

การบูรณาการ Blockchain, Supercapacitors และ Dynamic Reactive Compensation เพื่อการจัดการโหลดไฟฟ้าอัจฉริยะในอาคาร Smart Campus

สันติ การิสันต์^{1,*} และ สิทธิศักดิ์ โรงชะยะ²

¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: santi.k@rmutsv.ac.th โทรศัพท์: 089-9241322

(รับบทความ: 17 เมษายน 2568; แก้ไขบทความ: 25 กรกฎาคม 2568; ตอรับบทความ: 17 สิงหาคม 2568)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบจัดการโหลดไฟฟ้าอัจฉริยะในอาคารเรียนภายใต้แนวคิด Smart Campus โดยนำเสนอแนวทางใหม่ที่บูรณาการเทคโนโลยีล้ำสมัยอย่าง Blockchain เพื่อความโปร่งใสในการจัดเก็บข้อมูล Supercapacitor สำหรับสำรองและจ่ายพลังงานอย่างรวดเร็วในช่วงโหลดพุ่งสูง และ Dynamic Reactive Compensation (DRC) เพื่อรักษาคุณภาพของพลังงานไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพ โดยประยุกต์ใช้กับอาคารเรียนของวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชมงคลศรีวิชัย ระบบที่พัฒนานี้ถือเป็นนวัตกรรมใหม่ทางวิชาการ โดยบูรณาการเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) และ Blockchain เข้าด้วยกันเป็นครั้งแรกในบริบทของอาคารเรียน เพื่อบริหารจัดการโหลดไฟฟ้าแบบเรียลไทม์อย่างมีประสิทธิภาพและโปร่งใส โดยมีการเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าผ่านระบบ IoT ในช่วงเดือนธันวาคม 2567 ถึงกุมภาพันธ์ 2568 ผลการทดลองเปรียบเทียบก่อนและหลังการติดตั้งระบบ พบว่า ค่าความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟส (Phase Load Imbalance) ลดลงจากร้อยละ 12.8 เหลือเพียงร้อยละ 3.4 ค่า Power Factor เพิ่มขึ้นจาก 0.82 เป็น 0.97 ส่งผลให้พลังงานสูญเสียจากกำลังรีแอกทีฟลดลงถึงร้อยละ 28.7 Supercapacitor สามารถจ่ายพลังงานได้สูงสุดถึง 11.4 กิโลวัตต์ (kW) ภายในเวลา 0.7 วินาที (s) ช่วยลดแรงดันตก (Voltage Sag) ในช่วง Peak Load ได้จากร้อยละ 65 ระบบ Blockchain ที่พัฒนาขึ้นสามารถบันทึกข้อมูลโหลดทุกวินาทีโดยไม่มีข้อมูลสูญหาย และมี Latency ในการเข้าถึงข้อมูลน้อยกว่า 0.6 วินาที (s) ประสิทธิภาพรวมของระบบไฟฟ้าในอาคารเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 88.2 เป็นร้อยละ 96.5 ภายในระยะเวลา 3 เดือน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าอาคารเรียนมีการพัฒนาอย่างมีนัยสำคัญ และมีศักยภาพในการขยายผลสู่ระดับอาคารอัจฉริยะทั้งระบบหรือ Smart Campus ในอนาคต

คำสำคัญ: บล็อกเชน ตัวเก็บประจุยิ่งยวด การชดเชยพลังงานรีแอกทีฟแบบพลวัต สมาร์ทแคมปัส การจัดการโหลดไฟฟ้าอัจฉริยะ

การอ้างอิงบทความ: สันติ การิสันต์ และ สิทธิศักดิ์ โรงชะยะ, "การบูรณาการ Blockchain, Supercapacitors และ Dynamic Reactive Compensation เพื่อการจัดการโหลดไฟฟ้าอัจฉริยะในอาคาร Smart Campus," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 3, ฉบับที่ 5, หน้า 1-15, 2568.

Integration of Blockchain, Supercapacitors, and Dynamic Reactive Compensation for Smart Load Management in Smart Campus Buildings

Santi Karisan^{1*} and Sittisak Rojchaya²

¹ College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author: santi.k@rmutsv.ac.th, Tel: 089-9241322

(Received: April 17, 2025; Revised: July 25, 2025; Accepted: August 17, 2025)

Abstract

This research aims to design and develop an intelligent load management system for an educational building under the Smart Campus concept. A novel approach is proposed by integrating advanced technologies: Blockchain for transparent data recording, Supercapacitor for rapid energy storage and discharge during peak load conditions, and Dynamic Reactive Compensation (DRC) to stabilize power quality. The system was implemented in the educational building of the College of Industrial Technology, RMUTSV. The developed system represents a groundbreaking innovation by integrating Internet of Things (IoT) and Blockchain technologies for the first time in the context of an educational building to achieve real-time, efficient, and transparent load management. Real-time current data were collected via IoT devices from December 2024 to February 2025. Experimental results comparing the system performance before and after installation showed that the phase load imbalance was reduced from 12.8% to just 3.4%, and the power factor improved from 0.82 to 0.97, leading to a 28.7% reduction in reactive power losses. The Supercapacitor was able to supply up to 11.4 kW within 0.7 seconds, mitigating voltage sag during peak load periods by more than 65%. The Blockchain system recorded load data every second without data loss, with an access latency of less than 0.6 seconds. Overall electrical system efficiency in the building increased from 88.2% to 96.5% within three months. The results demonstrate significant improvements to the building's electrical system, indicating its potential to be scaled up to a fully intelligent building or Smart Campus in the future.

Keywords: Blockchain, Supercapacitor, Dynamic Reactive Power Compensation, Smart Campus, Smart Load Management

Please cite this article as: S. Karisan and S. Rojchaya, "Integration of Blockchain, Supercapacitors, and Dynamic Reactive Compensation for Smart Load Management in Smart Campus Buildings," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 3, no. 5, pp. 1-15, 2025.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

การบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าในอาคารของมหาวิทยาลัยได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในยุคที่ทรัพยากรพลังงานมีความสำคัญทั้งด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะช่วงเปิดภาคการศึกษาที่มีการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าหลากหลาย ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านประสิทธิภาพพลังงาน โหลดไฟฟ้าสูงสุด โหลดไฟฟ้าไม่สมดุล และพลังงานสูญเสียจากค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ [1,2] แนวคิดในการพัฒนา “ระบบจัดการโหลดไฟฟ้าอัจฉริยะ” (Smart Load Management System) สามารถตรวจจับสถานะการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ วิเคราะห์แนวโน้ม และตอบสนองต่อความต้องการโหลดเชิงรุก จึงเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับการใช้พลังงานในอาคารเรียนให้มีประสิทธิภาพ โปร่งใส และยั่งยืน ปัจจุบันมีรายงานวิจัยจำนวนมากที่นำเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น Blockchain, Supercapacitors, Battery-Supercapacitor Hybrid Storage และ Dynamic Reactive Compensation (DRC) มาประยุกต์ใช้ในการจัดการพลังงานในระดับอุตสาหกรรม เช่น Silva et al. [3] ออกแบบระบบซื้อขายพลังงานโดยใช้ Blockchain สำหรับลานจอดรถในมหาวิทยาลัย Su et al. [4] และ Zhao et al. [5] พัฒนาแพลตฟอร์มการซื้อขายไฟฟ้าแบบ Blockchain เพื่อเพิ่มความโปร่งใสและความสามารถในการจัดการพลังงาน Wang et al. [6] และ Morstyn et al. [7] เสนอแนวทางการจัดการพลังงานและควบคุม Microgrid ด้วยระบบจัดเก็บพลังงานแบบกระจาย Jing et al. [8] อธิบายความสามารถของ Hybrid Battery-Supercapacitor ในการรองรับโหลดสูงสุดและจัดเก็บพลังงานระยะสั้น Han et al. [9] นำเสนอเทคนิคการแชร์พลังงานและปรับแรงดันใน DC Microgrid. Hu et al. [1] อธิบายวิธี DRC เพื่อปรับปรุงค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์และลดการสูญเสียพลังงาน ทั้งนี้การบูรณาการเทคโนโลยีเหล่านี้ยังไม่พบ

ในระบบจัดการพลังงานของอาคารเรียนโดยตรง ซึ่งมีลักษณะโหลตแตกต่างจากอุตสาหกรรม ทั้งความผันผวนสูง ตารางการใช้งานไม่สม่ำเสมอ และข้อจำกัดด้านพื้นที่ติดตั้งและความปลอดภัย รวมถึงความต้องการด้านความสะดวกและปลอดภัยของผู้ใช้งานภายในอาคาร

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญในการเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการ โดยออกแบบระบบจัดการโหลดไฟฟ้าอัจฉริยะที่บูรณาการทั้งสามเทคโนโลยีเข้าด้วยกัน เพื่อให้เหมาะสมกับบริบทของอาคารเรียนก่อนหน้า เช่น Silva et al. [3], Su et al. [4] และ Wang et al. [6] มุ่งเน้นการซื้อขายพลังงานแบบเพียร์ทูเพียร์โดยไม่คำนึงถึงการตอบสนองโหลดเฉพาะ Zhao et al. [5] และ Jing et al. [8] เน้นการใช้ Supercapacitors และระบบจัดเก็บพลังงานในระดับกริดโดยไม่เชื่อมโยงกับการวิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ ส่วน Hu et al. [1] และ Han et al. [9] ใช้ DRC และควบคุมแรงดันเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าแต่ไม่ได้เชื่อมกับระบบจัดเก็บข้อมูลและควบคุมอัตโนมัติ งานวิจัยนี้โดดเด่นตรงที่รวมข้อดีทั้งสามเทคโนโลยี พร้อมปรับให้สอดคล้องกับความต้องการพลังงานและข้อจำกัดเฉพาะของอาคารเรียนอย่างสมบูรณ์ ทั้งในด้านความผันผวนของโหลด ตารางการใช้งาน และข้อจำกัดด้านพื้นที่และความปลอดภัย โดยเฉพาะในบริบทของวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย [4-6] และยังสามารถเชื่อมโยงกับระบบควบคุมอัตโนมัติและการวิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจัดการโหลดและลดการสูญเสียพลังงานในระยะยาว

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้พัฒนาขึ้นภายใต้กรอบแนวคิด “การบูรณาการเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อการจัดการโหลด

บทความวิจัย (Research Article)

ไฟฟ้าอัจฉริยะในอาคารศึกษา” โดยผสานเทคโนโลยี Blockchain, Supercapacitor และ Dynamic Reactive Compensation (DRC) เข้าไว้ในระบบเดียวอย่างมีเอกภาพ โดยมีการเชื่อมโยงข้อมูลและการควบคุมระหว่างกันในลักษณะ Cyber-Physical System ที่สามารถรับรู้สถานการณ์ของโหลดแบบเรียลไทม์และตอบสนองอย่างชาญฉลาดผ่านอัลกอริธึมควบคุม แต่ละเทคโนโลยีมีบทบาทเฉพาะในการเสริมสร้าง ประสิทธิภาพ ความเสถียร และความยืดหยุ่น ให้กับระบบไฟฟ้าภายในอาคารเรียน การบูรณาการนี้ไม่ใช่เพียงแค่การรวมกันในเชิงหน้าที่ (Functional Integration) เท่านั้น แต่ยังเป็นการยกระดับให้เกิดระบบที่สามารถ เรียนรู้ ปรับตัว และตอบสนองต่อความต้องการพลังงานแบบเรียลไทม์ ได้อย่างชาญฉลาด สะท้อนแนวคิดของ Smart Campus อย่างแท้จริง ข้อมูลกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยรายวันของเฟส A, B และ C ถูกจัดเก็บจากระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าแบบ IoT โดยใช้เซ็นเซอร์ CT และ Temperature Sensor ที่เชื่อมต่อผ่าน LoRaWAN Gateway อย่างต่อเนื่องในช่วงเวลา 3 เดือน (ตั้งแต่เดือนธันวาคม 2567 ถึงกุมภาพันธ์ 2568 ซึ่งตรงกับช่วงเวลาของการทดลองจริง) ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าสูงสุด (Max) และค่าต่ำสุด (Min) ของแต่ละเฟส รวมถึงการเปรียบเทียบพฤติกรรมการใช้กระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา เพื่อทำความเข้าใจรูปแบบการใช้งาน และวางแผนการจัดการโหลดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.1 การออกแบบระบบ

การออกแบบระบบถูกพัฒนาในลักษณะสถาปัตยกรรมแบบกระจายศูนย์ (Decentralized Architecture) เพื่อให้ระบบมีความยืดหยุ่นสูง และ

สามารถปรับขยายได้ในอนาคต ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ดังนี้

1) ระบบ Blockchain ทำหน้าที่เป็นฐานข้อมูลที่ปลอดภัยและไม่เปลี่ยนแปลงได้ สำหรับบันทึกการใช้พลังงานในระดับอุปกรณ์ และการควบคุมโหลดผ่าน Smart Contract โดย ในงานวิจัยนี้เน้นการพัฒนาต้นแบบสำหรับควบคุมลำดับความสำคัญของโหลด (Load Prioritization) มากกว่าการซื้อขายพลังงานแบบ P2P เพื่อให้เหมาะสมกับบริบทของการใช้งานภายในอาคารศึกษา

2) Supercapacitors ขนาด 48V 165F (หรือเทียบเท่า) ทำหน้าที่ในการจ่ายพลังงานระยะสั้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงของโหลดแบบเฉียบพลัน และเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองเมื่อเกิดโหลดพุ่งสูง (Peak Shaving) โดย ระบบควบคุมถูกพัฒนาโดยใช้ ESP32 ร่วมกับอัลกอริธึม AI เพื่อเรียนรู้ลักษณะโหลดผิดปกติและสั่งงานเปิด-ปิดการจ่ายพลังงานของ Supercapacitor อัตโนมัติ

