

ข้อเสนอโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า วิชา 2102490

การจำลองระบบบริหารจัดการพลังงานในสถานะใกล้เวลาจริงของสภาพแวดล้อม
อาคารเกเวอร์ต สแควร์

Simulation of near-real-time energy management system in
Gewertz Square environment

นายพรพิพัฒน์ แก้วเขียว เลขประจำตัวนิสิต 6430255221

นายภูวดล ดำนิล เลขประจำตัวนิสิต 6432136621

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จิตโกมุท ส่งศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2567

ลงชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

ลงชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม (ถ้ามี)

ลงชื่อตัวแทนบริษัท (เฉพาะ
นิสิตในโปรแกรมความเชื่อมโยง
อุตสาหกรรม)

.....

.....

.....

(.....)

(.....)

(.....)

วันที่

วันที่

วันที่

สารบัญ

1	บทนำ	4
1.1	ที่มาและความสำคัญของโครงการ	4
1.2	วัตถุประสงค์ของโครงการ	5
1.3	ขอบเขตของโครงการ	5
1.4	ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงการ	5
1.5	องค์ความรู้ทางวิศวกรรมที่นำมาประยุกต์ใช้	5
2	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1	ระบบจัดการพลังงาน (Energy Management System, EMS)	6
2.1.1	แบตเตอรี่	7
2.1.2	โหลดไฟฟ้า	10
2.1.3	แผงโซลาร์	11
2.2	ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด	12
2.2.1	การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยเทคนิคโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming, LP)	12
2.2.2	ตัวแปรตัดสินใจในระบบ EMS	12
2.2.3	เงื่อนไขบังคับของ EMS	12
2.2.4	ฟังก์ชันจุดประสงค์ของ EMS	13
2.3	การพยากรณ์ข้อมูลโดยใช้แบบจำลอง NeuralProphet	16
2.3.1	แบบจำลอง Neuralprophet	17
2.3.2	การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า (Load Forecasting)	17
2.3.3	การพยากรณ์พลังงานที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์ (Solar Forecasting)	18
3	แนวทางการดำเนินงาน	18
3.1	แนวทางดำเนินการในรายวิชา 2102490	18
3.2	แนวทางดำเนินการในรายวิชา 2102499	19
4	ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น	21
4.1	การเตรียมข้อมูล	21
4.1.1	ข้อมูลโหลด	21
4.1.2	ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงโซลาร์	21
4.1.3	แบตเตอรี่	22
4.1.4	ข้อมูลราคาซื้อและขายค่าไฟฟ้า	22
4.2	การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยเทคนิคโปรแกรมเชิงเส้นเทียบกับโปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม	23
4.3	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัดของแบตเตอรี่	26
4.3.1	การชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบ (Smooth charging)	26
4.3.2	การชาร์จแบตเตอรี่หลายลูกให้ทำงานคล้ายกัน (Multi battery)	28
4.3.3	การส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่ (Encourage charge)	29
4.3.4	การเพิ่มข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน (SoC terminal)	31
4.4	การหาค่าเหมาะที่สุดแบบเลื่อนแกน (Rolling optimization)	33
5	บทสรุป	38
5.1	บทสรุปการทำโครงการจนถึงปัจจุบัน	38
5.2	แผนการดำเนินงาน	38

สารบัญรูป

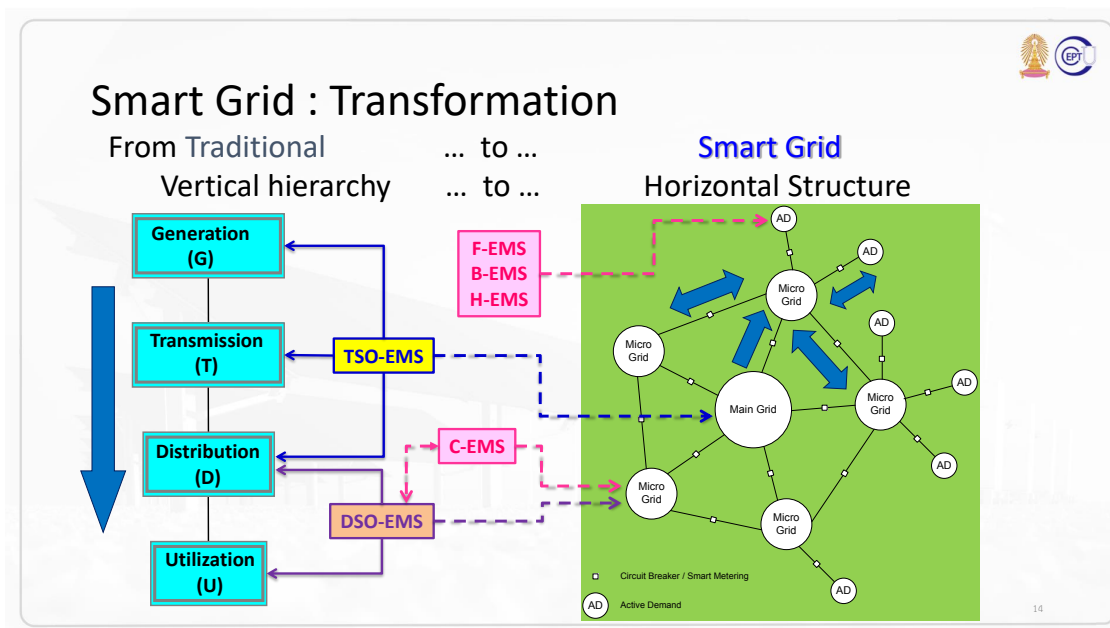
1	ภาพรวมระบบจัดการพลังงาน [1]	4
2	ระบบ EMS ณ อาคารเกเวอร์ต สแควร์	6
3	วัตถุประสงค์ของระบบจัดการพลังงาน	6
4	โมเดลแบตเตอรี่ที่ใช้ใน MATLAB/Simulink [2]	9
5	พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน	10
6	อาคารเกเวอร์ต สแควร์ [3]	10
7	แผนภาพระบบของแผงโซลาร์บนอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	11
8	แผนภาพแนวทางดำเนินการในรายวิชา 2102490	18
9	แผนภาพแนวทางดำเนินการในรายวิชา 2102499	19
10	กราฟอนุกรมเวลาของโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงโซลาร์	21
11		22
12	กราฟแสดงราคาซื้อและขายไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงที่สมมติขึ้น	23
13	กราฟเปรียบเทียบผลเฉลยจากการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยเทคนิค MILP และ LP	25
14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้ารวมที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและอัตราการเปลี่ยนแปลงของ P_{chg} และ P_{dchg}	27
15	กราฟการปรับค่าการชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบภายใต้ค่าถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกัน	27
16	กราฟเปรียบเทียบ P_{chg} , P_{dchg} , และ SoC ของแบตเตอรี่ลูกที่ 1 และ 2	29
17	กราฟการปรับค่าการส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่ภายใต้ค่าถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกัน	30
18	กราฟเปรียบเทียบผลเฉลยจากการไม่มีและมีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน	32
19	กราฟผลเฉลยจากการเลื่อนแกนโดยไม่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน	35
20	กราฟผลเฉลยจากการเลื่อนแกนโดยมีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน	36
21	ค่าไฟฟ้าสะสมใน 1 เดือน: (ซ้าย) การไม่ใช้ EMS, (กลาง) การใช้ EMS, (ขวา) เปรียบเทียบการไม่ใช้และใช้ EMS	37

สารบัญตาราง

1	พารามิเตอร์ในระบบจัดการพลังงาน	7
2	ตัวแปรตัดสินใจในระบบ EMS	12
3	ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ Jinko	22
4	ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองเปรียบเทียบผลเฉลยระหว่าง MILP และ LP	24
5	ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองหาค่าถ่วงน้ำหนักของการชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบ	26
6	ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองหาค่าถ่วงน้ำหนักของการชาร์จแบตเตอรี่หลายลูกให้ทำงานคล้ายกัน	28
7	ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองหาค่าถ่วงน้ำหนักของการส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่	30
8	ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองการเพิ่มข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน	31
9	ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเลื่อนแกน	34
10	แผนการดำเนินงานในการจัดทำโครงงานสำหรับปีการศึกษา 2567	38

1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ



รูปที่ 1: ภาพรวมระบบจัดการพลังงาน [1]

ระบบจัดการพลังงาน (Energy Management System: EMS) เป็นระบบที่ช่วยในการควบคุมและบริหารการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพสูงสุด EMS มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม เป็นต้น เพื่อควบคุมการผลิตและการใช้งานพลังงานให้เหมาะสมกับความต้องการในแต่ละช่วงเวลา และสามารถจัดเก็บพลังงานส่วนเกินในระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) เพื่อรองรับการใช้งานในช่วงเวลาที่มีพลังงานไม่เพียงพอหรือในช่วงที่มีความต้องการพลังงานสูง EMS สามารถแบ่งหน้าที่ตามระดับการจัดการในโครงข่ายไฟฟ้าออกเป็น 2 ระดับหลักตามรูปที่ 1 ได้แก่ TSO-EMS (Transmission System Operator EMS) และ DSO-EMS (Distribution System Operator EMS) โดย TSO-EMS เน้นการบริหารจัดการในระดับการส่งกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไปยังระบบจ่ายไฟ เช่น การรักษาสถิตภาพและเสถียรภาพของระบบ ขณะที่ DSO-EMS เน้นการจัดการพลังงานในระดับการจ่ายไฟฟ้าสู่ผู้ใช้ไฟฟ้าและไม่รักษาสถิตภาพของระบบ ในระดับ DSO-EMS ยังครอบคลุมระบบจัดการพลังงานในพื้นที่ที่แตกต่างกัน เช่น ระบบจัดการพลังงานในโรงงาน (Factory Energy Management System: FEMS) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการผลิตและเครื่องจักรในโรงงาน, ระบบจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management System: BEMS) ช่วยจัดการพลังงานในอาคารให้เหมาะสมกับพฤติกรรมกรรมการใช้งาน, และระบบจัดการพลังงานในบ้าน (Home Energy Management System: HEMS) ช่วยควบคุมการใช้พลังงานในครัวเรือน

ในโครงข่ายนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองการทำงานของระบบจัดการพลังงานในอาคารภายใต้สภาวะใกล้เคียงกับเวลาจริง (Near Real-Time Simulation) ที่มีฟังก์ชันจุดประสงค์สำหรับการลดค่าไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ โดยพื้นที่ที่ศึกษาคือ อาคารเกเวอร์ต สแควร์ มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ โหลดไฟฟ้า, ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop), ระบบกักเก็บพลังงาน, และโครงข่ายไฟฟ้า องค์ประกอบเหล่านี้คล้ายกับงานวิจัย [4] ที่มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ โครงข่ายไฟฟ้า, โหลดไฟฟ้า, และระบบกักเก็บพลังงาน แต่งานวิจัย [4] มีฟังก์ชันจุดประสงค์ในการประหยัดค่าไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว และโครงข่ายนี้ได้พัฒนามาจากโครงข่ายปี 2566 [5] ที่มีรูปแบบปัญหาเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) เนื่องจากมีตัวแปรที่เป็นสถานะการชาร์จหรือคายประจุของแบตเตอรี่ที่มีค่าเป็น 0 หรือ 1 โดยที่ 0 หมายถึง

ถึง ไม่มีการชาร์จหรือคายประจุของแบตเตอรี่ และ 1 หมายถึง มีการชาร์จหรือคายประจุของแบตเตอรี่ ทำให้ตัวแปรสถานะการชาร์จหรือคายประจุเป็นตัวแปรฐานสอง (binary)

ในโครงงานนี้ได้มีการปรับปรุงแนวทางการแก้ปัญหาสำหรับระบบการจัดการพลังงาน โดยเปลี่ยนวิธีการหาค่าเหมาะที่มีรูปแบบปัญหา MILP เป็นรูปแบบปัญหาเชิงเส้น (Linear Programming, LP) ทำให้การแก้ปัญหาเชิงเลขมีประสิทธิภาพมากขึ้น และการปรับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้เป็นแบบไร้หน่วยเพื่อให้การคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของตัวแปรต่างๆ มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นโดยไม่ขึ้นกับขนาดของพารามิเตอร์ เช่น ความจุของแบตเตอรี่หรือปริมาณการใช้โหลดสูงสุด โครงงานนี้ยังได้นำเสนอการจำลองระบบที่ใกล้เคียงกับสถานะจริง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ EMS ในสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การจำลองแบบนี้จะช่วยให้ระบบ EMS สามารถตอบสนองต่อสภาพการใช้งานที่ไม่แน่นอน และให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับสถานะการใช้งานจริง

องค์ประกอบของโครงงานนี้จัดเรียงดังนี้ หัวข้อที่ 1 เป็นบทนำและความสำคัญของโครงงาน, หัวข้อที่ 2 อธิบายถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำ EMS, หัวข้อที่ 3 อธิบายแนวทางการดำเนินงานในวิชา 490 และ 499, หัวข้อที่ 4 แสดงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลลัพธ์เบื้องต้น, และหัวข้อที่ 5 คือสรุปผลการวิจัยและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อพัฒนาระบบการจัดการพลังงานสำหรับอาคารเกเวอร์ต สแควร์ โดยใช้การจำลองในสถานะเสมือนจริงเพื่อประเมินประสิทธิภาพของ EMS ที่ได้รับการปรับปรุงจากโครงงานปี 2566 [5]

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. ทำระบบการจัดการพลังงานสำหรับอาคารเกเวอร์ต สแควร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. จำลองการทำงานของ EMS ในสถานะใกล้เคียงกับเวลาจริงที่คำนวณทุก 5 นาที
3. มีฟังก์ชันจุดประสงค์ที่หลากหลาย ได้แก่ การประหยัดค่าไฟ, การประหยัดพลังงาน, หรือการสร้างผลกำไร ในส่วนฟังก์ชันจุดประสงค์ของแบตเตอรี่จะรวมถึงการชาร์จแบตเตอรี่ให้เป็นไปตามรูปแบบที่ปรับเรียบ, การทำให้การชาร์จแบตเตอรี่หลายลูกทำงานคล้ายกัน, และการสนับสนุนการชาร์จแบตเตอรี่

1.4 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากโครงงาน

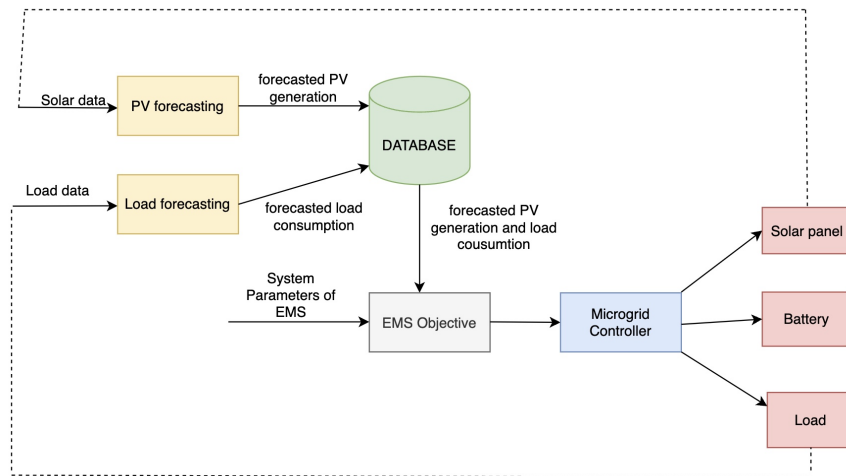
1. ชุดคำสั่ง MATLAB และ Python ที่ช่วยในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดของ EMS ซึ่งสามารถปรับใช้ได้กับอาคารหรือระบบอื่นๆ ที่มีลักษณะการใช้งานใกล้เคียงกัน
2. ผลการจำลองการทำงานของ EMS ในสถานะใกล้เคียงเวลาจริง โดยแสดงถึงประสิทธิภาพและความสามารถในการจัดการพลังงานในสถานการณ์การใช้พลังงานจริง

1.5 องค์ความรู้ทางวิศวกรรมที่นำมาประยุกต์ใช้

1. การหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) สำหรับการจัดการพลังงานในอาคาร โดยเน้นการคำนวณที่มีประสิทธิภาพภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ เช่น ข้อจำกัดในการชาร์จแบตเตอรี่, การประหยัดค่าไฟฟ้า, การสร้างผลกำไรจากการขายไฟฟ้าคืนสู่กริด เป็นต้น
2. อนุกรมเวลา (Time Series) และการพยากรณ์ (Forecasting) สำหรับการคาดการณ์โหลดและการผลิตพลังงานจากแผงโซลาร์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุม EMS อย่างมีประสิทธิภาพ
3. ระบบเชิงพลวัต (Dynamical Systems) เนื่องจากสมการสถานะการชาร์จของแบตเตอรี่ใน MATLAB Simulink เป็นสมการเชิงพลวัต

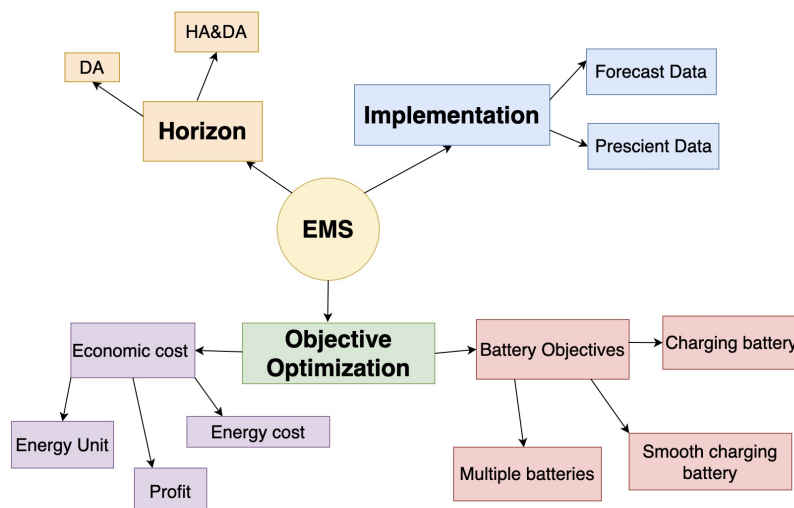
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบจัดการพลังงาน (Energy Management System, EMS)



รูปที่ 2: ระบบ EMS ณ อาคารเกเวอร์ต สแควร์

รูปที่ 2 ระบบจัดการพลังงาน ณ อาคารเกเวอร์ต สแควร์เชื่อมกับองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 3 องค์ประกอบ ได้แก่ โหลดไฟฟ้า แผงโซลาร์ และแบตเตอรี่ ระบบจะเก็บค่าพยากรณ์ของโหลดและกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์ไว้ที่ฐานข้อมูลและจะนำค่าพยากรณ์เหล่านี้ไปทำกับหาค่าเหมาะที่สุดตามจุดประสงค์ของ EMS โดยในการหาค่าเหมาะที่สุดนั้นจะต้องประกอบไปด้วยข้อมูลพยากรณ์ของโหลดไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์ และพารามิเตอร์ของระบบ เช่น คุณลักษณะของแบตเตอรี่ เมื่อหาค่าเหมาะที่สุดสำเร็จแล้วระบบจะส่งแผนการดำเนินงานไปที่ระบบควบคุมกริดเพื่อไปควบคุมแบตเตอรี่ โดยพารามิเตอร์ของระบบแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 3: วัตถุประสงค์ของระบบจัดการพลังงาน

