



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

กลยุทธ์การจัดตารางการใช้ไฟฟ้าสำหรับระบบการจัดการพลังงานภายในบ้านอยู่อาศัย ที่ติดตั้งระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ – แบตเตอรี่จัดเก็บพลังงาน

Electricity scheduling strategy for home energy management system based on the hybrid photovoltaic - battery energy storage system

นนทนันท์ พลพันธ์* ประชา คำภักดี บงกช สุขอนันต์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Nonthanan Phonphan* Pracha Khamphakdi Bongkoj Sookananta

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubonratchathani 34190

* Corresponding author.

E-mail: nonthanan.ph.59@ubu.ac.th; Telephone: 098 104 6832

วันที่รับบทความ 26 มีนาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 1 29 เมษายน 2564; วันที่ตอบรับบทความ 7 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกลยุทธ์การจัดตารางการใช้ไฟฟ้าสำหรับบ้านอยู่อาศัยที่ติดตั้งระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าพลังงานไฟฟ้า ลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด และยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ภายใต้เงื่อนไขความสมดุลพลังงาน พลังงานแสงอาทิตย์ และความจุของแบตเตอรี่ ในการจำลองการทำงานของระบบพิจารณาแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวันและพิจารณาโครงสร้างราคาค่าไฟฟ้าอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค สำหรับกำหนดสถานะการประจุของแบตเตอรี่และเทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก สำหรับกำหนดตารางการใช้ไฟฟ้า ผลการจำลองพบว่า สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้า ลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานยาวนาน การศึกษานี้ยืนยันว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าในบ้านอยู่อาศัย

คำสำคัญ

ระบบผสมผสาน ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้งาน สถานะการประจุของแบตเตอรี่ การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค การควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

Abstract

This paper proposes electricity scheduling strategy for home energy management system based on the hybrid photovoltaic - battery management system. Objective to reduce the cost of electrical energy, the maximum power demand and extends battery life. Under the condition of energy balance, solar energy and battery capacity. In simulation model the daily load profiles and the time of use rate (TOU) tariff are considers. The results show that the system with the Particle Swarm Optimization technique and the Fuzzy Logic Control application can reduce the energy cost in significantly. In addition, the simulation carried out to verify the usefulness of the proposed system to improve the home energy management system by reducing the peak demand.

Keywords

hybrid systems; photovoltaic system; battery; time of use rate (TOU); state of charge (SOC); particle swarm optimization (PSO); fuzzy logic control (FLC)

1. บทนำ

ลดการใช้พลังงานเป็นหนึ่งในความท้าทายที่สำคัญของศตวรรษที่ 21 ทั้งในด้านของการสร้างความมั่นคงของระบบไฟฟ้า การผลิตและใช้ไฟฟ้าด้วยต้นทุนที่เหมาะสม รวมถึงการผลิตและใช้ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารที่อยู่อาศัยอุตสาหกรรมและอาคารพาณิชย์มีการใช้พลังงานประมาณ 40% ของการใช้พลังงานทั่วโลกและมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้น [1] ซึ่งเป็นความท้าทายที่สำคัญสำหรับการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้า ภายใต้ข้อจำกัด ความแม่นยำในการทำนายความต้องการใช้ไฟฟ้าในอนาคต ข้อจำกัดในการพัฒนาโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ การเพิ่มสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียน และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของผู้ใช้ไฟฟ้าที่เป็นทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภคทำให้ระบบไฟฟ้าต้องได้รับการพัฒนาเพื่อยกระดับความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงข้างต้น ในระบบไฟฟ้าแบบดั้งเดิมนั้น ไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นไม่สามารถถูกกักเก็บไว้ได้ วิศวกรผู้ดูแลระบบจะต้องรักษาระดับการผลิตไฟฟ้าให้มากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้าตลอดเวลา เพื่อเสถียรภาพและความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า [2]

สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้า การนำระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System) มาร่วมกับระบบไฟฟ้าแบบดั้งเดิมจะช่วยลดต้นทุนค่าไฟฟ้าสำหรับผู้บริโภคภายใต้โครงสร้างราคาแบบ TOU ลงได้ เพราะผู้บริโภคไฟฟ้าสามารถที่จะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ไฟฟ้ามีราคาถูก (ช่วง Off-peak) และนำไฟฟ้าที่กักเก็บไว้ในระบบกักเก็บพลังงานมาใช้ในช่วงที่ไฟฟ้ามีราคาแพง (ช่วง Peak) ทำให้ลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า (Demand) ได้อีกด้วย นอกจากนี้ การใช้ระบบกักเก็บพลังงานยังเป็นการสร้างความมั่นคงทางพลังงานให้ผู้บริโภค ลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า ลดความเสี่ยงจากปัญหาไฟฟ้ามืด (outages) รวมไปถึงช่วยรักษาค่าความตึงเครียดไฟฟ้า (voltage) ให้คงที่ [3] โดยหากใช้ระบบกักเก็บพลังงานควบคู่กับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานทดแทน เช่น พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีความผันผวนและ

ควบคุมไม่ได้ อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานและความมั่นคงของระบบไฟฟ้า การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานสามารถช่วยลดความผันผวนของพลังงานไฟฟ้า เพิ่มมูลค่าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าใช้เอง พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำไปจ่ายให้กับโหลดไฟฟ้าภายในบ้านอยู่อาศัยก่อน พลังงานไฟฟ้าส่วนที่เหลือ สามารถส่งกลับเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า กรณีได้ทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้ากับการไฟฟ้าในพื้นที่นั้นๆ ดังนั้นมูลค่าหรือประโยชน์หลักของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้งานในบ้านที่อยู่อาศัย จะมาจากการลดค่าไฟฟ้าเป็นหลัก หากต้นทุนของกักเก็บพลังงานต่ำเพียงพอหรือราคาขายปลีกไฟฟ้าสูงพอ การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานสามารถถูกนำมาใช้เพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ส่วนเกิน (excess electricity) เพื่อเก็บไว้ใช้ช่วงเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์หยุดทำงาน หรือเก็บไว้ใช้ช่วงเวลาที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงกว่าไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ณ ขณะนั้น จะช่วยให้ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับผลตอบแทนจากการลงทุนในระบบเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage Device) ที่นิยมนำมาใช้ในระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า สถานะการประจุ (State of Charge ; SOC) คือพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ความจุที่คงเหลือของแบตเตอรี่และสถานะของสุขภาพ (State of health; SOH) คือพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบ่งชี้การเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ การกำหนดค่า SOC ที่เหมาะสมสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงาน สามารถลดความผันผวนของระบบไฟฟ้า สร้างสมดุลของการใช้ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการใช้ไฟฟ้า ลดค่าพลังงานไฟฟ้า และยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้น [1,4]

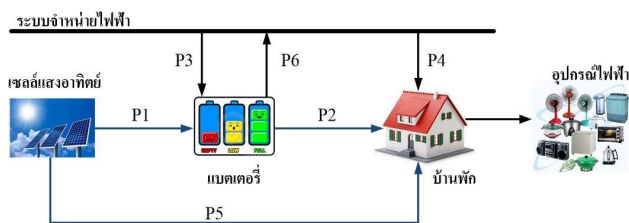
ในบทความนี้เป็นการนำเสนอขั้นตอนวิธีการจัดการพลังงานในระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่เชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้า สำหรับบ้านอยู่อาศัย

โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) ร่วมกับเทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic control; FLC) เพื่อช่วยในการตัดสินใจสถานะการประจุที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ ตารางการทำงานของระบบจำลอง และหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับบ้านอยู่อาศัย โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการการไหลของพลังงานไฟฟ้า ลดต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้า ลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด ลดความผันผวนของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานทดแทน ลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า ลดความเสี่ยงจากปัญหาไฟฟ้าดับ (outages) สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทบ้านอยู่อาศัยภายใต้โครงสร้างอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU)

บทความนี้มีการจัดระเบียบหัวข้อดังนี้ หัวข้อที่ 2 ระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ - แบตเตอรี่ หัวข้อที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หัวข้อที่ 4 วิธีการแก้ปัญหาหัวข้อที่ 5 ขั้นตอนวิธีการจัดการพลังงานหัวข้อที่ 6 ปัจจัยสำหรับการจำลองการจัดการพลังงานไฟฟ้า หัวข้อที่ 7 ผลการจำลอง และหัวข้อที่ 8 สรุปผลการศึกษา

2. ระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์-แบตเตอรี่

ระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์-แบตเตอรี่ ประกอบด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดบ้านอยู่อาศัย ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังของระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์-แบตเตอรี่

แผนผังของระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์-แบตเตอรี่ [2,4] แสดงในรูปที่ 1 ลูกศรแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า เมื่อ

P_1 คือ กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อประจุแบตเตอรี่

P_2 คือ กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อจ่ายโหลด

P_3 คือ กำลังไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อประจุแบตเตอรี่

P_4 คือ กำลังไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อจ่ายโหลด

P_5 คือ กำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อจ่ายโหลด

P_6 คือ กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อจ่ายกลับเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์-แบตเตอรี่ ดังรูปที่ 1 จำเป็นต้องมีระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC/AC Converter) และ ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC/DC Converter) สำหรับแปลงรูปแบบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้มีรูปแบบเดียวกัน

2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic System)

จากแผนผังของระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์-แบตเตอรี่ ดังรูปที่ 1 บทความนี้พิจารณาภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถรองรับความต้องการไฟฟ้าของโหลดในบ้านอยู่อาศัยได้ทั้งหมด ดังนั้นบ้านอยู่อาศัยจะต้องเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{PV}) คำนวณได้จากสมการ (1) [1-2,5-7,8]

$$P_{PV} = \eta_{PV} I_{PV} A_C \quad (1)$$

เมื่อ

P_{PV} คือ เอาต์พุตพลังงานรายชั่วโมงจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (kW)

A_C คือ ขนาดพื้นที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ (m^2)

η_{PV} คือ ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

I_{PV} คือ ความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ (kW/m^2)

การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์รายชั่วโมง ($P_{PV} \cdot h$) ในหน่วย kWh แสดงได้ดังสมการ (2)

$$E_{PV,h} = P_{PV} h \quad \forall h \in \{1, 2, \dots, 24\} \quad (2)$$

ดังนั้นปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์รายวันทั้งหมด (E_{PV}) ที่ติดตั้งในบ้านอยู่อาศัยในหน่วย kWh แสดงได้ดังสมการ (3)

$$E_{PV} = \sum_{h=1}^{24} E_{PV,h} \quad (3)$$

2.2 ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปไฟฟ้ากระแสตรง $P_{DC,BATT}(t)$ โดยสภาวะการทำงานของแบตเตอรี่แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการคายประจุและการประจุประจุ สำหรับช่วงการคายประจุพลังงานจากแบตเตอรี่จะจ่ายให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าหรือจ่ายโหลด $P_{DC,BATT}(t) \geq 0$ ผ่านเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือคอนเวอร์เตอร์ ส่วนในช่วงการประจุพลังงานจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าหรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายผ่านเครื่องประจุ ปริมาณกำลังไฟฟ้าของการประจุ/คายประจุขึ้นอยู่กับความจุของแบตเตอรี่ $C_{BATT}(t)$ แสดงได้ดังสมการ (4)-(7) [10-12]

$$P_{BATT(t)} = \begin{cases} P_{DC,BATT}(t) \geq 0 \text{ (Discharging)} \\ P_{DC,BATT}(t) \leq 0 \text{ (Charging)} \end{cases} \quad (4)$$

$$C_{BATT}(t) = C_{REF}(t) - \int Idt \quad (5)$$

$$C_{BATT}(t+1) = C_{BATT}(t) - P_{DC,BATT}(t) \times \Delta t \quad (6)$$

$$E_{BATT}(t) = P_{DC,BATT}(t) \times \Delta t \quad (7)$$

เมื่อ

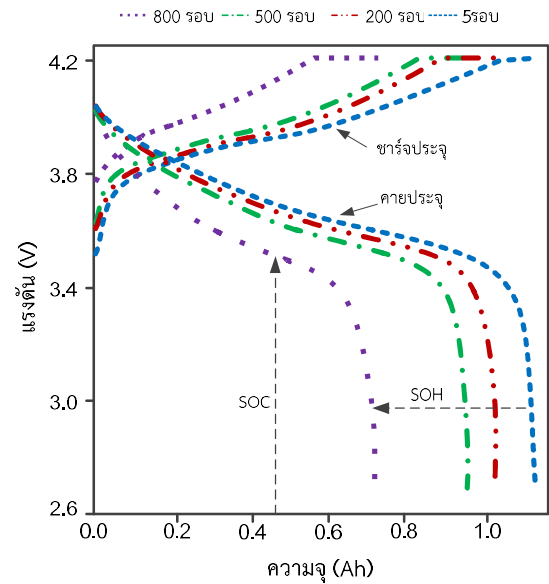
$P_{BATT(t)}$ คือ กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (W)

$E_{BATT}(t)$ คือ พลังงานในการประจุ/คายประจุจากแบตเตอรี่มีหน่วยวัดเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh)

กราฟคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน-ความจุของแบตเตอรี่ตามจำนวนรอบการใช้งาน แสดงในรูปที่ 2

ความจุแบตเตอรี่ (Battery Capacity; $C_{REF}(t)$) เป็นปริมาณพลังงานที่แบตเตอรี่สามารถประจุเต็ม ความจุของ

แบตเตอรี่มีหน่วยเป็นแอมแปร์-ชั่วโมง (Ah) อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปคูณกับระบบแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ความจุของแบตเตอรี่สามารถวัดเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) พลังงานที่สะสมไว้ในแบตเตอรี่ ณ เวลา t ใดๆ สามารถแสดงได้จากสถานะการประจุ SOC (%) เป็นอัตราส่วนระหว่างความจุที่เหลืออยู่ ($C_{BATT}(t)$) ต่อความจุสูงสุดของแบตเตอรี่ ($C_{REF}(t)$) คำนวณได้ดังสมการ (8)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของแรงดันและความจุของแบตเตอรี่ตามจำนวนรอบการใช้งาน [14]

$$SOC(\%) = \frac{C_{BATT}(t)}{C_{REF}(t)} \times 100\% \quad (8)$$

ระบบที่พิจารณาในบทความนี้ดังรูปที่ 1 ความจุของแบตเตอรี่จะเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิก เนื่องจากการประจุประจุไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์และระบบจำหน่ายไฟฟ้า การคายประจุไฟฟ้าเป็นไปตามความต้องการของโหลด สำหรับรูปแบบการผลิตไฟฟ้าที่กำหนดตามความต้องการของโหลดส่งผลกระทบต่อ SOC ของแบตเตอรี่ SOC ณ เวลาใดๆ แสดงได้ดังสมการ (9) [4, 5, 7, 10-11]

$$SOC(t+1)=SOC(t)+\eta_c \sum_{\tau=0}^{t-1} [P_1(\tau)+P_3(\tau)] - \eta_D \sum_{\tau=0}^{t-1} [P_2(\tau)+P_6(\tau)] \quad (9)$$

เมื่อ

$SOC(t)$ คือ ค่า SOC ณ เวลาปัจจุบัน

$SOC(t+1)$ คือ SOC ณ เวลา $t+1$

$\eta_c \leq 1$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการประจุของแบตเตอรี่

$\eta_D \leq 1$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการคายประจุของแบตเตอรี่

ขอบเขตของ SOC ควรถูกจำกัด ไว้ภายใต้เงื่อนไขดังสมการ (10) เพื่อให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

$$SOC_{min} \geq SOC \geq SOC_{max} \quad (10)$$

ค่ากระแสหรือกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แบตเตอรี่จะถูกประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) โดยความเร็วในการประจุหรือคายประจุ ($C-RATE$) เป็นข้อกำหนดที่กำหนดจากผู้ผลิต เวลาขั้นต่ำในการประจุแบตเตอรี่ให้เต็มจากความจุที่ว่างเปล่าถึงเต็มพิกัด (T_S) ในอีกมุมมองหนึ่ง $C-RATE$ แสดงขีดจำกัดของการประจุหรือคายประจุจากแบตเตอรี่ (C_{RATE}) (และกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ ($P_{DC,BATT}^{Max}(t)$) แสดงดังสมการ (11) และ (12)

$$C_{RATE} = \frac{1}{T_S} \quad (11)$$

$$P_{DC,BATT}^{Max}(t) = C_{RATE} \times C_{REF}(t) \quad (12)$$

อายุการใช้งานแบตเตอรี่ หรือ สถานะสุขภาพ ใช้สำหรับการกำหนดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ 2 แบบ คือ อายุการใช้งานตามปฏิทินคือแสดงในระยะเวลาปฏิทิน ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับประจุหรือการคายประจุของแบตเตอรี่ และอายุการใช้งานตามรอบการใช้งาน แสดงในรูปของจำนวนรอบการประจุหรือการคายประจุของแบตเตอรี่ [1] ในบทความนี้พิจารณาอายุการใช้งานตามรอบการใช้งาน โดย

