Gồm các cảm biến dòng SCT013, cảm biến điện áp ZMPT101B và cảm biến nhiệt độ/độ ẩm DHT22. Các cảm biến này gắn trực tiếp vào tủ điện để thu thập dữ liệu vận hành của hệ thống.

- Tầng xử lý và truyền thông: Vi điều khiển ESP32 đóng vai trò trung tâm, nhận dữ liệu từ cảm biến, xử lý tín hiệu, sau đó truyền dữ liệu thông qua wifi đến nền tảng Web API sử dụng giao thức MQTT.

- Tầng hiển thị và điều khiển: Nền tảng Web API trực quan hóa dữ liệu dưới dạng biểu đồ, đồng hồ đo hoặc bảng số liệu. Đồng thời, hệ thống cho phép người dùng giám sát theo thời gian thực, gửi cảnh báo khi có sự cố và điều khiển thiết bị tải thông qua relay từ xa.

Với mô hình này, toàn bộ hoạt động của tủ điện được số hóa và có thể giám sát, điều khiển thông minh từ bất cứ đâu có kết nối

Internet, giúp tăng độ an toàn, nâng cao hiệu suất và giảm thiểu sự cố trong vận hành hệ thống điện. Từ nghiên cứu đánh giá trên cơ sở lý thuyết kết hợp đánh giá các phương pháp đo thực tế, nhóm tác giả đề xuất mô hình kiến trúc hệ thống như Hình 1.

2.2. Phần cứng hệ thống

Trong bài báo, nhóm tác giả thiết kế hệ thống điều khiển và giám sát điện năng cho mạng phân phối hạ thế một pha. Hệ thống đo các thông số để đánh giá độ tin cậy của tủ điện hạ thế có các tính năng cơ bản sau đây:

- Đo lường thông số điện để đánh giá độ tin cậy của tủ điện hạ thế, bao gồm:

+ Đo thông số điện lộ tổng: U, I, $\cos \varphi$, tần số;

+ Đo thông số điện lộ nhánh (tối đa 8 lộ nhánh): U, I, $\cos \varphi$, tần số.

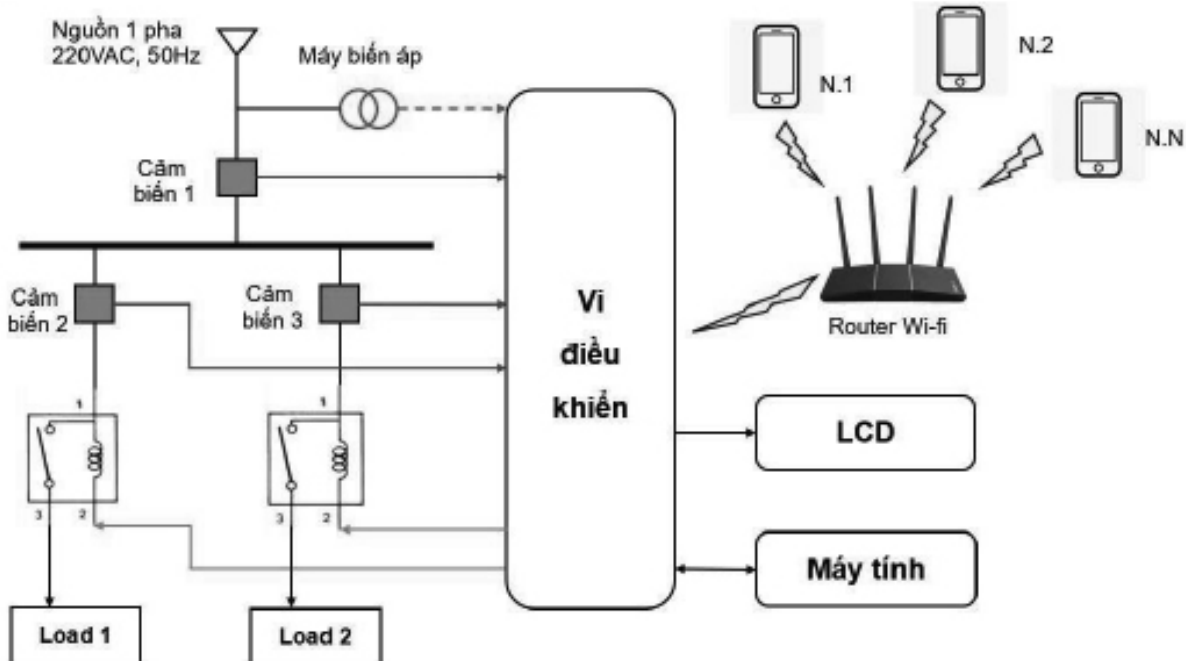
- Giám sát lưới điện phân phối thông qua các cảnh báo:

+ Cảnh báo mất điện các pha lộ tổng, lộ nhánh;

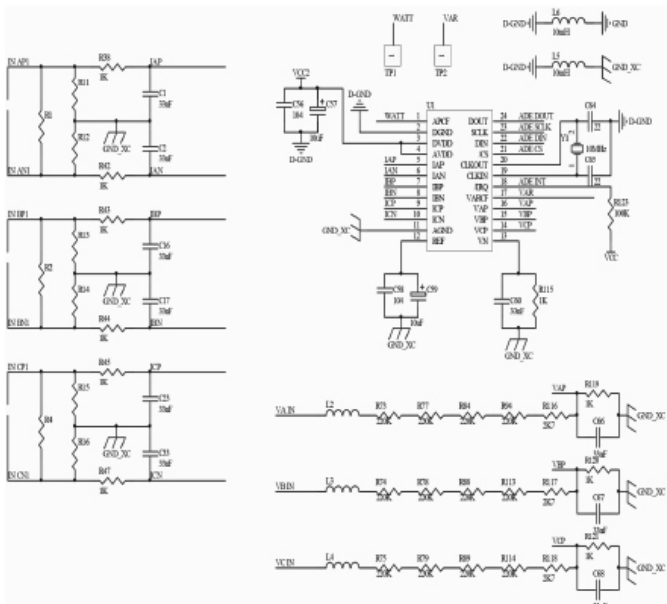
+ Cảnh báo quá áp, quá dòng lộ tổng, lộ nhánh;

- Truyền dữ liệu đo về trung tâm để đánh giá độ tin cậy của tủ điện hạ thế.

Bộ đo thông số về điện gồm khối đo dòng điện và khối đo điện áp. Hai khối này có nhiệm vụ biến đổi điện áp, dòng điện về giá trị tham chiếu để xử lý ADC và truyền kết quả đến bộ xử lý trung tâm tính toán, hiển thị ra giá trị của dòng điện và điện áp. Khối đo điện áp nguồn cấp của trạm biến áp có cấu tạo đơn giản bao gồm tụ điện, điện trở phân áp để đưa điện áp xoay chiều từ nguồn cấp của trạm biến áp vào biến đổi thành giá trị điện áp thích hợp. Các điện trở và tụ điện được tính toán lắp đặt sao cho với giá trị điện áp đo cực đại 300 VAC được đưa qua chúng cho giá trị đầu ra về mức điện áp tham chiếu 1VAC để đưa vào IC đo lường điện. Sau đó, tín hiệu điện áp được biến đổi ADC và gửi về bộ xử lý trung tâm để tính toán ra kết quả của điện áp đo. Khối đo dòng điện sử dụng cảm biến dòng SCT013 được sản xuất chuyên dùng cho đo lường các thông số về điện tích hợp công nghệ ADCs và DSP trên cùng một vi mạch [5, 6].



