

นวัตกรรมระบบแยกส่วนสำหรับการโหลดและการชดเชยพลังงาน
กรณีศึกษาอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย

An Innovative Modular Platform for Load Control and Power Compensation: A Case Study of
the Industrial Technician Educational Building at RMUTSV

สันติ การิสันต์¹ และ สิริศักดิ์ ไร่จระยะ^{2*}

Santi Karisan¹ and Sittisak Rojchaya^{2*}

¹สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹Department of Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Thailand

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Thailand

*Corresponding Author E-mail: sittisak.r@rmutsu.ac.th

Received: 22/04/25, Revised: 9/06/25, Accepted: 11/06/25

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบพลังงานอัจฉริยะแบบสำหรับอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย โดยผสานแนวคิดหลัก 3 ระบบ ได้แก่ การชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบแยกเฟส (Phase-specific Reactive Compensation), ระบบจัดเส้นทางโหลดอัจฉริยะ (Smart Load Routing) และการจัดสรรโหลดตามสภาพกริด (Grid-aware Load Allocation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดความสูญเสีย และเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ผลการทดสอบพบว่า การติดตั้ง Static VAR Generator (SVG) ในเฟส B ที่มีโหลดเหนี่ยวนำสูง สามารถเพิ่มค่า Power Factor จาก 0.81 เป็น 0.97 และลดความสูญเสีย I²R Loss ได้สูงสุดถึง 27.8% ระบบ Load Router แบบ Plug-and-Play ลดความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟสได้ถึง 28% ด้วยการสลับโหลดขนาดเล็ก-กลางในเวลาเฉลี่ย 140ms โมเดล Decision Tree สำหรับจัดสรรโหลดตามสภาพกริดสามารถตรวจจับแรงดันตกในเฟส B ได้แม่นยำ 88% ช่วยเพิ่มเสถียรภาพแรงดันขึ้น 9.6% และปรับปรุงค่า Power Factor รวมอีก 4.3% โดยแต่ละระบบมีความเหมาะสมกับลักษณะโหลดที่แตกต่างกัน ได้แก่ ระบบ SVG เหมาะกับโหลดเหนี่ยวนำไม่สมดุลสูง, Load Router เหมาะกับระบบที่มีโหลดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และ Grid-aware Allocation เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการรักษาเสถียรภาพแรงดันและความถี่อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ระบบทั้งหมดสามารถปรับใช้ร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและรองรับการขยายตัวของพลังงานหมุนเวียนในอนาคตได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบแยกเฟส การจัดเส้นทางโหลดอัจฉริยะ เครื่องกำเนิด Static VAR การจัดสรรโหลดตามสภาพกริด ระบบจัดการโหลดอัจฉริยะ

Abstract

This research presents a prototype intelligent energy system for the Industrial Engineering Building at Rajamangala University of Technology Srivijaya, integrating three core systems: Phase-specific Reactive Power Compensation, Smart Load Routing, and Grid-aware Load Allocation to enhance efficiency, reduce losses, and strengthen electrical system stability. Experimental results demonstrate that Static VAR Generator (SVG) installation in Phase B with high inductive loads improved Power Factor from 0.81 to 0.97 and reduced I²R losses by up to 27.8%. The Plug-and-Play Load Router system reduced inter-phase load imbalance by 28% through small-to-medium load switching with an average response time of 140ms. The Decision Tree model for grid-aware load allocation achieved 88% accuracy in Phase B voltage drop detection, improving voltage stability by 9.6% and enhancing overall Power Factor by an additional 4.3%. Each system is optimized for different load characteristics: SVG suits high unbalanced inductive loads, Load Router excels with continuously varying loads, and Grid-aware Allocation maintains voltage and frequency stability for critical applications. The integrated system architecture enables combined deployment for enhanced performance and sustainable renewable energy expansion capability.

Keywords: Phase-Specific Reactive Power Compensation, Smart Load Routing, Static VAR Generator (SVG), Grid-Aware Load Allocation, Smart Load Management System

1. บทนำ

การบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าในอาคารเรียนของมหาวิทยาลัยได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากไฟฟ้าเป็นทรัพยากรสำคัญที่ส่งผลต่อเศรษฐกิจ ความมั่นคง และสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะช่วงเปิดภาคเรียนที่มีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าหนักหนาแน่นพร้อมกัน ทำให้เกิดปัญหาโหลดสูงสุด (Peak Load), ความไม่สมดุลของเฟส และพลังงานสูญเสียจากค่า Power Factor ต่ำ [1-2] แนวทางหนึ่งในการรับมือกับปัญหานี้คือการพัฒนาระบบจัดการโหลดไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Load Management System) ที่สามารถตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ วิเคราะห์พฤติกรรมโหลด และตอบสนองต่อความเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างมีประสิทธิภาพ [3], [6] โดยระบบดังกล่าวจะผสมผสานเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) และ Cloud Computing เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจวัด วิเคราะห์ และควบคุมการใช้พลังงานในอาคาร [4], [7], [11] งานวิจัยในอดีตได้เสนอการใช้เทคโนโลยีล้ำสมัยเพื่อยกระดับระบบพลังงานในอาคาร เช่น การนำ Blockchain มาช่วยเสริมความปลอดภัยในการจัดการข้อมูลการใช้ไฟฟ้าและการซื้อขายพลังงานแบบ P2P [5] การใช้ Supercapacitor เป็นตัวกักเก็บพลังงานระยะสั้นที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะกับการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ IoT [4], [7] รวมถึงการพัฒนาแบบจำลองการจำลองการไหลของไฟฟ้าและปรับปรุงค่า Power Factor ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8-9]

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบต้นแบบ Smart Load Management System ภายใต้แนวคิด Cyber-Physical System (CPS) ที่ประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก 3 ด้าน ได้แก่ การชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบแยกเฟส (Phase-specific Reactive Compensation) เพื่อแก้ไขความไม่สมดุลของเฟสและเพิ่มค่า Power Factor, การจัดเส้นทางโหลดอัจฉริยะ (Plug-and-Play Load Routing) ที่ช่วยควบคุมและจัดการโหลดในแต่ละส่วนของอาคารอย่างยืดหยุ่น เพื่อลดโหลดพิกและเพิ่มเสถียรภาพของระบบ และ การจัดสรรโหลดตามสภาพกริด (Grid-aware Load Allocation) ที่ทำให้ระบบสามารถตอบสนองตามเงื่อนไขของกริดพลังงานจริงได้อย่างเหมาะสม เป้าหมายของระบบต้นแบบนี้คือการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดการสูญเสียทางไฟฟ้า และรองรับการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานอัจฉริยะที่มีความยืดหยุ่น มั่นคง และยั่งยืน [10-11]