ปกติแล้วนับอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จากผู้ผลิต แสดงดังสมการ (13) [4, 11]

$$SOH(\%) = \frac{C_{REF}(t)}{C_{REF,NOM}} \times 100 \quad (13)$$

เมื่อ

$SOH(\%)$ คือ สถานะสุขภาพหรืออายุการใช้งานของแบตเตอรี่

$C_{REF}(t)$ คือ ความจุสูงสุดของแบตเตอรี่ที่เวลา t ,

$C_{REF,NOM}$ คือ ความจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่

2.3 โหลดในบ้านอยู่อาศัย (Household Appliances)

ความต้องการพลังงานไฟฟ้าในบ้านอยู่อาศัยในหนึ่งวัน (ชั่วโมง 24) ความต้องการพลังงานรายชั่วโมงสำหรับโหลดแต่ละรายการ (E_a) จะมีหน่วยเป็น kW แสดงดังสมการ (14)

$$E_a = [E_{1,a}, E_{2,a}, \dots, E_{h,a}] \quad (14)$$

$$\forall h \in \{1, 2, \dots, 24\}, \forall a \in N$$

ความต้องการพลังงานรายชั่วโมงทั้งหมด (E_h) สำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้าแสดงดังสมการ (15)

$$E_h = \sum_{a=1}^N E_{h,a} \quad E_h = \sum_{a=1}^N E_{h,a} \quad (15)$$

ดังนั้นความต้องการพลังงานไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนทั้งหมดใน 1 วัน (E_T) ขึ้นอยู่กับการใช้พลังงานไฟฟ้าของโหลดช่วงเวลา h ($E_{h,a}$) แสดงดังสมการ (16)

$$E_T = \sum_{a=1}^N \sum_{h=1}^{24} E_{h,a} \quad (16)$$

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

ในบทความนี้พิจารณาราคาไฟฟ้าตามการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย สำหรับการใช้ไฟฟ้ากับบ้านเรือนที่อยู่อาศัย ประเภท 1.2.2 อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU) [14] ซึ่งราคาไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

แบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา ราคาไฟฟ้าสูงสำหรับช่วงความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูง (Peak) และราคาไฟฟ้าต่ำ สำหรับช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ (Off-Peak) และพิจารณาพลังงานที่เหลือจากการใช้งานขายให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในอัตราซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนในรูปแบบ Feed-in Tariff (FIT) แสดงดังสมการ (17)

$$\rho(t) = \begin{cases} \rho_k, & t \in T_k, 09.00 \leq T_k < 22.00h \\ \rho_o, & t \in T_o, 22.00 \leq T_o < 09.00h \\ \rho_s, & t \in T_s, 00.00 \leq T_s < 24.00h \end{cases} \quad (17)$$

เมื่อ

ρ_k = 5.7982 บาท/kWh เป็นราคาในช่วงความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูง (Peak)

ρ_o = 2.6369 บาท/kWh เป็นราคาในช่วงความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่ำ (Off-Peak)

ρ_s = 2.20 บาท/kWh เป็นราคารับซื้อไฟฟ้าส่วนเกินจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1 การจัดการพลังงานไฟฟ้าที่นำเสนอมี 2 ส่วน ส่วนแรกคือค่าใช้จ่ายในการซื้อไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า ส่วนที่สองคือรายได้จากการขายไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของต้นทุนทั้งหมด (E_{cost}) แสดงดังสมการ (18)

$$E_{cost} = \sum_{t \in T_k} \rho_k [P_3(t) + P_4(t)] + \sum_{t \in T_o} \rho_o [P_3(t) + P_4(t)] - \sum_{t \in T_s} \rho_s P_6(t) \quad (18)$$

เมื่อ

P_1 คือ กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อประจุแบตเตอรี่

P_2 คือ กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อจ่ายโหลด

P_3 คือ กำลังไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อประจุแบตเตอรี่

P_4 คือ กำลังไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อจ่ายโหลด

P_5 คือ กำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อจ่ายโหลด

P_6 คือ กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อจ่ายกลับเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตัวแปรควบคุม $P_i(t) = 1, 2, \dots, 6, 0 \leq t < 24$ ต้องตอบสนองเงื่อนไขดังนี้

1) เงื่อนไขการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ผลรวมของกำลังไฟฟ้าสำหรับประจุแบตเตอรี่และสำหรับการใช้งานโหลดจะต้องน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ แสดงดังสมการ (19)

$$P_1(t) + P_5(t) \leq P_{PV}(t) \quad (19)$$

2) เงื่อนไขด้านสมดุลกำลังไฟฟ้า

ความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดจะต้องเท่ากับผลรวมของกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ระบบจำหน่ายไฟฟ้า และเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังสมการ (20)

$$P_2(t) + P_4(t) + P_5(t) = P_L(t) \quad (20)$$

3) เงื่อนไขขอบเขตสถานะการประจุ

สถานะการประจุของแบตเตอรี่จะต้องน้อยกว่าความจุสูงสุดของแบตเตอรี่ (SOC_{max}) และมากกว่าค่าที่ความจุขั้นต่ำของแบตเตอรี่ (SOC_{min}) แสดงดังสมการ (21)

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (21)$$

4) เงื่อนไขของการไหลของกำลังไฟฟ้า

เพื่อความปลอดภัยและเหตุผลทางกายภาพอื่นๆการไหลของกำลังไฟฟ้าของแต่ละแหล่งจ่ายจะต้องไม่เป็นลบและมีค่าน้อยค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ แสดงดังสมการ (22)

$$0 \leq P_i(t) \leq P_i^{max}, (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (22)$$

เมื่อ P_i^{max} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่กำหนดไว้

5) เงื่อนไขของสถานะการประจุของแบตเตอรี่

การคายประจุของแบตเตอรี่ไม่ควรคายประจุจนถึงค่า SOC เริ่มต้น และ SOC สุดท้ายต้องไม่น้อยกว่า SOC เริ่มต้น แสดงดังสมการ (23)

$$SOC(0) \leq SOC(24) \quad (23)$$

4. วิธีการหาค่าที่เหมาะสม

วิธีการแก้ปัญหาที่นำเสนอในการศึกษานี้ ประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) และการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (fuzzy logic controller) ผสมผสานกันเพื่อให้การใช้งานระบบดังรูปที่ 1 สามารถลดค่าใช้จ่ายได้สูงสุด คำอธิบายของเทคนิคเหล่านี้มีดังต่อไปนี้

4.1 การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO)

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) สามารถแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่เชิงเส้นที่ซับซ้อน โดยมาจากการจำลองพฤติกรรมทางสังคมของสัตว์ที่อยู่เป็นกลุ่ม เช่น นก ปลา และฝูงสัตว์ โดยสัตว์เหล่านั้นจะใช้วิธีการกระจายกันค้นหาแหล่งอาหารหรือที่อยู่ที่ดีตามสมบูรณ์ โดยมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลจนสามารถค้นหาและมารวมตัวกันอยู่ในตำแหน่งที่มีความอุดมสมบูรณ์ได้ [16]

ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค เริ่มต้นด้วยการสุ่มหาตำแหน่งของอนุภาคมา 1 ชุด จากนั้นระบบจะค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละรอบของการตัดสินใจโดยอนุภาคแต่ละตัวจะมีการปรับปรุงตำแหน่งตามค่าที่ดีที่สุด 2 ค่า ดังนี้

