

การตัดยอดโหลดสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารที่มีการพยากรณ์โหลดและการทำงาน
ร่วมกันของอุปกรณ์ด้วยมาตรฐาน IEEE1888



นางสาวภาณุมาศ สอาดวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PEAK SHAVING FOR BUILDING ENERGY MANAGEMENT SYSTEM WITH LOAD
FORECASTING AND INTEROPERABILITY BY IEEE1888 STANDARD

Miss Phanumat Saatwong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การตัดยอดโหลดสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานใน
อาคารที่มีการพยากรณ์โหลดและการทำงานร่วมกันของ
อุปกรณ์ด้วยมาตรฐาน IEEE1888

โดย

นางสาวภาณุมาศ สอาดวงศ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ นาคพิระยุทธ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ อุตมวงศ์เสรี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย)

ภาณูมาส สอาดวงศ์ : การตัดยอดโหลดสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารที่มีการพยากรณ์โหลดและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ด้วยมาตรฐาน IEEE1888 (PEAK SHAVING FOR BUILDING ENERGY MANAGEMENT SYSTEM WITH LOAD FORECASTING AND INTEROPERABILITY BY IEEE1888 STANDARD) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน, 137 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้สาริตการตัดยอดโหลดสำหรับอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (อาคารวิศวกรรมไฟฟ้าเดิม) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้วยตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ชนิดเชื่อมต่อกับกริดสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร CUBEMS ที่มีอยู่ องค์ประกอบสำคัญสำหรับระบบนี้ประกอบด้วย 1) ข้อมูลโหลดในอดีตที่จัดเก็บอยู่ในหน่วยเก็บข้อมูล 2) โปรแกรมประยุกต์การตัดยอดโหลด และ 3) ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ประเด็นที่วิทยานิพนธ์นี้ให้ความสนใจและพัฒนาขึ้นคือ 1) โปรแกรมประยุกต์การตัดยอดโหลดสำหรับ CUBEMS ที่ประกอบด้วยการพยากรณ์โหลดและการกำหนดรูปแบบการอัดและคายประจุสำหรับอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ และ 2) การประสานการทำงานร่วมกันระหว่างองค์ประกอบต่างๆที่มีมาตรฐานแตกต่างกันด้วยมาตรฐานเปิด IEEE 1888 โดยในส่วนของพยากรณ์โหลด วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเลือกแบบจำลอง ARIMA (4,1,4)×(0,1,1)₆ ด้วยระเบียบวิธี Box-Jenkins ที่อาศัยข้อมูลโหลดในอดีต ทั้งนี้แบบจำลองดังกล่าวสามารถพยากรณ์ความต้องการสูงสุดได้แม่นยำในระดับหนึ่ง ในส่วนของประสานการทำงาน วิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาเกตเวย์สำหรับอินเวอร์เตอร์แบตเตอรี่ โดยเกตเวย์จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์ที่ใช้มาตรฐาน Modbus และ CUBEMS ที่ใช้มาตรฐาน IEEE 1888 ผลการทดลองกับระบบจริงแสดงให้เห็นว่า โปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำข้อมูลโหลดในอดีตของ CUBEMS มาพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าเพื่อกำหนดรูปแบบการอัดและคายประจุที่เหมาะสมและส่งผ่านเกตเวย์ไปที่อินเวอร์เตอร์พร้อมทั้งยังสามารถประสานการทำงานร่วมกันกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 5 kW 14.4 kWh โดยโปรแกรมประยุกต์สามารถตัดยอดค่าโหลดสูงสุดของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ได้สูงถึง 4.06 kW

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5670333421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: BUILDING ENERGY MANAGEMENT SYSTEM / IEEE1888 / LOAD FORECASTING
/ PEAK SHAVING

PHANUMAT SAATWONG: PEAK SHAVING FOR BUILDING ENERGY MANAGEMENT SYSTEM WITH LOAD FORECASTING AND INTEROPERABILITY BY IEEE1888 STANDARD. ADVISOR: ASST. PROF. SURAPONG SUWANKAWIN, Ph.D., 137 pp.

This thesis presents a peak-shaving application for Boonrod Binson building (former electrical engineering building) at Chulalongkorn University where the CUBEMS (Chulalongkorn University Building Energy Management System) is installed along with grid-connected battery energy storage. In this system, there are 3 main components in the following: 1) the historical load data stored in the data storage, 2) the peak-shaving application and 3) Battery Energy Storage System (BESS). This thesis mainly focuses on 2 issues. The first one is concerned with the development of peak-shaving application for CUBEMS; the load forecasting and the commanded patterns of charging/discharging current for the inverter of BESS are provided. The second issue is the interoperability among various equipments with distinct standards in the CUBEMS where the IEEE1888 open standard is conducted to be the backbone. In this thesis, a forecast model; ARIMA (4,1,4) \times (0,1,1)₉₆, is created from the Box-Jenkins methodology by using historical load data. This model can fairly forecast the peak demand to some extent. Furthermore, the gateway is developed in order to connect between battery inverter (Modbus standard) and CUBEMS (IEEE1888 standard). The experiment with the existing CUBEMS shows the results that the peak-shaving application can be able to employ the historical load data to forecast the electricity demand. The profiles of discharge current are appropriately generated and sent to the inverter through the developed gateway. In addition, the interoperability with 5-kW 14.4-kWh-rating BESS is achieved and the developed application can successfully shave up to 4.06 kW of the peak demand of Boonrod Binson building.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ ผู้ให้คำแนะนำตลอดการทำวิจัย ขอขอบคุณคุณคุณสรารุณี เดชจรัสโยธิน และคุณพงษ์พจน์ ชัยบุญเรือง ผู้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆเป็นอย่างดีมาโดยตลอด และขอขอบคุณโครงการทุนผู้ช่วยสอนที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษารวมถึงศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนสำหรับข้อมูลและสิ่งอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ แห่งห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับกำลังใจและคำแนะนำต่างๆ สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่เป็นกำลังใจอย่างยิ่งและให้การสนับสนุนในด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร.....	2
1.1.1 โครงการ SG-BEMS.....	3
1.1.2 โครงการ BEMOSS.....	4
1.1.3 โครงการ GUTP.....	5
1.2 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า	7
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	8
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	8
บทที่ 2 ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารด้วยมาตรฐาน IEEE1888	9
2.1 มาตรฐาน IEEE1888.....	9
2.1.1 สถาปัตยกรรม IEEE1888.....	9
2.1.1.1 เกตเวย์.....	10
2.1.1.2 โปรแกรมประยุกต์.....	10
2.1.1.3 หน่วยเก็บข้อมูล	10

2.1.1.4	รีจิสทรี	10
2.1.2	ลำดับการสื่อสารของมาตรฐาน IEEE1888.....	11
2.1.3	โพรโทคอลสำหรับการสื่อสารของมาตรฐาน IEEE1888	12
2.1.3.1	โพรโทคอล FETCH	12
2.1.3.2	โพรโทคอล WRITE.....	13
2.1.4	โครงสร้างข้อมูลสำหรับมาตรฐาน IEEE1888.....	14
2.2	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่มีมาตรฐานต่างกันด้วยเกตเวย์	17
2.2.1	มาตรฐาน Modbus.....	17
2.2.2	การทำงานของเกตเวย์ในระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่.....	19
2.2.2.1	การอ่านค่าจากอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และเก็บ ค่าไปยังหน่วยเก็บข้อมูล.....	22
2.2.2.2	การรับค่าคำสั่งจากโปรแกรมประยุกต์และส่งค่าไปยังอินเวอร์เตอร์ (เฉพาะ ส่วนส่งค่าไปยังอินเวอร์เตอร์) ผ่านมาตรฐาน Modbus.....	25
2.3	โปรแกรมประยุกต์สำหรับการตัดยอดโหลด.....	27
2.3.1	การอ่านปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจากหน่วยเก็บข้อมูล	27
2.3.2	การรับค่าคำสั่งจากโปรแกรมประยุกต์และส่งค่าไปยังอินเวอร์เตอร์ (เฉพาะส่วนรับ ค่าคำสั่งจากโปรแกรมประยุกต์)	30
บทที่ 3	การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า	33
3.1	ระเบียบวิธีของ Box-Jenkins.....	42
3.1.1	การระบุแบบจำลอง.....	45
3.1.2	การประมาณค่าพารามิเตอร์	46
3.1.3	การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง	46
3.1.4	การพยากรณ์.....	47
3.2	ตัวอย่างการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า.....	48

3.2.1 การระบุแบบจำลอง.....	49
3.2.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์และการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง	52
3.2.3 การพยากรณ์.....	55
3.2.5 เปรียบเทียบการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในกรณีต่างๆ.....	57
บทที่ 4 การตัดยอดโหลดสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร	66
4.1 แนวคิดในการตัดยอดโหลด	66
4.2 โครงสร้างของระบบทดสอบ.....	69
4.3 ผลการทดสอบการทำงาน	71
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	93
5.1 บทสรุปผลการวิจัย.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	94
รายการอ้างอิง	95
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่	98
ภาคผนวก ข การแปลงอนุกรมเวลาตามระเบียบวิธี Box-Jenkins.....	103
ภาคผนวก ค การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบูรณรอด บิณฑสันต์.....	105
ภาคผนวก ง การพิจารณาพิกัดและขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่	132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	137

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	ข้อมูลเชิงสถิติการใช้พลังงานไฟฟ้าจำแนกตามประเภท พ.ศ. 2554 – 2558	2
ตารางที่ 1.2	ข้อมูลเชิงสถิติการใช้พลังงานไฟฟ้าจำแนกตามประเภท พ.ศ. 2554 – 2558	3
ตารางที่ 2.1	การทำงานของแต่ละองค์ประกอบในกรณีต่างๆของมาตรฐาน IEEE1888.....	12
ตารางที่ 2.2	ส่วนประกอบส่วนหัว (Header) ของโครงสร้างข้อมูลสำหรับมาตรฐาน IEEE1888	16
ตารางที่ 2.3	ส่วนประกอบส่วนข้อความ (Body) ของโครงสร้างข้อมูลสำหรับมาตรฐาน IEEE1888	16
ตารางที่ 2.4	รหัสฟังก์ชันของมาตรฐาน Modbus.....	19
ตารางที่ 2.5	รายละเอียดของข้อมูลที่จัดเก็บในแฟ้มข้อมูล	21
ตารางที่ 2.6	ตัวอย่างข้อความร้องขอและข้อความตอบกลับระหว่างเกตเวย์และอินเวอร์เตอร์ ด้วยมาตรฐาน Modbus	23
ตารางที่ 2.7	ตัวอย่างข้อความร้องขอและข้อความตอบกลับระหว่างเกตเวย์และหน่วยเก็บข้อมูล ด้วยมาตรฐาน IEEE1888.....	24
ตารางที่ 2.8	ตัวอย่างข้อความร้องขอและข้อความตอบกลับระหว่างเกตเวย์และอินเวอร์เตอร์ ด้วยมาตรฐาน Modbus	26
ตารางที่ 2.9	ตัวอย่างข้อความร้องขอและข้อความตอบกลับระหว่างโปรแกรมประยุกต์และ หน่วยเก็บข้อมูล	28
ตารางที่ 2.10	ตัวอย่างข้อความร้องขอและข้อความตอบกลับระหว่างโปรแกรมประยุกต์และเกต เวย์.....	32
ตารางที่ 3.1	ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของอาคารบูรณรอด บิณฑสันต์ระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2558 – เดือนตุลาคม พ.ศ. 2559	41
ตารางที่ 3.2	การพิจารณาแบบจำลองของอนุกรมเวลาคงที่จากลักษณะของ ACF และ PACF.....	46
ตารางที่ 3.3	การใช้ข้อมูลย้อนหลังสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า	49
ตารางที่ 3.4	แบบจำลองสำหรับกรณีที่ 1.....	52
ตารางที่ 3.5	เปรียบเทียบแบบจำลองที่ 1 – 14 สำหรับกรณีที่ 1.....	52

ตารางที่ 3.6	ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ด้วยแบบจำลอง ARIMA (4, 1, 1) × (1, 1, 1) ₉₆	56
ตารางที่ 3.7	แบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในกรณีที่ 1 และ 2.....	58
ตารางที่ 3.8	แบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในกรณีที่ 3 และ 4.....	58
ตารางที่ 3.9	แบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในกรณีที่ 5 และ 6.....	58
ตารางที่ 3.10	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) ทั้ง 6 กรณี.....	62
ตารางที่ 3.11	ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 1.....	62
ตารางที่ 3.12	ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 2.....	63
ตารางที่ 3.13	ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 3.....	63
ตารางที่ 3.14	ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 4.....	64
ตารางที่ 3.15	ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 5.....	64
ตารางที่ 3.16	ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 6.....	65
ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบูรณาการ บินทสันต์ทั้ง 10 วัน.....	92

สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1	สถาปัตยกรรมของ BEMOSS[4].....	4
รูปที่ 1.2	สถาปัตยกรรมของมาตรฐาน IEEE1888[6]	5
รูปที่ 1.3	เปรียบเทียบลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และลักษณะการใช้ไฟฟ้าของอาคารบูรود บินทสันต์ ณ วันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2559	7
รูปที่ 2.1	โปรแกรมประยุกต์การตัดยอดโหลดที่พัฒนาขึ้นเพิ่มเติมในวิทยานิพนธ์นี้ สำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารด้วยมาตรฐาน IEEE1888.....	9
รูปที่ 2.2	สถาปัตยกรรมของมาตรฐาน IEEE1888[8]	10
รูปที่ 2.3	ลำดับการสื่อสารของมาตรฐาน IEEE1888[8]	11
รูปที่ 2.4	โปรโตคอล FETCH[8]	13
รูปที่ 2.5	โปรโตคอล WRITE[8].....	14
รูปที่ 2.6	โครงสร้างข้อมูลสำหรับมาตรฐาน IEEE1888[8].....	15
รูปที่ 2.7	ลำดับชั้นข้อมูลรูปแบบ XML สำหรับมาตรฐาน IEEE1888	15
รูปที่ 2.8	เฟรมข้อมูล Modbus โดยทั่วไป	18
รูปที่ 2.9	บอร์ด BeagleBone Black	19
รูปที่ 2.10	ผังงานของเกตเวย์สำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่	20
รูปที่ 2.11	กระบวนการอ่านค่าจากอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และเก็บค่าไปยังหน่วยเก็บข้อมูล.....	22
รูปที่ 2.12	ข้อมูลกำลังจริงด้านออกของแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์ ณ วันที่ 18 ตุลาคม 2559	24
รูปที่ 2.13	กระบวนการส่งค่าไปยังอินเวอร์เตอร์ผ่านมาตรฐาน Modbus ของหัวข้อ 2.2.2.2	25
รูปที่ 2.14	กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์แสดงการอัดและคายประจุแบตเตอรี่ด้วยการกำหนดคำสั่งผ่านเกตเวย์ไปยังอินเวอร์เตอร์.....	26
รูปที่ 2.15	ตัวอย่างสาริตของการอ่านปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจากหน่วยเก็บข้อมูล.....	27
รูปที่ 2.16	ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารบูรود บินทสันต์ ณ วันที่ 5 ตุลาคม 2559 ...	30

รูปที่ 2.17	กระบวนการรับค่าคำสั่งจากโปรแกรมประยุกต์ของหัวข้อ 2.3.2	31
รูปที่ 3.1	ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2558 – เดือนตุลาคม พ.ศ. 2559	41
รูปที่ 3.2	ลักษณะการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยรายวันของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์	42
รูปที่ 3.3	ผังงานระเบียบวิธี Box-Jenkins.....	44
รูปที่ 3.4	ตัวอย่างการพยากรณ์แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์ ณ เวลา t ต่างๆ	48
รูปที่ 3.5	ACF และ PACF ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที่ 1).....	50
รูปที่ 3.6	ACF และ PACF ของผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (ผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที่ 1)	50
รูปที่ 3.7	ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่าง แบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที่ 1).....	51
รูปที่ 3.8	ACF ของส่วนตกค้าง (Residuals) ด้วยของแบบจำลอง ARIMA $(4, 1, 1) \times (1, 1, 1)_{96}$	54
รูปที่ 3.9	การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่าง วันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 จำนวน 10 วัน ด้วยแบบจำลอง ARIMA $(4, 1, 1) \times (1, 1, 1)_{96}$	55
รูปที่ 3.10	การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ใน วันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ด้วยแบบจำลอง ARIMA $(4, 1, 1) \times (1, 1, 1)_{96}$ แบบปรับ จุดกำเนิดการพยากรณ์	56
รูปที่ 3.11	การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีที่ 1	59
รูปที่ 3.12	การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำการของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีที่ 2	59
รูปที่ 3.13	การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำการของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีที่ 3	60

รูปที่ 3.14 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำการของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีี่ 4	60
รูปที่ 3.15 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำการของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีี่ 5	61
รูปที่ 3.16 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำการของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีี่ 6	61
รูปที่ 4.1 แนวคิดการตัดยอดโหลดด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่	67
รูปที่ 4.2 สถิติการตัดยอดโหลดด้วยตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 6 kW 14.4 kWh	68
รูปที่ 4.3 ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ เพื่อตัดยอดโหลด	69
รูปที่ 4.4 ผังงานของโปรแกรมประยุกต์สำหรับตัดยอดโหลด	70
รูปที่ 4.5 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์	72
รูปที่ 4.6 การตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559	72
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559	73
รูปที่ 4.8 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2559แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์	74
รูปที่ 4.9 การตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2559	74
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2559	75
รูปที่ 4.11 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์	76
รูปที่ 4.12 การตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2559	76
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2559	77

รูปที่ 4.29 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์	88
รูปที่ 4.30 การตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2559	88
รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2559	89
รูปที่ 4.32 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์	90
รูปที่ 4.33 การตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559	90
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559	91



บทที่ 1

บทนำ

พลังงานไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ทั้งด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม หรืออาคารสำนักงาน บ้านพักอาศัย รวมถึงการเพิ่มขึ้นของประชากรและเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่มากขึ้นเนื่องจากทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติมีปริมาณจำกัด นอกจากนี้ยังทำลายสิ่งแวดล้อมด้วยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่บรรยากาศในปริมาณที่สูงอีกด้วย

ด้วยเหตุนี้ทั่วโลกจึงให้ความสำคัญกับการประหยัดพลังงาน เพื่อลดการใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้าจึงนำทรัพยากรธรรมชาติ ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลมมาใช้ในการผลิตร่วมด้วย เนื่องจากเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันจากสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนทั่วโลกที่เพิ่มขึ้น ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System; BESS) จึงถูกนำมาใช้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรอง สะสมพลังงานจากพลังงานหมุนเวียนในช่วงเวลาที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำแล้ว ยังสามารถเปลี่ยนช่วงการผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนให้เหมาะสมกับความต้องการใช้ไฟฟ้าได้อีกด้วย

ปัจจุบันประเทศไทยใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลักในการผลิตไฟฟ้า แต่การพัฒนาทางด้านสังคม เศรษฐกิจ และอุตสาหกรรมของประเทศ ส่งผลให้แนวโน้มความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้กำลังการผลิตไฟฟ้าอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการในอนาคต รัฐบาลจึงได้กำหนดนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ซึ่งช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และยังเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอีกด้วย ทั้งนี้เพื่อให้ระบบการไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ รองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าในอนาคตที่เพิ่มขึ้น จึงพัฒนาระบบไฟฟ้าปัจจุบันให้เป็นระบบไฟฟ้าที่ชาญฉลาดหรือระบบโครงข่ายสมาร์ทกริด (Smart Grid)

จากข้อมูลเชิงสถิติของการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่าง พ.ศ. 2554 – 2558 ในกลุ่มธุรกิจห้างสรรพสินค้า อาคารที่พัก[1, 2] จะมีสัดส่วนการใช้พลังงานที่สูงมากดังแสดงในตารางที่ 1.1 การบริหารจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy) และกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand) ของอาคารหรือเรียกว่าระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management System; BEMS) จึงมีนัยสำคัญในการช่วยลดการสร้างแหล่งผลิตไฟฟ้าได้

ตารางที่ 1.1 ข้อมูลเชิงสถิติการใช้พลังงานไฟฟ้าจำแนกตามประเภท พ.ศ. 2554 – 2558

ประเภท	หน่วยจำหน่ายไฟฟ้า (ล้านหน่วย)				
	พ.ศ.2554	พ.ศ.2555	พ.ศ.2556	พ.ศ.2557	พ.ศ.2558 (ม.ค.-ก.ย.)
อาหาร	8,956	9,721	9,697	10,281	7,621
อิเล็กทรอนิกส์	6,719	6,325	6,547	6,960	5,250
เหล็กและโลหะพื้นฐาน	6,627	6,954	7,065	7,252	5,067
สิ่งทอ	6,182	6,038	6,040	6,036	4,424
ยานยนต์	3,892	4,950	5,220	5,125	4,116
ห้างสรรพสินค้า	4,160	4,491	4,596	4,743	3,659
พลาสติก	4,164	4,458	4,531	4,539	3,500
ซีเมนต์	3,785	4,042	4,028	4,137	3,282
อพาร์ทเมนท์และเกสเฮ้าส์	2,915	3,291	3,494	3,687	3,054
โรงแรม	3,340	3,671	3,810	3,797	2,999

1.1 ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร

ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารเป็นการติดตามและควบคุมการใช้พลังงานของสิ่งอำนวยความสะดวกและระบบต่างๆภายในอาคารเช่น ระบบแสงสว่าง และระบบ HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) เป็นต้น ทั้งนี้ได้นำเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (Information and Communications Technology; ICT) มาประยุกต์ใช้กับการบริหารจัดการพลังงาน ในที่นี้การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าจะอาศัยข้อมูลจากมิเตอร์อัจฉริยะ (Smart Meter) และอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) โดยมีการบันทึกข้อมูลต่างๆไปยังระบบฐานข้อมูล นอกจากนี้ในระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารแบบใหม่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนมากขึ้นจึงต้องบริหารจัดการทั้งด้านอุปสงค์ (Demand Side) และด้านอุปทาน (Supply Side) ไปพร้อมกัน