รูปที่ 3 แสดงถึงวัตถุประสงค์ของระบบจัดการพลังงานซึ่งสามารถแบ่งได้หลายแง่มุม ดังนี้

ช่วงเวลาวางแผนของ EMS (Time Horizon) ระบบจัดการพลังงานสามารถวางแผนล่วงหน้าการใช้งานได้ 2 เวลา นั่นคือ 3 วันล่วงหน้าสำหรับการวางแผนดำเนินการ และ 1 ชั่วโมงล่วงหน้า ในช่วงเวลาที่สั้นลงของ 1 ชั่วโมงล่วงหน้าจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าช่วงเวลา 3 วันล่วงหน้า ทำให้เราใช้ข้อมูลในการวางแผนดำเนินการ 1 ชั่วโมงล่วงหน้ามาพิจารณาร่วมกับการวางแผนดำเนินการ 3 วันล่วงหน้า

การจำลองผลของ EMS สามารถเลือกที่จะใช้ข้อมูลที่รู้ล่วงหน้าอยู่แล้ว (prescient data) ในการทำงานแบบออฟไลน์ จะเหมาะกับการวางแผนล่วงหน้า แต่ข้อมูลที่รู้ล่วงหน้าอยู่แล้วไม่สามารถทำได้จริงในการจำลองใกล้เคียงจริง เนื่องจากไม่สามารถรู้ข้อมูลของโหลดและพลังงานที่ผลิตได้ของแผงโซลาร์ จึงต้องใช้ข้อมูลพยากรณ์ในการจำลองใกล้เคียงจริง เพื่อให้ได้ข้อมูลของโหลดและพลังงานที่ผลิตได้ของแผงโซลาร์ในอนาคต

ฟังก์ชันจุดประสงค์ของระบบจัดการพลังงาน นั้นประกอบไปด้วย ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ และ ฟังก์ชันการประหยัดค่าไฟของ EMS ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 2.2.4

ตารางที่ 1: พารามิเตอร์ในระบบจัดการพลังงาน

ตัวแปร	นิยาม	หน่วย
N_{Batt}	จำนวนของแบตเตอรี่ในระบบ	ลูก
$BattCapacity$	ความจุของแบตเตอรี่	กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)
SoC_{min}	สถานะแบตเตอรี่ต่ำสุด	%
$SoC(1)$	สถานะแบตเตอรี่เริ่มต้น	%
SoC_{max}	สถานะแบตเตอรี่สูงสุด	%
η_c	สัมประสิทธิ์การอัดประจุของแบตเตอรี่	-
η_d	สัมประสิทธิ์การคายประจุของแบตเตอรี่	-
MAX CHARGE RATE	อัตราการอัดประจุสูงสุดของแบตเตอรี่	กิโลวัตต์ (kW)
MAX DISCHARGE RATE	อัตราการคายประจุสูงสุดของแบตเตอรี่	กิโลวัตต์ (kW)
$b(t)$	อัตราราคาซื้อพลังงานไฟฟ้าจากกริด	บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง (THB/kWh)
$s(t)$	อัตราราคาขายพลังงานไฟฟ้าให้กริด	บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง (THB/kWh)
w_s	ค่าน้ำหนักของการชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบ	-
w_m	ค่าน้ำหนักของการชาร์จแบตเตอรี่หลายลูกให้ทำงานคล้ายกัน	-
w_c	ค่าน้ำหนักของการส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่	-

2.1.1 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่หรือระบบกักเก็บพลังงาน (Energy storage System, ESS) จะเข้ามามีบทบาทในการจัดการพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการจากกริด โดยถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดไฟฟ้าต้องการมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ แบตเตอรี่จะคายกำลังไฟฟ้าออกมาเพื่อทดแทนกำลังไฟฟ้าที่ไม่เพียงพอ ซึ่งส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ต้องการจากกริดมีค่าลดลง หรือไม่ต้องการดึงกำลังไฟฟ้าจากกริดเลย ในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่ามากกว่ากำลังของโหลดไฟฟ้า แบตเตอรี่จะถูกชาร์จกำลังไฟฟ้าเก็บไว้ โดยสมการที่ใช้บรรยายพลวัตและสมการข้อกำหนด ณ เวลาหนึ่งๆ สำหรับแบตเตอรี่ทุกลูก แสดงได้ดังนี้

สมการบรรยายพลวัตสถานะของแบตเตอรี่

ในรายงานนี้มีตัวแปรที่ใช้อธิบายสมการพลวัตของแบตเตอรี่ คือ สถานะของแบตเตอรี่ (State of Charge, SoC) ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนของพลังงานที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่ต่อพลังงานทั้งหมดที่แบตเตอรี่สามารถเก็บได้, กำลังไฟฟ้าที่ชาร์จเข้า ($P_{\text{chg}} \geq 0$) และ กำลังไฟฟ้าที่คายออกจากแบตเตอรี่ ($P_{\text{dchg}} \geq 0$) ในสถานะทั่วไปเมื่อแบตเตอรี่ส่งคายกำลังไฟฟ้าหรือถูกชาร์จกำลังไฟฟ้าเข้า จะมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าบางส่วนไปซึ่งแสดงได้ด้วยพจน์ η_d, η_c คือค่าคงตัวประสิทธิภาพขณะคายกำลังไฟฟ้าและถูกชาร์จกำลังไฟฟ้าเข้า โดยพลวัตสถานะของแบตเตอรี่แสดงได้ดังสมการ

$$\text{SoC}_i(t+1) = \text{SoC}_i(t) + \frac{100}{\text{BattCapacity}} \left(\eta_c P_{\text{chg}}^{(i)}(t) \Delta t - \frac{P_{\text{dchg}}^{(i)}(t) \Delta t}{\eta_d} \right) \quad (1)$$

- BattCapacity : ความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (kWh)
- Δt : ความละเอียดของเวลา
- i : ดัชนีที่แสดงถึงแบตเตอรี่ตัวที่ $i = 1, 2, \dots, N_{\text{Batt}}$
- t : ดัชนีเวลา $t = 1, 2, \dots, T$

สมการแสดงข้อจำกัดในการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่

เมื่อแบตเตอรี่ทำงาน แบตเตอรี่ไม่สามารถอัดหรือคายประจุมากไปกว่าอัตราการคายและอัดประจุสูงสุดได้ สามารถแสดงดังสมการข้อจำกัดในการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$P_{\text{chg}}^{(i)}(t) \leq \text{MAX CHARGE RATE}, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{\text{Batt}}$$

$$P_{\text{dchg}}^{(i)}(t) \leq \text{MAX DISCHARGE RATE}, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{\text{Batt}}$$

สมการบรรยายข้อจำกัดสถานะของแบตเตอรี่

เงื่อนไขเพิ่มเติมสำหรับแบตเตอรี่คือการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่โดยพบว่าถ้าอัดประจุแบตเตอรี่จนเต็ม และให้แบตเตอรี่คายประจุจนหมดจะส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็ว ดังนั้นจึงจำกัดการทำงานของแบตเตอรี่ไว้ในช่วงที่กำหนด

$$\text{SoC}_{\min,i} \leq \text{SoC}_i(t) \leq \text{SoC}_{\max,i} \quad (4)$$

สำหรับ $i = 1, 2, \dots, N_{\text{Batt}}$ และ $t = 1, 2, \dots, T$

สมการแสดงข้อจำกัดสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน

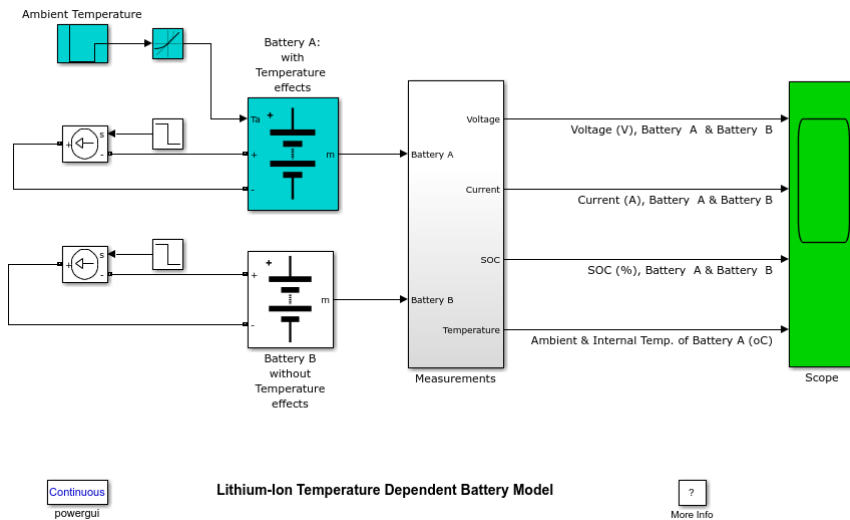
เมื่อแบตเตอรี่ทำงานข้ามวัน เพื่อป้องกันให้สถานะแบตเตอรี่เพียงพอในวันถัดไป จึงมีข้อกำหนดสำหรับสถานะของแบตเตอรี่ ณ ปลายวันโดยต้องการให้สถานะแบตเตอรี่ ณ ปลายวันมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{SoC}_i(T) \geq 40 \quad (5)$$

สำหรับ $i = 1, 2, \dots, N_{\text{Batt}}$ และ T คือดัชนีเวลา ณ ปลายวัน

แบบจำลองการทำงานเชิงพลวัตของแบตเตอรี่

ในการจำลองการทำงานของแบตเตอรี่นั้น มีจุดประสงค์เพื่อที่จะศึกษาว่าถ้าสิ่งไหนทำให้แบตเตอรี่เกิดการอัดและคายประจุ แล้วแบตเตอรี่จะมีการตอบสนองอย่างไร ในหัวข้อนี้แบตเตอรี่ที่สนใจจะศึกษาคือแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน และจำลองการทำงานของแบตเตอรี่ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 4: โมเดลแบตเตอรี่ที่ใช้ใน MATLAB/Simulink [2]

โมเดลแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออนที่ใช้ใน MATLAB/Simulink แสดงดังรูปที่ 4 ในโมเดลแบตเตอรี่ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยแบตเตอรี่ จำนวน 2 ตัวได้แก่แบตเตอรี่ A ที่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ และแบตเตอรี่ B ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ ในหัวข้อนี้จะสนใจศึกษาแบตเตอรี่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิเท่านั้น และไม่คิดผลกระทบจากอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (Aging effect) ในแบตเตอรี่ B นั้นมีพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดค่าเพื่อให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่ที่ต้องการใช้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5

แต่ละพารามิเตอร์นั้นมีนิยามดังนี้

- **Fully charged voltage (V):** แรงดันไฟฟ้าเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสถานะที่ชาร์จเต็ม
- **Nominal voltage (V):** แรงดันไฟฟ้าที่แสดงถึงจุดสิ้นสุดของช่วงเชิงเส้นในกราฟการคายประจุ (discharge curve)
- **Cut-off voltage (V):** แรงดันไฟฟ้าที่แสดงถึงจุดสิ้นสุดของกราฟการคายประจุ หรือกล่าวได้ว่าแบตเตอรี่จะมีการคายประจุจนหมดอย่างสมบูรณ์ที่แรงดันค่านี้
- **Capacity (Ah) at nominal voltage:** ค่าความจุไฟฟ้าที่แสดงถึงจุดสิ้นสุดของช่วงเชิงเส้นในกราฟการคายประจุ (discharge curve)
- **Rated Capacity (Ah):** ความสามารถขั้นต่ำในการเก็บประจุของแบตเตอรี่ (สามารถอ่านได้จากคู่มือการใช้งานของแบตเตอรี่)
- **Maximum capacity (Ah):** ความสามารถสูงสุดในการเก็บประจุของแบตเตอรี่ (ทั่วไปมีค่าเป็น 105% ของ Rated capacity)

(a)

(b)

รูปที่ 5: พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน

- **Internal resistance (Ω):** ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1% ของ Nominal power
- **Nominal discharge current (A):** กระแสที่จ่ายออกมาโดยแบตเตอรี่ซึ่งแสดงในรูปของ C-rate
- **Voltage (V) at exponential zone:** แรงดันไฟฟ้าที่แสดงถึงจุดสิ้นสุดของช่วงเอกซ์โพเนนเชียลในกราฟการคายประจุ (discharge curve)
- **Capacity (Ah) at exponential zone:** ค่าความจุไฟฟ้าที่แสดงถึงจุดสิ้นสุดของช่วงเอกซ์โพเนนเชียลในกราฟการคายประจุ (discharge curve)

2.1.2 โหลดไฟฟ้า

โหลดไฟฟ้า ณ อาคารเกเวอร์ต สแควร์ในช่วงเดือน มี.ค. พ.ศ. 2566 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567 มีค่าโหลดไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 35 kW



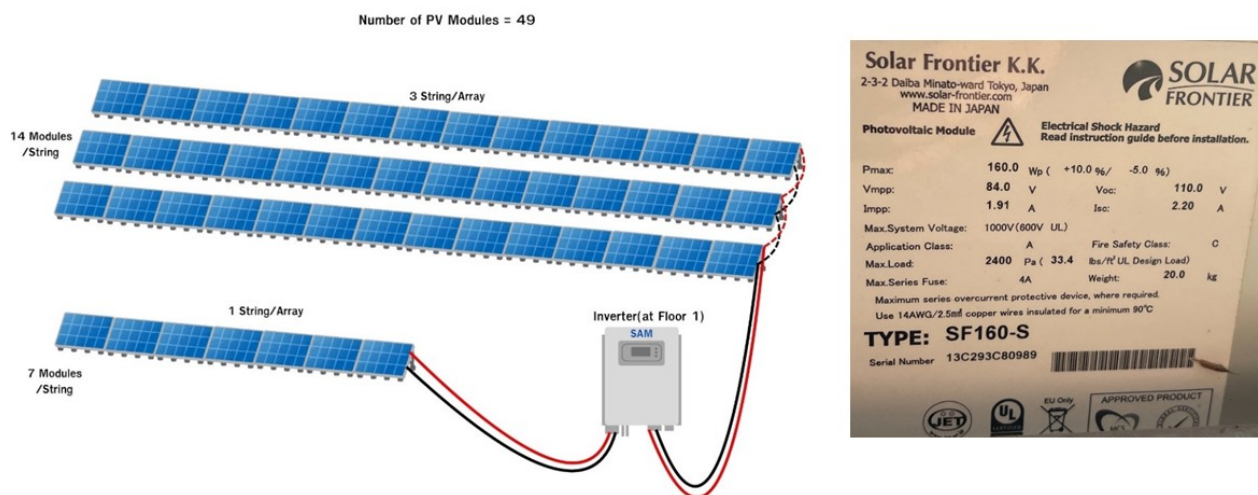
รูปที่ 6: อาคารเกเวอร์ต สแควร์ [3]

2.1.3 แผงโซลาร์

แผงโซลาร์ที่เชื่อมต่อกับอาคารเคเวอร์ตมีจำนวนทั้งหมด 49 แผง และกำลังผลิตรวมสูงสุดคือ 8 kW



(a) แผงโซลาร์ชนิด Frontier (8 kW)



(b) แผนภาพระบบของแผงโซลาร์ชนิด Frontier (8 kW) และคุณลักษณะ

รูปที่ 7: แผนภาพระบบของแผงโซลาร์บนอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด

2.2.1 การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยเทคนิคโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming , LP)

ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดมีหลายเทคนิคด้วยกัน โครงงานนี้จะเสนอเทคนิคโปรแกรมเชิงเส้น LP คือปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดโดยที่ฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับเป็นเชิงเส้น ดังนั้นจะเขียนรูปแบบปัญหา LP ได้เป็น

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && c^T x \\ & \text{subject to} && Ax \leq b \\ & && Gx = h \end{aligned} \quad (6)$$

- $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbf{R}^n$ เป็นตัวแปรตัดสินใจ (Decision variable)
- $A \in \mathbf{R}^{m \times n}$ และ $b \in \mathbf{R}^m$
- $G \in \mathbf{R}^{p \times n}$ และ $h \in \mathbf{R}^p$

เซตเงื่อนไขบังคับของโปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบทรงหลายหน้า (Polygon) โดยทั่วไปแล้วคำตอบของโปรแกรมเชิงเส้นจะอยู่บนจุดยอดหรือขอบของทรงหลายหน้า และโปรแกรมเชิงเส้นสามารถมีผลเฉลยหลายค่าได้

2.2.2 ตัวแปรตัดสินใจในระบบ EMS

ตารางที่ 2: ตัวแปรตัดสินใจในระบบ EMS

ตัวแปร	นิยาม	หน่วย
$P_{\text{net}}(t)$	กำลังไฟฟ้าที่บริโภคหักล้างกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้	กิโลวัตต์ (kW)
$P_{\text{chg}}^{(i)}(t)$	กำลังไฟฟ้าที่อัดเข้าสู่แบตเตอรี่ตัวที่ i	กิโลวัตต์ (kW)
$P_{\text{dchg}}^{(i)}(t)$	กำลังไฟฟ้าที่คายออกมาจากแบตเตอรี่ตัวที่ i	กิโลวัตต์ (kW)
$\text{SoC}_i(t)$	สถานะการชาร์จของแบตเตอรี่	%

2.2.3 เงื่อนไขบังคับของ EMS

1. สมการแสดงกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ต้องการจากกริด

$$P_{\text{net}}(t) = P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t) + \sum_{i=1}^n \left(P_{\text{chg}}^{(i)}(t) - P_{\text{dchg}}^{(i)}(t) \right), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

เมื่อ P_{load} คือ โหลดไฟฟ้า (kW) และ P_{pv} คือ กำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (kW)

กำลังไฟฟ้าที่ต้องการจากกริด (P_{net}) สามารถคำนวณได้จากกำลังของโหลดไฟฟ้าหักล้างด้วยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยถ้า

- $P_{\text{net}} > 0$ แสดงถึง กำลังไฟฟ้าที่โหลดในระบบต้องการมีมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของโหลดจึงต้องดึงกำลังไฟฟ้าจากกริดเข้ามาในระบบ
- $P_{\text{net}} < 0$ แสดงถึง กำลังไฟฟ้าที่โหลดในระบบต้องการมีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้ ในกรณีนี้ระบบไม่ต้องการดึงกำลังไฟฟ้าจากกริดและระบบสามารถขายกำลังไฟฟ้าคืนให้กับกริดได้