1) ค่าที่ดีที่สุดของอนุภาค (Particle best : P_{best}) คือ ค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดของการเคลื่อนที่ที่ผ่านมาของตัวมันเอง ซึ่งตำแหน่งค่าที่ดีที่สุดของอนุภาค ($P_{best,i}$) ในรอบการวนซ้ำถัดไป $t+1$ เมื่อ $t \in [0, \dots, N]$ คำนวณได้ดังสมการ (24)

$$P_{best,i}^{t+1} = \begin{cases} P_{best,i}^t, & f(x_i^{t+1}) > P_{best,i}^t \\ x_i^{t+1}, & f(x_i^{t+1}) \leq P_{best,i}^t \end{cases} \quad (24)$$

2) ค่าที่ดีที่สุดของทั้งกลุ่ม (Global best : G_{best}) คือค่าที่เป็นค่าที่ดีที่สุดของการเคลื่อนที่ที่ผ่านมาของทั้งกลุ่ม ตำแหน่งที่ดีที่สุดของทั้งกลุ่ม G_{best} ที่รอบการวนซ้ำที่ t คำนวณได้ดังสมการ (25)

$$G_{best} = \min \{P_{best,i}^t\} | i \in [1, \dots, n] \text{ และ } n > 1 \quad (25)$$

ความเร็วของอนุภาค i (velocity of particle) คำนวณได้จากสมการ (26)

$$v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_1 r_{1j}^t [P_{best,i}^t - x_{ij}^t] + c_2 r_{2j}^t [G_{best} - x_{ij}^t] \quad (26)$$

เมื่อ

v_{ij}^t คือ เวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) ของ

อนุภาค i ในมิติ j รอบการวนซ้ำที่ t

x_{ij}^t คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค i ในมิติ j รอบการวนซ้ำที่ t

$P_{best,i}^t$ คือ ค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดของการเคลื่อนที่ที่ผ่านมาของอนุภาค i ในมิติ j ที่พบตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงรอบการวนซ้ำที่ t

G_{best} คือ ค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดของการเคลื่อนที่ที่ผ่านมาทั้งหมดของอนุภาค i ในมิติ j ที่พบตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงรอบการวนซ้ำที่ t

c_1, c_2 คือ ค่าคงที่การเร่งความเร็วเชิงบวกซึ่งใช้เพื่อกำหนดระดับการมีส่วนร่วมขององค์ความรู้และองค์ประกอบทางสังคม

r_{1j}^t, r_{2j}^t คือ ตัวเลขสุ่มจากการแจกแจง $U(0,1)$ ในรอบการวนซ้ำที่ t

ω คือ น้ำหนักความเฉื่อย (inertia weight) ในรอบการวนซ้ำที่ t

ตำแหน่งของแต่ละอนุภาคจะได้รับการปรับปรุงในพื้นที่การค้นหาโดยสมการ (27)

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}, \quad x_i^0 \sim U(x_{\min}, x_{\max}) \quad (27)$$

เมื่อ $U(x_{\min}, x_{\max})$ คือ การแจกแจงแบบที่ $x_{\min}$ และ $x_{\max}$ เป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับ

เพื่อให้เกิดการลู่เข้าอย่างรวดเร็วและเพื่อให้ได้น้ำหนักความเฉื่อยที่เหมาะสมและความเฉื่อยมีค่าลดลงเป็นเส้นตรงถูกกำหนดตามสมการ (28)

$$\omega^{t+1} = \omega_{\max} - \left[\frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{t_{\max}} \right] t, \omega_{\max} > \omega_{\min} \quad (28)$$

เมื่อ

$\omega_{\min}$ คือ ค่าเริ่มต้นของน้ำหนักความเฉื่อย

$\omega_{\max}$ คือ ค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้ายของน้ำหนักความเฉื่อย

ตามลำดับ

$t_{\max}$ คือ จำนวนรอบการวนซ้ำสูงสุด

t คือ รอบการวนซ้ำปัจจุบัน

4.2 การควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) หรือ ตรรกศาสตร์คลุมเครือ ได้พัฒนามาจากฟัซซีเซต (Fuzzy Set) มีวัตถุประสงค์ในการประมาณการคล้ายการเลียนแบบวิถีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำฟัซซีลอจิกไปประยุกต์ใช้งานมากมายหลายสาขา เช่น ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องซักผ้า ระบบควบคุมการทำงานของกล้องถ่ายรูป ระบบควบคุมการทำงานของหม้อหุงข้าว ระบบควบคุมการจ่ายไฟให้กับตู้เย็น เป็นต้น [17] ฟัซซีลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial True) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (Completely True) กับเท็จ (Completely False) หรือเป็นเซตที่มีค่าความเป็นสมาชิกอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 หรือเขียนเป็นสัญลักษณ์ [0, 1] ส่วนตรรกะแบบจริงเท็จจะเป็นเซตที่มีค่าความเป็นสมาชิกเป็น 0 หรือ 1 หรือเขียนเป็นสัญลักษณ์ {0, 1} เท่านั้น

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยการกำหนดค่าให้กับสมาชิกที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นจึงเป็นส่วนที่สำคัญต่อการดำเนินการของฟัซซี เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกันหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีหลาย

ชนิด แต่ในบทความนี้เลือกใช้ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian Membership Function) เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่า คือ $\{\sigma, c\}$ ซึ่ง c หมายถึงค่าเฉลี่ย และ σ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังสมการ (29) [18]

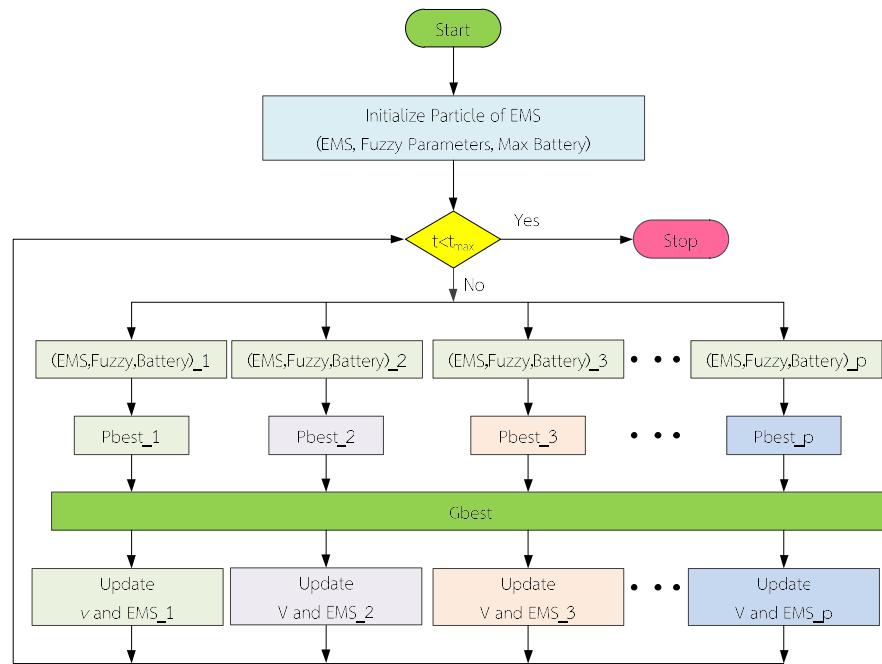
$$f(x; \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (29)$$