ในอดีตระบบควบคุมอาคารอัตโนมัติ (Building Automation System; BAS) แบบดั้งเดิมเป็นโพรโทคอลปิด (Closed Protocol) คือ ระบบต้องใช้โพรโทคอลชนิดเดียวกันในการสื่อสาร ดังนั้นอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบจึงมาจากผู้ผลิตเพียงรายเดียว ต่างจากปัจจุบันที่เริ่มนำโพรโทคอลเปิด (Open Protocol) ซึ่งสนับสนุนการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้โพรโทคอลต่างกัน จึงมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน นอกจากนี้ระบบควบคุมอาคารอัตโนมัติแบบดั้งเดิมมีลักษณะการควบคุมแบบรวมศูนย์

ดังแสดงในตารางที่ 1.2 เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารแบบใหม่จึงมีการใช้มาตรฐานสื่อสารแบบเปิดเช่น BACnet, LonWorks, Modbus และ ZigBee เป็นต้น ซึ่งโพรโทคอลเปิดสามารถสนับสนุนการทำงานร่วมกัน (Interoperability) ของอุปกรณ์ที่ใช้โพรโทคอลต่างกัน ได้ ทั้งนี้ตัวอย่างโครงการสาธิตของระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารแบบใหม่แสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1.2 ข้อมูลเชิงสถิติการใช้พลังงานไฟฟ้าจำแนกตามประเภท พ.ศ. 2554 – 2558

	Conventional BAS	New BEMS
Protocol/Information	Proprietary/Closed	Open/Sharing
Information Visualization	Pull Type	Push Type
Demand Control	Centralized/Top Down	Decentralized/Bottom Up
Compatibility	Vendor Oriented (Dependency)	User Oriented (Freedom)

1.1.1 โครงการ SG-BEMS

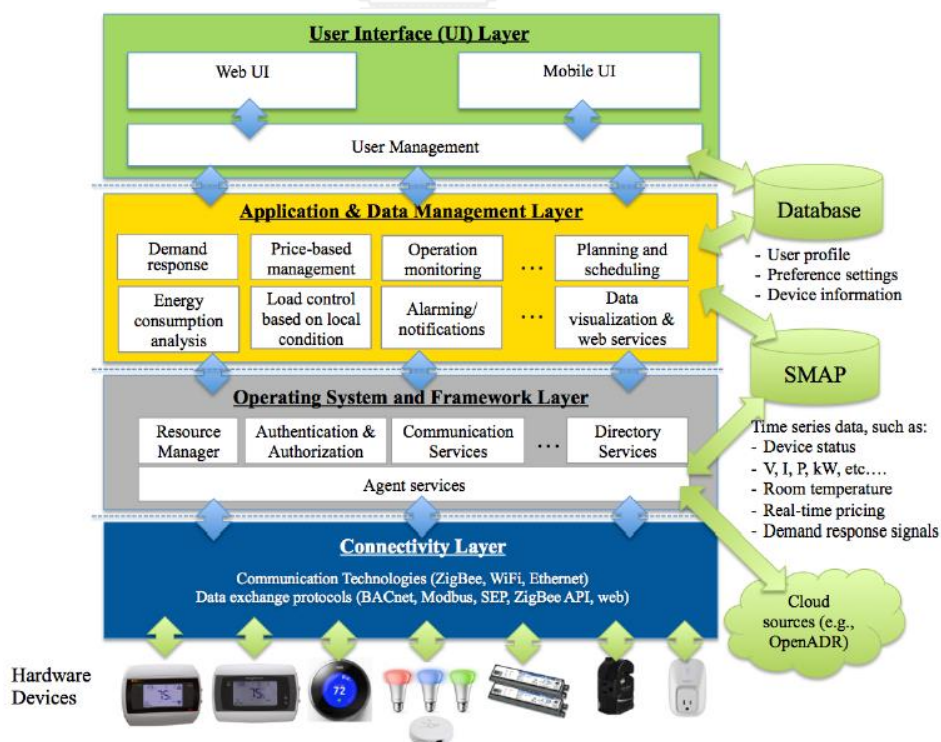
โครงการ SG-BEMS (Smart Grid Building Energy Management System)[3] พัฒนาโดยบริษัท Korea Telecom (KT) เพื่อลดการใช้พลังงานภายในอาคาร ค่าใช้จ่ายการใช้ไฟฟ้าและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่บรรยากาศ ทั้งนี้อาศัยการติดตามข้อมูลการใช้พลังงานและควบคุมสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆให้เหมาะสม โดยสถาปัตยกรรมของ SG-BEMS มีทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ 1) ระดับการจัดการ ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์สำหรับการจัดการ เซิร์ฟเวอร์บริการ และ เซิร์ฟเวอร์สำหรับจัดการข้อมูล 2) ระดับอัตโนมัติ ประกอบด้วย เกตเวย์อัจฉริยะ และ 3) ระดับเขตข้อมูล ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัด และตัวควบคุม

เกตเวย์อัจฉริยะสำหรับโครงการนี้ทำหน้าที่เก็บข้อมูลการใช้พลังงานผ่านมิเตอร์และข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัด ทั้งนี้เกตเวย์จะทำงานร่วมกับระบบปฏิบัติการภายในอาคารได้แก่ ระบบควบคุมไฟฟ้า ระบบ HVAC และระบบแสงสว่างและอุณหภูมิ พร้อมมีโปรแกรมที่สนับสนุนการทำงานร่วมกัน (Middleware) ระหว่างโพรโทคอลของอุปกรณ์ที่ต่างกัน อาทิ Modbus และ BACnet

1.1.2 โครงการ BEMOSS

โครงการ BEMOSS (Building Energy Management Open Source Software)[4] มีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงาน และมีการตอบสนองด้านโหลด (Demand Response) สำหรับอาคารขนาดเล็กและขนาดกลาง ทั้งนี้อาศัยการเข้าถึงข้อมูลและควบคุมอุปกรณ์ในระบบ HVAC ระบบแสงสว่างและโหลดแบบปลั๊ก โครงการนี้ได้มีการติดตั้งมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าและอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ เพื่อบันทึกข้อมูลการเคลื่อนไหว แสงสว่าง อุณหภูมิ และความชื้น เป็นต้น แนวคิดหลักของโครงการ BEMOSS จะออกแบบและพัฒนาในด้านต้นทุนประสิทธิภาพ มาตรฐานร่วมระหว่างกัน และแพลตฟอร์มซอฟต์แวร์แบบเปิดเผย เทคโนโลยีการสื่อสารที่ใช้ในโครงการ BEMOSS ประกอบด้วย การสื่อสารแบบใช้สาย ได้แก่ Ethernet และการสื่อสารแบบอนุกรม (RS-485) รวมถึงการสื่อสารแบบไร้สาย ได้แก่ ZigBee และ Wi-Fi และสามารถรองรับโพรโทคอล BACnet, Modbus, Web, OpenADR (Open Automated Demand Response) และ SEP (Smart Energy Profile) ได้อีกด้วย

สถาปัตยกรรมของ BEMOSS ดังแสดงในรูปที่ 1.1 มี 4 ระดับ ได้แก่ 1) ระดับส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ ประกอบด้วย การสื่อสารระหว่างกันของผู้ใช้ และการจัดการผู้ใช้ 2) ระดับโปรแกรมประยุกต์ และการจัดการข้อมูล 3) ระดับระบบปฏิบัติการและกรอบงาน และ 4) ระดับภาวะเชื่อมต่อ

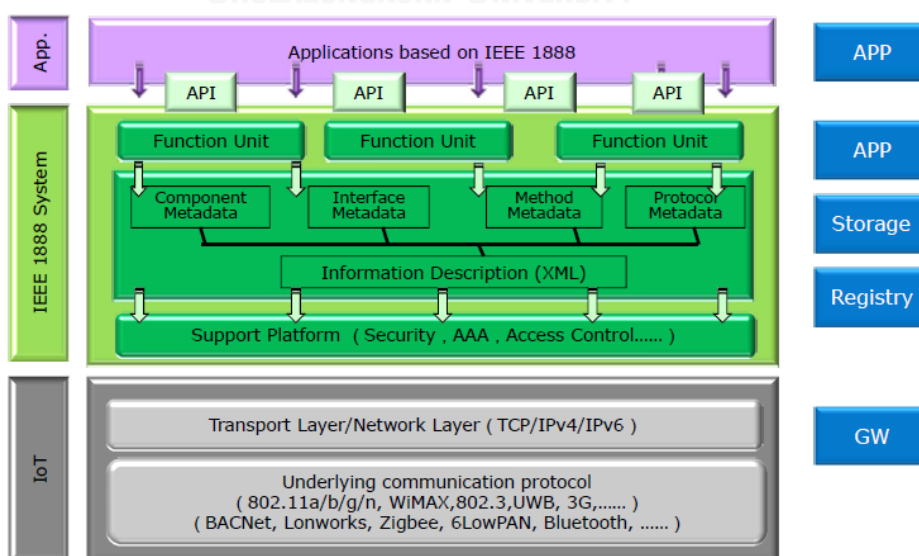


รูปที่ 1.1 สถาปัตยกรรมของ BEMOSS[4]

1.1.3 โครงการ GUTP

ในปีพ.ศ. 2554 ประเทศญี่ปุ่นเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว ทำให้เกิดปัญหาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เพียงพอกับความต้องการ มหาวิทยาลัยโตเกียวจึงจัดทำโครงการ GUTP (The Green University of Tokyo Project)[5, 6] มีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงานในอาคารภายในวิทยาเขตต่างๆของมหาวิทยาลัยโตเกียว รวมถึงรับมือกับภาวะโลกร้อน และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โครงสร้างของโครงการ GUTP ประกอบด้วย มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งภายในอาคาร มีการเชื่อมโยงระหว่างกันและส่งข้อมูลต่างๆไปยังหน่วยเก็บข้อมูล และโปรแกรมประยุกต์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้า ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในอาคาร อาทิ ระบบควบคุมแสงสว่าง และระบบ HVAC บนโครงข่าย TCP/IP ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่

โครงการนี้ได้นำมาตราฐาน IEEE1888 หรือ โพรโทคอลโครงข่ายการควบคุมชุมชนสีเขียวอย่างแพร่หลาย (Ubiquitous Green Community Control Network Protocol) มาใช้ มาตรฐานดังกล่าวเป็นโพรโทคอลเปิดที่นำเสนอโดยสถาบันวิชาชีพวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE) ซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้งานเฉพาะการบริหารจัดการพลังงานภายในอาคาร เนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆมีมาตรฐานการสื่อสารแตกต่างกันตามลักษณะการทำงาน มาตรฐานนี้จึงช่วยให้อุปกรณ์ต่างๆในระบบสื่อสารร่วมกันได้ผ่านโครงข่าย TCP/IP ด้วยโพรโทคอล HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) ซึ่งสามารถใช้งานกับระบบโครงข่ายทั้งแบบใช้สายและไร้สายได้ มีความน่าเชื่อถือและมีการรักษาความปลอดภัยในระหว่างการรับส่งข้อมูลกันเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานอื่น ทั้งนี้มีเกตเวย์ทำหน้าที่แปลงรูปแบบข้อมูลเดิมให้อยู่ในรูปแบบ XML (Extensible Markup Language) ตามมาตรฐาน IEEE1888 ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 สถาปัตยกรรมของมาตรฐาน IEEE1888[6]

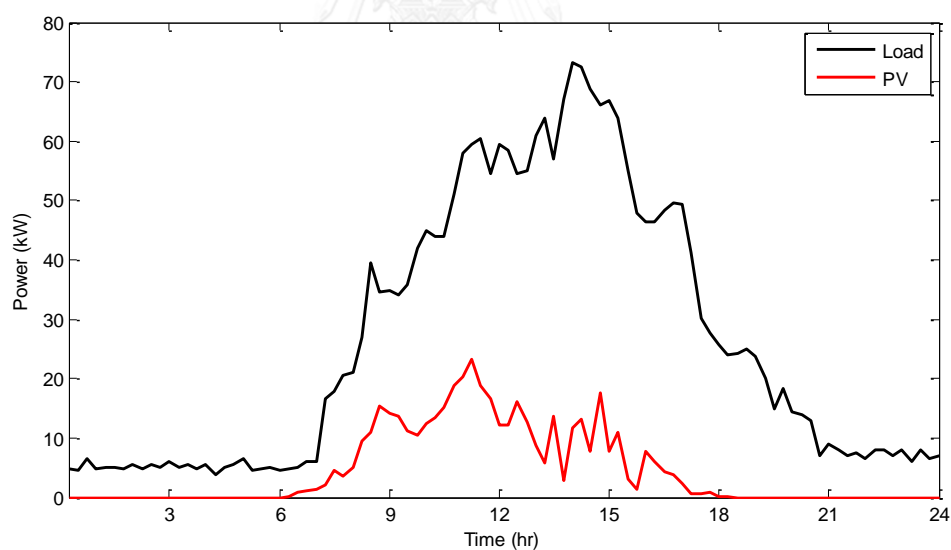
เนื่องจากอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานในระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารมาจากหลากหลายผู้ผลิต จึงเกิดข้อจำกัดในการสื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์เพราะต้องใช้โพรโทคอลหรือมาตรฐานการสื่อสารข้อมูลรูปแบบเดียวกัน โพรโทคอลเปิดจึงมีความเหมาะสมเพื่อให้อุปกรณ์ต่างๆสามารถสื่อสารกันได้ จากระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารในงานวิจัย[3-6] เป็นการจัดการด้านอุปสงค์เท่านั้น แต่ยังคงขาดระบบบริหารจัดการด้านอุปทานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนและระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรี่ที่ในปัจจุบันถือเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีบทบาทสำหรับอาคาร ทั้งนี้การบริหารจัดการในด้านอุปทานสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารโดยรวมได้

จากรายงาน[7] นำเสนอถึงทิศทางการบริหารจัดการพลังงานในอาคารสมัยใหม่ที่พิจารณาถึงแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวภายในอาคารได้แก่ แหล่งผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และตัวกักเก็บพลังงาน ทำให้บทบาทของอาคารต่อโครงข่ายไฟฟ้า (Building-to-Grid) ไม่เพียงเป็นโหลดเท่านั้น การบริหารจัดการแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวภายในอาคารมีข้อดีต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าดังนี้คือ 1) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบส่งและระบบจำหน่าย 2) ช่วยลดพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในระบบจำหน่ายได้ 3) ช่วยสนับสนุนการใช้แหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน และ 4) มีโหมดการทำงานที่เป็นบริการเสริม (Ancillary Service) ช่วยลดผลกระทบต่อโครงข่ายไฟฟ้าได้ อาทิเช่น โหมดการควบคุมกำลังจริง (Active Power Control) และกำลังปฏิกิริยา (Reactive Power Control) ทั้งนี้การใช้มาตรฐานการสื่อสารแบบเปิดจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบบริหารจัดการพลังงานดังกล่าวในวงกว้างได้

การพัฒนาส่วนประสานการทำงานร่วมกัน (Interoperability) ระหว่างข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ตัวกักเก็บพลังงาน และโครงข่ายไฟฟ้า เป็นแนวคิดในการบริหารจัดการด้านอุปสงค์ (Supply-Side Management; SSM) ควบคู่ไปกับการบริหารจัดการด้านอุปทาน (Demand-Side Management; DSM) วิทยานิพนธ์นี้จะสาธิตการบริหารจัดการพลังงานในอาคารด้วยมาตรฐาน IEEE1888 โดยพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak Shaving) ของอาคารด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรี่

1.2 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า

การลดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดหรือการตัดยอดโหลดมีผลต่อการลดค่าไฟฟ้าลงได้ ในปัจจุบันการใช้ไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวอาจช่วยลดความต้องการพลังไฟฟ้าได้หาก ลักษณะการใช้ไฟฟ้า (Load Profile) และลักษณะการผลิตไฟฟ้ามีความสอดคล้องกัน จากรูปที่ 1.3 แสดงให้เห็นว่าค่ายอดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีช่วงเวลาที่เหลื่อมไปจากค่ายอด โหลดของอาคารบูรود บินทสันต์ (อาคารวิศวกรรมไฟฟ้าเดิม) ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย ตัวจึงสามารถช่วยลดค่ายอดของโหลดได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น ตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จึงมี บทบาทในการตัดยอดโหลด ทั้งนี้อาศัยการอัดและคายพลังงานจากแบตเตอรี่ที่เหมาะสม ในการ ควบคุมระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ให้ตัดยอดโหลดได้อย่างแม่นยำนั้นจำเป็นต้องทราบ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงก่อน แต่เนื่องจากปริมาณการใช้ไฟฟ้าไม่อาจทราบได้ล่วงหน้า จึงต้องอาศัย ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าในอดีตมาสร้างแบบจำลองเพื่อช่วยคาดการณ์แนวโน้มการใช้ไฟฟ้าในอนาคต ดังนั้น การพยากรณ์ลักษณะการใช้ไฟฟ้าจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะประยุกต์ใช้ระเบียบวิธี ของ Box-Jenkins ในการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าของอาคารบูรود บินทสันต์สำหรับการตัดยอดโหลดด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่



รูปที่ 1.3 เปรียบเทียบลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และลักษณะการใช้ไฟฟ้าของ อาคารบูรود บินทสันต์ ณ วันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2559

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

นำเสนอการตัดยอดโหลดสำหรับอาคารด้วยตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ชนิดเชื่อมต่อกรีด และระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารที่มีการพยากรณ์โหลดและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ ด้วยมาตรฐาน IEEE1888

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

สาธิตการบริหารจัดการพลังงานด้านอุปทานของอาคารบุนรอด บินทสันต์ที่มีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ชนิดเชื่อมต่อกรีดเพื่อตัดยอดโหลดด้วยมาตรฐาน IEEE1888 และพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ที่ช่วยบริหารจัดการพลังงานในอาคารบุนรอด บินทสันต์ ผ่านระบบ CUBEMS ด้วยมาตรฐาน IEEE1888

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) องค์กรความรู้ในการพยากรณ์ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของอาคาร
- 2) องค์กรความรู้ในการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ต่างๆในการตัดยอดโหลด
- 3) มีเกตเวย์ที่สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ในระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วยมาตรฐาน IEEE1888

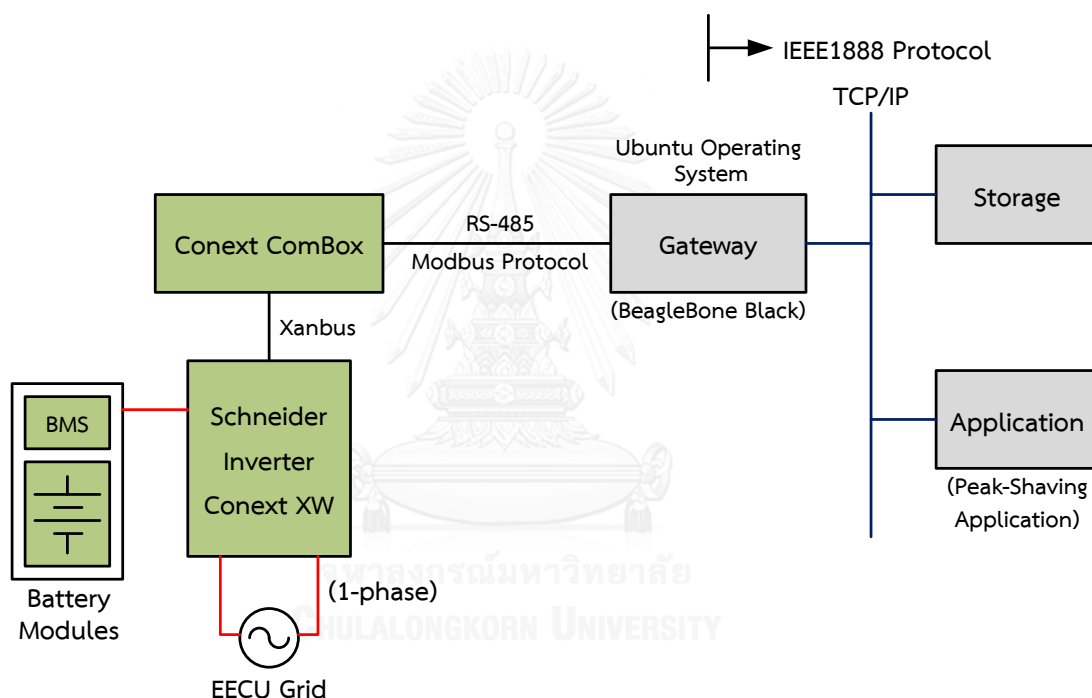
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษามาตรฐาน IEEE1888 และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาการพยากรณ์ลักษณะการใช้ไฟฟ้าจากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง
- 3) ศึกษาการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่
- 4) พยากรณ์ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของอาคารบุนรอด บินทสันต์
- 5) ทดสอบการบริหารจัดการพลังงานด้านอุปทานของอาคารด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อลดความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด
- 6) เก็บข้อมูล ประเมินผล และสรุปผล
- 7) เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารด้วยมาตรฐาน IEEE1888

ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารคือการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมาประยุกต์ร่วมกับการจัดการพลังงานในอาคาร ทำให้ทราบถึงปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพื่อกำหนดทิศทางการใช้ไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์มากที่สุดดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 ในบทนี้จะกล่าวถึงการทำงานร่วมกันของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และโปรแกรมประยุกต์สำหรับตัดยอดโหลดด้วยมาตรฐาน IEEE1888 ดังแสดงในรูปที่ 2.1

