การศึกษาด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของการลดค่าความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการควบคุมการจ่ายพลังงานด้วยโซล่าเซลล์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

Study on Techno-Economic of Peak Shaving with Photovoltaic System and Battery Energy Storage System

สมรถย์ อินจันทร์ กัญจน์ นาคเอี่ยม ณัฐวัฒน์ พัลวัน วรจักร์ เมืองใจ กิตตินัน สระสวย และ ธีระศักดิ์ สมศักดิ์ *

Somrot Injan Kan Nakaiam Nattawat Panlawan Worrajak Muanggjai Kittinun Srasuay and Teerasak Somsak *

หน่วยวิจัยระบบพลังงานสะอาด สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงใหม่

Clean Energy Systems Research Unit, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand

***Corresponding Author E-mail**: somrot_in65@live.rmutl.ac.th

Received: 6/09/25, **Revised**: 08/10/25, **Accepted**: 9/10/25

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบโซล่าเซลล์ร่วมกับแบตเตอรี่ (PV-BESS) เพื่อลดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand) ลง 10% จากฐานเดิม 770 กิโลวัตต์ การศึกษาใช้วิธีการจำลองการทำงานของระบบ BESS ขนาด 77 กิโลวัตต์ / 154 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ควบคู่กับการวิเคราะห์การลงทุนแบบพลวัต โดยพิจารณาต้นทุนแบตเตอรี่ที่คาดว่าจะลดลงระหว่างปี พ.ศ. 2567 ถึง 2573 ผลการจำลองชี้ว่าระบบสามารถลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดได้ 77 กิโลวัตต์ตามเป้าหมาย ด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าโครงการยังไม่มีความน่าลงทุนในช่วงปี พ.ศ. 2567-2572 (NPV < 0, IRR < 8%) จุดคุ้มทุนเชิงกลยุทธ์จะเกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2573 เมื่อราคาแบตเตอรี่คาดว่าจะลดลงสู่ระดับ 2,880 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งส่งผลให้อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เพิ่มขึ้นเป็น 8.65% และสูงกว่าอัตราคิดลดที่ยอมรับได้ โดยสรุป แม้ระบบ PV-BESS จะมีประสิทธิภาพทางเทคนิคสูง แต่ความคุ้มค่าในการลงทุนขึ้นอยู่กับจังหวะเวลาที่เหมาะสมกับต้นทุนเทคโนโลยี งานวิจัยจึงเสนอแนะกลยุทธ์ "เฝ้าระวังและรอคอย (Watchful Waiting)" เพื่อให้ผู้ประกอบการตัดสินใจลงทุนเมื่อสภาวะตลาดเอื้ออำนวย

คำสำคัญ: การลดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด, ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่, การวิเคราะห์เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์, จังหวะการลงทุน

Abstract

This research evaluates the technical efficiency and economic viability of a solar cell system combined with a battery (PV-BESS) to reduce the peak demand by 10% from the original base of 770 kilowatts. The study employs a simulation of the BESS system with a capacity of 77 kilowatts/ 154 kilowatt- hours, alongside a dynamic investment analysis, considering the expected decrease in battery costs over the years. From 2024 to 2030, simulation results indicate that the system can reduce peak electricity demand by 77 kilowatts as targeted. Economically, the project is not yet considered an investment opportunity during this period. B.E. 2567-2572 (NPV < 0, IRR < 8%) The strategic breakeven point will occur in the year B.E. Prof. In 2573, when battery prices are expected to drop to 2,880 baht per kilowatt- hour, resulting in an internal rate of return (IRR) increasing to 8.65%, which is higher than the acceptable discount rate. In summary, although the PV-BESS system has high technical efficiency, the investment value depends on the timing relative to technology costs. The research therefore recommends a "Watchful Waiting" strategy to allow operators to decide on investment when market conditions are favorable.

Keywords: Peak Shaving, Photovoltaic System, Battery Energy Storage System, Techno-economic Analysis, Investment Timing Peak Demand IRR NPV Strategic Break-even Point

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ระบบพลังงานทั่วโลกกำลังเผชิญกับความท้าทายที่สำคัญในการรักษาสมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทานพลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด หรือที่เรียกว่า "Peak Demand"[1] ปัญหานี้ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของโครงข่ายไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายในการผลิตและส่งจ่ายพลังงาน และปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพื่อรับมือกับสถานการณ์ดังกล่าว การศึกษาและพัฒนาเทคนิคการลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak Shaving) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนและระบบกักเก็บ

พลังงานมาใช้ การบูรณาการโซล่าเซลล์ (PV) ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage Systems: BESS) [2-6] ได้รับการยอมรับว่าเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการลดภาระสูงสุดของโครงข่ายไฟฟ้า ช่วยลดความจำเป็นในการสร้างโรงไฟฟ้าใหม่ และเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงาน [7]

ในบริบทของประเทศไทย ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากการเติบโตทางเศรษฐกิจ การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม และการใช้เครื่องปรับอากาศที่เพิ่มขึ้น [8] สถานการณ์นี้สร้างแรงกดดันต่อระบบผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าของประเทศ ทำให้การไฟฟ้าต้องพึ่งพาการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าสำรองที่มีต้นทุนสูง หรือนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศในช่วงเวลาดังกล่าว [9] การนำเทคนิค (Peak Shaving) มาประยุกต์ใช้ในประเทศไทยจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการบริหารจัดการพลังงานให้มีประสิทธิภาพ ลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [10]