Hình 1. Sơ đồ khối của hệ thống



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý khối đo thông số về điện

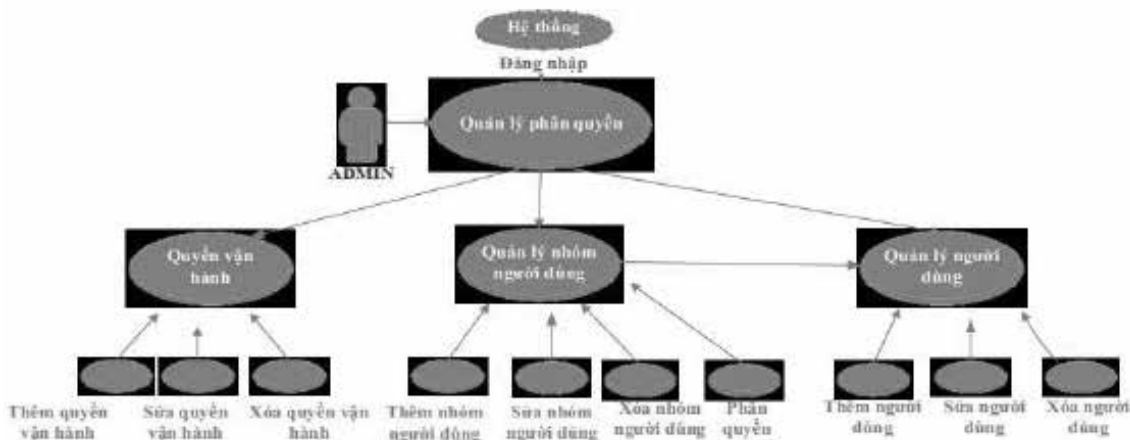
Quá trình trao đổi thông tin giữa trung tâm và thiết bị đo được thực hiện qua tập lệnh AT - tập lệnh chuẩn được hỗ trợ gửi và nhận tin qua mạng thông tin di động. Các thông tin cảnh báo giám sát và thông báo trạng thái được truyền giữa hai mạch sẽ đi qua khối giao tiếp theo chuẩn UART (truyền nhận nối tiếp đồng bộ và không đồng bộ). Việc điều khiển truyền tín hiệu được phối hợp giữa chip xử lý của cả hai mạch để quá trình truyền tín hiệu diễn ra một cách chính xác và hiệu quả. Tín hiệu qua UART sẽ được chuyển đổi qua IC MAX485 để truyền thông tín hiệu về bộ điều khiển trung tâm theo phương thức truyền thông công nghiệp RS485.

thiết kế giao diện người sử dụng vẫn phải đảm bảo các quy tắc và tiêu chuẩn thiết kế.

- Website ngôn ngữ tiếng Việt, đảm bảo hệ thống font chữ tiếng Việt theo chuẩn Unicode;
- Hệ thống bảo đảm tính an toàn, bảo mật thông tin về người sử dụng, thông tin về các thông số thu thập được từ các thiết bị; phân chia vai trò và quyền truy cập cho từng đối tượng sử dụng cụ thể.

Để tận dụng khả năng cài đặt ở một nơi và sử dụng ở nhiều nơi, giải pháp web-based sử dụng ASP.NET core, đó là một nền tảng ứng dụng web (web application framework) được phát triển và cung cấp bởi Microsoft, cho phép những người lập trình tạo ra những trang web động, những ứng dụng web và những dịch vụ web. Web API (Application Programming Interface) và Web service hoạt động như các phương tiện giao tiếp. Điểm khác biệt duy nhất giữa Web API và Web service chính là Web service tạo thuận lợi cho sự tương tác giữa hai máy qua mạng. Web API hoạt động như một giao diện giữa hai ứng dụng khác nhau để chúng có thể giao tiếp với nhau. Web API với khả năng hỗ trợ đầy đủ các chuẩn giao tiếp và mã nguồn mở hoàn toàn thích ứng khi xây dựng hệ thống [7]. Khi áp dụng phương pháp này sẽ có thể kết nối được các thiết bị cũ có chuẩn khác nhau đồng thời dễ dàng nâng cấp mở rộng.

Giải pháp truyền tin mà nhóm tác giả đề xuất là truyền thông theo API. Với giao diện lập trình ứng dụng này sẽ hỗ trợ việc xây dựng phương thức kết nối với phía back-end và ứng dụng khác trong hệ thống. Dữ liệu thu thập từ thiết bị giám sát truyền thông qua mạng thông tin di động về trung tâm sử dụng các hàm API. Cơ sở dữ liệu (CSDL) trực tuyến cho mục đích hiển thị và cảnh báo thông số, giám sát truyền thông. CSDL lưu trữ cho các tác vụ liên quan tới báo cáo, thống kê. Chức năng thiết lập nhanh cho hệ thống bằng các tập cấu hình thông qua dịch vụ web (tool service).



