

ระบบปรับสมดุลเฟสอัจฉริยะเพื่อการจัดการพลังงานอาคารเรียน: เปรียบเทียบการใช้ ปัญญาประดิษฐ์ การย้ายฟีดเดอร์อัตโนมัติ และการแปลงพลังงานจากแบตเตอรี่

สันติ การิรันดร์^{1*} และ สิทธิศักดิ์ โรจชยะ²
santi.k@rmutsv.ac.th^{1*}, sittisak.r@rmutsv.ac.th²

¹วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Received: May 26, 2025 Revised: September 23, 2025 Accepted: October 22, 2025

บทคัดย่อ

ในบริบทของประเทศไทยที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การบริหารจัดการพลังงานในภาคอาคารเรียนอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นกลยุทธ์สำคัญที่ช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน และส่งเสริมความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นรูปธรรม งานวิจัยนี้มุ่งวิเคราะห์ข้อมูลโหลดไฟฟ้าแบบเรียลไทม์จากอาคารเรียนช่วงอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เพื่อพัฒนาการจัดการด้านอุปสงค์ (Demand side management: DSM) ที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง การศึกษานี้ได้ออกแบบและทดสอบระบบควบคุมโหลดไฟฟ้าอัตโนมัติในสามรูปแบบ ได้แก่ 1) การย้ายโหลดระหว่างสายป้อน (Feeder-shifting) เพื่อกระจายโหลดอย่างสมดุล 2) ระบบตัวแทนอัจฉริยะ (AI-agent) ที่สามารถเรียนรู้และปรับพฤติกรรมควบคุมตามสภาพโหลดแบบพลวัต (Dynamic load) และ 3) ระบบแบตเตอรี่ร่วมกับอินเวอร์เตอร์ (Battery inverter) สำหรับลดภาระโหลดเฉพาะช่วงเวลาสำคัญ ผลการทดลองเชิงปฏิบัติแสดงให้เห็นว่า ระบบ AI-agent มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดค่าโหลดไฟฟ้าสูงสุด (Peak load) ได้เฉลี่ยถึง 21.7% รองลงมาคือระบบ Battery inverter ซึ่งลดได้ 15.3% และระบบ Feeder-shifting ที่ลดได้ 12.8% ตามลำดับ โดยระบบ AI-agent ยังแสดงศักยภาพในการเรียนรู้และตอบสนองต่อโหลดที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีประสิทธิภาพ ข้อค้นพบของงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า การผสมผสานระบบควบคุมโหลดอัจฉริยะร่วมกับการวิเคราะห์ข้อมูลพลังงานแบบเรียลไทม์ มีศักยภาพสูงในการผลักดันอาคารเรียนสู่แนวทาง อาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net-zero energy building: NZEB) และสามารถประยุกต์ใช้ในอาคารประเภทอื่น ๆ ที่มีลักษณะโหลดใกล้เคียง เช่น อาคารสำนักงานหรืออาคารสาธารณะ เพื่อยกระดับประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระดับประเทศ

คำสำคัญ: การจัดการฝั่งอุปสงค์ โหลดไฟฟ้าสูงสุด อาคารเรียน ตัวประกอบโหลด ประสิทธิภาพพลังงาน

Intelligent phase balancing system for campus energy management: A comparative study of AI, automatic feeder shifting, and battery energy conversion

Santi Karisan^{1*} and Sittisak Rojchaya²
santi.k@rmutsv.ac.th^{1*}, sittisak.r@rmutsv.ac.th²

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

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

Received: May 26, 2025 Revised: September 23, 2025 Accepted: October 22, 2025

Abstract

In the context of Thailand's continuously increasing electricity consumption, effective energy management in educational buildings has become a crucial strategy to reduce operational costs and concretely promote environmental sustainability. This study aims to analyze real-time electrical load data from the integrated industrial technician building at Rajamangala University of Technology Srivijaya, in order to develop a demand side management (DSM) strategy that aligns with actual usage conditions. Three types of automatic load control systems were designed and tested in this study: feeder-shifting, which redistributes load to balance the system, AI-agent, an intelligent system capable of learning and adapting to dynamic load conditions, and battery inverter, which alleviates peak demand during critical periods. Experimental results revealed that the AI-agent system demonstrated the highest effectiveness in reducing the peak load, with an average reduction of 21.7%. The battery inverter and feeder-shifting systems followed with reductions of 15.3% and 12.8%, respectively. Notably, the AI-agent system showed superior learning capability and responsiveness to fluctuating load conditions compared to other techniques. The findings indicate that integrating intelligent load control systems with real-time energy analytics holds high potential in driving educational buildings toward becoming net-zero energy buildings (NZEB). Furthermore, the approach can be effectively applied to other building types with similar load characteristics, such as office buildings and public facilities, to enhance national energy efficiency.

Keywords: Demand side management (DSM), Peak load, Educational building, Load factor, Energy efficiency

1. บทนำ

ในยุคที่โลกต้องเผชิญกับความท้าทายด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างเข้มข้น การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพไม่เพียงแต่เป็นเรื่องของความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐกิจเท่านั้น หากแต่ยังเป็นพันธกิจสำคัญในการขับเคลื่อนสังคมสู่ความยั่งยืน [1] ประเทศไทยในฐานะประเทศกำลังพัฒนาที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จำเป็นต้องเร่งพัฒนาแนวทางการบริหารจัดการพลังงานเชิงรุก โดยเฉพาะในภาคอาคารเรียนซึ่งมีลักษณะการใช้พลังงานเฉพาะทั้งในเวลาและรูปแบบการใช้งาน [2] อาคารเรียนมักมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงในช่วงเวลาทำการ เช่น เวลาเรียน การประชุม และกิจกรรมเสริมหลักสูตร ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาโหลดไฟฟ้าสูงสุด (Peak load) ในบางช่วงเวลา ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงเกินจำเป็น โดยเฉพาะในระบบคิดค่าไฟฟ้าแบบ Time of use (TOU) หรือแบบ Demand charge ที่คำนวณจากค่าสูงสุดของการใช้พลังงานไฟฟ้า [3] นอกจากนี้ผู้ใช้ไฟฟ้ามีความสามารถในการปรับพฤติกรรมตามราคาที่เปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวม [4] ด้วยกระแสการขับเคลื่อนสู่ “อาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์” (Net zero energy building: NZEB) ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจ่ายไฟฟ้า [1] การปรับสมดุลโหลดระหว่างสายจ่ายในระบบสามเฟสเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาโหลดเกินและเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ [5] แนวคิดการจัดการฝั่งอุปสงค์ (Demand side management: DSM) จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยการควบคุมและจัดการโหลดฝั่งผู้ใช้ไฟฟ้าอย่างชาญฉลาด [6] อย่างไรก็ตามความท้าทายอยู่ที่การเลือกใช้เทคโนโลยีและวิธีการที่เหมาะสมกับบริบทของอาคาร ทั้งในด้านขนาดระบบไฟฟ้า พฤติกรรมการใช้งาน และศักยภาพในการลงทุน [7]