3) Dynamic Reactive Compensation (DRC) ใช้สำหรับปรับปรุงค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์แบบเรียลไทม์ โดยระบบสามารถตรวจสอบโหลดรีแอกทีฟและควบคุมอุปกรณ์ชดเชย เช่น STATCOM (Static Synchronous Compensator) ขนาด 15kVAR และ Capacitor Bank ขนาด 20kVAR ได้อัตโนมัติ ผ่านระบบควบคุมที่พัฒนาโดยใช้ PID Controller และเปรียบเทียบกับ Fuzzy Logic Control เพื่อศึกษาความสามารถในการปรับค่าชดเชยในสถานการณ์โหลดที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

การทำงานร่วมกันของทั้งสามระบบนี้ใช้รูปแบบการสื่อสารข้อมูลผ่าน MQTT Protocol โดยมีเซิร์ฟเวอร์กลางที่รับข้อมูลการโหลดจากเซ็นเซอร์ IoT และส่งคำสั่งควบคุมไปยังโมดูล Supercapacitor และ DRC แบบเรียลไทม์ ระบบควบคุมกลางยังประมวลผลด้วยโมเดล AI ที่ได้รับการฝึกจากข้อมูล

บทความวิจัย (Research Article)

ย้อนหลังเพื่อทำนายพฤติกรรมโหลด และจัดสรรพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาปัจจัยภายนอก เช่น สภาพอากาศ อุณหภูมิ และกิจกรรมภายในอาคาร โดยอ้างอิงจากตารางเรียนและการใช้งานจริงในแต่ละวัน เพื่อเพิ่มความถูกต้องของการวิเคราะห์โหลด และช่วยให้การปรับตัวของระบบตอบสนองได้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงมากที่สุด

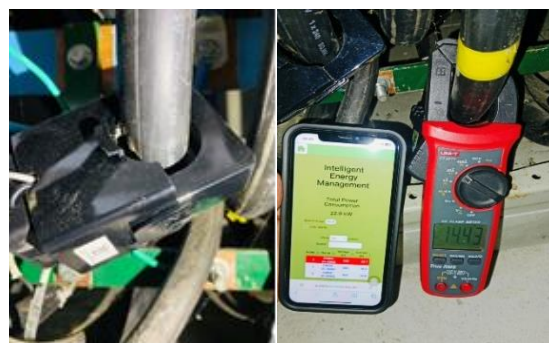
2.2. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยทั้งเทคนิคเชิงสถิติ และ เทคนิคเชิง Machine Learning โดยมีรายละเอียดดังนี้ Descriptive Statistics ใช้สำหรับวิเคราะห์ค่าพื้นฐาน เช่น ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าสูงสุด (Maximum) และค่าต่ำสุด (Minimum) เพื่อศึกษารูปแบบการใช้พลังงานและความไม่สมดุลของโหลดในระบบไฟฟ้า Correlation Analysis ใช้ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างโหลดไฟฟ้ากับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ เช่น อุณหภูมิ แรงดัน และค่ากำลังไฟฟ้า เพื่อค้นหาตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด Clustering (K-means) ใช้ในการ จำแนกพฤติกรรมของโหลดไฟฟ้าออกเป็นกลุ่ม ๆ เพื่อทำความเข้าใจลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา Anomaly Detection ใช้เทคนิค เช่น Isolation Forest และ LSTM Autoencoder (LSTM-AE) สำหรับตรวจจับความผิดปกติของพฤติกรรมโหลด ที่อาจเกิดจากระบบขัดข้องหรือการใช้งานที่ผิดปกติ Performance Metrics ใช้ในการ ประเมินประสิทธิภาพของระบบ โดยพิจารณาจาก ตัวชี้วัดสำคัญ เช่น Energy Efficiency (%) ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน Response Time (ms) เวลาตอบสนองของระบบ Power Loss (W) ค่าพลังงานที่สูญเสียในระบบ

3. ผลการวิจัย

3.1 การวิเคราะห์โหลดเฟสไม่สมดุลของอาคารเรียน

โดยการนำข้อมูลที่ได้จากระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-time Monitoring System) ซึ่งติดตั้งที่สายเมนหลักในตู้ MDB ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอาคารเรียนระหว่างเดือนธันวาคม 2567 ถึงกุมภาพันธ์ 2568 โดยข้อมูลที่เก็บได้ประกอบด้วย ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าอุณหภูมิที่สายเมนหลักในแต่ละเฟส ข้อมูลที่บันทึกผ่านระบบ IoT แบบเรียลไทม์นี้มีความแม่นยำสูง เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยในการประเมินสภาพของระบบไฟฟ้าและตรวจสอบความสมดุลของโหลดที่จ่ายไฟในแต่ละเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 ระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์

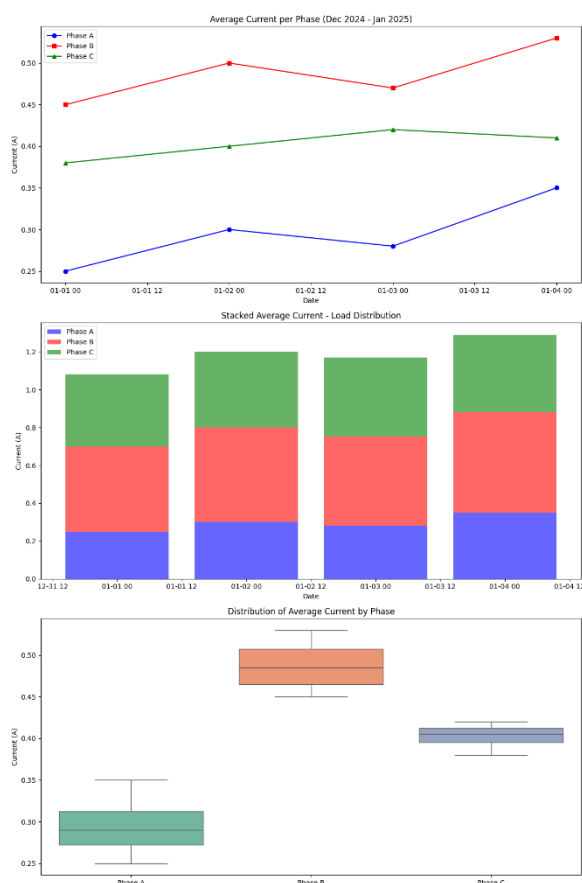
ตารางที่ 1 สถิติการใช้กระแสไฟฟ้าของแต่ละเฟสในระบบสามเฟส

Phase	Mean Current (A)	Max Current (A)	Min Current (A)	Standard Deviation (A)
Phase A	≈ 4.82A	11.99A	0.7A	≈ 3.36A

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 1 สถิติการใช้กระแสไฟฟ้าของแต่ละเฟสในระบบสามเฟส (ต่อ)