5. ขั้นตอนวิธีการจัดการพลังงาน

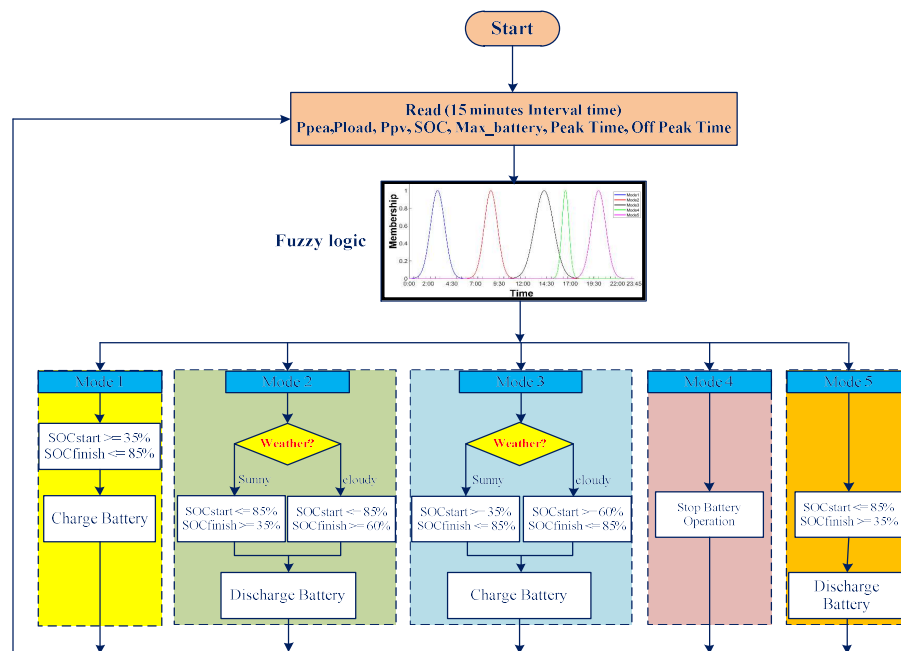
ขั้นตอนวิธีการจัดการพลังงานด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคที่นำเสนอในบทความนี้แสดงรูปที่ 3 ขั้นตอนการจัดการพลังงานที่นำเสนอจะแสดงในรูปที่ 4 ขั้นแรกเป็นการตรวจวัดกำลังการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{PV}) ความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลด (P_{load}) สถานะการประจุ (SOC) และช่วงเวลาของการใช้ไฟฟ้า Peak และ off-Peak time เพื่อคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อชดเชยความผันผวนของกำลังการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจะตั้งค่าเวลาอ้างอิง เพื่อกำหนดโหมดการทำงานที่เหมาะสมทั้ง 5 โหมด การตัดสินใจเลือกโหมดการทำงานของระบบโดยใช้วิธีการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ซึ่งการทำงานแต่ละโหมดมีรายละเอียดดังนี้

โหมดการทำงาน 1 อยู่ในช่วงเวลากลางคืนระบบเซลล์แสงอาทิตย์หยุดการผลิตพลังงานไฟฟ้าและปริมาณความต้องการโหลดค่อนข้างต่ำ และค่าพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลานี้จึงอยู่ในระดับต่ำและแบตเตอรี่จะถูกประจุจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดย SOC เปลี่ยนแปลงจาก 35% ถึง 85%

โหมดการทำงาน 2 อยู่ในช่วงเวลาเช้าระบบเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มผลิตพลังงานไฟฟ้า แต่ปริมาณของพลังงานที่ผลิตขึ้นมีปริมาณน้อย ดังนั้น แบตเตอรี่จะคายประจุเพื่อช่วยจ่ายโหลดในช่วงตอนเช้า การเปลี่ยนแปลงใน SOC ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ กรณีวันที่มีแดดจัดจะเปลี่ยนจาก 85% เป็น 35% และกรณีของวันที่มีเมฆมากมันจะเปลี่ยนจาก 85% เป็น 60% เท่านั้น



รูปที่ 3 ขั้นตอนวิธีการจัดการพลังงานด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค



รูปที่ 4 ขั้นตอนการจัดการพลังงานด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคร่วมกับการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

โหมดการทำงาน 3 อยู่ในช่วงเวลากลางวัน แบตเตอรี่จะประจุด้วยพลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่จะถูกใช้ในโหมดการทำงานถัดไป ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการใช้งานโหลดสูงสุดในบ้านอยู่อาศัย เช่น เดียวกันในโหมดการทำงานที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของ SOC ขึ้นอยู่กับสภาพ

อากาศ กรณีวันที่มีแดดจัดจะเปลี่ยนจาก 85% เป็น 35% และกรณีของวันที่มีเมฆมากมันจะเปลี่ยนจาก 85% เป็น 60%

โหมดการทำงาน 4 แบตเตอรี่จะหยุดทำงานเนื่องจากการประจุพลังงานอย่างเต็มที่สำหรับโหลดสูงสุดในโหมดการทำงานถัดไป

โหมมการทำงาน 5 อยู่ในช่วงตอนเย็นปริมาณการใช้โหมมจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แบตเตอรี่จะเริ่มคายประจุจนกระทั่ง SOC ถึงขีดจำกัดขอบเขตล่าง 35% เพื่อให้แบตเตอรี่จัดการกับโหมมสูงสุดในตอนเย็นในบ้านอยู่อาศัย

ในบทความนี้ข้อจำกัดขอบเขตบน (85%) และขอบเขตล่าง (35%) ของแบตเตอรี่ เพื่อการทำงานที่ปลอดภัยของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบผสมผสานที่มีระบบเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่นั้นไม่ได้นำมาพิจารณา แต่จะอภิปรายถึงวิธีการควบคุมระบบผสมผสานที่ติดตั้งในขั้นตอนการทำงาน การปรับขนาดของระบบผสมผสานที่เหมาะสมกับโหมม ดังนั้นประเด็นสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งเช่นการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจ จึงไม่นำมาพิจารณาในแบบจำลองค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของ เซลล์แสงอาทิตย์ และแบตเตอรี่ถือเป็นค่าเล็กน้อย ดังนั้นจึงไม่นำมาพิจารณาเช่นกัน

ตารางที่ 1 แสดงการทำงานที่ละขั้นตอนของ PSO

Algorithm : PSO

$P = \text{Particle_Initialization}()$

for $it = 1$ to it_max

for $p = 1$ to $\text{size}(P)$

$\text{cost_p} = \text{cost}(EMS_p)$

if $\text{cost_p} < pBest$

$pBest = EMS_p$

end

end

$gBest = \text{best } EMS_p \text{ in } P$

$$\omega' = \omega_{\max} - \left[\frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{t_{\max}} \right] t$$

Fuzzy Parameters = [...]

Max Battery = [...]

for $p = 1$ to $\text{size}(P)$

$$v' = \omega v + c_1 r_1 [P_{best} - EMS_p] + c_2 r_2 [G_{best} - EMS_p]$$

$$EMS_p = EMS_p + v'$$

end

end

6. ปัจจัยสำหรับการจำลองการจัดการพลังงานไฟฟ้า

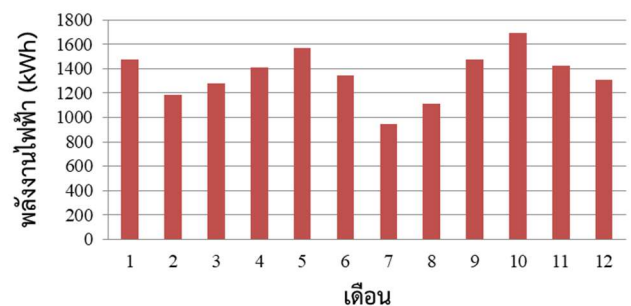
ปัจจัยสำหรับการจำลองการจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบนำเสนอภายใต้สมมติฐานและข้อจำกัด ซึ่งอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

1) พลังงานไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในบทความนี้ได้ประเมินข้อมูลพลังงานไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 kW เป็นเวลา 1 ปี พบว่ากำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะมีความสัมพันธ์กับฤดูกาล แสดงในรูปที่ 5

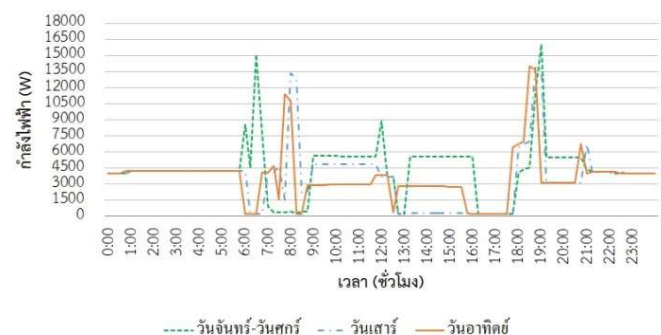
2) การใช้พลังงานไฟฟ้ารายวันของเครื่องใช้ไฟฟ้า ในบทความนี้พิจารณาเครื่องใช้ไฟฟ้าจำนวน 28 รายการพิกัดกำลังไฟฟ้าทั้งหมด 26,658W ดังแสดงในตารางที่ 2 และลักษณะของการใช้ไฟฟ้ารายวันของเครื่องใช้ไฟฟ้าหนึ่งสัปดาห์บทความนี้กำหนดให้การใช้กำลังไฟฟ้าวันจันทร์-ศุกร์มีลักษณะเหมือนกันและมีความแตกต่างกันในวันเสาร์และวันอาทิตย์แสดงในรูปที่ 6