- $P_{\text{net}} = 0$ แสดงถึง กำลังไฟฟ้าที่โหลดในระบบต้องการมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้ ดังนั้นระบบจึงไม่ต้องการดึงไฟฟ้าจากกริด

จะได้ว่าสมการ (7) เป็นสมการเชิงเส้น เพราะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นในตัวแปร $P_{\text{load}}, P_{\text{pv}}, P_{\text{chg}}^{(i)}, P_{\text{dchg}}^{(i)}$ ตามลำดับ

2. สมการบรรยายพลวัตสถานะของแบตเตอรี่ (1)
จะได้ว่าสมการ (1) เป็นสมการเชิงเส้น เพราะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นในตัวแปร $\text{SoC}_i, P_{\text{dchg}}^{(i)}, P_{\text{chg}}^{(i)}$
3. อสมการแสดงข้อจำกัดในการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ (2)-(3)
จะได้ว่าอสมการ (2)-(3) เป็นอสมการเชิงเส้น เพราะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นในตัวแปร $P_{\text{chg}}^{(i)}, P_{\text{dchg}}^{(i)}$ ตามลำดับ
4. อสมการบรรยายข้อจำกัดสถานะของแบตเตอรี่ (4)
จะได้ว่าอสมการ (4) เป็นอสมการเชิงเส้น เพราะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นในตัวแปร SoC_i
5. อสมการบรรยายข้อจำกัดสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน
จะได้ว่าอสมการ (5) เป็นอสมการเชิงเส้น เพราะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นในตัวแปร SoC_i

2.2.4 ฟังก์ชันจุดประสงค์ของEMS

การหาค่าเหมาะที่สุดของ EMS จะต้องมีข้อกำหนดคือ ช่วงเวลาสำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดซึ่งแสดงด้วยดัชนีแกนเวลา $t = 1, 2, \dots, T$, ความละเอียดของเวลา (resolution time) และพารามิเตอร์ของระบบจัดการพลังงานดังตารางที่ 1

ฟังก์ชันจุดประสงค์ของแบตเตอรี่

การชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบ (smooth charging)

เมื่อแบตเตอรี่สั่งอัดหรือคายประจุในเวลาหนึ่ง เมื่อพิจารณาในเวลาถัดไปที่อัดหรือคายประจุจะพบว่าต้องการให้กำลังของการอัดหรือคายประจุไม่ต่างกันมาก เนื่องจากไม่ยากให้มีการกระชากของกระแสซึ่งจะส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ได้ ดังนั้นจึงต้องการให้ผลรวมของ ผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่อัดหรือคายประจุในเวลาหนึ่งและเวลาถัดไปมีค่าน้อยที่สุด สำหรับแบตเตอรี่ทุกลูก

$$J_{\text{smoothcharge}} = \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{N_{\text{Batt}}} \left(\frac{|P_{\text{chg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{chg}}^{(i)}(t)|}{\text{MAX CHARGE RATE}} + \frac{|P_{\text{dchg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{dchg}}^{(i)}(t)|}{\text{MAX DISCHARGE RATE}} \right) \quad (8)$$

$$\text{เมื่อพิจารณาฟังก์ชัน } \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|P_{\text{chg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{chg}}^{(i)}(t)|}{\text{MAX CHARGE RATE}} + \frac{|P_{\text{dchg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{dchg}}^{(i)}(t)|}{\text{MAX DISCHARGE RATE}} \right)$$

จะพบว่าฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น (Nonlinear function) แต่สามารถจัดรูปฟังก์ชันนี้ให้อยู่ในรูปแบบของเอพิกราฟ (Epigraph form) ซึ่งสามารถแปลงจากปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันไม่เชิงเส้นเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นได้

จะใช้ตัวแปรเสริม $z_{\text{chg}}^{(i)}(t)$ และ $z_{\text{dchg}}^{(i)}(t)$ โดยที่กำหนดให้

$$\frac{|P_{\text{chg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{chg}}^{(i)}(t)|}{\text{MAX CHARGE RATE}} \leq z_{\text{chg}}^{(i)}(t), \quad t = 1, 2, \dots, T-1$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{\text{Batt}}$$

$$\frac{|P_{\text{dchg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{dchg}}^{(i)}(t)|}{\text{MAX DISCHARGE RATE}} \leq z_{\text{dchg}}^{(i)}(t), \quad t = 1, 2, \dots, T-1$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{\text{Batt}}$$

จะได้ว่าปัญหา

$$\text{minimize } J_{\text{smoothcharge}} = \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{N_{\text{Batt}}} \left(\frac{|P_{\text{chg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{chg}}^{(i)}(t)|}{\text{MAX CHARGE RATE}} + \frac{|P_{\text{dchg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{dchg}}^{(i)}(t)|}{\text{MAX DISCHARGE RATE}} \right)$$

สมมูลกับ

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{N_{\text{Batt}}} (z_{\text{chg}}^{(i)}(t) + z_{\text{dchg}}^{(i)}(t)) \\ &\text{subject to } z_{\text{chg}}^{(i)}(t) \geq \frac{P_{\text{chg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{chg}}^{(i)}(t)}{\text{MAX CHARGE RATE}}, \quad t = 1, 2, \dots, T-1 \\ &\quad \quad \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{Batt}} \\ &\quad \quad \quad z_{\text{chg}}^{(i)}(t) \geq \frac{-(P_{\text{chg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{chg}}^{(i)}(t))}{\text{MAX CHARGE RATE}}, \quad t = 1, 2, \dots, T-1 \\ &\quad \quad \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{Batt}} \\ &\quad \quad \quad z_{\text{dchg}}^{(i)}(t) \geq \frac{P_{\text{dchg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{dchg}}^{(i)}(t)}{\text{MAX DISCHARGE RATE}}, \quad t = 1, 2, \dots, T-1 \\ &\quad \quad \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{Batt}} \\ &\quad \quad \quad z_{\text{dchg}}^{(i)}(t) \geq \frac{-(P_{\text{dchg}}^{(i)}(t+1) - P_{\text{dchg}}^{(i)}(t))}{\text{MAX DISCHARGE RATE}}, \quad t = 1, 2, \dots, T-1 \\ &\quad \quad \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{Batt}} \end{aligned}$$

จากการจัดให้อยู่รูปของ epigraph form จะพบว่าปัญหาใหม่นี้มีฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับเป็นเชิงเส้นในตัวแปร $z_{\text{chg}}^{(i)}, z_{\text{dchg}}^{(i)}, P_{\text{chg}}^{(i)}, P_{\text{dchg}}^{(i)}$

การชาร์จแบตเตอรี่หลายลูกให้ทำงานคล้ายกัน (managing multiple batteries)

ในระบบที่มีแบตเตอรี่หลายลูกทำงานพร้อม ถ้ามีแบตเตอรี่บางลูกรับภาระงานมากกว่าลูกอื่นอาจทำให้แบตเตอรี่นั้นเสื่อมสภาพเร็วกว่าได้ จึงต้องการให้แบตเตอรี่ทุกลูกทำงานใกล้เคียงกันโดยที่บางลูกไม่ได้รับภาระมากกว่าลูกอื่น ในที่นี้จะใช้ตัวแปรเสริม สถานะแบตเตอรี่อ้างอิง (SoC_c) ซึ่งใช้เทียบหาผลต่างของ SoC_i และ SoC_c สามารถแสดงสมการได้ดังนี้ สำหรับระบบที่มีแบตเตอรี่ที่มีมากกว่าหรือเท่ากับ 3 ลูก

$$J_{\text{multibatt}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{Batt}}} \frac{|\text{SoC}_i(t) - \text{SoC}_c(t)|}{100} \quad (9)$$

สำหรับระบบที่มีแบตเตอรี่ 2 ลูก

$$J_{\text{multibatt}} = \sum_{t=1}^T \frac{|\text{SoC}_1(t) - \text{SoC}_2(t)|}{100} \quad (10)$$

การส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่ (encouragement to charge battery)

ฟังก์ชันนี้แสดงถึงความต้องการให้แบตเตอรี่ชาร์จเมื่อสถานะของแบตเตอรี่ยังไม่ถึงค่าสูงสุด โดยจะเปรียบเทียบสถานะแบตเตอรี่ปัจจุบันเทียบกับสถานะแบตเตอรี่สูงสุด

$$J_{\text{chargebatt}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{Batt}}} \frac{\text{SoC}_{\text{max},i} - \text{SoC}_i(t)}{\text{SoC}_{\text{max},i} - \text{SoC}_{\text{min},i}} \quad (11)$$

ฟังก์ชันการประหยัดค่าไฟของ EMS

พลังงานไฟฟ้าที่ดึงจากกริด (Energy Unit)

ความต้องการไฟฟ้าจากกริดนั้นบ่งบอกด้วย P_{net} โดยถ้า P_{net} มีค่าเป็นบวกนั้นหมายความว่าความต้องการโหลดไฟฟ้ามีมากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังนั้นจึงต้องดึงพลังงานจากกริดเพิ่ม ในที่นี้จึงใช้ฟังก์ชันหาค่าสูงสุดในการบ่งบอกพลังงานที่ต้องการจากกริด แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$J_{\text{cost}} = \text{Energy unit} = \sum_{t=1}^T \max(0, P_{\text{net}}(t)) \Delta t \quad (12)$$

จาก $\max(0, P_{\text{net}}(t))$ จะพบว่าฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น (Nonlinear function) แต่สามารถจัดรูปฟังก์ชันนี้ให้อยู่ในรูปแบบของ Epigraph form ได้ดังนี้
จะใช้ตัวแปรเสริม $Z(t)$ โดยที่ กำหนดให้

$$Z(t) \geq \max(0, P_{\text{net}}(t)), \quad t = 1, 2, \dots, T$$

จึงได้ว่าปัญหา

$$\text{minimize} \quad \sum_{t=1}^T \max(0, P_{\text{net}}(t)) \Delta t$$

สมมูลกับ

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \quad \sum_{t=1}^T Z(t) \Delta t \\ &\text{subject to} \quad Z(t) \geq 0, \quad t = 1, 2, \dots, T \\ &\quad \quad \quad Z(t) \geq P_{\text{net}}(t), \quad t = 1, 2, \dots, T \end{aligned}$$

จากการจัดให้อยู่รูปของ epigraph form จะพบว่าปัญหาใหม่มีฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับเป็นเชิงเส้นในตัวแปร $Z(t)$, P_{net} โดย P_{net} นั้นเป็นเชิงเส้นในตัวแปร $P_{\text{chg}}, P_{\text{dchg}}, P_{\text{load}}, P_{\text{pv}}$ ตาม (7)

ค่าไฟที่ต้องจ่ายเมื่อดึงพลังงานจากกริด (Energy Cost)

ฟังก์ชันนี้จะคำนวณค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการดึงพลังงานจากกริดมาใช้ โดย $b(t)$ เป็นค่าไฟที่ต้องจ่ายเพื่อดึงไฟฟ้าจากกริด

$$J_{\text{cost}} = \text{Energy cost} = \sum_{t=1}^T b(t) \max(0, P_{\text{net}}(t)) \Delta t \quad (13)$$

จาก $b(t) \max(0, P_{\text{net}}(t)) \Delta t$ จะพบว่าฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น แต่สามารถแปลงจากปัญหาการหาค่าเหมาะสมสุดของฟังก์ชันไม่เชิงเส้นเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นโดยเทคนิค Epigraph form เช่นเดียวกับฟังก์ชันพลังงานไฟฟ้าที่ดึงจากกริด

กำไรที่ได้จากการซื้อและขายไฟจากกริด (Profit)

ในกรณีที่สามารถขายพลังงานคืนให้กับกริดได้ ฟังก์ชันนี้จะคำนวณกำไรสูงสุดที่ได้จากการซื้อและขายไฟจากกริด โดย $s(t)$ คือ อัตราการขายพลังงานให้กริด

$$J_{\text{cost}} = \sum_{t=1}^T [b(t) \max(0, P_{\text{net}}(t)) - s(t) \max(0, -P_{\text{net}}(t))] \Delta t \quad (14)$$

จาก $s(t) \max(0, -P_{\text{net}}(t)) - b(t) \max(0, P_{\text{net}}(t)) \Delta t$ จะพบว่าฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น โดยการใช้เทคนิค Epigraph form ได้ว่า

จะใช้ตัวแปรเสริม $S(t)$ และ $B(t)$ โดยที่

$$\begin{aligned} S(t) &\geq s(t) \max(0, -P_{\text{net}}(t)), \quad t = 1, 2, \dots, T \\ B(t) &\geq b(t) \max(0, P_{\text{net}}(t)), \quad t = 1, 2, \dots, T \end{aligned}$$

จึงได้ว่าปัญหา

$$\text{minimize} \quad \sum_{t=1}^T [s(t) \max(0, -P_{\text{net}}(t)) - b(t) \max(0, P_{\text{net}}(t))] \Delta t$$

สมมูลกับ

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \sum_{t=1}^T (S(t) - B(t)) \Delta t \\ \text{subject to} \quad & B(t) \geq 0, \quad t = 1, 2, \dots, T \\ & S(t) \geq 0, \quad t = 1, 2, \dots, T \\ & B(t) \geq b(t) P_{\text{net}}(t), \quad t = 1, 2, \dots, T \\ & S(t) \geq -s(t) P_{\text{net}}(t), \quad t = 1, 2, \dots, T \end{aligned}$$

จากการจัดให้อยู่รูปของ epigraph form จะพบว่าปัญหาใหม่มีฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับเป็นเชิงเส้นในตัวแปร S_t, B_t, P_{net} โดย P_{net} เป็นเชิงเส้นในตัวแปร $P_{\text{chg}}, P_{\text{dchg}}, P_{\text{load}}, P_{\text{pv}}$ ตาม (7)

กล่าวโดยสรุป ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดของ EMS แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & J_{\text{cost}} + w_m J_{\text{multibatt}} + w_s J_{\text{smooth charge}} + w_c J_{\text{charge batt}} \\ \text{subject to} \quad & \text{Power balance constraints (7)} \\ & \text{Battery dynamic (1)} \\ & \text{Battery charge/discharge constraints (2) - (3)} \\ & \text{Battery's terminal SOC (5)} \\ & \text{Battery's SOC constraint (4)} \end{aligned} \quad (15)$$

2.3 การพยากรณ์ข้อมูลโดยใช้แบบจำลอง NeuralProphet

การพยากรณ์ข้อมูลเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบการจัดการพลังงานเพื่อที่จะทำให้ระบบวางแผนจัดการพลังงานให้มีประสิทธิภาพ ปัจจัยสำคัญที่ใช้การพยากรณ์ใน EMS ได้แก่ การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้บริโภค (load forecasting) และการพยากรณ์พลังงานที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์ (solar forecasting) นอกจากนี้การพยากรณ์มีการพยากรณ์ระยะสั้น (Day-Ahead, DA) และการพยากรณ์ระยะสั้นมาก (Hour-Ahead, HA) โดยทั้งสองแบบแตกต่างกันตรงที่เวลาที่ต้องการพยากรณ์ล่วงหน้า ทำให้การออกแบบแบบจำลองที่ต้องใช้การพยากรณ์แตกต่างกัน

NeuralProphet เป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาจากแบบจำลอง Prophet ของ Facebook โดย Neuralprophet เป็นการพยากรณ์ข้อมูลแบบไฮบริดที่ใช้ PyTorch และเรียนรู้ข้อมูลด้วยวิธีการเรียนรู้เชิงลึกมาตรฐาน (Standard deep learning) [6] การใช้แบบจำลอง NeuralProphet ในการพยากรณ์ข้อมูลจึงเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพ

2.3.1 แบบจำลอง Neuralprophet

Neuralprophet มีคุณสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) ทำให้มีความสามารถที่จะออกแบบแบบจำลองที่ซับซ้อนได้ องค์ประกอบหลักที่สำคัญของ Neuralprophet ที่ใช้ในการพยากรณ์ข้อมูล ได้แก่ แนวโน้ม (trend), ฤดูกาล (seasonality), และผลกระทบจากปัจจัยภายนอก (external events) องค์ประกอบเหล่านี้ทำให้การพยากรณ์ของข้อมูลมีความแม่นยำมากขึ้น โดยผลของการพยากรณ์เขียนได้ตามสมการ (16) [6] ดังนี้

$$\hat{y}(t) = T(t) + S(t) + E(t) + F(t) + A(t) + L(t) \quad (16)$$

โดยที่

- $\hat{y}(t)$ คือ ผลของการพยากรณ์
- $T(t)$ คือ ผลกระทบจากแนวโน้ม
- $S(t)$ คือ ผลกระทบจากฤดูกาล
- $E(t)$ คือ ผลกระทบจากเหตุการณ์และวันหยุด
- $F(t)$ คือ ผลกระทบจากปัจจัยภายนอกที่รู้ล่วงหน้า (Future regression)
- $A(t)$ คือ ผลกระทบจากการถดถอยในตัว (Auto regression)
- $L(t)$ คือ ผลกระทบจากปัจจัยภายนอกที่ล่าช้า (Lagged regression)

2.3.2 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า (Load Forecasting)

การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าเป็นกระบวนการสำคัญในระบบการจัดการพลังงาน เพื่อช่วยในการวางแผนและควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ การพยากรณ์ที่แม่นยำสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ และสนับสนุนการนำพลังงานจากแหล่งโซลาร์มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลที่รับเข้ามาจากหลายแหล่ง เช่น หน่วยงาน NCEP (National Centers for Environmental Prediction) เป็นหน่วยงานที่วิเคราะห์และพัฒนาข้อมูลสภาพอากาศ เพื่อนำไปใช้ในการพยากรณ์และสนับสนุนการวิจัยทางวิทยาศาสตร์

ข้อมูลนำเข้า (Input):

1. การใช้โหลดไฟฟ้า
2. อุณหภูมิโดยรอบจาก NCEP
3. ชั่วโมงใช้งานในห้องปฏิบัติการ
4. วันใช้งานในห้องปฏิบัติการ
5. ความเข้มแสงจาก NCEP

ข้อมูลส่งออก (Output):

1. ค่าพยากรณ์การใช้โหลดไฟฟ้า

การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าออกแบบด้วยแบบจำลอง NeuralProphet โดยใช้คุณลักษณะ 1. เป็นข้อมูลในอดีต และ 2.-5. เป็นข้อมูลที่รู้ล่วงหน้าของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าพยากรณ์

2.3.3 การพยากรณ์พลังงานที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์ (Solar Forecasting)

การพยากรณ์พลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระบวนการสำคัญสำหรับการวางแผนจัดการระบบพลังงาน เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์มีความแปรผันตามปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น สภาพอากาศ เวลาในแต่ละวัน และฤดูกาล การพยากรณ์ที่แม่นยำจึงช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของระบบจัดการพลังงาน

ข้อมูลนำเข้า (Input):

1. ความเข้มแสง
2. ดัชนีเมฆ
3. ความเข้มแสงในวันที่ฟ้าโปร่ง
4. ความเข้มแสงจาก NCEP
5. อุณหภูมิโดยรอบจาก NCEP

