

การเปรียบเทียบการใช้หม้อแปลงแบบรวมและแบบแยก ในระบบโซลาร์เซลล์สำหรับอาคารเดียวกัน

ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว¹ ศุภณัฐ อัยกัม^{2*} และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเลือกโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า ในอาคารที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเปรียบเทียบระหว่าง หม้อแปลงแบบรวม และหม้อแปลงแบบแยก ในอาคารทั่วไปการติดตั้งมีกรรมโหลดทั้งหมดผ่านหม้อแปลงเพียงลูกเดียว ทำให้เกิดความสูญเสียเพิ่มขึ้นและเพิ่มความเสี่ยงต่อความต่อเนื่องของระบบ การวิเคราะห์ ประกอบด้วย 1) การส่งผ่านพลังงาน 2) ความสูญเสียในสายและหม้อแปลง 3) ความต่อเนื่องของ โหลด และ 4) ต้นทุนระบบรวม โดยใช้การคำนวณตามหลักวิศวกรรมไฟฟ้า 3 สมการ ได้แก่ สมการ ประสิทธิภาพหม้อแปลง สมการกระแสและความสูญเสียในสาย และสมการประมาณต้นทุนระบบ ผลการศึกษาพบว่า หม้อแปลงแบบรวม ให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานและต้นทุนที่ดีกว่า ขณะที่ หม้อแปลงแบบแยก ให้ความต่อเนื่องของระบบสูงกว่า เหมาะกับอาคารที่มีโหลดสำคัญ เช่น โรงพยาบาลหรือศูนย์ข้อมูล นอกจากนี้ หม้อแปลงแบบแยกสามารถรองรับการติดตั้งระบบกักเก็บ พลังงานและระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะในอนาคตได้ดีกว่า เนื่องจากสามารถควบคุมทิศทาง พลังงานและแยกส่วนระบบได้อย่างอิสระ งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการเลือกใช้หม้อแปลง ให้เหมาะสมกับประเภทอาคาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน ลดความเสี่ยง และเตรียมความพร้อม สำหรับระบบพลังงานอัจฉริยะในอนาคต

คำสำคัญ: ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ หม้อแปลงไฟฟ้า ความสูญเสียพลังงาน
ความต่อเนื่องของโหลด ระบบสำรองพลังงาน

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

* ผู้ประสานงานหลัก e-mail: SUPANUT-OU@rmutp.ac.th

วันที่รับบทความ 10 ธันวาคม 2568

วันที่แก้ไขบทความ 26 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 28 ธันวาคม 2568

Comparison of Shared and Separate Transformer Designs in Building Solar PV Systems

Supawud Netpokaew¹ Supanut Ouikim^{2*} and Nattachote Rakthaicharoenchiep³

ABSTRACT

This study aimed to analyze the impact of transformer configuration on buildings equipped with solar photovoltaic (PV) systems by comparing two approaches: the shared transformer configuration and the separate transformer configuration. In many practical building installations, all electrical loads and PV generation are routed through a single transformer, which can result in increased energy losses and a higher risk of service interruption. The analysis focused on four key engineering aspects: 1) energy delivery to the load, 2) line and transformer loss analysis, 3) load continuity and system reliability, and 4) total system cost. The evaluation was conducted using fundamental electrical engineering principles, including the transformer efficiency equation, the current loss relationship in distribution lines, and a total system cost estimation model. The results indicated that the shared transformer configuration provided superior energy efficiency and lower overall system cost. While the separate transformer configuration ensured higher system continuity and reliability, making it more suitable for buildings with critical loads such as hospitals and data centers. Moreover, the separate transformer configuration provided greater flexibility for future integration of energy storage systems (ESS) and smart grid functionalities through independent power-flow

^{1,2,3} Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon (RMUTP), Thailand

* Corresponding author e-mail: SUPANUT-OU@rmutp.ac.th

Received: Dec 10, 2025

Revised: Dec 26, 2025

Accepted: Dec 28, 2025

control. Therefore, this study provided practical guidelines for selecting appropriate transformer configurations based on building type in order to enhance energy efficiency, reduce operational risk, and improve readiness for future intelligent energy systems.

Keywords: solar photovoltaic system, distribution transformer, energy losses, load continuity, backup power system.

บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (solar photovoltaic) ได้รับการติดตั้งอย่างแพร่หลายในอาคารประเภทต่าง ๆ ทั้งอาคารพาณิชย์ อาคารเรียน หน่วยงานราชการ และอาคารอุตสาหกรรม ด้วยเหตุผลด้านการประหยัดพลังงานและการลดการพึ่งพาโครงข่ายไฟฟ้าจากภายนอก อย่างไรก็ตาม การเชื่อมต่อระบบโซลาร์เซลล์เข้ากับระบบไฟฟ้าภายในอาคารจำเป็นต้องออกแบบให้มีความเหมาะสม โดยเฉพาะในส่วนของ หม้อแปลงไฟฟ้า (distribution transformer) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการรับจ่ายพลังงานระหว่างโครงข่าย การไฟฟ้า ระบบโซลาร์ และโหลดภายในอาคาร จากการสำรวจปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในหลายอาคาร พบว่าอาคารส่วนใหญ่ยังใช้ หม้อแปลงแบบร่วม (shared transformer) เพียงลูกเดียวรองรับทั้งโหลดปกติและพลังงานจากโซลาร์ ทำให้เกิดข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความสูญเสียในสายเพิ่มขึ้น การไหลย้อนพลังงานที่ควบคุมได้ยาก และมีจุดเสี่ยงเพียงจุดเดียวที่อาจทำให้โหลดทั้งหมดดับลงเมื่อหม้อแปลงขัดข้อง นอกจากนี้ อาคารที่มีความสำคัญสูง เช่น ศูนย์ข้อมูล โรงพยาบาล หรืออาคารที่ต้องการความต่อเนื่องของระบบไฟฟ้า ยังจำเป็นต้องมีโครงสร้างระบบที่รองรับการแยกภาระโหลดเพื่อเพิ่มความมั่นคงของระบบในทางวิศวกรรม การเพิ่มหม้อแปลงอีกหนึ่งลูกเพื่อแยกภาระโหลดของระบบโซลาร์ออกจากโหลดปกติ หรือที่เรียกว่า หม้อแปลงแบบแยก (separate transformer) เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มความต่อเนื่องของระบบ และสนับสนุนการขยายไปสู่ระบบกักเก็บพลังงาน (energy storage system) หรือระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (smart grid) ในอนาคตได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยเชิงเปรียบเทียบที่ชัดเจนสำหรับอาคารเดี่ยวที่ใช้พลังงานจริงในสภาวะการใช้งานปกติ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างหม้อแปลงแบบร่วม และหม้อแปลงแบบแยก ในอาคารหลังเดียวกัน โดยวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงวิศวกรรม 4 ด้าน ได้แก่ 1) การส่งผ่านพลังงาน (energy delivery) 2) ความสูญเสียในสายและหม้อแปลง (loss analysis) 3) ความต่อเนื่องของโหลด (continuity /reliability) และ 4) ต้นทุนรวมของระบบ (total cost) ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ จะช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเลือกโครงสร้างระบบหม้อแปลงที่เหมาะสมกับประเภทอาคาร เพิ่มประสิทธิภาพ