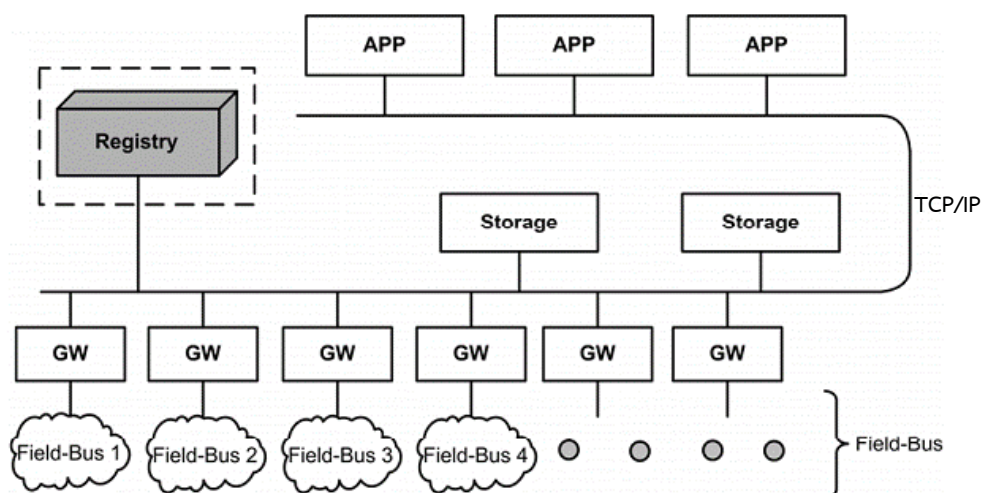


รูปที่ 2.1 โปรแกรมประยุกต์การตัดยอดโหลดที่พัฒนาขึ้นเพิ่มเติมในวิทยานิพนธ์นี้ สำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารด้วยมาตรฐาน IEEE1888

2.1 มาตรฐาน IEEE1888

2.1.1 สถาปัตยกรรม IEEE1888

สถาปัตยกรรมมาตรฐาน IEEE1888[8] แบ่งออกเป็น 2 ระนาบ ได้แก่ 1) ระนาบข้อมูล (Data-Plane) ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ได้แก่ เกตเวย์ (Gateway; GW) หน่วยเก็บข้อมูล (Storage) และโปรแกรมประยุกต์ (Application; APP) และ 2) ระนาบควบคุม (Control-Plane) ได้แก่ รีจิสทรี (Registry) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยทำงานบนโครงข่าย TCP/IP เป็นหลัก



รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมของมาตรฐาน IEEE1888[8]

2.1.1.1 เกตเวย์

เกตเวย์ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่ออุปกรณ์และแปลงรูปแบบข้อมูลให้อยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE1888 ตัวอย่างเช่น การอ่านข้อมูลจากอินเวอร์เตอร์ (ทั้งจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่) และมีเตอร์ตรวจวัดการใช้พลังงาน เพื่อเก็บข้อมูลไปยังหน่วยเก็บข้อมูลหรือแสดงผลผ่านโปรแกรมประยุกต์ รวมทั้งสั่งการทำงานอุปกรณ์ต่างๆโดยใช้ค่าจากองค์ประกอบอื่นๆ เช่น โปรแกรมประยุกต์ เป็นต้น

2.1.1.2 โปรแกรมประยุกต์

โปรแกรมประยุกต์ทำหน้าที่แสดงสถานะและข้อมูลล่าสุด ตัวอย่างเช่น ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของอาคารหรือกำลังด้านออกของอินเวอร์เตอร์จากหน่วยเก็บข้อมูล รวมไปถึงข้อมูลในอดีตเพื่อใช้วิเคราะห์สำหรับการบริหารจัดการพลังงาน นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆภายใต้มาตรฐาน IEEE1888 ได้ ซึ่งการตัดยอดโหลดในโครงการวิจัยนี้ถือเป็นโปรแกรมประยุกต์ในลักษณะหนึ่งด้วย

2.1.1.3 หน่วยเก็บข้อมูล

หน่วยเก็บข้อมูลทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลจากองค์ประกอบต่างๆ และสามารถส่งข้อมูลไปยังองค์ประกอบต่างๆเมื่อมีการร้องขอข้อมูลภายใต้มาตรฐาน IEEE1888

2.1.1.4 รีจิสทรี

รีจิสทรีเป็นศูนย์กลางเพื่อเชื่อมโยงแต่ละองค์ประกอบอันได้แก่ เกตเวย์ หน่วยเก็บข้อมูล และโปรแกรมประยุกต์เข้าด้วยกันอย่างอิสระ

ตารางที่ 2.1 การทำงานของแต่ละองค์ประกอบในกรณีต่างๆของมาตรฐาน IEEE1888

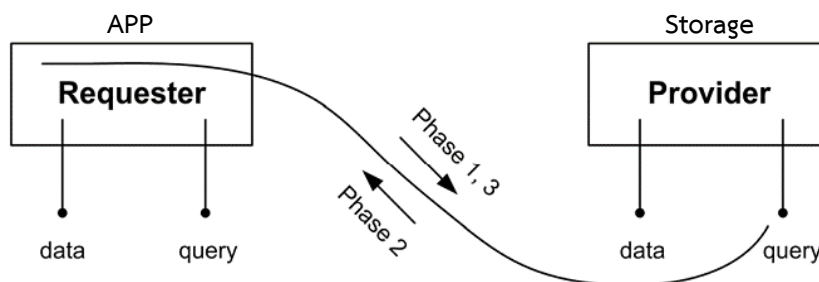
กรณี	ลักษณะการทำงาน
A	การลงทะเบียนขององค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ เกตเวย์ หน่วยเก็บข้อมูล และโปรแกรมประยุกต์
B	การค้นหาตัวระบุ (Point ID) ในองค์ประกอบต่างๆ
C	การค้นหา URI (Uniform Resource Identifier) ของหน่วยเก็บข้อมูล
D	การส่งข้อมูล ในกรณีนี้เกตเวย์ทำหน้าที่ส่งข้อมูลจากการอ่านค่าอินเวอร์เตอร์ไปยังหน่วยเก็บข้อมูล
E	การร้องขอข้อมูล ในกรณีนี้โปรแกรมประยุกต์ร้องขอข้อมูลจากหน่วยเก็บข้อมูล ถ้าข้อมูลที่ร้องขอมีขนาดใหญ่จะมีการส่งข้อมูลเป็นส่วนๆตามลำดับ
F	การค้นหา URI ของเกตเวย์
G	การร้องขอข้อมูล ในกรณีนี้โปรแกรมประยุกต์ร้องขอข้อมูลจากเกตเวย์
H	การส่งข้อมูล ในกรณีนี้โปรแกรมประยุกต์ทำหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์เป็นระยะตามที่กำหนด และเกตเวย์จะส่งข้อมูลปัจจุบันกลับมายังโปรแกรมประยุกต์
I	การส่งข้อมูล ในกรณีนี้โปรแกรมประยุกต์ทำหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์เพื่อส่งการทำงานอุปกรณ์ต่างๆ

2.1.3 โพรโทคอลสำหรับการสื่อสารของมาตรฐาน IEEE1888

มาตรฐาน IEEE1888 แบ่งประเภทของโพรโทคอลสำหรับการสื่อสารได้ 2 ประเภท ได้แก่ โพรโทคอลสำหรับการสื่อสารระหว่างองค์ประกอบ และโพรโทคอลสำหรับการสื่อสารระหว่างองค์ประกอบและรีจิสทรี ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะโพรโทคอลสำหรับการสื่อสารระหว่างองค์ประกอบเท่านั้นซึ่งมี 2 รูปแบบดังนี้

2.1.3.1 โพรโทคอล FETCH

โพรโทคอล FETCH เป็นโพรโทคอลสำหรับร้องขอข้อมูลจากองค์ประกอบระยะไกล องค์ประกอบที่ต้องการข้อมูลเรียกว่าผู้ร้องขอข้อมูล (Requester) และองค์ประกอบที่ให้ข้อมูลเรียกว่าผู้ให้บริการข้อมูล (Provider) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ตัวอย่างการใช้โพรโทคอล FETCH ในงานวิทยานิพนธ์นี้ คือ โปรแกรมประยุกต์ (ผู้ร้องขอข้อมูล) ร้องขอข้อมูลจากหน่วยเก็บข้อมูล (ผู้ให้บริการข้อมูล)

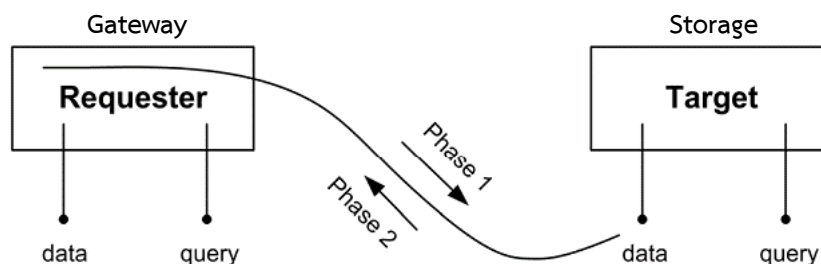


รูปที่ 2.4 โพรโทคอล FETCH[8]

- ขั้นตอนที่ 1: ผู้ร้องขอข้อมูลส่งคำขอไปยังผู้ให้บริการข้อมูล โดยผู้ร้องขอข้อมูลจะส่งช่วงเวลาที่ต้องการและขนาดของข้อมูลสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ (Acceptable Size) ถ้าไม่ได้กำหนดจะถูกตั้งค่าไว้ที่ 100 เป็นค่ามาตรฐาน
- ขั้นตอนที่ 2: ผู้ให้บริการข้อมูลส่งข้อมูลกลับไปยังผู้ร้องขอข้อมูล ถ้าขนาดของข้อมูลใหญ่กว่าขนาดของข้อมูลสูงสุดที่ยอมรับได้ ผู้ให้บริการข้อมูลจะแบ่งข้อมูลทั้งหมดเป็นชุดๆ และจะส่งข้อมูลกลับไปตามลำดับพร้อมกับตัวชี้ตำแหน่ง (Cursor) ถ้าไม่ได้รับตัวชี้ตำแหน่ง แสดงว่าข้อมูลที่ได้รับเป็นชุดสุดท้าย ถือว่ากระบวนการ FETCH เสร็จสมบูรณ์
- ขั้นตอนที่ 3: ผู้ร้องขอข้อมูลส่งคำขอไปยังผู้ให้บริการข้อมูลอีกครั้งพร้อมกับตัวชี้ตำแหน่งเพื่อรับข้อมูลชุดถัดไป

2.1.3.2 โพรโทคอล WRITE

โพรโทคอล WRITE เป็นโพรโทคอลสำหรับส่งข้อมูลไปยังองค์ประกอบระยะไกล องค์ประกอบที่ต้องการส่งข้อมูลเรียกว่าผู้ร้องขอส่งข้อมูล (Requester) และองค์ประกอบที่ได้รับข้อมูลเรียกว่าเป้าหมายรับข้อมูล (Target) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ตัวอย่างการใช้โพรโทคอล WRITE ในงานวิทยานิพนธ์นี้ คือ เกตเวย์ (ผู้ร้องขอส่งข้อมูล) ส่งข้อมูลจากระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ไปเก็บไว้ยังหน่วยเก็บข้อมูล (เป้าหมายรับข้อมูล)



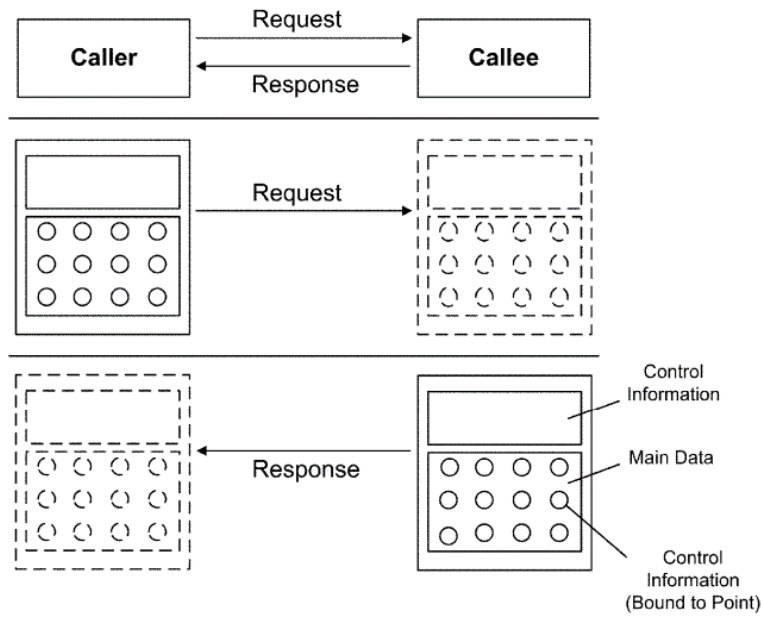
รูปที่ 2.5 โพรโทคอล WRITE[8]

ขั้นตอนที่ 1: ผู้ร้องขอส่งข้อมูลไปยังเป้าหมายรับข้อมูล

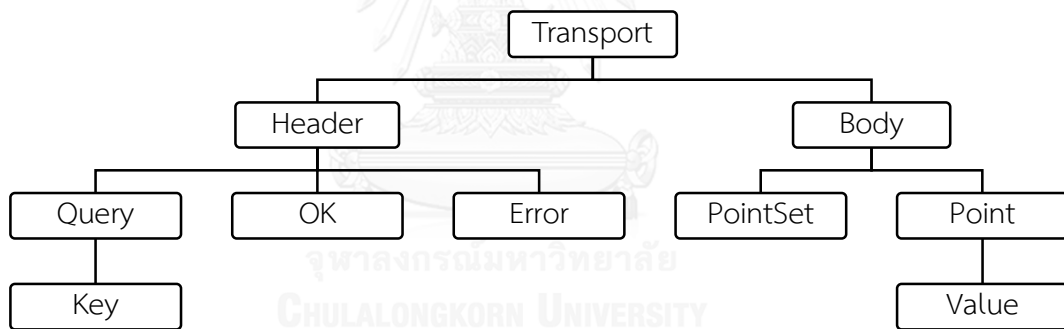
ขั้นตอนที่ 2: เป้าหมายรับข้อมูลตอบกลับว่าการส่งข้อมูลทำได้สำเร็จหรือเกิดความผิดพลาดไปยังผู้ร้องขอส่งข้อมูล

2.1.4 โครงสร้างข้อมูลสำหรับมาตรฐาน IEEE1888

มาตรฐาน IEEE1888 ได้นำโพรโทคอล RPC (Remote Procedure Call) มาใช้ทั้งกับโพรโทคอลสำหรับการสื่อสารระหว่างองค์ประกอบ และโพรโทคอลสำหรับการสื่อสารระหว่างองค์ประกอบและรีจิสทรี ผู้ร้องขอ (Caller) จะส่งการร้องขอข้อมูล (Request-Data) ไปยังผู้รับคำขอ (Callee) ซึ่งจะส่งการตอบกลับข้อมูล (Response-Data) ไปยังผู้ร้องขอ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โครงสร้างของคำร้องขอข้อมูลและการตอบกลับข้อมูลนั้นเหมือนกัน จากรูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของข้อมูล (Transport) ประกอบด้วยส่วนหัว (Header) และส่วนข้อความ (Body) โดยส่วนหัวประกอบด้วยข้อมูลควบคุม (Control Information) ได้แก่ ข้อมูลการร้องขอข้อมูล สถานะแสดงความถูกต้องหรือผิดพลาดที่เกิดขึ้น เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ในส่วนข้อความเป็นข้อมูลหลัก (Main Data) ประกอบด้วย Point หรือ PointSet ที่มีข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.6 โครงสร้างข้อมูลสำหรับมาตรฐาน IEEE1888[8]



รูปที่ 2.7 ลำดับชั้นข้อมูลรูปแบบ XML สำหรับมาตรฐาน IEEE1888

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบส่วนหัว (Header) ของโครงสร้างข้อมูลสำหรับมาตรฐาน IEEE1888

ส่วนประกอบ	รายละเอียด
Query	<ul style="list-style-type: none"> - ตัวระบุแบบ UUID (Universally Unique Identifier) สำหรับการร้องขอ - ชนิดของการร้องขอข้อมูล ในที่นี้คือ Storage หรือ Stream - ตัวชี้ตำแหน่ง - ขนาดของข้อมูลสูงสุดที่สามารถยอมรับได้
OK	- แสดงถึงการร้องขอที่สำเร็จ
Error	- แสดงข้อความผิดพลาด
Key	<ul style="list-style-type: none"> - Point ID หรือ PointSet ID ของการร้องขอ - เวลาของการร้องขอ อาจเป็นเวลาล่าสุดหรือช่วงเวลาที่ต้องการ

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบส่วนข้อความ (Body) ของโครงสร้างข้อมูลสำหรับมาตรฐาน IEEE1888

ส่วนประกอบ	รายละเอียด
PointSet	<ul style="list-style-type: none"> - URI ที่ระบุตัว PointSet อาจเรียกว่า PointSet ID - PointSet ประกอบด้วย Point หรือ PointSet ตัวอย่างเช่น <ul style="list-style-type: none"> ● bems.ee.eng.chula.ac.th/energy_consumption/ee/fl2/east
Point	<ul style="list-style-type: none"> - URI ที่ระบุตัว Point อาจเรียกว่า Point ID ตัวอย่างเช่น <ul style="list-style-type: none"> ● bems.ee.eng.chula.ac.th/energy_consumption/ee/fl2/east/lecturerroom_211 ● bems.ee.eng.chula.ac.th/energy_consumption/ee/fl2/east/lecturerroom_212 ● bems.ee.eng.chula.ac.th/energy_consumption/ee/fl2/east/meetingroom_210
Value	- ค่า ณ เวลาใดๆ ของ Point

2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่มีมาตรฐานต่างกันด้วยเกตเวย์

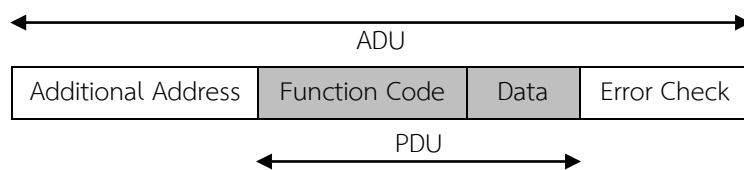
การเชื่อมต่ออุปกรณ์จากระบบการวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ไม่อาจทำได้โดยตรง ทั้งนี้อุปกรณ์ในระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารอาจจะมาจากหลากหลายผู้ผลิต เพื่อให้มีการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์จึงใช้เกตเวย์เป็นอุปกรณ์กลางสำหรับเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ภายใต้มาตรฐาน IEEE1888 สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการตัดยอดโหลดด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ โดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่นำมาใช้มีมาตรฐานการสื่อสาร Modbus ดังนั้นจึงต้องอาศัยเกตเวย์เป็นตัวกลางเชื่อมต่อเข้ากับมาตรฐาน IEEE1888 เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกันได้

2.2.1 มาตรฐาน Modbus

มาตรฐาน Modbus[9] เป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับการสื่อสารภายใน PLC (Programmable Logic Controller) คิดค้นโดยบริษัท Schneider Electric (ในอดีตคือบริษัท Modicon) มาตรฐาน Modbus เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในระดับอุตสาหกรรม ใช้สำหรับรับส่งข้อมูลของอุปกรณ์ควบคุมหรือส่วนประมวลผล เนื่องจากมาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานเปิด สามารถเข้าถึงได้ รองรับการทำงานกับระบบอื่นๆ และพัฒนาได้สะดวก และยังมีค่าใช้จ่ายใดๆ มาตรฐาน Modbus เป็นการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ ในที่นี้ อุปกรณ์ที่ต้องการข้อมูลจะเรียกว่า อุปกรณ์หลัก (Master) ส่วนอุปกรณ์ซึ่งถูกเรียกข้อมูลจะเรียกว่า อุปกรณ์รอง (Slave) ภายใต้มาตรฐาน Modbus ใดๆ อุปกรณ์หลักจะมีเพียง 1 ตัวเท่านั้น ส่วนอุปกรณ์รองมีจำนวนได้สูงสุด 247 ตัวโดยมีตัวระบุหมายเลข ทำให้อุปกรณ์หลักสามารถติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์รองได้ วิทยานิพนธ์นี้มีเกตเวย์จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์หลักและอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์รอง

แบบวิธีการส่งข้อมูลมาตรฐาน Modbus มี 2 รูปแบบคือ รูปแบบ ASCII (American Standard Code for Information Interchange) และรูปแบบ RTU (Remote Terminal Unit) ความแตกต่างของแบบวิธีการส่งข้อมูลทั้งสองคือ เฟอร์และระยะห่างของเวลาในการส่งชุดข้อมูล ภายใต้มาตรฐาน Modbus อุปกรณ์ต่างๆ จะต้องใช้แบบวิธีการส่งข้อมูลชนิดเดียวกัน โดยมีค่าเริ่มต้น (Default) เป็นรูปแบบ RTU ซึ่งในวิทยานิพนธ์ใช้แบบวิธี RTU ในการส่งข้อมูล

ในการส่งข้อมูลภายในโครงข่ายมาตรฐาน Modbus ได้กำหนดหน่วยข้อมูลโพรโทคอลทั่วไป (Protocol Data Unit; PDU) ที่ใช้ในการส่งข้อมูลภายในโครงข่าย นอกจากนี้มีการเพิ่มขอบเขตข้อมูลบางอย่างให้เฉพาะเจาะจงมากขึ้นเรียกว่า หน่วยข้อมูลการประยุกต์ (Application Data Unit; ADU) จากรูปที่ 2.8 ประกอบด้วย



รูปที่ 2.8 เฟรมข้อมูล Modbus โดยทั่วไป

- 1) Additional Address คือ ตำแหน่งที่อยู่ของอุปกรณ์รอง (Slave) เพื่อระบุอุปกรณ์ที่ต้องการสื่อสาร มีค่าตั้งแต่ 1-247
- 2) Function Code คือ รหัสฟังก์ชันที่บอกถึงหน้าที่ของเฟรมข้อมูลนั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้รหัสฟังก์ชัน 0x03 (Read Holding Registers) สำหรับการอ่านข้อมูลจากอินเวอร์เตอร์ และ 0x10 (Write Multiple Registers) สำหรับการเขียนข้อมูลไปยังอินเวอร์เตอร์
- 3) Data คือ ส่วนรายละเอียดข้อมูล ประกอบด้วย เลขที่อยู่เริ่มต้น (Starting Address) ปริมาณของรีจิสเตอร์ (Quantity of Register) จำนวนไบต์ (Byte Count) และค่าของรีจิสเตอร์ (Register Value)
- 4) Error Check คือ ส่วนที่ใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่รับส่งกัน ทั้งนี้ อุปกรณ์ที่ส่งชุดข้อมูลจะคำนวณค่า CRC (Cyclical Redundancy Checking) จากข้อมูลภายในเฟรมข้อมูล ในขณะที่อุปกรณ์รับข้อมูลจะคำนวณค่า CRC อีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบกับค่า CRC ก่อนหน้า หากค่าไม่เท่ากันแสดงว่าการส่งข้อมูลมีความผิดพลาด

