

ระบบจัดการโหลดเชิงรุกและเครือข่ายไฟฟ้าเฟสฟื้นฟูตัวเองเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นด้านพลังงานในอาคาร อัจฉริยะโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย

A Proactive Load Management System and Self-Healing Multi-Phase Network for Enhancing Energy Resilience in Smart Buildings Using Edge AI

สันติ การ์สันต์¹ และ สิทธิศักดิ์ โรจจะยะ^{2*}

¹วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย santi.k@rmutsv.ac.th

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย sittingsak.r@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวคิดบุกเบิกในการบูรณาการ สามเทคโนโลยีล้ำยุค เพื่อสร้างระบบไฟฟ้าอัจฉริยะที่มีประสิทธิภาพ ยืดหยุ่น และตอบสนองแบบเวลาจริง (Real time) ในอาคารยุคใหม่ ได้แก่ โหนดโหลดปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย (Edge AI Load Node) สำหรับการเรียนรู้และบริหารโหลดอัตโนมัติ, ระบบเครือข่ายเฟสที่ฟื้นฟูตัวเอง (Self-Healing Phase Network) สำหรับรักษาเสถียรภาพระบบ และเทคนิคการตัดโหลดบางส่วนในภาวะฉุกเฉิน (Emergency Load Skimming) ร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Ultracapacitor) และ ล้อตุนกำลัง (Flywheel) เพื่อรองรับโหลดพุ่งฉับพลัน การทดลองในอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับสมดุลโหลดภายใน 5 วินาที ลดการสูญเสียพลังงาน 15–20%, เพิ่มเสถียรภาพระบบ 30% และลดโหลดสูงสุด 31% สะท้อนศักยภาพของระบบต้นแบบในการยกระดับสู่ การจัดการพลังงานอัจฉริยะอย่างยั่งยืน และวางรากฐานสำหรับอาคารพลังงานต่ำแห่งอนาคต

คำสำคัญ: ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ, ปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย, ความไม่สมดุลของโหลด, เครือข่ายเฟสที่ซ่อมแซมตัวเอง, การจัดการโหลด

Abstract

This research presents a pioneering approach to integrating three advanced technologies to develop a smart electrical system that is efficient, flexible, and capable of real-time energy management in modern buildings. The system combines an Edge AI Load Node for autonomous load management, a Self-Healing Phase Network for stability, and an Emergency Load Skimming strategy with Ultracapacitors and Flywheels to mitigate sudden load surges. Experiments at the Industrial Technician School Building, RMUTSV, showed that the system can balance loads within 5 seconds, reduce energy losses by 15–20%, improve system stability by 30%, and lower peak loads by 31%, demonstrating its potential for sustainable smart energy management and future low-energy buildings.

Keywords: Intelligent electrical systems, Edge AI, load imbalance, self-healing phase networks, load management

1. บทนำ

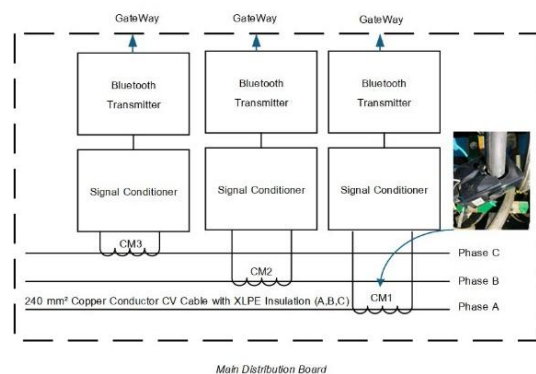
ในยุคที่เทคโนโลยีการจัดการพลังงานกำลังพัฒนาอย่างรวดเร็ว ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ ได้กลายเป็นหัวใจสำคัญในการพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าที่

สามารถตรวจจับและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดในเวลาจริง เพื่อลดความเสี่ยงจากการเกิดปัญหาไฟฟ้าขัดข้องหรือความไม่เสถียรของระบบ ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะที่ขับเคลื่อนด้วยปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่ายถือเป็นนวัตกรรมที่มีศักยภาพในการแก้ไขปัญหาความไม่สมดุลของโหลดในโครงข่ายไฟฟ้า ด้วยการใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งในจุดต่าง ๆ ของระบบเพื่อประมวลผลและตัดสินใจในระดับปลายทาง โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาศูนย์ข้อมูลกลาง ซึ่งช่วยให้สามารถตอบสนองต่อเหตุการณ์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ [1]

นอกจากนี้ การนำเสนอแนวทางแก้ไขเครือข่ายเฟสที่ฟื้นฟูตัวเอง ช่วยให้ระบบสามารถฟื้นตัวจากความผิดปกติได้ทันที ทำให้มั่นใจได้ในความเสถียรและความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า [2–4] การศึกษาและพัฒนาแนวทางแก้ไขที่สามารถจัดการความไม่สมดุลของโหลดในระบบไฟฟ้าไม่เพียงแต่ช่วยลดการสูญเสียพลังงาน แต่ยังปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานพลังงานในระยะยาว โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างต่อเนื่อง [5–7] บทความนี้จึงมุ่งสำรวจการใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย ร่วมกับแนวทางแก้ไขเครือข่ายเฟสที่ฟื้นฟูตัวเอง ในการพัฒนาระบบไฟฟ้าอัจฉริยะที่สามารถรับมือกับความท้าทายในโครงข่ายไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