การใช้พลังงาน ลดความเสี่ยงเชิงระบบ และเตรียมความพร้อมสำหรับการเปลี่ยนผ่านไปสู่ระบบพลังงานอัจฉริยะและอาคารซึ่งสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าสุทธิภายในอาคารเป็นศูนย์ (net zero energy building) ในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ใช้การคำนวณเชิงทฤษฎี (analytical approach) เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างระบบหม้อแปลงสองแบบ ได้แก่ 1) ระบบหม้อแปลงรวม และ 2) ระบบหม้อแปลงแยก สำหรับอาคารสำนักงานขนาดกลางที่ติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์บนหลังคา โดยดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. สมมติฐานและพารามิเตอร์หลัก

กำหนดให้กรณีศึกษาเป็นอาคารสำนักงานขนาดกลางที่มีโหลดไฟฟ้าเฉลี่ย 10,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน แบ่งการจ่ายพลังงานจากระบบโซลาร์เซลล์และการไฟฟ้าในอัตรา 50:50 หรือแหล่งละ 5,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน ขนาดหม้อแปลงในช่วง 250–315 กิโลโวลต์-แอมแปร์ ซึ่งพบได้ทั่วไปในอาคารราชการและอาคารพาณิชย์ ค่าพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าฐานสำหรับคำนวณพลังงานที่ส่งถึงโหลด ความสูญเสียในสาย และต้นทุนระบบเบื้องต้นของหม้อแปลงทั้งสองรูปแบบ

รายการ	ค่า	หน่วย
โหลดเฉลี่ยของอาคาร	10,000	กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน
พลังงานจากโซลาร์เซลล์	5,000	กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน
พลังงานจากการไฟฟ้า	5,000	กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน
ขนาดหม้อแปลง	250–315	กิโลโวลต์-แอมแปร์
ประสิทธิภาพหม้อแปลง ($\eta_{\text{Transformer}}$)	ร้อยละ 98	—
ประสิทธิภาพสายส่ง (η_{line})	ร้อยละ 97 (แบบรวม) ร้อยละ 94 (แบบแยก)	—
ระยะสายส่ง (เฉพาะระบบแยก)	30	เมตร

รายการ	ค่า	หน่วย
ความต้านทานสายส่ง (R line)	0.15	Ω
ตัวประกอบกำลัง (power factor, pf)	0.95	–
reliability index (SAIFI/SAIDI)	ใช้ค่าเปรียบเทียบกับเชิงคุณภาพ	–

นอกจากการกำหนดค่าโหลดเฉลี่ยรายเดือนเพื่อใช้เป็นฐานการคำนวณ งานวิจัยนี้ได้กำหนดโปรไฟล์โหลดรายวัน (daily load profile) ของอาคารกรณีศึกษาเพื่อสะท้อนรูปแบบการใช้งานจริง โดยแบ่งช่วงเวลาเป็น off-peak และ peak ตามลักษณะอาคารสำนักงาน โดยช่วงทำงาน 09:00–16:00 น. เป็นช่วง peak ทั้งนี้โปรไฟล์โหลดดังกล่าวใช้ประกอบการตีความผลลัพธ์ด้านความสูญเสียและความต่อเนื่องของโหลด รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 โปรไฟล์โหลดรายวันของอาคารกรณีศึกษา (peak/off-peak)

ช่วงเวลา	ลักษณะการใช้งานอาคาร	สัดส่วน พลังงานต่อวัน (ร้อยละ)	พลังงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อวัน)	กำลังเฉลี่ย (กิโลวัตต์)
00:00–06:00 น.	โหลดพื้นฐาน (ระบบรักษาความปลอดภัย/ แสงสว่างบางส่วน)	15	50.0	8.3
06:00–09:00 น.	เริ่มทำงาน/ระบบปรับ อากาศเริ่มทำงาน	15	50.0	16.7
09:00–16:00 น.	ช่วง peak (ทำงานเต็มรูปแบบ)	45	150.0	21.4
16:00–20:00 น.	ช่วงเลิกงาน/โหลดลดลงแต่ ยังมีแอร์บางส่วน	20	66.7	16.7
20:00–24:00 น.	โหลดพื้นฐาน (ปิดพื้นที่ส่วนใหญ่)	5	16.7	4.2
รวม	–	100	333.3	–

คำนวณจาก 10,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน $\approx$ 333.3 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อวัน (สมมติ 30 วันต่อเดือน) กำลังเฉลี่ย $\approx$ พลังงานช่วงนั้น (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) ต่อจำนวนชั่วโมง

2. การออกแบบระบบโซลาร์เซลล์

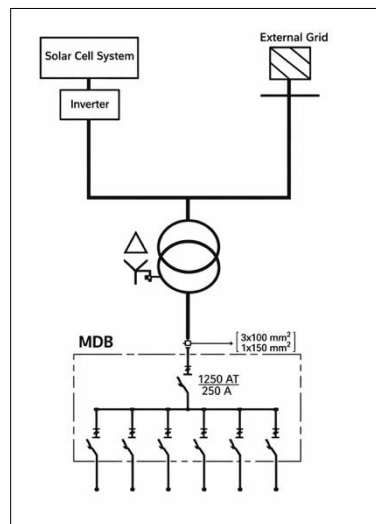
กำหนดให้ระบบโซลาร์เซลล์มีขนาดผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 5,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน ติดตั้งแบบเชื่อมต่อกับระบบ (grid-connected) ใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีประสิทธิภาพร้อยละ 96 และเชื่อมต่อเข้าระบบไฟฟ้าภายในอาคารผ่านตู้เมนจ่ายไฟหลักสำหรับการออกแบบระบบโซลาร์ ยึดตามหลักเกณฑ์มาตรฐานสากล (Masters, 2013) และมาตรฐานการเชื่อมต่อแหล่งผลิตกระจาย ระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่าย (IEEE, 2018)