Hình 3. Sơ đồ Use-case tổng quát chức năng quản lý phân quyền

2.3. Xây dựng phần mềm tại trung tâm xử lý

Để xây dựng hệ thống giám sát điều khiển tủ điện trong lưới điện hạ thế, nhóm tác giả xây dựng trên cơ sở thỏa mãn các yêu cầu sau:

- Hệ thống sẽ được triển khai trên nền tảng website đáp ứng nhiều người dùng.
- Hệ thống sẽ được trang bị hạ tầng mạng, server mạnh đáp ứng nhiều người cùng truy cập và giao dịch vào cùng một thời điểm (giờ cao điểm) một cách nhanh chóng và chính xác.
- Website dễ dàng và thuận tiện cho người sử dụng. Tuy nhiên,

Quản lý người dùng là chức năng cho phép quản lý việc cấp mới, sửa, xóa người dùng. Để truy cập được vào hệ thống, người dùng cần được người sử dụng hệ thống cấp tài khoản trước và sử dụng tài khoản này để đăng nhập vào hệ thống.

2.4. Thục nghiệm và đánh giá kết quả

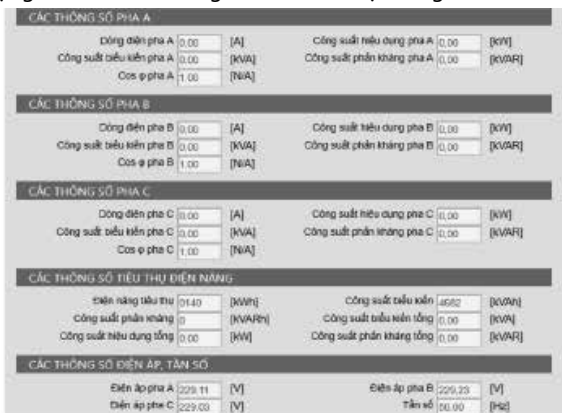
Dựa trên sơ đồ phản cứng, phần mềm đề xuất, các thiết bị lựa chọn nhóm tác giả thiết kế, chế tạo và phối ghép hoàn thiện mô hình giám sát điều khiển, đánh giá tính năng, khả năng đo của thiết bị đo và khả năng kết nối, truyền dữ liệu đo về trung tâm đánh giá độ tin cậy cung cấp điện. Thử nghiệm thiết bị đo đánh giá độ tin cậy cung cấp điện về tính năng và khả năng đo các thông số về điện, nhiệt

độ, độ ẩm, tiến hành hiệu chỉnh sử dụng bộ tạo điện áp, dòng điện chuẩn, đồng hồ đo điện, nhiệt kế, ẩm kế. Mô hình thử nghiệm thiết bị đo các thông số để đánh giá độ tin cậy cung cấp điện như Hình 4.

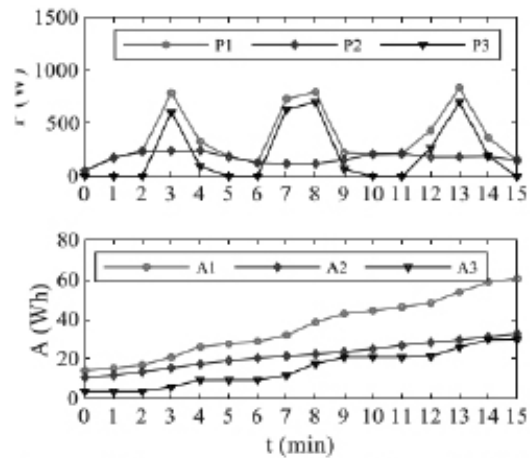
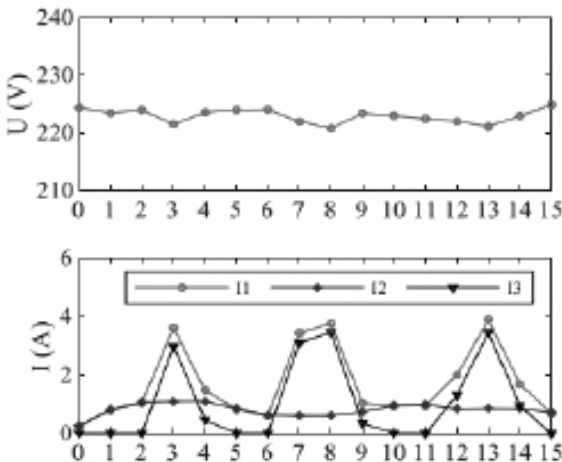