3) ข้อจำกัดในการการหาค่าเหมาะสมที่สุดประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์, สมดุลพลังงาน, กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า, สถานะการประจุ และพลังงานแบตเตอรี่ งานวิจัยนี้จะละเลยขีดจำกัดของการไหลกำลังไฟฟ้าย้อนกลับไปยังระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่าผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถป้อนพลังงานกลับเข้าไปใน ระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้โดยไม่มีข้อจำกัดใดๆ

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 10kW



รูปที่ 5 พลังงานไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 kW



รูปที่ 6 กราฟการใช้กำลังไฟฟ้ารายวันในหนึ่งสัปดาห์

4) กรณีศึกษาถูกแบ่งออกเป็นกรณีศึกษาทั้งหมด 7 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 ไม่มีการติดตั้งระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ – แบตเตอรี่จัดเก็บพลังงาน

กรณีที่ 2 ติดตั้งระบบผสมผสานระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ – แบตเตอรี่จัดเก็บพลังงาน

กรณีที่ 3 ติดตั้งระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ – แบตเตอรี่จัดเก็บพลังงาน ร่วมกับการปรับโหมดการทำงานด้วย Fuzzy Logic

กรณีที่ 4 ติดตั้งระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ – แบตเตอรี่จัดเก็บพลังงานร่วมกับการใช้เทคนิค PSO

กรณีที่ 5 ติดตั้งระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ – แบตเตอรี่จัดเก็บพลังงานร่วมกับการใช้เทคนิค PSO และหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

กรณีที่ 6 ติดตั้งระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ – แบตเตอรี่จัดเก็บพลังงาน ร่วมกับการใช้เทคนิค PSO และปรับโหมดการทำงานด้วย Fuzzy Logic

กรณีที่ 7 ติดตั้งระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ – แบตเตอรี่จัดเก็บพลังงาน ร่วมกับการใช้เทคนิค PSO และปรับโหมดการทำงานด้วย Fuzzy Logic และหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

5) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบ แสดงในตารางที่ 3

7. ผลการจำลอง (Simulation Results)

ระบบทดสอบประกอบด้วยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 10 kW เชื่อมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โหลดที่อยู่อาศัย และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ประเมินข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 5 และกราฟการใช้พลังงานไฟฟ้ารายวันในหนึ่งสัปดาห์ แสดงในรูปที่ 6 สำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในบทความนี้ พิจารณา Crate คือ 1C, ขอบเขตล่างของ SOC เท่ากับ 35%, ขอบเขตบนของ SOC เท่ากับ 85% ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ เท่ากับ 90% สำหรับอัตราค่าไฟฟ้าพิจารณาอัตราแบบ TOU เมื่อ ราคาในช่วงความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูง (Peak) 5.7982 บาท/kWh ราคาในช่วงความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่ำ (Off-Peak) 2.6369 บาท/kWh และราคารับซื้อไฟฟ้า

ส่วนเกินจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ 2.20 บาท/kWh จำลองการทำงานเป็นเวลา 1 ปี

ตารางที่ 2 รายการเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนที่ใช้จำลอง

ลำดับ	ชนิด	กำลังไฟฟ้า (W)
1	พัดลม 1	60
2	พัดลม 2	60
3	พัดลม 3	60
4	พัดลม 4	60
5	พัดลมดูดอากาศ	60
6	เครื่องปรับอากาศ 1	2,400
7	เครื่องปรับอากาศ 2	2,400
8	เครื่องปรับอากาศ 3	1,200
9	เครื่องปรับอากาศ 4	1,200
10	เครื่องปรับอากาศ 5	1,200
11	เครื่องทำน้ำอุ่น 1	3,500
12	เครื่องทำน้ำอุ่น 2	3,500
13	เครื่องทำน้ำอุ่น 3	3,500
14	เครื่องซักผ้า	510
15	ตู้เย็น 1	120
16	ตู้เย็น 2	120
17	เตารีดไอน้ำ	2,000
18	แสงสว่าง 1	36
19	แสงสว่าง 2	36
20	แสงสว่าง 3	36
21	แสงสว่าง 4	180
22	แสงสว่าง 5	180
23	เตาอบลมร้อน	2,100
24	หม้อหุงข้าว	770
25	โทรทัศน์	120
26	เตาไมโครเวฟ	600
27	เครื่องคอมพิวเตอร์	350
28	ปั้มน้ำ	300
กำลังไฟฟ้ารวม		26,658

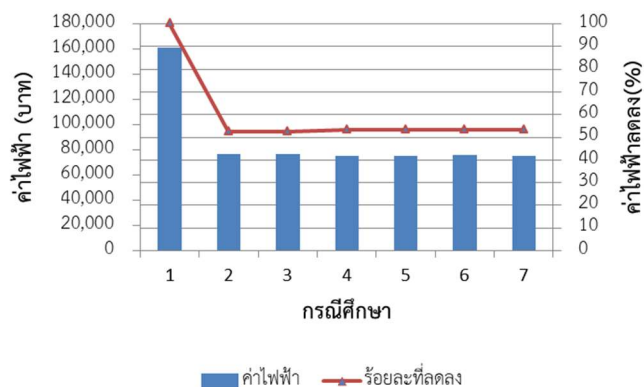
ประสิทธิภาพของวิธีการจัดการการพลังงานด้วยเทคนิค PSO ร่วมกับการควบคุมแบบ FLC ที่นำเสนอในบทความนี้ จำลองการทำงานด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB โดยการประเมินเปรียบเทียบทั้งหมด 7 กรณีศึกษา แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 7-8

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

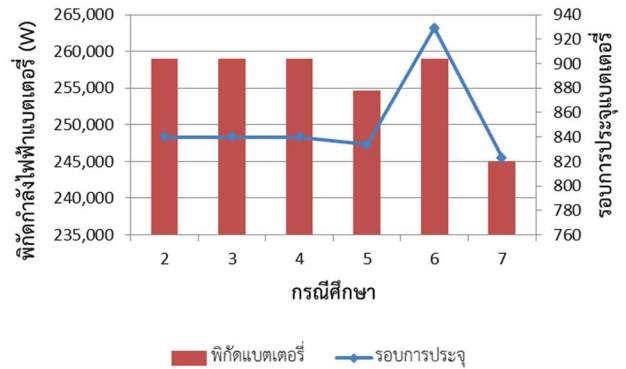
พารามิเตอร์	ค่า
kWH meter	30(100)A
P_{PEA}	16.5kW
P_{batt}	259 kW
$\eta_C = \eta_D$	0.95
DOD	50%
P_{pv}	10kW
η_{pv}	0.9
ω_{min}	0.4
ω_{max}	0.9
$C_1 = C_2$	1.494
i	10
t	20

ตารางที่ 4 ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้า รอบการทำงานของแบตเตอรี่ ขนาดแบตเตอรี่ และร้อยละค่าไฟฟ้าที่ลดลง

กรณีศึกษา	ซื้อไฟฟ้า (บาท)	ขายไฟฟ้า (บาท)	ค่าไฟฟ้า (บาท)	รอบการประจุแบตเตอรี่	ขนาดแบตเตอรี่ (W)	ร้อยละค่าไฟฟ้าที่ลดลง (%)
1	161,379	0	161,379	0	0	100
2	81,205	5,655	75,550	840	259,000	53.18
3	81,205	5,655	75,550	840	259,000	53.18
4	79,751	5,641	74,110	840	259,000	54.08
5	79,887	5,655	74,232	834	254,652	54.00
6	80,255	6,100	74,155	929	259,000	54.05
7	79,758	5,662	74,096	823	245,072	54.09