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ข้อมูลโหลดไฟฟ้าในอาคารเรียนผ่านระบบตรวจวัดแบบเรียลไทม์ และพัฒนาเทคนิค DSM ที่สามารถลด Peak load ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเปรียบเทียบ 3 รูปแบบระบบควบคุมโหลดไฟฟ้าอัตโนมัติ ได้แก่ เทคนิค Feeder shifting ที่ใช้การปรับสมดุลโหลดระหว่างสายจ่ายไฟฟ้าตามแนวทางที่ได้รับการพิสูจน์แล้ว [5] ระบบ AI-agent ที่เรียนรู้พฤติกรรมการใช้พลังงานและตัดสินใจควบคุมแบบอัตโนมัติ [8] และระบบ Battery inverter ที่จัดการการจ่ายพลังงานจากระบบกักเก็บเพื่อลดโหลดสูงสุด [7] ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้คาดว่าจะนำไปสู่การ

สร้างแบบจำลองการจัดการพลังงานที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ในการเรียนและอาคารสาธารณะอื่น ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นก้าวสำคัญในการยกระดับอาคารเรียนให้สอดคล้องกับแนวโน้มการปฏิรูปด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม [1]

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแนวทางใหม่เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าภายในอาคารเรียนช่วงอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย โดยมีเป้าหมายหลักในการแก้ไขปัญหาโหลดไม่สมดุล (Imbalance load) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความเสถียรและประสิทธิภาพของระบบจ่ายไฟฟ้าในอาคารเรียน

2.1 การเก็บข้อมูลและติดตั้งระบบตรวจวัดเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำและสอดคล้องกับการใช้งานจริง ระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-time monitoring system) ได้ถูกติดตั้งบริเวณสายเมนหลักในตู้ Main distribution board (MDB) ซึ่งเป็นศูนย์กลางการจ่ายไฟหลักของอาคาร โดยระบบนี้ประกอบด้วยเซนเซอร์ IoT ที่สามารถวัดและบันทึกข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วย ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า อุณหภูมิของสายเมนหลัก ข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งผ่านเครือข่าย IoT และแสดงผลบนแพลตฟอร์มคลาวด์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงลึกและติดตามแนวโน้มการใช้งานอย่างใกล้ชิด ตลอดช่วงระยะเวลาธันวาคม 2567 ถึง กุมภาพันธ์ 2568 ซึ่งครอบคลุมทั้งช่วงเปิดภาคเรียนและกิจกรรมอื่น ๆ ภายในอาคารเรียน

2.2 ระบบควบคุมโหลดไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ แนวคิดใหม่เพื่อสมดุลที่ยั่งยืน งานวิจัยนี้เสนอการเปรียบเทียบระบบควบคุมโหลดอัจฉริยะ 3 รูปแบบ โดยออกแบบและจำลองในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อหาความเหมาะสมสูงสุดต่อการใช้งานในอาคารเรียน

2.2.1 Static switch transfer system (SSTS) เป็นระบบสวิตช์แรงดันต่ำความเร็วสูงที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ Static transfer switch (STS) ซึ่งใช้เซมิคอนดักเตอร์ประเภท SCR หรือ IGBT ในการควบคุมการสลับโหลดระหว่างเฟสแบบฉับพลัน (instantaneous switching) โดยสามารถโอนโหลดจากเฟสที่มีภาระสูงไปยังเฟสที่มีภาระต่ำกว่าได้ภายในเวลาไม่เกิน 4ms (< 4ms) ระบบนี้ไม่มีหน่วยเก็บพลังงาน จึงไม่สามารถลดค่า Peak load ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามสามารถช่วยรักษาสถิติของโหลดระหว่างเฟสและลดความร้อนที่เกิดขึ้นในสายเมน

ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ SSTS ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบไฟฟ้าแรงต่ำแบบสามเฟส ซึ่งมีการแยกโหลดในแต่ละเฟสอย่างชัดเจน โดยติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ในแต่ละเฟส เพื่อนำข้อมูลมาใช้วิเคราะห์ภาวะโหลดไม่สมดุล (Load imbalance) ระบบจะทำงานเฉพาะในช่วงเวลาที่ตรวจพบความไม่สมดุลของโหลดเกิน 10% โดยอาศัยการควบคุมแบบ rule-based ซึ่งไม่ได้ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) ข้อดี ต้นทุนต่ำ ตอบสนองรวดเร็ว และติดตั้งง่าย ข้อจำกัด ไม่สามารถลดค่า Peak load ได้ในระยะยาว และไม่มีความสามารถในการเรียนรู้หรือปรับตัว

2.2.2 AI-agent control system เป็นกระบวนการทำงานโดยการใช้ Artificial neural network (ANN) เป็นแกนกลาง โดยออกแบบเป็นระบบ Supervised learning อินพุตที่ใช้สอนระบบมี 5 ตัวแปรหลัก ได้แก่ ค่าโหลดรายนาที่ในแต่ละเฟส (A, B, C), ค่าอุณหภูมิสายเมนหลัก, เวลา (Time slot), วันในสัปดาห์ (Weekday/weekend) และสถานะโหลดกลุ่มอุปกรณ์หลัก (ON/OFF) ความแม่นยำของโมเดล ค่าความแม่นยำ (Accuracy) ประมาณ 93.2%, Mean absolute error (MAE) เฉลี่ย $\pm 1.7A$ และ R^2 score (การพยากรณ์โหลดล่วงหน้า) 0.89 การทำงานของ AI-agent เรียนรู้พฤติกรรมโหลดในแต่ละช่วงเวลา (Time-series pattern) ตัดสินใจ ลด, เลื่อน หรือปิดโหลดเฉพาะกลุ่มแบบอัตโนมัติตอบสนองตามสถานการณ์จริง เช่น วันธรรมดา กับ วันหยุด, กลางวันกับกลางคืน ข้อดี ยืดหยุ่นปรับตัวได้แม่นยำ ลดพีคโหลดได้มาก ข้อจำกัด ซับซ้อนด้านการออกแบบต้องมีระบบฝึกและปรับปรุงสม่ำเสมอ

2.2.3 Phase-targeted battery inverter system ระบบแบตเตอรี่และอินเวอร์เตอร์เจาะจงเฟส สามารถส่งพลังงานไปยังเฟสที่มีภาระสูงโดยตรง รองรับโหลดสูงสุด (Peak load) และเก็บพลังงานช่วงโหลดต่ำได้ มีประสิทธิภาพสูงสุดในทุกมิติ แต่ต้องลงทุนเริ่มต้นสูง

