

ชุดควบคุมสำหรับลดการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อการมีส่วนร่วมในโปรแกรมตอบสนอง ด้านโหลด: แนวทางการบรรเทาปรากฏการณ์เส้นโค้งรูปเป็ด

Killing the Duck: A Solar rooftop power curtailment Controller for Participation in Demand Response Programs

พงศ์ภาวี พันธุ์ชัยเกษม¹ นันทวัน กรุดินทร์¹ อัมฤติ นัยกุล¹ และ ปิยดนัย ภาชนะพรรณ^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

pongpayee68@nu.ac.th, nuntawank63@nu.ac.th, auntitan64@nu.ac.th, and piyadanip@nu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาชุดควบคุมสำหรับลดกำลังการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาในภาคครัวเรือนหรือองค์กรขนาดเล็กอย่างสมัครใจ เพื่อบรรเทาผลกระทบจากปรากฏการณ์เส้นโค้งรูปเป็ด (Duck Curve) อันเกิดจากการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปริมาณมาก โดยจะเป็นการสนับสนุนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเลือกจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าผลิตได้ เมื่อได้รับการร้องขอจากผู้ดูแลระบบไฟฟ้าด้วยความสมัครใจ ระบบที่นำเสนอช่วยให้ผู้ใช้สามารถกำหนดช่วงเวลา และระดับการจำกัดกำลังไฟฟ้าได้ผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ โดยส่งการไปยังอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านชุดควบคุมซึ่งพัฒนาด้วยบอร์ด Raspberry Pi ซึ่งสามารถจำกัดกำลังไฟฟ้าได้ 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0, 30, และ 60 ของขนาดพิกัดอินเวอร์เตอร์ตามลำดับ ทั้งนี้ผู้เข้าร่วมการตอบสนองด้านโหลดนี้จะได้รับผลตอบแทนโดยพิจารณาจากโอกาสในการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียไปในช่วงเวลาที่มีการจำกัดกำลังการผลิต

คำสำคัญ: เส้นโค้งรูปเป็ด ผลตอบสนองด้านโหลด การจำกัดกำลังการผลิตระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

Abstract

This research presents a smart control system that enables voluntary solar power curtailment from residential or small-scale rooftop solar photovoltaic (PV) systems. The aim is to mitigate the impact of the “Duck Curve” phenomenon, which arises from a high penetration of solar PV in the power grid. The proposed system supports end-users who install rooftop PV systems to voluntarily limit their power output upon request from the grid operator. Users can specify the time periods and power curtailment levels via a mobile application, which communicates with the grid-tied PV inverter through a control unit developed using a Raspberry Pi board. The system allows power curtailment at three levels: 0%, 30%, and 60% of the inverter’s rated capacity. Participating users in this demand

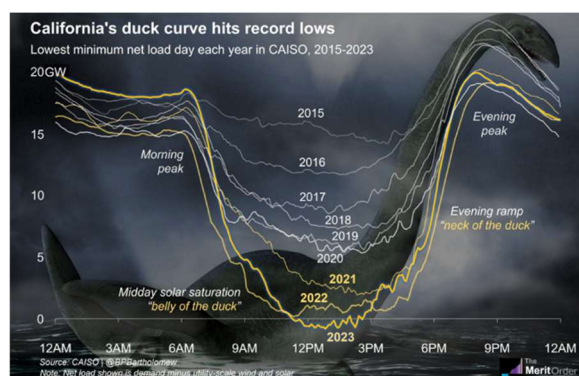
response program are compensated based on the opportunity loss of energy production during the curtailment period.

Keywords: Duck curve, demand response, power curtailment, solar rooftop system

1. บทนำ

การติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop PV System) ได้ขยายตัวอย่างรวดเร็วในภาคครัวเรือนและธุรกิจขนาดย่อมเนื่องจากต้นทุนที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เช่น ราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์ ส่งผลให้ผู้ใช้ไฟฟ้ารายย่อยมีความเชื่อมั่นในการลงทุนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากระยะเวลาคืนทุนสั้นลงประกอบกับแรงจูงใจจากนโยบายของภาครัฐ อาทิ มาตรการลดหย่อนภาษีจากค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [1] ส่งเสริมให้เกิดการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพิ่มมากขึ้น