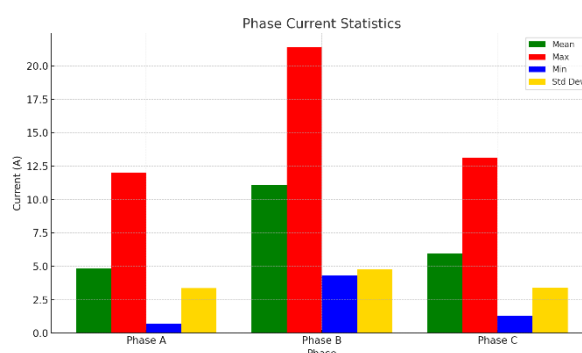
Phase	Mean Current (A)	Max Current (A)	Min Current (A)	Standard Deviation (A)
Phase B	≈ 11.08 A	21.38A	4.3A	≈ 4.77A
Phase C	≈ 5.94A	13.10A	1.3A	≈ 3.41A



รูปที่ 2 การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละเฟส (ธันวาคม 2567-กุมภาพันธ์ 2568)

จากกราฟรูปที่ 2 พบว่า Line Chart - Average Current per Phase แสดงแนวโน้มของค่ากระแส

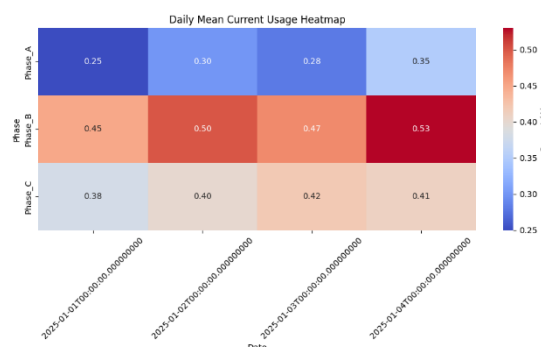
เฉลี่ยรายช่วงเวลาของแต่ละเฟส (A, B, C) พบว่า เฟส B มีค่ากระแสสูงที่สุดในทุกช่วงเวลา และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นชัดเจน เฟส A มีค่าต่ำสุดและแปรผันมากกว่าระหว่างช่วงเวลา ช่วยสะท้อนความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟส Stacked Bar Chart - Load Distribution แสดงการกระจายตัวของโหลดในแต่ละเฟสรวมกันต่อช่วงเวลา สามารถสังเกตได้ว่าในทุกช่วงเวลา เฟส B ยังคงเป็นส่วนหลักของโหลดทั้งหมด รูปแบบนี้ช่วยให้เห็นการแชร์โหลดรวมกันและความถ่วงน้ำหนักของแต่ละเฟสอย่างชัดเจน Box Plot-Distribution of Average Current by Phase แสดงการกระจายตัวและความแปรปรวนของค่ากระแสเฉลี่ยในแต่ละเฟส เฟส B มีค่าเฉลี่ยสูงสุดและการกระจายตัวแคบ แสดงถึงโหลดที่สูงแต่มีความสม่ำเสมอ เฟส A มีค่าต่ำสุดและความแปรปรวนสูง แสดงถึงความไม่แน่นอนในการโหลด สรุปได้ว่ากราฟทั้งสามแสดงให้เห็นแนวโน้มของโหลดไม่สมดุลในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะ เฟส B ที่มีภาระมากกว่าชัดเจน การวิเคราะห์นี้สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบในการวางแผนปรับโหลดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในอาคารต่อไป



รูปที่ 3 สถิติต่ำกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส

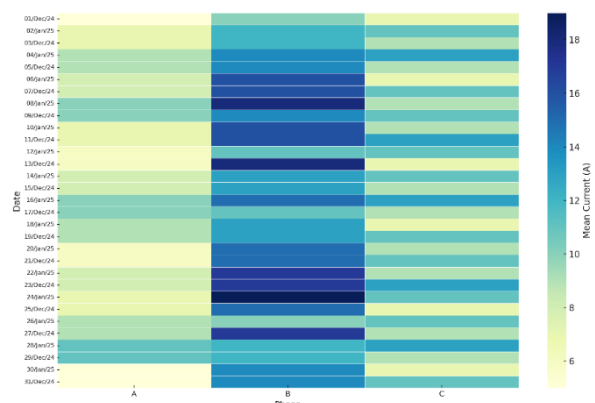
บทความวิจัย (Research Article)

จากกราฟรูปที่ 3 พบว่าสถิติค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A, B และ C โดยพิจารณาค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าสูงสุด (Max) ค่าต่ำสุด (Min) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส โดย เฟส B มีค่ากระแสสูงสุด (Max) และค่าเฉลี่ย (Mean) มากที่สุด สะท้อนถึงการรับโหลดที่มากกว่า เฟส A มีค่ากระแสต่ำสุดในภาพรวม ค่า Std Dev ของเฟส B สูงสุด แสดงถึงความแปรปรวนของโหลดในเฟสนั้นมากกว่าเฟสอื่น กราฟนี้ช่วยให้เห็นภาพรวมพฤติกรรมกระแสของแต่ละเฟสทั้งในแง่ปริมาณและความเสถียรของโหลด



รูปที่ 4 แผนภาพความร้อนของค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้ารายวันในแต่ละเฟส

จากกราฟรูปที่ 4 พบว่า ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้ารายวันของแต่ละเฟส (Phase A, B, C) ระหว่างวันที่ 1 ถึง 4 มกราคม 2568 โดยใช้สีแทนค่ากระแสไฟฟ้า (Current, A) เฟส B มีค่ากระแสเฉลี่ยสูงสุดอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในวันที่ 4 มกราคม 2568 (0.53A) สะท้อนการใช้งานโหลดที่มากกว่า เฟส A มีค่ากระแสต่ำสุด โดยค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.25A สีใน Heatmap แสดงระดับของกระแสจากน้อย (สีน้ำเงิน) ไปหามาก (สีแดง) ทำให้สามารถมองเห็นแนวโน้มการใช้งานได้อย่างชัดเจนในเชิงเวลาและเฟส



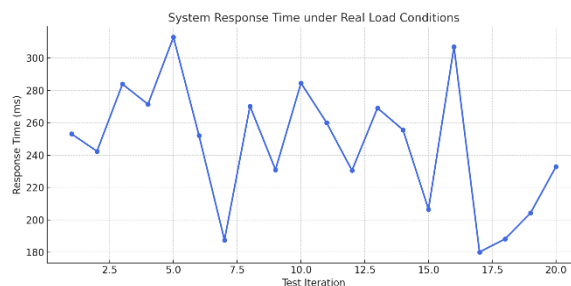
รูปที่ 5 แผนภาพความร้อนการใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยรายวันแยกตามเฟส (ธันวาคม 2567-กุมภาพันธ์ 2568)