ตารางที่ 2.4 รหัสฟังก์ชันของมาตรฐาน Modbus

Function Code	รายละเอียด
0x01	Read Coil
0x02	Read Discrete Inputs
0x03	Read Holding Registers
0x04	Read Input Register
0x05	Write Single Coil
0x06	Write Single Register
0x0F	Write Multiple Coils
0x10	Write Multiple Registers

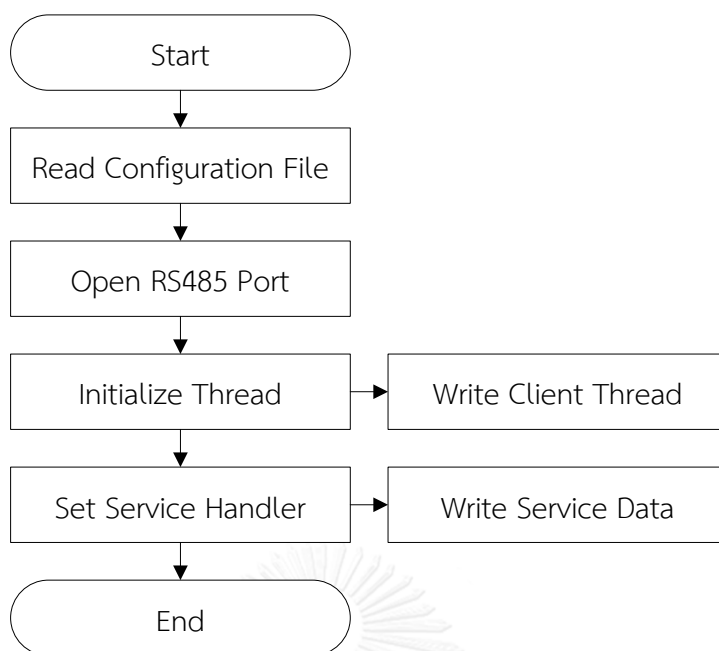
จากที่กล่าวในข้างต้นได้อธิบายถึงพื้นฐานของมาตรฐาน IEEE1888 และมาตรฐาน Modbus ในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงการทำงานของเกตเวย์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งนี้เกตเวย์ทำหน้าที่แปลงมาตรฐาน Modbus เป็นมาตรฐาน IEEE1888 เพื่อให้ระบบ CUBEMS สามารถอ่านข้อมูลต่างๆและควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์สำหรับแบตเตอรี่ได้

2.2.2 การทำงานของเกตเวย์ในระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

บอร์ด BeagleBone Black ถูกนำมาใช้เป็นเกตเวย์ในระบบกักเก็บพลังงานในแบตเตอรี่ในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะทำหน้าที่อ่านข้อมูลต่างๆและควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ผ่านทาง RS-485 ด้วยมาตรฐาน Modbus และสื่อสารกับองค์ประกอบอื่นๆในระบบดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยทำงานบนระบบปฏิบัติการ Ubuntu รูปที่ 2.10 แสดงถึงผังงานของเกตเวย์ในระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่แบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 บอร์ด BeagleBone Black



รูปที่ 2.10 ผังงานของเกตเวย์สำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

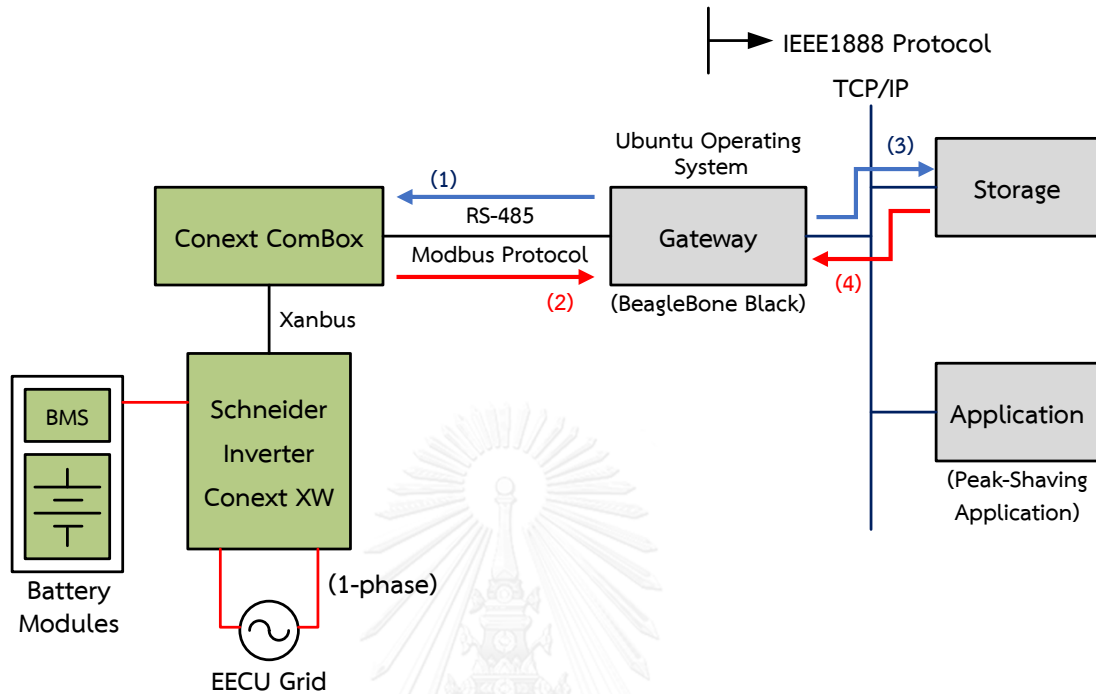
- 1) Read Configuration File คือ ส่วนอ่านรายละเอียดของข้อมูลที่จัดเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูล ทำให้สะดวกในการดำเนินการภายในโปรแกรม ซึ่งมีรายละเอียดของข้อมูลแสดงดังตารางที่ 2.5
- 2) Open RS485 Port คือ ส่วนเปิดการเชื่อมต่อช่องทาง RS-485 ของอินเวอร์เตอร์ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่
- 3) Initialize Thread คือ ส่วนตั้งค่าเริ่มต้นของ Write Client Thread และเริ่มต้นการทำงาน ทั้งนี้ Write Client Thread ทำหน้าที่อ่านข้อมูลจากอินเวอร์เตอร์ด้วยมาตรฐาน Modbus และเก็บค่าไปยังหน่วยเก็บข้อมูลด้วยมาตรฐาน IEEE1888 ทุกๆ 30 วินาที
- 4) Set Service Handle ส่วนตั้งค่าเริ่มต้นของ Write Server Data และเริ่มต้นการทำงาน ทั้งนี้ Write Server Data ทำหน้าที่ส่งข้อมูลกลับไปยังอินเวอร์เตอร์ด้วยมาตรฐาน Modbus หากได้รับการร้องขอจากองค์ประกอบต่างๆ อาทิเช่น โปรแกรมประยุกต์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดของข้อมูลที่จัดเก็บในแฟ้มข้อมูล

การตั้งค่า	รายละเอียด
RS485 Port	- RS485 Device Name
MODBUS Interface	- Point ID - Modbus Slave ID ได้แก่ หมายเลข 1-247 - Function Code (ดังตารางที่ 2.3) - หมายเลขรีจิสเตอร์ - ชนิดข้อมูล เช่น UINT16, SINT16, UINT32, SINT32 ฯลฯ - การอนุญาตเข้าถึงข้อมูล ได้แก่ Read, Write และ ReadWrite - สเกลของข้อมูล
Write Client	- URL ของหน่วยเก็บข้อมูล - ความถี่ในการเก็บข้อมูล - Point ID
Write Server	- Point ID

จากรายละเอียดการทำงานของเกตเวย์ในระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กล่าวมาข้างต้น ผู้เขียนจึงนำเสนอตัวอย่างการทำงานจริงเพื่อให้ผู้อ่านเกิดความเข้าใจกระบวนการสื่อสารระหว่าง CUBEMS และแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นดังต่อไปนี้

2.2.2.1 การอ่านค่าจากอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และเก็บค่าไปยังหน่วยเก็บข้อมูล



รูปที่ 2.11 กระบวนการอ่านค่าจากอินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และเก็บค่าไปยังหน่วยเก็บข้อมูล

ตัวอย่างนี้ผู้เขียนจะสาธิตการอ่านค่ากำลังจริงที่อินเวอร์เตอร์จ่ายให้หรือรับจากกริดด้วยมาตรฐาน Modbus และเก็บข้อมูลที่อ่านได้ไปยังหน่วยเก็บข้อมูลของ CUBEMS ด้วยมาตรฐาน IEEE1888 ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ทั้งนี้เกตเวย์จะทำงานในส่วน Write Client Thread ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว โดยรายละเอียดสำหรับแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ (1): เกตเวย์ส่งข้อความร้องขอข้อมูลกำลังจริงด้านออกของแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์ (หมายเลขรีจิสเตอร์คือ 0x0066) ผ่านทาง RS-485 ของอินเวอร์เตอร์ (Modbus Slave ID คือ 0x0A) ด้วยมาตรฐาน Modbus ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ขั้นตอนที่ (2): อินเวอร์เตอร์ส่งข้อมูลกำลังจริงด้านออกของแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์กลับไปยังเกตเวย์ผ่านทาง RS-485 ของอินเวอร์เตอร์ด้วยมาตรฐาน Modbus ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ขั้นตอนที่ (3): เกตเวย์ส่งข้อความขอส่งข้อมูลกำลังจริงด้านออกที่อ่านได้จากอินเวอร์เตอร์ไปยังหน่วยเก็บข้อมูล (หน่วยเก็บข้อมูลของ CUBEMS คือ www.bems.ee.eng.chula.ac.th) มี Point ID คือ http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/grid_power ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ขั้นตอนที่ (4): หน่วยเก็บข้อมูลตอบข้อความกลับไปยังเกตเวย์ว่าการส่งข้อมูลสำเร็จดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างข้อความร้องขอและข้อความตอบกลับระหว่างเกตเวย์และอินเวอร์เตอร์ด้วยมาตรฐาน Modbus

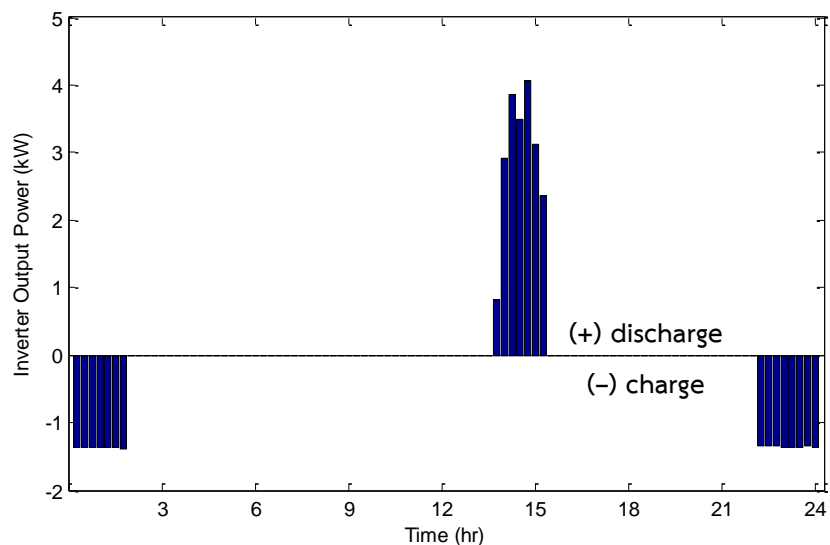
Request from the Master (Gateway) ในขั้นตอนที่ 1		Response from the Slave (Inverter XW) ในขั้นตอนที่ 2	
Modbus Slave Address	0x0A	Modbus Slave Address	0x0A
Function Code	0x03	Function Code	0x03
Starting Address (MSB)	0x00	Byte Count	0x02
Starting Address (LSB)	0x66	Value of Register 0x0066 (MSB)	0x07
Number of Registers (MSB)	0x00	Value of Register 0x0066 (LSB)	0xD0
Number of Registers (LSB)	0x01	CRC (MSB)	0xFF
CRC (MSB)	0xFF	CRC (LSB)	0xFF
CRC (LSB)	0xFF		

หมายเหตุ: กำลังจริงด้านออกของแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์ (หมายเลขรีจิสเตอร์ 0x0066) มีค่า 0x07D0 หรือ 2000 W

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างข้อความร้องขอและข้อความตอบกลับระหว่างเกตเวย์และหน่วยเก็บข้อมูลด้วย
มาตรฐาน IEEE1888

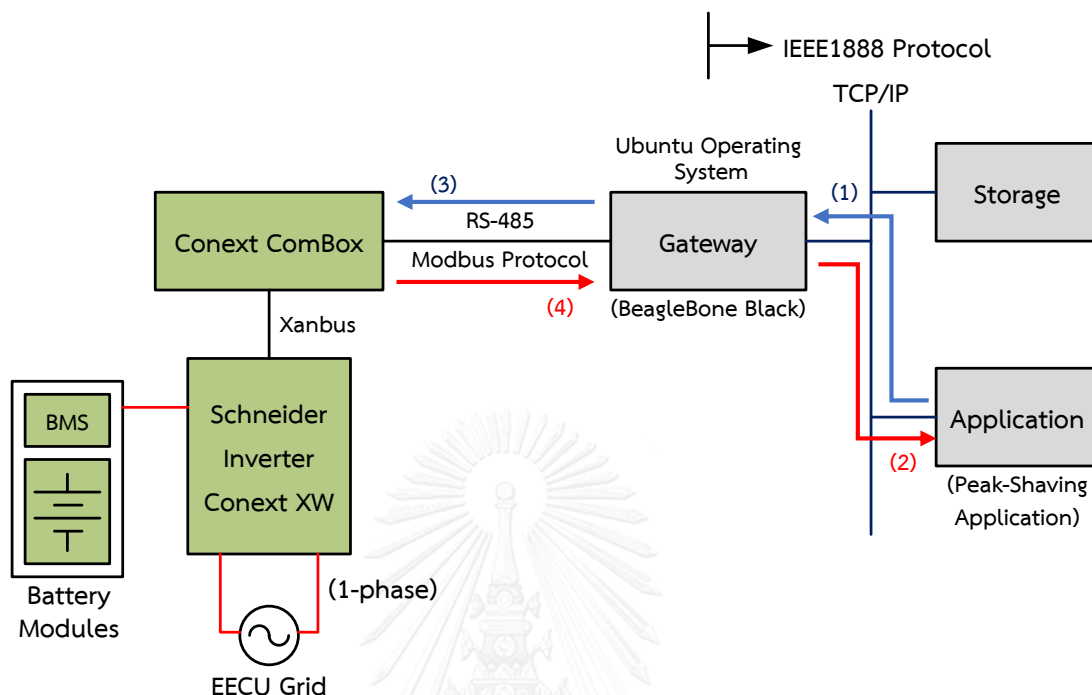
Request from Gateway ในขั้นตอนที่ 3
<pre><transport> <body> <point id="http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/grid_power"> <value time = "2016-10-18T12:20:00.000+07:00">2000</value> </point> </body> </transport></pre>
Response from Storage ในขั้นตอนที่ 4
<pre><transport> <header> <OK/> </header> </transport></pre>

รูปที่ 2.12 แสดงถึงข้อมูลกำลังจริงด้านออกของแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์ทุก 15 นาที ที่ถูกเก็บ
ข้อมูลอยู่ในหน่วยเก็บข้อมูลของ CUBEMS ณ วันที่ 18 ตุลาคม 2559



รูปที่ 2.12 ข้อมูลกำลังจริงด้านออกของแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์ ณ วันที่ 18 ตุลาคม 2559

2.2.2.2 การรับค่าคำสั่งจากโปรแกรมประยุกต์และส่งค่าไปยังอินเวอร์เตอร์ (เฉพาะส่วนส่งค่าไปยังอินเวอร์เตอร์) ผ่านมาตรฐาน Modbus



รูปที่ 2.13 กระบวนการส่งค่าไปยังอินเวอร์เตอร์ผ่านมาตรฐาน Modbus ของหัวข้อ 2.2.2.2

รูปที่ 2.13 แสดงถึงกระบวนการในการส่งกระแสอัดและคายประจุ (Charge/Discharge Current) สำหรับอินเวอร์เตอร์ ในกระบวนการนี้สามารถแบ่งการทำงานเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ 1) การรับค่ากระแสอัดและคายประจุจากโปรแกรมประยุกต์ผ่านเกตเวย์ (ขั้นตอนที่ (1) และ (2) ในรูปที่ 2.13) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 2.3.2 และ 2) ส่วนการส่งค่ากระแสอัดและคายประจุไปยังอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ ทั้งนี้เกตเวย์จะทำงานในส่วน Write Service Data ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว โดยรายละเอียดสำหรับแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

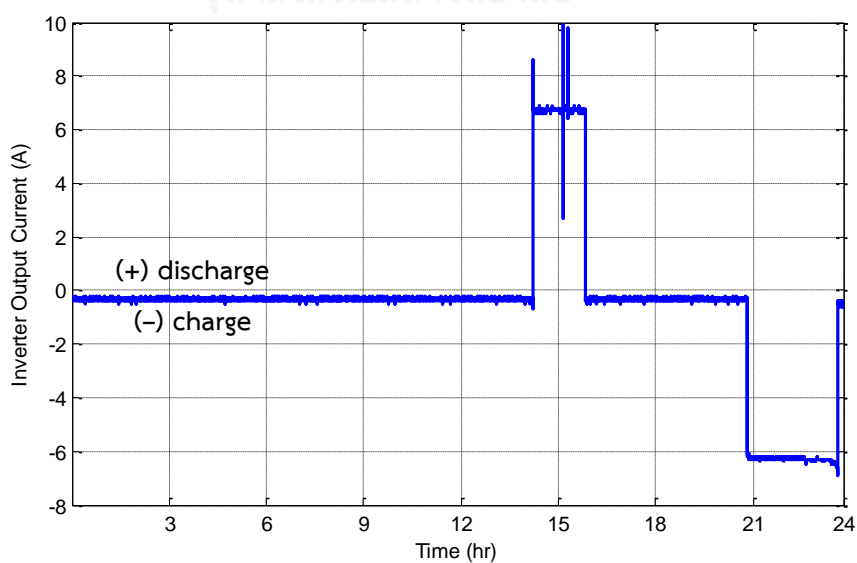
ขั้นตอนที่ (3): เกตเวย์ส่งข้อความเพื่อส่งค่ากระแสคายประจุ (หมายเลขรีจิสเตอร์คือ 0x01B4) ด้วยค่ากระแสคายประจุขนาด 7A (หรือ 0x0007) ผ่านทาง RS-485 ของอินเวอร์เตอร์ (Modbus Slave ID คือ 0x0A) ด้วยมาตรฐาน Modbus ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ขั้นตอนที่ (4): อินเวอร์เตอร์ส่งข้อความตอบกลับไปยังเกตเวย์ผ่านทาง RS-485 ของอินเวอร์เตอร์ ด้วยมาตรฐาน Modbus ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างข้อความร้องขอและข้อความตอบกลับระหว่างเกตเวย์และอินเวอร์เตอร์ด้วย
มาตรฐาน Modbus

Request from the Master (Gateway) ในชั้นตอนที่ 3		Response from the Slave (Inverter XW) ในชั้นตอนที่ 4	
Modbus Slave Address	0x0A	Modbus Slave Address	0x0A
Function Code	0x10	Function Code	0x10
Starting Address (MSB)	0x01	Starting Address (MSB)	0x01
Starting Address (LSB)	0xB4	Starting Address (LSB)	0xB4
Quantity of registers (MSB)	0x00	Quantity of registers (MSB)	0x00
Quantity of registers (LSB)	0x01	Quantity of registers (LSB)	0x01
Byte Count	0x02	CRC (MSB)	0xXX
Value of register 0x01B4 (MSB)	0x00	CRC (LSB)	0xXX
Value of register 0x01B4 (LSB)	0x07		
CRC (MSB)	0xXX		
CRC (LSB)	0xXX		

รูปที่ 2.14 แสดงข้อมูลกระแสคายประจุขนาด 7A ตั้งแต่เวลา 14:20 น. ถึง 16:00 น. และ
ข้อมูลกระแสอัดประจุขนาด 6.3A ตั้งแต่เวลา 20:50 น. ผ่านการตั้งค่าด้วยกระบวนการที่นำเสนอ

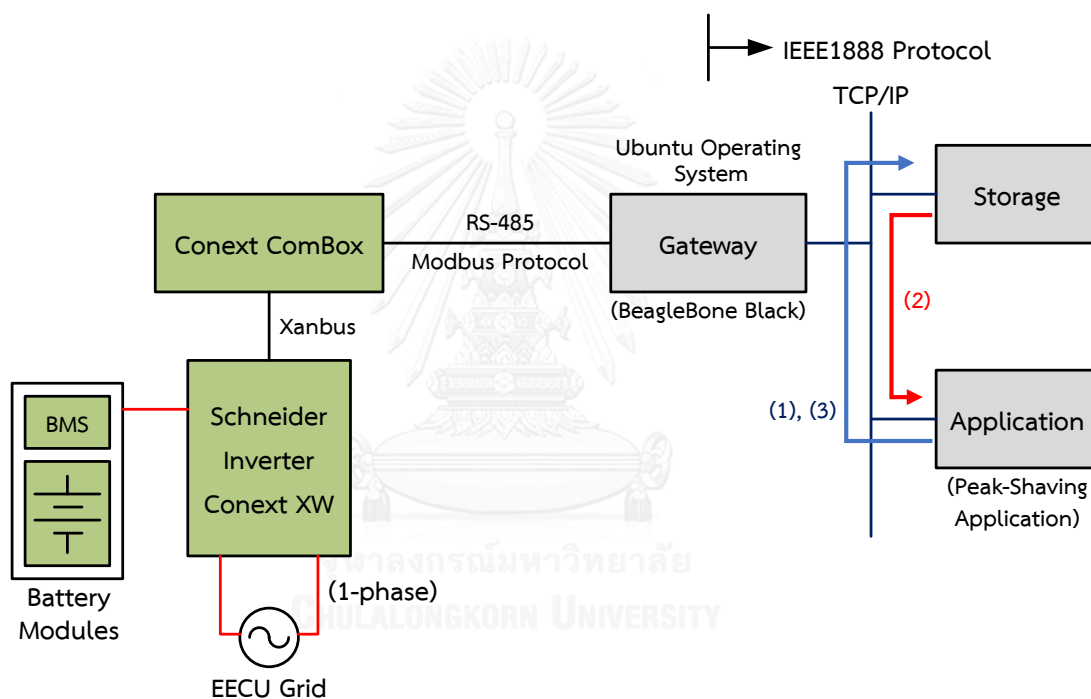


รูปที่ 2.14 กระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์แสดงการอัดและคายประจุแบตเตอรี่ด้วยการกำหนด
คำสั่งผ่านเกตเวย์ไปยังอินเวอร์เตอร์