Hình 4. Mạch đo của thiết bị

Hệ thống được đề xuất được phát triển như thể hiện trong Hình 4. Màn hình LCD trong hệ thống này được sử dụng để hiển thị các thông số đo lường. Để tiến hành thí nghiệm, các thiết bị điện được sử dụng để đại diện cho các tải trong hệ thống. Cụ thể, giả định rằng tải 1 là 4 bóng đèn công suất 60 W và tải 2 là máy sấy tóc công suất 750 W. Ngoài ra, để truyền tất cả dữ liệu đo được lên CSDL đám mây, hệ thống cần được thiết lập kết nối với mạng wifi tại địa điểm cài đặt. Sau khi hệ thống thí nghiệm được lắp đặt hoàn chỉnh, ứng dụng Web API được thiết kế trên điện thoại thông minh sẽ được sử dụng để điều khiển và giám sát từ xa hệ thống.



Hình 5. Hiển thị các thông số ở trung tâm



Hình 6. Kết quả thực nghiệm trong quá trình giám sát 15 phút

Trên các thiết bị thông minh, sau khi ứng dụng Web API được liên kết với hệ thống, tất cả các thông số đo lường sẽ được hiển thị dưới dạng số liệu như trong Hình 5. Điều này có nghĩa là hệ thống cho phép chúng ta dễ dàng giám sát các thông số đo lường theo thời gian thực. Ngoài ra, người dùng cũng có thể thực hiện hành động điều khiển thủ công các mạch trong hệ thống bằng cách nhấn nút điều khiển rơ-le trên giao diện.

3. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất một hệ thống điều khiển và giám sát điện năng chi phí thấp cho mạng điện một pha 220 VAC dựa trên công nghệ IoT đã được thiết kế và thử nghiệm tại phòng thí nghiệm của các trường đại học nơi các tác giả công tác. Các thông số điện bao gồm điện áp hiệu dụng (RMS), dòng điện hiệu dụng, công suất thực và lượng điện năng tiêu thụ có thể được đo lường, điều khiển và giám sát từ xa thông qua máy tính hoặc điện thoại thông minh có kết nối Internet. Kỹ thuật quản lý phía nhu cầu (Demand-Side Management) cũng được tích hợp vào hệ thống nhằm quản lý hiệu quả việc tiêu thụ năng lượng tại một địa điểm. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động chính xác và hiệu quả. Từ những kết quả này, có thể thấy rằng hệ thống đề xuất hoàn toàn có khả năng điều khiển và giám sát điện năng trong mạng phân phối hạ thế. Cuối cùng, hệ thống cũng có thể được phát triển thêm nhiều tính năng mới trong tương lai.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học GTVT trong Đề tài mã số T2025-DT-002.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. G. Bedi, R. Singh and K. C. Wang (2018), Review of Internet of Things (IoT) in Electric Power and Energy Systems, IEEE Internet of Things Journal, vol.5, no.2, pp.847-870.
- [2]. W. T. Hartman, A. Hansen, E. Vasquez, S. ElTawab and K. Altaii (2018), Energy monitoring and control using Internet of Things (IoT) system, in Proc. 2018 Systems and Information Engineering Design Symposium, pp.13-18.
- [3]. A. R. Manuel, G. C. Aurora, M. G. Ricardo, M. M. Antonio and C. C. Eduardo (2018), Novel Internet of Things Platform for In-Building Power Quality Submetering, Applied Sciences, vol.8, p.1320.
- [4]. Lê Anh Ngọc, Nguyễn Khánh Tùng (2020), Thiết kế IoT gateway cho hệ thống giám sát và quản lý tải điện hạ thế, Tạp chí Khoa học và Công nghệ năng lượng, Trường Đại học Điện lực, số 24, tr.9-19.
- [5]. Mark, J. W. and Weihua, Zhuang (2003), Wireless Communications and Networking, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [6]. Vijay K. Garg (2007), Wireless Communications and Networking, Morgan Kaufmann Publishers.
- [7]. Khaidir Ali1, Rama Okta Wiyagi, Ramadoni Syahputra (June 2017), Reliability Analysis of Power Distribution System, Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY), vol.1, no.2, ISSN 2550-1186, e-ISSN 2580-6823.