

การวิเคราะห์เชิงพลังงานและการประเมินระยะเวลาการสำรองไฟของระบบแบตเตอรี่สำหรับ โหลดสำคัญในระบบจ่ายไฟฟ้าแบบผสมผสานสำหรับอาคาร

Energy Based Analysis and Backup Duration Evaluation of Battery Systems for Critical Loads in Hybrid Power Distribution Systems for Buildings

ศุภณัฐ อัยกิม^{1*} และพูนศรี วรรณการ¹

Supanut Ouikim^{1*} and Poonsri Wannakarn¹

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800

¹Division of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10800

*Corresponding Author: supanut-ou@rmutp.ac.th

Received 26 กุมภาพันธ์ 2569; Revised 12 เมษายน 2569; Accepted 22 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เชิงพลังงานและการประเมินระยะเวลาการสำรองไฟของระบบแบตเตอรี่สำหรับโหลดสำคัญ (Critical Loads) ในระบบจ่ายไฟฟ้าแบบผสมผสานสำหรับอาคาร โดยมุ่งเน้นกรอบการคำนวณที่มีความโปร่งใส ตรวจสอบย้อนกลับได้ และเหมาะสำหรับการประเมินเบื้องต้นโดยไม่ต้องพึ่งพาซอฟต์แวร์จำลองเฉพาะทาง งานวิจัยนี้ได้พัฒนากลอบการคำนวณด้วย Microsoft Excel ในลักษณะโครงสร้างลำดับขั้น ประกอบด้วยส่วนกำหนดข้อมูลตั้งต้น (Inputs) ส่วนคำนวณสถานะประจุแบตเตอรี่ตามเวลา (SOC Calculation) และส่วนวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ (Sensitivity Analysis) เพื่อประเมินพลังงานที่ใช้งานได้จริงและระยะเวลาการสำรองไฟภายใต้พารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ ความจุแบตเตอรี่ ระดับการคายประจุที่อนุญาต ประสิทธิภาพรวมของระบบแปลงกำลัง และกำลังไฟฟ้าของโหลดสำคัญ นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบความสอดคล้องของผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณด้วยสมการเชิงพลังงานแบบปิดรูปและการคำนวณแบบช่วงเวลา เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของแนวทางที่เสนอ ผลการศึกษานำเสนอในรูปกราฟสถานะประจุแบตเตอรี่ตามเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการสำรองไฟกับพารามิเตอร์หลัก โดยกรณีฐานที่กำหนด $E_{bat} = 100$ kWh, $DoD = 0.8$, $\eta_{sys} = 0.9$ และ $P_{crit} = 10$ kW ให้ระยะเวลาการสำรองไฟเท่ากับ 7.2 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ความไวแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการสำรองไฟแปรผันตรงกับความจุแบตเตอรี่และประสิทธิภาพรวมของระบบ และแปรผกผันกับกำลังไฟฟ้าของโหลดสำคัญ แนวทางที่นำเสนอจึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการออกแบบและการประเมินความเพียงพอของระบบสำรองไฟในอาคารได้อย่างเป็นระบบ กระชับ และตรวจสอบได้

คำหลัก: ระบบแบตเตอรี่; โหลดสำคัญ; ระบบจ่ายไฟฟ้าแบบผสมผสาน; ระยะเวลาการสำรองไฟ; การวิเคราะห์เชิงพลังงาน

Abstract

This paper presents an energy-based analysis and backup duration evaluation of battery systems supplying critical loads in hybrid power distribution systems for buildings. The proposed approach emphasizes a transparent, traceable, and practically applicable calculation framework suitable for

preliminary assessment without relying on specialized simulation tools. In this study, a structured Microsoft Excel framework is developed, consisting of three main parts: Inputs, SOC Calculation, and Sensitivity Analysis. The framework is used to estimate usable energy and backup duration under key parameters, including battery capacity, allowable depth of discharge, overall conversion efficiency of the power conversion system, and critical-load demand. In addition, a consistency check between the closed-form energy-based calculation and the time-step calculation is included to improve the credibility of the proposed method. The results are presented in terms of battery state-of-charge trajectories over time and parametric relationships between backup duration and major system variables. For the base case of $E_{bat} = 100$ kWh, $DoD = 0.8$, $\eta_{sys} = 0.9$, and $P_{crit} = 10$ kW, the calculated backup duration is 7.2 hours. Sensitivity analysis shows that backup duration increases with battery capacity and system efficiency, and decreases with critical-load demand. The proposed framework therefore provides a concise and verifiable tool for preliminary design and adequacy assessment of battery backup systems for building critical loads.

Keywords: battery systems; critical loads; hybrid power distribution; backup duration; energy-based analysis

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบจ่ายไฟฟ้าในอาคารมีแนวโน้มพัฒนาไปสู่รูปแบบผสมผสาน (Hybrid Power Distribution Systems) อันเนื่องมาจากการบูรณาการแหล่งจ่ายพลังงานหลายประเภท ได้แก่ ระบบไฟฟ้าจากโครงข่ายหลัก พลังงานหมุนเวียน และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ การพัฒนาในลักษณะดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความมั่นคง ความยืดหยุ่น และความต่อเนื่องของการจ่ายพลังงาน โดยเฉพาะในอาคารที่มีโหลดสำคัญ (Critical Loads) เช่น ระบบไฟฟ้าฉุกเฉิน ระบบควบคุมระบบสื่อสาร และระบบความปลอดภัย ซึ่งจำเป็นต้องได้รับพลังงานอย่างต่อเนื่องแม้ในกรณีที่แหล่งจ่ายหลักเกิดความขัดข้อง [1]–[5] ภายใต้บริบทดังกล่าว ระบบแบตเตอรี่สำรองไฟจึงมีบทบาทสำคัญ และ “ระยะเวลาการสำรองไฟ” (Backup Duration) กลายเป็นตัวชี้วัดหลักในการประเมินความเพียงพอของระบบในเชิงวิศวกรรมไฟฟ้าอาคาร โดยทั่วไป การประเมินความสามารถของระบบแบตเตอรี่สำรองไฟมักอาศัยซอฟต์แวร์จำลองเชิงพลวัต (Dynamic Simulation Software) ซึ่งสามารถให้ผลลัพธ์ที่ละเอียดและครอบคลุมพฤติกรรมของระบบภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม ซอฟต์แวร์ลักษณะดังกล่าวมักมีลักษณะเป็น