2.3 โปรแกรมประยุกต์สำหรับการตัดยอดโหลด

หัวข้อ 2.2 ได้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่มีมาตรฐานต่างกันสามารถประสานการทำงานระหว่างกันได้ นอกจากเกตเวย์แล้วโปรแกรมประยุกต์ถือเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญ โดยโปรแกรมประยุกต์นอกจากจะทำหน้าที่แสดงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าแล้วยังสามารถควบคุมสั่งการทำงานอุปกรณ์ต่างๆได้ สำหรับโปรแกรมประยุกต์ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำหน้าที่ควบคุมการอัดและคายประจุของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ทั้งนี้จะอาศัยข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารบูรود บินทสันต์เพื่อพยากรณ์โหลดในอนาคต

2.3.1 การอ่านปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจากหน่วยเก็บข้อมูล



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างสาธิตของการอ่านปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจากหน่วยเก็บข้อมูล

รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างสาธิตการอ่านปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารบูรود บินทสันต์จากหน่วยเก็บข้อมูล CUBEMS ด้วยมาตรฐาน IEEE1888 โดยตารางที่ 2.9 แสดงถึงกระบวนการในการอ่านปริมาณการใช้พลังงานจากหน่วยเก็บข้อมูลซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ (1): โปรแกรมประยุกต์ส่งข้อความร้องขอข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (Point ID คือ http://bems.ee.eng.chula.ac.th/ee_building/monitor/energy) ณ ช่วงเวลาที่ต้องการไปยังหน่วยเก็บข้อมูล

- ขั้นตอนที่ (2): หน่วยเก็บข้อมูลส่งข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ากลับไปยังโปรแกรมประยุกต์ ถ้าขนาดของข้อมูลใหญ่กว่าขนาดของข้อมูลสูงสุดที่ยอมรับได้ ผู้ให้บริการข้อมูลจะแบ่งข้อมูลทั้งหมดเป็นชุดๆ และจะส่งข้อมูลกลับไปตามลำดับพร้อมกับตัวชี้ตำแหน่ง ถ้าไม่ได้รับตัวชี้ตำแหน่งแสดงว่าข้อมูลที่ได้รับเป็นชุดสุดท้าย ถือว่ากระบวนการเสร็จสมบูรณ์
- ขั้นตอนที่ (3): ผู้ร้องขอข้อมูลส่งคำขอไปยังผู้ให้บริการข้อมูลอีกครั้งพร้อมกับตัวชี้ตำแหน่งเพื่อรับข้อมูลชุดถัดไป

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างข้อความร้องขอและข้อความตอบกลับระหว่างโปรแกรมประยุกต์และหน่วยเก็บข้อมูล

1 st Request from Application ในขั้นตอนที่ 1
<pre><transport> <header> <query id="dffdefc9-b44f-4941-bb82-777eac5e97d9" type="storage" acceptableSize="100" ... SEARCH KEY... </query> </header> </transport></pre>
1 st Response from Storage ในขั้นตอนที่ 2
<pre><transport> <header> <query id="dffdefc9-b44f-4941-bb82-777eac5e97d9" type="storage" acceptableSize="100" cursor="74ecd695-8a54-4c50-8139-c4b3d31fcc9b" ... SEARCH KEY... </query> <OK/> </header></pre>

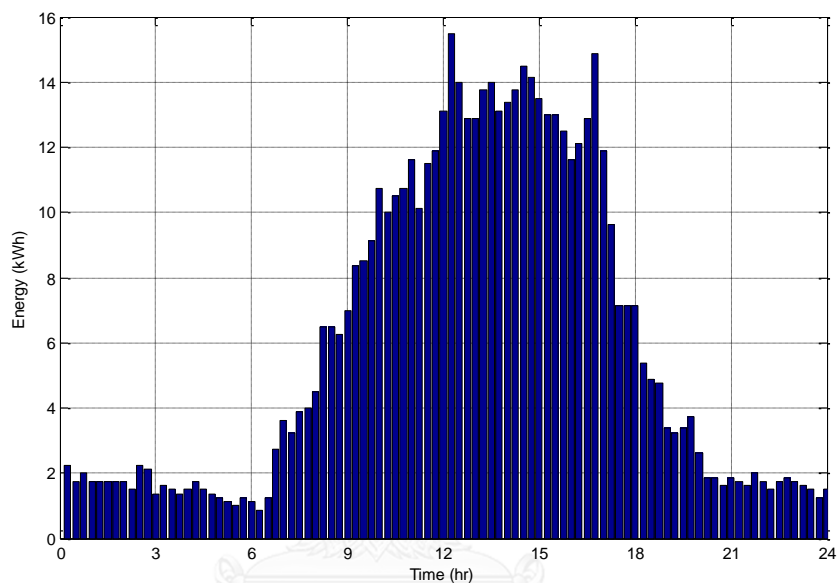
<pre> <body> <point id="http://bems.ee.eng.chula.ac.th/ee_building/monitor/energy"> ... DATA... </point> </body> </transport> </pre>
<p>2nd Request from Application ในขั้นตอนที่ 3 (กรณีข้อมูลมีขนาดใหญ่)</p>
<pre> <transport> <header> <query id="dffdefc9-b44f-4941-bb82-777eac5e97d9" type="storage" acceptableSize="100" cursor="74ecd695-8a54-4c50-8139-c4b3d31fcc9b" ... SEARCH KEY... </query> </header> </transport> </pre>
<p>2nd Response from Storage ในขั้นตอนที่ 2 (กรณีข้อมูลมีขนาดใหญ่)</p>
<pre> <transport> <header> <query id="e7aeef6d-7e5c-4b70-8eb1-11ad74808382" type="storage" acceptableSize="100" ... SEARCH KEY... </query> <OK/> </header> <body> <point id="http://bems.ee.eng.chula.ac.th/ee_building/monitor/energy"> ... DATA... </point> </body> </transport> </pre>

```

</point>
</body>
</transport>

```

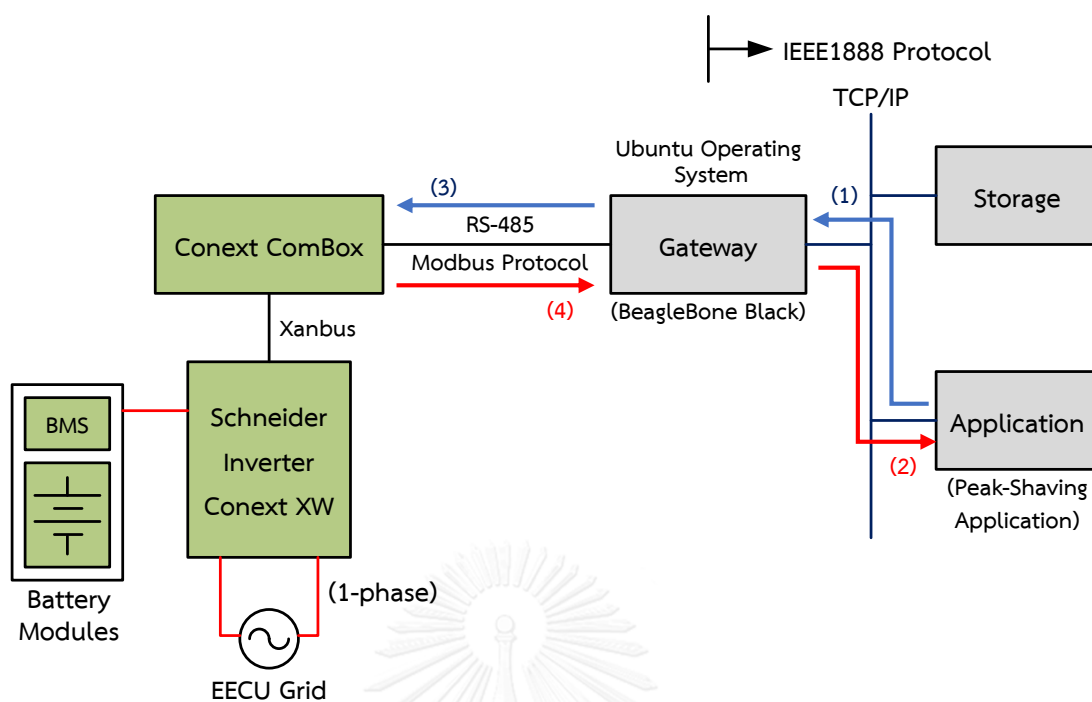
รูปที่ 2.16 แสดงข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ทุก 15 นาที ที่ถูกเก็บข้อมูลอยู่ในหน่วยเก็บข้อมูลของ CUBEMS ณ วันที่ 5 ตุลาคม 2559



รูปที่ 2.16 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ณ วันที่ 5 ตุลาคม 2559

2.3.2 การรับค่าคำสั่งจากโปรแกรมประยุกต์และส่งค่าไปยังอินเวอร์เตอร์ (เฉพาะส่วนรับค่าคำสั่งจากโปรแกรมประยุกต์)

ตัวอย่างถัดไปผู้เขียนจะสาธิตการรับค่าคำสั่งกระแสอัดและคายประจุจากโปรแกรมประยุกต์ และส่งค่ากระแสคายประจุไปยังอินเวอร์เตอร์ จากหัวข้อ 2.2.2.2 ที่ได้กล่าวถึงส่วนการส่งค่ากระแสคายประจุไปยังอินเวอร์เตอร์แล้ว ในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึงส่วนการรับค่าคำสั่งกระแสคายประจุจากโปรแกรมประยุกต์ ทั้งนี้เกตเวย์จะทำงานในส่วนสื่อสารด้วยมาตรฐาน IEEE1888 (ขั้นตอนที่ (1) และ (2) ในรูปที่ 2.17) โดยรายละเอียดแต่ละขั้นตอนอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.17 กระบวนการรับค่าคำสั่งจากโปรแกรมประยุกต์ของหัวข้อ 2.3.2

ขั้นตอนที่ (1): โปรแกรมประยุกต์ส่งข้อความขอส่งข้อมูลกระแสขายประจุ (Point ID คือ http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/max_sell_current) ด้วยค่ากระแสขายประจุขนาด 7 A ไปยังเกตเวย์ (Point ID ของเกตเวย์ที่เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์คือ <http://161.200.85.67:1888/IEEE1888GW?wsdl>) ดังแสดงในตารางที่ 2.10

ขั้นตอนที่ (2): เกตเวย์ตอบข้อความกลับไปยังโปรแกรมประยุกต์ว่าการส่งข้อมูลสำเร็จดังแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างข้อความร้องขอและข้อความตอบกลับระหว่างโปรแกรมประยุกต์และเกตเวย์

Request from Application ในขั้นตอนที่ 1
<pre><transport> <body> <point id = “http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/max_sell_current”> <value time = “2016-10-25T14:20:00.000+07:00”>7</value> </point> </body> </transport></pre>
Response from Gateway ในขั้นตอนที่ 2
<pre><transport> <head> <OK> </head> </transport></pre>

บทที่ 3

การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า

จากบทที่ 2 กล่าวถึงการประสานทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ในระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอริระหว่างมาตรฐาน Modbus และมาตรฐาน IEEE1888 ด้วยเกตเวย์แล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนโปรแกรมประยุกต์ของระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารที่มีตัวกักเก็บพลังงานแบบเตอริเพื่อตัดยอดโหลด ทั้งนี้การตัดยอดโหลดต้องอาศัยการอัดและคายประจุแบบเตอริในช่วงเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้การตัดยอดโหลดมีความแม่นยำจึงต้องทราบปริมาณการใช้ไฟฟ้าของอาคารล่วงหน้าด้วยการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าระยะสั้น (Short-Term Load Forecasting; STLF)

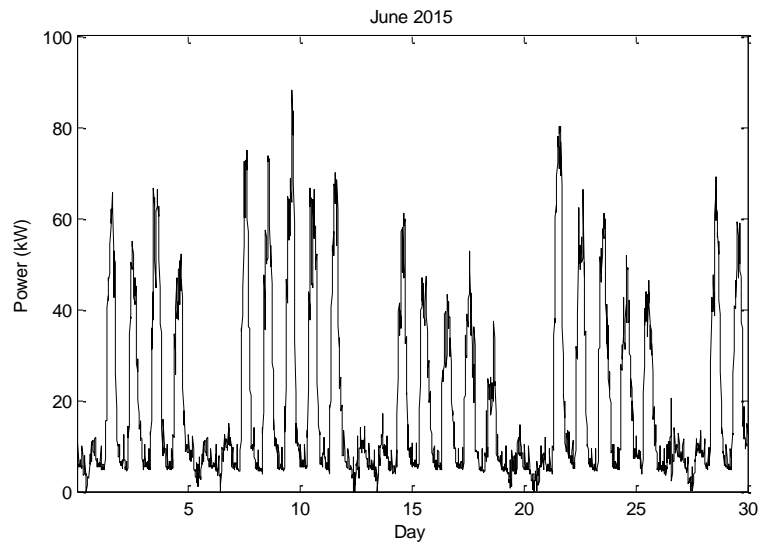
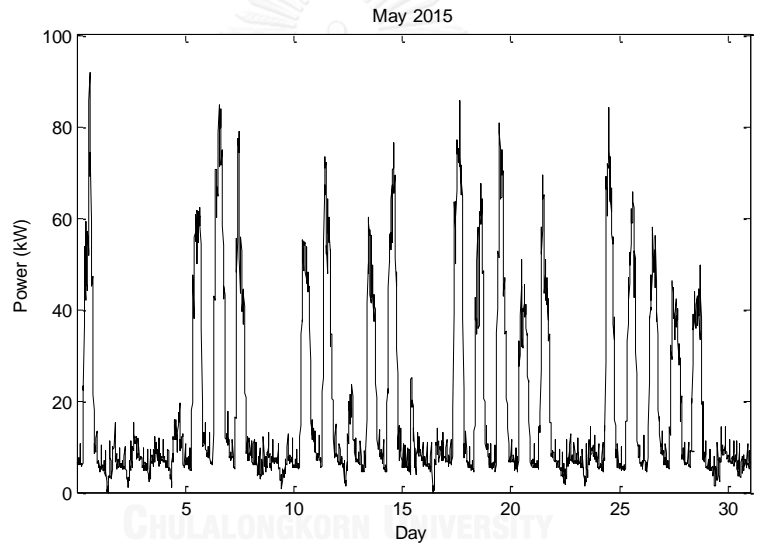
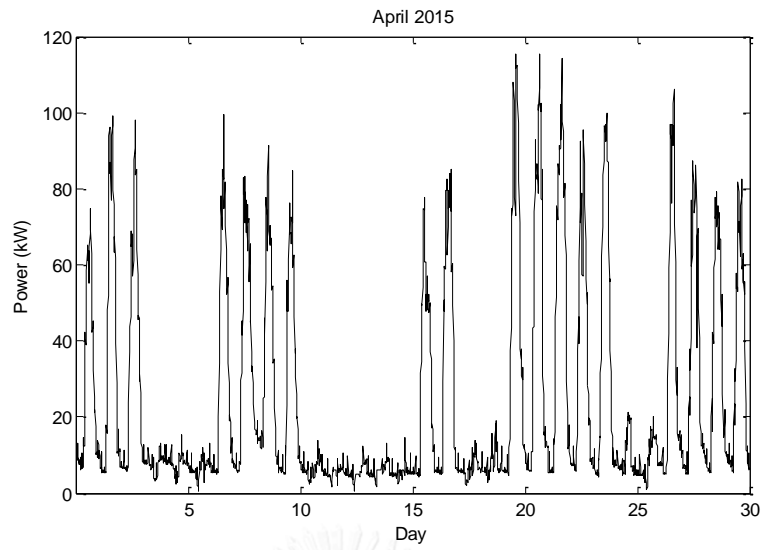
การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบจำเป็นต่อการควบคุมระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบบเตอริเพื่อตัดยอดโหลด สำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าระยะสั้นเป็นการคาดการณ์การใช้ไฟฟ้าในอนาคตตั้งแต่ชั่วโมงถึงสัปดาห์ ทั้งนี้การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในอาคารมีแบบจำลองหลากหลายรูปแบบโดยสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือ 1) แบบจำลองเชิงเส้น (Linear Models) และ 2) แบบจำลองไม่เชิงเส้น (Non-Linear Models)[10] แบบจำลองเชิงเส้นจะอยู่บนพื้นฐานของอนุกรมเวลาเป็นหลัก รายงาน[11] นำเสนอแบบจำลองปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Smoothing) เพื่อพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าระยะสั้นแบบรายวันสำหรับอาคารพร้อมด้วยค่าอุมหภูมิ รายงาน[12] กล่าวถึงการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าระยะสั้นแบบรายชั่วโมงสำหรับอาคารสำนักงานด้วยแบบจำลองการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple Linear Regression; MLR) และรายงาน[13] กล่าวถึงการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองถดถอยอัตโนมัติ (Autoregressive; AR) และแบบจำลองไม่เชิงเส้นอื่นๆ โดยชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองถดถอยอัตโนมัติให้ผลที่ดีกว่า ในอีกด้านหนึ่งแบบจำลองไม่เชิงเส้นจะใช้หลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence; AI) จากรายงาน[14] นำเสนอการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network; ANN) เพื่อพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าทุก 15 นาทีสำหรับอาคารพาณิชย์ โดยให้ผลลัพธ์สามารถระบุลักษณะการใช้ไฟฟ้ายาววันและความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดของวันได้ นอกจากนี้รายงาน[12] ยังกล่าวถึงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multilayer Perceptron; MLP) อีกด้วย

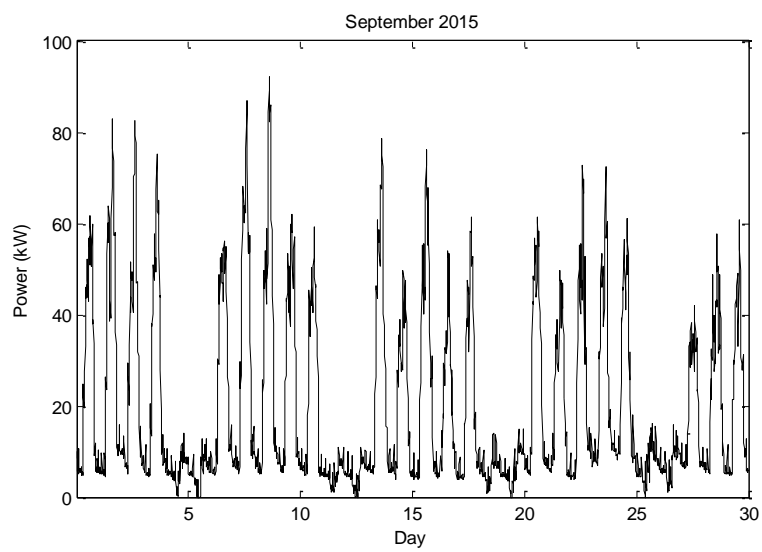
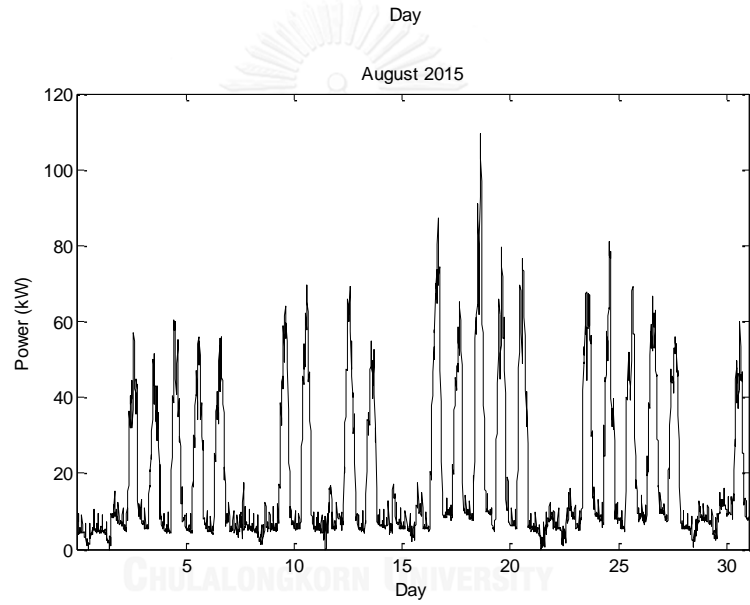
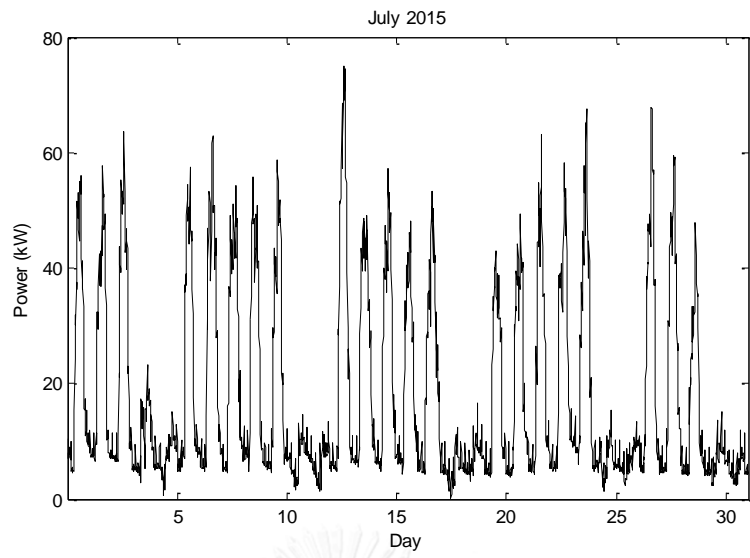
แม้ว่าในปัจจุบันการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าด้วยแบบจำลองไม่เชิงเส้นจะได้รับความสนใจศึกษาและวิจัยกันอย่างแพร่หลาย[12, 14] แต่ในทางปฏิบัติแนวคิดเกี่ยวกับอนุกรมเวลานั้นเป็นที่นิยม[15] เนื่องจากมีระเบียบวิธีอย่างเป็นระบบด้วยการวิเคราะห์จากหลักการพื้นฐานทางสถิติและทฤษฎีความน่าจะเป็น ทำให้สามารถเข้าใจกลไกในการประมาณค่าโหลดและสามารถเลือกอันดับของแบบจำลองพร้อมปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้การใช้แบบจำลองเชิง