ถึงแม้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะมีบทบาทสำคัญในการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและสนับสนุนเป้าหมายการลดการปล่อยคาร์บอนสู่สังคมคาร์บอนต่ำ แต่การผลิตไฟฟ้าปริมาณมากในช่วงเวลากลางวันของผู้บริโภค ส่งผลให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากระบบสายส่งหลักลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาดังกล่าวและพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่ช่วงเย็น เมื่อพล็อตกราฟแสดงภาระโหลดไฟฟ้ารวมทั้งระบบตลอดทั้งวัน (24 ชั่วโมง) จะปรากฏลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่ลด



รูปที่ 1 ปรากฏการณ์เส้นโค้งรูปเป็ด รัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา

ที่มา : CAISO @BPBartholomew

ต่ำลงในช่วงกลางวันและเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาอันสั้น ซึ่งเส้นกราฟที่ได้จะมีรูปทรงคล้ายเปิด จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์เส้นโค้งรูปเปิดดังแสดงในรูปที่ 1

จากปรากฏการณ์ดังกล่าวผู้ดูแลระบบไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องจัดทำกำลังผลิตจากแหล่งพลังงานอื่นเข้าสู่ระบบในระยะเวลาอันสั้น เพื่อรักษาเสถียรภาพและความสมดุลของระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าสำรองหรือโรงไฟฟ้าที่มีความยืดหยุ่นสูงในช่วงเวลาดังกล่าว มักมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าสูงกว่าปกติ ซึ่งอาจส่งผลให้ต้นทุนค่าไฟฟ้าของระบบโดยรวมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความผันผวนในช่วงเวลาดังกล่าวมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นความท้าทายสำคัญในการบริหารจัดการระบบ หากไม่สามารถจัดทำกำลังผลิตไฟฟ้ามาทดแทนได้ทันและอาจนำไปสู่ความเสี่ยงในการเกิดความไม่มั่นคงของระบบไฟฟ้าหรือภาวะไฟฟ้าดับในวงกว้างได้

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเพื่อแก้ไขปัญหาลักษณะนี้มากมาย ไม่ว่าจะเป็นการจำกัดขนาดการติดตั้งรวมของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับหม้อแปลงจำหน่ายลูกเดียวกันของการไฟฟ้า [2] รวมทั้งการบังคับติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (Zero export controller) ซึ่งวิธีดังกล่าวถูกมองว่าเป็นการกีดกันโอกาสในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้เต็มศักยภาพ นอกจากนี้การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ เพื่อเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางวันมาช่วยจ่ายในช่วงหัวค่ำที่ความต้องการไฟฟ้าพุ่งสูงซึ่งก็สามารถทำให้เส้นโค้งรูปเปิดเรียบมากขึ้นได้แต่ก็ยังต้องการเงินทุนที่สูงมาก [3]

การตอบสนองด้านโหลด (Demand Response) สามารถช่วยลดความผันผวนของความต้องการไฟฟ้าที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงกลางวันได้ เช่น การส่งเสริมให้มีการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าในช่วงกลางวันเพื่อเพิ่มโหลด [4] หรือการจำกัดกำลังการผลิตจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาในช่วงเวลาที่มีการผลิตสูง เช่น การสั่งลดกำลังไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ในช่วงที่เที่ยงของวันที่มีแดดจัด [5] แนวทางเหล่านี้สามารถดำเนินการได้โดยไม่ต้องลงทุนในอุปกรณ์ราคาแพงเพิ่มเติมมากนัก

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้พัฒนาชุดควบคุมสำหรับลดการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา เพื่อให้ผู้ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถสั่งลดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้ เมื่อผู้ดูแลระบบไฟฟ้าคาดการณ์ว่าจะมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นจำนวนมากด้วยการแจ้งเตือนและควบคุมผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ พร้อมทั้งคำนวณปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้แต่ถูกจำกัด เพื่อคำนวณเป็นผลตอบแทนของผู้เข้าร่วม

2. การออกแบบชุดควบคุมสำหรับลดการผลิตของระบบ

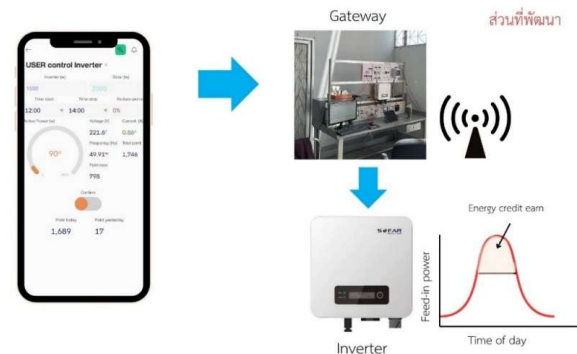
เซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