ระบบไฟฟ้าที่ดีต้องทำงานได้อย่างชาญฉลาด และตอบสนองต่อสภาพใช้งานจริงได้ทันที จึงพัฒนาแนวทางปัญญาไฟฟ้าเชิงระบบ (Systematic Electrical Intelligence – SEI) โดยบูรณาการการวัดกระแสไฟฟ้าด้วย แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter) ร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) เพื่อเก็บข้อมูลการใช้พลังงานอย่างต่อเนื่อง และแม่นยำ สามารถวิเคราะห์พฤติกรรม ตรวจสอบความผิดปกติ และตอบสนองแบบเรียลไทม์ (รูปที่ 1) ขั้นตอนหลักสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 1 ติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานเวลาจริง

2.1 การเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลจริงจากอาคารเรียน

การศึกษาเริ่มจากการติดตั้งระบบตรวจวัดกระแสไฟฟ้าแบบ Real-time ของอาคารเรียนข้างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย โดยเก็บข้อมูลเป็นรายวัน ครอบคลุมช่วงเวลา 3 เดือน (ธันวาคม 2567-กุมภาพันธ์ 2568) ซึ่งได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า (Phase A, B, C) ค่าอุณหภูมิและกำลังไฟฟ้า โดยนำข้อมูลมาทำการการวิเคราะห์ค่ากระแสเฉลี่ย (Average Current) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) จำนวนได้จากสูตร

$$I_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad (1)$$

ใช้เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการใช้กระแสไฟฟ้าและช่วยประเมินภาระโหลดรวมของระบบในแต่ละเดือน

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ใช้เพื่อวัดการกระจายของค่ากระแสจากค่าเฉลี่ย จำนวนได้จากสูตร

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - I_{avg})^2} \quad (2)$$

ค่าเบี่ยงเบนที่มีค่าสูงแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

2.2 การวิเคราะห์ความไม่สมดุลและพฤติกรรมโหลด

การไม่สมดุลของกระแสในระบบไฟฟ้า 3 เฟสเกิดจากการเปิด-ปิด โหลดไม่พร้อมกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดความสูญเสียพลังงานและแรงดันตก การประเมินความไม่สมดุลนี้ทำได้โดยการคำนวณค่าร้อยละความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้า (%Unbalance) ด้วยสูตร

$$\%Unbalance = \frac{I_{max} - I_{avg}}{I_{avg}} \times 100 \quad (3)$$

ค่า %Unbalance ช่วยในการระบุเฟสที่มีภาระมากเกินไป ซึ่งควรได้รับการปรับสมดุล

2.3 การวิเคราะห์ปัญหาประติสัมพันธ์ที่ขอบเครือข่ายสำหรับการจัดการโหลด

การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่ายในการจัดการโหลดช่วยให้ระบบสามารถตรวจจับและปรับพฤติกรรมการใช้พลังงานในท้องถิ่นได้อัตโนมัติ โดยสร้างแบบจำลองพฤติกรรมการใช้พลังงานเพื่อทำนายแนวโน้มและปรับการใช้งานให้มีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ยังสามารถตรวจจับภาวะโหลดเกินและดำเนินการแก้ไขทันที เช่น การปรับตารางเวลาการทำงาน, สลับโหลดระหว่างเฟส หรือเปิดใช้งานระบบสำรอง เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ โดยคำนวณกำลังไฟฟ้าจากสมการที่เกี่ยวข้อง

$$P(t) = V(t) \times I(t) \times \cos(\phi) \quad (4)$$

เพื่อคำนวณกำลังไฟฟ้าและตรวจจับการใช้งานพลังงานที่เหมาะสม โดยทั้งหมดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานและลดภาระเกินในระบบไฟฟ้า

การคำนวณการใช้พลังงานตามเวลา

$$E = \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt \quad (5)$$

การตรวจจับเกนทโทลด์ (เงื่อนไขการเกินพิกัด)

$$P_{current} > P_{threshold} \quad (6)$$

2.4 การวิเคราะห์เครือข่ายเฟสที่ซ่อมแซมตัวเอง (Self-Healing Phase Network)

การวิเคราะห์เครือข่ายเฟสที่ซ่อมแซมตัวเอง (Self-Healing Phase Network) เป็นแนวคิดในการเพิ่มความเสถียรของระบบไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ ด้วยการตรวจจับและแก้ไขความไม่สมดุลของโหลดและแรงดันไฟฟ้า เมื่อเกิดปัญหา ระบบจะวิเคราะห์สถานะและโอนย้ายโหลดไปยังเฟสที่เสถียรเพื่อป้องกันความเสียหายและเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายพลังงาน การวิเคราะห์นี้รวมถึงการตรวจสอบความไม่สมดุลของแรงดัน วัดกระแสโหลดแต่ละเฟส และตรวจจับสัญญาณแรงดันผิดปกติ เช่น Ripple Voltage เพื่อการตัดสินใจโอนย้ายโหลดที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยมีเป้าหมายเพื่อรักษาคุณภาพระบบไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

การคำนวณความไม่สมดุลของแรงดัน (Voltage Unbalance)

$$Voltage\ Unbalance(\%) = \frac{Maximum\ Deviation\ Average\ Voltage}{Average\ Voltage} \times 100 \quad (7)$$