2.3 แนวทางการประเมินและเปรียบเทียบระบบทั้ง 3 รูปแบบ

2.3.1 ประสิทธิภาพในการลดโหลดสูงสุดและความสมดุลของเฟส ในการบริหารจัดการโหลดของระบบไฟฟ้า แนวทางหนึ่งที่มีการนำมาใช้คือการเลือกใช้เทคโนโลยีหรือระบบที่สามารถลดโหลดสูงสุด (peak shaving) และปรับสมดุลของเฟส (phase balancing) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แนวทางหลัก ได้แก่ Static switch transfer

system (SSTS) มีคุณสมบัติโดดเด่นด้านความเร็วในการสลับโหลดและปรับสมดุลเฟส โดยเฉพาะในช่วงที่เกิดความไม่สมดุลเฉียบพลัน อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของระบบนี้คือมีความสามารถในการลดโหลดสูงสุดที่จำกัด เนื่องจากเน้นการทำงานแบบตอบสนองรวดเร็วมากกว่าการจัดการเชิงลึก AI-based control agent (AI-agent) ใช้หลักการเรียนรู้และวิเคราะห์พฤติกรรมของโหลดในระยะยาว ทำให้สามารถพัฒนาแนวโน้มการควบคุมที่เหมาะสมยิ่งขึ้นตามข้อมูลสะสม ส่งผลให้ระบบสามารถลดโหลดสูงสุดและปรับพฤติกรรมการใช้พลังงานให้สอดคล้องกับสภาพการทำงานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ Battery energy storage system with Inverter (Battery inverter) ทำงานบนหลักการเก็บพลังงานในช่วงโหลดต่ำ และปล่อยพลังงานในช่วงโหลดสูง (load leveling) จึงมีประสิทธิภาพสูงในการลดโหลดสูงสุด (Peak load) ปรับความสมดุลของระบบ และช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้า

2.3.2 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในการเลือกใช้งานระบบที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงาน จำเป็นต้องพิจารณาทั้งมิติของประสิทธิผลทางเทคนิคและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากต้นทุนการลงทุนเริ่มต้น (Initial capital cost) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period) คือระยะเวลาที่สามารถชดเชยเงินลงทุนเริ่มต้นจากผลประโยชน์ค่าไฟฟ้าต่อปี ซึ่งคำนวณจากการเปรียบเทียบ เงินลงทุนรวมของระบบควบคุมโหลดกับมูลค่าการลดค่าไฟฟ้ารายปี ที่ได้จากการลดค่าโหลดไฟฟ้าสูงสุด (Peak load) คำนวณได้ตามสมการ

$$PP = \frac{C_{initial}}{S_{annual}} \quad (1)$$

โดยที่ $C_{initial}$ = ค่าใช้จ่ายลงทุนเริ่มต้นของระบบ (บาท) และ S_{annual} = มูลค่าการประหยัดพลังงานต่อปี (บาท/ปี)

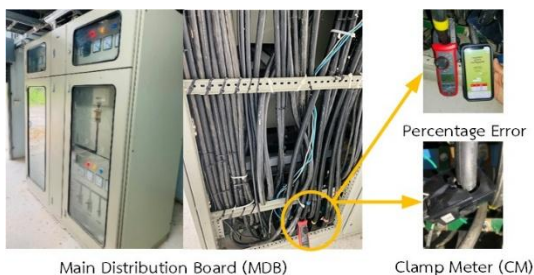
2.3.3 ประสิทธิภาพด้านพลังงาน ในระยะยาว การประเมินแนวโน้มการประหยัดพลังงานในระยะยาวสามารถดำเนินการผ่านการจำลอง (simulation) และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพฤติกรรมของโหลด โดยพบว่าระบบ Battery inverter มีคุณสมบัติเด่นในการชดเชยช่วงโหลดสูงสุด (Peak load) ทำให้ลดการใช้พลังงานโดยรวมได้มาก ระบบ AI-agent มีแนวโน้มปรับปรุงประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากสามารถ

เรียนรู้จากข้อมูลในอดีตและสภาพการใช้งานที่เปลี่ยนแปลง ระบบ SSTS มีความเสถียรในการประหยัดพลังงาน แต่ขาดความสามารถในการพัฒนาประสิทธิภาพต่อเนื่อง

2.3.4 แนวทางการบูรณาการระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ จากหลักการทางวิศวกรรมระบบไฟฟ้า การบูรณาการระบบ (System integration) ที่มีจุดแข็งต่างกันสามารถสร้างผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้ระบบใดระบบหนึ่งเพียงลำพัง แนวทางการบูรณาการที่มีประสิทธิภาพควรประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญดังนี้ ใช้ระบบ SSTS เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการปรับสมดุลโหลดแบบทันที (instant load balancing) เสริมด้วย AI-agent เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานอย่างชาญฉลาด เรียนรู้พฤติกรรมโหลด และปรับกลยุทธ์การใช้พลังงานให้เหมาะสมในระยะยาว ติดตั้ง Battery inverter ขนาดเหมาะสม เพื่อรองรับโหลดในช่วงสูงสุด โดยเฉพาะช่วงเวลาที่ความต้องการพลังงานสูง หรือระบบมีความไม่แน่นอน

3. ผลการวิจัย

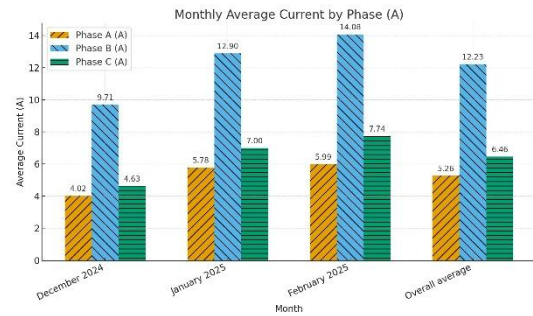
3.1 การวิเคราะห์โหลดเฟสไม่สมดุลของอาคารเรียนช่วงอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย โดยการนำข้อมูลที่ได้จากระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-time monitoring system) ซึ่งติดตั้งที่สายเมนหลักในตู้ Main Distribution Board (MDB) ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอาคารเรียนระหว่างเดือนธันวาคม 2567 ถึงกุมภาพันธ์ 2568 โดยข้อมูลที่เก็บได้ประกอบด้วย ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าอุณหภูมิที่สายเมนหลักในแต่ละเฟส ข้อมูลที่บันทึกผ่านระบบ IoT แบบเรียลไทม์นี้มีความแม่นยำสูง เมื่อทำการเปรียบเทียบความแม่นยำกับเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า Clip AM ซึ่งจะช่วยในการประเมินสภาพของระบบไฟฟ้าและตรวจสอบความสมดุลของโหลดที่จ่ายไฟในแต่ละเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 ระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์และทดสอบความแม่นยำของระบบ

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้ารายเดือนแยกตามเฟส

Month	Phase A (A)	Phase B (A)	Phase C (A)
December 2024	4.02	9.71	4.63
January 2025	5.78	12.90	7.00
February 2025	5.99	14.08	7.74
Overall average	5.26	12.23	6.46



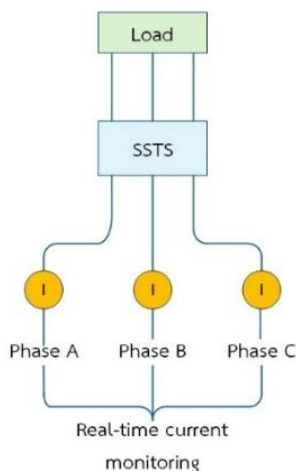
รูปที่ 2 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ารายเดือนของเฟส A, B และ C (ธันวาคม 2567 – กุมภาพันธ์ 2568)