2.1 หลักการทำงาน

เมื่อมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นจำนวนมากหรือเกิดปรากฏการณ์เส้นโค้งรูปเปิด ผู้ดูแลระบบไฟฟ้าจะส่งการแจ้งเตือนและคำร้องขอไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา ในกรณีที่ผู้ใช้ยืนยันเข้าร่วมจะสามารถสั่งลดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้ด้วยความ



รูปที่ 2 ระบบแจ้งเตือนจากผู้ดูแลเพื่อร้องขอให้ลดการผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 3 การปรับลดกำลังไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ

สมัครใจ โดยการกำหนดช่วงระยะเวลาและขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายเข้าระบบได้จากแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ ข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งไปชุดควบคุมที่เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ เพื่อสั่งให้จำกัดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกตามขนาดและช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งผู้เข้าร่วมจะได้ผลตอบแทนจากการสมัครใจดังแสดงในรูป 2 และรูปที่ 3

2.2 ชุดควบคุมการลดกำลังการผลิต

เมื่อผู้ใช้ไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาตอบรับคำร้องขอจากผู้ดูแลระบบไฟฟ้า ข้อมูลช่วงเวลาและระดับกำลังไฟฟ้าที่ต้องจำกัดจะถูกส่งไปยังชุดควบคุมซึ่งพัฒนาด้วยบอร์ด Raspberry Pi เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่องรีดที่รองรับฟังก์ชันการควบคุมกำลังไฟฟ้า เช่น ผลิตเกินที่ผ่านการรับรองตามข้อกำหนด VDE-AR-N 4105:2018-11 ของประเทศเยอรมนี ซึ่งสามารถตอบสนองคำสั่งลดกำลังจ่ายไฟได้อย่างเป็นลำดับขั้นตามที่กำหนด โดยจะใช้งานร่วมกับเครื่องรับควบคุมวิทยุ (Radio Ripple Control Receiver: RRCR) สำหรับให้ทางผู้ดูแลระบบสามารถสั่งควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าระบบได้โดยตรง

โดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์ที่มีฟังก์ชันดังกล่าว จะสามารถกำหนดระดับการปรับลดกำลังไฟฟ้าเป็นร้อยละของกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ ยกตัวอย่างเช่น อินเวอร์เตอร์ SOFAR รุ่น TL-G3 [6] ซึ่งสามารถปรับได้ 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0, 30, 60, และ 100 ตามลำดับ โดยการควบคุมจะทำการผ่านการเปิดหรือปิดวงจรรีเลย์สวิตช์ (K1 ถึง K4) ที่เชื่อมต่อกับช่องอินพุต (พอร์ต RJ45) ที่รองรับฟังก์ชันปรับลดกำลังไฟฟ้าง่ายแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งมีระดับการจำกัดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกตามสถานะของลอจิกในแต่ละขาอินพุต (L1 ถึง L4) ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลอจิกของขาอินพุต และขนาดร้อยละพิกัดของกำลังไฟฟ้า

L1	L2	L3	L4	กำลังไฟฟ้า (เปอร์เซ็นต์)
1	0	0	0	0
0	1	0	0	30
0	0	1	0	60
0	0	0	1	100

หมายเหตุ 1 คือ ปิดวงจร และ 0 คือ เปิดวงจร

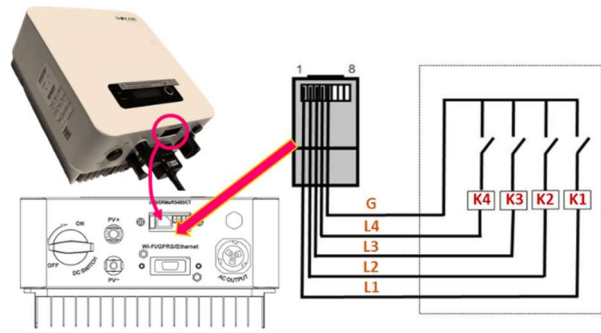
สำหรับข้อมูลปริมาณทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ ได้แก่ แรงดัน กระแส ความถี่ และกำลังไฟฟ้า จะถูกส่งเข้าไปที่ชุดควบคุมด้วยมาตรฐานการสื่อสารข้อมูลชนิด RS-485 และใช้โปรโตคอล Modbus RTU ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างชุดควบคุมและอินเวอร์เตอร์ จากนั้นข้อมูลปริมาณทางไฟฟ้าจะถูกส่งกลับไปแสดงผลแบบเวลาจริงที่แอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ รวมถึงการอัปเดตผลประโยชน์จากการเข้าร่วมการลดกำลังผลิตไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5