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของการลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการควบคุมการจ่ายพลังงานด้วยโซล่าเซลล์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ การศึกษาจะครอบคลุมการออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุมการจ่ายพลังงานที่เหมาะสม การประเมินประสิทธิภาพการลดค่าการใช้ไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกัน และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ผ่านตัวชี้วัดต่างๆ เช่น ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) [11]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (PV-BESS) เพื่อลดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Shaving) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในแวดวงวิชาการและอุตสาหกรรมทั่วโลก การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ด้านเทคนิคการควบคุมและด้านการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

2.1 ด้านเทคนิคและระบบควบคุม (Technical & Control System Research)

งานวิจัยในกลุ่มนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนากลยุทธ์และอัลกอริทึมการควบคุม (Control Algorithm) เพื่อให้ระบบ PV-BESS ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการใช้งานประเภทต่างๆ โดยเฉพาะ Peak Shaving จากการศึกษาจำนวนมากพบว่า หัวใจสำคัญของระบบคือตรรกะการควบคุมการอัดและจ่ายประจุ (Charge-Discharge Logic) ของแบตเตอรี่ ซึ่งต้องทำงานสอดประสานกับการผลิตไฟฟ้าจากโซล่าเซลล์และรูปแบบภาระการใช้ไฟฟ้า (Load Profile) ของ กำลังการผลิตไฟฟ้าจากแผงโซล่าเซลล์ ณ เวลาใดๆ ขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิของแผง และคุณลักษณะของแผงเอง สามารถแสดงด้วยสมการพื้นฐานดังนี้

$$P_{pv}(t) = \eta_{pv}.A.G(t).\left[1-\alpha_T\begin{pmatrix}T_{cell}(t)\\-T_{ref}\end{pmatrix}\right] \quad (1)$$

โดย η_{pv} = ประสิทธิภาพของแผง PV (%), A = พื้นที่รับแสงของแผง (m^2), $G(t)$ = ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (W/m^2), α_T = อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังตามอุณหภูมิ ($°C^{-1}$), $T_{cell}(t)$ = อุณหภูมิของแผง ณ เวลา (°C), T_{ref} = อุณหภูมิอ้างอิง (°C)

การควบคุมการจ่ายไฟของแบตเตอรี่ (Discharge Logic) ภายใต้กลยุทธ์การควบคุมแบบ Rule-Based Control ที่กล่าวถึงในงานวิจัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ "ตัดยอด" (Peak Shaving/Clipping) ของการใช้ไฟฟ้าจากระบบโครงข่าย (Grid)

$$P_{BESS}(t) = \min\begin{pmatrix}P_{discharge,\max}, P_{load}(t)\\-P_{PV}(t)-P_{Peak,Thres}\end{pmatrix} \quad (2)$$

โดย $P_{BESS}(t)$ กำลังที่ BESS จ่ายในเวลา t (W), $P_{discharge,\max}$ ค่ากำลังคายประจุสูงสุด (W), $P_{load}(t)$ โหลดรวม (W), $P_{PV}(t)$ พลังงานจาก PV (W), $P_{Peak,Thres}$ ค่าเป้าหมาย Peak ที่ตั้งไว้ (W)

จากแนวคิดเรื่อง Demand Side Management (DSM) และการประยุกต์ใช้ใน Peak Clipping คือการปรับเปลี่ยนรูปแบบการใช้พลังงานฝั่งผู้บริโภค เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม ทั้งในมิติของต้นทุน, เสถียรภาพ และความยั่งยืน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อก้าวเข้าสู่ยุค Smart Grid ที่เน้นการเชื่อมโยงข้อมูลและการสื่อสารระหว่างแหล่งผลิตและผู้ใช้ปลายทางอย่างชาญฉลาด เทคนิคนี้มีความเหมาะสมอย่างยิ่งกับกรณีที่โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้า มีองค์ประกอบของเทคนิคนี้เหมาะกับกรณีที่โครงสร้างค่าไฟมี “ค่าใช้จ่ายความต้องการสูงสุด” (Demand Charge) เป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งพบได้ในโรงงานหรืออาคารขนาดใหญ่ของไทยและประเทศในอาเซียน

2.2 ด้านเศรษฐศาสตร์และตัวชี้วัดความคุ้มค่า (Economic & Viability Metrics Research)

การตัดสินใจลงทุนในระบบ PV-BESS จำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินที่รัดกุม งานวิจัยในกลุ่มนี้จึงมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้หลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมเพื่อประเมินโครงการ [12-15] โดยมีตัวชี้วัดสำคัญที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ดังนี้

2.2.1 ตัวชี้วัดความสามารถในการคืนทุนคือระยะเวลาคืนทุน (Payback Period - PBP) เป็นตัวชี้วัดที่ง่ายที่สุด บอกถึงระยะเวลาที่โครงการจะสร้างกระแสเงินสดรับสุทธิเพียงพอที่จะครอบคลุมเงินลงทุนเริ่มต้นทั้งหมด

$$PBP = \frac{C_0}{CF_{annual}} \quad (3)$$

PBP = ระยะเวลาคืนทุน (ปี), C_0 = เงินลงทุนเริ่มต้นของโครงการทั้งหมด (บาท), CF_{annual} =กระแสเงินสดรับสุทธิต่อปี (บาท/ปี)

2.2.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value - NPV) เป็นผลรวมของกระแสเงินสดทั้งหมดของโครงการที่ถูกคิดลด (Discounted) มาเป็นมูลค่า ณ ปัจจุบัน หาก NPV > 0 หมายความว่าโครงการมีความ น่าลงทุน

$$NPV = \sum_{=1}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (4)$$

NPV = มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท), C_t = กระแสเงินสดสุทธิในปี (บาท), C_0 = เงินลงทุนเริ่มต้น(บาท), N = อายุของโครงการ (ปี), r = อัตราคิดลด (Discount Rate)(เปอร์เซ็นต์ %), t= ลำดับปีของโครงการ (ตั้งแต่ 1 ถึง N)