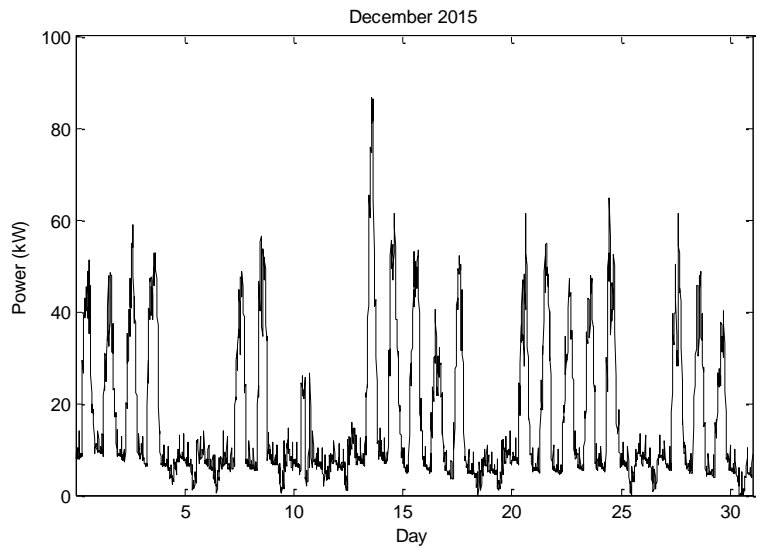
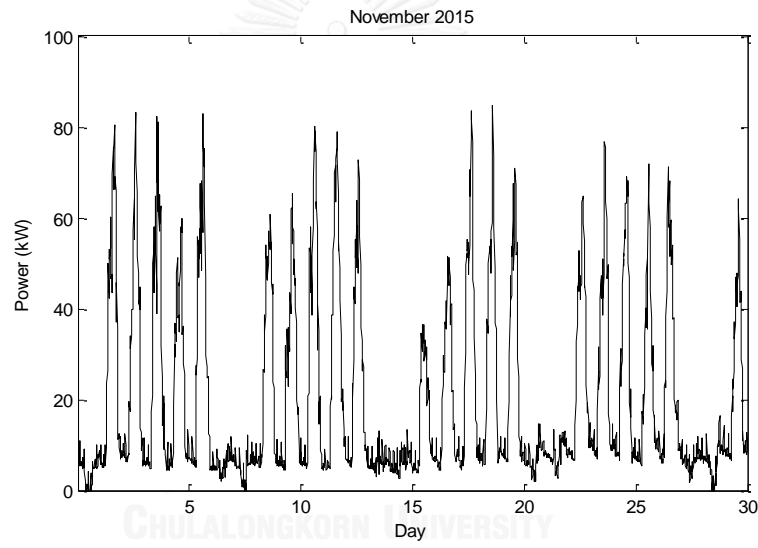
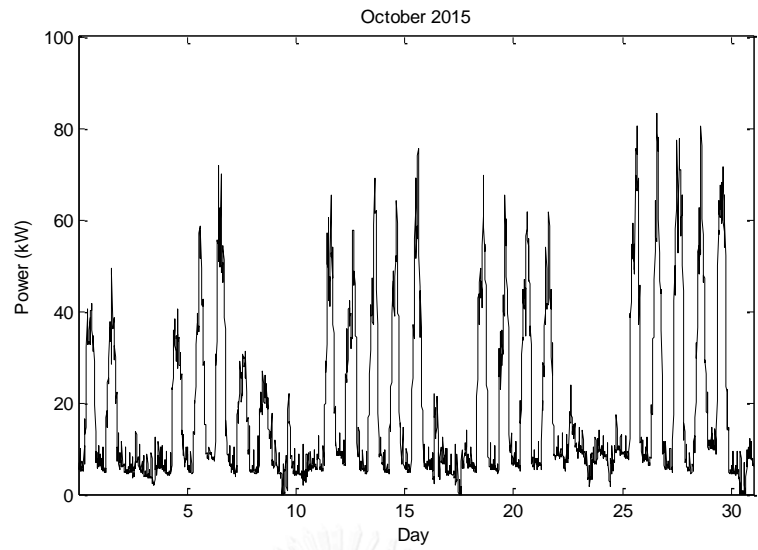
เส้นให้เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ต้องพิจารณาจากคุณสมบัติของข้อมูลโหลดได้แก่ 1) มีลักษณะเป็นคาบแบบรายวัน (Daily Pattern) 2) ข้อมูลในแต่ละช่วงเวลามีความเกี่ยวข้องกัน (Correlated Observation) และ 3) เป็นอนุกรมเวลาไม่คงที่ (Non-Stationary) กล่าวคือค่าเฉลี่ย (Mean) ของอนุกรมเวลาไม่คงที่

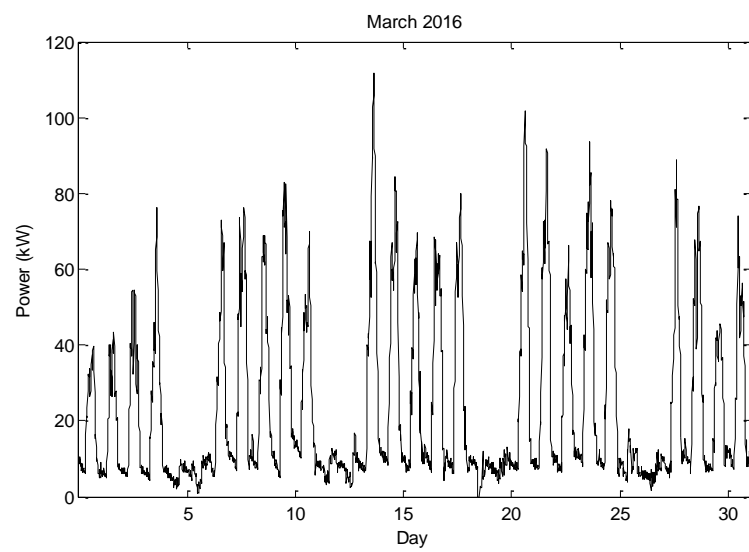
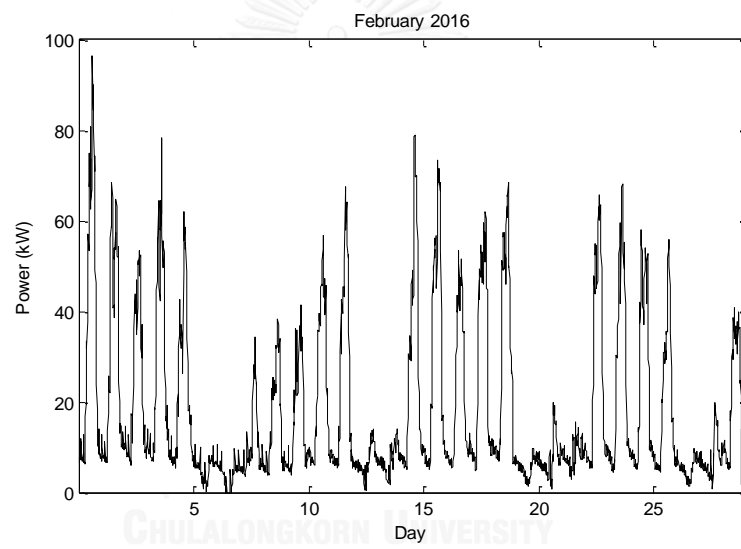
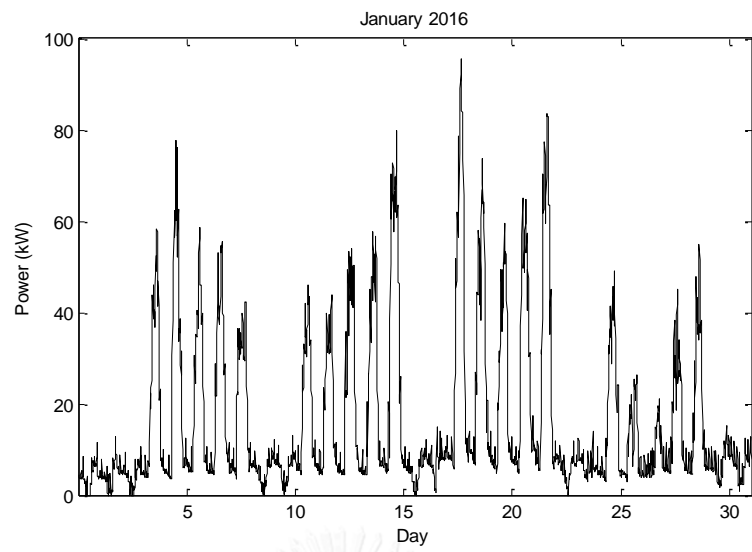
ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ระเบียบวิธีของ Box-Jenkins สำหรับพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าของอาคารบูรود บินทสันต์ ทั้งนี้การพยากรณ์โหลดด้วยระเบียบวิธีนี้มีข้อดีได้แก่ 1) ระเบียบวิธี Box-Jenkins สามารถใช้ได้กับข้อมูลที่มีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นระเบียบวิธีนี้จึงมีความเหมาะสมกว่าแบบจำลองปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น 2) อนุกรมเวลาไม่คงที่สามารถใช้ระเบียบวิธีนี้ได้ด้วยแบบจำลอง ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average Model) และ 3) ระเบียบวิธี Box-Jenkins สามารถใช้พยากรณ์อนุกรมเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบรายคาบได้

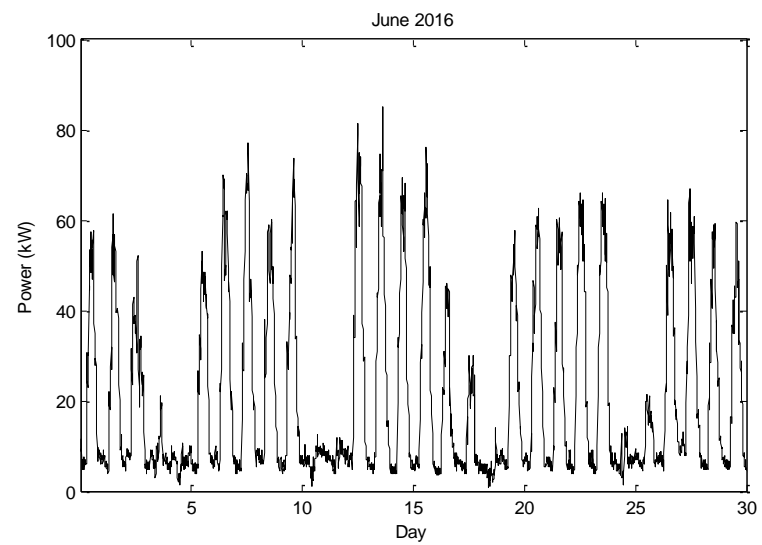
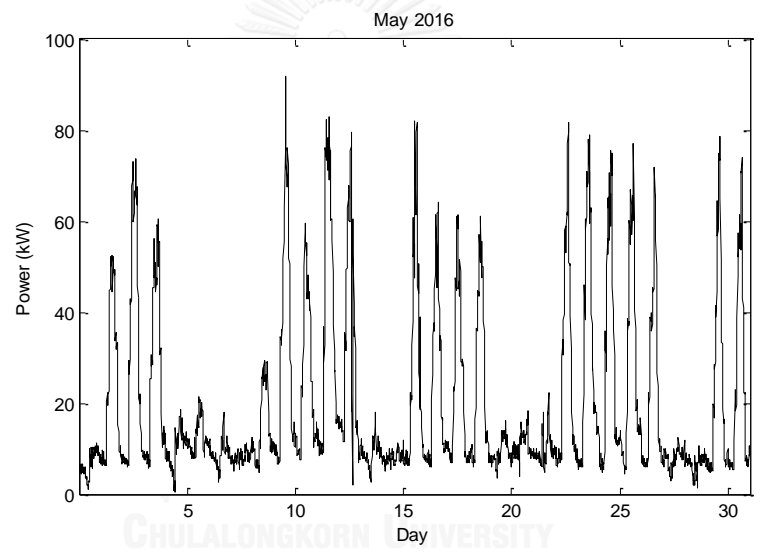
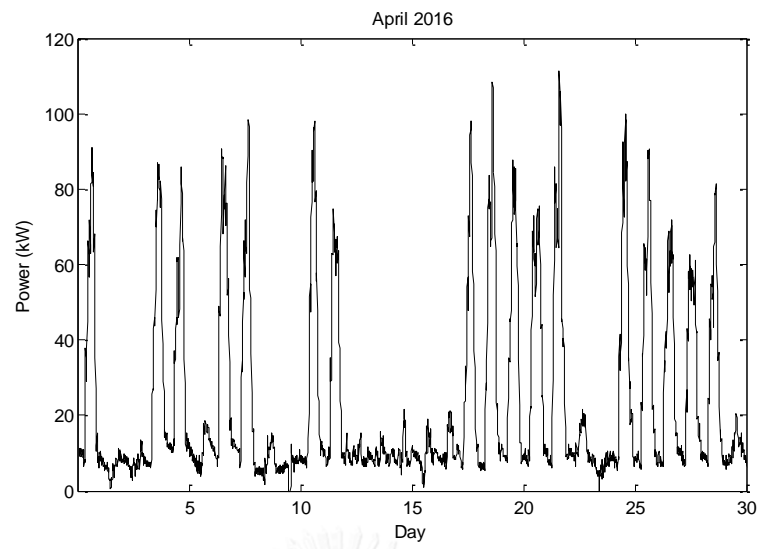
การสร้างแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของข้อมูลโหลดที่เกิดขึ้นในอดีต จากรูปที่ 3.1 แสดงข้อมูลการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 15 นาทีของอาคารบูรود บินทสันต์ ระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2558 – เดือนตุลาคม พ.ศ. 2559 โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาทีจากระบบ CUBEMS จะพบว่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ในช่วงเดือนเมษายนซึ่งสอดคล้องกับความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของประเทศในช่วงฤดูร้อน โดยตารางที่ 3.1 แสดงความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละเดือน รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยรายวันของอาคารบูรود บินทสันต์ ระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2558 – เดือนตุลาคม พ.ศ. 2559 จะพบว่าในวันทำงาน (วันจันทร์ – วันศุกร์) มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงในช่วงเวลา 07.00 น. – 21.00 น. ในขณะที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำกว่า 10 kW ในวันสุดสัปดาห์ (วันเสาร์ – วันอาทิตย์) นอกจากนี้ความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ในช่วงเวลา 10.00 น. – 16.00 น.

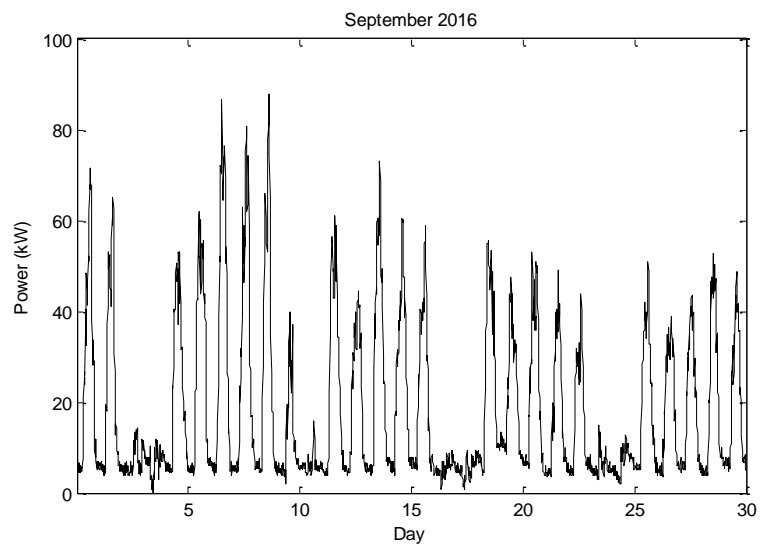
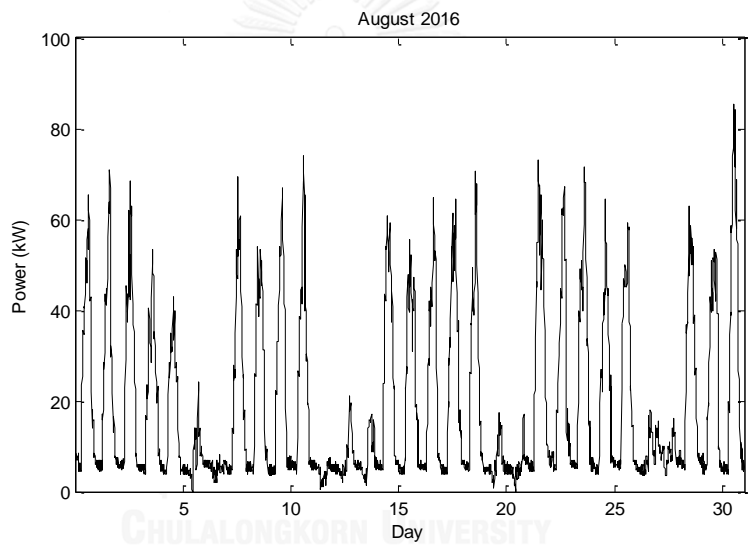
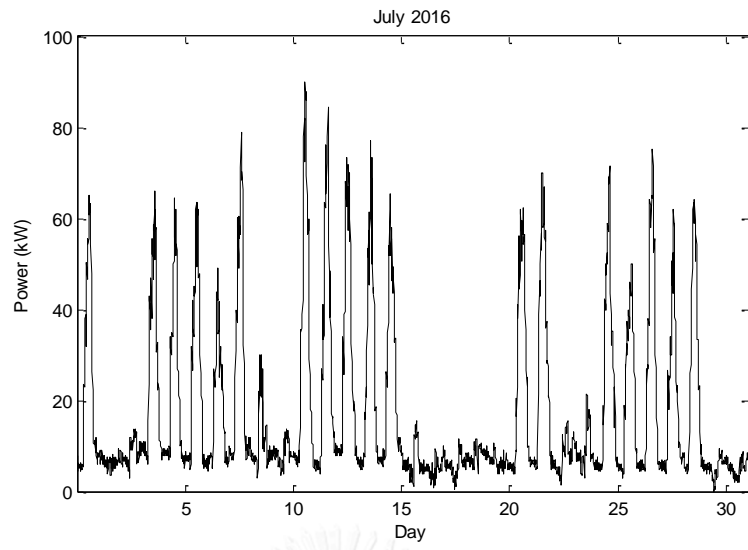


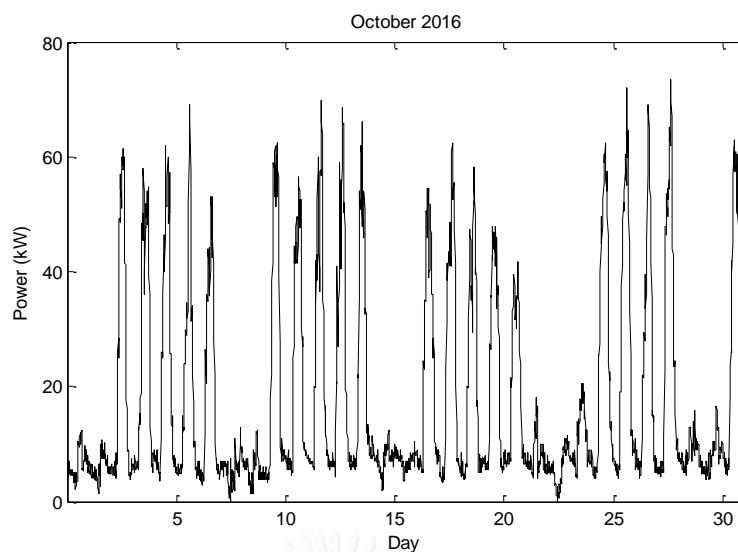








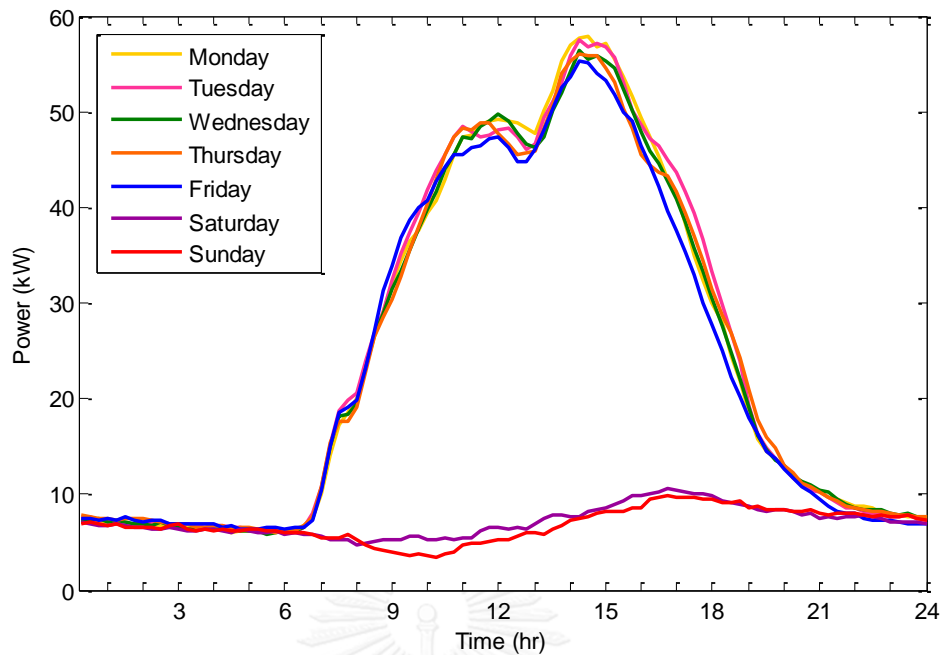




รูปที่ 3.1 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2558 – เดือนตุลาคม พ.ศ. 2559