ในส่วนแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือพัฒนาด้วยแอปพลิเคชัน Blynk ทั้งทางฝั่งผู้ดูแลระบบ และฝั่งผู้ใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาทางฝั่งผู้ดูแลระบบจะใช้แพลตฟอร์ม Blynk Console เพื่อส่งแจ้งเตือนและร้องขอความร่วมมือในการลดกำลังผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยฟังก์ชัน Scene Automation ที่ระบุช่วงเวลาและข้อความแจ้งเตือนได้ เมื่อผู้ใช้ได้รับแจ้งเตือนแล้วจะตอบสนองโดยการเลือกระดับการลดกำลังการผลิตที่ต้องการ ซึ่งทางฝั่งผู้ใช้จะต้องกำหนดขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์และพิกัดอินเวอร์เตอร์ เพื่อนำมาประเมินพลังงานไฟฟ้าที่หายไปขณะส่งลดกำลังผลิตและนำมาคำนวณเป็นแต้มสะสมต่อไป

2.3 การประเมินผลประโยชน์จากการเข้าร่วมการลดกำลัง

ผลิต

เพื่อเป็นแรงจูงใจให้ผู้ใช้เข้าร่วมกิจกรรมลดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ จึงควรต้องตอบแทนความร่วมมือและชดเชยโอกาสในการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียไปในช่วงเวลาเข้าร่วมกิจกรรม ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบแต้มสะสมเพื่อใช้เป็นส่วนลดค่าไฟฟ้า ร้านอาหาร หรือห้างสรรพสินค้า เป็นต้น โดยประเมิน



รูปที่ 4 การเชื่อมต่อรีเลย์สวิตช์เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าขาออกอินเวอร์เตอร์

จากพลังงานไฟฟ้าที่ถูกกระจายเข้าในระบบในช่วงเวลาที่สั่งลดการผลิตเป็นแต้มสะสมในอัตรา 1 กิโลวัตต์ชั่วโมง ต่อ 1 แต้ม และจะมีการอัปเดตแต้มตลอดช่วงระยะเวลาที่มีการสั่งลดการผลิตไฟฟ้าตามสมการ (1) ถึง (3)

$$P_{curtail}(t) = P_{exp}(t) - P_{limit}(t) \quad (1)$$

$$P_{exp}(t) = P_{profile}(t) \times P_{PV} \times \eta \quad (2)$$

$$P_{limit} = R \times P_{Inv} \quad (3)$$

เมื่อ $P_{curtail}(t)$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ถูกปรับลดลงมาที่เวลา t

$P_{ext}(t)$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่คาดว่าจะผลิตได้ที่เวลา t

$P_{limit}(t)$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่จำกัดไว้ที่เวลา t

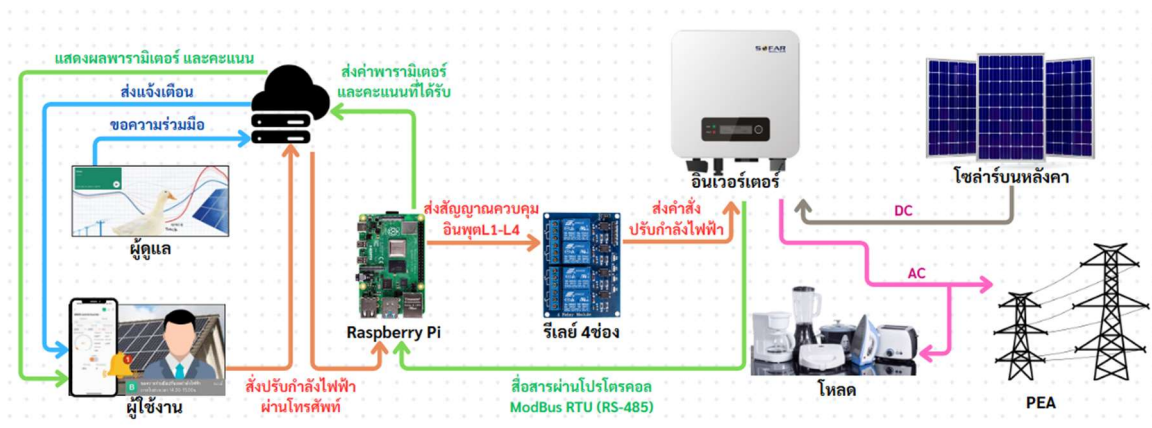
$P_{profile}(t)$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงต่อกำลังผลิตติดตั้ง 1 กิโลวัตต์สูงสุดที่เวลา t