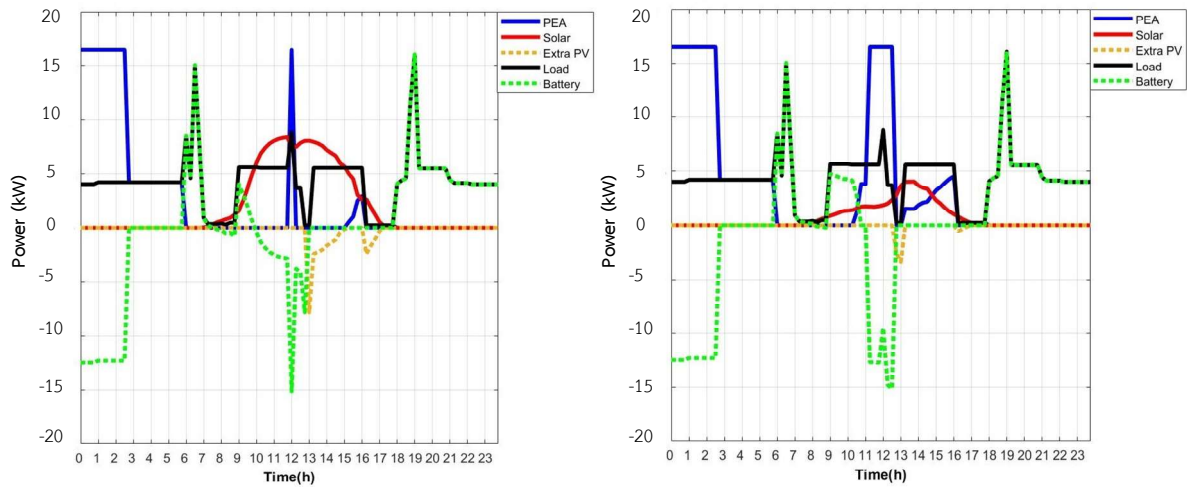


รูปที่ 7 กราฟค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องชำระและร้อยละที่ลดลง

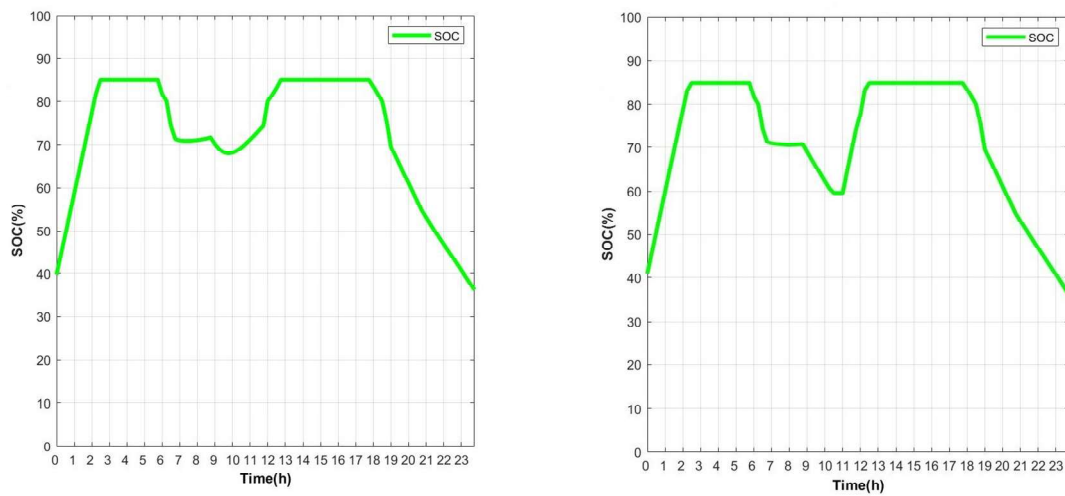


รูปที่ 8 กราฟพิกัดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมในแต่ละกรณีศึกษาและรอบการประจุของแบตเตอรี่

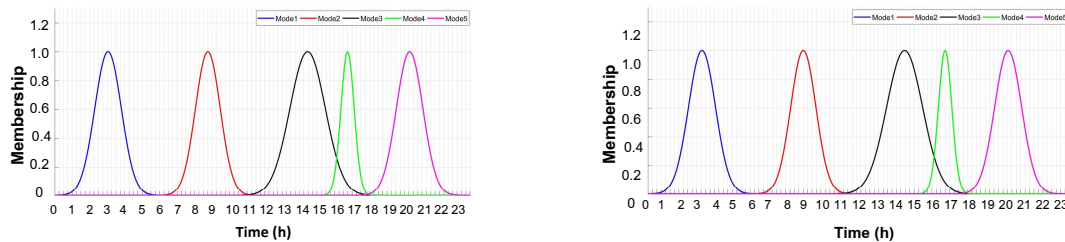
ผลการจำลองการทำงานของระบบทั้ง 7 กรณี แสดงในตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาภาพรวมค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องชำระรอบการประจุของแบตเตอรี่ ขนาดแบตเตอรี่ และร้อยละค่าไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 พบว่า กรณีที่ 7 ติดตั้งระบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์ – แบตเตอรี่จัดเก็บพลังงาน ร่วมกับการใช้เทคนิค PSO ปรับโหมดการทำงานด้วย Fuzzy Logic และหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องชำระมีค่าต่ำที่สุดเป็นเงิน 74,096 บาท/ปี ลดลงร้อยละ 09.54 มีรอบการประจุน้อยที่สุดเป็น 823 รอบ ขนาดพิกัดแบตเตอรี่ต่ำสุดเป็น 245,072 W รูปแบบการไหลของกำลังไฟฟ้ายาววันสำหรับวันที่มีแดดจัดและวันที่มีเมฆมาก ดังแสดงในรูปที่ 9 การจำลองพบว่าขั้นตอนวิธีการจัดที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าสอดคล้องกับรูปแบบการทำงานทั้ง 5 โหมดของระบบที่น่าเสนอ



(ก) การไหลของกำลังไฟฟ้า



(ข) สถานะการประจุ (SOC)



(ค) โหมดการทำงานของแบตเตอรี่

วันที่มีแดดจัด

วันที่มีเมฆมาก

รูปที่ 9 ตัวอย่างกราฟแสดงการทำงานของระบบจำลอง (ก) การไหลของกำลังไฟฟ้า, (ข) สถานะการประจุ SOC ของแบตเตอรี่ และ (ค) การปรับโหมดการทำงานของแบตเตอรี่ ในวันที่มีแดดจัดและวันที่มีเมฆมาก

จากรูปที่ 9 แสดงการทำงานของระบบที่พิจารณาโดยศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า, สถานะการประจุ SOC ของแบตเตอรี่ และการควบคุมการทำงานของแบตเตอรี่ ในวันที่มีแดดจัดและวันที่มีเมฆมาก ขอบเขตล่างของ SOC เท่ากับ 35%, ขอบเขตบนของ SOC เท่ากับ 85% การศึกษาพบว่า

การไหลของกำลังไฟฟ้าในในช่วงเวลากลางคืนระบบเซลล์แสงอาทิตย์หยุดการผลิตพลังงานไฟฟ้าและปริมาณความต้องการโหลดค่อนข้างต่ำ และค่าพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลานี้จึงอยู่ในระดับต่ำและแบตเตอรี่จะถูกประจุจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดย SOC เปลี่ยนแปลงจาก 35% ถึง 85% ในช่วงเวลา

เข้าระบบเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มผลิตพลังงานไฟฟ้า แต่ปริมาณของพลังงานที่ผลิตขึ้นมีปริมาณน้อย แบตเตอรี่จะคายประจุเพื่อช่วยจ่ายโหลดในช่วงตอนเช้า การเปลี่ยนแปลงของ SOC ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ กรณีวันที่มีแดดจัดจะเปลี่ยนจาก 85% เป็น 35% และกรณีของวันที่มีเมฆมากมันจะเปลี่ยนจาก 85% เป็น 60% เนื่องจากไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่าในช่วงเวลาถัดไประบบเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้เพียงพอในโหมดถัดไปเมื่อเปรียบเทียบกับวันที่มีแดดจัดในช่วงเวลากลางวัน แบตเตอรี่จะถูกประจุอีกครั้งด้วยพลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ช่วยลดความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งอาจเกิดขึ้นเมื่อพลังงานทั้งหมดที่สร้างขึ้นจากการไหลเวียนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ส่งไปยังระบบจำหน่ายไฟฟ้า นอกจากนี้พลังงานที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่จะถูกใช้ในโหมดการทำงานถัดไป ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการใช้งานโหลดสูงสุดในบ้านอยู่อาศัย เช่นเดียวกันในโหมดการทำงานที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของ SOC ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ กรณีวันที่มีแดดจัดจะเปลี่ยนจาก 85% เป็น 35% และกรณีของวันที่มีเมฆมากมันจะเปลี่ยนจาก 85% เป็น 60% และแบตเตอรี่จะหยุดการทำงานในโหมดการทำงาน 4 เนื่องจากมีการประจุพลังงานอย่างเต็มที่สำหรับโหลดสูงสุดในโหมดการทำงานถัดไป ในช่วงตอนเย็นปริมาณการใช้โหลดจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แบตเตอรี่จะเริ่มคายประจุจนกระทั่ง SOC ถึงขีดจำกัดขอบเขตล่าง 35% เพื่อให้แบตเตอรี่จัดการกับโหลดสูงสุดในตอนเย็นในบ้านอยู่อาศัย ซึ่งจะลดการใช้พลังงานจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทำให้ลดค่าพลังงานไฟฟ้าสำหรับผู้บริโภค เนื่องจากราคาค่าไฟฟ้ามีราคาแพงในช่วงเวลาความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peak Time) นอกจากนี้ด้วยการใช้พลังงานทั้งหมดในช่วงเวลานี้แบตเตอรี่ก็พร้อมที่จะประจุอีกครั้งในโหมดการทำงานถัดไป ซึ่งค่าไฟฟ้ามีราคาถูกในช่วงเวลาความต้องการไฟฟ้าต่ำ (Off-peak time)

จากตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่า SOC ของแบตเตอรี่ที่โหมดการทำงานต่างๆ กรณีศึกษาที่ 4-7 ที่ใช้การบริหารจัดการการทำงานด้วย PSO จำลองการทำงานจากระบบเป็นเวลา 1 ปี พบว่า กรณีศึกษาที่ 7 ภาพรวมค่า SOC ของโหมดการทำงานต่างๆ มีค่าต่ำที่สุด จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าในกรณีศึกษาที่ 7 ขนาดแบตเตอรี่ของระบบที่พิจารณามีขนาดต่ำที่สุด ดังนั้นผลการจำลองระบบนอกจากจะช่วยลดค่าไฟฟ้าที่

ต้องชำระแล้วขนาดของแบตเตอรี่ที่ต้องติดตั้งมีขนาดเล็กลง ถ้ามีการพิจารณาด้านต้นทุนการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน แบตเตอรี่ต้นทุนโดยภาพรวมทั้งระบบจะมีค่าลดลงและระยะเวลาคืนทุนจะเร็วขึ้น

ตารางที่ 5 ค่า SOC ของแบตเตอรี่ที่โหมดการทำงานต่างๆ กรณีที่บริหารจัดการการทำงานด้วย PSO

โหมดการทำงาน	กรณีศึกษา			
	4	5	6	7
โหมด 1 (soc เริ่มต้น)	35.00	37.44	35.00	35.00
โหมด 1 (soc สุดท้าย)	82.15	85.00	82.15	81.18
โหมด 2 (soc เริ่มต้นวันแดดจัด)	82.15	85.00	82.15	81.18
โหมด 2 (soc สุดท้ายวันแดดจัด)	35.00	35.00	35.00	35.00
โหมด 2 (soc เริ่มต้นวันเมฆมาก)	82.15	85.00	82.15	81.18
โหมด 2 (soc สุดท้ายวันเมฆมาก)	57.99	58.26	57.99	57.31
โหมด 3 (soc เริ่มต้นวันแดดจัด)	35.00	35.00	35.00	35.00
โหมด 3 (soc สุดท้ายวันแดดจัด)	82.15	85.00	82.15	81.18
โหมด 3 (soc เริ่มต้นวันเมฆมาก)	57.99	58.26	57.99	57.31
โหมด 3 (soc สุดท้ายวันเมฆมาก)	82.15	85.00	82.15	81.18
โหมด 4 (soc เริ่มต้น)	82.15	85.00	82.15	81.18
โหมด 4 (soc สุดท้าย)	82.15	85.00	82.15	81.18
โหมด 5 (soc เริ่มต้น)	82.15	85.00	82.15	81.18
โหมด 5 (soc สุดท้าย)	35.00	37.44	35.00	35.00

8. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการจัดการพลังงานภายในบ้านอยู่อาศัยระบบผสมผสานพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคร่วมกับการควบคุมแบบฟuzzy logic การจำลองพบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าโดยรวมลดลงอย่างชัดเจน รอบของการประจุแบตเตอรี่ลดลง ส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ยาวนานขึ้น ผลการจำลองยืนยันว่าวิธีการที่เสนอปรับปรุงประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการพลังงานในบ้านได้ดีขึ้น ลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในเวลาที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงและลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าสำหรับผู้บริโภค

การศึกษาในอนาคตจะมีการเพิ่มความหลากหลายของประเภทอาคาร เช่น อาคารพาณิชย์ อาคารสำนักงาน อาคารโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น และขยายขอบเขตระบบบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าจากบ้านอยู่อาศัยเพียงหลังเดียว เป็นรูปแบบชุมชนที่มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้เอง สามารถกำหนดราคาซื้อขายที่ได้ตกลงกันได้ ทำให้เกิดความยั่งยืนด้านพลังงานไฟฟ้าต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Barchi G, Miori D, Moser S. Papantoniou. A small-scale prototype for the optimization of PV generation and battery storage through the use of a building energy management system. In: *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. IEEE; 2018. p.1-5.
- [2] Talukder S. *Mathematical Modelling and Applications of Particle Swarm Optimization*. Master's Thesis, School of Engineering Blekinge Institute of Technology, Karlskrona Sweden, 2011.
- [3] มูลนิธิสถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย, รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาความเหมาะสมและแนวทางการส่งเสริมอุตสาหกรรมสำรองไฟฟ้า สำหรับโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศ (Grid Energy Storage), ประเทศไทย; มิถุนายน, 2562.
- [4] Kazmi S. et al. Balancing demand and supply of energy for smart homes. In: Barolli L, Terzo O. (eds) *Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems*. CISIS 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, 2018; 611.
- [5] Wu Z, Tazvinga H, Xia X. Demand side management of photovoltaic - battery hybrid system. *Post print submitted to Applied Energy*. February 16, 2015.
- [6] Kim ST, Bae SH, Kang YC, Park JW. Energy management based on the photovoltaic HPCS with an energy storage device. *IEEE Transaction on industrial electronics*. 2015;62(7):4608-4617.
- [7] Tazvinga H, Xia X, Zhang J. Minimum cost solution of photovoltaic– diesel– battery hybrid power systems for remote consumers, *Preprint Submitted to Solar Energy*. August 8, 2013.
- [8] Yang J, Liu J, Fang Z, Liu W. Electricity scheduling strategy for home energy management system with renewable energy and battery storage: a case study. *IET Renewable Power Generation*. 2018;12(6):639-648.
- [9] Abbood A. Salih M, Muslim H. Management of electricity peak load for residential sector in Baghdad city by using solar generation. *International Journal of Energy and Environment (IJEE)*. 2017; 8(1):63-72.
- [10] Ovali, SB. *Design and simulation of a residential photovoltaic-battery system [Master's Thesis]*. Department of Electrical and Computer Engineering, Michigan Technological University; 2016.
- [11] Prapanukool C, Chaitusaney S. An appropriate battery capacity and operation schedule of battery energy storage system for photovoltaic rooftop with net-metering scheme. *2017 14th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. Phuket; 2017. p. 222-225.
- [12] Beniwal N, Hussain I, Singh B. Control and operation of a solar-battery grid-tied system in fixed and variable power mode, *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018;12(11):2633-2641.
- [13] Huang SC, Tseng KH, Liang JW, Chang CL, Pecht M. An online SOC and SOH estimation model for Lithium-Ion batteries. *Energies*. 2017;10(4), 512.

- [14] Energy Ministry of Thailand. *Electricity Prices*.
[Online]. Available: <http://www.eppo.go.th/power/pw-Rate-PEA.html>, [Accessed: 7 ตุลาคม 2563].
- [15] Abbood A, Salih M, Muslim H. Management of electricity peak load for residential sector in Baghdad city by using solar generation. *International Journal of Energy and Environment (IJEE)*. 2017;8(8):63-72
- [16] Y. Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer. In: *IEEE international conference on evolutionary computation proceedings*. IEEE world congress on computational intelligence. 1998, p. 69-73
- [17] Mansiri K, Sukchai S, Sirisamphanwong C. Fuzzy control algorithm for battery storage and demand side power management for economic operation of the smart grid system at Naresuan University, Thailand. *IEEE Access*. 2018;6:32440-32449.
- [18] Althubaiti M. *Fuzzy Logic Controller for Hybrid Renewable Energy System with Multiple Types of Storage [Master's Thesis]*. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Alberta; 2018.