ข้อมูลส่งออก (Output):

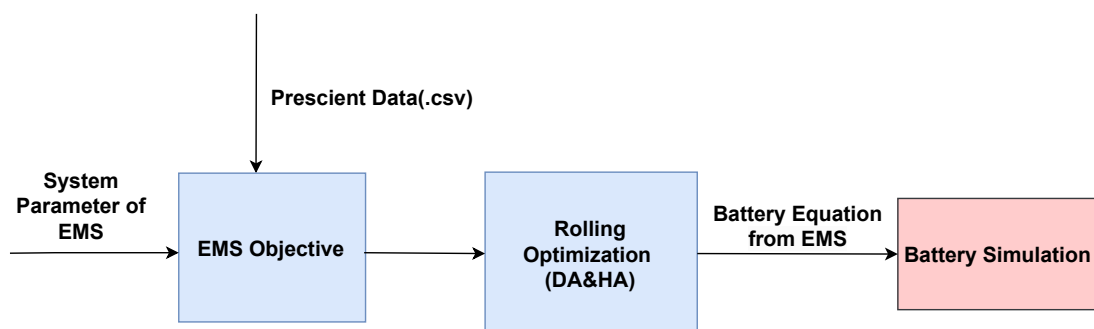
1. ค่าพยากรณ์ความเข้มแสง

การพยากรณ์พลังงานที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์ออกแบบด้วยแบบจำลอง NeuralProphet โดยใช้คุณลักษณะ 1. และ 2. เป็นข้อมูลในอดีต และ 3.-5. เป็นข้อมูลที่อยู่ล่วงหน้าของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าพยากรณ์

3 แนวทางการดำเนินงาน

แนวทางการดำเนินงานนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 หัวข้อหลัก โดยเริ่มดำเนินงานจาก แนวทางการดำเนินการในรายวิชา 2102490 และ แนวทางการดำเนินการในรายวิชา 2102499 ตามลำดับ

3.1 แนวทางการดำเนินการในรายวิชา 2102490



รูปที่ 8: แผนภาพแนวทางการดำเนินการในรายวิชา 2102490

จากรูปที่ 8 แสดงถึงแนวทางการดำเนินการในรายวิชา 2102490 โดยจุดประสงค์คือต้องการแสดงผลการจำลองการทำงานของแบตเตอรี่ โดยข้อมูลที่ใช้คือข้อมูลที่ทราบล่วงหน้าของโหลดไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์ โดย

เริ่มจากนำข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบ EMS และรับข้อมูลโหลดไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เพื่อทำการหาค่าเหมาะสมแบบเลื่อนแกนตามฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ต้องการ ผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมคือรูปแบบการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ และนำผลลัพธ์นี้ไปแสดงผลในรูปแบบสถานะของแบตเตอรี่ โดยใช้สมการ SoC ของแบตเตอรี่จากระบบ EMS สำหรับขั้นตอนดำเนินงานแสดงได้ดังต่อไปนี้

การแปลงปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด

เนื่องจากในรายงานก่อนหน้านี้ [5] นั้นใช้เทคนิคในการหาค่าเหมาะสมแบบโปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed integer LP, MILP) ในรายงานนี้จึงได้แปลงปัญหาจาก MILP เป็นโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming, LP) ซึ่งใช้เวลาในการหาค่าเหมาะสมที่สั้นน้อยกว่า

การทำให้ค่าน้ำหนักของฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นมาตรฐาน

เนื่องจากในรายงาน [5] ค่าน้ำหนักของฟังก์ชันจุดประสงค์นั้นขึ้นกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่ ส่งผลให้เมื่อเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่พิจารณาจะทำให้ต้องปรับค่าน้ำหนักของฟังก์ชันจุดประสงค์ใหม่ทุกครั้ง

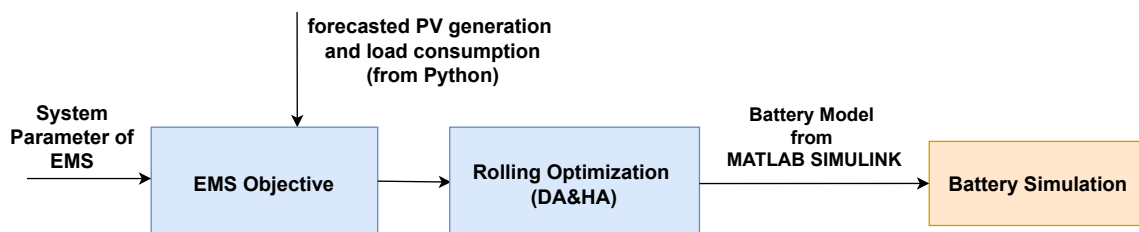
การหาค่าเหมาะสมแบบเลื่อนแกน

การหาค่าเหมาะสมแบบเลื่อนแกนจะนำค่าพารามิเตอร์ของระบบจัดการพลังงาน, และนำข้อมูลซึ่งรู้ล่วงหน้า (pre-scient data) ได้แก่ข้อมูลของการบริโภคกำลังไฟฟ้า (หรือโหลดไฟฟ้า) และข้อมูลกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์ มาทำการหาค่าเหมาะสมแบบเลื่อนแกนโดยใช้เทคนิค LP ตาม ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ต้องการ

การจำลองการทำงานของแบตเตอรี่

การจำลองการทำงานของแบตเตอรี่ จะแสดงสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ (Stage of Charge, SoC) เทียบกับเวลา โดยในการคำนวณ SoC จะใช้สมการของแบตเตอรี่จากระบบจัดการพลังงาน

3.2 แนวทางดำเนินการในรายวิชา 2102499



รูปที่ 9: แผนภาพแนวทางดำเนินการในรายวิชา 2102499

จากรูปที่ 9 แสดงถึงแนวทางการดำเนินการในรายวิชา 2102499 โดยจุดประสงค์คือต้องการแสดงผลการจำลองการทำงานของแบตเตอรี่ จุดที่แตกต่างจากรายวิชา 2102490 คือข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลที่พยากรณ์ของโหลดไฟฟ้า

และกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์ และในการจำลองการทำงานของแบตเตอรี่จะใช้สมการ SoC ใน MATLAB Simulink โดยเริ่มจากนำข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบ EMS และรับข้อมูลพยากรณ์ของโหลดไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์ มาหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเลื่อนแกนตามฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ต้องการ ผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดคือรูปแบบการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ และนำผลลัพธ์นี้ไปแสดงผลในรูปแบบสถานะของแบตเตอรี่ สำหรับขั้นตอนดำเนินงานแสดงได้ดังต่อไปนี้

การปรับปรุงแบบจำลองพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์

ข้อมูลขาเข้าของการหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นข้อมูลทำนายจึงต้องทำการปรับปรุงแบบจำลองพยากรณ์โดยจะพิจารณาค่าความผิดพลาดระหว่างความละเอียดเวลาที่ 15 นาทีและ 5 นาทีโดยต้องการพยากรณ์ค่าล่วงหน้า 1 ชั่วโมง

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเลื่อนแกน

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเลื่อนแกนจะนำค่าพารามิเตอร์ของระบบจัดการพลังงาน, และนำข้อมูลพยากรณ์ (forecast data) ของข้อมูลโหลดไฟฟ้า และข้อมูลกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์ มาทำการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเลื่อนแกนตามฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ต้องการ

การจำลองการทำงานของแบตเตอรี่

การจำลองการทำงานของแบตเตอรี่ จะแสดงสถานะการชาร์จแบตเตอรี่เทียบกับเวลา โดยรับข้อมูลการอัดและคายประจุ ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการหาค่าเหมาะสมที่สุด ในการคำนวณ SoC จะใช้สมการของแบตเตอรี่จากโมเดลแบตเตอรี่ใน MATLAB Simulink

4 ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น

4.1 การเตรียมข้อมูล

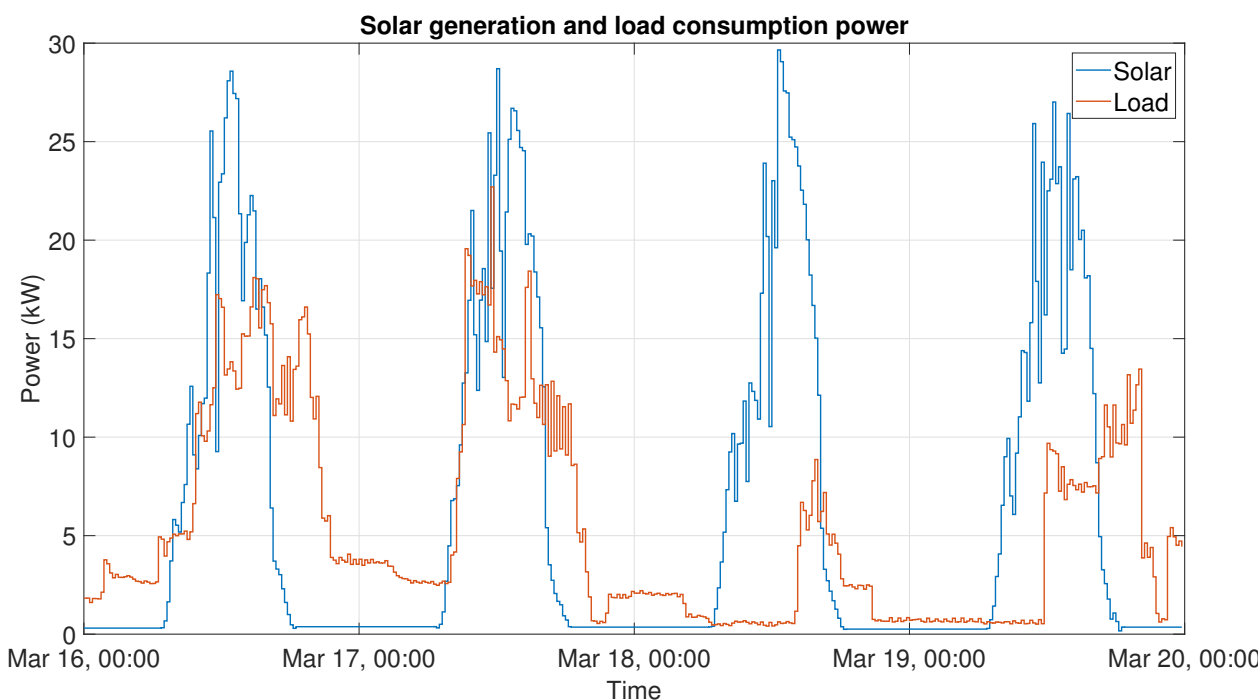
4.1.1 ข้อมูลโหลด

ข้อมูลโหลดได้มาจากแพลตฟอร์ม CUBEM และมีเตอร์ของ รศ. ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน ได้ถูกปรับความละเอียดข้อมูลให้เป็น 15 นาที

4.1.2 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงโซลาร์

ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงโซลาร์ในโครงการนี้ได้มาจากแพลตฟอร์ม CUEE และมีเตอร์ของ รศ. ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน ได้ถูกปรับความละเอียดข้อมูลให้เป็น 15 นาที ข้อมูลจากแพลตฟอร์ม CUEE แสดงให้เห็นว่า กำลังการผลิตสูงสุดของแผงโซลาร์อยู่ที่ 8 กิโลวัตต์ (kW) แต่ทีมวิจัย CEPT มีแผนการติดตั้งแผงโซลาร์ใหม่ที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 50 กิโลวัตต์ (kW) จึงได้ปรับสเกลข้อมูลให้กำลังการผลิตสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 50 กิโลวัตต์ เพื่อสอดคล้องกับแผงโซลาร์ที่ติดตั้งใหม่

ตัวอย่างข้อมูลในรูปที่ 10 แสดงกราฟอนุกรมเวลาของโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงโซลาร์ โดยพบว่าโหลดมีความแปรปรวนตามช่วงเวลาในแต่ละวันเนื่องจากพฤติกรรมการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน เช่น ในรูปที่ 10 มีการใช้โหลดมากในช่วงเย็นของวันที่ 16 มีนาคม 2566 แต่ช่วงเย็นวันที่ 18 มีนาคม 2566 มีการใช้โหลดน้อยซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามช่วงเวลา ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงโซลาร์จะมีรูปแบบคล้ายกันในทุกๆวัน โดยมีค่าสูงสุดในช่วงกลางวันและลดลงในช่วงเช้ามืดกับช่วงเย็น ซึ่งเป็นผลจากการขึ้นและตกของดวงอาทิตย์ ส่งผลให้ความเข้มแสงอาทิตย์ที่แผงโซลาร์ได้รับมีค่าสูงในช่วงเวลากลางวัน



รูปที่ 10: กราฟอนุกรมเวลาของโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงโซลาร์

4.1.3 แบตเตอรี่

ข้อมูลแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองเป็นข้อมูลแบตเตอรี่ของ Jinko [7] ทีมวิจัย CEPT วางแผนจัดซื้อแบตเตอรี่จำนวน 2 ลูก เมื่อเกิดกรณีที่แบตเตอรี่ลูกใดลูกหนึ่งเกิดปัญหาจะสามารถซ่อมแซมได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบ และพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่แสดงไว้ตามตารางที่ 3 ค่าแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยของแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของช่วงการทำงานแบตเตอรี่

ตารางที่ 3: ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ Jinko

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
η_c	0.95	-
η_d	$0.95 * 0.93$	-
อัตราการชาร์จประจุสูงสุด	100	kW
อัตราการคายประจุสูงสุด	100	kW
ความจุแบตเตอรี่	215	kWh
SoC(1)	50	%
SoC _{min}	20	%
SoC _{max}	80	%
ค่าปลาย SoC	0	%
แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	$\frac{672+864}{2}$	V



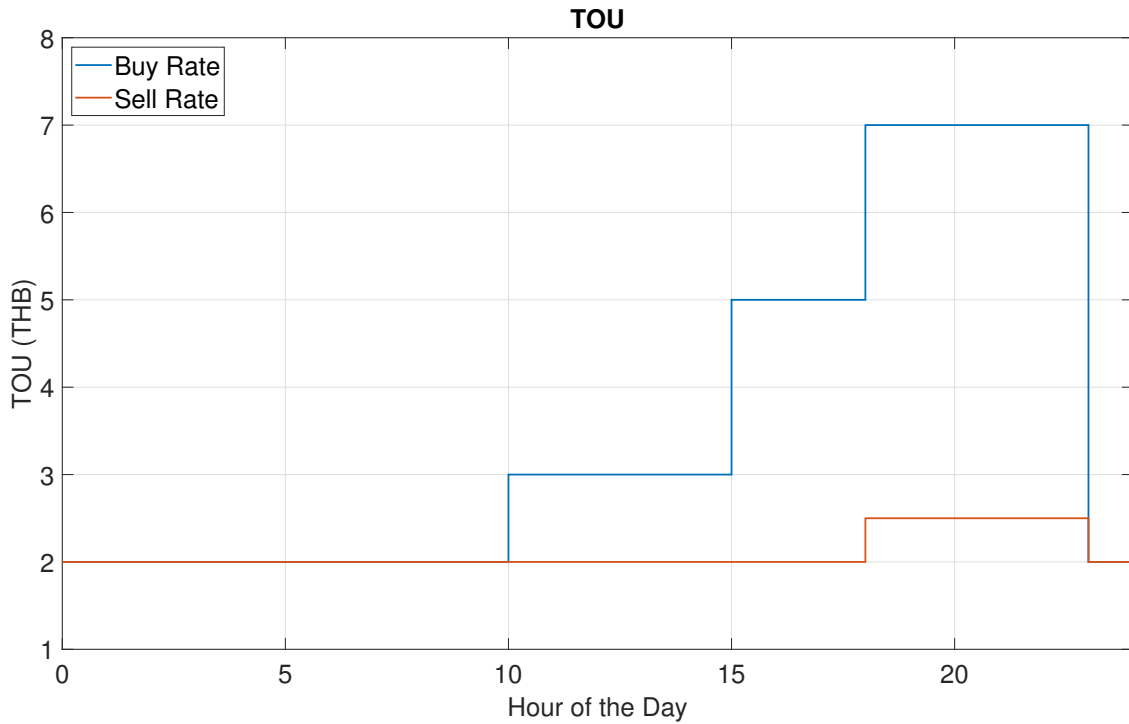
รูปที่ 11:

แบตเตอรี่ Jinko ความจุ 215 kWh [7]

4.1.4 ข้อมูลราคาซื้อและขายค่าไฟฟ้า

ข้อมูลราคาซื้อและขายค่าไฟฟ้าถูกออกแบบให้เปลี่ยนแปลงตามเวลา (TOU) ตามรูปที่ 12 โดยราคาซื้อค่าไฟฟ้าแบ่งเป็นช่วงเวลาต่างๆ คือ เวลา 00:00 - 10:00 น. ราคา 2 บาท, เวลา 10:00 - 14:00 น. ราคา 3 บาท, เวลา 14:00 - 18:00 น. ราคา 5 บาท, เวลา 18:00 - 22:00 น. ราคา 7 บาท, และเวลา 22:00 - 24:00 น. ราคากลับ

มาเป็น 2 บาท ส่วนราคาขายค่าไฟฟ้าจะมีราคา 2 บาทตลอดทั้งวัน ยกเว้นช่วงเวลา 18:00 - 22:00 น. ที่ปรับราคาเป็น 2.5 บาท สาเหตุที่ออกแบบราคาซื้อและขายค่าไฟฟ้าตามรูปที่ 12 เนื่องจากต้องการให้ค่าไฟฟ้ามีความผันผวนตามช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ทำให้ EMS ตัดสินใจใช้พลังงานในช่วงเวลาที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ และหลีกเลี่ยงการใช้พลังงานช่วงที่ราคาสูง



รูปที่ 12: กราฟแสดงราคาซื้อและขายไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงที่สมมติขึ้น

4.2 การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยเทคนิคโปรแกรมเชิงเส้นเทียบกับโปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม

ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed Integer Linear Programming: MILP) เป็นปัญหาเชิงเส้นที่มีตัวแปรบางตัวเป็นจำนวนเต็ม โครงการปี 2566 [5] ใช้ MILP ในการหาค่าเหมาะที่สุดของระบบจัดการพลังงาน โดยมีตัวแปร x_{chg} และ x_{dchg} เป็นตัวแปรที่มีค่า 0 หรือ 1 ที่บ่งบอกสถานะของการชาร์จหรือคายประจุของแบตเตอรี่ โครงการปี 2566 [5] มีข้อจำกัดในการชาร์จและการคายประจุแบตเตอรี่สามารถแสดงตาม (17) และ (18) หมายถึงการชาร์จหรือคายประจุในช่วงเวลานั้นจะไม่เกินค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ นอกจากนี้แบตเตอรี่ไม่มีการชาร์จและคายประจุพร้อมกันได้ เนื่องจากข้อจำกัดการชาร์จและการคายประจุที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกันตาม (19)

$$P_{chg}(t) \leq x_{dchg}(t) \cdot \text{MAX CHARGE RATE} \quad (17)$$

$$P_{dchg}(t) \leq x_{chg}(t) \cdot \text{MAX DISCHARGE RATE} \quad (18)$$

$$0 \leq x_{chg}(t) + x_{dchg}(t) \leq 1 \quad \text{เมื่อ} \quad x_{chg}(t), x_{dchg}(t) \in \{0, 1\} \quad (19)$$