จากกราฟที่ 2 พบว่า เฟส B มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงที่สุดในทุกเดือน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 12.33A โดยเริ่มจาก 10.61A ในเดือนธันวาคม เพิ่มขึ้นเป็น 12.52A ในเดือนมกราคม และ 14.17A ในเดือนกุมภาพันธ์ 2568 เฟส C มีค่ากระแสรองลงมา โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน จาก 4.87A, 6.46A และ 7.31A ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.17A ขณะที่เฟส A มีค่ากระแสต่ำสุด โดยเริ่มจาก 4.20A ในเดือนธันวาคม 2567 เพิ่มขึ้นเป็น 5.29A และ 5.73A ในเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์ 2568 ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ย 5.05A ทั้งนี้ ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสยังอยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงปิดภาคเรียน จึงมีการใช้งานพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าปกติ

3.2 การประเมินประสิทธิภาพของแนวทางการควบคุมโหลด 3 ระบบ

3.2.1 ระบบ Static switch transfer system (SSTS) ในระบบไฟฟ้าสามเฟส มักเกิดโหลดไม่สมดุล ทำให้กระแสแต่ละเฟสแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดความร้อนและความสูญเสียในระบบ มากขึ้น ระบบ Static switch transfer system (SSTS) ถูกพัฒนาเพื่อแก้ปัญหานี้ โดยใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการสลับโหลดระหว่างเฟสแบบเรียลไทม์ ทำให้กระแสในแต่ละเฟสใกล้เคียงกันมากขึ้น คุณสมบัติของ SSTS ตรวจจับและสลับโหลดอัตโนมัติในเวลาไม่กี่ ms

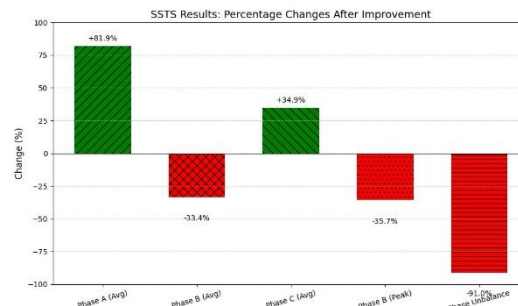
ลดความต่างของกระแสระหว่างเฟสได้ประมาณ 20-50% ลดความสูญเสียและยืดอายุอุปกรณ์ SSTS เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการคุณภาพไฟฟ้าสูงและลดความร้อนสะสมในเฟสที่โหลดหนักเกินไป ดังรูปไดอะแกรม



รูปที่ 3 การเฝ้าติดตามกระแสไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ของโหลดสามเฟสผ่าน SSTS

ตารางที่ 2 ตารางการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าและความไม่สมดุลของเฟส

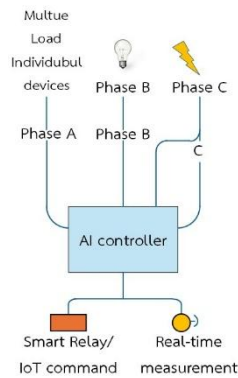
Parameter	Before improvement	After improvement	Change (%)
Average current Phase A	5.02A	9.13A	+81.9
Average current Phase B	12.22A	8.14A	-33.4
Average current Phase C	6.28A	8.47A	+34.9
Peak current Phase B	23.77A	15.3A	-35.7
Phase imbalance	143%	13%	-91.0



รูปที่ 4 ผลลัพธ์ SSTS การเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์หลังการปรับปรุง

จากกราฟรูปที่ 4 พบว่า ด้านบวก เฟส A เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ +81.9% ซึ่งแสดงถึงการปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เฟส C แสดงการเพิ่มขึ้นที่ +34.9% สะท้อนให้เห็นถึงผลลัพธ์เชิงบวกในระดับปานกลาง ด้านลบ เฟส B แสดงการลดลง -33.4% ซึ่งควรได้รับการวิเคราะห์เพิ่มเติม เฟส D (Peak) ลดลง -35.7% บ่งชี้ถึงความท้าทายในการควบคุมค่าสูงสุด เฟส Imbalance ลดลงอย่างรุนแรงถึง -91.0% แสดงถึงความไม่สมดุลในระบบที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก นัยสำคัญสำหรับงานวิจัยนี้คือการพบความไม่สอดคล้องกันระหว่างผลลัพธ์ในแต่ละเฟส บ่งชี้ถึงความซับซ้อนของระบบ ซึ่งมาตรการปรับปรุงอาจส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์แต่ละตัวแตกต่างกันการลดลงอย่างมากของ Phase imbalance โดยเฉพาะควรได้รับการตรวจสอบเพิ่มเติมเพื่อระบุสาเหตุและพัฒนาแนวทางการแก้ไข งานวิจัยควรมุ่งเน้นหาวิธีการหรือรูปแบบใหม่ ๆ ในการปรับปรุงสมดุลระหว่างการเพิ่มประสิทธิภาพในเฟส A และ C ขณะที่แก้ไขปัญหาในเฟสอื่น ๆ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สมดุลและยั่งยืนมากขึ้น

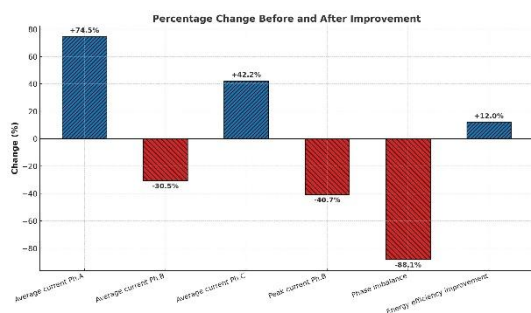
3.2.2 ระบบ AI-agent control system วิเคราะห์ผลลัพธ์จากการจำลอง (Simulation) ประสิทธิภาพในการคาดการณ์และจัดสมดุลโหลดอัตโนมัติ ขั้นตอนการทำงาน การเก็บข้อมูลและฝึกสอน AI เก็บข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์แต่ละชนิดสร้างโมเดล Neural network เพื่อเรียนรู้แนวโน้มการใช้ไฟฟ้า ฝึกสอน AI ให้ตัดสินใจปรับเฟสโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อระบบการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ติดตั้ง Smart relay/Contactor ที่สามารถสั่งงานได้ผ่าน IoT เชื่อมต่ออุปกรณ์สำคัญที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงเข้ากับระบบติดตั้งเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ กระบวนการทำงานของ AI ตรวจสอบแนวโน้มการใช้ไฟฟ้าล่วงหน้า 30min พยากรณ์โหลดเฟส B เพื่อเตรียมการย้ายโหลด สับสลับเฟสของอุปกรณ์อัตโนมัติเมื่อคาดการณ์ว่าจะมีโหลดเกิน ดังรูปไดอะแกรม