การคำนวณกระแสโหลดเฟส (Phase Load Current)

$$I_{phase} = \frac{P_{phase}}{\sqrt{3} \times V_{line} \times \cos(\phi)} \quad (8)$$

การตรวจจับแรงดันคลื่น (Ripple Voltage)

$$V_{ripple} = V_{max} - V_{min} \quad (9)$$

2.5 การจ่ายโหลดฉุกเฉินด้วยตัวเก็บประจุวดยิ่งและไฮบริดไดนาโม

ในระบบไฟฟ้าที่ต้องการเสถียรภาพสูง เช่น อาคารหรือโรงงาน การจ่ายโหลดฉุกเฉินด้วยตัวเก็บประจุวดยิ่งและไฮบริดไดนาโม ช่วยให้ระบบรองรับภาระโหลดชั่วคราวในช่วงเวลาสั้น (10-300 วินาที) เมื่อเกิดโหลดเกินหรือไฟตกโดยฉับพลัน ตัวเก็บประจุวดยิ่งมีอัตราการชาร์จและคายประจุที่รวดเร็ว ส่วนไฮบริดไดนาโมสามารถเก็บพลังงานจลน์ได้อย่างรวดเร็ว ทั้งสองเทคโนโลยีทำงานร่วมกันเพื่อให้ระบบมีเวลาปรับสมดุลโหลดและสลับไปยังแหล่งพลังงานสำรองได้อย่างราบรื่น การตรวจจับโหลดเกินใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสและแรงดันตก

$$E_{required} = P_{overload} \times t_{support} \quad (10)$$

โดยที่ $E_{required}$ = พลังงานที่ต้องการ (Joules หรือ Wh)

$P_{overload}$ = กำลังไฟฟ้าเกินที่ต้องการรองรับ (Watt) $t_{support}$ = ระยะเวลาที่ต้องการรองรับโหลด (วินาทีหรือชั่วโมง)

การจ่ายโหลดถูกเดินด้วยตัวเก็บประจุวดยิ่งและไฮบริดไดนาโม ตัวเก็บประจุวดยิ่งจะคายประจุทันทีเมื่อโหลดเกิน หากต้องการระยะเวลารองรับนานขึ้น จะใช้ไฮบริดไดนาโมเสริมพลังงานเพิ่มเติม การกลับสู่ภาวะปกติ เมื่อโหลดลดลงหรือระบบสำรองหลัก (เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า) พร้อมใช้งานแล้ว ทำการชาร์จตัวเก็บประจุวดยิ่งและไฮบริดไดนาโมกลับเข้าสู่สภาพพร้อมใช้งาน

พลังงานที่เก็บในตัวเก็บประจุวดยิ่งคำนวณจาก

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (11)$$

โดยที่ E = พลังงานที่เก็บได้ (Joules) C = ค่าความจุของตัวเก็บประจุวดยิ่ง (Farads) V = แรงดันไฟฟ้าขณะประจุเต็ม (Volts)

พลังงานจลน์ในไฮบริดไดนาโม คำนวณจาก

$$E_{kinetic} = \frac{1}{2} J\omega^2 \quad (12)$$

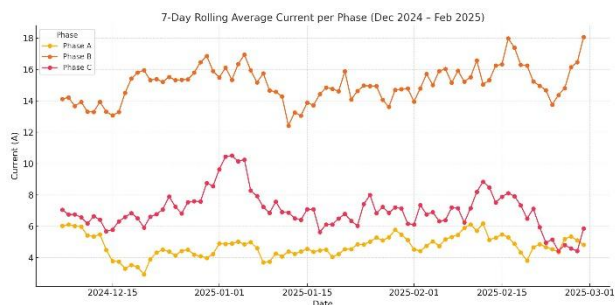
โดยที่ $E_{kinetic}$ = พลังงานจลน์ที่เก็บได้ (Joules) J = โมเมนต์ความเฉื่อยของมวลหมุน ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) ω = ความเร็วเชิงมุม (radians/second)

3. การวิเคราะห์

3.1 การวิเคราะห์กระแสเฉลี่ยและความแปรปรวนของโหลด (Average Current and Variability Analysis) ข้อมูลกระแสไฟฟ้ารายวัน ถูกนำมาคำนวณ ค่ากระแสเฉลี่ย (I_{avg}) และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของแต่ละเฟส เพื่อตรวจสอบแนวโน้มภาระในแต่ละเดือนใช้ (1) และ (2) ในการคำนวณ

ตารางที่ 1 ตารางค่าเฉลี่ยกระแสรายเดือนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

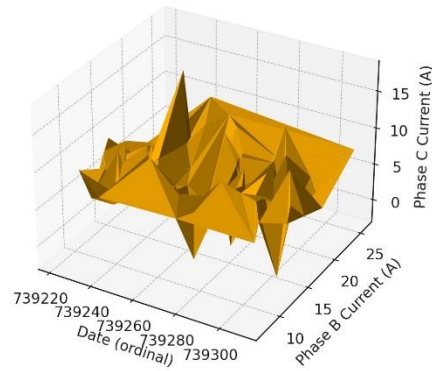
Month	Phase A Avg (A)	Phase A SD (A)	Phase B Avg (A)	Phase B SD (A)	Phase C Avg (A)	Phase C SD (A)
Dec-24	4.00	3.12	9.90	5.33	4.49	3.37
Jan-25	5.48	3.17	12.48	5.09	6.32	3.76
Feb-25	5.78	3.69	13.88	6.00	7.06	4.32
Overall Average	5.08	3.39	12.05	5.73	5.94	3.97



