

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าอัจฉริยะในอาคารสถานศึกษาด้วยแบบจำลองดิจิทัล ปัญญาประดิษฐ์ และการจัดการโหลดหลายเฟสร่วมกับพลังงานหมุนเวียน: กรณีศึกษาอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย

Smart Electrical System Optimization in Educational Buildings Using Digital Twin, Artificial Intelligence, and Multi-Phase Load Management with Renewable Energy: A Case Study of the Industrial Technician School Building, RMUTSV

สิทธิศักดิ์ โรจยะยะ¹ และ สันติ การิสันต์^{2*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย sittisak.r@rmutsv.ac.th

²วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย santi.k@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

ในยุคดิจิทัลที่ใช้พลังงานอย่างชาญฉลาดเป็นหัวใจของความยั่งยืน งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์ ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Electrical System) สำหรับอาคารเรียน โดยบูรณาการเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น Digital Twin, Reinforcement Learning (RL) และ PV Microinverter แบบเลือกเฟส เข้ากับแนวทางการจัดการโหลดในระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส จากการเก็บข้อมูลจริง 3 เดือน พบว่า เฟส B มีพฤติกรรมโหลดสูงผิดปกติและเกิดความไม่สมดุลเกิน 40% หลายวันติดต่อกัน โดยดำเนินการแก้ไขผ่าน 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การวิเคราะห์กระแสและความแปรปรวน 2) การตรวจจับความไม่สมดุล 3) การจำลองการถ่ายโอนโหลด 4) การบูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์ และ 5) การคำนวณพลังงานสูญเสียและแรงดันตก ผลการวิเคราะห์ชี้ว่า การถ่ายโอนโหลดและการจ่ายพลังงานจาก PV สามารถลดความไม่สมดุลจาก 55.6% เหลือ 6.6% และลดพลังงานสูญเสียได้ 150kWh ต่อปี พร้อมลดค่าไฟฟ้า 600 บาท/ปี งานวิจัยนี้เป็นต้นแบบการออกแบบระบบไฟฟ้าอัจฉริยะสำหรับอาคารเรียนในอนาคต ที่สามารถบูรณาการทั้งด้านการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ความเสถียรของระบบ และการรองรับพลังงานหมุนเวียนพร้อมต่อยอดสู่ Net Zero Energy Building (NZE) ในระดับสถานศึกษาระดับอุดมศึกษาได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ, การจัดการโหลด, ความไม่สมดุลของโหลด

Abstract

In the digital age, smart energy management is essential for sustainability. This study proposes the design and analysis of a Smart Electrical System for educational buildings, integrating Digital Twin technology, Reinforcement Learning (RL), and phase-selectable PV microinverters into a three-phase load management framework. Real-world data collected over three months revealed abnormal loading behavior on Phase B, with load imbalance exceeding 40% on multiple consecutive days. A five-step approach was implemented—comprising current analysis, imbalance detection, load transfer simulation, solar integration, and energy loss calculation. The results demonstrate that combining load redistribution with solar power supply reduced the imbalance from 55.6% to 6.6%, saving 150 kWh of energy and approximately 600 THB annually. This research serves as a model for developing smart, energy-efficient, and renewable-ready electrical systems in academic

buildings, contributing toward the realization of Net Zero Energy Buildings (NZE) in higher education institutions.

Keywords: Smart Electrical System, Load Management, Load Imbalance

1. บทนำ

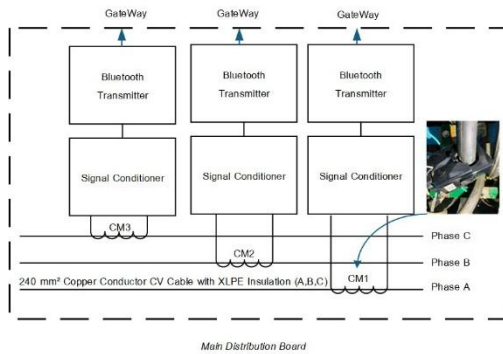
ในยุคที่พลังงานกลายเป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนโลก ความท้าทายของการจัดการพลังงานในอาคารเรียนไม่ได้มีเพียงแค่การประหยัดค่าไฟฟ้า แต่ยังรวมถึงการสร้างที่ยั่งยืน ความมั่นคงของระบบ และความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดแบบทันทีทันใด ปัญหาความไม่สมดุลของโหลดในระบบไฟฟ้า 3 เฟส โดยเฉพาะกรณีเฟสใดเฟสหนึ่งมีการเกินขีดจำกัด เช่น เฟส B ที่มีกระแสไฟฟ้าสูงกว่าค่าเฉลี่ยถึงเกือบสองเท่า นั้น ไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ไม่จำเป็น แต่ยังส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์และความเสถียรของระบบในภาพรวม จากสถานการณ์ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวทางการพัฒนา “ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะในอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย” โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีล้ำสมัย ได้แก่ แบบจำลองดิจิทัล (Digital Twin) เพื่อจำลองพฤติกรรมโหลดในแต่ละช่วงเวลา [3] ปัญญาประดิษฐ์ (Reinforcement Learning) เพื่อทำนายและควบคุมโหลดเชิงรุก [5] ระบบจ่ายพลังงาน PV Microinverter แบบเลือกเฟส เพื่อรองรับโหลดที่ไม่สมดุล [4] และระบบ AC/DC Phase-Linking สำหรับถ่ายโอนพลังงานระหว่างเฟสอย่างอัจฉริยะ [6]

นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์เชิงลึกทั้งด้านพฤติกรรมกระแสไฟฟ้ารายวัน ความไม่สมดุลของโหลด พลังงานสูญเสีย และแรงดันตกในระบบ โดยใช้ข้อมูลจริงจากระบบ Monitoring ที่ติดตั้งบริเวณสายเมนหลักของอาคารเรียน พร้อมคำนวณผลประโยชน์เชิงเศรษฐศาสตร์ เช่น การลดพลังงานสูญเสียและค่าพลังงานรายปี ผลลัพธ์ของการศึกษานี้ไม่เพียงแต่แสดงให้เห็นว่า “การบริหารโหลดอย่างชาญฉลาดสามารถเปลี่ยนภาระให้เป็นประสิทธิภาพ” แต่ยังเป็นต้นแบบของการออกแบบอาคารเรียนที่รองรับพลังงานหมุนเวียนและมุ่งสู่แนวคิด Net Zero Energy Building (NZE) ในระดับมหาวิทยาลัยได้อย่างแท้จริง [1-2][7]

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

ระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งทำงานได้อย่างชาญฉลาด และตอบสนองต่อสภาพใช้งานจริงได้ทันที จึงพัฒนาแนวทาง Systematic Electrical Intelligence (SEI) โดยบูรณาการการวัดกระแสไฟฟ้าด้วย Clamp Meter ร่วมกับระบบ IoT เพื่อเก็บข้อมูลการใช้พลังงานอย่างต่อเนื่องและแม่นยำ

สามารถวิเคราะห์พฤติกรรม ตรวจสอบความผิดปกติ และตอบสนองแบบเรียลไทม์ (รูปที่ 1) และมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 1 ติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานเรียลไทม์

2.1 การเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลจริงจากอาคารเรียน

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

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

ใช้เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการใช้กระแสไฟฟ้าและช่วยประเมินภาระโหลดรวมของระบบในแต่ละเดือน

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ใช้เพื่อวัดการกระจายของค่ากระแสจากค่าเฉลี่ย คำนวณได้จากสูตร

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

ค่าเบี่ยงเบนที่มีค่าสูงแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

2.2 การวิเคราะห์ความไม่สมดุลและพฤติกรรมโหลด

ระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่สมดุลจะช่วยให้การจ่ายพลังงานมีประสิทธิภาพสูงสุด ลดความสูญเสียในสายไฟและยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ แต่ในสภาพการใช้งานจริง โดยเฉพาะในอาคารเรียนที่มีการเปิด-ปิดโหลดไม่พร้อมกัน มักเกิดความไม่สมดุลของกระแส (Current Unbalance) ซึ่งนำไปสู่ความสูญเสียทางพลังงานและแรงดันตกที่เพิ่มขึ้น เพื่อประเมินระดับความไม่สมดุลของระบบ งานวิจัยนี้ได้ใช้การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยคำนวณ ค่าร้อยละความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้า (%Unbalance) คำนวณได้จากสูตร

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

ค่า %Unbalance ช่วยในการระบุเฟสที่มีภาระมากเกินไป ซึ่งควรได้รับการปรับสมดุล

2.3 การจำลองการถ่ายโอนโหลดด้วย Digital Simulation

การถ่ายโอนโหลด (Load Transfer Simulation) การย้ายโหลดระหว่างเฟส การจำลองผลของการย้ายภาระไฟฟ้าระหว่างเฟสเพื่อลดความไม่สมดุล คำนวณได้จากสูตร

$$I'_{new} = I_{original} \pm \Delta I \quad (4)$$

โดยพิจารณาการย้ายโหลดจะพิจารณาในอัตราที่เหมาะสม พร้อมประเมินผลกระทบต่อ %Unbalance และพลังงานสูญเสียหลังการปรับ