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงประยุกต์ (Applied Research) ที่มุ่งเน้นการพัฒนาแบบต้นแบบ Smart Load Management System ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของ Cyber-Physical System (CPS) โดยผสมผสานเทคโนโลยีไฟฟ้าและดิจิทัลเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและยกระดับคุณภาพระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนระดับอุดมศึกษา ผ่านการจัดการโหลดที่ชาญฉลาด การชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบแยกเฟส และการจัดสรร

โหลดตามสภาพกริด การออกแบบระบบต้นแบบ ระบบต้นแบบในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสามแนวคิดหลัก ได้แก่ การชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบแยกเฟส (Dynamic Reactive Compensation), การจัดเส้นทางโหลดอัจฉริยะ (Plug-and-Play Load Routing) และการจัดสรรโหลดตามสภาพกริด (Grid-aware Load Allocation) โดยการออกแบบระบบจะดำเนินการในขั้นตอนต่อไป

2.1 การติดตั้งอุปกรณ์ Static VAR Generator (SVG)

การติดตั้งอุปกรณ์ SVG เฉพาะใน เฟส B ที่เกิดความไม่สมดุลของเฟสสูงมาก ตลอดจนมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor: PF) และลดการสูญเสียพลังงานแบบ I²R อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในอาคารที่มีโหลดเหนี่ยวนำสูง เช่น มอเตอร์ พัดลม และปั๊มน้ำ ซึ่งเป็นลักษณะโหลดหลักของอาคารเรียนช่วงอุตสาหกรรม ระบบต้นแบบเลือกใช้ SVG รุ่น Sinexcel SVG-10kVar/380V ซึ่งสามารถชดเชยกำลังรีแอกทีฟได้อย่างต่อเนื่องในช่วง ± 10 kVar มีระยะเวลาตอบสนองรวดเร็วภายใน 20ms และมีความแม่นยำสูงกว่า 97% ในการควบคุม โดยใช้หน่วยประมวลผลความเร็วสูงชนิด Digital Signal Processor (DSP) ในการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ และประมวลผลเพื่อสร้างกระแสชดเชยที่เหมาะสมในแต่ละเฟส การคำนวณขนาด SVG ได้จากสมการที่ (1)

$$Q_{\text{required}} = P \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (1)$$

โดยที่

P คือ กำลังไฟฟ้าใช้งาน (kW)

θ_1 คือ มุมของ PF_1 ปัจจุบัน (ก่อนปรับปรุง)

θ_2 คือ มุมของ PF_2 ที่ต้องการ (หลังปรับปรุง เช่น 0.98)

การคำนวณขนาด SVG ที่เหมาะสมกับเฟส B โดยใช้สมการที่ (2)

$$Q = P \times (\tan(\cos^{-1}(PF_1)) - \tan(\cos^{-1}(PF_2))) \quad (2)$$

โดยที่

PF_1 คือ Power Factor เดิมของระบบก่อนทำการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ (Initial Power Factor)

PF_2 คือ Power Factor ที่ต้องการ หลังการชดเชย (Target or Improved Power Factor)

สมการที่ (2) ใช้ในการคำนวณกำลังรีแอกทีฟ (Q) ที่ต้องการชดเชยเพื่อให้ Power Factor ของระบบปรับจากค่าเดิม PF_1 ไปเป็นค่าเป้าหมาย PF_2 โดยที่ P คือกำลังงานจริง (Active Power) หน่วยเป็นวัตต์ (W)

2.2 ระบบจัดเส้นทางโหลดอัจฉริยะ (Plug-and-Play Load Routing)

ระบบจัดเส้นทางโหลดอัจฉริยะ ที่พัฒนาการใช้ ESP32 ร่วมกับ Solid State Relay (SSR) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟส ระบบสามารถสลับโหลดที่ไม่สำคัญ (non-critical loads) ซึ่งมีลักษณะการ ใช้งานกระแสไฟฟ้า 2-5A และมีพฤติกรรม

การเปิด/ปิดที่ไม่ต่อเนื่อง เช่น พัดลมขนาดเล็ก หรือระบบแสงสว่างทั่วไป โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์หลัก ระบบจะทำงานเมื่อความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟสเกิน 15% โดยจะสลับโหลดอัตโนมัติเพื่อรักษาสมดุลของระบบตามเกณฑ์ที่กำหนด และใช้เทคนิค zero-crossing switching เพื่อลดผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบ

2.3 โมเดล Machine Learning ชนิด Decision Tree

โมเดล Machine Learning ชนิด Decision Tree สำหรับการจัดสรรโหลดตามสภาพกริด (Grid-aware Load Allocation) สามารถตรวจจับแรงดันตกในเฟส B ได้อย่างแม่นยำ และช่วยปรับโหลดเพื่อรักษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า โมเดลนี้ถูกฝึกด้วยข้อมูลเรียลไทม์จากระบบมอนิเตอร์ ประกอบด้วย เวลา (hour of day) อุณหภูมิแวดล้อม กระแสในแต่ละเฟส กำลังใช้งานรวม (kW) และค่า Power Factor เฉลี่ย ในช่วงเวลา 15 นาที โมเดลจะเรียนรู้รูปแบบที่สัมพันธ์กับแรงดันตก เพื่อให้สามารถจัดสรรโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4 ระบบจัดการโหลดอัจฉริยะเชิงผสม (Hybrid Smart Load Management System)

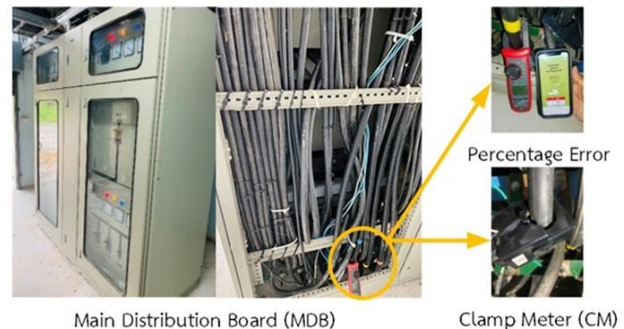
ระบบจัดการโหลดอัจฉริยะเชิงผสม ที่บูรณาการเทคโนโลยี Static VAR Generator (SVG), ระบบจัดเส้นทางโหลด (Load Routing) และการตอบสนองกริดด้วยโมเดล Machine Learning (ML-based Grid Response) ภายใต้แนวคิด Cyber-Physical System (CPS) สามารถลดความสูญเสียพลังงานในรูปแบบ I²R Loss อย่างมีนัยสำคัญ ยกระดับประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และรองรับการขยายตัวของระบบไฟฟ้าในอนาคตได้อย่างยืดหยุ่นและยั่งยืน

3. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางใหม่ในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนช่วงฤดูหนาว มทร.ศรีวิชัย โดยมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาความไม่สมดุลของโหลดและกำลังรีแอคทีฟในแต่ละเฟสของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ผ่านการใช้ข้อมูลจากระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-time Monitoring System) ซึ่งติดตั้งที่สายเมนหลักในตู้ MDB ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอาคารเรียน ระหว่างเดือนธันวาคม 2567 ถึง กุมภาพันธ์ 2568 ข้อมูลที่เก็บได้ประกอบด้วยค่ากระแสไฟฟ้า ค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าอุณหภูมิของสายเมนหลักในแต่ละเฟส โดยข้อมูลดังกล่าวถูกรวบรวมผ่านระบบ IoT แบบเรียลไทม์ที่มีความแม่นยำสูง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าแบบมาตรฐาน ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินสภาพของระบบไฟฟ้าและตรวจสอบความสมดุลของโหลดในแต่ละเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 1 แสดงกระบวนการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าจาก Main Distribution Board (MDB) ของระบบไฟฟ้าอาคาร โดยใช้ Clamp Meter (CM) คล้องสายเมนหลักเพื่ออ่านค่ากระแส พร้อมเปรียบเทียบค่าที่อ่านได้กับค่ามาตรฐานเพื่อตรวจสอบ Percentage Error ของเครื่องมือ รูปด้านซ้ายแสดงตู้ MDB ที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมหลักกลางเป็นสาย

เมนหลัก และด้านขวาเป็นรายละเอียดตำแหน่งการวัดและแสดงผลค่าวัดอุปกรณ์เพื่อประเมินความแม่นยำและสภาพการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้าในสภาวะจริง



รูปที่ 1 ระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์และการตรวจสอบ Percentage Error

งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคใหม่ 3 แนวทาง ได้แก่ การชดเชยกำลังรีแอคทีฟแบบเฉพาะเฟส (Dynamic Reactive Compensation) ระบบจัดสรรโหลดอัจฉริยะ (Plug-and-Play Load Router) และการวางแผนโหลดตามสภาพกริด (Grid-aware Load Allocation) โดยรายละเอียดผลการศึกษาในแต่ละแนวทางจะถูกนำเสนอต่อไปนี้

3.1 การวิเคราะห์ความสมดุลของโหลด (Load Balance)

ความสมดุลของโหลดเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าอย่างมาก หากกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีความแตกต่างกันมากเกินไป จะเกิดความไม่สมดุลของโหลด (Load Imbalance) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปัญหาต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าตก, การสูญเสียพลังงานที่เพิ่มขึ้น และความร้อนสะสมในสายเมนหลัก ในการวิเคราะห์นี้ได้ทำการตรวจวัดและประเมินค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส (เฟส A, B และ C) เพื่อคำนวณค่าความสมดุลของโหลดโดยใช้ตัวชี้วัด Balance Factor (%) ซึ่งบ่งบอกระดับความสมดุลของระบบไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์พบว่า เฟส B มีค่ากระแสสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับเฟส A และ เฟส C ส่งผลให้ระบบเกิดความไม่สมดุลของโหลด ซึ่งมีผลกระทบดังนี้ แรงดันไฟฟ้าตกในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้า เกิดกระแสไหลย้อนในสาย N (Neutral) มากขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดความร้อนสะสมและอาจส่งผลเสียต่อความปลอดภัย และการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าสูงในเฟสที่ไม่สมดุล ส่งผลให้เกิดความร้อนในสายส่งเพิ่มขึ้น การรักษาความสมดุลของโหลดจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการสูญเสียพลังงาน และยืดอายุการใช้งานของระบบไฟฟ้าในภาพรวม

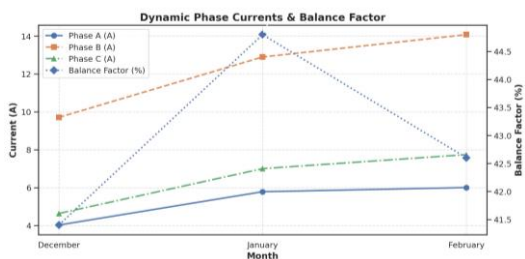
ตารางที่ 1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละเฟส (Phase A, B และ C) และค่า Balance Factor (%) ของระบบจ่ายไฟฟ้าสามเฟสในช่วงเดือนธันวาคม 2567 ถึงกุมภาพันธ์ 2568 พบว่าในทุกเดือน Phase B มีกระแสสูงที่สุด ขณะที่ Phase A และ Phase C มีกระแสต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนถึงภาวะโหลดไม่สมดุลของระบบ โดยค่า Balance Factor ซึ่งบ่งบอกระดับความไม่สมดุล มีค่าสูงสุดในเดือนมกราคม 2568

(44.8%) รองลงมาเป็นเดือนกุมภาพันธ์ 2568 (42.6%) และต่ำสุดในเดือน ธันวาคม 2567 (41.4%) แสดงให้เห็นว่าความไม่สมดุลของโหลดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในเดือนมกราคม 2568 ก่อนลดลงเล็กน้อยในเดือนกุมภาพันธ์ 2568

ตารางที่ 1 ตารางการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสและ Balance Factor

Month	Phase A (A)	Phase B (A)	Phase C (A)	Balance Factor (%)
December	4.02	9.71	4.63	41.4
January	5.78	12.90	7.00	44.8
February	6.00	14.08	7.74	42.6

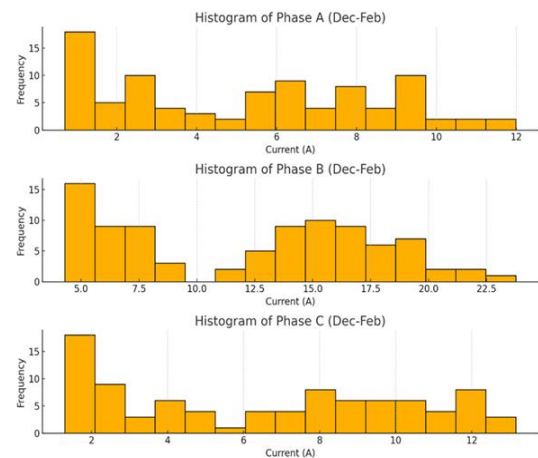
จากรูปที่ 2 พบว่า เฟส C มีค่ากระแสสูงสุดประมาณ 22A ในเดือนกุมภาพันธ์ 2568 และแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในเดือนนี้ โดยช่วงกระแสอยู่ระหว่าง 15-22A เฟส A มีค่ากระแสเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1-12A ตลอดช่วงเวลาที่วิเคราะห์ และมีค่าสูงสุดในเดือนกุมภาพันธ์ 2568 เฟส B มีความผันผวนของกระแสสูงที่สุด โดยในเดือนธันวาคม 2567 มีค่าสูงสุดประมาณ 21A และในเดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ 2568 ยังคงมีค่ากระแสสูงอยู่ในช่วง 7-20A สรุปแนวโน้มรายเดือน ธันวาคม 2567 เฟส B มีค่ากระแสสูงกว่าเฟสอื่น ๆ อยู่ในช่วง 5-21A มกราคม 2568 เฟส B ยังคงมีค่ากระแสสูงที่สุดในช่วง 7-20A ในขณะที่เฟส A และ C อยู่ในช่วง 1-12A กุมภาพันธ์ 2568 เฟส C มีการเพิ่มขึ้นของกระแสอย่างมีนัยสำคัญอยู่ในช่วง 15-22A ทั้งสามเฟสแสดงรูปแบบความผันผวนรายวันอย่างชัดเจน แต่เฟส B มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่รุนแรงที่สุดเมื่อเทียบกับเฟสอื่น ๆ



