การศึกษาพฤติกรรมการอัดและคายประจุที่เหมาะสมของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเพื่อจ่ายค่าไฟฟ้าต่ำสุดด้วยเทคนิคการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

Investigation of charge-recharge optimization in battery energy storge system for minimizing electric bill using particle swarm technique

ฮิเดกิ ค้าขาย [1] และ ผศ. ดร.ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ [1,*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี thipwan@g.sut.ac.th

บทคัดย่อ

ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (Battery energy storage system: BESS) เป็นส่วนสำคัญในการลดระดับความผันผวนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่แน่นอนในแต่ละวันให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) และยังสามารถลดระดับยอดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ต้องการได้ บทความนี้ศึกษาการปรับพฤติกรรมการอัดประจุและคายประจุของ BESS ที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เพื่อการลดค่าไฟฟ้าของหอพักนักศึกษาใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) เพื่อให้ได้ค่าไฟฟ้าต่ำที่สุด ได้พิจารณาคุณลักษณะเฉพาะของ BESS รุ่น G-cell แบตเตอรี่ขนาด 100kW/200kWh จากผลการจำลองหลังปรับพฤติกรรมของ BESS พบว่า BESS สามารถช่วยกักเก็บพลังงานจาก PV ในช่วงเวลาที่ PV ผลิตกำลังไฟฟ้ามากกว่าที่หอพักต้องการได้ 89% และช่วยลดค่าไฟฟ้าของหอพักนักศึกษาได้ถึง 54% เมื่อเทียบกับกรณีก่อนปรับพฤติกรรม

คำสำคัญ: ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่แบบกลุ่มอนุภาค การจัดการพลังงาน

Abstract

Battery energy storage systems (BESS) are an important part of reducing the level of daily unstable solar fluctuations for photovoltaic (PV) cells and can also reduce the maximum level of power demand. This paper examines the optimal adjustment of BESS charging and discharging behavior by the particle swarm optimization (PSO) technique for reducing the electricity bills of student dormitories at Suranaree University of Technology (SUT). To achieve the lowest electricity cost for the dormitory load, we considered the characteristics of the BESS G-cell 100kW/200kWh. According to the simulation results after BESS behavior, BESS can help store energy from PV during times when PV produces 89% more power than the dormitory needs and reduce the dormitory's electricity bill by 54% compared to the case before the behavior adjustment.

Keywords: Battery Energy Storage System, Particle Swarm Optimization, Energy management

1. บทนำ

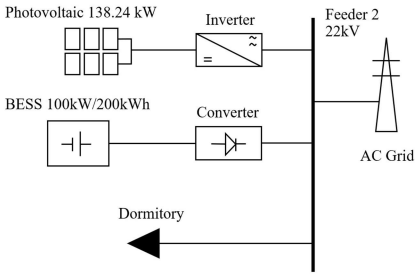
ในปัจจุบันภาวะโลกร้อนส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดภัยแล้ง พายุ น้ำท่วมและอื่นๆ พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ช่วยลดปัญหาเหล่านี้ [1-2] แต่เนื่องจาก PV มีความผันผวนสูง ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและความเข้มแสงเป็นหลัก ระบบกักเก็บพลังงานจึงมีส่วนช่วยในการลดความผันผวนเหล่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนเหมาะสมที่สุดสำหรับลดความผันผวนของระบบพลังงานหมุนเวียน [3] นอกจากนี้ระบบกักเก็บพลังงานยังสามารถช่วยเก็บพลังงานส่วนเกินจากพลังงานหมุนเวียนและยังช่วยลดความต้องการพลังงานที่ On-peak ของผู้ใช้ได้อีกด้วย มีงานวิจัย [4-5] ทบทวนเทคนิค PSO และชี้ให้เห็นว่ามีการประยุกต์ใช้เทคนิค PSO กันอย่างแพร่หลาย ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถใช้อัลกอริทึมได้หลากหลาย เช่น จีนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm: GA) PSO และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยคอโลนีมด (Ant Colony Optimization: ACO) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัย [6-7] บ่งบอกว่า PSO มีข้อดีคือ การลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดอย่างรวดเร็ว ใช้งานง่าย มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และใช้พื้นที่จัดเก็บน้อย

เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือการประเมินค่าที่เหมาะสมที่สุดของการอัดและคายประจุของ BESS รุ่น G-cell แบตเตอรี่ขนาด 100kW/200kWh เพื่อเก็บพลังงานส่วนเกินจากเซลล์แสงอาทิตย์และลดค่าไฟฟ้าของหอพักนักศึกษา โดยพิจารณาคุณลักษณะเฉพาะของ BESS ดังกล่าวด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วย PSO

2. วิธีการ

ในส่วนนี้ได้นำเสนอแบบจำลองของระบบซึ่งประกอบด้วย PV ขนาด 138.24 kW, BESS ขนาด 100kW/200kWh และกริดไฟฟ้า Sub-unit หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 22kV แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งศึกษาประเมินพฤติกรรมการอัดและคายประจุที่เหมาะสมสำหรับลดการใช้ไฟฟ้าของหอพักนักศึกษาด้วยเทคนิค PSO โดยพิจารณาถึงข้อจำกัดต่างๆของ BESS เช่น State of Charge (SOC), Depth of Discharge (DOD) และ C-rate เป็นต้น

available online December 1, 2023.
*Corresponding author: ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (E-mail: thipwan@g.sut.ac.th)



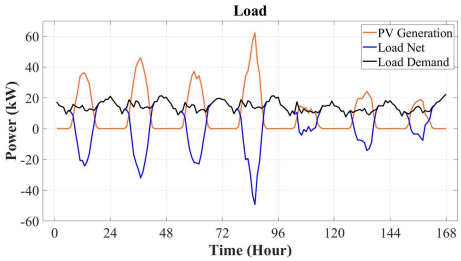
รูปที่ 1 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Grid tied ที่มีระบบ BESS

2.1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์และความต้องการพลังงาน

ระบบที่ศึกษามีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระบบ BESS แสดงในรูปที่ 2 ขนาดการติดตั้ง 138.24 kW

รูปที่ 2 ภาพถ่ายการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 138.24 kW

รูปที่ 3 แสดงการผลิตกำลังไฟฟ้าของ PV ที่วัดได้พบว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผลิตได้แสดงในกราฟเส้นสีส้ม กำลังไฟฟ้าที่ต้องการของหอพักนักศึกษาแสดงในกราฟเส้นสีดำ เมื่อนำมาพิจารณาหากำลังไฟฟ้าสุทธิของโหลดตามสมการที่ 1 จึงได้กราฟเส้นสีน้ำเงิน โดยค่าที่ติดลบมีความหมายว่า PV ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการของหอพัก หรือเรียกว่าพลังงานส่วนเกิน ซึ่งเป็นข้อมูลเฉลี่ยรายสัปดาห์จากการบันทึกค่าทุกๆ 1 ชั่วโมง ระยะเวลา 1 เดือน และนำมาเฉลี่ยเป็นราย 1 สัปดาห์



รูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าที่ต้องการของหอพักนักศึกษา กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจาก PV และกำลังไฟฟ้าสุทธิของหอพักนักศึกษา ในระยะเวลา 1 สัปดาห์

$$Load_{Net} = Load_{Demand} - PV_{Generation} \quad (1)$$

โดยที่ $Load_{Net}$ คือกำลังไฟฟ้าของโหลดสุทธิ (kW) $Load_{Demand}$ คือกำลังไฟฟ้าที่ต้องการของหอพักนักศึกษา (kW) และ $PV_{Generation}$ คือกำลังไฟฟ้าที่ PV ผลิตได้ หน่วย (kW)