ตารางที่ 3.1 ความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2558 – เดือนตุลาคม พ.ศ. 2559

เดือน/ปี	ความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)	เดือน/ปี	ความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)
เมษายน 2558	115.54	มกราคม 2559	95.54
พฤษภาคม 2558	91.80	กุมภาพันธ์ 2559	96.37
มิถุนายน 2558	88.20	มีนาคม 2559	111.54
กรกฎาคม 2558	75.03	เมษายน 2559	111.46
สิงหาคม 2558	109.04	พฤษภาคม 2559	91.85
กันยายน 2558	92.21	มิถุนายน 2559	85.04
ตุลาคม 2558	83.29	กรกฎาคม 2559	90.00
พฤศจิกายน 2558	84.62	สิงหาคม 2559	85.50
ธันวาคม 2558	86.52	กันยายน 2559	87.92
		ตุลาคม 2559	73.50



รูปที่ 3.2 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยรายวันของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์

3.1 ระเบียบวิธีของ Box-Jenkins

ระเบียบวิธี Box-Jenkins[16-18] พัฒนาโดย George E.P. Box และ Gwilym M. Jenkins เป็นระเบียบวิธีที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากมีวิธีการวิเคราะห์ห้อย่างเป็นระบบและเหมาะสำหรับการพยากรณ์ระยะสั้น แบบจำลองของระเบียบวิธีนี้จะใช้กับอนุกรมเวลาคงที่ (Stationary Time Series) อย่างไรก็ตามข้อมูลโหลดมีคุณสมบัติเป็นอนุกรมเวลาไม่คงที่ (Non-Stationary Time Series) และยังแปรผันตามฤดูกาล (Seasonal) (ดูรายละเอียดภาคผนวก ข) จึงต้องมีกระบวนการเพิ่มเติมตามระเบียบวิธี Box-Jenkins ดังรายละเอียดต่อไปนี้

กำหนดให้ข้อมูลโหลดเป็นอนุกรมเวลา ($y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, \dots$) ณ เวลา ($t, t-1, t-2, \dots$) เพราะอนุกรมเวลาของโหลด (y_t) เป็นอนุกรมเวลาที่มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นแบบจำลองสามารถกำหนดด้วยสมการของแบบจำลอง ARMA (Autoregressive Moving Average Model) ดังสมการที่ (3.1)

$$y_t = \underbrace{\mu + \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_p y_{t-p}}_{\text{Autoregressive (AR) Model}} + \underbrace{\varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}}_{\text{Moving Average (MA) Model}} \quad (3.1)$$

โดยที่ μ คือ ค่าเฉลี่ยคงที่
 ε_t คือ ค่าความคลาดเคลื่อนปัจจุบัน

- p คือ อันดับของแบบจำลอง AR
 q คือ อันดับของแบบจำลอง MA
 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ คือ ค่าพารามิเตอร์แบบจำลอง AR
 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ คือ ค่าพารามิเตอร์แบบจำลอง MA

เนื่องจากอนุกรมเวลาของโหนดเป็นอนุกรมเวลาไม่คงที่ จึงต้องอาศัยการแปลง (Transformation) ให้อนุกรมเวลาของโหนด (z_t) เป็นอนุกรมเวลาคงที่ ดังแสดงในสมการที่ (3.2)

$$z_t = \underbrace{\nabla_L^D}_{\substack{\text{seasonal} \\ \text{difference} \\ \text{operator}}} \underbrace{\nabla^d}_{\substack{\text{non-seasonal} \\ \text{difference} \\ \text{operator}}} y_t = \underbrace{(1-B^L)^D}_{\substack{\text{seasonal} \\ \text{difference} \\ \text{operator}}} \underbrace{(1-B)^d}_{\substack{\text{non-seasonal} \\ \text{difference} \\ \text{operator}}} y_t \quad (3.2)$$

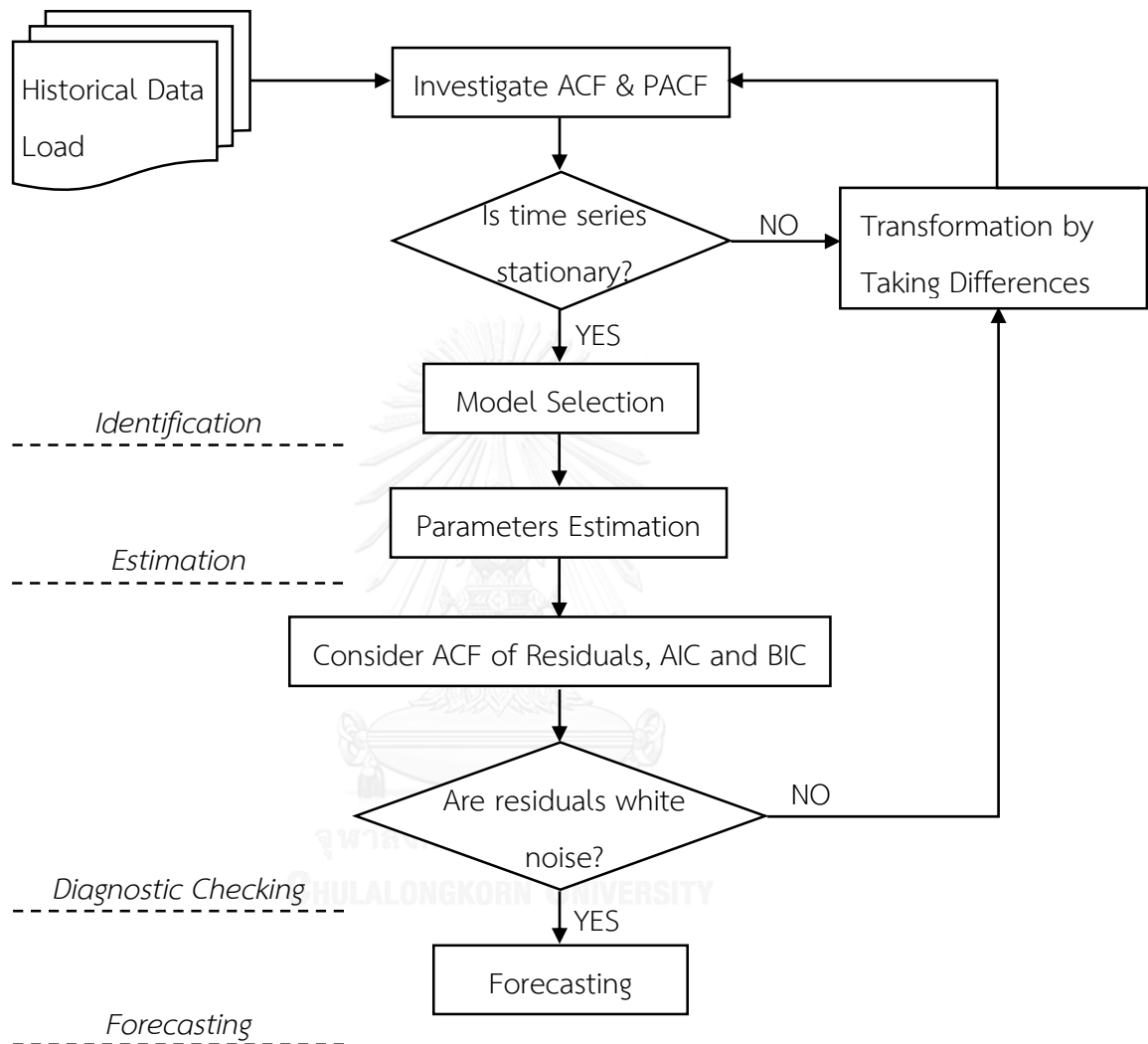
- โดยที่ B คือ ตัวดำเนินการเลื่อนถอยหลัง (Backward Shift Operator)
 ∇ คือ ตัวดำเนินการผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาล (Non-Seasonal Difference Operator)
 d คือ อันดับของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาล
 ∇_L คือ ตัวดำเนินการผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาล (Seasonal Difference Operator)
 D คือ อันดับของผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาล
 L คือ คาบของฤดูกาล

จากคุณสมบัติของอนุกรมเวลาที่แปรผันตามฤดูกาล จึงสร้างแบบจำลองโหนดแบบ SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Model) หรือสามารถเขียนรูปทั่วไปของแบบจำลองได้เป็น ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_L ซึ่งเรียกว่าแบบจำลองแปรผันตามฤดูกาลแบบคูณ (Multiplicative Seasonal Model) ดังสมการที่ (3.3)

$$\underbrace{\phi_p(B)}_{\substack{\text{non-seasonal} \\ \text{AR operator}}} \underbrace{\Phi_P(B^L)}_{\substack{\text{seasonal} \\ \text{AR operator}}} z_t = \underbrace{\theta_q(B)}_{\substack{\text{non-seasonal} \\ \text{MA operator}}} \underbrace{\Theta_Q(B^L)}_{\substack{\text{seasonal} \\ \text{MA operator}}} \varepsilon_t \quad (3.3)$$

- โดยที่ $\phi_p(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$
 $\Phi_P(B^L) = 1 - \Phi_{1L} B^L - \Phi_{2L} B^{2L} - \dots - \Phi_{PL} B^{PL}$
 $\theta_q(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$
 $\Theta_Q(B^L) = 1 - \Theta_{1L} B^L - \Theta_{2L} B^{2L} - \dots - \Theta_{QL} B^{QL}$

ระเบียบวิธี Box-Jenkins ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ 1) การระบุแบบจำลอง (Identification) 2) การประมาณค่าพารามิเตอร์ (Estimation) 3) การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง (Diagnostic Checking) และ 4) การพยากรณ์ (Forecasting) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผังงานระเบียบวิธี Box-Jenkins

3.1.1 การระบุแบบจำลอง

การระบุแบบจำลองของอนุกรมเวลาใดๆต้องตรวจสอบว่าเป็นอนุกรมเวลาคงที่ คือ มีค่าเฉลี่ย (Mean) และความแปรปรวน (Variance) คงที่ตลอดทั้งอนุกรมเวลา โดยพิจารณาจากฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโต (Autocorrelation Function; ACF) เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ค่าสังเกตของอนุกรมเวลาที่ล่าหลัง k หน่วยเวลาดังแสดงในสมการที่ (3.4) พร้อมกับพิจารณาฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบออโตบางส่วน (Partial Autocorrelation Function; PACF) เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ค่าสังเกตของอนุกรมเวลาที่ล่าหลัง k หน่วยเวลาและกำจัดผลของค่าสังเกตระหว่าง 2 ค่านั้นดังแสดงในสมการที่ (3.5)

$$r_k = \frac{\sum_{t=a}^{n-k} (z_t - \bar{z})(z_{t+k} - \bar{z})}{\sum_{t=a}^n (z_t - \bar{z})^2} \quad (3.4)$$

เมื่อ $a = 1, 2, \dots$

โดยที่ r_k คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบออโตอันดับที่ k

\bar{z} คือ ค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลา

$$r_{kk} = \begin{cases} r_1 & \text{if } k = 1 \\ \frac{r_k - \sum_{j=1}^{k-1} r_{k-1,j} r_{k-j}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} r_{k-1,j} r_j} & \text{if } k = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (3.5)$$

เมื่อ $r_{kj} = r_{k-1,j} - r_{kk} r_{k-1,k-j}$ สำหรับ $j = 1, 2, \dots, k-1$

โดยที่ r_{kk} คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบออโตบางส่วนอันดับที่ k

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบออโตและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบออโตบางส่วนจะมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ทั้งนี้แต่ละอันดับแสดงถึงลักษณะสมบัติของอนุกรม อนุกรมเวลาคงที่ที่จะมีสัมประสิทธิ์ค่าสูงในอันดับต้นๆและลดลงเข้าสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็วเมื่ออันดับเพิ่มขึ้น หากสัมประสิทธิ์ค่อยๆลดลงเข้าสู่ศูนย์อย่างช้าๆ เมื่ออันดับเพิ่มขึ้นแสดงว่าอนุกรมเวลานี้ไม่คงที่ การแปลงอนุกรมเวลาไม่คงที่ให้เป็นอนุกรมเวลาคงที่ทำได้โดยการหาผลต่าง (Differences) ซึ่งอธิบายในสมการที่ (3.2) นอกจากการหาผลต่างแล้วยังสามารถใช้การหาลอการิทึม (Logarithm) ของอนุกรมดังแสดงในสมการที่ (3.6)

$$z_t = \ln y_t \quad (3.6)$$

การระบุแบบจำลองที่เหมาะสมพิจารณาจากลักษณะ ACF และ PACF ของอนุกรมเวลาคงที่ เพื่อกำหนดอันดับของแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การพิจารณาแบบจำลองของอนุกรมเวลาคงที่จากลักษณะของ ACF และ PACF

แบบจำลอง	ACF	PACF
MA(q)	ลดลงเข้าใกล้ศูนย์หลังอันดับ q (Cuts off after lag q)	ลดลงเข้าสู่ศูนย์อย่างรวดเร็ว
AR(p)	ลดลงเข้าสู่ศูนย์อย่างรวดเร็ว	ลดลงเข้าใกล้ศูนย์หลังอันดับ p (Cuts off after lag p)
ARMA(p, q)	ลดลงเข้าสู่ศูนย์อย่างรวดเร็ว	ลดลงเข้าสู่ศูนย์อย่างรวดเร็ว

3.1.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์

การประมาณค่าพารามิเตอร์ (ประกอบด้วย ϕ_p , Φ_p , θ_q , Θ_q) จากแบบจำลองอนุกรมเวลาในขั้นตอนที่ 1 ด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม MATLAB โดยอาศัยการคำนวณซ้ำจนได้ค่าที่เหมาะสม เพื่อดำเนินการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองในขั้นตอนต่อไป

3.1.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

หลังจากระบุแบบจำลองและหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองได้แล้ว ก่อนที่จะนำแบบจำลองไปใช้ต้องตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองก่อน หากแบบจำลองไม่เหมาะสมต้องปรับปรุงแบบจำลองใหม่ ซึ่งการตรวจสอบความเหมาะสมมีหลากหลายวิธีดังนี้

3.1.3.1 ฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบอัตโนมัติของส่วนตกค้าง (Residuals) ถ้าค่า ACF ของส่วนตกค้างเข้าใกล้ศูนย์ในทุกๆอันดับ แสดงว่าส่วนตกค้างเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสม

3.1.3.2 เกณฑ์สารสนเทศของ Akaike (AIC) และเกณฑ์สารสนเทศของ Bayesian (BIC) เป็นเกณฑ์สำหรับการเลือกแบบจำลองที่ประมาณค่าด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุด ดังแสดงในสมการที่ (3.7) และ (3.8) เกณฑ์การเลือกแบบจำลองจะพิจารณาจากค่า AIC และ BIC ที่ต่ำสุด หากค่า AIC และ BIC ให้ผลการเลือกแบบจำลองแตกต่างกันจะพิจารณาจากค่า BIC เพราะค่า BIC จะไม่มีความไวต่อจำนวนพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีของ AIC

$$AIC = -2\ln(L) + 2r \quad (3.7)$$

$$BIC = -2\ln(L) + r\ln(n) \quad (3.8)$$

โดยที่ L คือ ค่าควรจะเป็นสูงสุดของแบบจำลอง
 r คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่ประมาณค่าในแบบจำลอง
 n คือ จำนวนข้อมูล

3.1.4 การพยากรณ์

ขั้นตอนนี้คือการพยากรณ์ค่าในอนาคตโดยอาศัยแบบจำลองที่ตรวจสอบแล้วว่ามีความเหมาะสมที่สุด การพยากรณ์สามารถพยากรณ์ได้ทั้งแบบจุดหรือแบบช่วงเวลา ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การพยากรณ์แบบช่วงเวลา สมการเชิงผลต่าง (Difference Equation) ดังแสดงในสมการที่ (3.9) กล่าวคือการพยากรณ์จะทำที่จุดกำเนิด (Origin) ณ เวลา t สำหรับพยากรณ์ไปข้างหน้าเป็นเวลา l วิธีการนี้สามารถปรับการพยากรณ์ให้เป็นปัจจุบันได้โดยการเปลี่ยนจุดกำเนิดการพยากรณ์เมื่อมีข้อมูลใหม่ ทำให้การพยากรณ์มีโอกาสใกล้เคียงค่าจริงมากขึ้น ดังนั้นจึงควรปรับใช้ค่าให้เป็นปัจจุบันสำหรับการพยากรณ์ในช่วงเวลาที่ถัดไปดังแสดงในรูปที่ 3.4

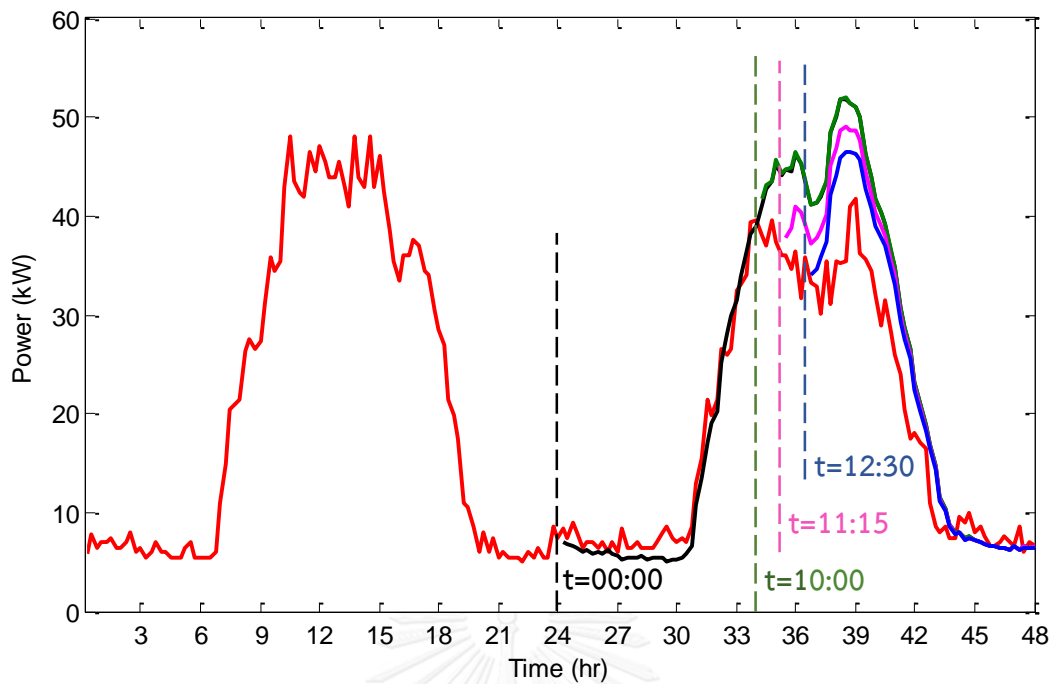
$$z_{t+l} = \varphi_1 z_{t+l-1} + \dots + \varphi_{p+P+d+D} z_{t+l-p-P-d-D} - \vartheta_1 \varepsilon_{t+l-1} - \dots - \vartheta_{q-Q} \varepsilon_{t+l-q-Q} + \varepsilon_{t+l} \quad (3.9)$$

$$\text{โดยที่ } \varphi(B) = \underbrace{\phi_p(B)}_{\text{non-seasonal AR operator}} \underbrace{\Phi_P(B^L)}_{\text{seasonal AR operator}} \underbrace{\nabla_L^D}_{\text{seasonal difference operator}} \underbrace{\nabla^d}_{\text{non-seasonal difference operator}}$$

$$\vartheta(B) = \underbrace{\theta_q(B)}_{\text{non-seasonal MA operator}} \underbrace{\Theta_Q(B^L)}_{\text{seasonal MA operator}}$$

t คือ เวลา ณ ปัจจุบัน

l คือ เวลาไปข้างหน้าในอนาคต ($l = 15$ นาที, 30 นาที,...)