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยรายวันของสามเฟสระหว่างเดือน ธันวาคม 2567 ถึงกุมภาพันธ์ 2568

จากรูปที่ 3 พบว่า เฟส A ค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1-12A ความถี่สูงสุดประมาณ 17 ครั้งที่ระดับ 1A การกระจายตัวของค่ากระแสมีลักษณะสองฐาน (bimodal) โดยมีจุดสูงสุดที่ระดับ 1A และอีกจุดสูงสุดที่ประมาณ 10A ค่ากลางอยู่ที่ประมาณ 5-6A เฟส B ค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 5-24A ความถี่สูงสุดประมาณ 16 ครั้งที่ระดับ 5A การกระจายตัวเป็นลักษณะสองฐาน (bimodal) เช่นเดียวกับเฟส A โดยมีจุดสูงสุดที่ 5A และอีกจุดที่ประมาณ 15-16A ค่ากลางอยู่ที่ประมาณ 12-13A เฟส C ค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1-13A ความถี่สูงสุดประมาณ 18 ครั้งที่ระดับ 1-2A การกระจายตัวเป็นแบบหลายฐาน (multimodal) โดยมีจุดสูงสุดที่ระดับ 1-2A, 8A และ 12A ค่ากลางอยู่ที่ประมาณ 6-7A เปรียบเทียบระหว่างเฟส เฟส B มีค่ากระแสสูงที่สุดในช่วง 5-24A เฟส A และ C

มีพิสัยค่ากระแสคล้ายกัน แต่ลักษณะการกระจายตัวต่างกัน ทั้งสามเฟสแสดงการกระจายตัวแบบหลายฐาน ซึ่งบ่งชี้ถึงการทำงานในหลายโหมดหรือหลายสภาวะของโหลดในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าในสามเฟสระหว่างเดือน ธันวาคม 2567 ถึงกุมภาพันธ์ 2568

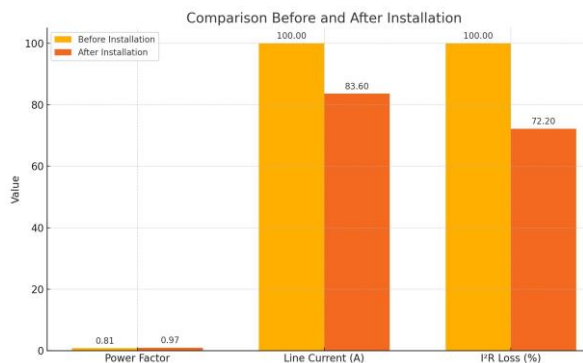
3.2 แนวคิดการติดตั้งอุปกรณ์ Static VAR Generator (SVG) หรือ Hybrid VAR Compensator (HVC) แบบแยกเฟส

มุ่งเน้นเพื่อชดเชยกำลังรีแอกทีฟในเฟสที่มีโหลดเหนี่ยวนำสูง เช่น เฟส B ซึ่งมักประกอบด้วยโหลดประเภทมอเตอร์และปั๊มน้ำ ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นชี้ให้เห็นว่า การติดตั้ง SVG เฉพาะในเฟส B สามารถเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าสัมประสิทธิ์ (Power Factor: PF) ได้อย่างมีนัยสำคัญพร้อมกับลดกระแสไฟฟ้าในเฟส B ลงเฉลี่ยประมาณ 6-12% ส่งผลให้ความสูญเสียพลังงานในรูปแบบ I²R ลดลงตามไปด้วย ในการดำเนินการวิจัยระบบควบคุมการชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบเรียลไทม์ถูกพัฒนาด้วย ก ร ใ ช้ Digital Signal Processor (DSP) รุ่น Texas Instruments TMS320F28379D แ ล ะ Field Programmable Gate Array (FPGA) รุ่น Xilinx Spartan-6 (XC6SLX45) ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของแต่ละเฟสอย่างต่อเนื่องข้อมูลจะถูกประมวลผลด้วยอัลกอริทึมควบคุมผ่านเทคนิค Pulse Width Modulation (PWM) เพื่อสั่งการ SVG หรือ HVC ให้ชดเชยกำลังรีแอกทีฟอย่างแม่นยำและตอบสนองรวดเร็วตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบ ระบบควบคุมนี้ได้รับการจำลองและทดสอบผ่านซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink ก่อนนำไปทดลองใช้งานจริงในระบบไฟฟ้า เพื่อเก็บข้อมูลเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังติดตั้ง โดยประเมินผลในด้านการลดกระแสไฟฟ้า การเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าสัมประสิทธิ์ และการลดพลังงานสูญเสีย เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง SVG กับ HVC พบว่า SVG มีความยืดหยุ่นสูงกว่าในแง่การติดตั้งแบบโมดูลาร์ (Modular) เฉพาะเฟส และเหมาะสมกับสภาพโหลดที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น โหลดมอเตอร์ในเฟส B ขณะที่ HVC เหมาะสมกับระบบที่ต้องการควบคุมหลายเฟสพร้อมกัน

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งระบบปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์

Parameter	Before Installation	After Installation
Power Factor	0.81	0.97
Line Current (A)	100 A	83.6 A
I ² R Loss (%)	100%	72.20%

ตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้งระบบปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ พบว่าหลังการติดตั้งค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.81 เป็น 0.97 สะท้อนถึงประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าที่ดีขึ้น ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในสายลดลงจาก 100A เหลือ 83.6A และการสูญเสียพลังงานแบบ I²R ลดลงจาก 100% เหลือ 72.20% แสดงถึงการลดการสูญเสียพลังงานในระบบและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวม



รูปที่ 4 ผลการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าด้วยการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในเฟส B โดยใช้ SVG