2.4 การเชื่อมต่อพลังงานหมุนเวียนเข้าระบบด้วย PV Microinverter

ระบบ PV ขนาด 5kW เชื่อมต่อกับ Microinverter แบบเลือกเฟสจ่ายพลังงานได้ โดยจะเริ่มจ่ายพลังงานไปยังเฟสที่มีภาระโหลดสูงสุด (พีค) หากเฟสใดเต็ม ระบบจะทำการถ่ายโอนพลังงานไปยังเฟสที่เหลือที่สามารถรองรับพลังงานได้ โดยสามารถคำนวณพลังงานที่จ่ายได้จากสูตรดังนี้

$$E_{PV} = P_{PV} \times t \quad (5)$$

ช่วยประเมินศักยภาพของการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้งานร่วมกับระบบ

2.5 การคำนวณพลังงานสูญเสียและแรงดันตก

การคำนวณการสูญเสียพลังงาน (Energy Loss) การสูญเสียในสายไฟฟ้า พลังงานที่สูญเสียในสายไฟเนื่องจากความต้านทาน คำนวณได้จากสูตร

$$P_{loss} = I^2 \times R \quad (6)$$

แสดงให้เห็นว่ากระแสที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสูญเสียมากขึ้น การคำนวณแรงดันตก (Voltage Drop) แรงดันตกในสายไฟ แรงดันที่ลดลงเมื่อกระแสไหลผ่านสายที่มีความต้านทาน คำนวณได้จากสูตร

$$\Delta V = I \times R \quad (7)$$

ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดันในระบบ โดยเฉพาะในจุดโหลดปลายสาย

2.6 การวิเคราะห์ผลกระทบของโหลดไม่สมดุลต่อประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าและพลังงานสูญเสีย แนวทางสู่การจัดการโหลดอย่างชาญฉลาด

ระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่มีภาระโหลดไม่สมดุล ส่งผลโดยตรงต่อการสูญเสียพลังงานในสายไฟฟ้าและแรงดันตกในระบบ ซึ่งมีผลกระทบต่อนเสถียรภาพและประสิทธิภาพการส่งจ่ายพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อประเมินผลกระทบดังกล่าว การวิเคราะห์นี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าการ

สูญเสียพลังงานระหว่างกรณีที่โหลดไม่สมดุลกับกรณีที่โหลดถูกจัดสมดุลแล้ว โดยคำนวณได้จากสูตรดังนี้

โหลดไม่สมดุล (Unbalanced System)

$$P_{loss_total} = \sum_{i=A}^C I_i^2 \times R \quad (8)$$

โหลดสมดุล (Balanced System)

$$P_{loss_balance} = 3 \times I_{avg}^2 \times R \quad (9)$$

โดยการเปรียบเทียบพลังงานที่สูญเสียในระบบที่มีโหลดสมดุลและไม่สมดุล เพื่อแสดงผลของการจัดการโหลด

การประเมินประสิทธิภาพการส่งจ่ายพลังงาน เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบในเชิงอัตราส่วน งานวิจัยได้คำนวณ ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ของการส่งจ่ายพลังงานในแต่ละกรณี คำนวณได้จากสูตร

$$\eta = \frac{P_{loss_balance}}{P_{loss_unbalance}} \times 100 \quad (10)$$

แสดงอัตราส่วนของการสูญเสียระหว่างระบบสมดุลและไม่สมดุล เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ

การประเมินผลประโยชน์ทางพลังงานและเศรษฐศาสตร์นอกจากนี้ยังมีการคำนวณ พลังงานที่ประหยัดได้ (Energy Saving) จากการลดค่าการสูญเสียพลังงานในแต่ละวัน คำนวณได้จากสูตร

$$Energy_{saving} = \frac{\Delta P \times t}{1000} \quad (11)$$

$$\Delta P = P_{loss_unbalance} - P_{loss_balance} \quad (12)$$

ใช้วัดผลประโยชน์เชิงพลังงานที่ได้จากการปรับโหลดให้สมดุลในหน่วย kWh

3. การวิเคราะห์

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

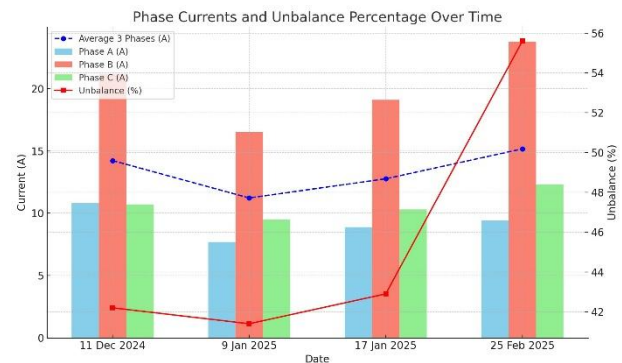
ตารางที่ 1 ตารางค่าเฉลี่ยกระแสรายเดือนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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