P_{PV} คือ กำลังผลิตติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

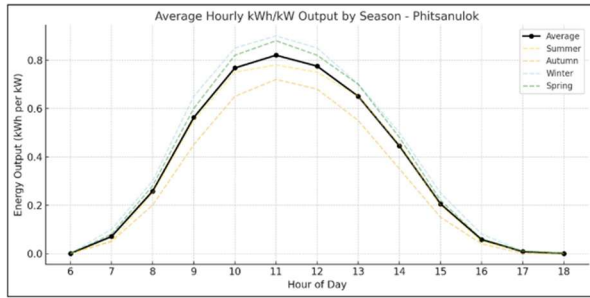
η คือ ประสิทธิภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ที่ค่า 80 เปอร์เซ็นต์

R คือ ค่าร้อยละของพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ มีค่าร้อยละ 0, 30, และ 60 ตามลำดับ

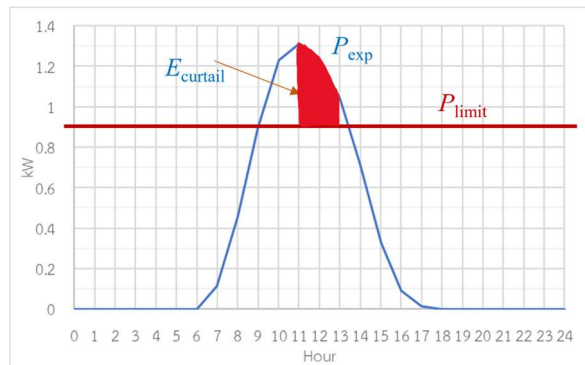
P_{Inv} คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 5 ไดอะแกรมของชุดควบคุมการลดกำลังการผลิตจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา



รูปที่ 6 พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงต่อกำลังผลิตติดตั้ง 1 กิโลวัตต์สูงสุด



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา

จากสมการ (1) สามารถคิดค่ากำลังไฟฟ้าที่ถูกปรับลดลงมาจากผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาและกำลังไฟฟ้าที่จำกัด ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาใช้วิธีประเมินจากข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยที่ผลิตได้เป็นรายชั่วโมงในแต่ละพื้นที่จากเว็บไซต์ Profilesolar [7] โดยมีการระบุค่าเป็นพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงต่อกำลังผลิตติดตั้ง 1 กิโลวัตต์สูงสุดและนำข้อมูลมาคูณกับขนาดการติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพดังสมการ (2) ค่าขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาได้สามารถหาได้จากเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์คูณกับขนาดการติดตั้งของอินเวอร์เตอร์ ดังสมการ (3)

พลังงานไฟฟ้าที่หายไปขณะเข้าร่วมกิจกรรมสามารถคำนวณจากผลรวมของขนาดกำลังไฟฟ้าที่ปรับลดลงคูณด้วยช่วงเวลาอัปเดตข้อมูล ดังสมการ (4)

$$E_{\text{curtail}} = \sum_{t=\text{start}}^{\text{stop}-1} P_{\text{curtail}}(t) \times \Delta t \quad (4)$$

เมื่อ E_{curtail} คือ พลังงานไฟฟ้าที่หายไปขณะเข้าร่วมกิจกรรม

$P_{\text{curtail}}(t)$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ถูกปรับลดลงมาที่เวลา t

Δt คือ ช่วงเวลาอัปเดตข้อมูลทุก ๆ 5 วินาที

2.4 ตัวอย่างการคำนวณผลประโยชน์จากการเข้าร่วมการผลิตกำลังผลิต

กำหนดให้ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างมีขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 2 กิโลวัตต์สูงสุดและอินเวอร์เตอร์มีขนาด 1.5 กิโลวัตต์ เมื่อเลือกใช้ค่า

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการหาพลังงานไฟฟ้าที่หายไปจากการลดกำลังผลิต