2.2.3 อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return - IRR) คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้ NPV ของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ พอดี โครงการจะน่าลงทุนเมื่อ IRR สูงกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำ ที่คาดหวัง (Hurdle Rate)

$$0 = \sum_{=1}^{n} \frac{C_t}{(1+IRR)^t} - C_0 \quad (5)$$

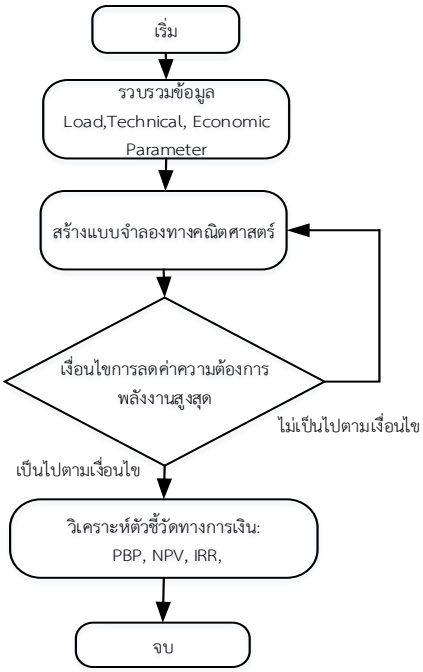
IRR = อัตราผลตอบแทนของโครงการ(เปอร์เซ็นต์ %), C_t = กระแสเงินสดสุทธิในปี(บาท), C_0 = เงินลงทุนเริ่มต้น(บาท), N= อายุของโครงการ (ปี), r = อัตราคิดลด (Discount Rate) (เปอร์เซ็นต์ %), t = ลำดับปีของโครงการ (ตั้งแต่ 1 ถึง N)

งานวิจัยเชิงเศรษฐศาสตร์จำนวนมากได้ข้อสรุปที่สอดคล้องกันว่าความคุ้มค่าของระบบ PV-BESS สำหรับการทำ Peak Shaving นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้า (โดยเฉพาะส่วนต่างระหว่างค่าไฟ On-Peak และ Off-Peak และอัตราค่า Demand Charge) ต้นทุนของเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง และนโยบายสนับสนุนจากภาครัฐ

ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้จึงได้นำทั้งหลักการทางเทคนิคการควบคุมแบบ Rule-Based และตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ ที่ครบถ้วนมาประยุกต์ใช้ เพื่อทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้และความคุ้มค่าของโครงการภายใต้บริบทและข้อมูลการใช้งานจริงของผู้ประกอบการในประเทศไทย

3. วิธีการดำเนินงาน

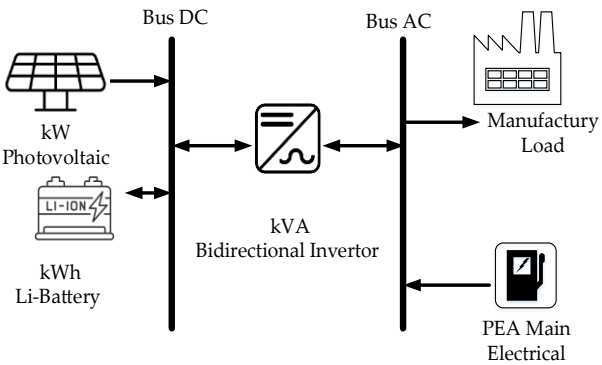
การศึกษานี้มีระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) โดยเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling) และการจำลองการทำงานของระบบ (System Simulation) ขั้นตอนดังกล่าวจะรวมตั้งแต่การเก็บข้อมูล การสร้างแบบจำลองทางเทคนิค การจำลองการทำงานของระบบ (ด้วย MATLAB R2024b) การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (Techno-Economic Assessment) และการสรุปผลและข้อเสนอแนะ ดังรูปที่ 1 ที่เป็นลำดับดังนี้



รูปที่ 1 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

3.1 แนวคิดการลดค่าการใช้พลังงานสูงสุดด้วยโซล่าเซลล์และแบตเตอรี่

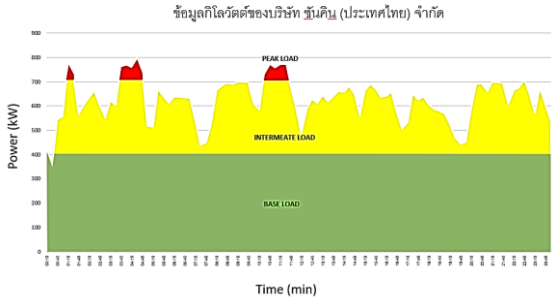
แนวคิดและองค์ประกอบหลักของระบบ PV-BESS (Photovoltaic - Battery Energy Storage System) สำหรับการทำ Peak Shaving องค์ประกอบ: ระบบประกอบด้วยระบบโซล่าเซลล์ (Solar PV Array) ที่ทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ระบบแบตเตอรี่ (Battery Bank) และชุดควบคุมประจุ (Charge Controller) ซึ่งทำหน้าที่กักเก็บพลังงาน และที่สำคัญคือ อินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง (Bi-directional Inverter) ที่เชื่อมต่อระหว่างระบบ DC และโหลด/โครงข่ายไฟฟ้า (AC Load Panel/Utility Grid) ดังรูปที่ 2 แสดงระบบโซล่าเซลล์และแบตเตอรี่สำหรับการลดค่าการใช้พลังงานสูงสุด