โครงการฉบับนี้ได้เปลี่ยนมาใช้วิธี LP โดยได้มีการกำจัดตัวแปร x_{chg} และ x_{dchg} ทำให้กระบวนนี้ไม่มีตัวแปรที่มีค่าเป็นจำนวนเต็ม ส่งผลให้ไม่ข้อจำกัดการชาร์จและการคายประจุที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกัน และสาเหตุที่ทำให้ปัญหานี้มีผลเฉลยของ P_{chg} และ P_{dchg} ไม่เคยมีค่ามากกว่า 0 kW พร้อมกันเลย เนื่องมาจากสมการ SoC (1), สมการ P_{net} (7) และฟังก์ชันจุดประสงค์ (12)

การพิสูจน์ว่า P_{chg} และ P_{dchg} ไม่เคยมีค่ามากกว่า 0 kW พร้อมกันเลย กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของ SoC ใน (1) มีค่าเท่ากัน, $\eta_c = 0.95$, และ $\eta_d = 0.9$ การทดลองได้แบ่งกรณีการจัดการกำลังไฟฟ้าออกเป็นสองกรณี คือ:

- กรณีที่กำหนดให้ $P_{dchg} = 0$ kW

$$\text{คำนวณได้ค่า } P_{chg} = 105 \text{ kW และ } P_{net} = \text{Net Load} + 105 \text{ kW}$$

- กรณีที่กำหนดให้ $P_{dchg} = 50$ kW

$$\text{คำนวณได้ค่า } P_{chg} = 165 \text{ kW และ } P_{net} = \text{Net Load} + 115 \text{ kW}$$

แสดงให้เห็นว่า P_{net} ของกรณีแรกมีค่าน้อยกว่า ทำให้ผลเฉลี่ยในกรณีแรกมีค่าน้อยที่สุดเสมอ ดังนั้น P_{chg} และ P_{dchg} ไม่เคยมีค่ามากกว่า 0 kW พร้อมกันเลย ทำให้สามารถเปลี่ยนรูปแบบปัญหาจาก MILP เป็น LP ได้

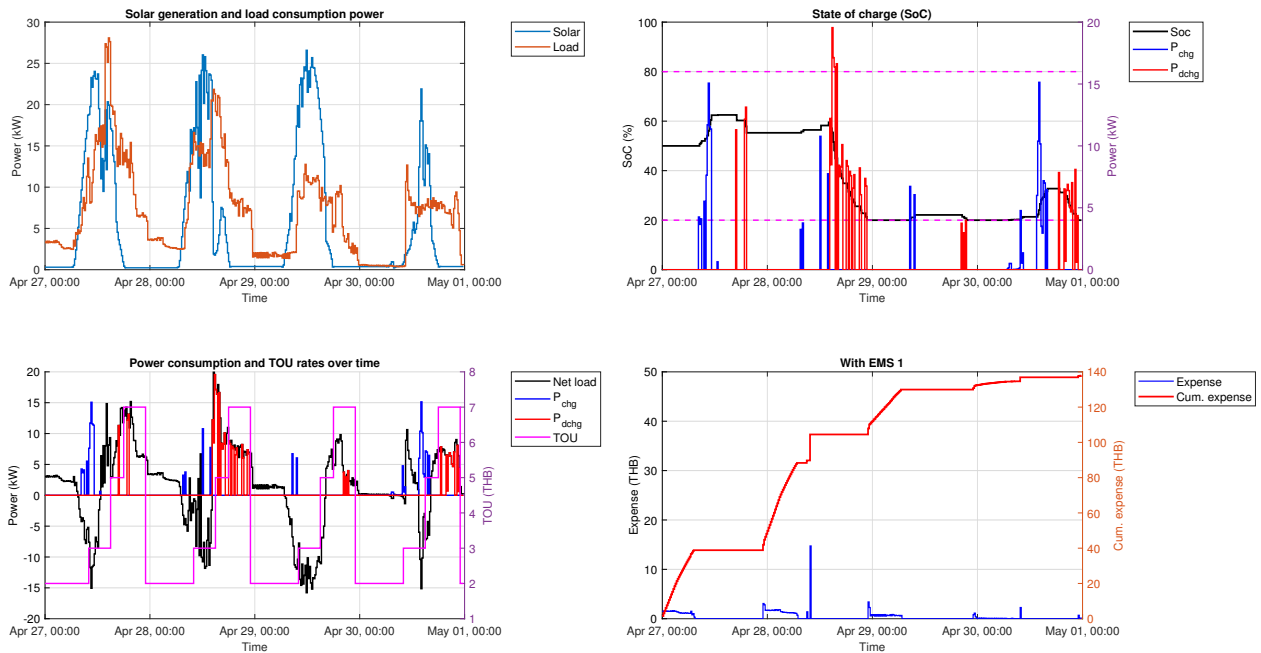
ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลเฉลี่ยและค่าไฟฟ้ารวมของปัญหาแบบ MILP และ LP โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4 และใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการประหยัดค่าไฟฟ้าตาม (12) ภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU การเปลี่ยนรูปแบบปัญหาจาก MILP เป็น LP ในกรณีทั่วไปจะเป็นการลดตัวแปรของปัญหาลง ทำให้มีค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ลดลง แต่ปัญหาที่พิจารณามีค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่เท่ากัน ส่งผลให้สามารถแก้ปัญหาค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ลดลงได้โดยไม่ต้องมีตัวแปรที่เป็นจำนวนเต็ม และผลการทดลองพบว่าผลเฉลี่ย P_{chg} และ P_{dchg} ของ MILP และ LP ไม่เหมือนกัน

ตารางที่ 4: ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองเปรียบเทียบผลเฉลี่ยระหว่าง MILP และ LP

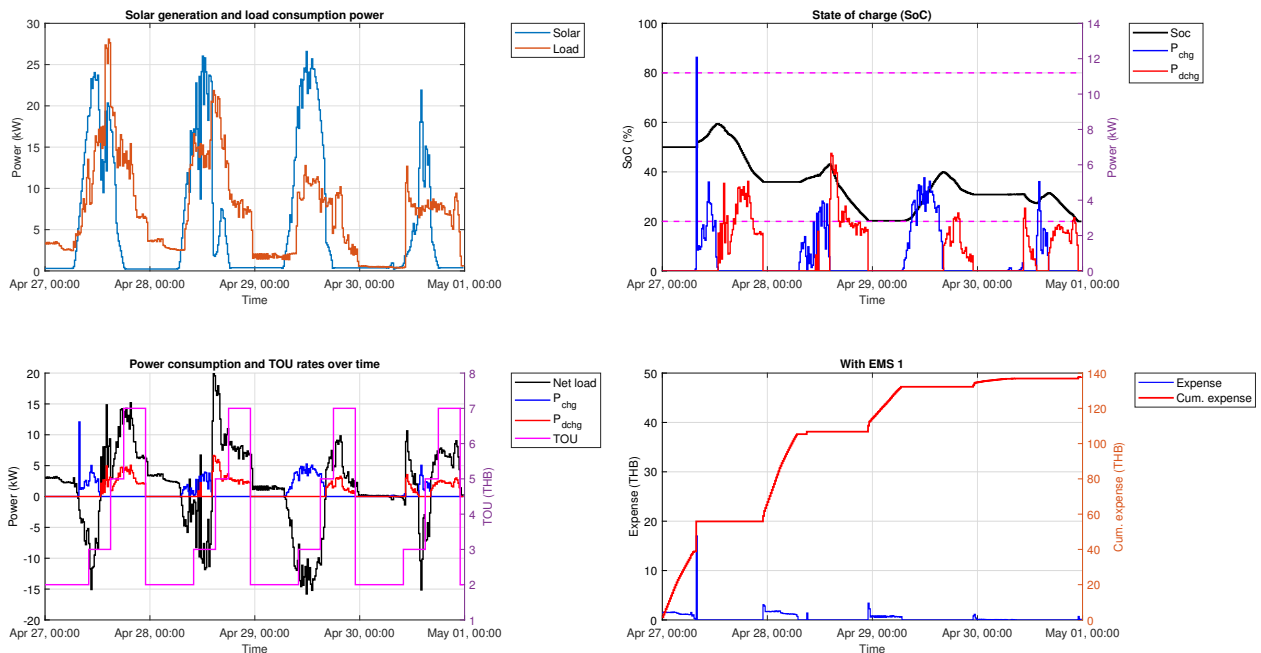
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
η_c	0.95	-
η_d	$0.95 * 0.93$	-
อัตราการชาร์จประจุสูงสุด	200	kW
อัตราการคายประจุสูงสุด	200	kW
ความจุแบตเตอรี่	430	kWh
SoC(1)	50	%
SoC _{min}	20	%
SoC _{max}	80	%
ค่าปลาย SoC	0	%
แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	$\frac{672+864}{2}$	V
จำนวนแบตเตอรี่	1	ลูก
w_s	0	-
w_m	0	-
w_c	0	-

รูปที่ 13 แสดงข้อมูลโหลด, ข้อมูลโซลาร์, และผลเฉลี่ยจากการแก้ปัญหา MILP หรือ LP มีรายละเอียดของกราฟย่อยในแต่ละตำแหน่งดังนี้:

- กราฟย่อยที่ (1,1) เป็นกราฟอนุกรมเวลาของโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์ แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและเปรียบเทียบการใช้พลังงานของโหลดกับการผลิตกำลังไฟฟ้าจากโซลาร์ในแต่ละช่วง พบว่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวันน้อยกว่าพลังงานที่แผงโซลาร์ผลิตได้ ส่งผลให้มีพลังงานส่วนเกินเพียงพอที่จะจัดเก็บเข้าสู่แบตเตอรี่ได้
- กราฟย่อยที่ (1,2) แสดงผลเฉลี่ยของระบบควบคุมการชาร์จและคายประจุแบตเตอรี่ โดยกราฟนี้ประกอบด้วย SoC, P_{chg} , และ P_{dchg} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบบริหารจัดการพลังงานของแบตเตอรี่อย่างไรในแต่ละ



(a) MILP



(b) LP

รูปที่ 13: กราฟเปรียบเทียบผลเฉลยจากการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยเทคนิค MILP และ LP

ช่วงเวลา พบว่าผลเฉลย SoC, P_{chg} , และ P_{dchg} ของการแก้ปัญหาแบบ MILP และ LP แสดงความแตกต่างกัน เนื่องจากปัญหา MILP และ LP ไม่มีคำตอบที่เป็นเอกลักษณ์ โดยปัญหาแบบ MILP มีข้อจำกัดในการใช้ตัวแปรจำนวนเต็ม ซึ่งส่งผลให้รูปแบบการใช้พลังงานในการชาร์จและคายประจุจากแบตเตอรี่แตกต่างจากปัญหาแบบ LP

- กราฟย่อยที่ (2,1) แสดงการใช้พลังงานสุทธิร่วมกับผลเฉลย P_{chg} และ P_{dchg} รวมถึงราคาไฟฟ้าแบบ TOU พบว่าถ้าการใช้พลังงานสุทธิมีค่ามากกว่า 0 kW จะทำให้ระบบมีการคายประจุออกจากแบตเตอรี่ แต่ถ้าการใช้พลังงานสุทธิมีค่าน้อยกว่า 0 kW จะทำให้ระบบมีการชาร์จประจุเข้าแบตเตอรี่ เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้พลังงาน, การจัดการพลังงานแบตเตอรี่, และราคาไฟฟ้าที่แตกต่างกันในแต่ละช่วง

- กราฟย่อยที่ (2,2) แสดงค่าไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาและค่าไฟฟ้าสะสมตลอดช่วงเวลาการทดลอง ซึ่งช่วยให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบในการควบคุมค่าไฟฟ้าเมื่อมีระบบจัดการพลังงาน พบว่าค่าไฟฟ้ารวมจากการใช้ MILP และ LP มีค่าเท่ากัน โดยดูจากค่าสุดท้ายของค่าไฟฟ้าสะสม ทำให้สรุปผลการทดลองได้ว่าการแก้ปัญหาแบบ MILP และ LP จะได้ผลเฉลยที่แตกต่างกันแต่มีค่าไฟฟ้ารวมเท่ากัน

4.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัดของแบตเตอรี่

4.3.1 การชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบ (Smooth charging)

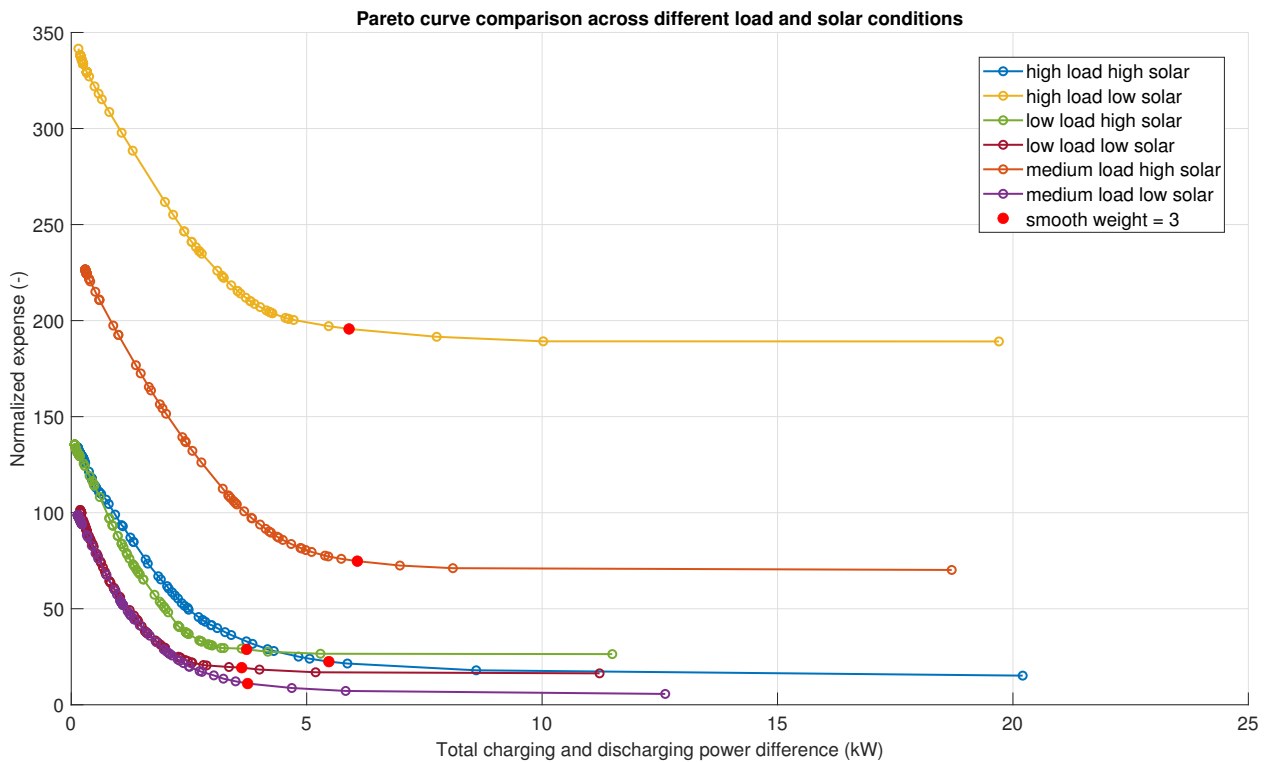
minimize $J_{\text{cost}} + w_s J_{\text{smooth charge}}$ subject to Power balance constraints (7) Battery dynamic (1) Battery charge/discharge constraints (2) - (3) Battery's SOC constraint (4)	(20)
--	------

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักของการชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบที่เหมาะสม โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 5 และใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการประหยัค่าไฟฟ้าตาม (12) ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบตเตอรี่ตาม (8) ภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ผลการทดลองพบว่าค่าถ่วงน้ำหนักของการชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบที่เหมาะสมกับการทดลองให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของ P_{chg} และ P_{dchg} ที่น้อยมีค่าเท่ากับ 3

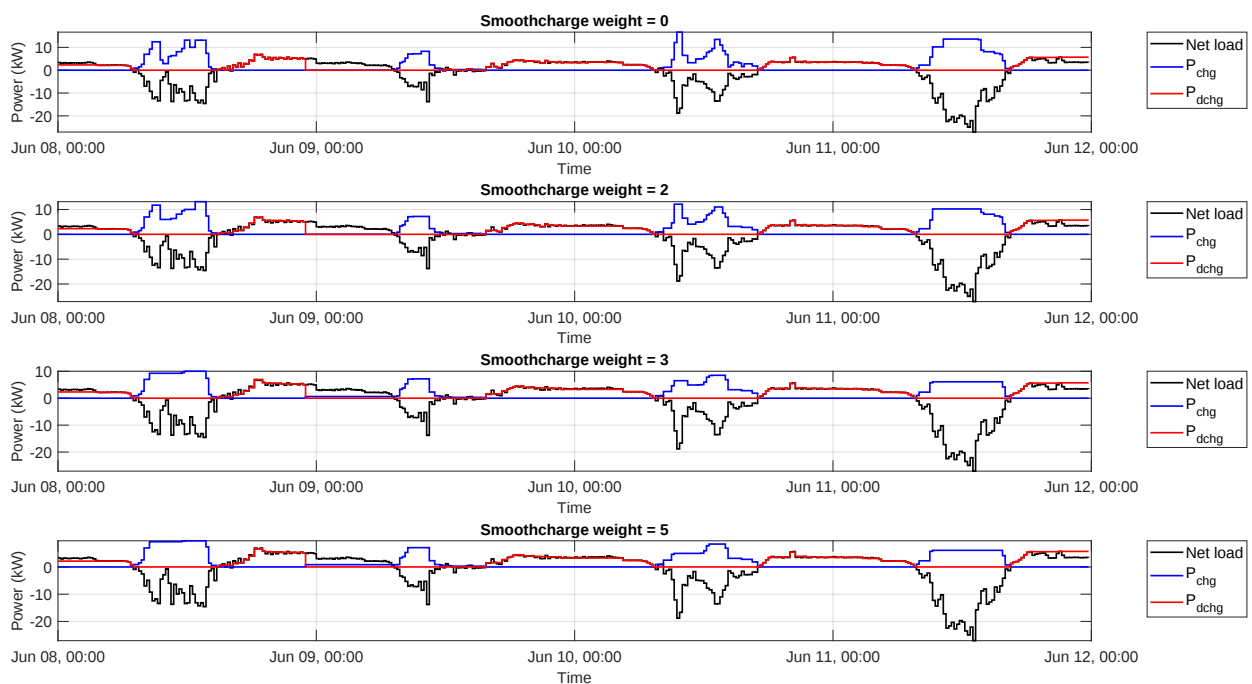
ตารางที่ 5: ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองหาค่าถ่วงน้ำหนักของการชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบ

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
η_c	0.95	-
η_d	$0.95 * 0.93$	-
อัตราการชาร์จประจุสูงสุด	200	kW
อัตราการคายประจุสูงสุด	200	kW
ความจุแบตเตอรี่	430	kWh
SoC(1)	50	%
SoC _{min}	20	%
SoC _{max}	80	%
ค่าปลาย SoC	0	%
แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	$\frac{672+864}{2}$	V
จำนวนแบตเตอรี่	1	ลูก
w_s	0 ถึง 100	-
w_m	0	-
w_c	0	-

รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้ารวมที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและอัตราการเปลี่ยนแปลงของ P_{chg} และ P_{dchg} ภายใต้ค่าถ่วงน้ำหนัก w_s ซึ่งอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 โดยที่ w_s มีค่ามากจะอยู่ทางด้านซ้ายของกราฟ และ w_s มีค่าน้อยจะอยู่ทางด้านขวาของกราฟ จากการวิเคราะห์พบว่าในช่วง $w_s = 0 - 5$ ค่า P_{chg} และ P_{dchg} มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงแต่ค่าไฟฟ้ารวมที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานมีค่าน้อย ซึ่งเหมาะสำหรับการออกแบบระบบที่เน้นการลดค่าไฟฟ้าตาม (12) มากกว่าการคำนึงถึงการปรับรูปแบบการชาร์จแบตเตอรี่ให้เรียบตาม (8) นอกจากนี้ในกรณี ที่ $w_s = 3$ พบว่าค่า P_{chg} และ P_{dchg} มีอัตราการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกันในทุกข้อมูลโหลดและโซลาร์ที่แตกต่าง กัน ด้วยเหตุนี้ช่วง $w_s = 0 - 5$ จึงถูกเลือกเป็นค่าถ่วงน้ำหนักสำคัญสำหรับการวาดกราฟในรูปที่ 15 เพื่อวิเคราะห์ค่าถ่วงน้ำหนักการชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบที่เหมาะสม



รูปที่ 14: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไฟฟ้ารวมที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและอัตราการเปลี่ยนแปลงของ P_{chg} และ P_{dchg}



รูปที่ 15: กราฟการปรับค่าการชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบภายใต้ค่าถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกัน

รูปที่ 15 แสดงการใช้พลังงานสุทธิร่วมกับผลเฉลี่ย P_{chg} และ P_{dchg} มีการเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก $w_s = 0, 2, 3, 5$ พบว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกันมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของ P_{chg} และ P_{dchg} ดังนี้:

- $w_s = 0$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของ P_{chg} และ P_{dchg} มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับค่าถ่วงน้ำหนักอื่น ๆ แสดงถึงความผันผวนของการชาร์จและคายประจุของแบตเตอรี่ในระดับที่มากที่สุด

- $w_s = 2$ และ $w_s = 3$
อัตราการเปลี่ยนแปลงของ P_{chg} และ P_{dchg} ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ $w_s = 0$ แสดงถึงการชาร์จและคายประจุของแบตเตอรี่ที่มีความราบเรียบเพิ่มขึ้น
- $w_s = 5$
อัตราการเปลี่ยนแปลงของ P_{chg} และ P_{dchg} ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก $w_s = 3$ โดยไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจน

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนัก $w_s = 2$ และ $w_s = 3$ เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการลดความผันผวนของการชาร์จและคายประจุของแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงเลือกค่า $w_s = 3$ เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของการชาร์จแบตเตอรี่ให้มีรูปแบบปรับเรียบที่เหมาะสม เนื่องจากต้องการค่าถ่วงน้ำหนักที่น้อยที่สุดที่ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของ P_{chg} และ P_{dchg} มีการเปลี่ยนแปลงน้อย

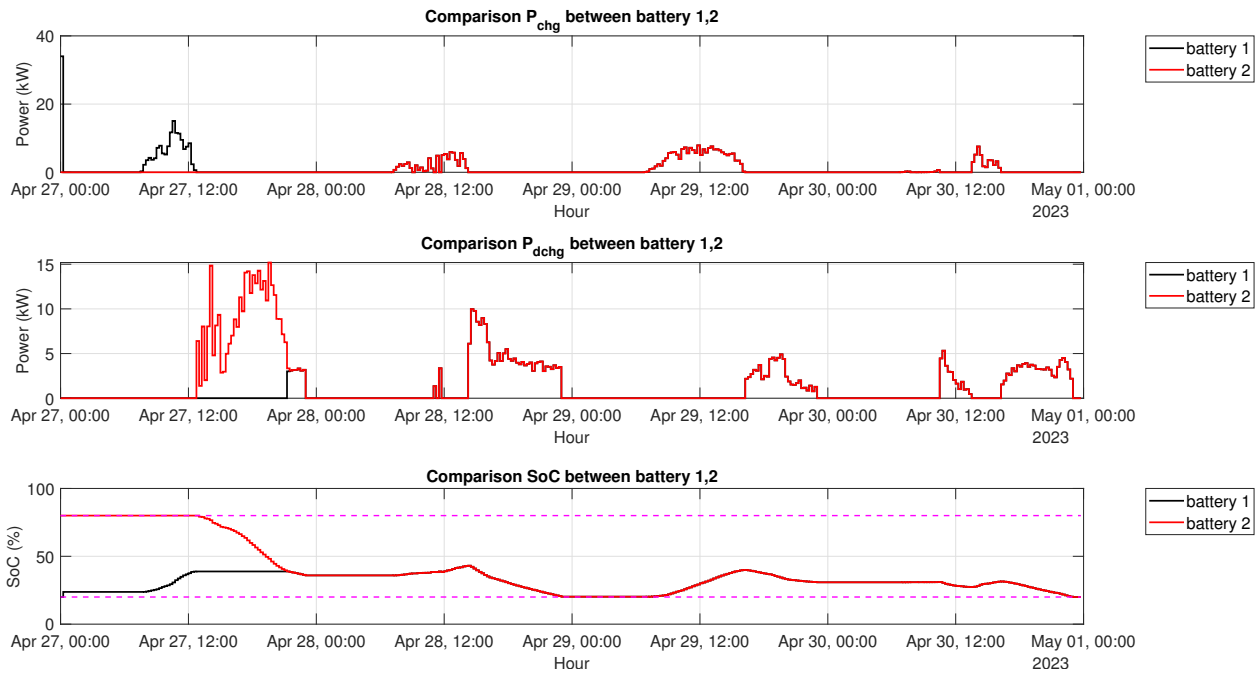
4.3.2 การชาร์จแบตเตอรี่หลายลูกให้ทำงานคล้ายกัน (Multi battery)

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && J_{\text{cost}} + w_m J_{\text{multibatt}} \\ &\text{subject to} && \text{Power balance constraints (7)} \\ &&& \text{Battery dynamic (1)} \\ &&& \text{Battery charge/discharge constraints (2) - (3)} \\ &&& \text{Battery's SOC constraint (4)} \end{aligned} \quad (21)$$

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักของการชาร์จแบตเตอรี่หลายลูกให้ทำงานคล้ายกันที่เหมาะสม โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 6 ให้มีสถานะการชาร์จเริ่มต้นของแบตเตอรี่แต่ละลูกไม่เท่ากัน และใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการประหยัดค่าไฟฟ้าตาม (12) ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบตเตอรี่ตาม (10) ภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ผลการทดลองพบว่าค่าถ่วงน้ำหนักของการชาร์จแบตเตอรี่หลายลูกให้ทำงานคล้ายกันที่เหมาะสมกับการที่แบตเตอรี่มีการทำงานที่ใกล้เคียงกันมีค่าเท่ากับ 10^{-4}

ตารางที่ 6: ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองหาค่าถ่วงน้ำหนักของการชาร์จแบตเตอรี่หลายลูกให้ทำงานคล้ายกัน

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
η_c	0.95	-
η_d	$0.95 * 0.93$	-
อัตราการชาร์จประจุสูงสุด	100	kW
อัตราการคายประจุสูงสุด	100	kW
ความจุแบตเตอรี่	215	kWh
SoC ₁ (1)	20	%
SoC ₂ (1)	80	%
SoC _{min}	20	%
SoC _{max}	80	%
ค่าปลาย SoC	0	%
แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	$\frac{672+864}{2}$	V
จำนวนแบตเตอรี่	2	ลูก
w_s	0	-
w_m	10^{-4}	-
w_c	0	-



รูปที่ 16: กราฟเปรียบเทียบ P_{chg} , P_{dchg} , และ SoC ของแบตเตอรี่ลูกที่ 1 และ 2

รูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลย P_{chg} , P_{dchg} , และ SoC ของแบตเตอรี่ลูกที่ 1 และ 2 มีรายละเอียดของกราฟย่อยในแต่ละตำแหน่งดังนี้:

- กราฟย่อยที่ (1,1) เป็นกราฟผลเฉลย P_{chg} ของแบตเตอรี่ลูกที่ 1 และ 2 เพื่อแสดงการเปรียบเทียบ P_{chg} ของแบตเตอรี่ลูกที่ 1 และ 2 ในช่วงเวลาต่างๆ พบว่าผลเฉลย P_{chg} ของแบตเตอรี่ที่มีค่า SoC(1) น้อยกว่า จะทำให้ค่า P_{chg} มีค่ามากกว่า 0 kW ในช่วงแรกเพื่อที่จะทำให้เพิ่มสถานะการชาร์จให้เท่ากับแบตเตอรี่อีกลูกหนึ่ง
- กราฟย่อยที่ (2,1) เป็นกราฟผลเฉลย P_{dchg} ของแบตเตอรี่ลูกที่ 1 และ 2 เพื่อแสดงการเปรียบเทียบ P_{dchg} ของแบตเตอรี่ลูกที่ 1 และ 2 ในช่วงเวลาต่างๆ พบว่าผลเฉลย P_{dchg} ของแบตเตอรี่ที่มีค่า SoC(1) มากกว่า จะทำให้ค่า P_{dchg} มีค่ามากกว่า 0 kW ในช่วงแรกเพื่อที่จะทำให้ลดสถานะการชาร์จให้เท่ากับแบตเตอรี่อีกลูกหนึ่ง
- กราฟย่อยที่ (3,1) เป็นกราฟผลเฉลย SoC ของแบตเตอรี่ลูกที่ 1 และ 2 เพื่อแสดงการเปรียบเทียบ SoC ของแบตเตอรี่ลูกที่ 1 และ 2 ในช่วงเวลาต่างๆ พบว่าผลเฉลย SoC ของแบตเตอรี่ลูกที่ 1 และ 2 จะมีการปรับให้ใกล้เคียงกันเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นค่าถ่วงน้ำหนักที่ $w_m = 10^{-4}$ ระบบสามารถปรับสถานะการชาร์จของแบตเตอรี่ทั้งสองลูกให้มีค่าใกล้เคียงกันได้เมื่อเวลาผ่านไป

4.3.3 การส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่ (Encourage charge)

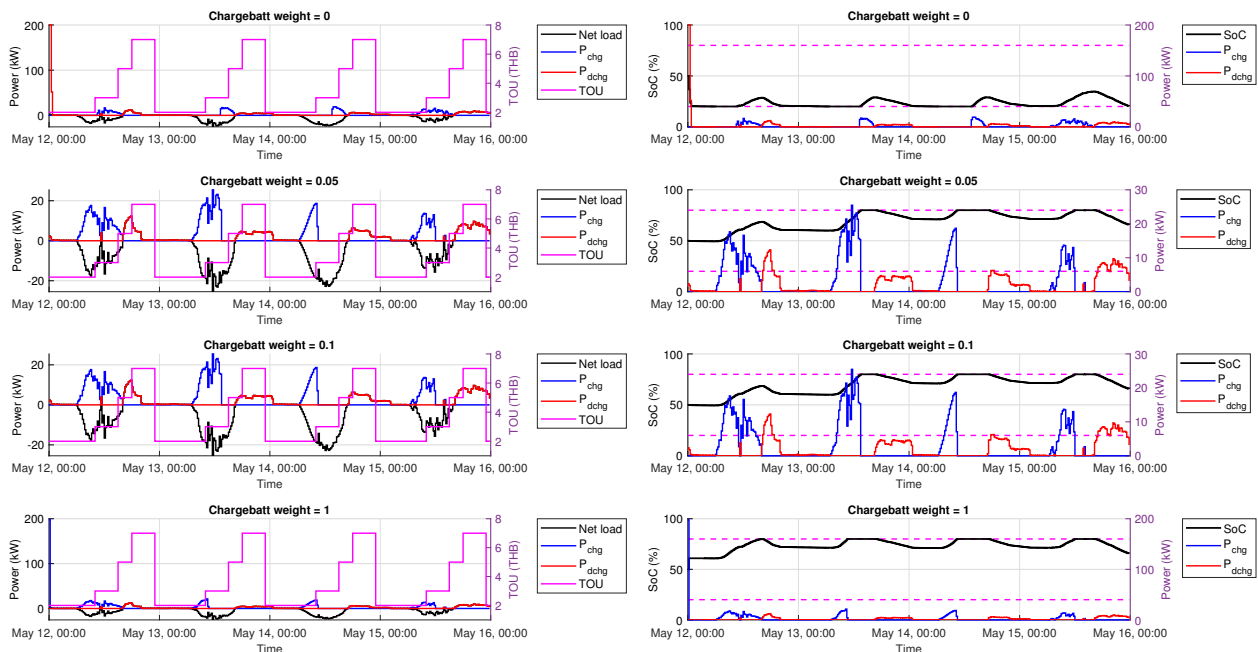
$$\begin{aligned}
 &\text{minimize} && J_{\text{cost}} + w_c J_{\text{charge batt}} \\
 &\text{subject to} && \text{Power balance constraints (7)} \\
 &&& \text{Battery dynamic (1)} \\
 &&& \text{Battery charge/discharge constraints (2) - (3)} \\
 &&& \text{Battery's SOC constraint (4)}
 \end{aligned} \tag{22}$$

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักของการส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่ที่เหมาะสม เนื่องจาก

กรณีที่พลังงานจากแผงโซลาร์ผลิตได้มากกว่าการใช้พลังงานของโหลดควรมีการชาร์จพลังงานเข้าสู่แบตเตอรี่ โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 7 และใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการประหยัดค่าไฟฟ้าตาม (12) ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบตเตอรี่ตาม (11) ภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ผลการทดลองพบว่าค่าถ่วงน้ำหนักของการส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับการให้แบตเตอรี่มีการชาร์จประจุเมื่อ $SoC(t) \leq SoC_{max}(t)$ มีค่าเท่ากับ 0.05

ตารางที่ 7: ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองหาค่าถ่วงน้ำหนักของการส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
η_c	0.95	-
η_d	$0.95 * 0.93$	-
อัตราการชาร์จประจุสูงสุด	200	kW
อัตราการคายประจุสูงสุด	200	kW
ความจุแบตเตอรี่	430	kWh
$SoC(1)$	50	%
SoC_{min}	20	%
SoC_{max}	80	%
ค่าปลาย SoC	0	%
แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	$\frac{672+864}{2}$	V
จำนวนแบตเตอรี่	1	ลูก
w_s	0	-
w_m	0	-
w_c	0, 0.05, 0.1, 1	-



รูปที่ 17: กราฟการปรับค่าการส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่ภายใต้ค่าถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกัน

รูปที่ 17 ในคอลัมน์ที่ 1 แสดงการใช้พลังงานสุทธิร่วมกับผลเฉลี่ย P_{chg} และ P_{dchg} พร้อมราคาไฟฟ้าแบบ TOU และในคอลัมน์ที่ 2 แสดงผลเฉลี่ย SoC, P_{chg} , และ P_{dchg} มีค่าถ่วงน้ำหนัก $w_c = 0, 0.05, 0.1, 1$ พบว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกันมีผลต่อ SoC, P_{chg} , และ P_{dchg} ดังนี้:

- $w_c = 0$

แบตเตอรี่สามารถชาร์จประจุของแบตเตอรี่ได้น้อยเมื่อ $SoC(t) \leq SoC_{max}(t)$ เนื่องจากน้ำหนักที่ให้การเพิ่มปริมาณการชาร์จในระบบมีค่าน้อยที่สุด

- $w_c = 0.05$ และ $w_c = 0.1$

แบตเตอรี่สามารถชาร์จประจุของแบตเตอรี่ได้ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกันมากนักภายใต้เงื่อนไข $SoC(t) \leq SoC_{max}(t)$ แสดงให้เห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักในช่วงนี้มีผลกระทบต่อปริมาณการชาร์จในระดับใกล้เคียงกัน

- $w_c = 1$

แบตเตอรี่สามารถชาร์จประจุของแบตเตอรี่ได้มากที่สุดเมื่อ $SoC(t) \leq SoC_{max}(t)$ เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักที่สูงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการชาร์จในระบบ

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนัก $w_c = 0.05$ และ $w_c = 0.1$ เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่เมื่อ $SoC(t) \leq SoC_{max}(t)$ ดังนั้นจึงเลือกค่า $w_c = 0.05$ เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของการส่งเสริมการชาร์จแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

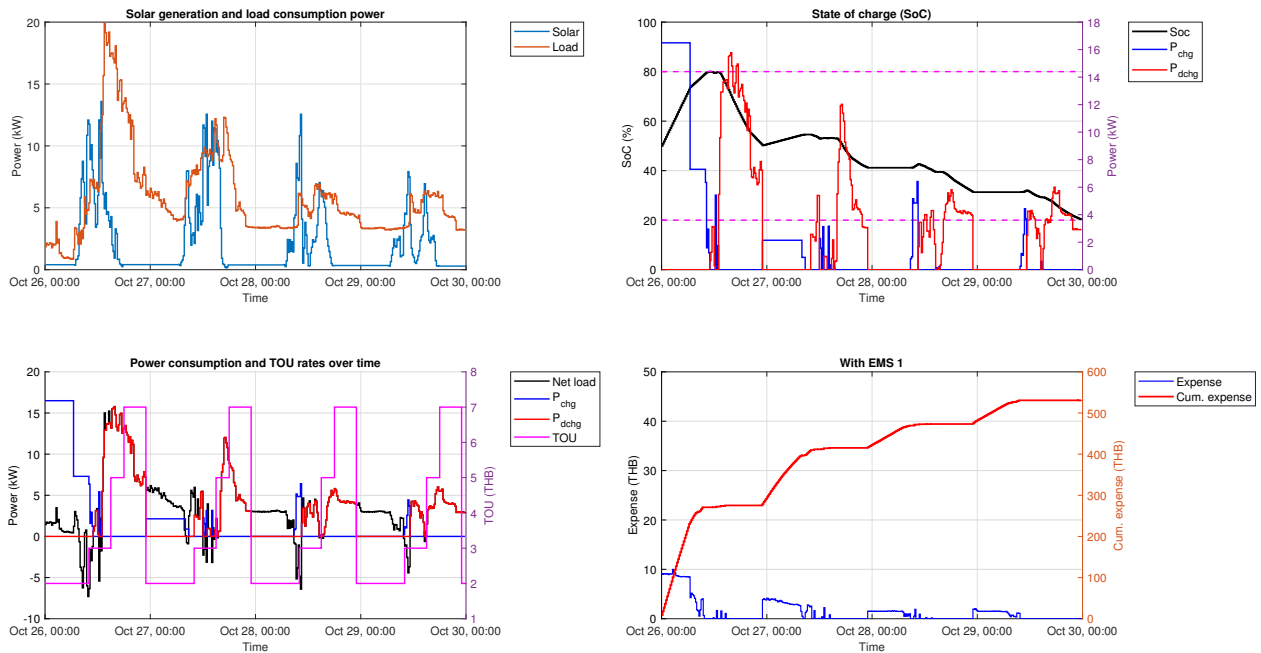
4.3.4 การเพิ่มข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน (SoC terminal)

minimize subject to	$J_{cost} + w_m J_{multibatt} + w_s J_{smooth\ charge} + w_c J_{charge\ batt}$ Power balance constraints (7) Battery dynamic (1) Battery charge/discharge constraints (2) - (3) Battery's terminal SOC (5) Battery's SOC constraint (4)	(23)
------------------------	--	------