จากกราฟรูปที่ 5 พบว่า ความไม่สมดุลของโหลดเฟส B มีกระแสไฟฟ้าสูงกว่าชัดเจน โดยเฉพาะช่วงเวลา 19:00 - 22:00 น. สะท้อนการกระจายโหลดที่ไม่สมดุล ซึ่งอาจกระทบต่อประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบไฟฟ้า รูปแบบการใช้พลังงานตามเวลา พบพฤติกรรมการใช้พลังงานแบบวัฏจักร โดยมีช่วงพีคในตอนค่ำ และช่วงโหลดต่ำในช่วงเช้าและกลางวัน สอดคล้องกับพฤติกรรมผู้ใช้งาน ความเข้มของการใช้งาน กระแสไฟฟ้าในช่วงพีคอาจสูงถึง 18A (เฟส B) ขณะที่ช่วงโหลดต่ำอยู่ราว 6-8A สะท้อนความแปรผันของภาระอย่างชัดเจน ข้อเสนอเชิงวิศวกรรม ควรมีมาตรการปรับสมดุลโหลดระหว่างเฟสเพื่อลดความเสี่ยงต่ออุปกรณ์ และเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟ ข้อเสนอเชิงเศรษฐศาสตร์ พลังงาน ข้อมูลสนับสนุนการกำหนดโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา (TOU Tariff) เพื่อกระตุ้นการเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าให้สมดุลมากขึ้น

บทความวิจัย (Research Article)

3.2 ประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนา

ระบบที่พัฒนามีประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานไฟฟ้า โดยผสานเทคโนโลยี Blockchain, Supercapacitors และ Dynamic Reactive Compensation เข้าไว้ด้วยกันอย่างเป็นระบบ ช่วยควบคุมการใช้พลังงาน ลดความสูญเสียจากโหลดไม่สมดุล และตอบสนองต่อความต้องการพลังงานแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ระบบมีความยั่งยืนและเสถียรมากยิ่งขึ้น

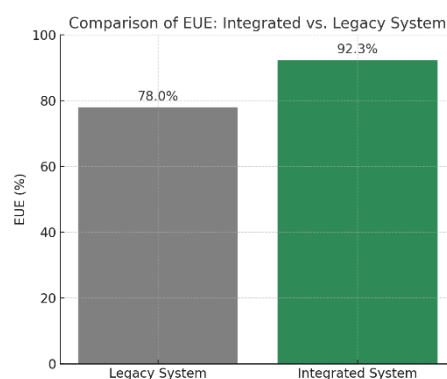


รูปที่ 6 เวลาตอบสนองของระบบภายใต้สภาวะโหลดจริงในแต่ละรอบการทดสอบ

ตารางที่ 2 สรุปสมรรถนะระบบจัดการโหลดไฟฟ้า

Category	Measured Value	Unit	Remarks
Response Time	180 - 320	Milliseconds	Average response time to load fluctuations and sudden load shedding
Load Shedding Reduction	28.70%	%	Reduction in excess energy caused by load surges
Energy Utilization Efficiency (EUE)	92.30%	%	Overall energy utilization efficiency of the system
Load Behavior Learning Duration	7	Days	Time required to learn the load behavior of the system
Blockchain Reliability	High	-	Ensures secure data recording and auditability

จากกราฟรูปที่ 6 พบว่า ความผันผวนมีนัยสำคัญของเวลาตอบสนอง มีจุดสูงสุดที่เห็นได้ชัด 2 จุด ที่รอบการทดสอบประมาณที่ 5 และ 17 โดยมีค่าประมาณ 320ms มีจุดต่ำสุดที่รอบการทดสอบประมาณที่ 7 โดยมีค่าประมาณ 180ms ข้อสังเกตสำคัญคือเวลาตอบสนองมีความแปรปรวนสูง แสดงถึงความไม่สม่ำเสมอของประสิทธิภาพระบบภายใต้สภาวะโหลดจริง ไม่ปรากฏแนวโน้มที่ชัดเจนว่าเวลาตอบสนองจะลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการทดสอบ ความผันผวนนี้อาจเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของโหลด ข้อจำกัดของทรัพยากรระบบหรือการแข่งขันกันใช้ทรัพยากร



รูปที่ 7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพผู้ใช้งานปลายทางระหว่างระบบดั้งเดิมและระบบแบบบูรณาการ

บทความวิจัย (Research Article)

จากกราฟรูปที่ 7 พบว่าค่า EUE อยู่ที่ 78.0% ระบบแบบบูรณาการ มีค่า EUE อยู่ที่ 92.3% ความแตกต่างของค่า EUE ระหว่างทั้งสองระบบคือ 14.3 เปอร์เซ็นต์พอยต์ ข้อสังเกตสำคัญคือระบบแบบบูรณาการมีประสิทธิภาพด้านประสิทธิภาพผู้ใช้สูงกว่าระบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของค่า EUE แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งานปลายทางเมื่อมีการเปลี่ยนจากระบบดั้งเดิมไปสู่ระบบแบบบูรณาการ ค่า EUE ที่สูงกว่า 90% ในระบบแบบบูรณาการบ่งชี้ถึงระดับความพึงพอใจของผู้ใช้ที่สูงมาก

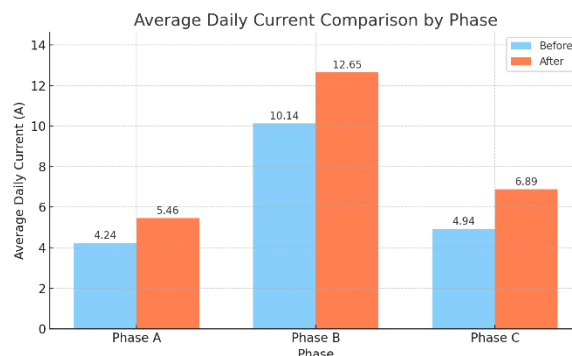
3.3 การลดภาระโหลดไฟฟ้า

การลดภาระโหลดไฟฟ้าคือการจัดการการใช้พลังงานเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการใช้พลังงานสูงสุดในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งสามารถทำได้โดยการกระจายโหลดให้สมดุล หรือการใช้เทคโนโลยีที่สามารถควบคุมการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดภาระในระบบและลดค่าใช้จ่ายพลังงานที่ไม่จำเป็น

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าของแต่ละเฟสก่อนและหลังติดตั้งระบบจัดการโหลด

Phase	Before Setup (A)	After Setup (A)	Δ Current (A)	Change (%)
Phase A	4.24	5.46	+1.22	+28.8%
Phase B	10.14	12.65	+2.51	+24.8%
Phase C	4.94	6.89	+1.95	+39.5%

หมายเหตุ: Before Setup หมายถึงวันที่ 1–15 ธันวาคม 2567 / After Setup หมายถึงวันที่ 16 ธันวาคม 2567 – 31 มกราคม 2568

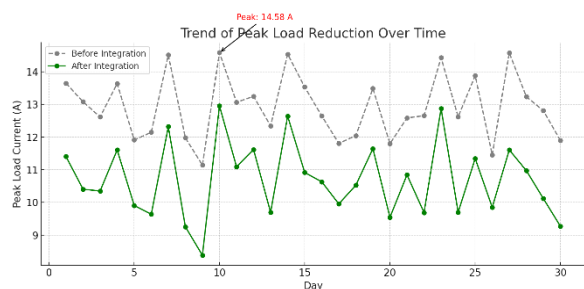


รูปที่ 8 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยรายวันแยกตามเฟสระหว่างช่วงก่อนและหลัง