3.2 การวิเคราะห์ความไม่สมดุลของโหลด (Unbalanced Load Analysis) เพื่อระบุวันและช่วงเวลาที่เกิดระหว่างเฟสไม่สมดุลอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2 ตารางวิเคราะห์ความไม่สมดุลของกระแส

Date	Phase A (A)	Phase B (A)	Phase C (A)	3-Phase Average (A)	Unbalance (%)	Status
11-Dec-24	10.8	21.2	10.7	14.23	42.20%	UB
9-Jan-25	7.7	16.5	9.5	11.23	41.40%	UB
17-Jan-25	8.9	19.1	10.3	12.77	42.90%	UB
25-Feb-25	9.41	23.77	12.32	15.17	55.60%	UB

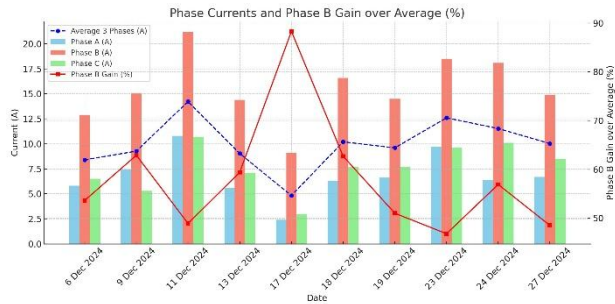


รูปที่ 2 กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสและเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลตามช่วงเวลา

จากกราฟรูปที่ 2 พบว่า ความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ช่วง 11 ธันวาคม 2567-25 กุมภาพันธ์ 2568 โดยเฟส B มีภาระโหลดสูงผิดปกติ (18.5–22.5A) ขณะที่เฟส A ลดลงเหลือ 7.5A ก่อนกลับสู่ 10A และเฟส C คงที่ในช่วง 10–12A ระดับความไม่สมดุลเริ่มต้นที่ 42% และพุ่งขึ้นถึง 55.6% ปลายเดือน กุมภาพันธ์ 2568 ซึ่งสูงเกินมาตรฐานตลอดช่วงเวลา สะท้อนถึงการกระจายโหลดที่ไม่สมดุล โดยเฉพาะในเฟส B สรุปได้ว่าความแตกต่างของค่ากระแสระหว่างเฟสที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นสาเหตุหลักของความไม่สมดุล หากไม่แก้ไขจะส่งผลต่อเสถียรภาพระบบและเพิ่มการสูญเสียพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 วันที่กระแส Phase B สูงเกินกว่าค่าเฉลี่ย 20-30%

Date	Phase A (A)	Phase B (A)	Phase C (A)	3-Phase Average (A)	Phase B Above Avg (%)
6-Dec-24	5.8	12.9	6.5	8.40	53.60%
9-Dec-24	7.4	15.1	5.3	9.27	62.90%
11-Dec-24	10.8	21.2	10.7	14.23	48.90%
13-Dec-24	5.6	14.4	7.1	9.03	59.40%
17-Dec-24	2.4	9.1	3.0	4.83	88.30%
18-Dec-24	6.3	16.6	7.7	10.20	62.70%
19-Dec-24	6.6	14.5	7.7	9.60	51.00%
23-Dec-24	9.7	18.5	9.6	12.60	46.80%
24-Dec-24	6.4	18.1	10.1	11.53	56.90%



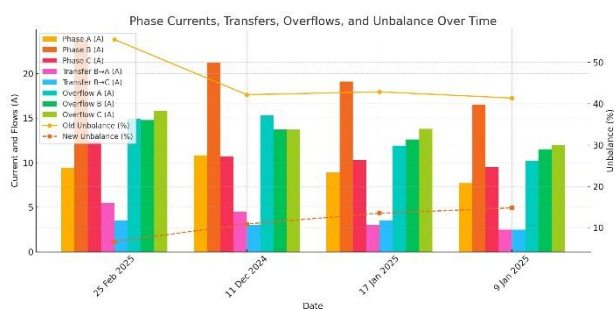
รูปที่ 3 กระแสไฟฟ้าแต่ละเฟสและเปอร์เซ็นต์ที่เฟส B สูงกว่าค่าเฉลี่ย