2.2 ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

หอพักนักศึกษาติดตั้ง BESS ขนาด 100kW/200kWh แสดงในภาพที่ 4 ใช้งานร่วมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ BESS สามารถเก็บพลังงานส่วนเกินจาก PV และนำไปใช้ได้เมื่อต้องการ

รูปที่ 4 ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ขนาด 100kW/200kWh

2.3 การพิจารณาต้นทุนเทคโนโลยี BESS

เพื่อให้มีการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่สมบูรณ์ ระยะเวลาในการคืนทุน (Pay-back time: PBT) จึงได้รับการพิจารณาอย่างง่าย ค่า PBT จะกำหนดเป็นจำนวนปีเพื่อให้ครอบคลุมระยะเวลาในการลงทุน [8] สามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$PBT = \frac{(CAPEX_{BESS} + CAPEX_{PV})}{[M_{Saving} - (OPEX_{BESS} + OPEX_{PV})]} \quad (2)$$

โดยที่ $CAPEX_{BESS}$ และ $CAPEX_{PV}$ คือราคาต้นทุนรวมทั้งหมดของ BESS และ PV (Baht/kWh) $OPEX_{BESS}$ และ $OPEX_{PV}$ คือราคาต้นทุนการดำเนินการและซ่อมบำรุงของ BESS และ PV (Baht/kWh) และ M_{Saving} คือเงินที่ BESS และ PV สามารถช่วยประหยัดได้ (Baht)

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

Name	Value	Reference
$CAPEX_{BESS}$	570 €/kWh	[9]
$OPEX_{BESS}$	4.6 €/kWh	[9]
$CAPEX_{PV}$	1200 €/kWh	[10]
$OPEX_{PV}$	19 €/kWh	[10]

2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ (3) อธิบายถึงการหาค่าไฟฟ้าให้มีค่าต่ำที่สุด ในการจำลองประเมินค่าที่เหมาะสมที่สุดของการอัดและคายประจุของ BESS มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าไฟฟ้าของหอพักนักศึกษา

$$Minimize\ f = min(Cost_{Electricity}) \quad (3)$$

จากสมการที่ (5) $Cost_{Electricity}$ สามารถแบ่งได้เป็นสามเทอมแสดงในสมการที่ (6)

$$Cost_{Electricity} = C_{OP}E_{OP} + C_{OFFP}E_{OFFP} + C_P E_{max} \quad (4)$$

โดยที่ C_{OP} คือค่าแฟคเตอร์พลังงานไฟฟ้าช่วงเวลา On-Peak ต่อหน่วย (บาท/kWh) C_{OFFP} คือค่าแฟคพลังงานไฟฟ้าช่วง On-Peak ต่อหน่วย (บาท/kWh) C_p คือค่าแฟคเตอร์ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/kWh),

E_{OP} คือพลังงานไฟฟ้าช่วง On-Peak (kWh), E_{OFFP} คือพลังงานไฟฟ้าช่วง Off-Peak (kWh) E_{max} คือพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (kW)

คุณลักษณะเฉพาะของ BESS ในการประเมินค่าที่เหมาะสมที่สุดมีเงื่อนไขดังนี้

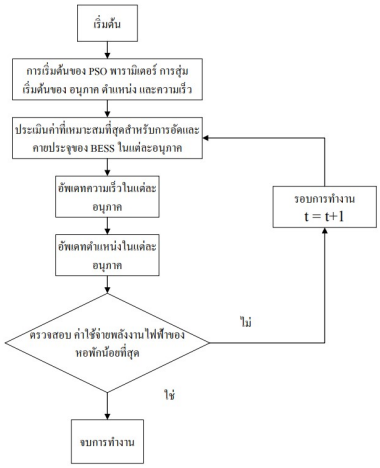
$$SOC_{min} \leq SOC_{BESS} \leq SOC_{max} \quad (5)$$