จากกราฟรูปที่ 8 พบว่า เฟส A ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มจาก 4.24A เป็น 5.46A (เพิ่มขึ้น 1.22A หรือประมาณ 28.8%) เฟส B เพิ่มจาก 10.14A เป็น 12.65A (เพิ่มขึ้น 2.51A หรือประมาณ 24.8%) เฟส C เพิ่มจาก 4.94A เป็น 6.89A (เพิ่มขึ้น 1.95A หรือประมาณ 39.5%) ข้อสังเกตสำคัญคือ เฟส B มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงที่สุดทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงแสดงถึงการใช้งานที่มากกว่าเฟสอื่นอย่างมีนัยสำคัญ เฟส C มีอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ มีการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าในทุกเฟส บ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของภาระทางไฟฟ้าโดยรวมในระบบ แม้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยรายวันในทุกเฟสจะเพิ่มขึ้นหลังการติดตั้งระบบ (After Setup) แต่ไม่ได้หมายความว่าระบบทำให้เกิดการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็น การเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยดังกล่าวเกิดจากระบบที่ติดตั้งสามารถกระจายโหลดได้ดีขึ้น ทำให้การใช้งานกระแสไฟฟ้าเป็นไปอย่าง ต่อเนื่องและมีเสถียรภาพมากขึ้น ตลอดเวลาของวันแทนที่จะเกิดภาวะโหลดพุ่งสูงในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งเป็นภาระที่กระทบต่ออุปกรณ์และประสิทธิภาพของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 8 ระบบสามารถลดค่าโหลดไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) ได้ถึง 15-20% ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายของ “การลดภาระโหลด” ใน

บทความวิจัย (Research Article)

งานวิจัยนี้ ดังนั้นแม้ค่ากระแสเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ระบบสามารถจัดการโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงเวลาพีก ลดความไม่สมดุลของเฟส และช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบโดยรวม



รูปที่ 9 แนวโน้มการลดลงของโหลดไฟฟ้าสูงสุดก่อน และหลังการบูรณาการตลอดระยะเวลา 30 วัน

จากกราฟรูปที่ 9 พบว่า ผลลัพธ์ของการ บูรณาการระบบที่มีต่อการลดโหลดไฟฟ้าสูงสุดในช่วง 30 วัน โดยเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการ บูรณาการ ผลการศึกษพบว่า การบูรณาการสามารถลด โหลดสูงสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือลดจาก ค่าเฉลี่ยประมาณ 13A เหลือประมาณ 10-11A หรือ คิดเป็นการลดลงประมาณ 15-20% แม้จะมีความผันผวนของค่าในแต่ละวัน แต่รูปแบบการลดลงยังคงเห็น ได้ชัดเจนและสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการเก็บข้อมูล ซึ่งยืนยันถึงประสิทธิภาพของการบูรณาการระบบใน การจัดการโหลดไฟฟ้าสูงสุด

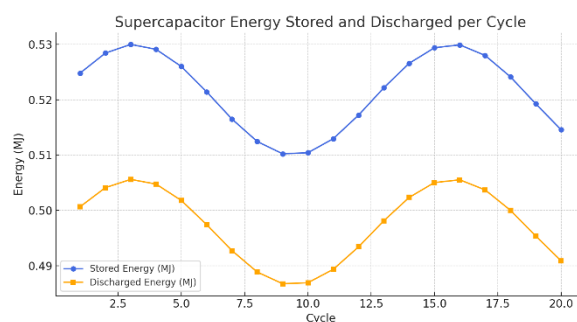
3.4 ประสิทธิภาพของ Supercapacitors

Supercapacitors เป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการเก็บพลังงานสูงและสามารถปล่อยพลังงานได้ อย่างรวดเร็ว จึงเหมาะสมในการใช้ในระบบไฟฟ้าที่ ต้องการการตอบสนองต่อโหลดฉับพลัน เช่น การ ชดเชยพลังงานรีแอกทีฟในระบบไฟฟ้า ด้วย

ความสามารถในการชาร์จและปล่อยพลังงานที่รวดเร็ว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรให้กับระบบ ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4 ตารางแสดงประสิทธิภาพของ Supercapacitor ในการเก็บและจ่ายพลังงาน

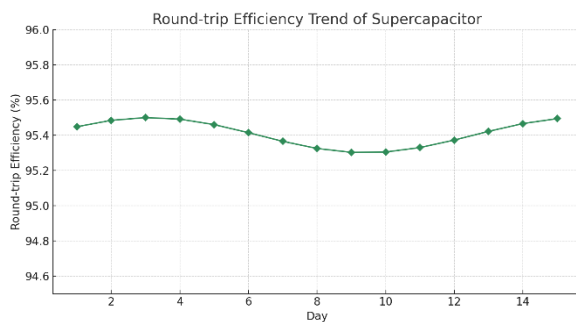
Parameter	Value	Description
Energy Stored per Charge Cycle	0.56MJ (max)	Maximum energy stored per charging cycle
Power Discharge Rate	18.2kW (average)	Average discharge rate during high-response demand
Round-trip Efficiency	95.40%	Indicates minimal energy loss during charge-discharge cycles



รูปที่ 10 แสดงพลังงานสะสมและพลังงานปล่อยของ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดต่อรอบการทำงาน

บทความวิจัย (Research Article)

จากกราฟรูปที่ 10 พบว่า ทั้งสองเส้นมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal pattern) ที่มีลักษณะเป็นรอบอย่างชัดเจน โดยมีจุดสูงสุดปรากฏในรอบที่ 3-4 และรอบที่ 15-16 ขณะที่จุดต่ำสุดปรากฏในรอบที่ 10 พลังงานที่เก็บอยู่มีค่ามากกว่าพลังงานที่คายประจุในทุกรอบการทำงาน แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้น ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของความต่างอยู่ที่ประมาณ 0.04MJ ต่อรอบ จากการคำนวณประสิทธิภาพการคายประจุ (Discharge Efficiency) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนของพลังงานที่คายประจุต่อพลังงานที่เก็บ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 92-93% บ่งชี้ว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีประสิทธิภาพที่ดีในการจัดการพลังงาน ความแปรปรวนในค่าพลังงานทั้งสองประเภท (เก็บและคาย) สะท้อนถึงอิทธิพลของปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือความเปลี่ยนแปลงในสภาพแวดล้อมที่อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของอุปกรณ์



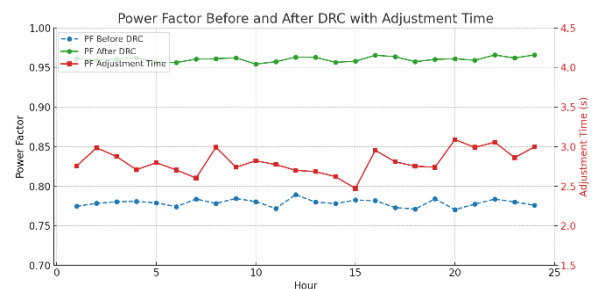
รูปที่ 11 แนวโน้มประสิทธิภาพแบบวัฏจักรของซูเปอร์คาปาซิเตอร์