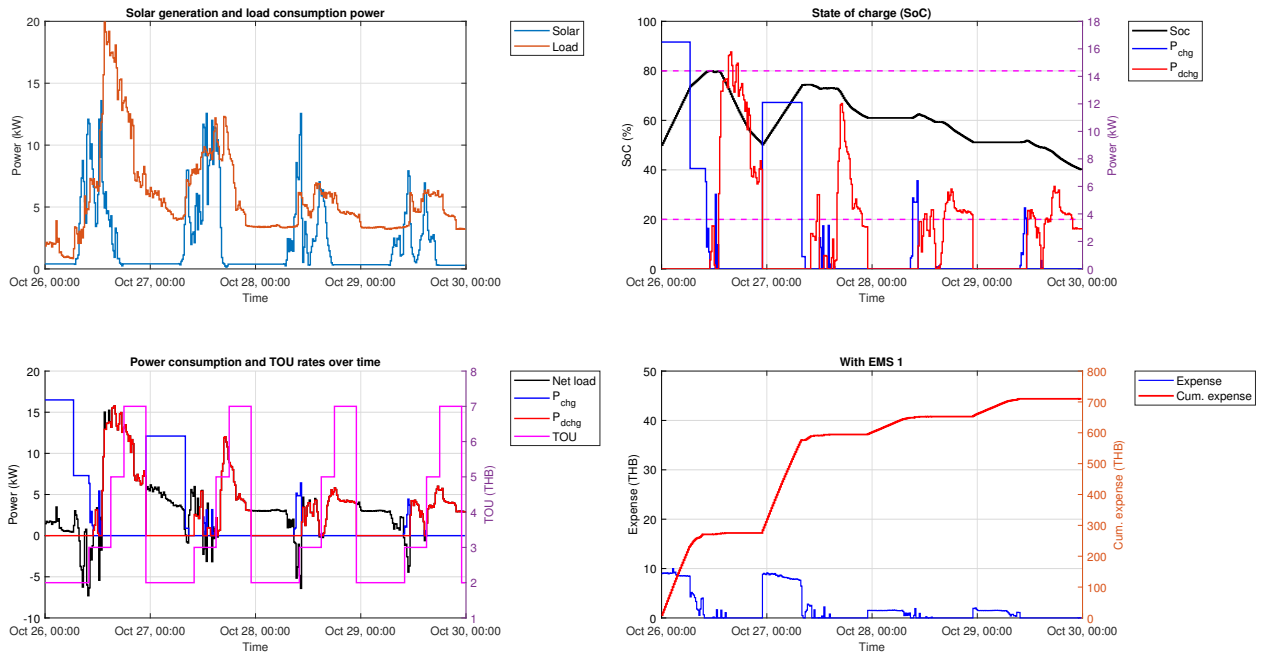
ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าไฟฟ้ารวมและผลเฉลี่ยระหว่างการมีและไม่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 8 และใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการประหยัดค่าไฟฟ้าตาม (12) ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบตเตอรี่ตาม (8) และ (11) ภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ผลการทดลองพบว่าค่าไฟฟ้ารวมแบบมีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันจะแพงกว่าค่าไฟฟ้ารวมแบบไม่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน และผลเฉลี่ย SoC ที่เวลาสุดท้ายของวันจะมีค่ามากกว่าข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันเสมอ

ตารางที่ 8: ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองการเพิ่มข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
η_c	0.95	-
η_d	$0.95 * 0.93$	-
อัตราการชาร์จประจุสูงสุด	200	kW
อัตราการคายประจุสูงสุด	200	kW
ความจุแบตเตอรี่	430	kWh
SoC(1)	50	%
SoC _{min}	20	%
SoC _{max}	80	%
ค่าปลาย SoC	0 หรือ 40	%
แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	$\frac{672+864}{2}$	V
จำนวนแบตเตอรี่	1	ลูก
w_s	3	-
w_m	0	-
w_c	0.05	-



(a) ไม่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน



(b) มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน

รูปที่ 18: กราฟเปรียบเทียบผลเฉลยจากการไม่มีและมีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน

รูปที่ 18 แสดงข้อมูลโหลด, ข้อมูลโซลาร์, และผลเฉลยจากการมีและไม่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน มีรายละเอียดของกราฟย่อยในแต่ละตำแหน่งดังนี้:

- กราฟย่อยที่ (1,1) เป็นกราฟอนุกรมเวลาของโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์ แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและเปรียบเทียบการใช้พลังงานของโหลดกับการผลิตกำลังไฟฟ้าจากโซลาร์ในแต่ละช่วง พบว่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวันมากกว่าพลังงานที่แผงโซลาร์ผลิตได้ ส่งผลให้ต้องซื้อไฟฟ้าจากกริดเพื่อให้มีพลังงานเพียงพอต่อการใช้โหลด
- กราฟย่อยที่ (1,2) แสดงผลเฉลยของระบบควบคุมการชาร์จและคายประจุแบตเตอรี่ โดยกราฟนี้ประกอบด้วย SoC , P_{chg} , และ P_{dchg} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบบริหารจัดการพลังงานของแบตเตอรี่อย่างไรในแต่ละ

ช่วงเวลา พบว่าผลเฉลี่ย SoC ที่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันในเวลาสุดท้ายของวันจะมีค่ามากกว่าข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน

- กราฟย่อยที่ (2,1) แสดงการใช้พลังงานสุทธิร่วมกับผลเฉลี่ย P_{chg} และ P_{dchg} รวมถึงราคาค่าไฟแบบ TOU เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้พลังงาน, การจัดการพลังงานแบตเตอรี่, และราคาค่าไฟที่แตกต่างกันในแต่ละช่วง พบว่าถ้าการใช้พลังงานสุทธิมีค่ามากกว่า 0 kW จะทำให้ระบบมีการคายประจุออกจากแบตเตอรี่ แต่ถ้าการใช้พลังงานสุทธิมีค่าน้อยกว่า 0 kW จะทำให้ระบบมีการชาร์จประจุเข้าแบตเตอรี่ โดยไม่ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน ในกรณีที่มีข้อจำกัดดังกล่าว ระบบจะชาร์จแบตเตอรี่ในช่วงเวลา 00:00 - 10:00 น. เนื่องจากอัตราค่าไฟ TOU ต่ำที่สุด และเพื่อให้สถานะการชาร์จเพียงพอสำหรับการใช้งานในช่วงบ่ายและคงเหลือเมื่อถึงเวลาสุดท้ายของวัน
- กราฟย่อยที่ (2,2) แสดงค่าไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาและค่าไฟฟ้าสะสมตลอดช่วงเวลาการทดลอง ซึ่งช่วยให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบในการควบคุมค่าไฟฟ้าเมื่อมีระบบจัดการพลังงาน พบว่าค่าไฟฟ้ารวมในกรณีที่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันจะสูงกว่าค่าไฟฟ้ารวมในกรณีที่ไม่มีข้อจำกัด โดยดูจากค่าสุดท้ายของค่าไฟฟ้าสะสม ทำให้สรุปผลการทดลองได้ว่าค่าไฟฟ้ารวมในกรณีที่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันจะสูงกว่ากรณีที่ไม่มีข้อจำกัด และผลเฉลี่ยของ SoC ที่เวลาสุดท้ายของวันมักจะมีค่ามากกว่าค่าข้อจำกัดที่กำหนดเสมอ

4.4 การหาค่าเหมาะที่สุดแบบเลื่อนแกน (Rolling optimization)

minimize	$J_{cost} + w_m J_{multibatt} + w_s J_{smooth\ charge} + w_c J_{charge\ batt}$	
subject to	Power balance constraints (7)	
	Battery dynamic (1)	
	Battery charge/discharge constraints (2) - (3)	(24)
	Battery's terminal SOC (5)	
	Battery's SOC constraint (4)	

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าไฟฟ้ารวมระหว่างไม่ใช้และใช้ EMS และเปรียบเทียบค่าไฟฟ้ารวมระหว่างไม่มีและมีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 9 และใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการประหยัดค่าไฟฟ้าตาม (12) ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบตเตอรี่ตาม (8), (10), และ (11) ภายใต้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ผลการทดลองพบว่าค่าไฟฟ้ารวมแบบไม่ใช้ EMS จะแพงกว่าค่าไฟฟ้ารวมแบบใช้ EMS และค่าไฟฟ้ารวมในกรณีที่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันจะสูงกว่ากรณีที่ไม่มีข้อจำกัด โดยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเลื่อนแกนจะดำเนินการโดยใช้ข้อมูล 1 เดือนและเลื่อนแกนทุกๆ 1 วันเพื่อหาค่าเหมาะที่สุด

รูป 19 และ 20 แสดงผลเฉลี่ยจากการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเลื่อนแกนโดยไม่มีและมีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน มีรายละเอียดของกราฟย่อยในแต่ละตำแหน่งดังนี้:

- กราฟย่อยที่ (a) แสดงผลเฉลี่ยของระบบควบคุมการชาร์จและคายประจุแบตเตอรี่ โดยกราฟนี้ประกอบด้วย SoC, P_{chg} , และ P_{dchg} แสดงให้เห็นว่าระบบบริหารจัดการพลังงานของแบตเตอรี่อย่างไรในแต่ละช่วงเวลา พบว่าถ้าไม่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันจะทำให้ระบบจัดการพลังงานตามสถานะการชาร์จเริ่มต้นในแต่ละวัน ในวันที่สถานะการชาร์จเริ่มต้นในแต่ละวันมีค่าน้อย ระบบจะมีการคายประจุออกจากแบตเตอรี่ที่น้อยเมื่อเทียบกับวันที่สถานะการชาร์จเริ่มต้นในแต่ละวันมีค่ามาก แต่ถ้ามีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันจะทำให้ระบบมีพลังงานเหลือพอสำหรับการชาร์จและคายประจุจากแบตเตอรี่ในแต่ละวัน
- กราฟย่อยที่ (b) แสดงการใช้พลังงานสุทธิร่วมกับผลเฉลี่ย P_{chg} และ P_{dchg} รวมถึงราคาค่าไฟแบบ TOU เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้พลังงาน, การจัดการพลังงานแบตเตอรี่, และราคาค่าไฟที่แตกต่างกันในแต่ละช่วง พบว่าถ้าไม่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันจะทำให้ระบบมีการคาย

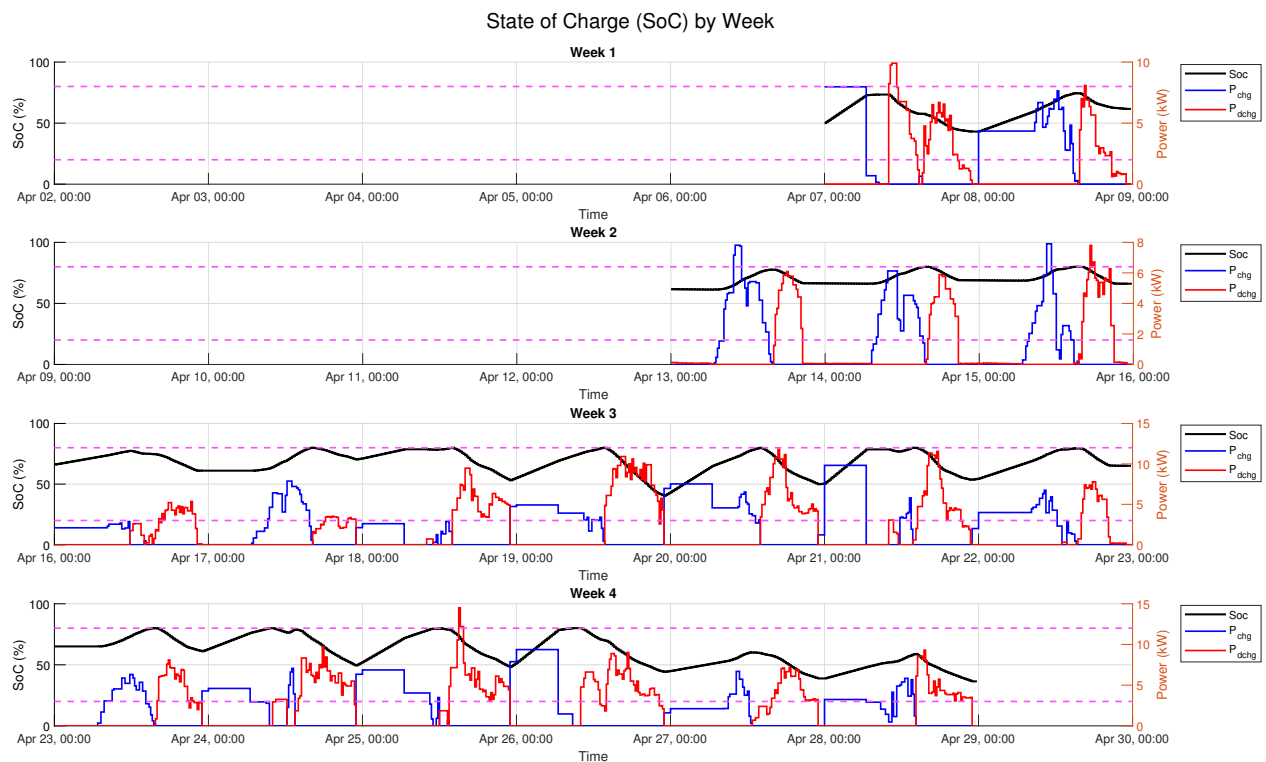
ตารางที่ 9: ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเลื่อนแกน

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
η_c	0.95	-
η_d	$0.95 * 0.93$	-
อัตราการชาร์จประจุสูงสุด	100	kW
อัตราการคายประจุสูงสุด	100	kW
ความจุแบตเตอรี่	215	kWh
$SoC_1(1)$	50	%
$SoC_2(1)$	50	%
SoC_{min}	20	%
SoC_{max}	80	%
ค่าปลาย SoC	0 หรือ 40	%
แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน	$\frac{672+864}{2}$	V
จำนวนแบตเตอรี่	2	ลูก
w_s	3	-
w_m	10^{-4}	-
w_c	0.05	-

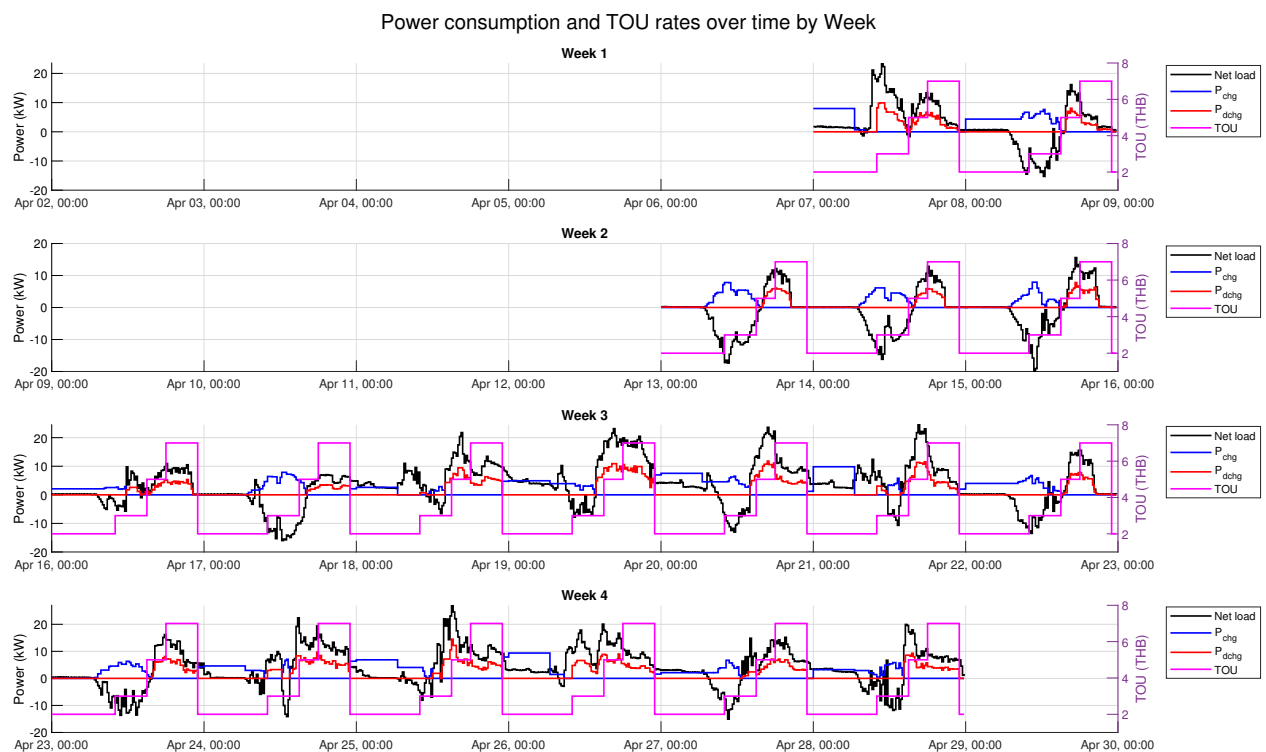
ประจําออกจากแบตเตอรี่ เมื่อการใช้พลังงานสุทธิมีค่ามากกว่า 0 kW แต่ระบบมีการชาร์จประจุเข้าแบตเตอรี่ เมื่อการใช้พลังงานสุทธิมีค่าน้อยกว่า 0 kW นอกจากนี้การชาร์จและคายประจุจากแบตเตอรี่ในแต่ละวันไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับพลังงานสุทธิในแต่ละวัน แต่ถ้ามียกข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันจะทำให้ระบบเลือกที่จะชาร์จประจุในช่วงเวลา 00.00 - 10.00 น. เนื่องจากมีค่าไฟฟ้าแบบ TOU ที่ต่ำที่สุด และเพื่อให้พลังงานเหลือพอใช้สำหรับช่วงบ่ายและมีสถานะการชาร์จคงเหลือพอเมื่อถึงเวลาสุดท้ายของแต่ละวัน