ค่า SOC_{BESS} คือค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณพลังงานที่มีอยู่ในแบตเตอรี่เทียบเป็นเปอร์เซ็นของความจุสูงสุดของแบตเตอรี่ อ้างอิงตามเอกสารข้อมูลอุปกรณ์ของ BESS จากผู้ผลิตควรใช้ไม่เกิน 80% DOD หรือควรใช้ SOC ของ BESS อยู่ที่ 20% ถึง 100% ของพิกัด BESS

$$P_{min} \leq P_{BESS} \leq P_{max} \quad (6)$$

ค่า P_{BESS} คือค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ BESS สามารถจ่ายได้ใน 1 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับความจุ ตามเอกสารข้อมูลของ BESS แนะนำให้ใช้อยู่ที่ 0.5C หรือใช้ C-rate เท่ากับ 0.5 หรือ 100kW

การดำเนินงานแสดงในรูปที่ 5 มีการทำงานดังนี้ ขั้นตอนแรกสุ่มค่าอนุภาค ตำแหน่ง และความเร็วของ PSO ขั้นตอนที่สองประเมินค่าการอัดและคายประจุของ BESS ของอนุภาคแต่ละตัว ขั้นตอนที่สามและสี่อัพเดทความเร็วและตำแหน่งของแต่ละอนุภาค ขั้นตอนที่ห้าตรวจสอบค่าค่าไฟฟ้าของหอพักมีค่าที่ต่ำที่สุดหรือไม่ ถ้าไม่จะกลับไปทำงานในขั้นตอนที่สองใหม่และอัพเดทรอบการทำงาน แต่ถ้าใช่จะจบการทำงาน



รูปที่ 5 แผนผังการดำเนินงาน

3. การวิเคราะห์ผลการทดสอบการจำลอง

การวิเคราะห์ผลจากการประเมินค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเก็บและคายประจุของ BESS ค่าไฟฟ้าที่ BESS สามารถช่วยลดได้ จะแบ่งเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าช่วง On-Peak ราคา 4.1025 บาท/หน่วย ช่วง Off-Peak มีราคา 2.5849 บาท/หน่วย และค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าราคา 74.14 บาท/kW ซึ่งช่วงเวลา On-Peak (09.00-22.00 น.) และ Off-Peak (22.00-08.00 น.) สำหรับวันจันทร์ถึงวันศุกร์ ในวันหยุดเสาร์อาทิตย์และวันหยุดทั่วไปมีช่วงเวลา Off-Peak (24.00-00.00 น.)

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 1,590 kWh มากกว่าที่โหลดหอพักนักศึกษาต้องการถึง 736 kWh/สัปดาห์ ผลลัพธ์ BESS สามารถเก็บพลังงานส่วนเกินเหล่านี้ได้ถึง 654 kWh/สัปดาห์ และนำพลังงานไฟฟ้าไปช่วยจ่ายโหลดแก่หอพักนักศึกษาจะสามารถช่วยลดความต้องการโหลดพลังงานไฟฟ้า นำไปสู่ความประหยัดทางเศรษฐศาสตร์ การอ้างอิงในตารางที่ 2 พบว่าในงานวิจัยที่อ้างอิงนั้นในระบบ BESS และ PV สามารถช่วยลดพลังงานไฟฟ้าในระบบได้

การประเมินค่าที่เหมาะสมที่สุดของการอัดและคายประจุของ BESS ด้วยเทคนิค PSO ช่วยลดพลังงานไฟฟ้าของหอพักในช่วง On-Peak ได้ 109 kWh ลดพลังงานไฟฟ้าช่วง Off-Peak ได้ 747 kWh และลดความต้องกำลังไฟฟ้าได้ 7 kW เมื่อพิจารณาเป็นจำนวนเงิน BESS สามารถช่วยลดค่าไฟฟ้าได้ 3,470 บาท/สัปดาห์ จากเดิมของหอพักที่มีการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไฟฟ้า 6,365 บาท/สัปดาห์ แสดงในตารางที่ 3 โดยไม่พิจารณาค่าธรรมเนียมต่างๆ