รูปที่ 2 ระบบโซล่าเซลล์และแบตเตอรี่สำหรับการลดค่าการใช้พลังงานสูงสุด

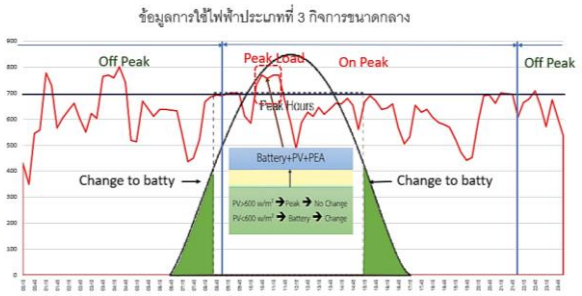
สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าภาคอุตสาหกรรมและธุรกิจขนาดกลางและขนาดใหญ่ในประเทศไทยภายใต้โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU (Time of Use) ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีการคิดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand Charge) และเป็นกลุ่มเป้าหมายหลักของการติดตั้งระบบลดค่าการใช้พลังงานสูงสุดด้วยโซล่าเซลล์และแบตเตอรี่ และคำนวณค่า Peak ที่ลดได้และคำนวณมูลค่า Demand Charge ที่ประหยัดได้มาคำนวณค่าพลังงานที่ประหยัดได้ ตลอดอายุโครงการกำหนดพารามิเตอร์ฯ แสดงดังตารางที่ 1 โดยองค์ประกอบและหน้าที่ของระบบประกอบด้วย ระบบโซล่าเซลล์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยพลังงานที่ผลิตได้จะนำไปเก็บไว้ในระบบแบตเตอรี่ สำหรับแบตเตอรี่ทำหน้าที่กักเก็บพลังงานและจะถูกดึงไปใช้งานกรณีต้องการลดลดค่าความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด ในงานนี้อินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางถูกเลือกนำมาใช้งานเพื่อสามารถควบคุมทิศทางการไหลของพลังงานในระบบตามเงื่อนไขที่ออกแบบ

จากรูปที่ 3 ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของบริษัท ซันคิน (ประเทศไทย) จะเห็นได้ว่าการใช้ไฟฟ้าใน 1 วันของบริษัทดังกล่าว มีช่วงเวลาที่มีค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าอยู่ในประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง ซึ่งมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย ใน 15 นาทีสูงสุดในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งตั้งแต่ 30 กิโลวัตต์ แต่ไม่ถึง 1,000 กิโลวัตต์ เมื่อคิดอัตราตามช่วงเวลาการใช้ ที่แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลท์ ความต้องการพลังงานไฟฟ้า 210.00 บาท/กิโลวัตต์ กับค่าพลังงาน Peak 4.3297 บาท/หน่วย ค่าบริการจะอยู่ที่ 312.24 บาท/เดือน ซึ่งค่าใช้จ่ายดังกล่าวสามารถใช้หลักการบริหารจัดการพลังงานเข้ามาช่วยในช่วงที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้



รูปที่ 3 ข้อมูลกิโลวัตต์ ของบริษัท ซันคิน (ประเทศไทย) จำกัด

จากรูปที่ 4 เทคนิคการควบคุมการลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดด้วยโซล่าเซลล์และแบตเตอรี่ จากโรงงานประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง โดยเก็บข้อมูลค่ากำลังไฟฟ้าราย 15 นาทีมาวิเคราะห์ จากรูปดังกล่าวโรงงานนี้มีพฤติกรรมของการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเวลา 10:30 น. - 11:45 น. ที่ 770 กิโลวัตต์ (Peak load) อยู่ช่วงเวลา on peak ตั้งแต่เวลา 09:00 น. - 22:00 น. ของอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU (Time of Use) โรงงานนี้จัดอยู่ในประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าตามอ้างอิงการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แรงดัน 22 – 33 กิโลโวลต์ มีค่าความต้องการที่ต้องจ่ายอยู่ที่ 132.93 บาท/กิโลวัตต์ ในงานวิจัยนี้ได้ตั้งเงื่อนไขการลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 10 % ที่เกิดขึ้นในช่วง Peak Time การเลือกวิเคราะห์ที่ 10% มักเป็นค่าที่ถูกเลือกมาจากการศึกษาเปรียบเทียบในหลายๆ สถานการณ์ เพื่อหาสัดส่วนการลดโหลดที่ให้ผลตอบแทนทางการเงินที่คุ้มค่าที่สุด โดยทั่วไปแล้ว การลด Peak Load ที่มีประสิทธิภาพ (Effective Peak Shaving) จะเกิดขึ้นเมื่อแบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานเพื่อลดความต้องการไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีค่าไฟฟ้าสูงและค่า Demand Charge สูงได้อย่างสม่ำเสมอ พร้อมทั้งความคุ้มค่าทางการลงทุน (Cost-Benefit Analysis) การเลือกค่า 10% อาจเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดระหว่างประสิทธิภาพของการลดโหลดกับขนาดและความจุของแบตเตอรี่ที่ต้องลงทุน หากเลือกเปอร์เซ็นต์ที่สูงเกินไป (เช่น 20-30%) อาจต้องใช้แบตเตอรี่ขนาดใหญ่ขึ้นมาก ซึ่งทำให้ต้นทุนการติดตั้งสูงขึ้นและอาจไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ที่ต่ำเกินไป (เช่น 5%) อาจให้ผลตอบแทนน้อยเกินไปจนไม่คุ้มกับการลงทุน



รูปที่ 4 เทคนิคการควบคุมการลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดด้วยโซล่าเซลล์และแบตเตอรี่