จากกราฟรูปที่ 3 พบว่า เฟส B มีกระแสไฟฟ้าสูงอย่างต่อเนื่อง (10–21A) และแตะจุดสูงสุดที่ 21A (11 ธันวาคม 2567) ขณะที่เฟส A แปรผันสูง (1–10A) และเฟส C ค่อนข้างคงที่ (5–11A) ดัชนี Phase B Gain over Average อยู่ในช่วง 55–90% โดยเฉพาะช่วง 11–15 ธันวาคม 2567 แสดงถึงความผันผวนรุนแรงและเริ่มเกิดความไม่สมดุล ค่าเฉลี่ยรวม 3 เฟสอยู่ระหว่าง 8–15A และลดลงในช่วงปลายเดือน สะท้อนการใช้งานที่เบาบาง สรุปได้ว่า เฟส B มีภาระกระแสสูงกว่าค่าเฉลี่ยอย่างชัดเจน โดยเฉพาะช่วงกลางเดือน ธันวาคม 2567 ซึ่งควรเฝ้าระวังเป็นพิเศษเนื่องจากอาจสะท้อนถึงพฤติกรรมโหลดผิดปกติหรือปัญหาในการกระจายโหลด

3.3 การจำลองการถ่ายโอนโหลด (Load Transfer Simulation)
ดำเนินการจำลองผลการถ่ายโอนโหลดจากเฟส B (ที่มีโหลดเกิน) ไปยังเฟส A และ C พร้อมคำนวณ %Unbalance ใหม่หลังถ่ายโอน เพื่อประเมินความมีประสิทธิภาพของการจัดสมดุล

ตารางที่ 4 การถ่ายโอนโหลดจาก Phase B ไปยัง Phase A / C

Date	Original Unbalance (%)	New Unbalance (%)
25-Feb-25	55.60%	6.60%
11-Dec-24	42.20%	10.90%
17-Jan-25	42.90%	13.50%
9-Jan-25	41.40%	14.80%



รูปที่ 4 กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส การถ่ายโอน การล้น และความไม่สมดุลตามช่วงเวลา

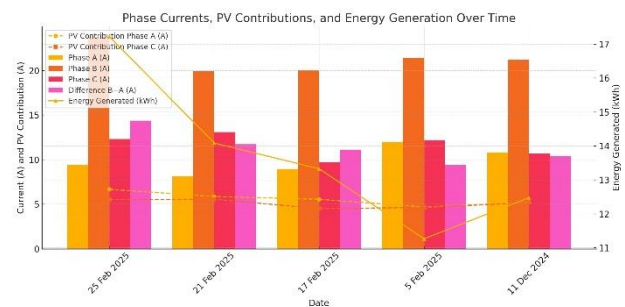
จากกราฟรูปที่ 4 พบว่า ระดับความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในช่วง 40–55% ซึ่งสูงเกินมาตรฐาน โดยเฉพาะเฟส B ที่มีกระแสไฟฟ้าสูงกว่าค่าเฉลี่ยถึง 70–90% ตลอดช่วงเวลา แสดงถึงการโหลดที่ไม่สมดุลและมีแนวโน้มสะสม การจำลองการกระจายโหลดช่วยลด Unbalance ได้จาก 55% เหลือ 40% และอาจลดได้ถึง 20% ด้วยเทคนิคที่เหมาะสม ความผันผวนของเฟส B ช่วงกลางเดือน ธันวาคม 2567 (ค่า Phase B

Gain สูงถึง 90%) บ่งชี้ถึงโหลดผิดปกติหรือการใช้งานเกิน ผลกระทบคือความร้อนสะสมในอุปกรณ์ เสี่ยงต่อการสึกหรอ และสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น การปรับโหลดด้วยเทคนิค Phase Transfer ช่วยลดความไม่สมดุลได้ถึง 35% และเพิ่มประสิทธิภาพระบบโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญ

3.4 การวิเคราะห์การสนับสนุนโหลดด้วยพลังงานหมุนเวียน (PV Microinverter Targeting) ระบบ PV ขนาด 5kW ได้รับการจำลองให้เลือกจ่ายไฟให้กับเฟสที่มีโหลดสูงก่อน (เฟส B) และกระจายไปยังเฟสอื่นเมื่อ B เต็ม

ตารางที่ 5 การกระจายพลังงานจาก PV Microinverter ขนาด 5kW

Date	Phase A (A)	Phase B (A)	Phase C (A)	B-A Diff (A)	Energy Saved (kWh)	PV A (A)	PV C (A)
25-Feb-25	9.41	23.77	12.32	14.36	17.23	6.68	5.53
21-Feb-25	8.95	20.06	9.73	11.11	13.33	5.56	4.51
17-Feb-25	8.18	19.92	13.10	11.74	14.09	5.87	5.57
5-Feb-25	11.99	21.38	12.19	9.39	11.27	4.70	4.65
11-Dec-24	10.80	21.20	10.70	10.40	12.48	5.20	5.17