“black-box” กล่าวคือ ผู้ใช้งานไม่สามารถเข้าถึงหรือเข้าใจความสัมพันธ์เชิงกายภาพภายในแบบจำลองได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในด้านความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขงาน รวมถึงความซับซ้อนในการใช้งาน ซึ่งอาจไม่เหมาะสมสำหรับการประเมินเบื้องต้น การออกแบบในระยะเริ่มต้น หรือการนำเสนอข้อมูลเชิงวิศวกรรมเพื่อประกอบการตัดสินใจ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ในด้านระบบกักเก็บพลังงานมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ การจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของแบตเตอรี่ หรือการพัฒนาอัลกอริทึมควบคุมขั้นสูงภายใต้เงื่อนไขโหลดแปรผัน [1], [3], [4] อีกทั้งยังมีงานศึกษาที่พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิและการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ต่อสมรรถนะของระบบในระยะยาว [6] รวมถึงงานวิจัยด้านการประเมินสถานะประจุแบตเตอรี่ (State of Charge: SOC) ซึ่งมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์และควบคุมระบบแบตเตอรี่ [7] แม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูง แต่ในทางปฏิบัติอาจมีความซับซ้อนและยากต่อการนำไปใช้งาน ออกแบบเบื้องต้น ในขณะที่แนวทางการวิเคราะห์เชิงพลังงาน (Energy-Based Analysis) ซึ่งอาศัยหลักสมดุลพลังงานและสมการเชิงวิศวกรรมพื้นฐาน ยังมีการนำเสนอ

ในบริบทของงานออกแบบระบบไฟฟ้าอาคารอย่างจำกัด โดยเฉพาะแนวทางที่สามารถตรวจสอบย้อนกลับได้และสามารถใช้งานได้จริงโดยไม่เพิ่มความซับซ้อนของแบบจำลอง ดังนั้น บทความนี้จึงมุ่งนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์เชิงพลังงานสำหรับการประเมินระยะเวลาการสำรองไฟของระบบแบตเตอรี่สำหรับโหลดสำคัญในระบบจ่ายไฟฟ้าแบบผสมผสานสำหรับอาคาร โดยพัฒนากอบการคำนวณที่มีความโปร่งใส ตรวจสอบย้อนกลับได้ และสามารถทำซ้ำผลลัพธ์ได้ (reproducible) ผ่านโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งถูกออกแบบในรูปแบบโครงสร้างลำดับขั้น ประกอบด้วยส่วน Inputs, SOC Calculation และ Sensitivity Analysis เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พลังงานที่ใช้งานได้จริง (Usable Energy) ระยะเวลาสำรองไฟในรูปแบบสมการปิดรูป (Closed-Form Solution) และพฤติกรรมสถานะประจุแบตเตอรี่ตามเวลา (State of Charge: SOC) ได้อย่างเป็นระบบ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยประกอบด้วย

1. พัฒนาแบบจำลองเชิงพลังงานสำหรับการประเมินระยะเวลาการสำรองไฟของระบบแบตเตอรี่สำหรับโหลดสำคัญ
2. วิเคราะห์พฤติกรรมสถานะประจุแบตเตอรี่ตามเวลาเพื่ออธิบายข้อจำกัดของช่วงการใช้งานแบตเตอรี่ (SOC window)
3. ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ความจุแบตเตอรี่ ระดับโหลด และประสิทธิภาพของระบบ ต่อระยะเวลาการสำรองไฟ ผ่านการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)
4. เสนอแนวทางที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการออกแบบและการประเมินระบบสำรองไฟในขั้นต้นได้อย่างกระชับ โปร่งใส และตรวจสอบได้

แนวทางที่นำเสนอในบทความนี้มีความแตกต่างจากวิธีการที่อาศัยซอฟต์แวร์จำลองเชิงพลวัต โดยเน้นการแสดงความสัมพันธ์เชิงกายภาพของพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น ความจุแบตเตอรี่ ระดับโหลด และประสิทธิภาพของระบบ ผ่านสมการเชิงพลังงานที่เข้าใจได้ง่าย ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมไฟฟ้าอาคารได้

อย่างสะดวก และสามารถปรับพารามิเตอร์เพื่อประเมินสถานการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี (Analytical Approach) บนพื้นฐานหลักสมดุลพลังงาน (Energy Balance Principle) เพื่อประเมินระยะเวลาการสำรองไฟของระบบแบตเตอรี่สำหรับโหลดสำคัญในระบบจ่ายไฟฟ้าแบบผสมผสานสำหรับอาคาร โดยไม่ใช้ซอฟต์แวร์ จำลองเชิงพลวัต (Dynamic Simulation Software) วิธีการศึกษาถูกออกแบบให้สามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ (Traceable) และทำซ้ำได้ (Reproducible) ผ่านโครงสร้างแผนงาน Microsoft Excel

กระบวนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. กำหนดโครงสร้างระบบและขอบเขตการศึกษา
2. กำหนดสมมติฐานและพารามิเตอร์กรณีฐาน
3. คำนวณระยะเวลาสำรองไฟด้วยสมการเชิงพลังงานแบบปิดรูป
4. วิเคราะห์พฤติกรรมสถานะประจุแบตเตอรี่แบบช่วงเวลา
5. วิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์หลักต่อผลลัพธ์

2.1 โครงสร้างระบบและขอบเขตการศึกษา

ระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นระบบจ่ายไฟฟ้าแบบผสมผสานสำหรับอาคาร ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักจากระบบการไฟฟ้า (Grid) และแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ผ่านอุปกรณ์แปลงกำลัง (Power Conversion System: PCS/Inverter)

บทความนี้พิจารณาเฉพาะสถานการณ์ที่แหล่งจ่ายหลักไม่สามารถให้บริการได้ และระบบแบตเตอรี่ทำหน้าที่จ่ายไฟให้โหลดสำคัญ (Critical Loads) เพียงอย่างเดียว โดยกำหนดให้โหลดมีลักษณะเป็นโหลดคงที่ (Constant Load)

ขอบเขตการศึกษาเพื่อควบคุมความซับซ้อนของแบบจำลองและมุ่งเน้นการวิเคราะห์เชิงพลังงานภายใต้โหลดคงที่ การศึกษานี้กำหนดเงื่อนไขดังต่อไปนี้