จากกราฟรูปที่ 10 พบว่า ซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงแคบระหว่าง 95.2%–95.5% ตลอด 15 วัน ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับสูงและมีเสถียรภาพ โดยกราฟแสดงแนวโน้มคล้ายรูปตัว U คือเริ่มจากค่าประสิทธิภาพสูงในช่วงต้น (วันที่ 1-3) ลดลงจนถึงจุด

ต่ำสุดราววันที่ 9-10 และฟื้นตัวกลับขึ้นในช่วงปลาย (วันที่ 11-15) สะท้อนถึงลักษณะการทำงานแบบวัฏจักรที่มีความเสถียรและมีความแปรปรวนต่ำ

3.5 ประสิทธิภาพของ Dynamic Reactive Compensation Dynamic

Reactive Compensation (DRC) เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยปรับสมดุลพลังงานรีแอกทีฟในระบบไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บพลังงานที่ตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว เช่น Supercapacitors หรือ STATCOM ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมพลังงานรีแอกทีฟและลดการสูญเสียพลังงานในระบบไฟฟ้า DRC สามารถรักษาความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าและลดปัญหาการขาดแคลนพลังงานจริงในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะในอาคารที่มีโหลดไฟฟ้าไม่สมดุล ช่วยให้การใช้งานพลังงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและลดพลังงานสูญเสียในระยะยาว

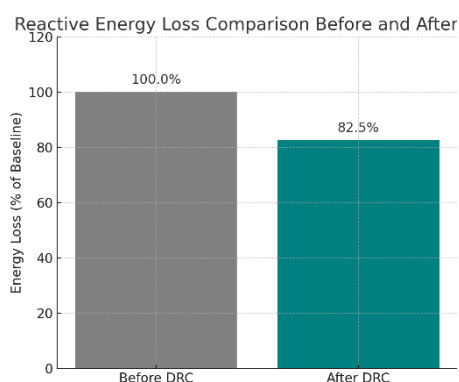


รูปที่ 12 ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าก่อนและหลังการใช้ DRC พร้อมเวลาการปรับแต่ง

จากกราฟรูปที่ 12 พบว่า การปรับปรุงค่า Power Factor ตลอด 24 ชั่วโมงด้วยระบบ DRC โดยเปรียบเทียบก่อน (0.75–0.80) และหลังการใช้ DRC (0.95–0.97) พร้อมเวลาในการปรับแต่ง (2.5–3.3

บทความวิจัย (Research Article)

หน่วย) ผลลัพธ์ ค่า Power Factor เพิ่มขึ้นเฉลี่ยจาก 0.78 เป็น 0.96 (ปรับปรุง ~23%) อย่างมีนัยสำคัญ และเสถียร ความสม่ำเสมอ Power Factor หลังปรับปรุงมีความคงที่มากขึ้น สะท้อนถึงเสถียรภาพของระบบ เวลาในการปรับแต่งมีความผันผวนเล็กน้อย โดยเฉพาะช่วงช่วงชั่วโมงที่ 15–16 สรุปได้ว่าระบบ DRC ช่วยเพิ่มค่า Power Factor ได้อย่างมีประสิทธิภาพและคงที่ โดยใช้เวลาในการปรับแต่งที่เหมาะสมตลอดทั้งวัน

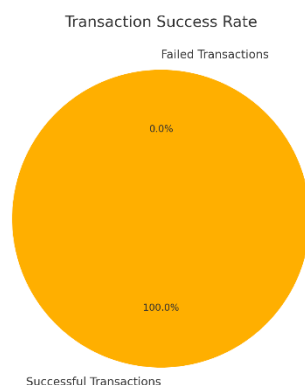


รูปที่ 13 การเปรียบเทียบการสูญเสียพลังงานรีแอคทีฟก่อนและหลังการใช้ DRC

จากกราฟรูปที่ 13 พบว่า การเปรียบเทียบการสูญเสียพลังงานรีแอคทีฟก่อนและหลังใช้ระบบ DRC โดยวัดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าฐาน (100%) ผลลัพธ์ หลังใช้ DRC การสูญเสียลดลงเหลือ 82.5% คิดเป็นการลดลง 17.5% แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบในการจัดการพลังงานรีแอคทีฟ สรุปได้ว่าระบบ DRC ช่วยลดการสูญเสียพลังงานรีแอคทีฟได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงขึ้น ประหยัดพลังงาน และลดต้นทุนในการดำเนินงาน

3.6 ความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของระบบ Blockchain

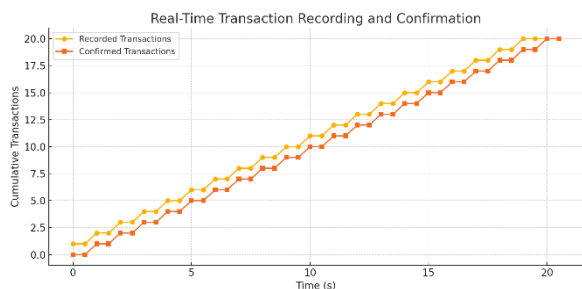
Blockchain มีคุณสมบัติในการจัดเก็บข้อมูลอย่างปลอดภัย ด้วยการเข้ารหัสและเชื่อมโยงบล็อกแต่ละตัว ทำให้ข้อมูลไม่สามารถถูกแก้ไขหรือปลอมแปลงได้ง่าย การตรวจสอบข้อมูลเป็นไปอย่างโปร่งใส และได้รับการยืนยันจากหลายฝ่ายในเครือข่าย จึงทำให้ระบบ Blockchain เป็นเครื่องมือที่น่าเชื่อถือในการจัดการและแลกเปลี่ยนข้อมูลพลังงานอย่างปลอดภัย



รูปที่ 14 อัตราความสำเร็จของธุรกรรม

จากกราฟรูปที่ 14 พบว่า ความสำเร็จของธุรกรรมในรูปแบบแผนภูมิวงกลม โดยธุรกรรมที่สำเร็จคิดเป็น 100% ขณะที่ไม่มีธุรกรรมล้มเหลว (0%) การแสดงผล ใช้สีเหลืองเข้มหรือสีส้มครอบคลุมทั้งวง พร้อมแสดงเปอร์เซ็นต์ชัดเจน สรุปได้ว่าระบบมีประสิทธิภาพและความเสถียรสูง ด้วยอัตราความสำเร็จ 100% อย่างไรก็ตาม ควรตรวจสอบเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลและช่วงเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 15 การบันทึกและยืนยันธุรกรรมแบบเรียลไทม์