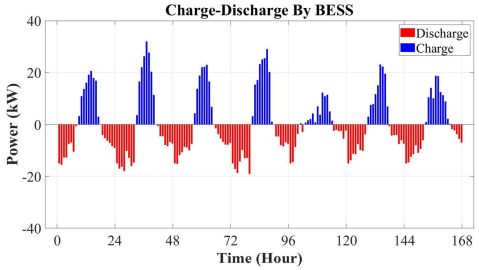
พฤติกรรมการอัดและคายประจุ และSOC การอัดและคายประจุของแบตเตอรี่แสดงในรูปที่ 6(a) แท่งกราฟสีแดงเป็นช่วงที่แบตเตอรี่ทำการคายประจุเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าแบตเตอรี่จะคายประจุในช่วงที่ PV ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้หอพักนักศึกษาได้ และแท่งกราฟสีน้ำเงินเป็นการอัดประจุแบตเตอรี่เป็นช่วงที่ PV ผลิตกำลังไฟฟ้ามากกว่าที่หอพักนักศึกษาต้องการ ในรูปที่ 6(b) ได้แสดงค่า SOC ของแบตเตอรี่ ค่า SOC สอดคล้องกับกราฟในรูป 6(a) แบตเตอรี่คายประจุกราฟแท่งสีฟ้าจะลดลง แบตเตอรี่อัดประจุกราฟแท่งสีฟ้าจะเพิ่มขึ้น ค่า SOC ของแบตเตอรี่จะไม่เกินข้อจำกัดของแบตเตอรี่ตามสมการที่ (5) เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างความต้องการกำลังไฟฟ้าเดิมของหอพักโหลดติดตั้ง PV และโหลดหลังที่ติดตั้ง PV และ BESS แสดงในรูปที่ 7 พบว่าเมื่อประเมินค่าที่เหมาะสมที่สุดของการอัดประจุการคายประจุของแบตเตอรี่แล้ว ระบบจะมีความต้องการกำลังไฟฟ้าที่ลดลง และกำลังไฟฟ้าส่วนเกินที่ PV ผลิตได้จะมีค่าที่ลดลงเนื่องจากถูกแบตเตอรี่อัดประจุในช่วงนั้น

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัย สำหรับลดพลังงานไฟฟ้า

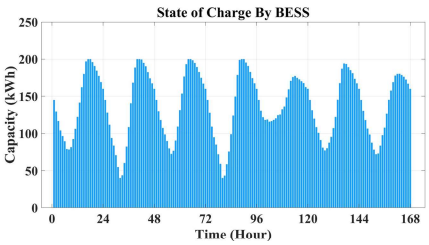
System	Objective	Author/Ref.	Load shaved
Load shopping malls with PV 1000kW$_P$ and BESS 500kWh	Peak Shaving and Shifting	G. Barchi [8]	-49.97%
Load in Naresuan University with BESS 29 MWh	Optimization of BESS size for Peak shaving	U. Prasatsap [12]	-26.47%

ตารางที่ 3 ผลการประเมินค่าที่เหมาะสมที่สุด

System	E_{max} (kW)	E_{OP} (kWh)	E_{OFFP} (kWh)
Load demand	22	1,031	1,386
Load with PV	22	437	1,127
Load with PV and BESS	15	327	380



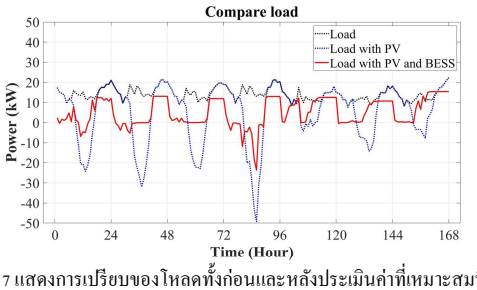
(a)



(b)