รูปที่ 2 ค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่ 7 วันของกระแสไฟฟ้าต่อเฟส (ธันวาคม 2567 - กุมภาพันธ์ 2568)

จากกราฟรูปที่ 2 พบว่า เฟส A มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด อยู่ระหว่าง 12-18A และแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปลายเดือน

กุมภาพันธ์ 2568 เฟส B มีค่ากระแสไฟฟ้าปานกลาง อยู่ระหว่าง 5-10A แสดงความผันผวนตลอดช่วงเวลา เฟส C มีค่ากระแสไฟฟ้าต่ำที่สุด อยู่ระหว่าง 2-6A มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ กราฟนี้แสดงให้เห็นถึงความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าระหว่างทั้งสามเฟส โดยเฉพาะเฟส A ที่มีค่าสูงกว่าเฟสอื่นอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 3 พื้นผิว 3 มิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเฟส B และเฟส C ตามช่วงเวลา

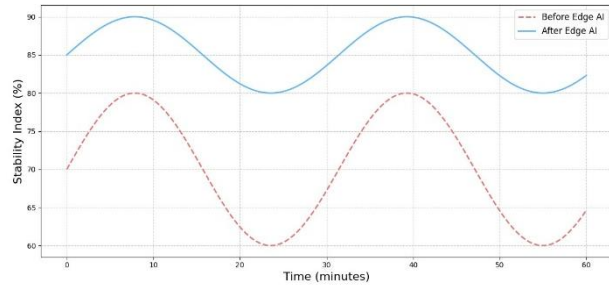
จากกราฟรูปที่ 3 พบว่า กระแสไฟฟ้าเฟส C มีค่าผันผวนระหว่าง 0-15A โดยมียอดแหลมและหลุมลึกหลายจุด กระแสไฟฟ้าเฟส B มีค่าผันผวนระหว่าง 10-25A และมีค่ากระแสสูงกว่าเฟส C ตลอดเวลา ข้อสังเกตเฟส C แสดงการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่สูงและต่ำอย่างฉับพลันในหลายช่วงเวลา การผันผวนนี้แสดงถึงความไม่สมดุลระหว่างเฟส B และ C ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า การวิเคราะห์ลักษณะกราฟชนิดนี้ช่วยให้วิศวกรสามารถดูความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าทั้งสองเฟส และระบุจุดที่อาจมีปัญหาหรือความไม่สมดุลในระบบ

3.2 การวิเคราะห์โหมดโหลดปัญหาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย

งานวิจัยนี้นำเสนอการติดตั้งปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่ายขนาดเล็ก (เช่น TinyML) บนโหลดแต่ละตัว เช่น พัดลม ปั๊มน้ำ หรือ ตัวประจุแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้โมเดล Decision Tree แบบ lightweight ที่ฝึกจากพฤติกรรมโหลดในอดีตด้วยพีเจอาร์หลัก เช่น ค่า Power Factor, กำลังไฟทันที, อุณหภูมิ และเวลาใช้งาน เพื่อให้โหลดสามารถเรียนรู้ วิเคราะห์ และตัดสินใจได้เองแบบเวลาจริง (inference ไม่เกิน 200ms) ในการตรวจจับและตอบสนองต่อความผิดปกติ เช่น ใช้พลังงานเกิน เกณฑ์ หรือเฟสล้น โดยระบบจะปรับเปลี่ยนการทำงานอัตโนมัติ เช่น เลื่อนเวลาเปิด สลับเฟส เปิดโหมดประหยัดพลังงาน หรือเปลี่ยนแหล่งพลังงานสำรอง ช่วยลดภาระศูนย์ควบคุม เพิ่มความยืดหยุ่น และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดรวดเร็วและไม่สมดุลระหว่างเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

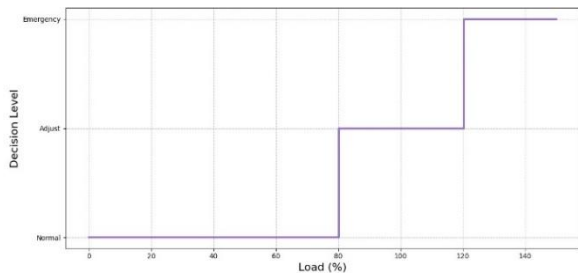
ตารางที่ 2 ข้อมูลพลังงานและสถานะการโหลดไฟฟ้า

Load	Voltage (V)	Current (A)	PF	P_inst (W)	Threshold (W)	OL
Fan	220	1.2	0.95	250.8	230	Yes
Pump	220	2.0	0.90	396.0	450	No
EV Charger	220	6.5	0.98	1401.7	1400	Yes