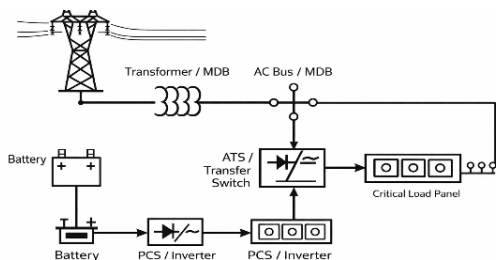
- ระบบพิจารณาเฉพาะการจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ในช่วงเหตุการณ์ของแหล่งจ่ายหลักโดยไม่รวมการผลิตพลังงานจากแหล่งหมุนเวียนระหว่างเหตุการณ์

- ใช้ค่าประสิทธิภาพรวม (η_{sys}) แทนการจำลองกลยุทธควบคุมขั้นสูงของ PCS

- สมมติให้สมรรถนะของแบตเตอรี่คงที่ตลอดช่วงการวิเคราะห์ โดยไม่รวมผลของการเสื่อมสภาพระยะยาว

- ไม่พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิและการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบในระยะยาว [6] เพื่อให้แบบจำลองสะท้อนการประเมินเบื้องต้นในขั้นออกแบบ

เงื่อนไขดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อให้แบบจำลองมีความเรียบง่าย โปร่งใส และตรวจสอบย้อนกลับได้ เหมาะสำหรับการประเมินเบื้องต้นในงานออกแบบระบบไฟฟ้าอาคาร ในการศึกษา สมมติให้ระบบแบตเตอรี่เป็นชนิด Lithium-ion ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในระบบกักเก็บพลังงานสำหรับอาคาร เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง และมีประสิทธิภาพการชาร์จ-คายประจุที่ดี



รูปที่ 1 แสดงผังโครงสร้างระบบจ่ายไฟฟ้าแบบผสมผสานที่ใช้เป็นกรอบแนวคิดในการวิเคราะห์ โดยเน้นการจ่ายไฟให้โหลดสำคัญผ่านระบบแบตเตอรี่สำรองไฟในกรณีที่แหล่งจ่ายหลักไม่สามารถให้บริการได้

2.2 สมมติฐานและพารามิเตอร์พื้นฐาน

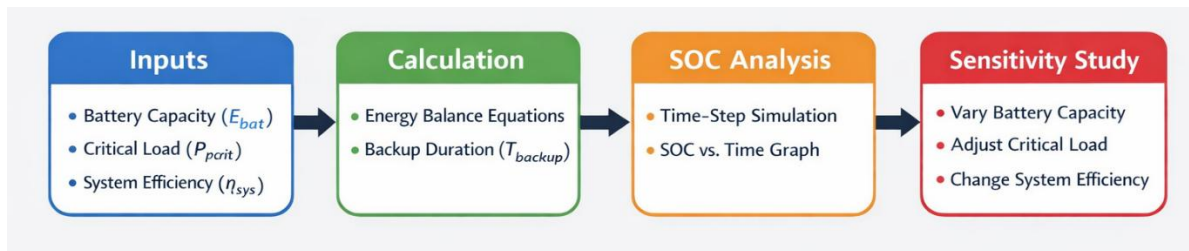
การคำนวณและการวิเคราะห์ดำเนินการผ่านโครงสร้างแผ่นงาน Microsoft Excel ซึ่งถูกจัดแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนกำหนดพารามิเตอร์ตั้งต้น (Inputs) ส่วนคำนวณวิถีสถานะประจุแบตเตอรี่แบบช่วงเวลา (SOC_{Calc}) และส่วนวิเคราะห์ความไวของระบบ

(Sensitivity) โดยโครงสร้างดังกล่าวถูกออกแบบให้กระบวนการคำนวณมีความโปร่งใส ตรวจสอบย้อนกลับได้ และสามารถทำซ้ำได้ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันเพื่อกำหนดกรอบการประเมินเชิงพลังงานอย่างเป็นระบบ การศึกษานี้กำหนดชุดพารามิเตอร์กรณีฐาน (Base Case Parameters) ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์กรณีฐานในแท็บ Inputs (Base Case)

รายการพารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า (กรณีฐาน)	หน่วย	คำอธิบาย
ความจุพลังงานแบตเตอรี่รวม	E_{bat}	100	kWh	ความจุพลังงานรวมของระบบแบตเตอรี่
สถานะประจุสูงสุด	SOC_{max}	100	%	ระดับประจุสูงสุดของแบตเตอรี่
สถานะประจุเริ่มต้น (สำหรับ SOC_{Calc})	$SOC_{initial}$	100	%	ค่า SOC ณ จุดเริ่มเหตุการณ์สำรองไฟ (ใช้สร้างตารางที่ 2 และรูปที่ 2)
สถานะประจุต่ำสุดที่อนุญาต	SOC_{min}	20	%	ขอบเขตล่างเพื่อป้องกันการคายประจุลึก
ระดับความเสี่ยงของการคายประจุที่อนุญาต	DoD	0.8	-	พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณ E_{usable} และ T_{backup} (สมการที่ 1-2)
ประสิทธิภาพรวมของระบบ	η_{sys}	0.9	-	รวมประสิทธิภาพแบตเตอรี่และ PCS/Inverter
กำลังไฟฟ้าโหลดสำคัญ	P_{crit}	10	kW	โหลดสำคัญแบบคงที่ (assumed constant)
ช่วงเวลาคำนวณ (Time step)	Δt	(ใส่ตาม Excel จริง)	ชั่วโมง	ใช้สำหรับคำนวณ SOC แบบช่วงเวลาใน SOC_{Calc}

หมายเหตุ: ค่า DoD ใช้สำหรับคำนวณพลังงานที่ใช้งานจริงในสมการปิดรูป ค่า $SOC_{initial}$ ใช้สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรม SOC ใน SOC_{Calc} ทั้งสองค่าถูกกำหนดแยกวัตถุประสงค์กันอย่างชัดเจน



รูปที่ 2 ผังขั้นตอนการวิเคราะห์ระยะเวลาการสำรองไฟแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประกอบด้วย การกำหนดข้อมูลตั้งต้น การคำนวณเชิงพลังงาน การวิเคราะห์สถานะประจุแบตเตอรี่ และการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์