3. โครงสร้างการเชื่อมต่อหม้อแปลง

การเชื่อมต่อระหว่างระบบโซลาร์ การไฟฟ้า และโหลดภายในอาคาร แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง ดังนี้

3.1 ระบบหม้อแปลงรวม

ระบบนี้ใช้หม้อแปลงเพียงลูกเดียวในการรับพลังงานจากการไฟฟ้าและโซลาร์ก่อนจ่ายเข้าสู่ตู้เมนจ่ายไฟหลักของอาคาร ทำให้โครงสร้างระบบเรียบง่ายและมีต้นทุนเริ่มต้นต่ำ แต่มีจุดล้มเหลวเดียว (single point of failure) แผนผังสายเดียวของระบบหม้อแปลงรวม แสดงในรูปที่ 1

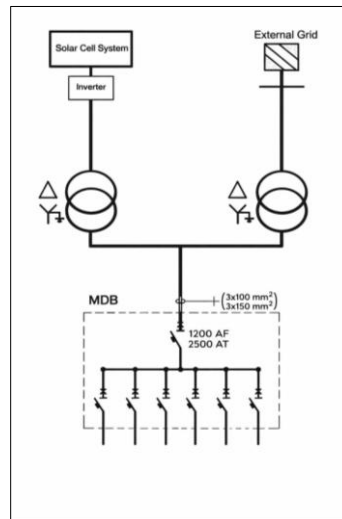


รูปที่ 1 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบหม้อแปลงรวม

3.2 ระบบหม้อแปลงแยก

ระบบนี้แยกหม้อแปลงของโซลาร์เซลล์ออกจากหม้อแปลงของการไฟฟ้า โดยทั้งสองส่วนรวมเข้าที่ตู้เมนจ่ายไฟหลักของอาคารในภายหลัง ข้อดีคือสามารถแยกโซนโหลดและสลับจ่ายบางส่วนได้เมื่อเกิดความขัดข้อง ทำให้ความต่อเนื่องของระบบสูงขึ้น รองรับการต่อระบบกักเก็บ

พลังงานหรือระบบ smart grid ในอนาคตได้ง่าย แผนผังสายเดี่ยวของระบบหม้อแปลงแยกแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบหม้อแปลงแยก

4. สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์

กำหนดสมการหลัก 3 สมการ สำหรับคำนวณพลังงานที่ส่งถึงโหลด ความสูญเสียในสาย และต้นทุนระบบ ดังนี้

$$E_{delivered} = P_{source} \times \eta_{Transformer} \times \eta_{line} \quad (1)$$

$$P_{loss} = I^2 \times R_{line} \quad (2)$$

$$Cost_{total} = C_{tr} + C_{PV} + C_{cable} + C_{control} + C_{install} \quad (3)$$

โดยที่

P_{source}	คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากแหล่งกำเนิด (โซลาร์/การไฟฟ้า)
$\eta_{Transformer}$	คือ ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลง
η_{line}	คือ ค่าประสิทธิภาพสายส่ง
I	คือ กระแสไฟฟ้า (A)

R_{line}	คือ ความต้านทานสาย (Ω)
C_{tr}	คือ ต้นทุนหม้อแปลง
C_{pv}	คือ ต้นทุนระบบโซลาร์
C_{cable}	คือ ต้นทุนสายไฟ
$C_{control}$	คือ ต้นทุนอุปกรณ์ควบคุม
$C_{install}$	คือ ต้นทุนค่าติดตั้ง

จากสมการ (1)–(3) สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งด้านประสิทธิภาพพลังงาน ความสูญเสีย และต้นทุนของแต่ละโครงสร้างหม้อแปลง เพื่อเปรียบเทียบเชิงวิศวกรรมอย่างเป็นระบบ

5. การพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติม

เพื่อให้การวิเคราะห์ครอบคลุมมากขึ้น งานวิจัยนี้ได้พิจารณาพารามิเตอร์เสริม 3 รายการ ได้แก่ ประสิทธิภาพหม้อแปลง ตัวประกอบกำลัง และความเชื่อถือได้ของระบบ (SAIFI/SAIDI) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 ประสิทธิภาพหม้อแปลง (transformer efficiency)

กำหนดค่าฐานของประสิทธิภาพหม้อแปลงเป็น $\eta_{Transformer}$ เท่ากับร้อยละ 98 ทั้งสำหรับระบบหม้อแปลงรวมและระบบหม้อแปลงแยก จากนั้นทำการทดสอบความไว (sensitivity analysis) ในช่วงร้อยละ 97–99 เพื่อตรวจสอบผลกระทบต่อพลังงานที่ส่งถึงโหลด $E_{delivered}$ ตามสมการ (1)

5.2 ตัวประกอบกำลัง

ใช้ความสัมพันธ์ของระบบสามเฟสในการคำนวณกระแสไลน์เพื่อนำไปประเมินความสูญเสียในสาย ตามสมการ (2) โดยกำหนด

$$S = \sqrt{3} V_{LL} I_{line}, P = S \cdot pf \quad (4)$$

และ

$$I_{line} = \frac{P}{\sqrt{3} V_{LL} pf} \quad (5)$$

จากนั้นคำนวณความสูญเสียในสายด้วย

$$P_{loss} = I_{line}^2 R_{line} \quad (6)$$

ในกรณีฐานกำหนด $pf = 0.95$ และอภิปรายผลเพิ่มเติมเมื่อ pf ลดลง

5.3 วิธีประเมินความเชื่อถือได้ (reliability assessment: SAIFI/SAIDI)