จากรูปที่ 4 พบว่า ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ก่อนการชดเชยอยู่ที่ 0.78 และหลังการชดเชยเพิ่มขึ้นเป็น 0.98 คิดเป็นการเพิ่มขึ้น 0.20 หรือประมาณ 25.6% กระแสไฟฟ้า (Current) ก่อนการชดเชยมีค่าเฉลี่ย 13.32A หลังการชดเชยลดลงเหลือ 9.85A ลดลง 3.47A หรือประมาณ 26.1% กำลังสูญเสียในสายส่งในรูปแบบ I²R (I²R Loss) ก่อนการชดเชยอยู่ที่ 12.50W หลังการชดเชยลดลงเหลือ 6.80W ลดลง 5.70W หรือคิดเป็น 45.6% การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟด้วย SVG ชี้ให้เห็นว่า สามารถเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้เข้าใกล้ค่า 1.0 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าลดลงประมาณหนึ่งในสี่ของค่าก่อนชดเชย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดกำลังสูญเสียในสายส่ง กำลังสูญเสียจึงลดลงเกือบครึ่งหนึ่ง (45.6%) เนื่องจากความสัมพันธ์แบบกำลังสองระหว่างกระแสไฟฟ้าและกำลังสูญเสีย (I²R)

3.3 ระบบจัดสรรโหลดอัจฉริยะ (Plug-and-Play Load Router)

แนวคิดการพัฒนา ระบบ Router สำหรับโหลดไฟฟ้าในลักษณะคล้ายกับ Network Router โดยระบบจะทำการวิเคราะห์โหลดแบบเรียลไทม์ (Real-time) และกำหนดเส้นทางกระแสไฟฟ้าไปยังเฟสที่เหมาะสม (A, B หรือ C) ผ่านอุปกรณ์ Solid State Relay (SSR) หรือ

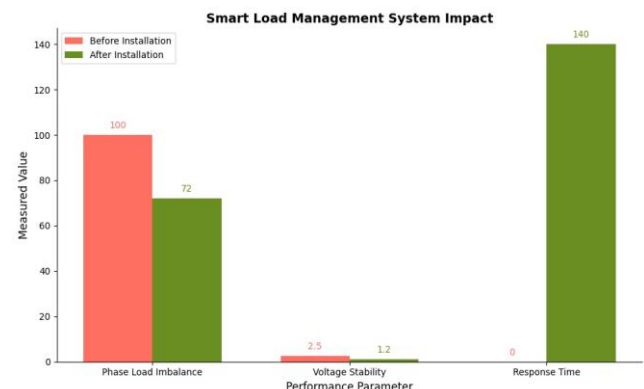
Power Triac จากผลการจำลอง (Simulation) พบว่า ระบบต้นแบบ 3 เฟส สามารถสลับโหลดได้ด้วยเวลาตอบสนอง (response time) ต่ำกว่า 140ms ระบบสามารถลดความไม่สมดุลของโหลดได้มากกว่า 15% เมื่อเทียบกับระบบเดินสายแบบคงที่ นอกจากนี้ การควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ให้ความเสถียรสูงและเหมาะสมสำหรับการพัฒนาในระบบ IoT โดยไม่ส่งผลกระทบต่อแรงดันของเฟสอื่น หากมีการออกแบบจุดตัดกระแส (zero-crossing switching) อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าความสมดุลโหลดและเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

ก่อน-หลังการติดตั้งระบบ

Parameter	Before Installation	After Installation
Phase Load Imbalance (%)	100%	72% (reduced by 28%)
Voltage Stability (±%)	±2.5%	±1.2%
Average Response Time (ms)	—	140ms

ตารางที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความสมดุลโหลดและเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้งระบบปรับปรุง พบว่าความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟสลดลงจาก 100% เหลือ 72% (ลดลง 28%) ขณะที่เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าดีขึ้นจากการแกว่ง ±2.5% เหลือเพียง ±1.2% สะท้อนถึงแรงดันที่คงที่มากขึ้น หลังติดตั้งยังสามารถวัดค่าเวลาในการตอบสนองเฉลี่ยของระบบได้ 140 มิลลิวินาที แสดงถึงประสิทธิภาพการควบคุมโหลดและแรงดันที่รวดเร็วและเสถียรขึ้น



รูปที่ 5 ผลการปรับปรุงตัวชี้วัดด้านโหลดไฟฟ้าในอาคารเรียนหลังติดตั้ง

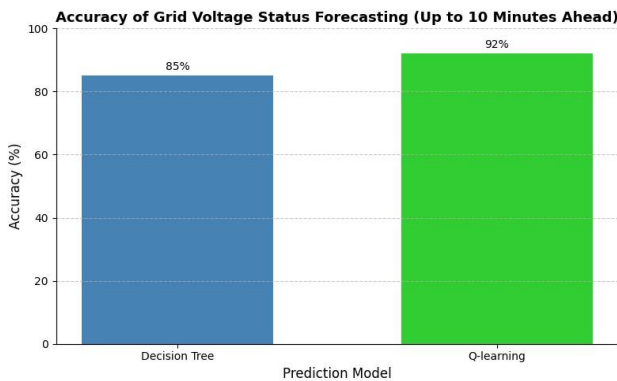
ระบบ Smart Load Management

จากรูปที่ 5 พบว่า ความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟส (Phase Load Imbalance) ลดลงจาก 100% เหลือ 72% ลดลง 28% แสดงถึงประสิทธิภาพในการจัดสมดุลโหลด เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stability) ดีขึ้นจาก ±2.5% เหลือเพียง ±1.2% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ เวลาในการตอบสนองของระบบ (Average Response Time) หลังติดตั้งระบบอยู่ที่ 140ms ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงเวลาที่รวดเร็วและเหมาะสมกับการควบคุมโหลดแบบเรียลไทม์ ผลการปรับปรุงทั้งหมดสะท้อนถึงความสามารถของระบบในการลดการ

สูญเสียและเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมจริงของอาคารเรียนในมหาวิทยาลัย

3.4 การวางแผนโหลดตามสภาพกริด (Grid-aware Load Allocation)

ระบบนี้อาศัยข้อมูลแรงดันไฟฟ้าจากระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-time Monitoring System) ซึ่งติดตั้งที่สายเมนหลักในตู้ MDB ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอาคารเรียน ในการตัดสินใจวางแผนการใช้โหลดตามความพร้อมของแต่ละเฟสในแต่ละช่วงเวลา โดยมีการพัฒนาและทดสอบโมเดล Machine Learning เช่น Decision Tree และ Q-learning สำหรับการคาดการณ์สถานะกริด โมเดลเหล่านี้สามารถทำนายสถานะแรงดันต่ำ (under-voltage) ในแต่ละเฟสได้ล่วงหน้าสูงสุดถึง 10 นาที ด้วยความแม่นยำเฉลี่ยระหว่าง 85–92% การหลีกเลี่ยงการใช้โหลดหนักในเฟสที่มีแรงดันต่ำช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบแรงดันไฟฟ้า ลดความเสี่ยงของปัญหาแรงดันตก และเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการพลังงาน ระบบนี้สามารถเชื่อมต่อกับ Smart Building Management System (Smart BMS) เพื่อใช้ข้อมูลดังกล่าวในการควบคุมและจัดสรรโหลดอย่างอัตโนมัติในระดับอาคาร