พารามิเตอร์ดังกล่าวครอบคลุมตัวแปรหลักที่มีผลโดยตรงต่อการคำนวณพลังงานที่ใช้งานได้จริง (E_{usable}) และระยะเวลาการสำรองไฟ (T_{backup}) ได้แก่ ความจุแบตเตอรี่ ระดับการคายประจุที่อนุญาต ประสิทธิภาพรวมของระบบ และกำลังไฟฟ้าของโหลดสำคัญ แม้ในการศึกษานี้จะใช้ค่าประสิทธิภาพรวมของระบบเป็นค่าคงที่ แต่ในทางปฏิบัติ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แปลงกำลังจะเปลี่ยนแปลงตามระดับโหลด ดังนั้นในส่วนการอภิปรายผลจะมีการพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพต่อระยะเวลาการสำรองไฟเพิ่มเติม

2.3 สมการที่ใช้ในการคำนวณระยะเวลาการสำรองไฟ

การคำนวณระยะเวลาการสำรองไฟอาศัยหลักการสมดุลพลังงาน โดยพิจารณาพลังงานที่แบตเตอรี่สามารถนำมาใช้งานได้จริงหลังจากคำนึงถึงข้อจำกัดด้านระดับการคายประจุและประสิทธิภาพของระบบ ดังสมการที่ (1)

$$E_{usable} = E_{bat} \times DoD \times \eta_{sys} \quad (1)$$

เมื่อ E_{usable} คือพลังงานที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง (kWh), E_{bat} คือความจุพลังงานแบตเตอรี่ (kWh), DoD คือระดับความลึกของการคายประจุ, η_{sys} คือประสิทธิภาพรวมของระบบ และ P_{crit} คือกำลังไฟฟ้าของโหลดสำคัญ (kW) จากนั้นค่าพลังงานที่สามารถใช้งานได้จริง E_{usable} จะถูกนำไปแทนในสมการที่ (2) เพื่อคำนวณระยะเวลาการสำรองไฟ T_{backup}

$$T_{backup} = \frac{E_{usable}}{P_{crit}} \quad (2)$$

โดยที่ P_{crit} คือกำลังไฟฟ้าของโหลดสำคัญ (kW) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาสำรองไฟแปรผกผันกับกำลังโหลดสำคัญตามความสัมพันธ์เชิงพลังงาน การคำนวณทั้งหมดดำเนินการใน

รูปแบบตารางคำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้สามารถตรวจสอบและปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ได้สะดวก

สมการ (1)–(2) เป็นสมการปิดรูป (Closed-Form Solution) เหมาะสำหรับการประเมินเบื้องต้นในการออกแบบระบบ สมการดังกล่าวเป็นการประยุกต์ใช้หลักสมดุลพลังงานในรูปแบบที่สามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ และเหมาะสำหรับการประเมินเชิงวิศวกรรมในขั้นต้น

2.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมสถานะประจุแบตเตอรี่ตามเวลา

เพื่อแสดงพฤติกรรมการคายประจุและสถานะประจุของแบตเตอรี่ (SOC) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ระบบแบตเตอรี่ [7] ระหว่างการสำรองไฟ การศึกษานี้ใช้การคำนวณแบบช่วงเวลา (time-step) ในแท็บ SOC_{Calc} โดยอาศัยหลักสมดุลพลังงาน (energy balance) ภายใต้สมมติฐานว่าโหลดสำคัญมีลักษณะเป็นโหลดคงที่ (constant critical load) ในแต่ละช่วงเวลา Δt พลังงานคงเหลือของแบตเตอรี่จะลดลงตามกำลังโหลดที่ต้องจ่ายผ่านระบบแปลงกำลัง โดยพิจารณาประสิทธิภาพรวมของระบบ (η_{sys}) ดังสมการ (3)

$$E_{remain}(t + \Delta t) = E_{remain}(t) - [\Delta t \frac{P_{crit}}{\eta_{sys}}] \quad (3)$$

โดยที่ E_{remain} คือพลังงานคงเหลือของแบตเตอรี่ (kWh), P_{crit} คือกำลังไฟฟ้าของโหลดสำคัญ (kW), η_{sys} คือประสิทธิภาพรวมของเส้นทางแปลงกำลังจากแบตเตอรี่ไปยังโหลด (รวม PCS/inverter และความสูญเสียที่พิจารณา) และ Δt คือช่วงเวลาคำนวณ (ชั่วโมง) ทั้งนี้พจน์ $[\frac{P_{crit}}{\eta_{sys}}]$ แทนกำลังที่แบตเตอรี่ต้องจ่ายจริงเพื่อรองรับโหลดเมื่อคำนึงถึงความสูญเสียของระบบแปลงกำลัง จากนั้นคำนวณค่า SOC เป็นอัตราส่วน

ของพลังงานคงเหลือเทียบกับพลังงานตั้งต้นของกรณีฐาน (Base Case) ตามสมการ (4)

$$SOC(t) = \frac{E_{remain}(t)}{E_{bat}} \quad (4)$$

โดยกำหนด $E_{bat} = 100$ kWh และกำหนดค่าเริ่มต้น $E_{remain}(0) = 80$ kWh ทำให้ $SOC(0) = 0.8$ หรือ 80% จากนั้นทำการคำนวณต่อเนื่องตามเวลาเพื่อสร้างตารางผลลัพธ์และกราฟ SOC-เวลา (รูปที่ 2) การคำนวณใช้ $\Delta t = 1$ ชั่วโมง และใช้ linear interpolation สำหรับจุดสิ้นสุดที่ $SOC = SOC_{min}$ แนวทางการคำนวณแบบช่วงเวลานี้ช่วยให้สามารถอธิบายพฤติกรรมการลดลงของพลังงานในระบบได้อย่างชัดเจน และสะท้อนข้อจำกัดของการใช้งานแบตเตอรี่ภายใต้กรอบ SOC window

2.5 การวิเคราะห์ความไวของระบบ (Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์สำคัญต่อระยะเวลาการสำรองไฟของระบบแบตเตอรี่ โดยดำเนินการในแท็บ Sensitivity ของ Microsoft Excel ซึ่งสามารถปรับค่าพารามิเตอร์และคำนวณผลลัพธ์ใหม่ได้ทันที (automatic recalculation)

ในการศึกษานี้ การวิเคราะห์ความไวไม่ได้พิจารณาเฉพาะความจุแบตเตอรี่ (E_{bat}) เท่านั้น แต่ยังรวมถึงผลกระทบของกำลังโหลดสำคัญ (P_{crit}) และประสิทธิภาพของระบบ (η_{sys}) ต่อระยะเวลาการสำรองไฟ เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์หลักในมุมมองที่ครอบคลุมมากขึ้น ภายใต้หลักสมดุลพลังงาน