3.2 การสร้างแบบจำลองและจำลองการทำงานของระบบ

การสร้างแบบจำลองและจำลองผลทางเทคนิค (Technical Modeling & Simulation) ขั้นตอนนี้เป็นการนำข้อมูลและพารามิเตอร์จากขั้นตอนที่ 3.1 มาสร้างแบบจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB R2024b นำเข้าข้อมูล ป้อนข้อมูล Load Profile และ PV Profile ราย 15 นาที เข้าสู่แบบจำลองจำลองการทำงานแบบวนซ้ำ สมการตรรกะการควบคุมเพื่อทำ Peak Shaving (Control Logic) เงื่อนไขการจ่ายไฟ (Discharge) เพื่อลด Peak แบตเตอรี่จะจ่ายไฟเมื่อโหลดดังนี้กำหนดเงื่อนไขการควบคุมที่ใช้ดังนี้

1) $PV \rangle\ 600\ W/m^2 \rightarrow Peak \rightarrow Discharge$ (6)

2) $PV \langle\ 600\ W/m^2 \rightarrow Battery \rightarrow charge$ (7)

โดย

PV = แผงเซลล์แสงอาทิตย์ หน่วยเป็น (W/m^2)

เงื่อนไขการจ่ายไฟ (Discharge)

$$P_{load}(t) - P_{pv}(t) \rangle\ P_{Peak,Thres} \; and \; SOC(t) \rangle\ SOC_{\min}$$

$$\rightarrow P_{BESS}(t) = \min \begin{pmatrix} P_{discharge,\max}, P_{load}(t) \\ -P_{pv}(t) - P_{Peak,Thres} \end{pmatrix} \quad (8)$$

เงื่อนไขการชาร์จไฟ (Charge)

$$P_{pv}(t) \rangle\ P_{load}(t) \; and \; SOC(t) \langle\ SOC_{\max}$$

$$\rightarrow P_{BESS}(t) = -\min\begin{pmatrix} P_{charge,\max}, P_{pv}(t) \\ -P_{load}(t) \end{pmatrix} \quad (9)$$

โดย $P_{load}(t)$ = โหลดไฟฟ้าของอาคาร (W), $P_{pv}(t)$ = กำลังการผลิตของโซล่าเซลล์ (W), $P_{Peak,Thres}$ = ค่าเป้าหมายควบคุมโหลดสูงสุด(W), $SOC(t)$ = สถานะพลังงานของแบตเตอรี่ (%), $SOC_{\min}$ = สถานะพลังงานขั้นต่ำของแบตเตอรี่ (%), $SOC_{\max}$ = สถานะพลังงานสูงสุดของแบตเตอรี่ (%), P_{BESS} = กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (W), $P_{discharge,\max}$ = กำลังการจ่ายไฟสูงสุด (W), $P_{charge,\max}$ = กำลังการชาร์จสูงสุด (W)

3.3 การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (Techno-Economic Assessment)

การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis) จากการสำรวจราคาอินเวอร์เตอร์และแบตเตอรี่ของ Huawai ในปี พ.ศ. 2568 มาพิจารณาปัจจัยด้านราคาและแนวโน้มค่าพลังงานของประเทศไทยนำผลลัพธ์ทางเทคนิคมาประเมินความคุ้มค่าทางการเงิน คำนวณผลประโยชน์รายปี คำนวณค่า Peak ที่ลดได้และคำนวณมูลค่า Demand Charge ที่ประหยัดได้มาคำนวณค่าพลังงานที่ประหยัดได้ ตลอดอายุโครงการกำหนดพารามิเตอร์ฯ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ทางเศรษฐศาสตร์

พารามิเตอร์	ระบบโซล่าเซลล์	ระบบแบตเตอรี่	อินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง
เงินลงทุน	18,000 บาท	5,000 (บาท/kWh)	4,000 - 6,000 (บาท/kW)
O&M ($/kW/y)	8 - 12	12 - 18	10 - 15
ประสิทธิภาพ (%)	20 %	90%	97%
อายุการใช้งาน (ปี)	25	10	10 - 15
อัตราการเสื่อมสภาพ	0.5% / ปี	2.0% / ปี	-

4. ผลการทดลองและอภิปราย

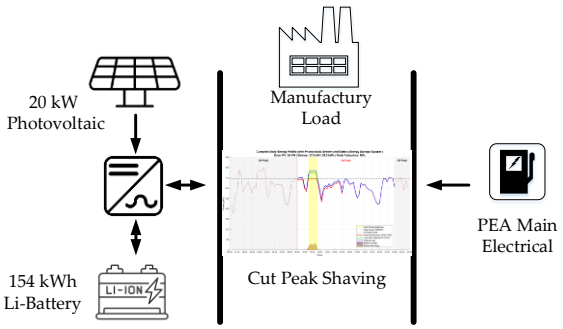
จากการจำลองการทำงานของระบบตามระเบียบวิธีวิจัยที่กำหนดไว้ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ผลการวิเคราะห์ทางเทคนิคและผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

4.1 ผลการวิเคราะห์ทางเทคนิค (Technical Analysis Results)

จากเงื่อนไขทางเทคนิคที่กำหนดในหัวข้อ 3.2 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB R2024b โดยกำหนดเงื่อนไขการควบคุมตามสมการที่ 6 และ สมการที่ 7 จำลองการทำงานของระบบพบว่า จากพฤติกรรมการใช้โหลดของโรงงานดังกล่าว ที่มีค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วง on peak เท่ากับ 770 kW ในช่วงเวลา 10:30 น. - 11:45 น. และกำหนดเงื่อนไขการจ่ายไฟ (Discharge) ตามสมการที่ 8 พร้อมทั้งเงื่อนไขการชาร์จไฟ (Charge) สมการที่ 9 ให้ปริมาณค่าความต้องการฯ ดังกล่าวลดลง 10% เท่ากับ 77 kW ส่งผลให้ค่าความต้องการฯ ลดลงเท่ากับ 693 kW