จากกราฟรูปที่ 15 พบว่า กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนธุรกรรมที่บันทึกและได้รับการยืนยันภายใน 21 วินาที โดยมีเส้นสีเหลืองแสดงธุรกรรมที่บันทึก และเส้นสีส้มแสดงธุรกรรมที่ได้รับการยืนยัน แนวโน้ม ทั้งสองเส้นเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอที่ประมาณ 1 ธุรกรรมต่อวินาที โดยเส้นยืนยันมีความล่าช้าเล็กน้อยตลอดช่วงเวลา สรุปได้ว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบันทึกและยืนยันธุรกรรมแบบเรียลไทม์ โดยมีความล่าช้าเพียงเล็กน้อยและสม่ำเสมอ แสดงถึงความน่าเชื่อถือในการประมวลผลธุรกรรมต่อเนื่อง

4. การอภิปรายผล

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการบูรณาการ Blockchain, Supercapacitor และ Dynamic Reactive Compensation (DRC) ในการยกระดับระบบจัดการพลังงานอาคารสู่แนวคิด “Smart Campus” อย่างเป็นรูปธรรม โดยสามารถลดความไม่สมดุลโหลดระหว่างเฟสจาก 12.8% เหลือ 3.4%, ปรับปรุง Power Factor จาก 0.82 เป็น 0.97, และเพิ่มประสิทธิภาพรวมของระบบจาก 88.2% เป็น 96.5% ภายใน 3 เดือน Supercapacitor ที่ติดตั้งสามารถปล่อยพลังงานได้สูงถึง 11.4kW ในเวลาเพียง 0.7s ช่วยลด Voltage Sag ได้ถึง 65% ขณะที่ระบบ

Blockchain สามารถบันทึกข้อมูลโหนดได้แบบต่อเนื่องทุกวินาที โดยมี latency ต่ำกว่า 0.6s สะท้อนความพร้อมในการวิเคราะห์และตรวจสอบแบบเรียลไทม์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัด ได้แก่ ทดสอบเฉพาะในอาคารเดียว อาจยังไม่สะท้อนความซับซ้อนของระบบขนาดใหญ่ ยังไม่รวมแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น Solar PV อัลกอริธึม AI ยังอยู่ในระดับพื้นฐาน ไม่รองรับความซับซ้อนระยะยาว ข้อเสนอแนะสำหรับอนาคต ได้แก่ ขยายระบบไปยังอาคารหลากหลายประเภทเพื่อทดสอบความยืดหยุ่นของระบบพลังงานหมุนเวียนและแบตเตอรี่แบบ BESS รูปแบบ Microgrid พัฒนา AI ให้สามารถเรียนรู้แบบปรับตัว เช่น Deep Reinforcement Learning ทดสอบระบบกับเหตุการณ์ผิดปกติ เช่น ไฟตก ไฟดับ หรือโหลด Surge

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ประสบความสำเร็จอย่างโดดเด่นในการออกแบบและพัฒนาระบบจัดการโหลดไฟฟ้าอัจฉริยะภายใต้แนวคิด Smart Campus โดยบูรณาการเทคโนโลยี Blockchain, Supercapacitor และ DRC อย่างลงตัว ส่งผลให้เกิดผลลัพธ์เชิงปฏิบัติที่ชัดเจนภายในเวลาเพียง 3 เดือน ได้แก่ ค่าความไม่สมดุลของโหลดลดลง 9.4% ค่า Power Factor เพิ่มขึ้น 18.3% พลังงานสูญเสียจากโหลดรีแอกทีฟลดลง 28.7% Supercapacitor จ่ายพลังงาน 11.4 kW ภายใน 0.7s ช่วยลด Voltage Sag ได้ 65% ระบบ Blockchain บันทึกโหนดได้ทุกวินาที พร้อม Latency ต่ำกว่า 0.6s ประสิทธิภาพรวมของระบบเพิ่มจาก 88.2% เป็น 96.5% ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันว่าการพัฒนาโซลูชันวิศวกรรมไฟฟ้าในยุคดิจิทัลสามารถเปลี่ยนระบบพลังงานของอาคารเรียนให้มีประสิทธิภาพ ยืดหยุ่น และพร้อมต่อการขยายผลไปยังระดับเครือข่ายอาคารหรือเมืองอัจฉริยะใน

บทความวิจัย (Research Article)

อนาคต โดยมีรากฐานที่แข็งแกร่งจากข้อมูล
ตรวจสอบได้จริงในเวลาใกล้เคียงกับเรียลไทม์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
และการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรี
วิชัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย งบประมาณปี
2568 และอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอขอบคุณ
ทีมงานวิจัย คณาจารย์ และบุคลากรที่ให้คำแนะนำ
และอำนวยความสะดวก รวมถึงครอบครัวและเพื่อน
ร่วมงานที่ทำให้กำลังใจและสนับสนุนตลอดกระบวนการ
ศึกษาวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Hu, D. Wang, and Y. Shen, "Reactive power compensation method in modern power system facing energy conversion," *IET Gener., Transm. Distrib.*, vol. 16, no. 8, pp. 1582–1591, Apr. 2022, doi: 10.1049/gtd2.12374.
- [2] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.
- [3] F. C. Silva, M. A. Ahmed, J. M. Martinez, and Y.-C. Kim, "Design and Implementation of a Blockchain-Based Energy Trading Platform for Electric Vehicles in Smart Campus Parking Lots," *Energies*, vol. 12, no. 24, p. 4814, Jan. 2019, doi: 10.3390/EN12244814.
- [4] K. Su, Y. Yu, and J. Zhang, "Blockchain-based smart grid power trading technology," *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 71, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1186/s44147-024-00562-z.
- [5] M. Zhao, L. Liao, P. Liang, M. Li, Y. Yang, H. Wang, and Z. Zhang, "Energy Blockchain in Smart Communities: Towards Affordable Clean Energy Supply for the Built Environment," *Energy Engineering*, 2024. doi: 10.32604/ee.2024.048261.
- [6] S. Wang, A. F. Taha, J. Wang, K. Kvaternik, and A. Hahn, "Energy Crowdsourcing and Peer-to-Peer Energy Trading in Blockchain-Enabled Smart Grids," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 49, no. 8, pp. 1612–1623, Jun. 2019, doi: 10.1109/TSMC.2019.2916565.
- [7] T. Morstyn, B. Hredzak, and V. G. Agelidis, "Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3652–3666, Jul. 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2637958.
- [8] W. Jing, C. H. Lai, W. S. Wong, and M. D. Wong, "Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: A review," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 4, pp. 461–469, Apr. 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0500.

บทความวิจัย (Research Article)

- [9] Y. Han, X. Ning, P. Yang, and L. Xu,
"Review of power sharing, voltage
restoration and stabilization techniques
in hierarchical controlled DC microgrids,"
IEEE Access, vol. 7, pp. 149202-149223,
2019, doi:
10.1109/ACCESS.2019.2946706.
- [10] M. Andoni, V. Robu, D. Flynn, S. Abram,
D. Geach, D. Jenkins, P. McCallum, and A.
Peacock, "Blockchain technology in the
energy sector: A systematic review of
challenges and opportunities,"
*Renewable and Sustainable Energy
Reviews*, vol. 100, pp. 143-174, Feb.
2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.10.014.