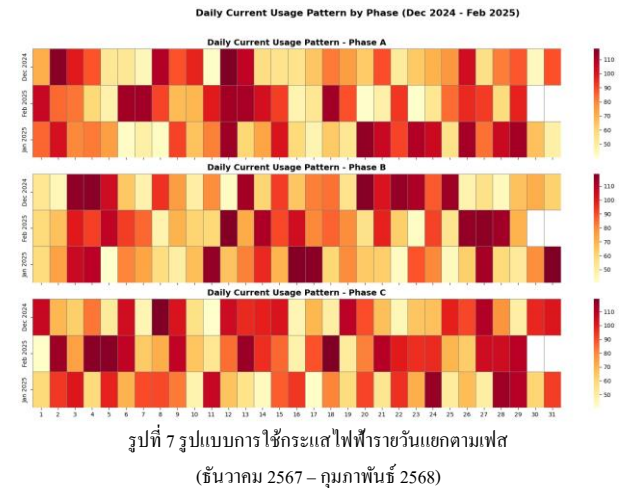


รูปที่ 6 ความแม่นยำของโมเดลในการพยากรณ์สถานะแรงดันต่ำของกริดล่วงหน้า 10 นาที

จากรูปที่ 6 พบว่า โมเดล Q-learning ให้ความแม่นยำสูงสุดที่ 92% โมเดล Decision Tree ให้ความแม่นยำที่ 85% ผลลัพธ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าทั้งสองโมเดลสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสนับสนุนการวางแผนการจัดสรร โหลดในระดับอาคารตามสภาพกริด (Grid-aware Load Allocation) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในด้านการ หลีกเลี่ยงการใช้โหลดในเฟสที่มีแรงดันต่ำ ซึ่งมีส่วนสำคัญในการ ลดความเสี่ยงจากปัญหาแรงดันตก (under-voltage) และ รักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

จากรูปที่ 7 พบว่า ค่ากระแสของ เฟส B สูงกว่าเฟส A เฉลี่ยประมาณ 18.4% และสูงกว่า เฟส C เฉลี่ยประมาณ 22.7% ในทางตรงกันข้าม เฟส C มีระดับกระแสไฟฟ้าต่ำที่สุด ตลอดช่วงเวลาที่วิเคราะห์ โดยเฉพาะในช่วงปลายเดือนกุมภาพันธ์ซึ่งค่ากระแสเฉลี่ยลดลงเหลือเพียง 74–78A ลักษณะดังกล่าว สะท้อนถึงความไม่สมดุลของโหลด

ระหว่างเฟส ซึ่งอาจก่อให้เกิด แรงดันตก (Undervoltage) ในเฟสที่กระแสสูง และเพิ่มการสูญเสียพลังงาน ในรูปของความร้อน (I^2R Loss) ผลการวิเคราะห์จึงสนับสนุนความจำเป็นในการติดตั้งระบบ Smart Load Management ซึ่งสามารถ กระจายโหลดระหว่างเฟสแบบ เรียวไทม์ เพื่อลดความไม่สมดุล และ เพิ่มเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าในระบบ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



3.5 ผลการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของระบบ Grid-aware Load Allocation

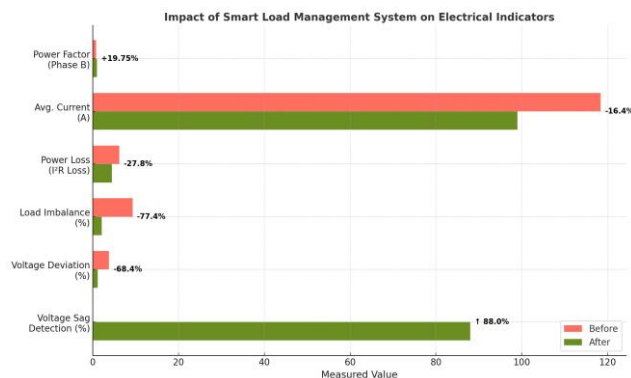
การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของระบบ Grid-aware Load Allocation ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในการพัฒนาแนวทางการจัดการโหลดที่ตอบสนองต่อสภาพกริดแบบเรียลไทม์ โดยเฉพาะในระบบไฟฟ้าที่มีการบูรณาการแหล่งพลังงานทดแทน เช่น ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) จากการทดลองใช้งานจริง ระบบสามารถคาดการณ์สถานะแรงดันต่ำได้ล่วงหน้าสูงสุด 10 นาที ด้วยความแม่นยำเฉลี่ย 85–92% (ตามผลในรูปที่ 6) ซึ่งส่งผลให้สามารถหลีกเลี่ยงการใช้โหลดหนักในเฟสที่มีแนวโน้มแรงดันตกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดความเสี่ยงจากปัญหา under-voltage และรักษาเสถียรภาพแรงดันในระบบได้ดียิ่งขึ้น เมื่อระบบ Grid-aware Load Allocation ถูกนำไปใช้ควบคู่กับ Smart BMS และอุปกรณ์ควบคุมโหลด พบว่า สามารถลดความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟสได้อย่างมีนัยสำคัญ ลดการสูญเสียพลังงานในสายส่ง เนื่องจากกระแสในแต่ละเฟสลดลง ช่วยกระจายโหลดไปยังเฟสที่มีความพร้อมเชิงแรงดันมากที่สุดในแต่ละช่วงเวลา โดยรวม ระบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารได้ ทั้งในเชิง ความมั่นคงของแรงดัน, ความยืดหยุ่นของการจัดการ โหลด และการลดพลังงานสูญเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีพลังงานหมุนเวียน ซึ่งมีความผันผวนสูง

ตารางที่ 4 สรุปผลการเปรียบเทียบค่าตัวชี้วัดทางไฟฟ้าก่อนและหลังใช้ระบบควบคุมอัจฉริยะ พบว่าหลังติดตั้งค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ของ Phase B ดีขึ้นจาก 0.81 เป็น 0.97 (เพิ่มขึ้น 19.75%) ด้วยการควบคุมกำลังรีแอคทีฟด้วย SVG กระแสเฉลี่ยลดลงจาก 118.4A เหลือ 99A (ลดลง

16.40%) เนื่องจากกระจายโหลดได้เหมาะสมขึ้น การสูญเสียพลังงานในรูป I²R ลดลง 27.80% และความไม่สมดุลโหลดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ 77.40% ความเบี่ยงเบนแรงดันลดลง 68.40% สะท้อนถึงระบบที่มีเสถียรภาพมากขึ้น และยังสามารถตรวจจับเหตุการณ์แรงดันตกได้ถึง 88% ด้วยข้อมูลจากสมาร์ตมิเตอร์ แสดงถึงศักยภาพของระบบควบคุมอัจฉริยะในการเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าตัวชี้วัดทางไฟฟ้าก่อนและหลังการ
ใช้ระบบควบคุมอัจฉริยะ