รูปที่ 5 กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส การผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ และการผลิตพลังงานตามช่วงเวลา

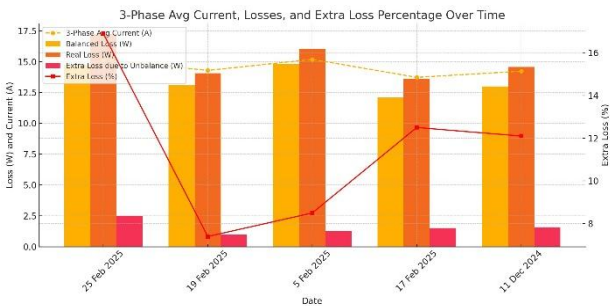
จากกราฟรูปที่ 5 พบว่า พฤติกรรมของกระแสไฟฟ้าจาก PV และโหลดในแต่ละเฟสมีแนวโน้มที่ผันผวน โดย PV Contribution Phase A มีการผันผวนระหว่าง 8–12A โดยสูงสุดที่ 12A (9 มกราคม 2568) ส่วน PV Contribution Phase C ค่อนข้างคงที่ที่ 8–10A บ่งชี้ถึงความเสถียรของระบบในเฟสนี้ ขณะที่ เฟส A มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 11–14A และ เฟส B ลดลงจาก 14A เหลือ 10–11A สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงการใช้ไฟที่เกิดขึ้น Utility Input A เริ่มต้นที่ 14A (23 ธันวาคม 2567) และลดลงเหลือ 10–11A สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของการผลิตจาก PV Energy Generation ลดลงจาก 16kWh เป็น 12kWh ในช่วงฤดูหนาว (ธันวาคม 2567–มกราคม 2568) ลดลง 25% สอดคล้องกับการลดลงของแสงแดด โดย PV Baseline คงที่ที่ 7A ซึ่งแสดงถึงระดับการผลิตขั้นต่ำ ระบบแสดงถึงการปรับลดการพึ่งพาพลังงานจาก Utility เมื่อ PV เพิ่มขึ้น โดยมีการกระจายโหลดอย่างสมดุลระหว่าง Load A และ Load B สรุปได้ว่า ระบบโซลาร์เซลล์มีศักยภาพการผลิตที่ดีในเฟส A และ C แม้ในฤดูหนาว และการลดการพึ่งพา Utility แสดงถึงการทำงานที่มีประสิทธิภาพของ Smart Load Management ในการจัดการพลังงานแบบไดนามิก

3.5 การคำนวณพลังงานสูญเสียและแรงดันตก (Energy Loss and Voltage Drop Analysis) ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าภายในอาคาร ได้ดำเนินการคำนวณค่าพลังงานสูญเสีย (Energy Loss) และ

แรงดันตก (Voltage Drop) ของสายส่งหลัก โดยใช้สายไฟชนิด CV (Copper Conductor, XLPE Insulated, PVC Sheathed, 0.6/1kV, 90°C) ขนาด 240mm² ซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance, R) เท่ากับ 0.0214Ω/km

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบการสูญเสียพลังงานระหว่างระบบสมดุลและไม่สมดุล (สาย CV 240mm²)

Date	Average Current (A)	Loss if Balanced (W)	Actual Loss (W)	Additional Loss Due to Imbalance (W)	Additional Loss (%)
25-Feb-25	15.17	14.76	17.25	2.49	16.90%
19-Feb-25	14.29	13.1	14.07	0.97	7.40%
5-Feb-25	15.19	14.8	16.05	1.25	8.50%
17-Feb-25	13.73	12.09	13.6	1.51	12.50%
11-Dec-24	14.23	13	14.58	1.58	12.10%



รูปที่ 6 กระแสเฉลี่ย 3 เฟส การสูญเสีย และเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพิเศษตามช่วงเวลา

จากกราฟรูปที่ 6 พบว่า ค่ากระแสเฉลี่ย 3 เฟสอยู่ในช่วง 13–15 แอมแปร์ โดยมีแนวโน้มคงที่ ส่วนค่าการสูญเสียจริงและค่าความไม่สมดุลของโหลดอยู่ในช่วง 3–4 กิโลวัตต์ ขณะที่ค่า Extra Loss % มีแนวโน้มลดลงจาก 15% เหลือประมาณ 11–12% แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาด้านความสมดุลของโหลดและลดการสูญเสียพลังงานจากความไม่สมดุลของระบบ ทั้งนี้ การควบคุมโหลดให้สมดุลระหว่างเฟสเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความมั่นคงของระบบไฟฟ้าโดยรวม