เวลา	P_{profile} (kW/kWp)	P_{exp} (kW)	P_{limit} (kW)	P_{curtail} (kW)
6:00-7:00 น.	0	0	-	-
7:00-8:00 น.	0.07	0.112	-	-
8:00-9:00 น.	0.285	0.456	-	-
9:00-10:00 น.	0.562	0.9	-	-
10:00-11:00 น.	0.768	1.2288	-	-
11:00-12:00 น.	0.82	1.312	0.9	0.412
12:00-13:00 น.	0.775	1.24	0.9	0.34
13:00-14:00 น.	0.65	1.04	-	-
14:00-15:00 น.	0.445	0.712	-	-
15:00-16:00 น.	0.205	0.328	-	-
16:00-17:00 น.	0.057	0.0912	-	-
17:00-18:00 น.	0.008	0.0128	-	-
18:00-19:00 น.	0	0	-	-
E_{curtail} (kWh) หรือ แด้มสะสม				0.752

พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงจากรูปที่ 6 และกำหนดให้มีการลดกำลังผลิตให้ไม่เกินร้อยละ 60 ตั้งแต่เวลา 11.00 – 13.00 น. เป็นระยะเวลารวมทั้งสิ้น 2 ชั่วโมง สามารถประเมินหาพลังงานไฟฟ้าที่หายไปขณะเข้าร่วมกิจกรรม กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ถูกงดจ่ายเข้าในระบบในช่วงเวลาที่สั่งลดการผลิตจะถูกคำนวณคิดเป็นแด้มสะสมให้กับผู้ใช้งานระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาดังแสดงในตารางที่ 2

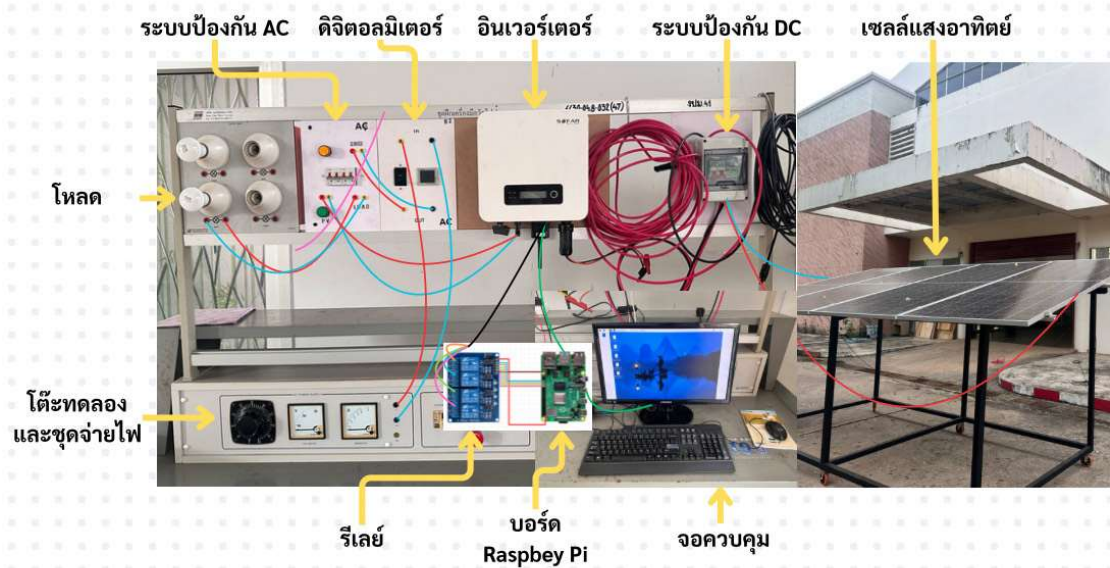
เมื่อนำค่าตัวอย่างการหาพลังงานไฟฟ้าที่หายไปจากการลดกำลังผลิตจากตารางที่ 2 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลาจะได้กราฟที่แสดงในรูปที่ 7 สามารถเห็นกำลังไฟฟ้าที่ถูกจำกัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และปริมาณพลังงานที่ผลิตได้แต่ถูกจำกัดไว้