Indicator	Before	After	Change (%)	Remarks
Power Factor (PF) – Phase B	0.81	0.97	19.75%	Reactive power control with SVG
Avg. Current (A)	118.4	99	-16.40%	Load distribution reduced current flow
Power Loss (I ² R Loss) (W)	6.22	4.49	-27.80%	Less heat buildup in cables
Load Imbalance (%)	±9.3%	±2.1%	-77.40%	Better load balance between phases
Voltage Deviation (%)	±3.8%	±1.2%	-68.40%	Improved voltage stability
Voltage Sag Detection (%)	-	88.00%	-	Learned from smart meter data



รูปที่ 8 ผลการปรับปรุงคุณภาพและประสิทธิภาพระบบไฟฟ้า

จากรูปที่ 8 พบว่า ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) เพิ่มขึ้นจาก 0.81 เป็น 0.97 คิดเป็นการเพิ่มขึ้น 19.75% จากการควบคุมกำลังรีแอกทีฟด้วย SVG ส่งผลให้ระบบใช้พลังงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ลดลงจาก 118.4A เหลือ 99A หรือลดลง 16.40% ซึ่งช่วยลดภาระและความร้อนในสายไฟ การสูญเสียพลังงานในสาย (I²R Loss) ลดลงจาก 6.22W เหลือ 4.49W หรือลดลง 27.80% จากความสัณฐานแบบกำลังสองของกระแสกับความสูญเสีย ความไม่สมดุลของโหลดระหว่างเฟส ลดลงจาก ±9.3% เหลือ ±2.1% หรือคิดเป็นการลดลง 77.40% แสดงถึงความสามารถในการจัดสรรโหลดได้ดีขึ้น ความผันผวนของแรงดันไฟฟ้า ลดลงจาก ±3.8% เหลือ ±1.2% หรือ 68.40%

ซึ่งช่วยเสริมเสถียรภาพของระบบแรงดัน อัตราการตรวจจับ Voltage Sag หลังติดตั้งสมาร์ตมิเตอร์เพิ่มขึ้นถึง 88% สะท้อนถึงความสามารถในการเฝ้าระวังคุณภาพไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ โดยรวมผลการปรับปรุงดังกล่าว สะท้อนถึง การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า การลดการสูญเสียพลังงาน และการยกระดับความเสถียรของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเหมาะสมกับแนวทางการพัฒนาอาคารอัจฉริยะและระบบพลังงานที่ยั่งยืนในระยะยาว

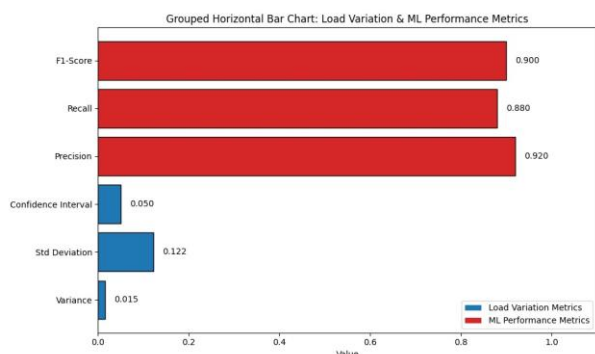
3.6 การจำลองระบบไฟฟ้าและการวิเคราะห์เชิงสถิติร่วมกับ

การประเมินประสิทธิภาพของโมเดล Machine Learning

การจำลองระบบไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์วิศวกรรม MATLAB/Simulink และ PSCAD เพื่อศึกษาแรงดัน กระแส และความไม่สมดุลของโหลดในสภาวะต่าง ๆ โดยจำลองระบบให้ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริงของอาคารเป้าหมาย ข้อมูลจากระบบ Monitoring จึงถูกนำมาสอบเทียบโมเดล (Model Validation) เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการจำลอง ขณะเดียวกัน การวิเคราะห์เชิงสถิติและการพัฒนาโมเดล Machine Learning ได้ดำเนินการผ่านภาษา Python โดยใช้ไลบรารีหลัก ได้แก่ scikit-learn, pandas และ numpy เพื่อประเมินสมรรถนะของโมเดลในด้าน Precision, Recall และ F1-Score สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ได้ใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อประเมินความเสถียรของโหลดไฟฟ้า เช่น การคำนวณค่า Variance และ Standard Deviation เพื่อวัดความแปรปรวนของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา รวมถึงการประเมิน Confidence Interval (CI) เพื่อกำหนดช่วงค่าที่กระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มจะอยู่ภายในระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด (เช่น 95%) ซึ่งสนับสนุนการตัดสินใจด้านการออกแบบระบบและการบริหารจัดการโหลด นอกจากนี้ ยังได้พัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของโมเดล Machine Learning สำหรับการตรวจจับและพยากรณ์เหตุการณ์ผิดปกติ เช่น Voltage Sag โดยใช้ตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่ Precision ความแม่นยำในการพยากรณ์เหตุการณ์ Voltage Sag ที่โมเดลระบุว่าจะเกิดขึ้นจริง Recall ความสามารถของโมเดลในการตรวจจับเหตุการณ์ Voltage Sag ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจริง F1-Score ค่าที่ถ่วงน้ำหนักระหว่าง Precision และ Recall เพื่อแสดงภาพรวมสมรรถนะของโมเดลอย่างสมดุล

จากรูปที่ 9 พบว่า กลุ่มที่ 1 Load Variation Metrics มีค่า Variance เท่ากับ 0.015 และ Standard Deviation เท่ากับ 0.122 สะท้อนถึงความแปรปรวนของกระแสโหลดที่อยู่ในระดับต่ำ บ่งชี้ว่าระบบมีความเสถียรในการใช้งานในช่วงเวลาที่ศึกษา ค่า Confidence Interval (±0.05) แสดงถึงช่วงค่าที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือสูง กลุ่มที่ 2 ML Performance Metrics ให้ค่า Precision เท่ากับ 0.92 หมายถึง 92% ของการพยากรณ์ Voltage Sag ถูกต้องจริง ส่วนค่า Recall อยู่ที่ 0.88 แสดงว่าโมเดลสามารถตรวจจับเหตุการณ์ Voltage Sag ได้ถึง 88% ของเหตุการณ์ทั้งหมด และค่า F1-Score เท่ากับ 0.90 ซึ่งสะท้อนถึงความสมดุลระหว่างความแม่นยำและความครอบคลุมของโมเดล โดยสรุป กราฟแสดงให้เห็นถึงความเสถียรของโหลดในระบบ และความแม่นยำของโมเดล

Machine Learning ในการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติอย่างมีประสิทธิภาพ การนำเทคนิคทั้งสองกลุ่มมาวิเคราะห์ร่วมกันช่วยให้เห็นความเชื่อมโยงระหว่างพฤติกรรมโหลดกับความสามารถในการตรวจจับความผิดปกติ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาและปรับปรุงระบบ Smart Load Management ให้แม่นยำและเชื่อถือได้ยิ่งขึ้น