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ ได้กำหนดให้พารามิเตอร์บางตัวคงที่ตามกรณีฐาน และทำการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ที่สนใจทีละตัว (One-Variable-at-a-Time Analysis) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อระยะเวลาการสำรองไฟ (T_{backup}) ดังนี้

- การวิเคราะห์ผลกระทบของความจุแบตเตอรี่ (E_{bat})
- การวิเคราะห์ผลกระทบของกำลังโหลดสำคัญ (P_{crit})
- การวิเคราะห์ผลกระทบของประสิทธิภาพระบบ (η_{sys})

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ถูกนำเสนอในรูปแบบตารางและกราฟ เพื่อแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์และระยะเวลาการสำรองไฟ ซึ่งช่วยให้สามารถตีความผลลัพธ์ในเชิง

วิศวกรรมได้อย่างชัดเจน และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบสำรองไฟในขั้นต้นได้อย่างเหมาะสม ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความไวแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการสำรองไฟแปรผันตรงกับความจุแบตเตอรี่และประสิทธิภาพของระบบ และแปรผกผันกับกำลังโหลดสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับสมการเชิงพลังงานพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และช่วยยืนยันว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนพฤติกรรมของระบบได้อย่างเหมาะสมในเชิงวิศวกรรม

2.6 การตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลอง (Model Validation)

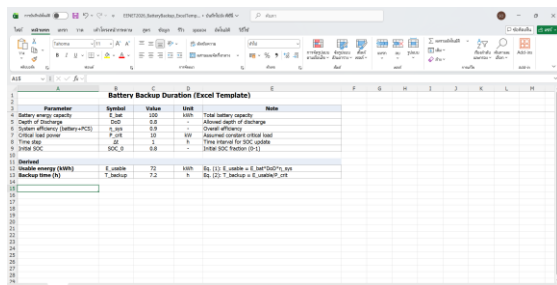
เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้มีการตรวจสอบความสอดคล้องของผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณด้วยสมการเชิงพลังงานแบบปิดรูป (Closed-Form Solution) และการคำนวณแบบช่วงเวลา (Time-Step Method) ภายใต้พารามิเตอร์เดียวกัน

ผลการเปรียบเทียบพบว่า ระยะเวลาการสำรองไฟที่ได้จากทั้งสองวิธีมีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ในเชิงวิศวกรรม ทั้งนี้ ความแตกต่างดังกล่าวเกิดจากวิธีการนิยามช่วงพลังงานที่ใช้งานได้และข้อจำกัดของช่วงสถานะประจุแบตเตอรี่ (SOC window)

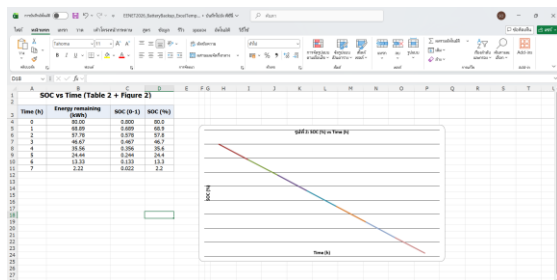
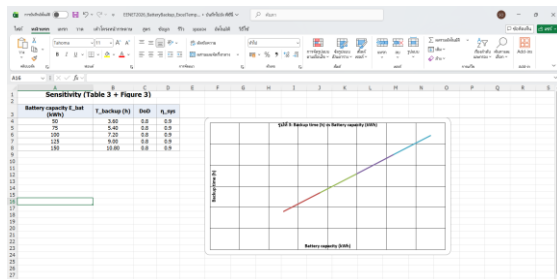
แนวทางการตรวจสอบนี้ช่วยยืนยันว่าแบบจำลองเชิงพลังงานที่นำเสนอสามารถสะท้อนพฤติกรรมของระบบได้อย่างเหมาะสมสำหรับการประเมินเบื้องต้น และสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการออกแบบระบบสำรองไฟในอาคารได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ

2.7 โครงสร้างการคำนวณใน Microsoft Excel

เพื่อให้เห็นภาพกระบวนการคำนวณที่ชัดเจน โครงสร้างของแบบจำลองถูกพัฒนาใน Microsoft Excel โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนกำหนดพารามิเตอร์ (Inputs) ส่วนคำนวณสถานะประจุแบตเตอรี่ (SOC_{Calc}) และส่วนวิเคราะห์ความไว (Sensitivity)



รูปที่ 3 กำหนดพารามิเตอร์ (Inputs)

รูปที่ 4 คำนวณสถานะประจุแบตเตอรี่ (SOC_{calc})

รูปที่ 5 วิเคราะห์ความไว (Sensitivity)

3. ผลและการอภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ถูกเรียบเรียงตามลำดับวัตถุประสงค์ของการศึกษา ได้แก่ (1) การประเมินระยะเวลาการสำรองไฟจากสมการเชิงพลังงานแบบปิดรูป (2) การวิเคราะห์พฤติกรรมสถานะประจุแบตเตอรี่ตามเวลา และ (3) การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์หลักต่อระยะเวลาการสำรองไฟ

3.1 ระยะเวลาการสำรองไฟของระบบแบตเตอรี่ (กรณีฐาน)

จากพารามิเตอร์กรณีฐานในตารางที่ 1 พลังงานที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงของแบตเตอรี่คำนวณจากสมการ (1) ได้เป็น

$$E_{usable} = E_{bat} \times DoD \times \eta_{sys}$$

แทนค่ากรณีฐาน $E_{bat} = 100$ kWh, $DoD = 0.8$, และ $\eta_{sys} = 0.9$ จะได้

$$E_{usable} = 100 \times 0.8 \times 0.9 = 72 \text{ kWh}$$

จากนั้นคำนวณระยะเวลาสำรองไฟด้วยสมการ (2) ภายใต้โหลดสำคัญคงที่ $P_{crit} = 10$ kW ได้เป็น

$$T_{backup} = E_{usable} / P_{crit} = 72 / 10 = 7.2 \text{ ชั่วโมง}$$

ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาสำรองไฟแปรผันตรงกับ ความจุแบตเตอรี่และระดับ DoD และแปรผกผันกับกำลังโหลดสำคัญตามหลักสมมูลพลังงาน ทั้งนี้ ค่า E_{usable} ใช้สำหรับการประเมินเชิงออกแบบ ส่วนการวิเคราะห์วิถี SOC ตามเวลาในหัวข้อถัดไปใช้ค่าเริ่มต้น $SOC_{initial} = 80\%$ ตามสมมติฐานกรณีฐาน