การประเมินความเชื่อถือได้ในงานวิจัยนี้ใช้ดัชนีมาตรฐาน 2 รายการ ได้แก่ จำนวนครั้งเฉลี่ยที่เกิดไฟดับต่อปี (system average interruption frequency index, SAIFI) และระยะเวลาไฟดับรวมเฉลี่ยต่อปี (system average interruption duration index, SAIDI) เพื่อใช้เปรียบเทียบแนวโน้มความต่อเนื่องของโหลดระหว่างโครงสร้างหม้อแปลงแบบรวมและแบบแยก อย่างไรก็ตามเนื่องจากงานวิจัยนี้ ไม่ได้ใช้สถิติไฟดับภาคสนามจากอาคารจริง จึงกำหนดค่า SAIFI/SAIDI แบบการประเมินเชิงสถานการณ์ (scenario-based estimation) เพื่อใช้เปรียบเทียบในระดับการออกแบบเบื้องต้น โดยยึดหลักว่า ระบบหม้อแปลงร่วมมีลักษณะเป็นจุดล้มเหลวเดี่ยวส่งผลให้ความถี่และระยะเวลาไฟดับที่กระทบโหลดรวมมีแนวโน้มสูงกว่า ระบบหม้อแปลงแยกสามารถแยกโซน/สลับจ่ายโหลดสำคัญได้บางส่วน จึงมีแนวโน้มลดความถี่และระยะเวลาไฟดับโดยเฉลี่ย ค่าประเมินเชิงเปรียบเทียบแสดงใน ตารางที่ 3 ค่าตัวชี้วัดเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ประกอบการให้คะแนนเชิงคุณภาพในหัวข้อผลการวิจัย

ตารางที่ 3 ค่าประเมิน SAIFI/SAIDI ของระบบหม้อแปลงร่วมและแยก

ระบบ	SAIFI (ครั้งต่อปี)	SAIDI (ชั่วโมงต่อปี)	หมายเหตุ
หม้อแปลงร่วม	2.5	10	จุดล้มเหลวเดี่ยว กระทบโหลดทั้งหมด
หม้อแปลงแยก	1.0	4	แยกโซน/สลับจ่ายโหลด สำคัญได้บางส่วน

6. การตรวจสอบความสอดคล้องด้วยการจำลอง (simulation validation)

เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความสอดคล้องของผลลัพธ์ (validation) โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงวิเคราะห์ (analytical results) กับผลที่ได้จากการแทนพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าในระดับโครงสร้าง (system-level representation) ซึ่งเป็นแนวทางที่ใช้กันทั่วไปในการศึกษาระบบจ่ายไฟฟ้าในอาคารที่มีการบูรณาการระบบโซลาร์เซลล์

6.1 เครื่องมือและแนวคิดการจำลองระบบ

การตรวจสอบความสอดคล้องอาศัยแนวคิดของแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า (power distribution system model) ที่ใช้ในซอฟต์แวร์ด้านระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น MATLAB/Simulink

(Simscape electrical) หรือ ETAP โดยในงานวิจัยนี้ใช้การแทนค่าพารามิเตอร์เชิงวิศวกรรม เพื่อสะท้อนพฤติกรรมของระบบจริง แทนการจำลองเชิงเวลาละเอียด (time-domain simulation)

6.2 โครงสร้างแบบจำลองระบบ แบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา ได้แก่

1) ระบบหม้อแปลงรวม ระบบโซลาร์เซลล์และแหล่งจ่ายจากการไฟฟ้าถูกเชื่อมต่อผ่านหม้อแปลงไฟฟ้ารวมเพียงลูกเดียว ก่อนจ่ายเข้าสู่โหลดทั้งหมดของอาคาร

2) ระบบหม้อแปลงแยก ระบบโซลาร์เซลล์และระบบการไฟฟ้าใช้หม้อแปลงแยกกัน และเชื่อมรวมที่ตู้เมนจ่ายไฟหลักทำให้สามารถแยกโซนโหลดและควบคุมการไหลของพลังงานได้อย่างอิสระ โครงสร้างทั้งสองแบบสอดคล้องกับไดอะแกรมเส้นเดียวที่ แสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2

6.3 พารามิเตอร์หลักในการจำลอง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องกำหนดให้สอดคล้องกับสมมติฐานในส่วนการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี (ตารางที่ 1) ได้แก่

- 1) โหลดเฉลี่ยของอาคาร: 10,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน
- 2) พลังงานจากโซลาร์เซลล์: 5,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน
- 3) ประสิทธิภาพหม้อแปลง: ร้อยละ 98
- 4) ประสิทธิภาพสายส่ง
 - ระบบหม้อแปลงรวม: ร้อยละ 97
 - ระบบหม้อแปลงแยก: ร้อยละ 94
- 5) ตัวประกอบกำลัง 0.95

6.4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงวิเคราะห์กับผลการจำลอง

ผลการตรวจสอบพบว่า แนวโน้มของพลังงานที่ส่งถึงโหลดและพลังงานสูญเสียของทั้งสองโครงสร้างมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณเชิงทฤษฎี โดยระบบหม้อแปลงรวมให้พลังงานถึงโหลดสูงกว่าเล็กน้อย ขณะที่ระบบหม้อแปลงแยกมีความสูญเสียรวมสูงกว่า เนื่องจากระยะสายส่งและจำนวนอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณเชิงวิเคราะห์และการแทนแบบจำลองเชิงระบบ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงวิเคราะห์กับแบบจำลองเชิงวิเคราะห์

รายการวิเคราะห์	การคำนวณเชิงวิเคราะห์	แบบจำลองเชิงวิเคราะห์	ค่าคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)
พลังงานถึงโหลด – ระบบหม้อแปลงรวม (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน)	9,900	9,750	-1.5
พลังงานถึงโหลด – ระบบหม้อแปลงแยก (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน)	9,600	9,400	-2.1
พลังงานสูญเสีย – ระบบหม้อแปลงรวม (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน)	100	120	+2.0
พลังงานสูญเสีย – ระบบหม้อแปลงแยก (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน)	400	420	+5.0

จากตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณเชิงวิเคราะห์ และผลจากการแทนแบบจำลองเชิงระบบ ซึ่งพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ ± 5 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงวิเคราะห์สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้อย่างเหมาะสม ในระดับการออกแบบเบื้องต้น

6.5 การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ (sensitivity analysis)

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี จึงได้ทำการทดสอบความไวของพารามิเตอร์หลัก เพื่อประเมินความคงทนของผลลัพธ์ โดยพิจารณา 2 กรณีสมมติ ได้แก่

กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพหม้อแปลงลดลงจากร้อยละ 98 เป็นร้อยละ 97

กรณีที่ 2 ตัวประกอบกำลังลดลงจาก 0.95 เป็น 0.90

ผลการวิเคราะห์พบว่า ระบบหม้อแปลงแยกมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์มากกว่าระบบหม้อแปลงรวมในด้านพลังงานสูญเสีย ขณะที่ระบบหม้อแปลงรวมได้รับผลกระทบมากกว่าในด้านความต่อเนื่องของโหลดเมื่อเกิดเหตุขัดข้อง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันของแต่ละโครงสร้าง

6.6 ข้อจำกัดของการศึกษา (limitations)

การศึกษานี้ใช้การคำนวณเชิงทฤษฎีและการแทนค่าพารามิเตอร์ในระดับระบบ โดยไม่ได้ทำการจำลองเชิงเวลาจริง (time-series simulation) หรือใช้ข้อมูลโหลดภาคสนามจากอาคารจริง ดังนั้น ผลลัพธ์จึงเหมาะสำหรับการเปรียบเทียบเชิงแนวโน้มและการออกแบบเบื้องต้น งานวิจัยในอนาคตควรนำข้อมูลโหลดจริงและการจำลองเชิงเวลาเข้ามาใช้ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและสะท้อนพฤติกรรมการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิเคราะห์เปรียบเทียบระบบหม้อแปลงร่วมและหม้อแปลงแยก ทำภายใต้สมมติฐานว่าอาคารมีโหลดเฉลี่ย 10,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน โดยพิจารณา 4 ประเด็นหลัก ได้แก่ การกระจายพลังงาน ความสูญเสีย ความต่อเนื่องของโหลด และต้นทุนเบื้องต้น

1. การกระจายพลังงาน

จากสมการ (1) เมื่อกำหนดพลังงานจากโซลาร์และการไฟฟ้าแหล่งละ 5,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน พบว่า

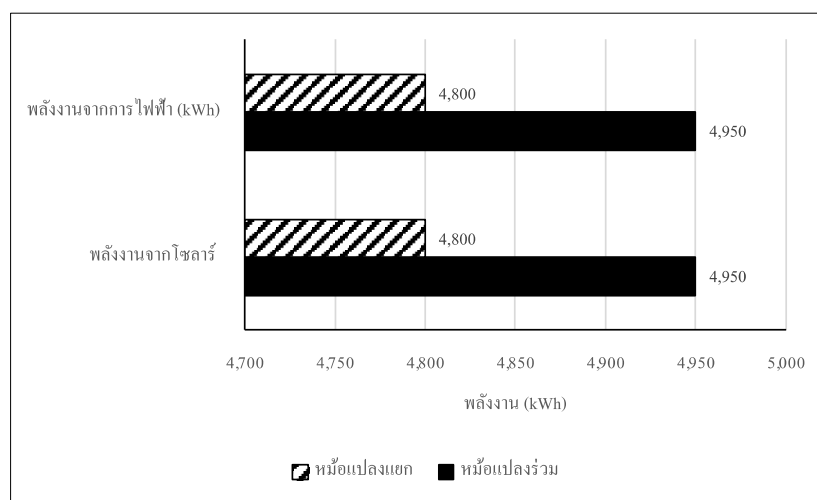
- ระบบหม้อแปลงร่วม มีค่าการสูญเสียรวมประมาณร้อยละ 1 ทำให้พลังงานถึงโหลดจริง 4,950 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จากแต่ละแหล่ง หรือรวม 9,900 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน

- ระบบหม้อแปลงแยก มีค่าการสูญเสียรวมประมาณร้อยละ 4 ทำให้พลังงานถึงโหลดจริง 4,800 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จากแต่ละแหล่งหรือรวม 9,600 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน

ผลการคำนวณแสดงใน ตารางที่ 5 และ รูปที่ 3

ตารางที่ 5 การกระจายพลังงานจากโซลาร์และการไฟฟ้าของระบบหม้อแปลงร่วมและแยก

ระบบ	พลังงานจากโซลาร์ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	พลังงานจากการไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	รวมพลังงานถึงโหลด (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
หม้อแปลงร่วม	4,950	4,950	9,900
หม้อแปลงแยก	4,800	4,800	9,600



รูปที่ 3 กราฟสัดส่วนพลังงาน Solar/Grid ที่ถึงโหลดจริง

จากตารางที่ 3 และรูปที่ 3 จะเห็นว่าระบบหม้อแปลงรวมมีพลังงานถึงโหลดสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างสายส่งสั้นกว่าและมีจุดสูญเสียน้อยกว่า

2. พลังงานสูญเสียในระบบ

การประเมินความสูญเสียใช้สมการ (2) ร่วมกับค่ากระแสและความต้านทานสายส่ง จากตารางที่ 1 พบว่าระบบหม้อแปลงรวม มีพลังงานสูญเสียรวมประมาณ 100 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน หรือคิดเป็น ร้อยละ 1 ของพลังงานต้นทาง ระบบหม้อแปลงแยก มีพลังงานสูญเสียรวมประมาณ 400 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน หรือร้อยละ 4 ของพลังงานต้นทาง ผลการเปรียบเทียบแสดงใน ตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบพลังงานสูญเสียของระบบหม้อแปลงรวมและหม้อแปลงแยก

ระบบ	พลังงานรวมจากต้นทาง (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (ร้อยละ)
หม้อแปลงรวม	10,000	ร้อยละ 1	100
หม้อแปลงแยก	10,000	ร้อยละ 4	400

จากตารางที่ 6 สรุปได้ว่าระบบหม้อแปลงแยกมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงกว่าระบบหม้อแปลงรวม ประมาณ 300 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน หรือเพิ่มขึ้นราว 3 เท่า เนื่องจากระยะสายส่งยาวขึ้น และมีจำนวนอุปกรณ์มากกว่า ส่งผลให้ต้องพิจารณาการเลือกขนาดสายและการจัดวางอุปกรณ์อย่างรอบคอบเพื่อลดการสูญเสีย