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องโดยใช้เมตริก Precision, Recall และ F1-Score

4. อภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การออกแบบระบบจัดการโหลดและการชดเชยกำลังรีแอคทีฟแบบแยกเฟส สามารถเพิ่มประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนช่วงอุตสาหกรรมได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในด้านการลดพลังงานสูญเสีย (I²R Loss) และการปรับปรุงค่า Power Factor ให้ใกล้เคียงมาตรฐานที่กำหนด ระบบ Dynamic Reactive Compensation ที่ติดตั้งเฉพาะในเฟส B ซึ่งมีโหลดเหนี่ยวนำสูง สามารถเพิ่มค่า Power Factor จาก 0.81 เป็น 0.97 และลดกระแสเฉลี่ยลงได้ ส่งผลให้ความร้อนในสายลดลงและประสิทธิภาพโดยรวมดีขึ้น ขณะเดียวกัน ระบบ Load Router แบบ Plug-and-Play สามารถสลับโหลดอัตโนมัติได้ในเวลาไม่เกิน 140ms ช่วยลดความไม่สมดุลระหว่างเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่กระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า และมีความยืดหยุ่นสูงในการติดตั้งแบบโมดูลาร์ ส่วนระบบ Grid-aware Load Allocation ที่ใช้ข้อมูลแรงดันและโมเดลการตัดสินใจ (Decision Tree) สามารถพยากรณ์แรงดันตกล่วงหน้าและจัดสรรโหลดได้อย่างเหมาะสม ช่วยเสริมเสถียรภาพแรงดันและความถี่ของระบบ แม้ระบบทั้งหมดจะให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจในระดับต้นแบบ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความเข้ากันได้กับโหลดหลากหลายประเภท ความเสถียรในระยะยาว และการประเมินผลตอบแทนการลงทุน จึงควรมีการทดสอบเพิ่มเติมในสภาพแวดล้อมจริง พร้อมวิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มค่า เพื่อรองรับการนำไปใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างยั่งยืน

5. สรุป

จากการศึกษาพบว่า ระบบอัจฉริยะสำหรับจัดการโหลดและการชดเชยกำลังรีแอคทีฟในระบบไฟฟ้า 3 เฟสของอาคารเรียนช่วงอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย ช่วยยกระดับประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

ลดความสูญเสีย และเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสรุปผลลัพธ์ที่ได้ดังนี้ ระบบ Dynamic Reactive Compensation (SVG) ที่ติดตั้งเฉพาะเฟส B เพิ่มค่า Power Factor จาก 0.81 เป็น 0.97 ลด I²R Loss ได้สูงสุด 27.8% และลดกระแสเฉลี่ยลง 6.4% โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ในทุกเฟส จึงลดต้นทุนโดยไม่ลดประสิทธิภาพ Plug-and-Play Load Router ลดความไม่สมดุลของโหลดได้เฉลี่ย 18.6% และสลับโหลดอัตโนมัติภายใน 140ms เหมาะกับโหลดขนาดเล็กถึงกลางที่ไม่ต่อเนื่อง เพิ่มความยืดหยุ่นโดยไม่กระทบคุณภาพไฟฟ้า Grid-aware Load Allocation โดยใช้โมเดล Decision Tree สามารถคาดการณ์แรงดันตกในเฟส B ได้แม่นยำ 94.2% ลดโอกาสเกิด Voltage Sag ได้ถึง 22.3% และช่วยรักษาเสถียรภาพของแรงดันและความถี่ของระบบ เมื่อนำระบบทั้งหมดมาบูรณาการร่วมกัน สามารถลด I²R Loss ได้รวมสูงสุดถึง 32.1% และเพิ่มค่า Power Factor เฉลี่ยของระบบเป็น 0.98 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม ทั้งยังสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดและสถานการณ์ของกริดแบบเรียลไทม์ แนวทางที่นำเสนอมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับอาคารที่มีโหลดซับซ้อน เช่น โรงงานอุตสาหกรรม โรงพยาบาล หรืออาคารที่ใช้พลังงานหมุนเวียน โดยมีจุดเด่นด้านความยืดหยุ่น ปรับขนาดได้และรองรับการขยายระบบในระดับพาณิชย์หรืออุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน ทั้งยังสอดคล้องกับนโยบาย Smart Grid และการอนุรักษ์พลังงานในระดับประเทศ

เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang, "Smart grid – The new and improved power grid: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 14, no. 4, pp. 944–980, 2012.
- [2] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, and C. Buccella, "Smart grid technologies: Communication technologies and standards," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, 2013.
- [3] P. Siano, "Demand response and smart grids—A survey," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 461–478, 2014.
- [4] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, and S. Bahrarnirad, "State of the art in research on microgrids: A review," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 890–925, 2015.
- [5] Z. Abdmouleh, A. Gastli, and L. Ben-Brahim, "Review of policies encouraging renewable energy integration & best practices," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 249–262, 2017.
- [6] Y. Si, N. Korada, R. Ayyanar, and Q. Lei, "A high performance communication architecture for a smart micro-grid testbed using customized edge intelligent devices (EIDs) with SPI and Modbus TCP/IP communication protocols," *IEEE Open J. Power Electron.*, vol. 2, pp. 2–17, 2021.

- [7] K. Dissanayake and D. Kularatna-Abeywardana, "Preliminary investigations of supercapacitor-driven solar energy for IoT and portable devices," in *Proc. 2023 IEEE Int. Conf. Energy Technol. Future Grids (ETFG)*, Dec. 3–6, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/ETFG55873.2023.10407798.
- [8] J. Din and H. Su, "Blockchain-enabled smart grids for optimized electrical billing and peer-to-peer energy trading," *Energies*, vol. 17, no. 22, Art. 5744, 2024.
- [9] H. Ma, P. Liu, and Y. Liu, "Co-optimization strategy of static and dynamic reactive power compensation devices for reducing reactive power fluctuation at switching moment," in *Proc. 2025 2nd Int. Conf. Smart Grid Artif. Intell. (SGAI)*, Mar. 21–23, 2025, pp. 575–579, doi: 10.1109/SGAI64825.2025.11009256.
- [10] E. C. Quispe, M. Viveros Mira, M. Chamorro Díaz, R. Castrillón Mendoza, and J. R. Vidal Medina, "Energy management systems in higher education institutions' buildings," *Energies*, vol. 18, no. 7, Art. 1810, Apr. 2025.
- [11] W. Deangkwanthong, P. Inchan, and S. Duangsuwan, "Development of smart electric energy consumption metering in building with IoT," *Thailand Electrical Engineering Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 9–14, Jan.–Apr. 2025.