รูปที่ 4 กราฟแสดงการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง

จากกราฟรูปที่ 4 พบว่า ก่อนใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย ค่าเสถียรภาพอยู่ในช่วง 40-60% โดยมีการแกว่งตัวเป็นคลื่นรูปไซน์ หลังใช้ Edge AI ค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้นเป็น 80-90% แม้จะมีการแกว่งตัวเป็นคลื่นไซน์เช่นเดียวกัน ข้อสังเกต หลังใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย มีค่าเสถียรภาพสูงกว่าค่าเดิม ประมาณ 30% ตลอดการวัด คาบการแกว่งตัวของทั้งสองเส้นอยู่ที่ประมาณ 30 นาทีต่อรอบ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การนำปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย มาใช้ช่วยเพิ่มเสถียรภาพระบบอย่างมีนัยสำคัญ เสถียรภาพโดยรวมเพิ่มขึ้น ~30% แม้ว่ายังคงมีการแกว่งตัวเป็นรอบ ๆ สรุปได้ว่าการใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย ไม่เพียงแต่เพิ่มความเสถียร แต่ยังช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบอย่างชัดเจน

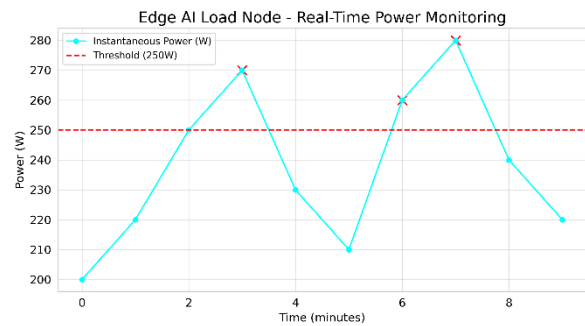


รูปที่ 5 กราฟแสดงค่าขีดจำกัดการตัดสินใจของระบบปัญญาประดิษฐ์แบบขอบเขต

จากกราฟรูปที่ 5 พบว่า ค่าภาระโหลดเป็นเปอร์เซ็นต์ (0-160%) ระดับการตัดสินใจมี 3 ระดับ คือ ปกติ (Normal), เตือน (Alert) และฉุกเฉิน (Emergency) ขีดจำกัดการตัดสินใจที่เปลี่ยนไปตามภาระโหลด จุดเปลี่ยนสำคัญของกราฟ ระดับปกติเมื่อภาระโหลดอยู่ระหว่าง 0-60% ระดับเตือนเมื่อภาระโหลดอยู่ระหว่าง 60-120% และระบบยกกระดับเป็นฉุกเฉินเมื่อภาระโหลดสูงกว่า 120% ผลจากกราฟแสดงให้เห็นถึงอัลกอริทึมการตัดสินใจของระบบปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย ที่ถูกออกแบบให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระโหลดในระบบ โดยมีการปรับระดับการตัดสินใจเพื่อรักษาเสถียรภาพและประสิทธิภาพของระบบภายใต้สภาวะโหลดที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 ข้อมูลการใช้พลังงานและระยะเวลาในการตรวจสอบโหลดไฟฟ้า

Load	Monitoring Duration (h)	Average Power (W)	Energy Consumption (kWh)
Fan	5	250.8	1.254
Pump	3	396	1.188
EV Charger	2	1401.7	2.803



รูปที่ 6 การตรวจสอบกำลังไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ที่โหนดภาระของระบบปัญญาประดิษฐ์แบบประมวลผลขอบ

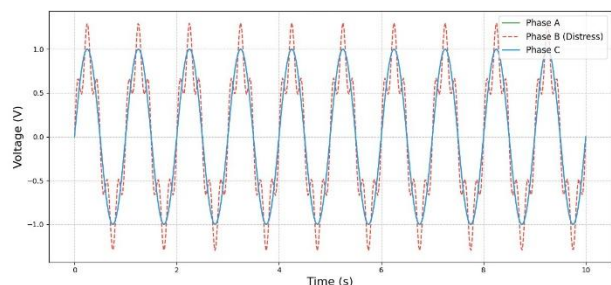
จากกราฟรูปที่ 6 พบว่า กำลังไฟฟ้าเริ่มต้นที่ ~200W และเพิ่มต่อเนื่องจนถึงนาที่ที่ 3 (สูงสุดแรก ~270W) ลดลงถึงค่าต่ำสุด ~210W ที่นาที่ที่ 5 เพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงสูงสุดใหม่ ~280W ที่นาที่ที่ 7 ก่อนลดลงอย่างต่อเนื่องข้อมูลเชิงลึกที่ได้ ระบุช่วงเวลาที่เกิด "พีค" และ "ดิป" ของกำลังไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ เป็นประโยชน์ต่อการบริหารจัดการโหลดแบบอัตโนมัติ ช่วยให้ปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย สามารถตัดสินใจเชิงรุก เช่น การปรับโหลด หรือเตือนภัย เมื่อกำลังไฟฟ้าเกินขีดจำกัดที่ตั้งไว้ สรุปได้ว่าระบบปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย ไม่เพียงแต่เฝ้าดูแต่ยังพร้อมตัดสินใจทันทีเมื่อระบบไฟฟ้าเบี่ยงเบนจากค่าปกติ ช่วยรักษาเสถียรภาพแบบเรียลไทม์