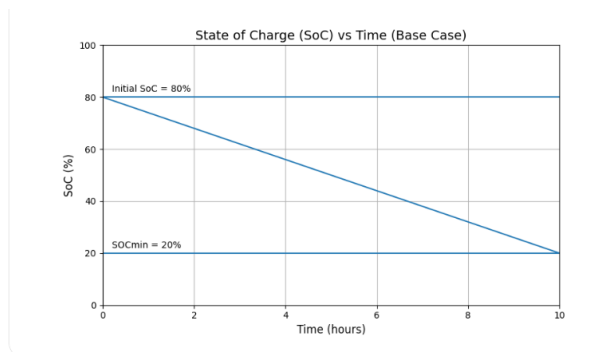
3.2 พฤติกรรมสถานะประจุแบตเตอรี่ตามเวลา

ผลการคำนวณแบบช่วงเวลา (Time-Step Method) ในแท็บ SOC_{calc} แสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 6

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณ SOC ตามเวลา (SOC vs Time) ในกรณีฐาน

เวลา (ชั่วโมง)	พลังงานคงเหลือ (kWh)	SOC (0-1)	SOC (%)
0	80.00	0.800	80.0
1	68.89	0.689	68.9
2	57.78	0.578	57.8
3	46.67	0.467	46.7
4	35.56	0.356	35.6
5	24.44	0.244	24.4
5.4	20.00	0.200	20.0

หมายเหตุ: ตารางนี้คำนวณจากไฟล์ Excel (แท็บ SOC_{calc}) ภายใต้สมมติฐาน โหลดสำคัญคงที่ โดยใช้การคำนวณแบบ time-step ($\Delta t = 1$ ชั่วโมง) และคำนวณจุดสิ้นสุดเพิ่มเติมด้วยการประมาณเชิงเส้น (linear interpolation) เพื่อให้เวลาที่ SOC ลดลงถึง $SOC_{min} = 20\%$ แสดงเป็นค่า 5.4 ชั่วโมงในกรณีฐาน



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง SOC กับเวลาในการสำรองไฟ (กรณีฐาน) แสดงการลดลงของ SOC ตามเวลาเมื่อโหลดสำคัญเป็นโหลดคงที่ โดยเริ่มต้นที่ $SOC = 80\%$ และลดลงต่อเนื่องจนถึง $SOC_{min} = 20\%$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขหยุดการคายประจุ (cut-off limit) ตามข้อกำหนดการใช้งานแบตเตอรี่ในกรณีฐาน

จากผลลัพธ์พบว่า SOC ลดลงในลักษณะเกือบเชิงเส้นตามเวลา เนื่องจากโหลดสำคัญถูกกำหนดให้เป็นโหลดคงที่ ทำให้อัตราการคายพลังงานต่อหน่วยเวลาเป็นค่าคงที่ตามสมการที่ (3) ส่งผลให้กราฟ SOC มีลักษณะเป็นเส้นตรง

เมื่อกำหนดค่า $SOC_{min} = 20\%$ เป็นเงื่อนไขหยุดการคายประจุ และใช้ช่วงเวลา $\Delta t = 1$ ชั่วโมง จะได้ระยะเวลาสำรองไฟประมาณ 5–6 ชั่วโมง (ขึ้นกับการประมาณช่วงท้ายด้วย linear interpolation)

ควรสังเกตว่า ค่าดังกล่าวแตกต่างจากค่า 7.2 ชั่วโมงที่ได้จากสมการปิดรูป ทั้งนี้เนื่องจากแนวทางการคำนวณต่างกัน กล่าวคือ

- สมการปิดรูปใช้ $DoD = 0.8$ เป็นกรอบพลังงานที่อนุญาตให้ใช้

- การวิเคราะห์ SOC ใช้กรอบ SOC window ระหว่าง $SOC_{initial} = 80\%$ ถึง $SOC_{min} = 20\%$ ซึ่งคิดเป็น 60% ของความจุ

ดังนั้นผลลัพธ์ทั้งสองจึงสะท้อน “คนละมุมมองของการออกแบบ” กล่าวคือ

- ค่า 7.2 ชั่วโมง เหมาะสำหรับการ sizing เชิงทฤษฎีเบื้องต้น

- ค่า 5–6 ชั่วโมง แสดงพฤติกรรมจริงภายใต้ข้อจำกัด SOC_{min} และ time-step

ความแตกต่างนี้ไม่ใช่ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง แต่เป็นผลจากนิยามขอบเขตพลังงานที่ใช้ในการคำนวณที่ต่างกัน

3.3 การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์หลัก

ผลการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์หลักแสดงในตารางที่ 3–5 และรูปที่ 7–9 โดยพิจารณาผลกระทบของความจุแบตเตอรี่ กำลังโหลดสำคัญ และประสิทธิภาพของระบบต่อระยะเวลาการสำรองไฟ

(1) ผลกระทบของความจุแบตเตอรี่

ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการสำรองไฟเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นเมื่อความจุแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น ภายใต้เงื่อนไขโหลดคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ตามสมการเชิงพลังงาน

(2) ผลกระทบของกำลังโหลดสำคัญ

จากตารางที่ 4 พบว่า เมื่อกำลังโหลดเพิ่มขึ้นระยะเวลาการสำรองไฟลดลงอย่างมีนัยสำคัญในลักษณะแปรผกผัน ซึ่งเป็นไปตามหลักสมดุลพลังงาน

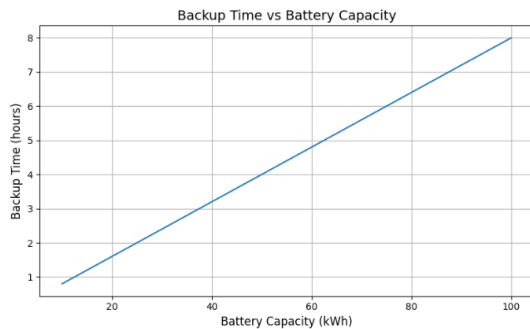
(3) ผลกระทบของประสิทธิภาพระบบ

จากตารางที่ 5 พบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบส่งผลให้ระยะเวลาการสำรองไฟเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งสะท้อนถึงบทบาทของการสูญเสียพลังงานในระบบแปลงกำลัง

ผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า พารามิเตอร์ทั้งสามมีผลต่อระยะเวลาการสำรองไฟอย่างมีนัยสำคัญ และควรพิจารณาร่วมกันในการออกแบบระบบสำรองไฟในอาคาร

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความไวของความจุแบตเตอรี่ต่อระยะเวลาสำรองไฟ (กำหนดโหลดคงที่ตามกรณีฐาน)

ความจุแบตเตอรี่ (kWh)	DoD	η_{sys}	โหลดสำคัญ P_{crit} (kW)	ระยะเวลาสำรองไฟ T_{backup} (ชั่วโมง)
50	0.8	0.9	10	3.6
75	0.8	0.9	10	5.4
100	0.8	0.9	10	7.2
125	0.8	0.9	10	9.0
150	0.8	0.9	10	10.8



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสำรองไฟกับความจุแบตเตอรี่ (Sensitivity Analysis) แสดงการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาสำรองไฟตามความจุแบตเตอรี่ภายใต้เงื่อนไขโหลดคงที่และพารามิเตอร์อื่นคงที่ แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับสมการที่ (1)–(2) ซึ่งแสดงให้เห็น

จากผลลัพธ์พบว่า ระยะเวลาสำรองไฟเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นเมื่อเพิ่มความจุแบตเตอรี่ ภายใต้เงื่อนไขโหลดคงที่และพารามิเตอร์อื่นคงที่ แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับสมการที่ (1)–(2) ซึ่งแสดงให้เห็น

$$T_{\text{backup}} \propto E_{\text{bat}}$$

ผลการวิเคราะห์นี้มีนัยสำคัญต่อการออกแบบระบบสำรองไฟในขั้นต้น เนื่องจากสามารถใช้เป็นแนวทางกำหนดขนาดแบตเตอรี่ให้สอดคล้องกับระยะเวลาสำรองไฟที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องใช้การจำลองเชิงพลวัตที่ซับซ้อน

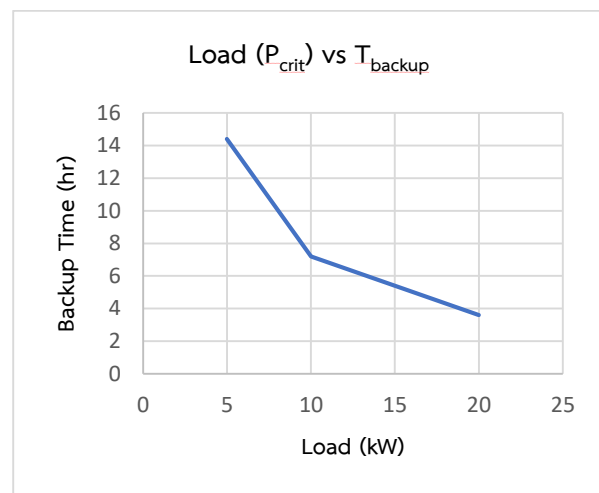
เพื่อศึกษาผลกระทบของกำลังโหลดสำคัญต่อระยะเวลาการสำรองไฟ ได้ทำการปรับค่ากำลังโหลด (P_{crit}) ในช่วงค่าที่แตกต่างกัน ขณะที่พารามิเตอร์อื่นคงที่ ตามกรณีฐาน ได้แก่ ความจุแบตเตอรี่ ($E_{\text{bat}} = 100 \text{ kWh}$), ระดับการคายประจุ ($\text{DoD} = 0.8$) และประสิทธิภาพของระบบ ($\eta_{\text{sys}} = 0.9$)

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโหลดสำคัญและระยะเวลาการสำรองไฟภายใต้เงื่อนไขการคำนวณเดียวกัน

ตารางที่ 4 ผลกระทบของกำลังโหลดสำคัญต่อระยะเวลาการสำรองไฟ

กำลังโหลด (kW)	ระยะเวลาสำรองไฟ (ชั่วโมง)
5	14.4
10	7.2
20	3.6

ผลลัพธ์จากตารางที่ 4 ถูกนำเสนอในรูปแบบกราฟในรูปที่ 8 เพื่อแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโหลดสำคัญและระยะเวลาการสำรองไฟ โดยช่วยให้สามารถมองเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระบบได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโหลดสำคัญ (Load, P_{crit}) กับระยะเวลาการสำรองไฟ (T_{backup})

จากรูปที่ 8 พบว่า เมื่อกำลังโหลดสำคัญเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการสำรองไฟลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีลักษณะแปรผกผัน ซึ่งสอดคล้องกับสมการเชิงพลังงานที่ใช้ในงานวิจัย กล่าวคือ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น อัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยเวลาจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พลังงานที่สะสมในแบตเตอรี่หมดเร็วขึ้น

เพื่อศึกษาผลกระทบของประสิทธิภาพระบบแปลงกำลังต่อระยะเวลาการสำรองไฟ ได้ทำการปรับค่าประสิทธิภาพของระบบ (η_{sys}) ในช่วงค่าที่แตกต่างกัน โดยกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงที่ตามกรณีฐาน ได้แก่

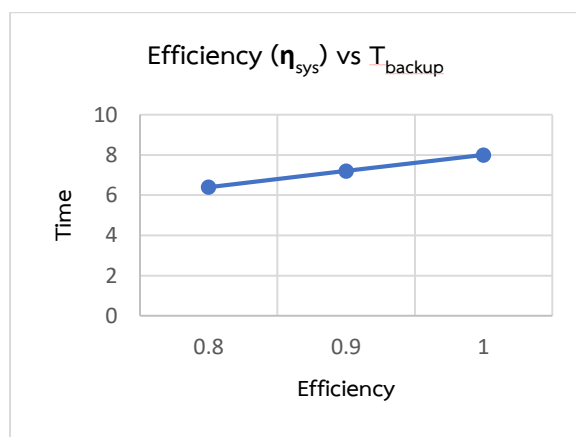
ความจุแบตเตอรี่ ($E_{\text{bat}} = 100 \text{ kWh}$), ระดับการคายประจุ ($\text{DoD} = 0.8$) และกำลังโหลดสำคัญ ($P_{\text{crit}} = 10 \text{ kW}$)

ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 5 ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินผลกระทบของการสูญเสียพลังงานในระบบแปลงกำลังต่อระยะเวลาการสำรองไฟได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 5 ผลกระทบของประสิทธิภาพระบบต่อระยะเวลาการสำรองไฟ