3. ความต่อเนื่องของโหลดและความเชื่อถือได้

ในมิติของความต่อเนื่องของโหลด ระบบหม้อแปลงรวมมีลักษณะเป็นจุดล้มเหลวเดียว หากหม้อแปลงหรืออุปกรณ์สำคัญขัดข้อง โหลดทั้งหมดของอาคารจะได้รับผลกระทบทันที ขณะที่ระบบหม้อแปลงแยกสามารถแยกโซนจ่ายไฟและสลับโหลดสำคัญไปใช้จากอีกหม้อแปลงหนึ่งได้ การประเมินเชิงคุณภาพของความต่อเนื่อง แสดงใน ตารางที่ 7 ส่วนค่าตัวชี้วัด SAIFI/SAIDI ตามสมมติฐาน ในตารางที่ 3 สามารถสรุปรวมเป็นระดับความเชื่อถือได้ดังแสดงใน ตารางที่ 8

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพด้านความต่อเนื่องของโหลด

ระบบ	คะแนนความต่อเนื่อง	จำนวนแหล่งจ่ายที่ใช้ได้	ความสามารถในการสลับโหลด	ความเสี่ยงระดับทั้งหมด	ความต่อเนื่องของโหลด
หม้อแปลงรวม	2	2 (โซลาร์ + การไฟฟ้า)	ไม่มี (ใช้ร่วมกัน)	สูง	ปานกลาง
หม้อแปลงแยก	3	2 ต่อ 2 (แยกโซลาร์ + การไฟฟ้า/โหลด)	มี (แยกอิสระ)	ต่ำ	สูง

ตารางที่ 8 ดัชนีความเชื่อถือได้ (SAIFI และ SAIDI) ของระบบหม้อแปลงรวมและแยก

ระบบ	SAIFI (ครั้งต่อปี)	SAIDI (ชั่วโมงต่อปี)	ระดับความเชื่อถือได้
หม้อแปลงรวม	2.5	10	ปานกลาง
หม้อแปลงแยก	1.0	4	สูง

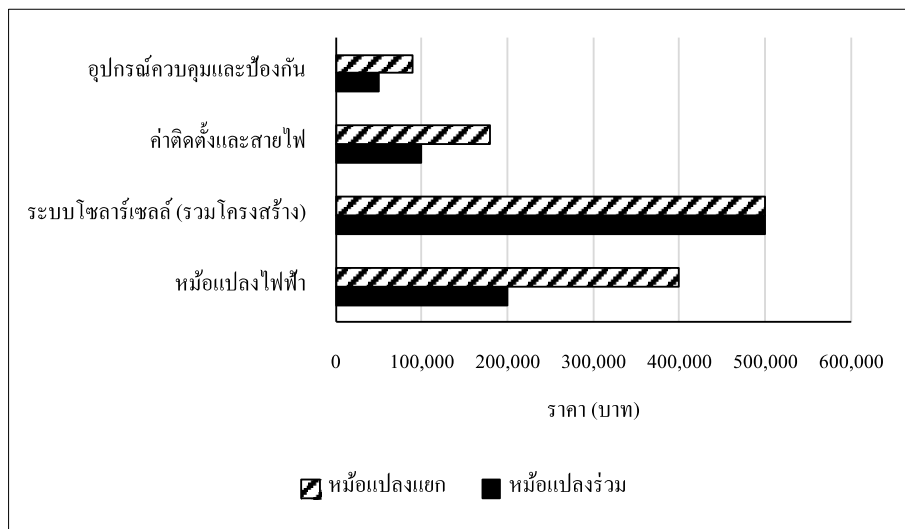
ผลการประเมินชี้ว่า ระบบหม้อแปลงแยกมีค่า SAIFI และ SAIDI ต่ำกว่าระบบหม้อแปลงรวมอย่างมีนัยสำคัญเชิงวิศวกรรม สะท้อนถึงโอกาสเกิดเหตุไฟดับและระยะเวลาที่ลูกค้าได้รับผลกระทบที่น้อยกว่า จึงเหมาะสำหรับอาคารที่มีโหลดสำคัญ เช่น โรงพยาบาลหรือศูนย์ข้อมูล

4. การประเมินต้นทุนระบบ

การประเมินต้นทุนใช้สมการ (3) โดยกำหนดราคาประมาณการของหม้อแปลง ระบบโซลาร์สายไฟ อุปกรณ์ควบคุม และค่าติดตั้ง พบว่า ระบบหม้อแปลงรวม มีต้นทุนรวมประมาณ 850,000 บาท ในขณะที่ระบบหม้อแปลงแยก มีต้นทุนรวมประมาณ 1,170,000 บาท หรือสูงกว่าประมาณร้อยละ 37.6 รายละเอียดแสดงใน ตารางที่ 9 และรูปที่ 4 แม้ว่าระบบหม้อแปลงแยกจะมีต้นทุนสูงกว่า แต่แลกกับความยืดหยุ่นและความต่อเนื่องที่สูงขึ้น ซึ่งอาจคุ้มค่าหากอาคารมีโหลดวิกฤตหรือมีแผนขยายระบบในอนาคต

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบต้นทุนเบื้องต้นของระบบหม้อแปลงรวมและหม้อแปลงแยก

รายการต้นทุน	หม้อแปลงรวม (บาท)	หม้อแปลงแยก (บาท)
หม้อแปลงไฟฟ้า	200,000	400,000
ระบบโซลาร์เซลล์ (รวมโครงสร้าง)	500,000	500,000
ค่าติดตั้งและสายไฟ	100,000	180,000
อุปกรณ์ควบคุมและป้องกัน	50,000	90,000
รวมต้นทุนทั้งหมด	850,000	1,170,000



รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบต้นทุนรวมของระบบทั้งสองแบบ

5. การสรุปภาพรวมเชิงคะแนน

เพื่อให้เห็นภาพรวมอย่างชัดเจน ได้ทำการ normalize ตัวชี้วัดหลักให้อยู่ในช่วง 0-5 โดยค่า ยิ่ง “ดี” ยิ่งได้คะแนนสูง (เช่น พลังงานถึงโหลดมาก ต้นทุนต่ำ) ผลการให้คะแนนสรุปในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 สรุปคะแนนเปรียบเทียบระบบหม้อแปลง (normalized 0-5)

หัวข้อประเมิน	หม้อแปลงรวม (0-5)	หม้อแปลงแยก (0-5)
พลังงานถึงโหลด	4.9	4.6
ความสูญเสียพลังงาน	4.9	3.0
ความต่อเนื่องของโหลด	2.0	5.0