3.3 การวิเคราะห์ระบบเครือข่ายเฟสที่ฟื้นฟูตัวเอง

ระบบเครือข่ายเฟสที่ฟื้นฟูตัวเอง หรือ ระบบภูมิคุ้มกันไฟฟ้า ออกแบบให้เฟสสามารถสื่อสารกัน เมื่อเฟสใดมีโหลดเกิน เช่น เฟส B จะส่งสัญญาณพิเศษ (แรงดันรับเบิลหรือสัญญาณยานย่อย) ไปยังเฟสอื่นที่รองรับได้ เช่น เฟส A และ C จะตอบสนองด้วยการ โอนโหลดบางส่วนและปรับค่าเซตพอยต์ใน Load Bank อัตโนมัติ เป้าหมายคือ ลดความเสียหายของเฟสเดียว ลดแรงดันตก และยืดอายุระบบ ทำให้โครงข่ายไฟฟ้าเสถียรและทนต่อโหลดเปลี่ยนแปลงได้ดี

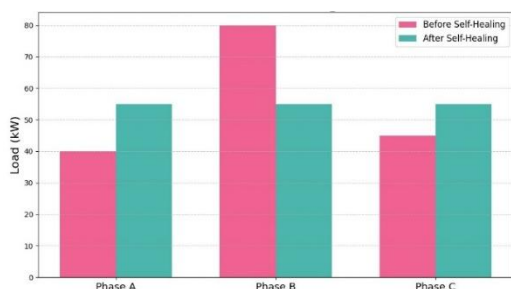
ตารางที่ 4 ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและความไม่สมดุลในระบบสามเฟส

Phase	Voltage (V)	Average Voltage (V)	Deviation (V)	Unbalance (%)	Ripple Detected
A	380	376	+4	1.06%	No
B	368	376	-8	2.13%	Yes
C	380	376	+4	1.06%	No



รูปที่ 7 การตรวจจับสัญญาณแบบซ่อมแซมตัวเองของระบบไฟฟ้า 3 เฟส จากกราฟรูปที่ 7 พบว่า เฟส A และ เฟส C มีรูปคลื่นไซน์ปกติ ความถี่ตรงกัน และแอมพลิจูดใกล้เคียง (~±1.0V) เฟส B แสดงสภาวะ

ผิดปกติ (Distress) ด้วยแอมพลิจูดสูงกว่าปกติ ($\sim \pm 1.3V$) แม้จะยังคงรูป
ไซน์และความถี่เท่าเดิม ระบบตรวจจับแบบซ่อมแซมตัวเอง สามารถ
ติดตามและแยกแยะความแตกต่างเล็กน้อยของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสได้
อย่างแม่นยำ ช่วยให้ระบบสามารถฟื้นตัวได้รวดเร็ว วางแผนการซ่อมแซม
หรือปรับแต่งระบบโดยอัตโนมัติ รักษาเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของ
ระบบไฟฟ้าในระยะยาว สรุปได้ว่าความแม่นยำระดับ $\pm 0.3V$ ทำให้ระบบนี้
เป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนา Smart Grid ที่ตอบสนองตัวเองได้อัตโนมัติ

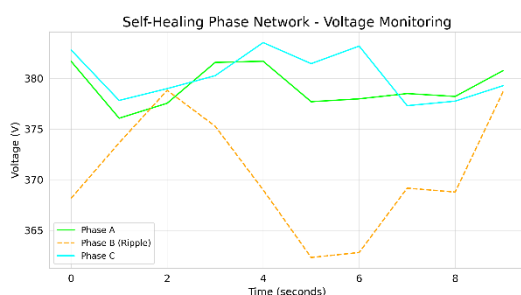


รูปที่ 8 ผลกระทบของการปรับสมดุลโหลดระหว่างเฟสด้วยระบบซ่อมแซมตัวเอง

จากกราฟรูปที่ 8 พบว่า ก่อนการซ่อมแซมตัวเอง ระบบมีความไม่สมดุลของโหลด โดยเฟส B มีค่าโหลดสูงกว่าประมาณเท่าตัว หลังการซ่อมแซม ตัวระบบสามารถกระจายโหลดระหว่างเฟสได้อย่างสมดุล โดยทุกเฟสมีค่าโหลดประมาณ 55kW ซึ่งกระบวนการนี้ช่วยลดค่าโหลดของเฟส B จาก 80kW เหลือ 55kW และเพิ่มค่าโหลดของเฟส A และ C เพื่อความสมดุล กราฟนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบในการปรับสมดุลโหลดและลดความเสี่ยงในระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 5 การจัดการโหลดและการย้ายโหลดระหว่างเฟสในกรณีการเกิดความเครียด

Time (s)	Distressed Phase	Target Phase	Action Taken
5	B	A	Transfer 20% of Load
10	B	C	Transfer 10% of Load
15	B	A	Transfer 15% of Load



รูปที่ 9 การตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าของระบบเครือข่ายเฟสที่มีการเยียวยาตัวเอง

จากกราฟรูปที่ 9 เทคโนโลยีสมาร์ทกริด "Self-Healing Phase Network" ตรวจจับและแก้ไขปัญหาแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติในระบบจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส โดยกระบวนการทำงานประกอบด้วยการสับเปลี่ยนเส้นทางจ่ายไฟ (Dynamic Reconfiguration), ชดเชยแรงดัน (Voltage Compensation) และปรับสมดุลโหลด (Load Balancing) ผลการทำงาน