โดยกำหนดให้เงื่อนไขว่ากรณีที่ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ จากสมการที่ 1 มีค่ามากกว่า 600 W/m^2 กำหนดให้ระบบโซล่าเซลล์จ่ายพลังงานเป็นอันดับแรกจากนั้นระบบแบตเตอรี่จะจ่ายพลังงานเป็นอันดับต่อในสมการที่ 2 มาให้กับระบบและเมื่อกรณีค่าพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่าน้อยกว่า 600 W/m^2 กำหนดให้ระบบโซล่าเซลล์จ่ายพลังงานให้กับระบบแบตเตอรี่เพื่อชาร์จพลังงาน

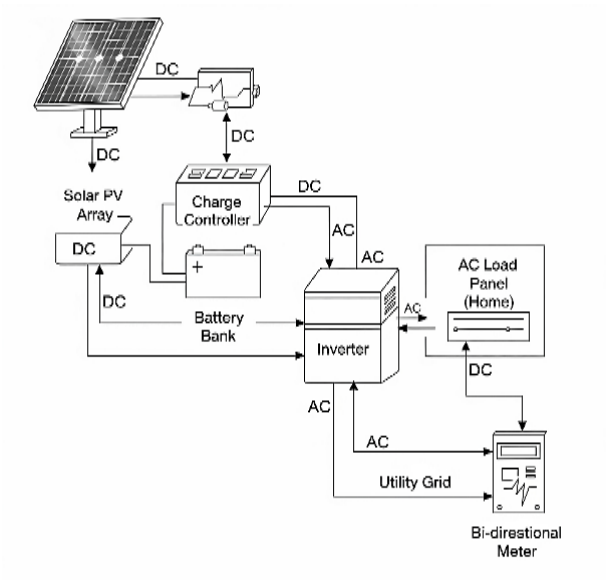
ในงานวิจัยนี้การเลือกขนาดแบตเตอรี่เท่ากับ 154 kW ได้จากพลังงานที่ในช่วงเวลาที่ต้องการลดค่าความต้องการฯ เป็นหลัก และขนาดของระบบแผงโซล่าเซลล์เป็นการกำหนดที่ค่าเริ่มต้น 20 kW เพื่อความเหมาะสมสำหรับการลงทุนในระยะเริ่มต้น ทั้งนี้ขนาดของระบบทั้งหมดจำเป็นต้องใช้คณิตศาสตร์ประยุกต์ด้านการหาที่เหมาะสม (optimization) มาประยุกต์ใช้ซึ่งจะเป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยนี้ โดยรูปที่ 5 แสดงขนาดของอุปกรณ์ประกอบระบบดังกล่าว



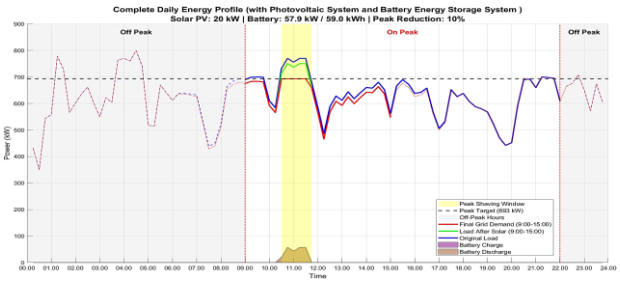
รูปที่ 5 หลักการทำงานของระบบเมื่อมีการเกิด Peak shaving โหลดทั้งหมดของโรงงาน

หลักการทำงานของระบบนี้คือการใช้กลยุทธ์การควบคุมแบบ Rule-Based Control เพื่อลดปริมาณไฟฟ้าสุทธิที่ดึงจาก Utility Grid ให้อยู่ในระดับที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 6 โดยการผลิตและการเก็บพลังงานในช่วงที่มีแสงแดด ระบบโซล่าเซลล์ (Solar PV Array) จะผลิตไฟฟ้า (DC) ซึ่งถูกควบคุมและเก็บไว้ใน Battery Bank ผ่าน Charge Controller การควบคุม Peak: ในช่วงเวลา On Peak (9:00 น. - 22:00 น.) ที่โหลดของโรงงาน Peak สูงเกินค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ P_{Target} = 693 kW ลำดับการจ่ายไฟ: ระบบจะกำหนดให้ PV จ่ายพลังงานเป็นอันดับแรก จากนั้น Battery Bank จะจ่ายพลังงานเป็นอันดับต่อมา ผ่าน Inverter เพื่อเติมเต็มส่วนที่ขาด ทำให้ Final Grid Demand ที่วัดโดย Bi-directional Meter ลดลงมาเท่ากับค่า P_{Target} = 693 kW การควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์สองทิศทาง อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่สำคัญในการควบคุมการไหลของพลังงาน (Discharge/Charge) ตามเงื่อนไขที่ออกแบบ ระบบนี้มีเป้าหมาย

ในการลด Peak Demand ลง 10% หรือ 77 kW เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายความต้องการสูงสุด (Demand Charge) ภายใต้โครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ของประเทศไทย



รูปที่ 6 แบบจำลองเทคนิคการลดค่าความต้องการการลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 7 ผลการจำลองเทคนิคการลดค่าความต้องการการลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดด้วยโปรแกรม MATLAB R2024b