3.6 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ (Efficiency Evaluation) และ การประเมินผลประโยชน์ทางพลังงานและเศรษฐศาสตร์ (Energy and Economic Impact)

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบจำหน่ายและต้นทุนพลังงานที่สูญเสียประจำปี

Date	Total Distribution Power (kW)	Energy Loss (W)	Distribution Efficiency (%)	Annual Energy Loss (kWh)	Annual Energy Cost Loss (THB)*
25-Feb-25	68	17.25	99.83%	151.18	604.71
19-Feb-25	68	14.07	99.85%	123.28	493.12
5-Feb-25	68	16.05	99.84%	140.6	562.4
17-Feb-25	68	13.6	99.85%	119.07	476.3
11-Dec-24	67	14.58	99.84%	127.67	510.69



รูปที่ 7 การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การสูญเสีย ประสิทธิภาพ และตัววัดการสูญเสียรายปีตามช่วงเวลา

จากกราฟรูปที่ 7 พบว่า พลังงานที่ส่งจ่ายอยู่ในช่วง 13–14 กิโลวัตต์ ขณะที่การสูญเสียอยู่ระหว่าง 3–4 กิโลวัตต์ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพมีความผันแปร โดยวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2568 มีประสิทธิภาพต่ำสุดและพลังงานสูญเสียต่อปีสูงสุดที่ประมาณ 550 kWh หรือคิดเป็นต้นทุนราว 600 บาท/ปี สะท้อนถึงปัญหาการจัดการโหลดไม่เหมาะสม ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายโหลดไม่สมดุลหรืออุปกรณ์บางชนิด การจัดการโหลดอย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญต่อการลดการสูญเสียและเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในภาพรวม

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบการสูญเสียพลังงานก่อนและหลังการปรับสมดุลโหลด พร้อมการประเมินผลการประหยัดพลังงาน

Date	Power Loss Before Balancing (W)	Power Loss After Balancing (W)	Energy Saved (kWh/day)	Annual Electricity Cost Savings (THB)
25-Feb-25	17.25	14.76	0.06	87.35
11-Dec-24	14.58	13	0.038	55.48
17-Jan-25	13.04	11.83	0.029	42.34
9-Jan-25	12.31	11.29	0.025	36.5
21-Feb-25	12.36	10.69	0.04	58.4



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบการสูญเสียพลังงานก่อนและหลังการปรับสมดุล พร้อมการประหยัดพลังงานและต้นทุนรายปี

จากกราฟรูปที่ 8 พบว่า การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่สูญเสียก่อนและหลังการปรับสมดุลโหลด พร้อมค่าพลังงานที่ประหยัดได้ (kWh/day) และมูลค่าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท) ณ วันที่ 5 ช่วงเวลาสำคัญระหว่างเดือน ธันวาคม 2567 ถึง กุมภาพันธ์ 2568 ผลการวิเคราะห์พบว่า วันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2568 มีค่าพลังงานสูญเสียก่อนปรับสมดุล 17.25W และลดลง

เหลือ 14.76W หลังการปรับ ทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้ 0.06kWh/day และลดต้นทุนได้ 87.35 บาทต่อปี ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในชุดข้อมูลนี้ ขณะที่วันที่ 9 มกราคม 2568 มีการประหยัดต่ำที่สุดอยู่ที่ 0.025kWh/day หรือคิดเป็นต้นทุน 36.50 บาทต่อปี แนวโน้มโดยรวมสะท้อนให้เห็นว่าการปรับสมดุลโหลดมีผลชัดเจนในการลดการสูญเสียพลังงาน และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า พร้อมทั้งลดต้นทุนพลังงานในระยะยาวได้อย่างมีนัยสำคัญ

4. ผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าและการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ในอาคารเรียนช่วงอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย พบผลลัพธ์ที่น่าสนใจ เฟส B มีภาระโหลดเฉลี่ยสูงสุดที่ 12.05A ตลอดช่วง 3 เดือน และมีความแปรปรวน (SD) สูงถึง 5.73A ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะโหลดที่ไม่เสถียรและส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะในวันที่เกิดความไม่สมดุลสูงเกิน 40% หลายวัน เช่น 11 ธันวาคม 2567 (42.2%) และ 25 กุมภาพันธ์ 2568 (55.6%) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการวางแผนปรับโหลด การจำลองการถ่ายโอนโหลดจากเฟส B ไปยัง A และ C ช่วยลด %Unbalance ได้อย่างมีประสิทธิภาพจาก 55.6% เหลือเพียง 6.6–14.8% และปรับโหลดให้สมดุลขึ้นอย่างชัดเจน การใช้ระบบ PV Microinverter แบบเลือกเฟส ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสนับสนุนพลังงานได้เฉลี่ยวันละ 11–17kWh ลดภาระเฟส B ได้อย่างน่าทึ่ง การคำนวณพลังงานสูญเสียในสายเมนหลักแสดงให้เห็นว่า ระบบที่ไม่สมดุลมีการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้นถึง 12–17% เมื่อเทียบกับระบบที่ได้รับการจัดสมดุลแล้ว ซึ่งสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพการส่งจ่ายพลังงานในระบบสมดุลให้สูงถึง 99.85% พร้อมลดพลังงานสูญเสียได้กว่า 150 kWh/ปี หรือประมาณ 600 บาท/ปี อีกทั้งยังสะท้อนถึงประสิทธิภาพในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่ชัดเจน

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้พิสูจน์ว่า การวิเคราะห์และจัดการโหลดไฟฟ้าอย่างเป็นระบบสามารถลดภาระโหลดไม่สมดุล เพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายพลังงาน ลดแรงดันตกและพลังงานสูญเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนอย่างยั่งยืน โดยแนวทางที่เสนอ เช่น Smart Load Transfer, Digital Twin และ PV Targeting สอดคล้องกับวิสัยทัศน์ของอาคารเรียนแห่งอนาคต ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ได้แก่ การขยายการใช้ระบบ AI และ Digital Twin เพื่อควบคุมโหลดแบบ Real-time พร้อมพยากรณ์ฟีดแบ็ก การพัฒนา Dashboard วิเคราะห์โหลด 3 เฟส และการผนวกรวมระบบ PV กับ Load Balancer อัตโนมัติโดยใช้แนวคิด Phase-Switching เพื่อรองรับโหลดที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็ว หากนำแนวทางนี้ไปใช้กับอาคารเรียนอื่นของมหาวิทยาลัย 10 แห่ง จะสามารถลดพลังงานไฟฟ้าได้ราว 15,000 kWh/ปี และประหยัดค่าไฟได้ประมาณ 60,000 บาท/ปี ซึ่งเป็นก้าวสำคัญสู่การพัฒนา Smart Campus ที่ยั่งยืนทั้งด้านพลังงาน เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะกรรมการผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอขอบคุณทีมงานวิจัย คณาจารย์ บุคลากร และครอบครัวที่ให้การแนะนำและกำลังใจตลอดกระบวนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Khan, M. A. Khan, and A. U. Khan, "Three-Phase Load Balancing in Distribution Systems Using Load Sharing Technique," *Engineering Proceedings*, vol. 46, no. 1, p. 18, Sep. 2023.
- [2] A. A. Goudah, D. H. Schramm, M. El-Habrouk, and Y. G. Dessouky, "Smart Electric Grids Three-Phase Automatic Load Balancing Applications using Genetic Algorithms," *Renewable Energy and Sustainable Development*, vol. 6, no. 1, pp. 18–24, 2023.
- [3] G. Bao and S. Ke, "Load Transfer Device for Solving a Three-Phase Unbalance Problem Under a Low-Voltage Distribution Network," *Energies*, vol. 12, no. 15, p. 2842, Jul. 2019.
- [4] Y. Li and Y. Gong, "Design of Three Phase Load Unbalance Automatic Regulating System for Low Voltage Power Distribution Grids," *MATEC Web of Conferences*, vol. 173, p. 02040, 2018.
- [5] S. S. Sivaraju, J. Chitra, T. Anuradha, and A. Pandian, "An Intelligent Load Balancing Strategy for Energy Cost Minimization in EV Applications," *Electric Power Components and Systems*, vol. 52, no. 7, pp. 1200–1218, 2024.
- [6] A. Khan, "Load-balancing System for the Distribution Network Using a Load-sharing Approach," *International Journal of Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 45–50, 2023.
- [7] S. U. Haq, B. Arif, A. Khan, and J. Ahmed, "Automatic Three Phase Load Balancing System by Using Fast Switching Relay in Three Phase Distribution System," in *Proceedings of the 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG)*, 2018, pp. 1–6.



สิทธิศักดิ์ ไร่จະยะ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยรังสิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สนใจงานวิจัยด้านนวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ และเทคโนโลยี



สันติ การสันต์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สนใจงานวิจัยด้านการจัดการพลังงาน และเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า