รูปที่ 5 ระบบปรับสมดุลโหลดระหว่างเฟสด้วย AI และ IoT พร้อมการวัดแบบเรียลไทม์

ตารางที่ 3 ผลการปรับปรุงความสมดุลของกระแสไฟฟ้า 3 เฟส และประสิทธิภาพพลังงาน

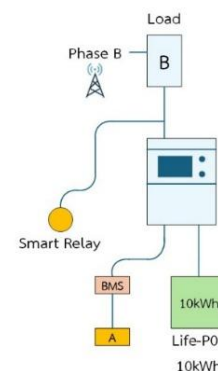
Parameter	Before improvement	After improvement	Change (%)
Average current Ph.A	5.02A	8.76A	+74.5%
Average current Ph.B	12.22A	8.49A	-30.5%
Average current Ph.C	6.28A	8.93A	+42.2%
Peak current Ph.B	23.77A	14.1A	-40.7%
Phase imbalance	143%	17%	-88.1%
Energy efficiency improvement	Baseline	+12%	+12%



รูปที่ 6 ผลลัพธ์ AI-agent การเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์หลังการปรับปรุง

จากกราฟรูปที่ 6 ผลการปรับปรุงด้วย AI-agent แสดงทั้งผลบวกและลบ เฟส A ปรับปรุงเด่นชัด (+74.5%) และเฟส C ดีขึ้น (+42.2%) พร้อมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานเล็กน้อย (+12.0%) อย่างไรก็ตาม ความไม่สมดุลระหว่างเฟสยังคงมาก (-88.3%) และเฟส B มีประสิทธิภาพลดลงทั้งค่าเฉลี่ย (-10.5%) และค่าสูงสุด (-30.7%) สะท้อนว่า AI-agent อาจเน้นปรับเฉพาะเฟส A และ C จนกระทบเฟส B และสมดุลระบบ ข้อเสนอแนะควรวิเคราะห์สาเหตุการลดลงของเฟส B และปรับอัลกอริทึมของ AI-agent ให้ปรับปรุงทุกเฟสอย่างสมดุล พัฒนากลไกรักษาสมดุลระหว่างเฟสเพื่อลดผลเสียต่อเสถียรภาพ และพิจารณาการแลกเปลี่ยนระหว่างการปรับเฉพาะเฟสกับความสมดุลโดยรวมให้สอดคล้องกับเป้าหมายและข้อจำกัดของระบบ

3.2.3 ระบบ Phase-targeted battery inverter system การชดเชยโหลดเฉพาะเฟสด้วยพลังงานสำรองลดโหลดสูงสุด (Peak shaving) ในช่วงเวลาสำคัญ Load shifting ผ่าน Battery inverter เฉพาะเฟส B สถาปัตยกรรมระบบ Battery inverter สำหรับ Load shifting เฉพาะเฟส B การออกแบบระบบ แบตเตอรี่ LiFePO₄ ขนาด 10kWh Hybrid inverter ขนาด 10kW เฉพาะเฟส B ระบบ BMS (Battery management system) ระบบตรวจจับกระแสไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ การตั้งค่าการทำงาน ชาร์จแบตเตอรี่เมื่อโหลดเฟส B < 5A จ่ายไฟจากแบตเตอรี่เมื่อโหลดเฟส B > 9A ปรับกำลังจ่ายแบบไดนามิกตามปริมาณโหลดที่เกิน ตอบสนองภายใน 50ms เมื่อตรวจพบโหลดเกิน กลยุทธ์การจัดการพลังงาน ชาร์จแบตเตอรี่ในช่วงกลางคืนหรือวันหยุด (ช่วงโหลดต่ำ) สำรองกำลังไฟฟ้าสำหรับช่วงเวลาที่มิโหลดสูง ป้องกันไม่ให้แบตเตอรี่คายประจุต่ำกว่า 20% ดังรูปไดอะแกรม



รูปที่ 7 ระบบจัดการโหลดเฟส B ด้วย Smart Relay และแบตเตอรี่สำรอง LiFePO₄

ตารางที่ 4 ดัชนีชี้วัดการปรับปรุงระบบไฟฟ้าเฟส B

Parameter	Before (est.)	After (est.)	Change (%)
Phase B (Peak)	21.25A	9.00A	-57.70%
Phase B (Average peak)	15.53A	8.50A	-45.30%
Energy usage in phase	1000kWh	850kWh	-15.00%
Transformer loading	100%	82%	-18.00%
Thermal damage	100 (base)	75	-25.00%



รูปที่ 8 ผลลัพธ์จากระบบ AI-agent การเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์หลังการปรับปรุง

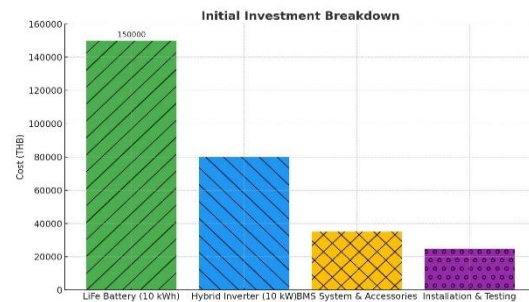
จากกราฟรูปที่ 8 พบว่า ผลการปรับปรุงระบบอินเวอร์เตอร์แบตเตอรี่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญในพารามิเตอร์สำคัญทั้งห้าประการ โดยมีรายละเอียดดังนี้ กระแสไฟฟ้าสูงสุดในเฟส B ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 21.25A เหลือเพียง 9.00A คิดเป็นการลดลงร้อยละ 57.70 ในขณะที่ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าสูงสุดในเฟส B ลดลงจาก 15.53A เหลือ 8.50A หรือลดลงร้อยละ 45.30 สำหรับการบริโภคพลังงานในเฟสลดลงจาก 1,000kWh เหลือ 850kWh คิดเป็นการลดลงร้อยละ 15.00 ด้านภาระการทำงานของหม้อแปลงลดลงจากร้อยละ 100 เหลือร้อยละ 82 หรือลดลงร้อยละ 18.00 และความเสียหายจากความร้อนลดลงจากค่าฐานที่ 100 เหลือ 75 หรือลดลงร้อยละ 25.00 ข้อมูลเชิงประจักษ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงระบบส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในด้านการลดความเข้มของกระแสไฟฟ้าในเฟส B ซึ่งส่งผลต่อเนื่องในการลดความเสียหายจากความร้อนและการใช้พลังงานโดยรวม

ตารางที่ 5 รายการและค่าใช้จ่ายสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ LiFe [7]

Item	Cost (THB)
LiFePO ₄ battery (10kWh)	150,000
Hybrid inverter (10kW)	80,000
BMS System and accessories	35,000
Installation and system testing	25,000
Total investment	290,000

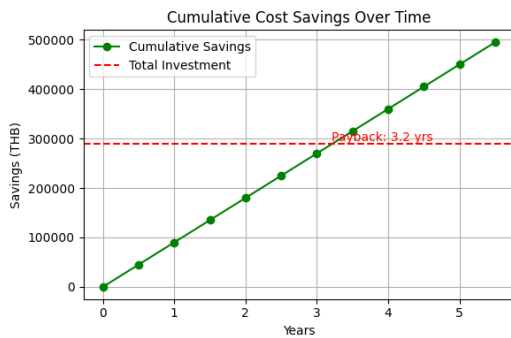
ตารางที่ 6 ผลตอบแทนทางการเงินจากการลงทุนในระบบกักเก็บพลังงาน