จากผลการจำลองฯ พบว่า เงื่อนไขทางเทคนิคที่กำหนดสามารถควบคุมการจ่ายพลังงานได้แสดงดังรูปที่ 7 ช่วงเวลา 10:30 น. - 11:45 น. ที่เกิดค่าความต้องการฯ ตามกำหนด ระบบโซล่าเซลล์ก็จะทำงานผลิตไฟฟ้าเพื่อช่วยลดโหลดเบื้องต้นก่อน จากนั้นระบบกำหนดให้แบตเตอรี่จ่ายพลังงานตาม จะเห็นว่าแบตเตอรี่คายประจุจ่ายไฟสูงสุดที่ประมาณ 58 kW ซึ่งใกล้เคียงกับพิกัดกำลังสูงสุดของแบตเตอรี่ 57.9 kW ทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้ พร้อมทั้งกรณีที่มีค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดในช่วง On Peak ตรงกับช่วง Peak Sun Hours แบบจำลองจะทำงานตามเงื่อนไขในการจ่ายพลังงานเพื่อลดค่า Peak Load จนกว่าจะหมดค่าพลังงานของแบตเตอรี่ที่ค่า Soc ต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

4.2 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis Results)

4.2.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางเศรษฐศาสตร์

เมื่อนำผลลัพธ์ทางเทคนิคมาประเมินความคุ้มค่าทางการเงินโดยวิเคราะห์ตัวชี้วัดความสามารถในการคืนทุนคือระยะเวลาคืนทุน สมการที่ 3 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ สมการที่ 4 และอัตราผลตอบแทนภายในสมการที่ 5 ได้ผลลัพธ์ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางเศรษฐศาสตร์

ตัวชี้วัด (Metric)	หน่วย
ระยะเวลาคืนทุน (PBP)	7.86 ปี
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)	-141,250 บาท
อัตราผลตอบแทน (IRR)	4.30 %

งานวิจัยนี้ การประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบต้องพิจารณาปัจจัยด้านต้นทุนและช่วงเวลาการลงทุนเป็นสำคัญ

4.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเฝ้าระวังและรอคอย

จากการวิเคราะห์ด้านการลงทุนด้านเศรษฐ์ศาสตร์ดังหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ แสดงให้เห็นว่ายังไม่ควรลงทุน ณ ขณะนี้ แม้ว่าทางเทคนิคจะสามารถทำงานได้

ดังนั้นทางคณะจึงประยุกต์ใช้กลยุทธ์เฝ้าระวังและรอคอย” (Watchful Waiting) จากแนวทาง DSM (Demand Side Management) จากแหล่งข้อมูลของ BloombergNEF (BNEF) องค์การพลังงานระหว่างประเทศ (IEA) [16-17] ชี้ตรงกันว่า ราคาแบตเตอรี่มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในทศวรรษที่ผ่านมา และคาดว่าจะลดลงต่อไปในอนาคต คาดการณ์ถึงปี 2573 ราคาคาดว่าจะลดลงอีกประมาณ 30% [18-19] จากการคำนวณแนวโน้มราคาและผลกระทบต่อดัชนีทางการเงินผลประหยัดต่อปีอยู่ที่จำนวน 122,834 บาท พร้อมการคำนวณแนวโน้มทางเศรษฐศาสตร์ตามกลยุทธ์เฝ้าระวังและรอคอยสรุปได้ดังตารางที่ 3 ต่อไปนี้

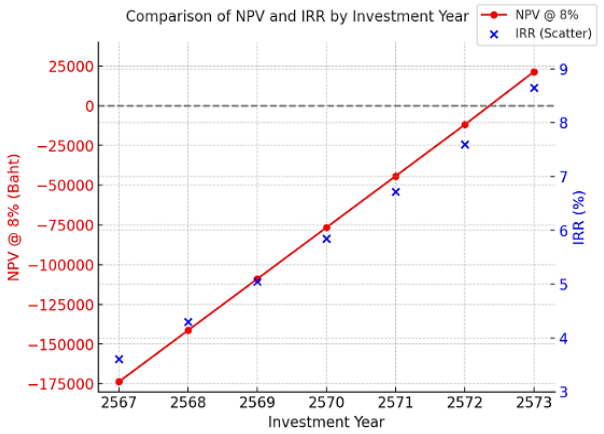
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ทางเศรษฐศาสตร์ตามกลยุทธ์เฝ้าระวังและรอคอยภายใต้เงื่อนไขการคาดการณ์ราคาแบตเตอรี่ในอนาคต

ปีที่ลงทุน	ราคาแบตเตอรี่คาดการณ์ (บาท/kWh)	ต้นทุนลงทุนรวม (บาท)	ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
2567	4,140	997,560	8.12
2568	3,930	965,220	7.86
2569	3,720	932,880	7.6
2570	3,510	900,540	7.33
2571	3,300	868,200	7.07
2572	3,090	835,860	6.81
2573	2,880	803,520	6.54

ในงานนี้ได้กำหนดเงื่อนไขเป็น 2 กรณีได้แก่ กรณีที่ 1 ให้ IRR ชนะเงินเฟ้อ (Target IRR > 3%) เพื่อให้โครงการให้ผลตอบแทนมากกว่า 3% ต้นทุนการลงทุนรวม จากตารางที่ 3 คาดการณ์ราคาแบตเตอรี่ตั้งแต่ปี 2567 (4,140 บาท/kWh) เป็นต้นไป หมายความว่าโครงการนี้สามารถให้ผลตอบแทนชนะเงินเฟ้อ 3% ได้ตั้งแต่ปีแรกที่พิจารณา

สำหรับกรณีที่ 2 ให้ IRR ชนะอัตราคิดลดของโครงการ (Target IRR > 8%)ในมุมมองของนักลงทุน การที่ IRR ชนะเงินเฟ้ออย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ แต่ควรจะชนะ "อัตราคิดลด" หรือ "Hurdle Rate" ของโครงการ ซึ่งเราใช้อยู่ที่ 8% เพื่อให้ถือว่าเป็นการลงทุนที่น่าดึงดูดใจอย่างแท้จริงเพื่อให้โครงการให้ผลตอบแทนมากกว่า 8% ดังนั้น ต้นทุนของแบตเตอรี่ต้องไม่เกิน: 3,013 บาท/kWh