3. ผลการทดสอบการทำงาน

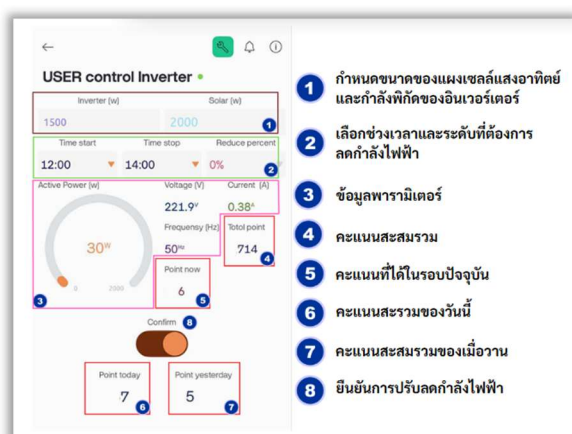
3.1 การตั้งค่าการทดสอบ

ในการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมสำหรับลดการผลิตของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 4 แผง รุ่น SUN580-73MDH8NS แต่ละแผงมีขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 580 วัตต์ กำลังการผลิตรวมทั้งสิ้น 2,320 วัตต์ (ประมาณ 2 กิโลวัตต์) และใช้อินเวอร์เตอร์ รุ่น SOFAR TL-G3 พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1,500 วัตต์ นอกจากนี้การจำลองโหลดในระบบ อุปกรณ์การทดสอบและเครื่องมือวัดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 8 และหน้าต่างแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์ของผู้ใช้งานระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาดัง แสดงได้ดังรูปที่ 9

การทดสอบการทำงานของชุดควบคุมและแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือที่ได้พัฒนาขึ้น จะทำการจำกัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่ระดับร้อยละ 0, 30, และ 60 ตามลำดับในการทดสอบจะเริ่มลดกำลังผลิตที่เวลา 12.00 น. และกลับมาจ่าย



รูปที่ 8 อุปกรณ์ในการทดสอบ



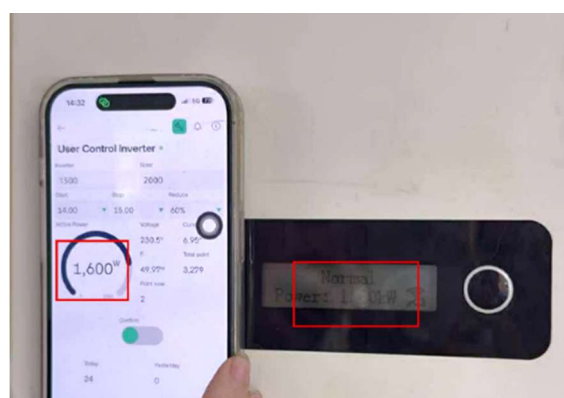
รูปที่ 9 หน้าจอแสดงผลบนแอปพลิเคชันโทรศัพท์มือถือทางฝั่งผู้ใช้งาน

ตามปกติที่เวลา 14.00 น. ทดสอบ 3 กรณีโดยแยกวันกัน โดยแต่ละจะมีการอัปเดตตลอดเวลาในช่วงที่มีการลดกำลังผลิตและจะมีการสรุปคะแนนประจำวันและคะแนนสะสมทั้งหมด เมื่อสิ้นสุดระยะการเข้าร่วมกิจกรรม

3.2 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมและแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือที่ได้พัฒนาขึ้น โดยจำกัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่ระดับร้อยละ 0, 30, และ 60 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าชุดควบคุมสำหรับลดกำลังผลิตสามารถสั่งลดกำลังไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ระดับต่าง ๆ ผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือที่พัฒนาขึ้นมาได้ พร้อมกับคะแนนสะสมเมื่อลดการผลิตในรูปที่ 10 ถึง 11

ในส่วนผลการลดกำลังผลิต ตั้งแต่ 12.00 น. ถึง 14.00 น. เป็นระยะเวลารวมทั้งสิ้น 2 ชั่วโมง ที่ร้อยละ 0, 30, และ 60 ตามลำดับแสดงได้



รูปที่ 10 แอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือที่ควบคุมและสถานะของอินเวอร์เตอร์ก่อนใช้การจำกัดกำลังไฟฟ้า (จ่าย 100%)



รูปที่ 11 แอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือที่ควบคุมและสถานะของอินเวอร์เตอร์หลังใช้การจำกัดกำลังไฟฟ้าที่ร้อยละ 60

จากรูปที่ 12 ถึง 14 เมื่อนำมาคิดคะแนนสะสมในวันแรกได้ 2.2 แต้ม ในวันที่ 2 ได้ 1.38 แต้มและวันที่ 3 ได้ 0.48 แต้ม ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 12 จำกัดกำลังไฟฟ้าที่ร้อยละ 0