Description	Value
Annual energy savings	4,200kWh
Annual electricity cost savings	90,000THB
Payback period	3.2 years



รูปที่ 9 การแจกแจงค่าใช้จ่ายในการลงทุนระบบกักเก็บพลังงาน

จากกราฟรูปที่ 9 พบว่า โครงสร้างต้นทุนของระบบพลังงานมีองค์ประกอบหลักคือ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ลิเทียมเฟอร์โรฟอสเฟต (LiFePO₄) ขนาด 10kWh ซึ่งมีมูลค่าการลงทุนสูงสุดที่ 150,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 50 ของต้นทุนรวมทั้งหมด รองลงมาคือ อินเวอร์เตอร์แบบไฮบริด (Hybrid inverter) ขนาด 10kW มูลค่า 80,000 บาท (คิดเป็นร้อยละ 27.6) ตามด้วยระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery management system: BMS) และอุปกรณ์เสริม มูลค่า 35,000 บาท (ร้อยละ 12.1) และค่าติดตั้งพร้อมการทดสอบระบบ มูลค่า 25,000 บาท (ร้อยละ 8.6) จากการวิเคราะห์พบว่ามูลค่าการลงทุนรวมอยู่ที่ 290,000 บาท โดยมีสัดส่วนที่ชัดเจนว่าระบบกักเก็บพลังงานเป็นองค์ประกอบหลักของต้นทุน ซึ่งสะท้อนถึงความสำคัญของการเลือกใช้เทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพและความเหมาะสมด้านต้นทุน สำหรับการพัฒนาโครงการในระยะยาวและการขยายผลในระดับระบบ

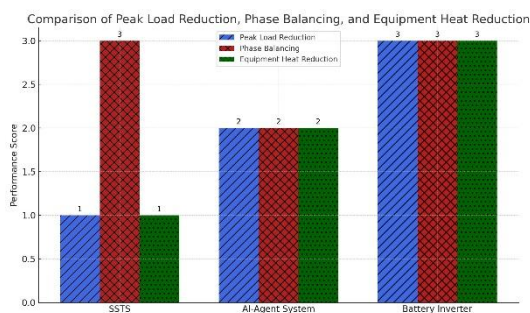


รูปที่ 10 กราฟแสดงการสะสมของการประหยัด
ค่าไฟฟ้าและระยะเวลาคืนทุนของระบบแบตเตอรี่
LiFePO₄

จากกราฟรูปที่ 10 พบว่า การสะสมของการ
ประหยัดค่าไฟฟ้ารายปีจากการติดตั้งระบบแบตเตอรี่
LiFePO₄ ซึ่งมีมูลค่าประหยัดปีละ 90,000 บาท โดย
เส้นสะสมตัดกับต้นทุนเริ่มต้น 290,000 บาทที่ปีที่ 3.2
ซึ่งเป็นระยะเวลาคืนทุน (Payback period) หลังจากปี
ที่ 3.2 เป็นต้นไป การลงทุนเริ่มสร้างผลตอบแทนสุทธิ
(Net benefit) แสดงถึงความคุ้มค่าและความยั่งยืนของ
โครงการในระยะยาว

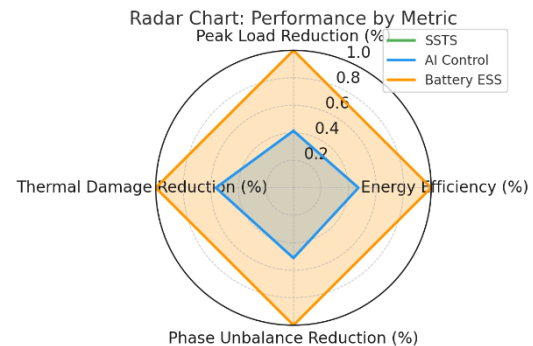
3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ ใช้
การจำลองในสภาพแวดล้อมจริงเพื่อประเมิน
ประสิทธิภาพของระบบทั้ง 3 ได้แก่ SSTS, AI-agent
และ Battery inverter

3.3.1 เปรียบเทียบในด้านความ
สามารถในการลดโหลดสูงสุด (Peak load reduction)
ความสามารถในการปรับสมดุลเฟส (Phase balancing)
ความสามารถในการลดความร้อนของอุปกรณ์ (Heat
reduction) มีการให้คะแนนตามประสิทธิภาพ (1=ต่ำ,
2=ปานกลาง, 3=สูง) และคำนวณคะแนนรวมภาพรวม
(Overall improvement score)



รูปที่ 11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบควบคุม
พลังงานไฟฟ้า 3 ประเภท

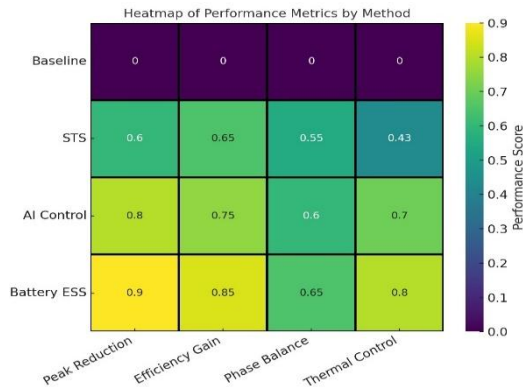
จากกราฟที่ 11 พบว่า ระบบควบคุมพลังงาน
ทั้ง 3 ประเภทมีจุดเด่นแตกต่างกัน ได้แก่ SSTS
มีคะแนนสูงสุดในการปรับสมดุลเฟส (3) แต่มี
คะแนนต่ำในการลดโหลดสูงสุดและลดความร้อน
ของอุปกรณ์ (1) AI-agent มีคะแนนระดับปานกลาง
(2) ในทั้งสามด้าน แสดงถึงประสิทธิภาพที่สมดุลแต่ไม่
โดดเด่น Battery inverter ได้คะแนนสูงสุดในการ
ลดโหลดสูงสุดและลดความร้อนของอุปกรณ์ (3) แต่ได้
คะแนนต่ำสุดในการปรับสมดุลเฟส (1) ผลการ
ประเมินชี้ให้เห็นว่าแต่ละระบบมีจุดแข็งเฉพาะด้าน
ซึ่งควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการ
ควบคุมพลังงานในระบบนั้น ๆ



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบจัด
การพลังงานในด้านต่าง ๆ ด้วยแผนภาพความร้อน