หัวข้อประเมิน	หม้อแปลงรวม (0-5)	หม้อแปลงแยก (0-5)
ความยืดหยุ่นในการใช้งาน	2.0	4.5
ต้นทุนรวมของระบบ	5.0	2.5

จากตารางที่ 10 พบว่า ระบบหม้อแปลงรวมได้คะแนนสูงด้านพลังงานถึงโหลด ความสูญเสียต่ำ และต้นทุนรวม ระบบหม้อแปลงแยกได้คะแนนสูงด้านความต่อเนื่องของโหลดและความยืดหยุ่นในการใช้งาน หากจัดทำตารางสรุปสุดท้ายสำหรับผู้ออกแบบ แสดงในตารางที่ 11 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า “ระบบรวมเด่นด้านพลังงาน-ต้นทุน ส่วนระบบแยกเด่นด้านความต่อเนื่อง-ความยืดหยุ่น”

ตารางที่ 11 ตารางสรุปเปรียบเทียบเชิงคุณภาพระหว่างหม้อแปลงรวมและหม้อแปลงแยก

ด้านการประเมิน	หม้อแปลงรวม	หม้อแปลงแยก
พลังงานถึงโหลด	สูง (9,900 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน)	ปานกลาง (9,600 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน)
ความสูญเสียพลังงาน	ต่ำ (ร้อยละ 1 ~ 100 กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	สูง (ร้อยละ 4 ~ 400 กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

การศึกษาความเหมาะสมของโครงสร้างหม้อแปลงในอาคารที่ติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์พบว่า อาคารที่ใช้หม้อแปลงเพียงลูกเดียวมักประสบปัญหาความสูญเสียสะสมในระบบ และมีความเสี่ยงต่อความต่อเนื่องของการจ่ายไฟ โดยเฉพาะในช่วงที่มีการจ่ายพลังงานจากทั้งระบบการไฟฟ้าและระบบโซลาร์เซลล์พร้อมกัน ผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า โครงสร้างหม้อแปลงแบบรวมและแบบแยกมีลักษณะการตอบสนองที่แตกต่างกันตามประเภทของโหลด และลักษณะการใช้งานของอาคาร ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างระบบโซลาร์เซลล์และหม้อแปลงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าอาคารที่รายงานโดย Yang, Wen & Wang (2022) และ Masters (2013) ที่เน้นให้พิจารณาภาพรวมของโครงสร้างระบบมากกว่าการประเมินต้นทุนเพียงอย่างเดียว

ผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีพบว่า ระบบหม้อแปลงแบบรวมมีความสูญเสียโดยรวมต่ำกว่า เนื่องจากมีจำนวนอุปกรณ์และระยะสายส่งที่สั้นกว่า ส่งผลให้พลังงานที่ส่งถึงโหลดสูงกว่า (ประมาณ 9,900 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน) เมื่อเทียบกับระบบหม้อแปลงแบบแยก (ประมาณ 9,600 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน) ซึ่งมีความสูญเสียในสายเพิ่มขึ้นราว 3 เท่า ทั้งนี้ความแตกต่างดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของความสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังตามสมการ $P_{loss} = I^2 R$ ซึ่งเป็นหลักการ

พื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Masters, 2013; Iqbal, 2022)

แม้ว่าระบบหม้อแปลงแบบแยกจะมีประสิทธิภาพด้านพลังงานต่ำกว่า แต่มีจุดเด่นด้านความเชื่อถือได้ของระบบ โดยสามารถแยกโซนโหลดสำคัญและลดผลกระทบจากเหตุขัดข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับผลการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการบูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์และหม้อแปลงหลายชุด ซึ่งรายงานว่าการแยกโครงสร้างหม้อแปลงช่วยลดความถี่และระยะเวลาการดับไฟของโหลดสำคัญได้อย่างมีนัยสำคัญ (Lee & Lee, 2023)

เมื่อพิจารณาการใช้งานในสถานการณ์จริง ผู้ใช้อาคารและผู้ดูแลระบบให้ความสำคัญทั้งด้านความมั่นคงของระบบและต้นทุนการติดตั้ง โดยอาคารทั่วไปมักให้ความสำคัญกับต้นทุนเริ่มต้นต่ำและความเรียบง่ายในการดูแลรักษา จึงเหมาะสมกับระบบหม้อแปลงแบบรวม ขณะที่อาคารที่มีโหลดสำคัญ เช่น ศูนย์ข้อมูล ห้องเซิร์ฟเวอร์ หรือโรงพยาบาล ให้ความสำคัญกับความต่อเนื่องของระบบเป็นหลัก จึงเหมาะสมกับระบบหม้อแปลงแบบแยก ทั้งนี้แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยด้านการออกแบบหม้อแปลงสำหรับระบบไฟฟ้าอัจฉริยะที่มีสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนสูง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการแยกโครงสร้างหม้อแปลงช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและรองรับการขยายระบบในอนาคตได้ดีกว่า (Li, Zhang & Wu, 2024)

6. ข้อเสนอแนะเชิงพาณิชย์และการนำไปใช้จริง

จากผลการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปต่อยอดสู่การตัดสินใจเชิงพาณิชย์ และการออกแบบระบบไฟฟ้าในอาคารที่ติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยเฉพาะในขั้นตอนการเลือกโครงสร้างหม้อแปลง การประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ และการให้บริการด้านวิศวกรรมในทางปฏิบัติ

6.1 decision matrix สำหรับการเลือกโครงสร้างหม้อแปลง

ผู้ใช้งานและผู้ออกแบบสามารถใช้ผลการให้คะแนนเชิงวิศวกรรม (ตารางที่ 10 และ ตารางที่ 11) เป็น decision matrix ในการเลือกโครงสร้างหม้อแปลงให้เหมาะสมกับประเภทอาคาร โดยสรุปได้ว่าอาคารสำนักงานทั่วไป อาคารเรียน หรืออาคารพาณิชย์ที่ให้ความสำคัญกับต้นทุนเริ่มต้นต่ำและประสิทธิภาพพลังงาน ควรเลือกใช้ ระบบหม้อแปลงรวม อาคารที่มีโหลดสำคัญ เช่น โรงพยาบาล ศูนย์ข้อมูล ห้องควบคุม หรืออาคารที่ต้องการ ความต่อเนื่องของระบบสูง ควรเลือกใช้ระบบหม้อแปลงแยก แม้จะมีต้นทุนสูงกว่า แนวทางนี้ช่วยให้การตัดสินใจไม่ยึดเฉพาะต้นทุนเพียงอย่างเดียว แต่พิจารณาพร้อมกับความเสี่ยงด้านความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