จากรูปที่ 8 เป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แบบพลวัต ภายใต้กลยุทธ์ "เฝ้าระวังและรอคอย" (Watchful Waiting) โดยพิจารณาถึงแนวโน้มการลดลงของราคาแบตเตอรี่ในอนาคต แกน X (Investment Year): ปีที่ตัดสินใจลงทุน (ตั้งแต่ พ.ศ. 2567 ถึง 2573) แกน Y ซ้าย (NPV @ 8%): มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, เส้นสีแดง) ที่อัตราคิดลด (Discount Rate) 8% แกน Y ขวา (IRR): อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, จุดสีน้ำเงิน) จุดคุ้มทุนเชิงกลยุทธ์: กราฟแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าในช่วงปี 2567-2572 ทั้ง NPV และ IRR ยังอยู่ในระดับที่ไม่น่าลงทุน (NPV < 0, IRR < 8%) จุดตัด (Strategic Break-even Point): โครงการจะเริ่มมีความน่าลงทุน (NPV > 0 และ IRR > 8%) ใน ปี พ.ศ. 2573 ซึ่งเป็นปีที่ราคาแบตเตอรี่คาดว่าจะลดลงสู่ระดับ 2,880 บาท/kWh



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบ NPV และ IRR ตามปีที่ลงทุน

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาเชิงเทคนิคและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดด้วยโซล่าเซลล์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (PV-BESS) โดยเน้นการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่าการลงทุนในระบบดังกล่าวมีความเป็นไปได้ในเชิงเทคนิคแต่ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ขึ้นกับราคาตลาดของเทคโนโลยี โดยเฉพาะราคาแบตเตอรี่ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่กำหนดจุดคุ้มทุนของโครงการแนวทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ งานวิจัยในอนาคตควรพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้ ข้อจำกัดของค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่กรณีท้องฟ้าแปรปรวนซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการผลิตพลังงานจากโซล่าเซลล์ ราคาและแนวโน้มค่าพลังงานของประเทศไทย และควรพิจารณาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ในแผนเศรษฐศาสตร์ (Battery Degradation Model) เพื่อสะท้อนต้นทุน ในระยะยาว ศึกษาเทคนิค Optimization และ Predictive Control เพื่อเปรียบเทียบกับ Rule-Based Control และหาจุดสมดุลที่เหมาะสมระหว่างต้นทุน ความซับซ้อน และความคุ้มค่า

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ และสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่สนับสนุนอุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, “โครงสร้างและอัตราค่าไฟฟ้าของประเทศไทย,” 2025. [Online]. Available: https://www.erc.or.th. [Accessed: Jun. 28, 2025].

[2] กัญจน์ นาคเอี่ยม, "การลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการควบคุมการจ่ายพลังงานของอินเวอร์เตอร์ร่วมกับการทำนายการใช้ภาระทางไฟฟ้า ARIMA," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 2562.

[3] S.T. Aduda and F.M. Labeodan, "A Rule-Based Control Strategy for Peak Shaving with a Battery Energy Storage System in the Day-Ahead Market," in *2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, pp. ,2021.

[4] J. Smith and A. Johnson, “Global energy challenges and peak demand management,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 3, pp. 1234-1245, 2021.

[5] L. Chen, T. Wang, and Y. Li, “Impact of peak demand on power grid stability and greenhouse gas emissions,” Energy Policy, vol. 150, pp. 112001, 2022.

[6] M. Davis and R. Brown,“The role of renewable energy and energy storage in peak shaving,” Applied Energy*, vol. 300, pp. 117321, 2023.

[7] P. White and K. Green, “Integration of PV and BESS for enhanced grid stability and peak load reduction,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 38, no. 1, pp.123-132, 2023.

[8] Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), Thailand Energy Statistics 2023, Ministry of Energy, 2023.

[9] Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Power Development Plan (PDP) 2018-2037 (Revision 1), 2022.

[10] S. Boonprasert and N. Chuangchai, "Peak shaving strategies for energy management in Thailand," Journal of Energy and Environment, vol. 42, no. 2, pp. 87-96, 2024.

[11] H. Li, "Economic evaluation of energy storage systems: A comprehensive review," Journal of Energy Storage*, vol. 50, pp. 104273, 2022.

[12] A. Z. Khan, "Techno-economic analysis of solar PV-battery storage systems for peak load shifting," Renewable Energy, vol. 180, pp. 100-110, 2021.

[13] B. Wang, "Challenges and opportunities in advanced modeling of PV-BESS for peak shaving," Energy Conversion and Management, vol. 260, pp. 115500, 2022.

[14] D. K. Sharma and S. R. Sharma, "Comparative analysis of control techniques for peak load management using hybrid renewable energy systems," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 55, pp. 102923, 2023.

[15] T. Panyasorn and C. Limcharoen, "Feasibility study of solar PV-BESS for peak shaving in Thai commercial buildings," Energy Reports, vol. 9, pp. 2000-2009, 2023

[16] International Energy Agency, "Global EV Outlook 2024," IEA, Paris,May2024. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024. [Accessed: Jun. 28, 2025].

[17] International Energy Agency, "Batteries and Secure Energy Transitions," IEA, Paris, Apr. 2024. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions. [Accessed: Jun. 28, 2025].

[18] J. Chen and P. K. Larsen, "Future Cost and Performance Projections of Battery Technologies for Utility-Scale Energy Storage: A Review," in *2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Orlando, FL, USA, pp. 1-5, 2023.

[19] A. K. Swain and S. K. Singh, "Techno-Economic Analysis of Battery Energy Storage Systems Considering Future Price Reductions for Grid Support," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 1, pp. 245-255, Jan.-Feb, 2023.