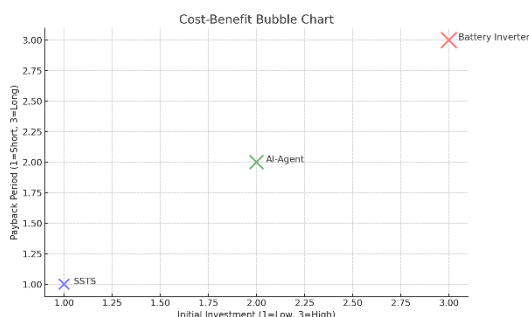
จากกราฟรูปที่ 12 พบว่า การเปรียบเทียบ
ประสิทธิภาพของ 4 วิธี ได้แก่ Baseline, Control
method 1, Control method 2 และ SSTS Method
โดย Baseline มีค่าเป็น 0.00 ในทุกมิติ แสดงถึงสถานะที่
ไม่มีการปรับปรุง Control method 1 เป็นการควบคุม
พื้นฐานที่เน้นลด Peak load มีประสิทธิภาพปานกลาง
(ประมาณ 0.60) Control method 2 พัฒนาขึ้นโดยเพิ่ม
การจัดสมดุลโหลดระหว่างเฟส จึงมีประสิทธิภาพดีขึ้นใน
ทุกมิติ โดยเฉพาะ Peak reduction (0.80) ขณะที่ SSTS
Method ให้ผลลัพธ์สูงสุดในทุกมิติ โดยเฉพาะด้าน
Phase balance ที่ 0.95 สรุปได้ว่าการควบคุมที่ซับซ้อน
และครบวงจรขึ้น เช่น Control method 2 และ SSTS
Method ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า Baseline อย่างชัดเจนชัดเจน

3.3.2 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทาง
เศรษฐศาสตร์ วิเคราะห์โดยเปรียบเทียบต้นทุนการลงทุน
เริ่มต้น (Initial investment) ระยะเวลาคืนทุน (Payback
period) ความคุ้มค่าในแง่ต้นทุนประสิทธิภาพ (Cost-
effectiveness) ใช้กราฟแบบฟอง (Bubble chart) เพื่อ
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนและผลตอบแทน



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ SSTS, AI control และ Battery ESS ในด้านต่าง ๆ

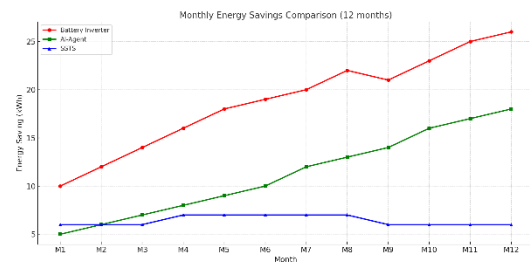
จากกราฟที่ 13 พบว่า Peak reduction (การลดจุดสูงสุด) วิธี Baseline มีประสิทธิภาพต่ำสุด (0.00) ในทุกตัวชี้วัด Linear method และ Simulated แสดงประสิทธิภาพที่ดีที่สุด (0.80) Least squares อยู่ในระดับปานกลาง (0.60) Efficiency gain (การเพิ่มประสิทธิภาพ) Simulated มีค่าสูงสุด (0.80) Linear method และ Least squares มีค่าเท่ากัน (0.65, 0.75) Phase balance (สมดุลเฟส) ทุกวิธีแสดงประสิทธิภาพที่ตีพอสมควร (0.55-0.65) มีความแตกต่างน้อยที่สุดในตัวชี้วัดนี้ Thermal control (การควบคุมความร้อน) Simulated มีประสิทธิภาพสูงสุด (0.80) Linear method รองลงมา (0.70) มีความแตกต่างชัดเจนระหว่างวิธีการต่าง ๆ สรุปได้ว่าวิธี Simulated แสดงประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในหลายตัวชี้วัด ขณะที่ Baseline มีประสิทธิภาพต่ำสุดอย่างชัดเจน การใช้ Linear method และ Least squares เป็นทางเลือกที่สมดุลระหว่างประสิทธิภาพและความซับซ้อน



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบต้นทุนและผลตอบแทนของระบบ SSTS, AI-agent และ Battery inverter

จากกราฟรูปที่ 14 พบว่า ระบบ SSTS มีดัชนีการลงทุนเริ่มต้นต่ำที่สุดที่ประมาณ 1.00 และมีผลตอบแทนต่อการลงทุนอยู่ที่ประมาณ 1.00 ขณะที่เทคโนโลยี AI-agent มีค่าดัชนีการลงทุนเริ่มต้นปานกลางที่ประมาณ 2.00 แต่ให้ผลตอบแทนต่อการลงทุนที่สูงขึ้นที่ประมาณ 2.00 ส่วนระบบแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์มีดัชนีการลงทุนเริ่มต้นสูงที่สุดที่ประมาณ 3.00 แต่ก็ให้ผลตอบแทนต่อการลงทุนสูงที่สุดเช่นกันที่ประมาณ 3.00 ข้อมูลนี้แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างระดับการลงทุนเริ่มต้นและผลตอบแทนที่คาดหวัง ซึ่งมีนัยสำคัญต่อการตัดสินใจเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมตามข้อจำกัดด้านงบประมาณและเป้าหมายผลตอบแทนทางการเงิน

3.3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานในระยะยาว ใช้การจำลองการประหยัดพลังงานรายเดือนเป็นระยะเวลา 12 เดือน วิเคราะห์แนวโน้มการประหยัดพลังงานของแต่ละระบบ โดยเฉพาะในช่วงที่โหลดสูง



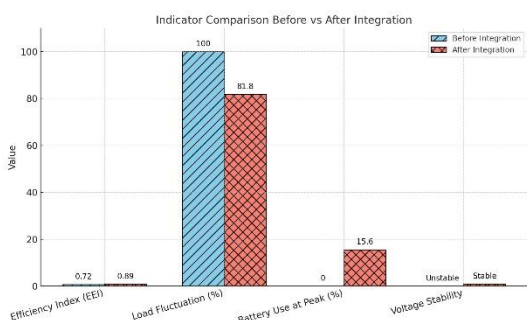
รูปที่ 15 การเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานรายเดือน (12 เดือน)

จากกราฟรูปที่ 15 พบว่า ระบบแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์ แสดงถึงประสิทธิภาพสูงสุดและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เริ่มต้นที่ประมาณ 10kWh ในเดือนที่ 1 และเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจนถึงประมาณ 40kWh ในเดือนที่ 12 ส่วนระบบ AI-agent แสดงการประหยัดพลังงานในระดับปานกลาง เริ่มต้นที่ประมาณ 5kWh และเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปจนถึงประมาณ 18kWh ในเดือนสุดท้าย ในขณะที่ระบบ SSTS แสดงการประหยัดพลังงานต่ำสุด เริ่มต้นที่ประมาณ 5kWh และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนถึงประมาณ 8kWh ในช่วงเดือนที่ 7 หลังจากนั้นการประหยัดพลังงานคงที่จนถึงเดือนที่ 12 ข้อมูลนี้บ่งชี้ว่าระบบแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงกว่าระบบอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในระยะสั้นและระยะยาวโดยแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของการประหยัดพลังงานที่สูงกว่าตลอดช่วงเวลาการศึกษา

3.3.4 แนวทางการบูรณาการระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ จากความท้าทายด้านโหลดผันผวนและแรงดันไม่เสถียรในระบบเดิม การบูรณาการเทคโนโลยีที่เหมาะสมสามารถยกระดับประสิทธิภาพได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษานี้เสนอแนวทางการใช้ SSTS เป็นโครงสร้างหลักในการปรับสมดุลโหลดแบบทันที ที่เพิ่ม AI-agent เพื่อเรียนรู้และควบคุมระบบในระยะยาว และเสริม Battery inverter ขนาดเล็ก เพื่อรองรับโหลดช่วงสูงสุด แนวทางดังกล่าวช่วยเพิ่มดัชนีประสิทธิภาพ ลดความผันผวนของโหลด และรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบตัวชี้วัดก่อนและหลังการผสมระบบ

Indicator	Before integration	After integration
Efficiency index (EEI)	0.72	0.89
Load fluctuation (%)	100	81.8
Battery use at peak time (%)	0	15.6
Voltage stability (IEC $\pm 5\%$)	Unstable	Stable



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบก่อนและหลังการผสมระบบ

จากกราฟรูปที่ 16 พบว่า ระบบหลังการบูรณาการแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยดัชนีประสิทธิภาพพลังงาน (EEI) เพิ่มขึ้นจาก 0.72 เป็น 0.89 สะท้อนถึงความสามารถในการจัดการพลังงานได้ดีขึ้น ความผันผวนของโหลดลดลงจาก 100% เหลือ 81.8% แสดงถึงความเสถียรในการจ่ายโหลดที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ระบบยังสามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในช่วงพีกได้ถึง 15.6% ซึ่งก่อนหน้านี้ไม่มีการใช้เลย และสามารถรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในเกณฑ์ IEC $\pm 5\%$ ได้อย่างเสถียร จากเดิมที่ไม่สามารถควบคุมแรงดันได้อย่างเหมาะสม ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันว่าแนวทางการบูรณาการที่ใช้โครงสร้าง SSTS, ระบบ

AI-agent และ Battery inverter ขนาดเล็ก มีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพและความมั่นคงของระบบไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ

4. การอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ติดตั้ง Clamp Meter ภายใน Main Distribution Board (MDB) เพื่อเก็บข้อมูลโหลดไฟฟ้าแบบเรียลไทม์จากการใช้งานจริงในอาคารเรียนช่วงฤดูสาหรารม ผลวิเคราะห์เบื้องต้นพบความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟส โดยเฉพาะเฟส B ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงพัฒนาระบบควบคุมโหลดอัจฉริยะ ได้แก่ Static Transfer Switch System (SSTS) และ AI-Agent Control System พร้อมทดสอบในสภาวะแวดล้อมจำลองและระบบต้นแบบ ผลการทดสอบระบบควบคุมโหลด 3 รูปแบบพบว่า AI-Agent ลด Peak Load เฉลี่ยสูงสุด 21.7% ด้วยการเรียนรู้พฤติกรรมโหลดและปรับกลยุทธ์แบบเรียลไทม์ เหมาะกับการบริหารพลังงานอัตโนมัติ Battery Inverter เฉพาะเฟส ลดเฉลี่ย 15.3% โดยชดเชยโหลดในเฟสที่สูง เหมาะกับอาคารโหลดไม่สมดุล แม้มีต้นทุนสูง Feeder-shifting ลดเฉลี่ย 12.8% ผ่านการกระจายโหลดแบบ passive ลงทุนต่ำ เหมาะกับระบบสายป้อนแยกชัดเจน งานวิจัยชี้ให้เห็นว่าการวิเคราะห์โหลดแบบเรียลไทม์เป็นหัวใจของ Demand Side Management (DSM) และการผสมผสานวิธีการควบคุม (Hybrid DSM) เป็นแนวทางที่มีศักยภาพต่อการพัฒนา Net Zero Energy Building (NZEB) ที่ยั่งยืนทั้งด้านพลังงานและเศรษฐกิจ

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้เสนอแนวทางการบริหารจัดการพลังงานด้วยระบบ Demand Side Management (DSM) อาคารเรียนช่วงฤดูสาหรารม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย โดยใช้แนวคิด Smart Phase Balancer ซึ่งประกอบด้วย 3 ระบบย่อย ได้แก่ Feeder-shifting, AI-agent และ Battery Inverter เพื่อลดโหลดสูงสุด (Peak Load) ของระบบไฟฟ้า ข้อมูลถูกเก็บแบบเรียลไทม์จากสายเมนหลักในตู้ MDB ระหว่างเดือนธันวาคม 2567 ถึงกุมภาพันธ์ 2568 ผลการทดลองพบว่า AI-agent ลดโหลดสูงสุดได้ 21.7% รองลงมาคือ Battery Inverter 15.3% และ Feeder-shifting 12.8% AI-agent ยังช่วยปรับปรุง Load Factor 9.4% และลดการใช้พลังงานช่วง Time of

Use (TOU) อย่างมีนัยสำคัญ ระบบที่พัฒนาสามารถประยุกต์ใช้กับอาคารอื่น ๆ เพื่อยกระดับเป็น Smart Building และสนับสนุนเป้าหมายลดคาร์บอนตามนโยบาย BCG Economy และ Net-zero Emission สำหรับงานวิจัยในอนาคต การติดตั้งอุปกรณ์จริงเพิ่มเติม เช่น SSTS, AI-Agent บน Embedded System และ Battery Inverter จะช่วยยืนยันประสิทธิภาพในสถานะใช้งานจริง และเพิ่มความสำเร็จของงานวิจัยทั้งด้านวิชาการและการประยุกต์ใช้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณปี 2568 และอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอบคุณทีมงานวิจัย คณาจารย์ และบุคลากรที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวก รวมถึงครอบครัวและเพื่อนร่วมงานที่ให้งานกำลังใจและสนับสนุนตลอดกระบวนการศึกษาวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hafeez G, Alghamdi H, Alghamdi B, Alsafran AS, Ullah S, Murawwat S, editors. Demand response and renewable generation with optimization approach for energy management in smart grids. 2025 4th International Conference on Smart Grid and Green Energy (ICSGGE); 2025: IEEE.
- [2] El Hassan M, Najjar M, Tohme R. A practical way to balance single phase loads in a three phase system at distribution and unit level. Renewable Energy and Power Quality Journal. 2022;20:173-7.
- [3] Schittekatte T, Mallapragada D, Joskow PL, Schmalensee R. Electricity retail rate design in a decarbonizing economy: an analysis of time-of-use and critical peak pricing. The Energy Journal. 2024;45(3):25-56.
- [4] Hofmann M, Lindberg KB, editors. Do households react to variable power prices?- Results from a Norwegian pricing experiment. 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe); 2021: IEEE.

- [5] Alhmoud L, Marji W. Optimization of three-phase feeder load balancing using smart meters. IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2021;45(1):9-17.
- [6] Faria P, Vale Z. Demand response in smart grids. Energies. 2023;16(2):863.
- [7] Zachary S, Tindemans SH, Evans MP, Cruise JR, Angeli D. Scheduling of energy storage. Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2021;379(2202):20190435.
- [8] Biswal AP, Roy K, Ghosh A, editors. AI-enabled prediction of wind speed and temperature with multiverse optimization for efficient control of standalone hybrid system. 2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET); 2023: IEEE.