(a) การอัดและคายประจุของ BESS (a) State of Charge ของ BESS

รูปที่ 6 ค่า การอัดและคายประจุของ BESS และSOC ของ BESS ในหนึ่งสัปดาห์



รูปที่ 7 แสดงการเปรียบของโหลดทั้งก่อนและหลังประเมินค่าที่เหมาะสมที่สุดของ BESS

4. สรุป

การประเมินการอัดและคายประจุของ BESS ที่เสนอได้รับการจำลองโดยใช้ข้อมูลจากหอพักนักศึกษาในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลลัพธ์ในการศึกษานี้ได้รับการพิจารณาเป็นรายสัปดาห์หากมีการติดตั้งพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 35% แต่ก็ผลิตกำลังไฟฟ้าส่วนเกินความต้องการสูงถึง 46% จากการทดสอบจำลอง BESS สามารถช่วยเก็บกำลังไฟฟ้าส่วนเกินนี้ได้ 89% และช่วยลดการใช้พลังงานช่วง On-Peak ได้ 66% ช่วง Off-Peak ได้ 25% และลดความต้องการพลังไฟฟ้าได้ 31% ซึ่ง BESS สามารถลดค่าไฟฟ้าได้ถึง 54% เทียบกับกรณีก่อรปรับพฤติกรรมของ BESS เมื่อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อหอพักนักศึกษาติดตั้ง PV และ BESS หลังปรับพฤติกรรมการอัดและคายประจุดังผลการจำลองจะใช้ระยะเวลาในการคืนทุนอยู่ที่ 9.6 ปี เทคนิคที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้กับระบบอื่นได้ ที่มีอัตราค่าไฟฟ้าและระบบที่คล้ายคลึงกัน ในอนาคตจะมีการศึกษาผลจากการจำลองและนำไปใช้ในการควบคุม BESS จริงเพื่อพิจารณาผลลัพธ์จากระบบจริงและจากการจำลอง

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Shimizu, O. Hashimoto and G. Kimura, "A novel high-performance utility-interactive photovoltaic inverter system," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 704-711, March 2003

[2] R. -J. Wai and W. -H. Wang, "Grid-Connected Photovoltaic Generation System," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 55, no. 3, pp. 953-964, April 2008

[3] H. A. Behabtu et al., "A Review of Energy Storage Technologies' Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration," Sustainability, vol. 12, no. 24, p. 10511, Dec. 2020

[4] A. Banks, J. Vincent, and C. Anyakoha, "A review of particle swarm optimization. Part I: background and development," Natural Computing, vol. 6, no. 4, pp. 467–484

[5] M. Jain, V. Saihjpal, N. Singh, and S. B. Singh, "An Overview of Variants and Advancements of PSO Algorithm," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 17, p. 8392, Aug. 2022

[6] M. Jain, V. Saihjpal, N. Singh, and S. B. Singh, "An Overview of Variants and Advancements of PSO Algorithm," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 17, p. 8392, Aug. 2022

[7] T. Kerdphol, et al., "Optimization of a battery energy storage system using particle swarm optimization for stand-alone microgrids," International Journal Of Electrical Power & Energy Systems, vol. 81, pp. 32-39, 2016.

[8] G. Barchi, M. Pierro, and D. Moser, "Predictive Energy Control Strategy for Peak Shaving and Shifting Using BESS and PV Generation Applied to the Retail Sector," Electronics, vol. 8, no. 5, p. 526, May 2019

[9] B. Zakeri and S. Syri, "Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 42, pp. 569–596, Feb. 2015

[10] Vartiainen, E.; Masson, G.B.C. The True Competitivness for Solar PV: A European Case Study; Technical report, ETIP-PV. Available online: https://etip-pv.eu/publications/etip-pv-publications/ (accessed on 1 March 2019).

[11] U. Prasatsap, S. Kiravittaya, and J. Polprasert, "Determination of Optimal Energy Storage System for Peak Shaving to Reduce Electricity Cost in a University," Energy Procedia, vol. 138, pp. 967–972, Oct. 2017.