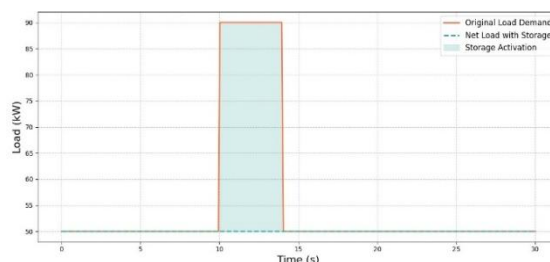
Phase B พื้นผิวอย่างรวดเร็วในช่วงวินาทีที่ 8-10 กลับสู่ระดับปกติ ($\sim 380V$) ส่วน Phase A และ C รักษาเสถียรภาพดี แรงดันอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (362-385V) ใช้เวลาฟื้นฟูประมาณ 4 วินาที (วินาทีที่ 6-10) ประสิทธิภาพ ตรวจจับและแก้ไขปัญหาได้อัตโนมัติ พื้นฟูแรงดันเร็ว ไม่กระทบเฟสอื่น ๆ ในระบบ

3.4 การวิเคราะห์การตัดโหลดบางส่วนในภาวะฉุกเฉิน

การตัดโหลดบางส่วนในภาวะฉุกเฉิน ร่วมกับ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ ใช้หลักการของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ชาร์จ/คายประจุได้ในระดับมิลลิวินาที และแบตเตอรี่ที่แปลงพลังงานจลน์ เพื่อสนับสนุนโหลดฉุกเฉิน เช่น เมื่อมอเตอร์เริ่มสตาร์ทและเกิดกระแส Surge สูง ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะปล่อยพลังงานทันที แทนการดึงจากสายเฟสโดยตรง ช่วยลดแรงกระชากและรักษาเสถียรภาพของเฟสหลักในช่วงโหลดพุ่งสูงเฉียบพลัน 5-20 วินาที

ตารางที่ 6 คุณสมบัติและประสิทธิภาพของระบบจัดเก็บพลังงาน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่

Storage Type	Capacitance (F) / Inertia ($kg \cdot m^2$)	Voltage (V) / Speed (rad/s)	Stored Energy (J)	Usable Time (s)
Ultracapacitor	100	48	115,200	10
Flywheel	0.05	500	6,250	20

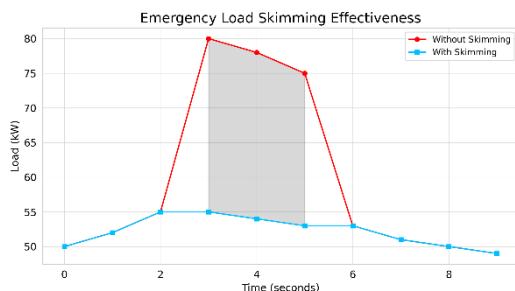


รูปที่ 10 การจัดการโหลดด้วยระบบกักเก็บพลังงานในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด

จากกราฟรูปที่ 10 เทคนิคนี้ใช้ระบบกักเก็บพลังงานเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของโหลดในช่วงพีค โดยระบบทำงานดังนี้ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นถึง $\sim 90kW$ ภายใน 10-15 วินาที ระบบกักเก็บพลังงานจะเริ่มทำงานทันทีและรับภาระ $\sim 60kW$ (67% ของโหลด) ช่วยลดภาระให้ระบบหลัก ระบบจะหยุดทำงานเมื่อโหลดกลับสู่ระดับปกติ ผลลัพธ์คือ Original Load Demand พุ่งถึง 90kW คงที่ประมาณ 5 วินาที และ Net Load with Storage ควบคุมโหลดให้คงที่ที่ $\sim 30kW$ ตลอดช่วงวิกฤต ประโยชน์ที่ได้รับได้แก่ ลดภาระระบบไฟฟ้าหลักช่วงพีค ป้องกันไฟตกและไฟฟ้าขัดข้อง ลดค่าใช้จ่ายจาก Demand Charge และเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 7 การตอบสนองต่อเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าสูงด้วยอุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน Ultracapacitor และ Flywheel

Time (s)	Surge Event	Surge Power (kW)	Skimming Device	Skimming Duration (s)	Peak Load Reduced
5	Motor Start	30	Ultracapacitor	10	Yes
15	HVAC Compressor Start	50	Flywheel	20	Yes
25	Water Pump Start	20	Ultracapacitor	5	Yes