รูปที่ 21 แสดงค่าไฟฟ้าสะสมใน 1 เดือนโดยไม่มีและมียกข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน มีรายละเอียดของกราฟย่อยในแต่ละตำแหน่งดังนี้:

- กราฟย่อยคอลัมน์ (ซ้าย) แสดงค่าไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาและค่าไฟฟ้าสะสมตลอดช่วงเวลาการทดลองแบบที่ไม่ใช่ EMS ทำให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าไฟฟ้าในแต่ละวัน พบว่าค่าไฟฟ้าในแต่ละวันจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับการใช้พลังงานโหลดและพลังงานโซลาร์ที่ผลิตได้ นอกจากนี้การมีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันทำให้ราคาค่าไฟฟ้าในแต่ละวันแพงกว่าการไม่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน
- กราฟย่อยคอลัมน์ (กลาง) แสดงค่าไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาและค่าไฟฟ้าสะสมตลอดช่วงเวลาการทดลองแบบที่ไม่ใช่ EMS ทำให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าไฟฟ้าในแต่ละวัน พบว่าค่าไฟฟ้าในแต่ละวันจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับการใช้พลังงานโหลดและพลังงานโซลาร์ที่ผลิตได้ แต่ระบบจะพยายามลดค่าไฟฟ้าลงให้ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับกราฟย่อย (ซ้าย) นอกจากนี้การมีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวันทำให้ราคาค่าไฟฟ้าในแต่ละวันแพงกว่าการไม่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน
- กราฟย่อยคอลัมน์ (ขวา) แสดงค่าไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาและค่าไฟฟ้าสะสมตลอดช่วงเวลาการทดลองแบบที่ไม่ใช่และใช้ EMS ซึ่งช่วยให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบในการควบคุมค่าไฟฟ้าเมื่อมีระบบจัดการพลังงาน พบว่าระบบใช้ EMS จะช่วยในการประหยัดค่าไฟฟ้าเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ใช่ EMS โดยไม่มีหรือมีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน

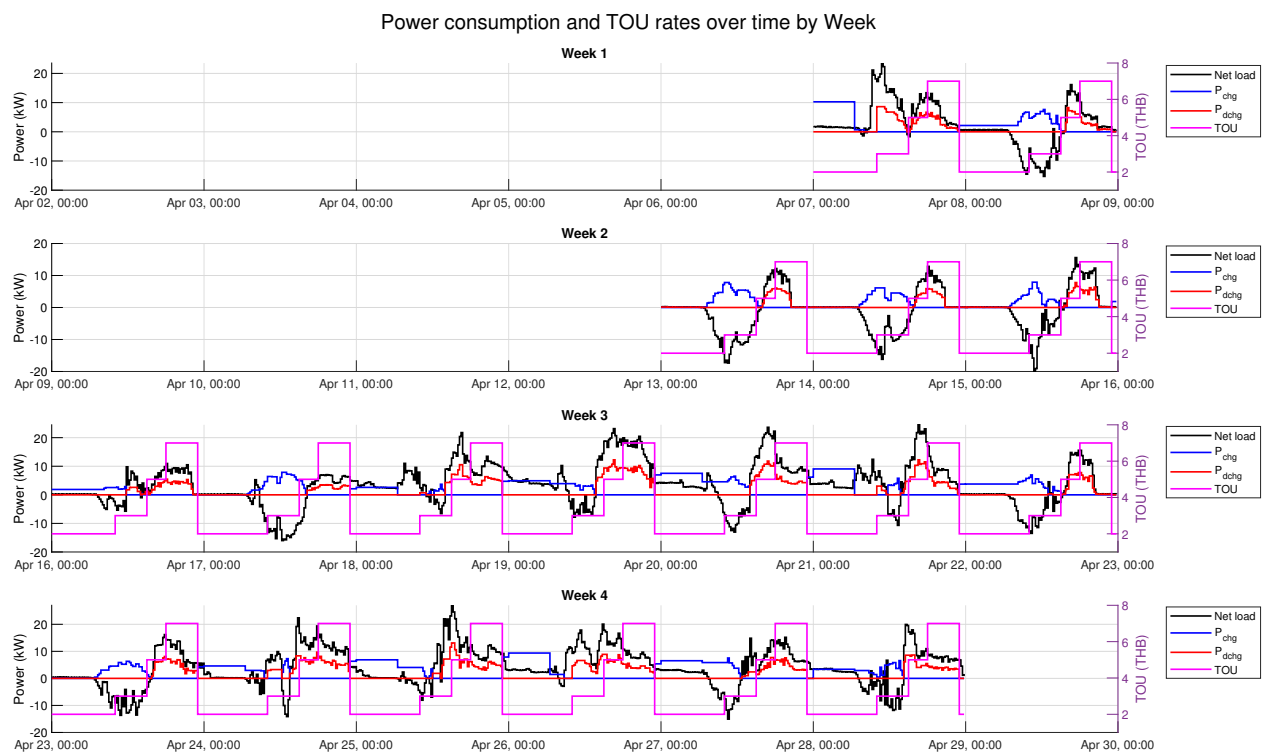
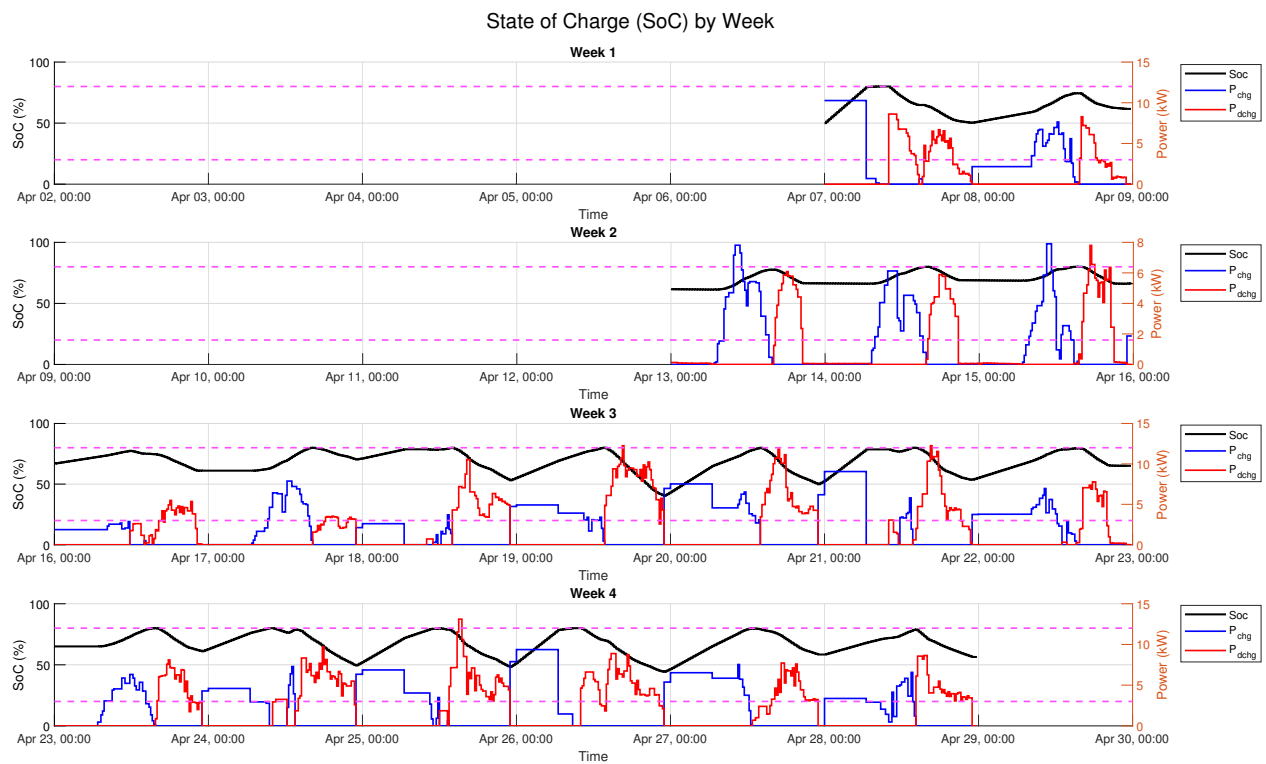


(a) กราฟแสดง SoC, P_{chg} , และ P_{dchg}

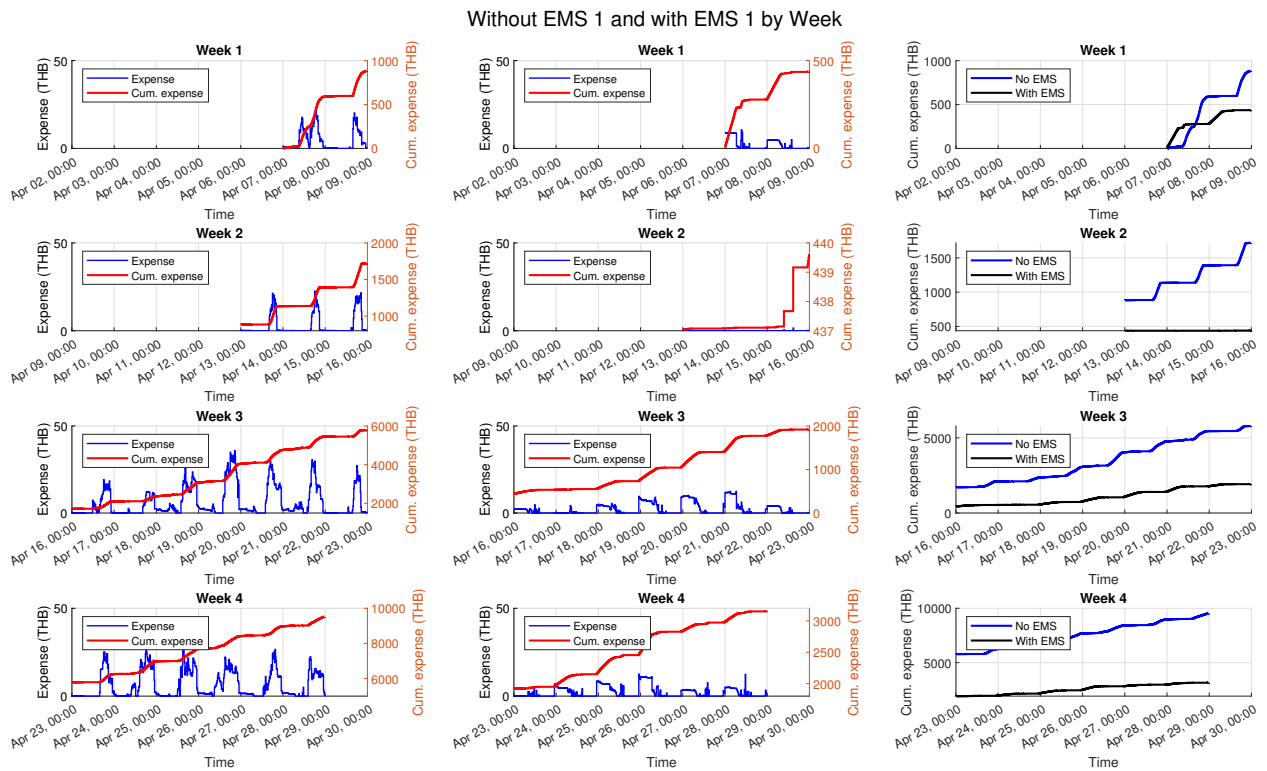


(b) กราฟแสดง Net Load, P_{chg} , P_{dchg} , และ TOU

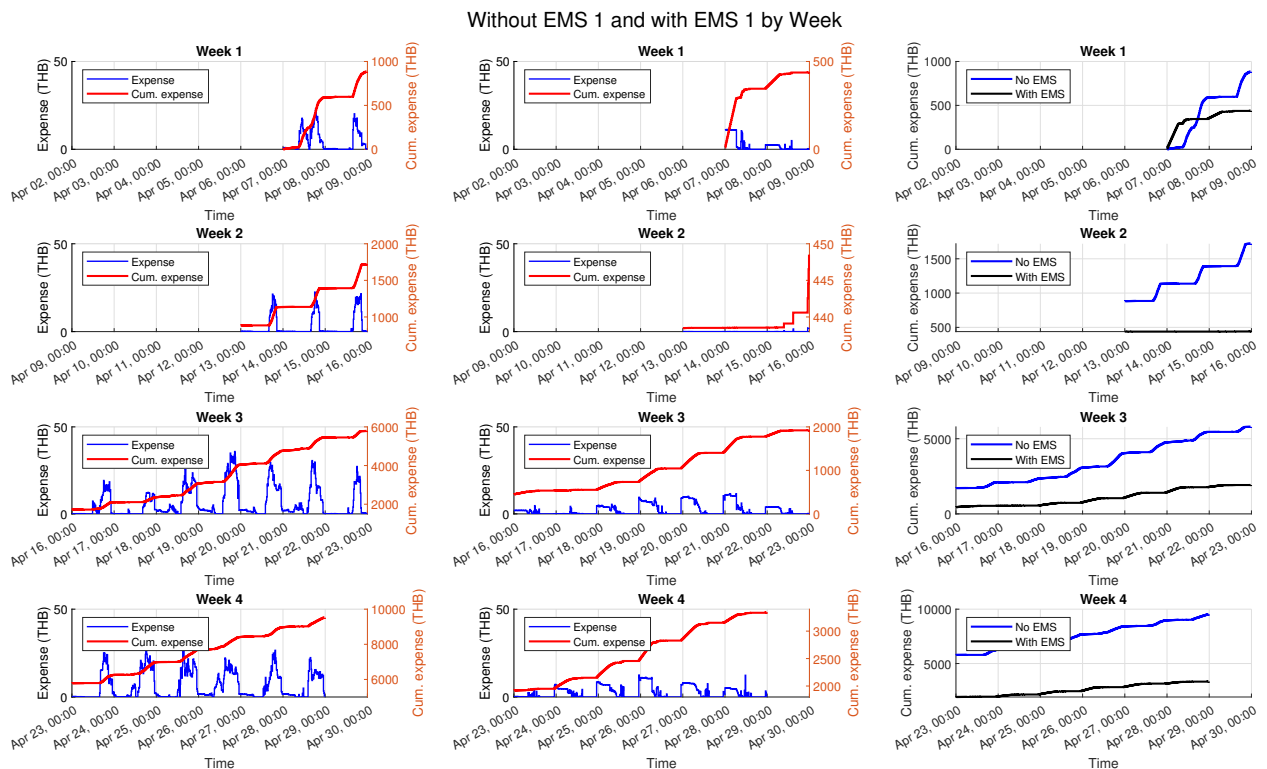
รูปที่ 19: กราฟพลผลจากการเลื่อนแกนโดยไม่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน



รูปที่ 20: กราฟผลเฉลยจากการเลื่อนแกนโดยมีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน



(a) ไม่มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน



(b) มีข้อจำกัดของสถานะการชาร์จ ณ ปลายวัน

รูปที่ 21: ค่าไฟฟ้าสะสมใน 1 เดือน: (ซ้าย) การไม่ใช้ EMS, (กลาง) การใช้ EMS, (ขวา) เปรียบเทียบการไม่ใช้ และใช้ EMS

5 บทสรุป

5.1 บทสรุปการทำโครงการจนถึงปัจจุบัน

จากแผนการดำเนินการ ขณะนี้ได้ทำงานเสร็จแล้วทั้งหมด 4 หัวข้อดังนี้ การแปลงปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดจาก MILP เป็น LP, การแปลงค่าน้ำหนักของฟังก์ชันจุดประสงค์ให้เป็นมาตรฐาน, การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเลื่อนแกน โดยใช้ข้อมูลซึ่งรู้ล่วงหน้า, และการจำลองการทำงานของแบตเตอรี่โดยใช้สมการสถานะแบตเตอรี่จากระบบจัดการพลังงาน

5.2 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินการ	วิชา 2102490					วิชา 2102499				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. แปลงปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดจาก MILP เป็น LP										
2. การแปลงค่าน้ำหนักของฟังก์ชันจุดประสงค์ให้เป็นมาตรฐาน										
3. การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเลื่อนแกนโดยใช้ข้อมูลซึ่งรู้ล่วงหน้า										
4. การจำลองการทำงานของแบตเตอรี่โดยใช้สมการสถานะแบตเตอรี่จากระบบจัดการพลังงาน										
5. การปรับปรุงแบบจำลองพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์										
6. การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเลื่อนแกนโดยใช้ข้อมูลพยากรณ์ของโหลดไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์										
7. การจำลองการทำงานของแบตเตอรี่ในสภาวะใกล้เคียงเวลาจริง										
8. จัดทำรายงานและเตรียมนำเสนอโครงการ										

ตารางที่ 10: แผนการดำเนินงานในการจัดทำโครงการสำหรับปีการศึกษา 2567

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Assoc. Prof. Naebboon Hoonchareon, “Centralized and decentralized EMS,” https://mycourseville-default.s3.ap-southeast-1.amazonaws.com/useruploaded_course_files/2024_1/57018/materials/559_02_C_and_D_EMS-1336-17255141541104.pdf/ (ออนไลน์), 2024, เข้าถึงเมื่อ 18 พฤศจิกายน 2567.
- [2] MathWorks, “Lithium-ion temperature-dependent battery model,” <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/lithium-ion-temperature-dependent-battery-model.html> (ออนไลน์), เข้าถึงเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2567.
- [3] “RE100 microgrid: Chulalongkorn university,” <http://www.sustainability.chula.ac.th/th/report/3594/> (ออนไลน์), เข้าถึงเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2567.
- [4] D. Pérez-Piñero, S. Skogestad, and S. Boyd, “Home energy management with dynamic tariffs and tiered peak power charges,” 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2307.07580>
- [5] N. Kongkaew and P. Chaowarak, “Energy management system for Gewertz square,” 2566, CUEE Final-Year Project Report (2102499).
- [6] O. Triebe, H. Hewamalage, P. Pilyugina, N. Laptev, C. Bergmeir, and R. Rajagopal, “Neural-prophet: Explainable forecasting at scale,” <https://arxiv.org/abs/2111.15397> (ออนไลน์), เข้าถึงเมื่อ 13 พฤศจิกายน 2567.
- [7] Jinko Solar Energy Storage, “Jks-215klaa-100plaa product page,” <https://jinkosolarenergystorage.com.au/product/jks-215klaa-100plaa/> (ออนไลน์), เข้าถึงเมื่อ 12 พฤศจิกายน 2567.