η_{sys}	$T_{\text{backup}} \text{ (hr)}$
0.8	6.4
0.9	7.2
1.0	8.0

ผลลัพธ์จากตารางที่ 5 ถูกนำเสนอในรูปแบบกราฟในรูปที่ 9 เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบและระยะเวลาการสำรองไฟ ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มของผลลัพธ์ในเชิงวิศวกรรมได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบ (η_{sys}) กับระยะเวลาการสำรองไฟ (T_{backup})

จากรูปที่ 5 พบว่า เมื่อประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการสำรองไฟเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยมีแนวโน้มเชิงเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดความสูญเสียในระบบแปลงกำลังมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่

3.4 การอภิปรายผลเชิงวิศวกรรม

ผลการศึกษายืนยันว่าแนวทางการวิเคราะห์เชิงพลังงานสามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบแบตเตอรี่สำรองไฟได้อย่างชัดเจน ภายใต้สมมติฐานโหลดคงที่และประสิทธิภาพรวมคงที่ โดยผลลัพธ์จากสมการปิดรูปให้ระยะเวลาการสำรองไฟเท่ากับ 7.2 ชั่วโมง ขณะที่การวิเคราะห์แบบช่วงเวลาให้ค่าอยู่ในช่วงประมาณ 5–6 ชั่วโมง ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกันในเชิงวิศวกรรม ความแตกต่างของผลลัพธ์ดังกล่าวเกิดจากข้อจำกัดของช่วงสถานะประจุแบตเตอรี่ (SOC window) และวิธีการนิยามพลังงานที่สามารถใช้งานได้ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการเลือกวิธีการคำนวณมีผลต่อการตีความผลลัพธ์ในการออกแบบระบบจริง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ความไวแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ความจุแบตเตอรี่ กำลังโหลดสำคัญ และประสิทธิภาพของระบบ มีผลต่อระยะเวลาการสำรองไฟอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะกำลังโหลดซึ่งมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน และประสิทธิภาพของระบบซึ่งสะท้อนถึงผลของการสูญเสียพลังงานในกระบวนการแปลงกำลัง เมื่อเปรียบเทียบกับแนวทางที่ใช้ซอฟต์แวร์จำลองเชิงพลวัต งานวิจัยนี้มีจุดเด่นในด้านความเรียบง่าย ความโปร่งใส และความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับได้ ซึ่งเหมาะสำหรับการประเมินเบื้องต้นและการออกแบบระบบไฟฟ้าอาคาร อย่างไรก็ตาม แบบจำลองยังมีข้อจำกัด เช่น การสมมติให้โหลดเป็นค่าคงที่ การไม่พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิ และการไม่รวมการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ในสภาวะการใช้งานจริง

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เสนอแนวทางการวิเคราะห์ระยะเวลาการสำรองไฟของระบบแบตเตอรี่สำหรับโหลดสำคัญในระบบจ่ายไฟฟ้าแบบผสมผสานสำหรับอาคาร โดยอาศัยหลักสมดุลพลังงานร่วมกับสมการเชิงพลังงานแบบปิดรูป และการคำนวณแบบช่วงเวลาในโปรแกรม Microsoft Excel ผลการศึกษาพบว่า ภายใต้พารามิเตอร์พื้นฐาน ระบบแบตเตอรี่สามารถให้ระยะเวลาการสำรองไฟเชิงออกแบบเท่ากับ 7.2 ชั่วโมงจากสมการปิดรูป และ

ประมาณ 5–6 ชั่วโมงเมื่อพิจารณาข้อจำกัดของช่วงสถานะประจุแบตเตอรี่ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของมุมมองในการประเมินระบบ การวิเคราะห์ความไวแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการสำรองไฟมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความจุแบตเตอรี่และประสิทธิภาพของระบบ และมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับกำลังโหลดสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับหลักสมดุลพลังงานพื้นฐาน จุดเด่นของแนวทางที่นำเสนอคือความเรียบง่าย ความโปร่งใส และความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับได้ โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาซอฟต์แวร์จำลองเฉพาะทาง ทำให้เหมาะสำหรับการประเมินและออกแบบระบบในขั้นต้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัด เช่น การสมมติให้โหลดคงที่ และการไม่พิจารณาปัจจัยด้านอุณหภูมิและการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตอาจขยายไปสู่การพิจารณาโหลดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และการพัฒนาแบบจำลองที่รวมผลกระทบของปัจจัยดังกล่าว เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการใช้งานจริง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำบทความวิจัยฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Recommended Practice for Battery Management Systems in Stationary Energy Storage Applications, IEEE Standard 2686-2024, 2024.
- [2] T. Baloyi and S. Chowdhury, “Sizing and selection of battery energy storage system for time of use arbitrage in a commercial building in South Africa,” in *Proceeding of IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Aug. 2021, pp. 1 - 5. doi: 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543436.
- [3] J. Pai, L. Pota, S. Venkatesan, and P. Siano, “Hybrid optimization of backup energy storage for building load management,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 17, Art. no. 7747, 2024.
- [4] J. M. S. Callegari, W. C. S. Amorim, H. A. Pereira, B. J. Cardoso Filho, and D. I. Brandao, “On sizing of battery energy storage systems for independent multi-ancillary services in AC grids,” *Results in Engineering*, 2025, Art. no. 101000. doi: 10.1016/j.prime.2025.101000.
- [5] L. Su, W. Gang, M. Liu, Z. Ling, Y. Zhang, and S. Dong, “A capacity optimization method for the battery energy storage system based on historical electricity data of existing buildings,” *Energy Reports*, vol. 13, pp. 6132-6147, Jun. 2025. doi: 10.1016/j.egy.2025.05.060.
- [6] C. H. B. Apribowo, Sarjiya, S. P. Hadi, and F.D. Wijaya, “Optimal planning of battery energy storage systems by considering battery degradation due to ambient temperature: A review, challenges, and new perspective,” *Batteries*, vol. 8, no. 12, pp. 290, Dec. 2022. doi:10.3390/batteries8120290
- [7] N. Ghaeminezhad, Q. Ouyang, and J. Wei, “Review on state of charge estimation techniques of lithium-ion batteries: A control-oriented approach,” *Journal of Energy Storage*, vol. 72, pp. 108707, Nov. 2023. doi: 10.1016/j.est.2023.108707.