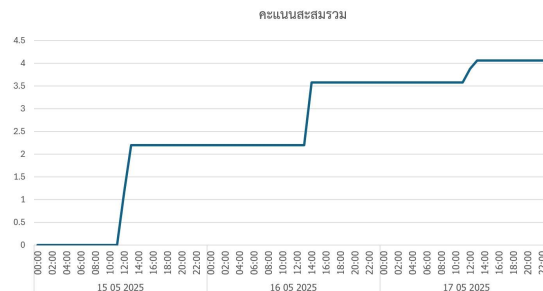
รูปที่ 13 จำกัดกำลังไฟฟ้าที่ร้อยละ 30



รูปที่ 14 จำกัดกำลังไฟฟ้าที่ร้อยละ 60

4. สรุป

ชุดควบคุมการปรับลดกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อบรรเทาปัญหาปรากฏการณ์เส้นโค้งรูปเปิดที่พัฒนาขึ้นโดยใช้บอร์ด Raspberry Pi ร่วมกับรีเลย์สวิตช์ 4 ช่องและมีการส่งผ่านแอปพลิเคชัน Blynk IoT บนมือถือ สามารถลดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ได้ 3 ระดับคือ ร้อยละ 0, 30, และ 60 ตามช่วงระยะเวลาที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังมีระบบสะสมคะแนนตามปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่หายไปจากการเข้าร่วมการลดกำลังผลิต ซึ่งจะช่วยให้เจ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา เข้าร่วมกิจกรรมดังกล่าวมากขึ้น ผลการทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการพบว่า ระบบควบคุม และแอปพลิเคชันที่สร้างขึ้น สามารถสั่งปรับลดกำลังผลิตในช่วงเวลาที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ และรวดเร็ว สอดคล้องกับคำสั่งที่กำหนดโดยผู้ใช้งาน รวมทั้งสามารถแสดงค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ และแด้มสะสมได้อย่างถูกต้อง และมีการอัปเดตตลอดเวลา ในอนาคตจะนำชุดควบคุมดังกล่าวไปใช้งานกับโหนดที่มีความหลากหลาย รวมทั้งการเชื่อมต่อกับระบบจริงและสภาพแวดล้อมจริง โดยมีการส่งข้อมูลให้กับระบบตรวจวัดพลังงานอย่าง



รูปที่ 15 กราฟคะแนนสะสมรวมเมื่อลดกำลังการผลิต

ต่อเนื่องตลอดเวลา และการใช้งานร่วมกับระบบอัตโนมัติโดยผู้ที่ไม่ต้องการการด้วยตัวเอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปราณี หมั่นแผ้ววารี. "รัฐยิ่งตรง2มาตรการลดหย่อนภาษี โซลาร์รูฟท็อป-ลงทุนอนุรักษ์พลังงาน." bangkokbiznews.com Accessed: July. 15, 2025. [Online.] Available: <https://www.bangkokbiznews.com/business/economic/1188417>
- [2] "ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559" การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค,ประเทศไทย. Accessed: July. 15, 2025.
- [3] L. A. Wong, V. K. Ramachandaramurthy, S. L. Walker, and J. B. Ekanayake, "Optimal placement and sizing of battery energy storage system considering the duck curve phenomenon," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 197160–197170, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034380.
- [4] M. A. Rahman, I. Rahman, and N. Mohammad, "Implementing Demand Response in the Residential Energy System to Solve Duck Curve Problem," in *Proc. 2020 2nd Int. Conf. Adv. Inf. Commun. Technol. (ICAICT)*, Dhaka, Bangladesh, 2020, pp. 466–470, doi: 10.1109/ICAICT51780.2020.9333449.
- [5] S. S. Ahmad, F. S. Al-Ismael, A. A. Almehezia, and M. Khalid, "Model Predictive Control Approach for Optimal Power Dispatch and Duck Curve Handling Under High Photovoltaic Power Penetration," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 186840–186850, Oct. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030100.
- [6] Shenzhen SOFARSOLAR Co., Ltd. *USER MANUAL SOFAR 1.1k~3.3KTL-G3*. (2024). Accessed: July. 15, 2025. [Online.] Available: <https://www.sofarsolar.com/upload/file/20240311/1710121923451047146.pdf>
- [7] A. Robinson, June. 2024, "Solar PV Analysis of Phitsanulok, Thailand," profileSOLAR.com. [Online.] Available: <https://profilesolar.com/locations/Thailand/Phitsanulok/>