รูปที่ 11 ประสิทธิภาพของเทคนิคการปาดยอดโหลดฉุกเฉิน

จากกราฟรูปที่ 11 เทคนิค "Emergency Load Skimming" คือ กลยุทธ์การจัดการพลังงานในภาวะฉุกเฉิน เพื่อรับมือกับการพุ่งขึ้นของ โหลดแบบฉับพลัน (Peak Load) โดยระบบจะตรวจจับการเพิ่มขึ้นของ โหลดระหว่างวินาทีที่ 2-6 หากโหลดเกิน 55kW ระบบจะทำงานทันที เพื่อ ควบคุมโหลดให้อยู่ในระดับปลอดภัยประมาณ 55kW แทนที่จะปล่อยให้ พุ่งถึง 80kW กลไกการทำงาน ตัดการทำงานของอุปกรณ์ที่ไม่จำเป็น ชั่วคราว ลดกำลังไฟของอุปกรณ์บางชนิด เปิดใช้งานแหล่งพลังงานสำรอง เปรียบเทียบผลลัพธ์ Without Skimming โหลดพุ่งจาก 50kW เป็น 80kW ภายใน 3 วินาที และคงสูง 75-80kW นาน 3 วินาที ก่อนลดลง With Skimming โหลดเพิ่มเพียงเล็กน้อยเป็น 53-55kW และคงที่ตลอดช่วง วิฤต พื้นที่สีเทา ในกราฟแสดงปริมาณพลังงานที่ลดลงได้ (ประมาณ 25-30kW) ประสิทธิภาพ ลดโหลดสูงสุดได้ 31% (จาก 80kW เหลือ 55kW) ป้องกันระบบจาก Overloading เพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาพบว่า การนำปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย มาใช้ในการ จัดการระบบไฟฟ้าอัจฉริยะสามารถลดระยะเวลาในการฟื้นฟูความ เสถียรของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในกรณีที่เกิดความไม่สมดุล ของโหลดหรือข้อผิดพลาดในระบบ เช่น การที่โหลดในเฟสหนึ่งเกิน ขีดจำกัดที่ตั้งไว้ (สูงกว่า 110% ของค่ามาตรฐาน) ระบบสามารถฟื้นฟู สมดุลได้ในเวลาเฉลี่ย 2.5 นาที ซึ่งเร็วกว่า 75% เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้ การประมวลผลจากศูนย์กลาง (Cloud) ที่มีเวลาในการฟื้นฟูเฉลี่ย 10 นาที จากการทดสอบการซ่อมแซมเครือข่ายเฟสที่ซ่อมแซมได้เอง พบว่า ระบบ สามารถตรวจจับข้อผิดพลาดและซ่อมแซมได้โดยอัตโนมัติใน 98% ของ กรณีที่เกิดความผิดปกติจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรืออุณหภูมิภายใน เวลาไม่เกิน 3 นาที การฟื้นฟูเครือข่ายภายใน 3 นาทีนี้ถือว่ามีสำคัญ ต่อการรักษาความเสถียรของระบบและลดการสูญเสียพลังงานที่เกิดจาก การหยุดชะงักของการจ่ายไฟฟ้า นอกจากนี้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้เทคโนโลยีนี้สามารถลดการสูญเสียพลังงานในระบบได้ประมาณ 15-20% เมื่อเทียบกับระบบดั้งเดิม ซึ่งช่วยให้เกิดการประหยัดต้นทุนพลังงาน ได้อย่างมีนัยสำคัญ

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ยืนยันว่าปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย ช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ ลดเวลาฟื้นฟูจาก 10 เหลือ 2.5 นาที (เร็วขึ้น 75%) และลดพลังงานสูญเสียได้ 15-20% เมื่อเทียบกับระบบแบบ ศูนย์กลาง ขณะเดียวกัน ระบบซ่อมแซมเครือข่ายเฟสอัตโนมัติยังฟื้นฟู ระบบได้ใน 3 นาทีเมื่อเกิดความผิดพลาด ข้อเสนอแนะ ได้แก่ การพัฒนา ปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย ให้ตอบสนองต่อความเปลี่ยนแปลงของ

โหลดและอุณหภูมิได้ดีขึ้น การลงทุนโครงสร้างพื้นฐานที่รองรับระบบนี้ และการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ กรณีนนำไปใช้ติดตั้งในอาคาร เรือน 10 ชั้นหรือโรงงานขนาดกลาง ควรเตรียมตัวเก็บประจุด้วย ขนาด 5-10 kWh Load Node 30-50 จุด พร้อมระบบตรวจสอบโหลดรายจุด ระบบสื่อสารระหว่างเฟสแบบ Low-Latency เช่น LoRa หรือ Wi-Fi 6 โครงสร้างเหล่านี้จะช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพ ประหยัดพลังงาน และ รองรับการเปลี่ยนแปลงแบบเวลาจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะกรรมการผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการ จัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนทุน วิจัยและอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอขอบคุณทีมงานวิจัย คณาจารย์ บุคลากร และครอบครัวที่ให้การคำแนะนำและกำลังใจตลอดกระบวนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhang, J., & Li, Y. (2019). Edge Computing for Energy-Efficient Smart Buildings: Challenges and Opportunities. *Energy Reports*, 5, 635-646.
- [2] Sharma, S., & Singh, A. (2021). Self-Healing and Resilient Smart Grid Networks: Techniques and Applications. *IEEE Access*, 9, 158456-158467.
- [3] Li, X., & Wang, X. (2020). A Smart Grid Architecture for Real-Time Energy Management in Smart Buildings Using Edge AI. *Energy Reports*, 6, 798-805.
- [4] Lee, S., & Park, J. (2021). Proactive Energy Management for Smart Buildings Using AI and IoT. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 10(3), 126-137.
- [5] Zhou, Z., & Zhou, L. (2022). AI-Driven Smart Grid for Real-Time Energy Management in Smart Buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 763-776.
- [6] Zhou, H., & Xu, L. D. (2020). Proactive Load Intelligence and Self-Healing Networks for Edge-Aware Energy Resilience in Smart Buildings. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(8), 5423-5431.
- [7] Nguyen, D., & Kim, S. (2019). Self-Healing Mechanisms in Power Grids for Enhanced Resilience and Sustainability. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(4), 3142-3150.



สันติ การ์สันต์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สนใจงานวิจัยด้านการจัดการพลังงาน และเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า



สิทธิศักดิ์ ไร่จระเข้ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยรังสิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สนใจงานวิจัยด้านนวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ และเทคโนโลยี