6.2 การประเมินต้นทุนตลอดอายุโครงการ (life-cycle cost: LCC)

แม้งานวิจัยนี้จะประเมินต้นทุนในรูปแบบต้นทุนเริ่มต้น (initial cost) เป็นหลัก แต่ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นว่าระบบหม้อแปลงแยกมีศักยภาพในการลดต้นทุนแฝงจากไฟดับ (cost of outage) และเพิ่ม

ความยืดหยุ่นในการขยายระบบในอนาคต เช่น การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานหรือระบบควบคุมอัจฉริยะ ดังนั้น ในการใช้งานเชิงพาณิชย์จึงควรทำการวิเคราะห์การประเมินต้นทุนตลอดอายุโครงการเพิ่มเติม โดยรวมต้นทุนด้านพลังงาน การบำรุงรักษา และต้นทุนจากการหยุดชะงักของโหลด เพื่อประเมินความคุ้มค่าในระยะยาวอย่างรอบด้าน

6.3 แนวทางการให้บริการเชิงวิศวกรรม (audit / design / BOQ)

ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นการรอบสำหรับการให้บริการทางวิศวกรรม ได้แก่ energy & system audit: วิเคราะห์โครงสร้างหม้อแปลงเดิมของอาคารที่ติดตั้งโซลาร์เซลล์ ว่ามีความเหมาะสมกับรูปแบบโหลดหรือไม่

engineering design: ใช้แนวคิด shared/separate transformer เป็นตัวเลือกในการออกแบบระบบไฟฟ้าใหม่หรือปรับปรุงระบบเดิม

BOQ และการประมาณราคา: ใช้ผลการเปรียบเทียบต้นทุนเป็นข้อมูลอ้างอิงในการจัดทำ BOQ และเสนอราคางานระบบไฟฟ้าอย่างเป็นระบบ

แนวทางดังกล่าวช่วยให้ผู้ประกอบการวิชาชีพสามารถเชื่อมโยงงานวิจัยเข้ากับการออกแบบและการตัดสินใจเชิงพาณิชย์ได้จริง และสนับสนุนการพัฒนาาระบบไฟฟ้าอาคารที่มีความยั่งยืนและพร้อมรองรับการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานอัจฉริยะในอนาคต

สรุปผล

ผลการวิจัยนี้ศึกษาการเปรียบเทียบระบบหม้อแปลงแบบรวมและแบบแยกในอาคารที่ติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ โดยพิจารณาประเด็นด้านพลังงาน ความสูญเสีย ความต่อเนื่องของโหลด และต้นทุนรวมหรือค่าใช้จ่ายเบื้องต้น พบว่า ระบบหม้อแปลงแบบรวมสามารถส่งผ่านพลังงานถึงโหลดได้มากกว่า (ประมาณ 9,900 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน) เนื่องจากมีความสูญเสียในสายและหม้อแปลงน้อยกว่า ขณะที่ระบบหม้อแปลงแบบแยกมีพลังงานถึงโหลดประมาณ 9,600 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน แต่มีข้อได้เปรียบด้านความต่อเนื่องของระบบและความเชื่อถือได้สูงกว่าอย่างชัดเจน เพราะสามารถแยกโซนโหลดสำคัญและลดผลกระทบเมื่อเกิดเหตุขัดข้อง โดยค่าดัชนี SAIFI/SAIDI ต่ำกว่าระบบหม้อแปลงรวม แม้ว่าต้นทุนรวมของระบบหม้อแปลงแบบแยกจะสูงกว่าราวร้อยละ 37.6 แต่ให้ความยืดหยุ่นมากกว่าในการรองรับการขยายระบบในอนาคต เช่น ระบบกักเก็บพลังงานและ smart grid ในขณะที่ระบบหม้อแปลงแบบรวมมีความคุ้มค่าในด้านการลงทุนและประสิทธิภาพพลังงาน เหมาะสำหรับอาคารทั่วไปที่ต้องการต้นทุนต่ำและระบบที่ดูแลรักษาง่าย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบหม้อแปลงแบบรวมเหมาะกับอาคารทั่วไป ส่วนระบบหม้อแปลงแบบแยกเหมาะกับอาคารที่มีโหลดสำคัญซึ่งต้องการความต่อเนื่องและเสถียรภาพของระบบสูงกว่า

ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบจริงควรทำการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุโครงการ รวมถึงค่าบำรุงรักษา และต้นทุนความเสียหายจากไฟดับ เพื่อใช้เปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่างระบบหม้อแปลงร่วมและหม้อแปลงแยกอย่างครบถ้วน ควรศึกษา ผลกระทบของการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน และการควบคุมโหลดอัจฉริยะร่วมกับโครงสร้างหม้อแปลงทั้งสองแบบ เพื่อประเมินศักยภาพในการรองรับระบบ smart grid ในอนาคต ในงานวิจัยต่อไป อาจนำข้อมูลโหลดจริงของอาคารหลายประเภท เช่น โรงพยาบาล ศูนย์ข้อมูล หรืออาคารเรียน มาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองที่สะท้อนพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Yang, Y., Wen, H. & Wang, X. (2022). Modeling and analysis of PV–transformer interactions in grid-connected systems, **Proc. 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, 4123–4130.
- IEEE. (2018). IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. **IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)**, 6 April 2018, 1-138. from doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8332112.
- Masters, G. M. (2013). **Renewable and Efficient Electric Power Systems. (2nd ed.)**. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press.
- Iqbal, M. T. (2022). Transformer loading and efficiency in grid-connected solar photovoltaic systems. **Renewable Energy**, 195, 650–660.
- Lee, J. & Lee, S. (2023). Reliability evaluation of distribution networks with PV and transformer integration, **Proc. 2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)**, 1–5.
- Li, H., Zhang, Y. & Wu, J. (2024). Optimal design of distribution transformers for smart grid with renewable energy penetration, **Electric Power Systems Research**, 222, 109–121.