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการพยากรณ์แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์ ณ เวลา t ต่างๆ

3.2 ตัวอย่างการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า

ในตัวอย่างนี้จะนำเสนอการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ตั้งแต่วันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 โดยเลือกเฉพาะวันทำงาน (วันจันทร์ – วันศุกร์) ทั้งนี้อาศัยข้อมูลโหลดย้อนหลังตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2558 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เฉพาะวันทำงาน (วันจันทร์ – วันศุกร์) เช่นเดียวกัน โดยจะนำเสนอการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีการใช้ข้อมูลย้อนหลังที่แตกต่างกันแยกออกเป็น 6 กรณีดังแสดงในตารางที่ 3.3 ทั้งนี้ผู้เขียนจะแสดงลำดับขั้นตอนการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอ้างอิงจากแผนผังระเบียบวิธี Box-Jenkins ดังในรูปที่ 3.3 เฉพาะกรณีที่ 1 สำหรับกรณีอื่นๆสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ค

ตารางที่ 3.3 การใช้ข้อมูลย้อนหลังสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า

กรณี	ชนิดข้อมูลย้อนหลัง	ปริมาณข้อมูลย้อนหลัง
1	วันจันทร์ – วันศุกร์ (รวม)	8 สิงหาคม พ.ศ. 2559 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559
2	วันจันทร์ – วันศุกร์ (แยก)	8 สิงหาคม พ.ศ. 2559 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559
3	วันจันทร์ – วันศุกร์ (รวม)	16 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559
4	วันจันทร์ – วันศุกร์ (แยก)	16 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559
5	วันจันทร์ – วันศุกร์ (รวม)	1 เมษายน พ.ศ. 2558 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559
6	วันจันทร์ – วันศุกร์ (แยก)	1 เมษายน พ.ศ. 2558 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559

หมายเหตุ: “รวม” หมายถึง การใช้ข้อมูลรวมวันจันทร์ – วันศุกร์ และ “แยก” หมายถึง การใช้ข้อมูลแบบแยกเป็นวัน

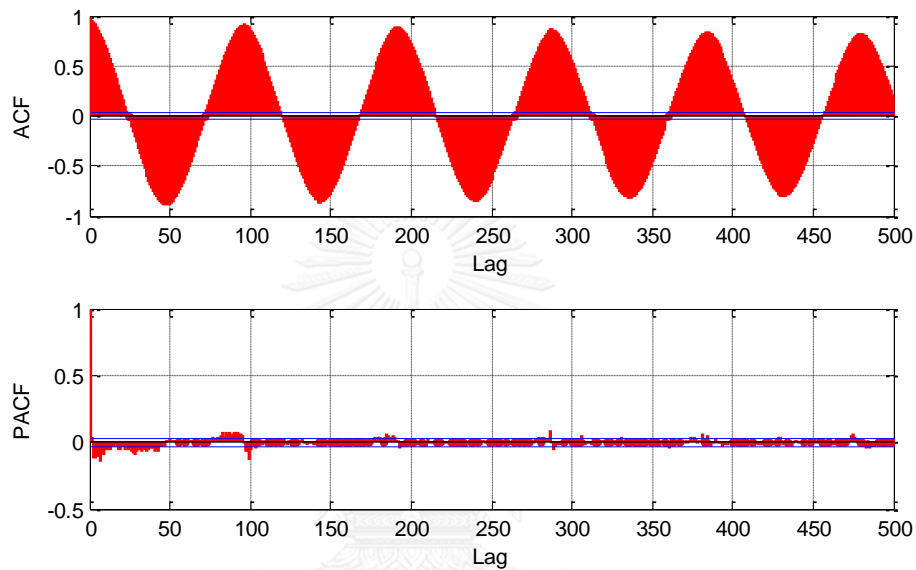
3.2.1 การระบุแบบจำลอง

จากกรณีที่ 1 การตรวจสอบข้อมูลการใช้ไฟฟ้า (y_t) ว่าเป็นอนุกรมเวลาคงที่หรือไม่จะพิจารณาจากฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบอัตโนมัติ (Autocorrelation Function, ACF) และฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบอัตโนมัติบางส่วน (Partial Autocorrelation Function, PACF) และเงื่อนไขในตารางที่ 3.2 จากรูปที่ 3.5 พบว่าข้อมูลการใช้ไฟฟ้าเป็นอนุกรมเวลาไม่คงที่เพราะ ACF ค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ ในลักษณะแกว่ง (Oscillation)

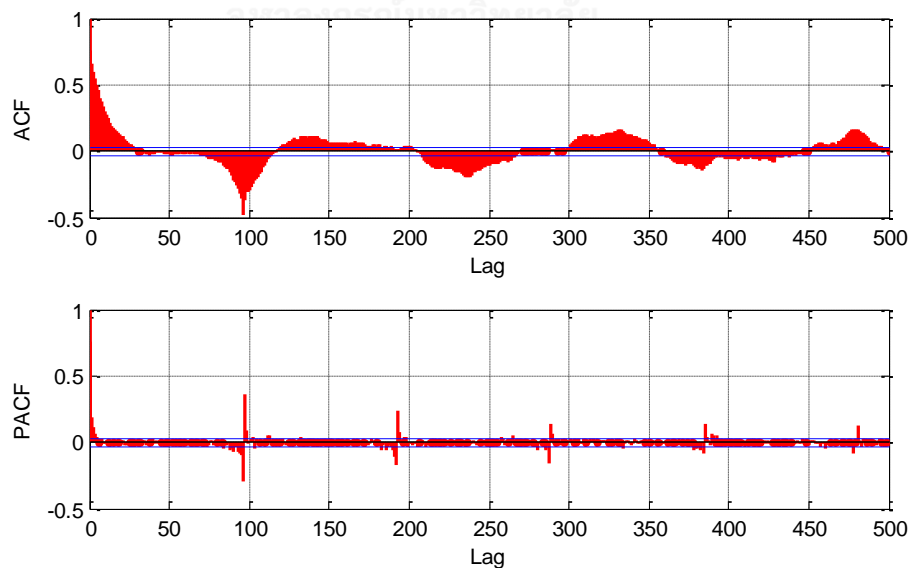
จากข้างต้นข้อมูลการใช้ไฟฟ้าเป็นอนุกรมเวลาไม่คงที่ ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากลักษณะของข้อมูลการใช้ไฟฟ้าที่มีการแปรผันแบบรายวัน และอาจรวมถึงลักษณะของข้อมูลเองในส่วนที่ไม่แปรผันตามฤดูกาล (Non-Seasonal) ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาหาผลต่างทั้งแบบที่แปรผันตามฤดูกาลและแบบที่ไม่แปรผันตามฤดูกาล โดยในเบื้องต้นเราจะหาเฉพาะผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลจากสมการที่ (3.2) รูปที่ 3.6 แสดงถึงผลการแปลงอนุกรมเวลาไม่คงที่ (y_t) เป็นอนุกรมเวลาคงที่ (z_t) ด้วยผลต่างอันดับที่ 1 ($D=1$) และด้วยคาบเวลา $L=96$ (เนื่องจากข้อมูลการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 15 นาที มีจำนวน 96 ข้อมูลต่อวัน) จากรูปที่ 3.6 พบว่าหากพิจารณาจากจำนวนเท่าของคาบเวลาของฤดูกาลแล้ว ACF มีค่าลดลงเข้าสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว โดยอันดับที่ 192 ($2L$), 288 ($3L$), 384 ($4L$), 480 ($5L$),... มีค่าน้อยมากจนถือได้ว่าไม่มีนัยสำคัญ จึงกล่าวได้ว่าผลต่างอันดับ 1 แบบแปรผันตามฤดูกาล ($D=1$) เพียงพอสำหรับแบบจำลอง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า ACF ในช่วงที่น้อยกว่าอันดับที่ 96 ($1L$) จะเห็นได้จากรูปที่ 3.6 ว่าค่า ACF ค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ ผลดังกล่าวสะท้อนถึงความไม่คงที่ของอนุกรมจากข้อมูลในส่วนที่ไม่แปรผันตามฤดูกาล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลเพิ่มเติมด้วย สมการที่ (3.10) แสดงถึงอนุกรมเวลาที่ได้จากการหาผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($D=1$) และผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับที่ 1 ($d=1$)

$$z_t = \nabla_{96}^1 \nabla^1 y_t = (1-B^{96})^1 (1-B)^1 y_t \quad (3.10)$$

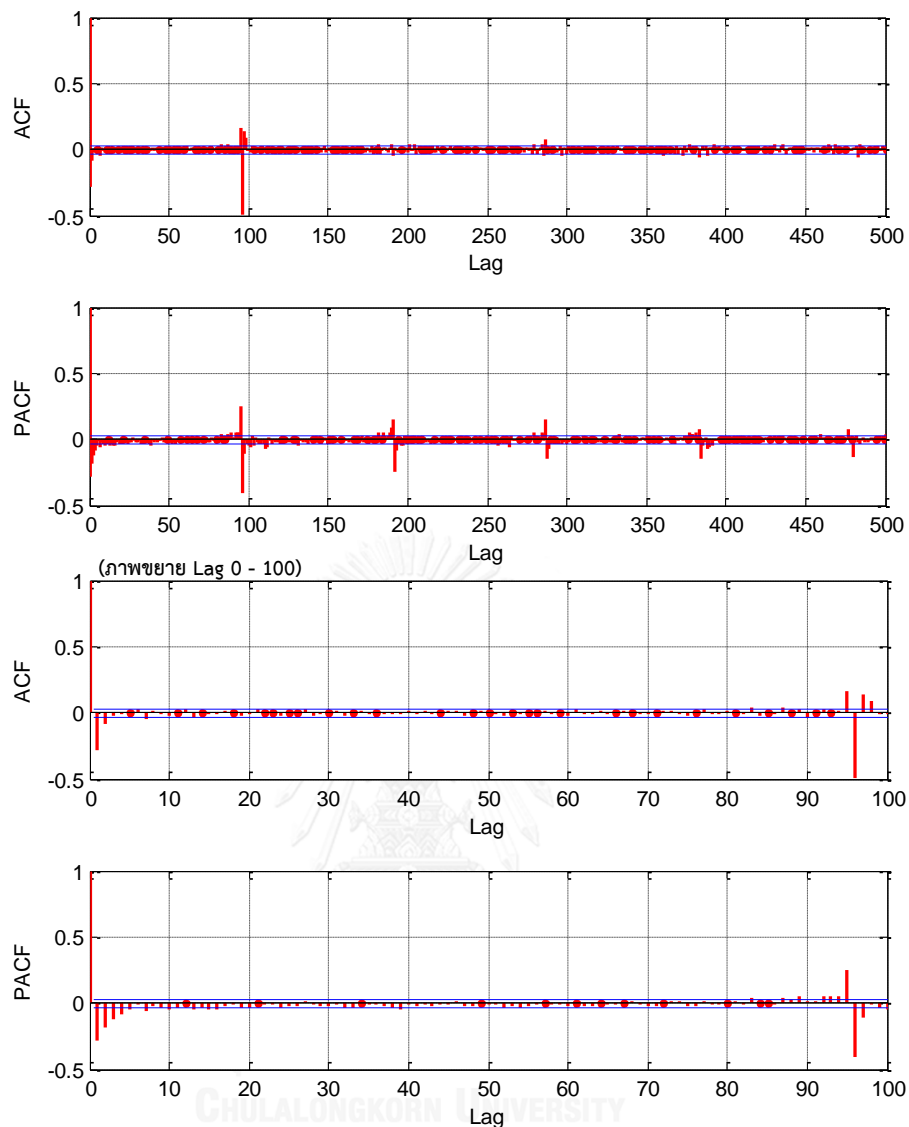
จากรูปที่ 3.7 พบว่า ACF ลดลงเข้าสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว ในช่วงไม่เกินอันดับที่ 96 ($1L$) ซึ่งสรุปได้ว่าการแปลงข้อมูลอนุกรมเวลาด้วยผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 และผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 สามารถทำให้ได้อนุกรมเวลาใหม่ (z_t) ในสมการ (3.10) เป็นอนุกรมเวลาคงที่ได้



รูปที่ 3.5 ACF และ PACF ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที่ 1)



รูปที่ 3.6 ACF และ PACF ของผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (ผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที่ 1)



รูปที่ 3.7 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที่ 1)

จากรูปที่ 3.7 ในการระบุอันดับของแบบจำลองในสมการที่ (3.3) จะพิจารณาจากตารางที่ 3.2 กล่าวคือ ส่วนที่แปรผันตามฤดูกาล ACF มีค่าที่เป็นนัยสำคัญที่อันดับที่ 96 ($1L$) และ PACF ลดลงเข้าสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็วในลักษณะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่อันดับที่ 96 ($1L$), 192 ($2L$), 288 ($3L$), 384 ($4L$) และ 480 ($5L$) จากลักษณะดังกล่าวนี้สามารถระบุได้เป็นแบบจำลอง MA อันดับ 1 ($Q=1$) สำหรับในส่วนที่ไม่แปรผันตามฤดูกาล ACF มีค่าที่เป็นนัยสำคัญที่อันดับที่ 1 และ PACF ลดลงเข้าสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว จากลักษณะดังกล่าวนี้สามารถระบุได้เป็นแบบจำลอง MA อันดับ 1 ($q=1$) แม้ว่าการกำหนดอันดับของแบบจำลองจากลักษณะ ACF และ PACF จะมีเฉพาะ

แบบจำลอง MA เท่านั้น แต่ทั้งนี้แบบจำลองอาจจะมีผลของแบบจำลอง AR ร่วมด้วยจึงกำหนดแบบจำลองสำหรับพิจารณาดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แบบจำลองสำหรับกรณีที่ 1

แบบจำลอง	รูปแบบ	แบบจำลอง	รูปแบบ
1	ARIMA (0, 1, 1) × (0, 1, 1) ₉₆	8	ARIMA (0, 1, 1) × (1, 1, 1) ₉₆
2	ARIMA (1, 1, 1) × (0, 1, 1) ₉₆	9	ARIMA (1, 1, 1) × (1, 1, 1) ₉₆
3	ARIMA (2, 1, 1) × (0, 1, 1) ₉₆	10	ARIMA (2, 1, 1) × (1, 1, 1) ₉₆
4	ARIMA (3, 1, 1) × (0, 1, 1) ₉₆	11	ARIMA (3, 1, 1) × (1, 1, 1) ₉₆
5	ARIMA (4, 1, 1) × (0, 1, 1) ₉₆	12	ARIMA (4, 1, 1) × (1, 1, 1) ₉₆
6	ARIMA (5, 1, 1) × (0, 1, 1) ₉₆	13	ARIMA (5, 1, 1) × (1, 1, 1) ₉₆
7	ARIMA (0, 1, 2) × (0, 1, 1) ₉₆	14	ARIMA (0, 1, 2) × (1, 1, 1) ₉₆

3.2.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์และการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

จากตารางที่ 3.4 เราสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุด โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB พร้อมกับพิจารณาค่า AIC และ BIC สำหรับตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง ตารางที่ 3.5 แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองต่างๆ

ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบแบบจำลองที่ 1 – 14 สำหรับกรณีที่ 1

แบบจำลอง \ พารามิเตอร์	1	2	3	4	5
ϕ_1 (AR(1))	-	0.429553	0.611608	0.620655	0.623872
ϕ_2 (AR(2))	-	-	0.137741	0.102123	0.0938771
ϕ_3 (AR(3))	-	-	-	0.066725	0.0326551
ϕ_4 (AR(4))	-	-	-	-	0.0616971
ϕ_5 (AR(5))	-	-	-	-	-
θ_1 (MA(1))	-0.389174	-0.769195	-0.956656	-0.970812	-0.976724
θ_2 (MA(2))	-	-	-	-	-
Θ_1 (SMA(96))	-0.842583	-0.838098	-0.832259	-0.830044	-0.830829
AIC	-3548.56	-3643.38	-3667.45	-3682.81	-3695.82
BIC	-3523.17	-3611.64	-3629.36	-3638.37	-3645.03

แบบจำลอง พารามิเตอร์	6	7	8	9	10
ϕ_1 (AR(1))	0.622429	-	-	0.447759	0.635959
ϕ_2 (AR(2))	0.0926807	-	-	-	0.145027
ϕ_3 (AR(3))	0.029913	-	-	-	-
ϕ_4 (AR(4))	0.0485391	-	-	-	-
ϕ_5 (AR(5))	0.0216934	-	-	-	-
θ_1 (MA(1))	-0.975798	-0.36275	-0.386701	-0.783546	-0.976631
θ_2 (MA(2))	-	-0.127691	-	-	-
Φ_1 (SAR(96))	-	-	-0.0864396	-0.0935036	-0.12425
Θ_1 (SMA(96))	-0.830521	-0.839494	-0.827877	-0.820836	-0.809262
AIC	-3695.82	-3610.46	-3571.46	-3670.03	-3711.53
BIC	-3638.68	-3578.72	-3539.71	-3631.94	-3667.10

แบบจำลอง พารามิเตอร์	11	12	13	14
ϕ_1 (AR(1))	0.63084	0.632626	0.631207	-
ϕ_2 (AR(2))	0.10645	0.0977354	0.0964054	-
ϕ_3 (AR(3))	0.0618731	0.0275037	0.0241903	-
ϕ_4 (AR(4))	-	0.0598385	0.0449112	-
ϕ_5 (AR(5))	-	-	0.0242737	-
θ_1 (MA(1))	-0.979112	-0.982911	-0.981968	-0.362128
θ_2 (MA(2))	-	-	-	-0.127549
Φ_1 (SAR(96))	-0.122483	-0.121419	-0.122559	-0.0859576
Θ_1 (SMA(96))	-0.807866	-0.80902	-0.808341	-0.824226
AIC	-3725.31	-3737.65	-3738.18	-3632.85
BIC	-3674.53	-3680.51	-3674.70	-3594.75

การหาความเหมาะสมของแบบจำลองจากตารางที่ 3.5 สามารถพิจารณาจากค่า AIC และ BIC แม้ว่าแบบจำลองที่ 13 มีค่า AIC ต่ำสุด แต่แบบจำลองที่ 12 มีค่า BIC ต่ำสุด ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลองที่ 12 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากฟังก์ชันสหสัมพันธ์แบบอัตโนมัติของส่วนตกค้าง (Residuals) ของแบบจำลองที่ 12 ในรูปที่ 3.8 พบว่าค่า ACF ของส่วนตกค้างเข้าใกล้ศูนย์ตลอดทุกอันดับ และส่วนตกค้างเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ดังนั้นแบบจำลอง $ARIMA(4, 1, 1) \times (1, 1, 1)_{96}$ จึงความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบูรณรอด บินทสันต์ จากสมการที่ (3.3) สามารถเขียนแบบจำลองได้ดังแสดงในสมการที่ (3.11)

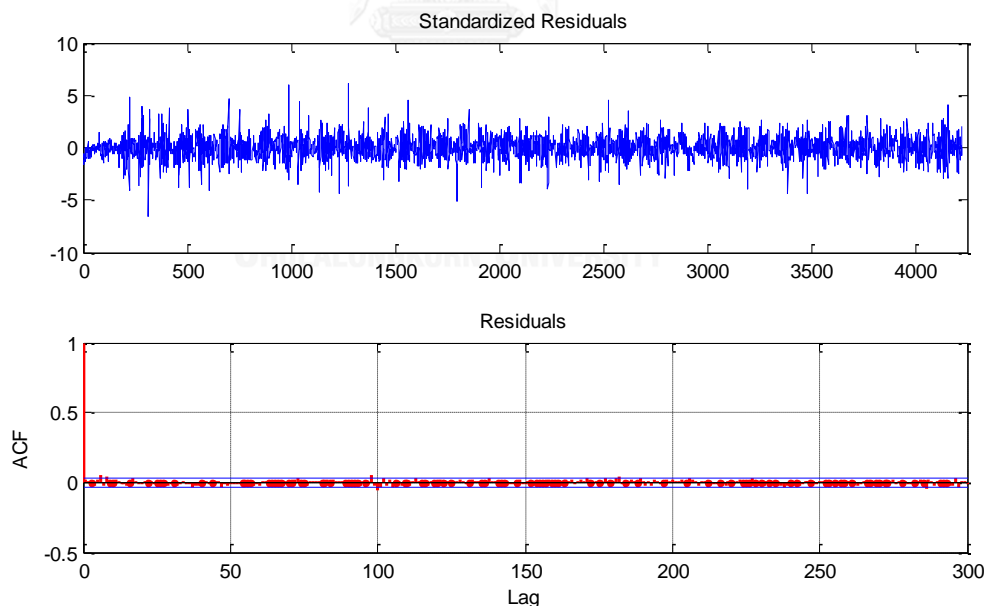
$$\begin{aligned} & (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3 - \phi_4 B^4)(1 - \Phi_1 B^{96})(1 - B^{96})(1 - B)y_t \\ & = (1 - \theta_1 B)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t \end{aligned} \quad (3.11)$$

โดยที่ $\phi_1 = 0.632626$ $\theta_1 = -0.982911$ $\Phi_1 = -0.121419$ $\Theta_1 = -0.80902$

$$\phi_2 = 0.0977354$$

$$\phi_3 = 0.0275037$$

$$\phi_4 = 0.0598385$$



รูปที่ 3.8 ACF ของส่วนตกค้าง (Residuals) ด้วยของแบบจำลอง $ARIMA(4, 1, 1) \times (1, 1, 1)_{96}$

3.2.3 การพยากรณ์

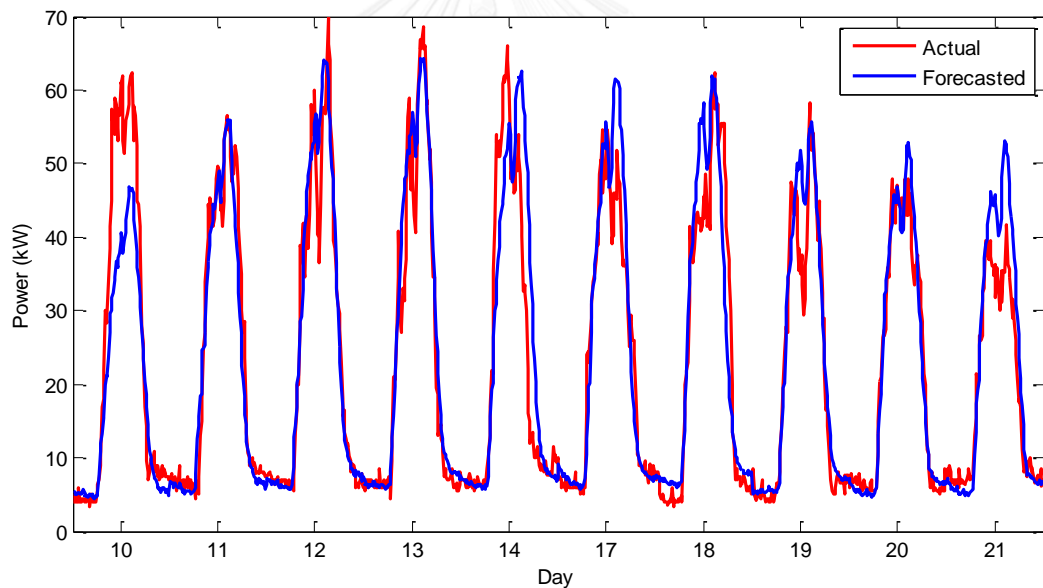
จากการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง ARIMA(4, 1, 1)×(1, 1, 1)₉₆ ที่ได้ในขั้นตอนก่อนหน้านี้ สำหรับในขั้นตอนนี้จะนำเสนอการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เฉพาะในวันทำงานจำนวน 10 วัน ด้วยค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในสมการที่ (3.11) ความแม่นยำของการพยากรณ์จะคำนวณได้จากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error; MAPE) ดังสมการที่ (3.12)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{y_t} \times 100 \quad (3.12)$$

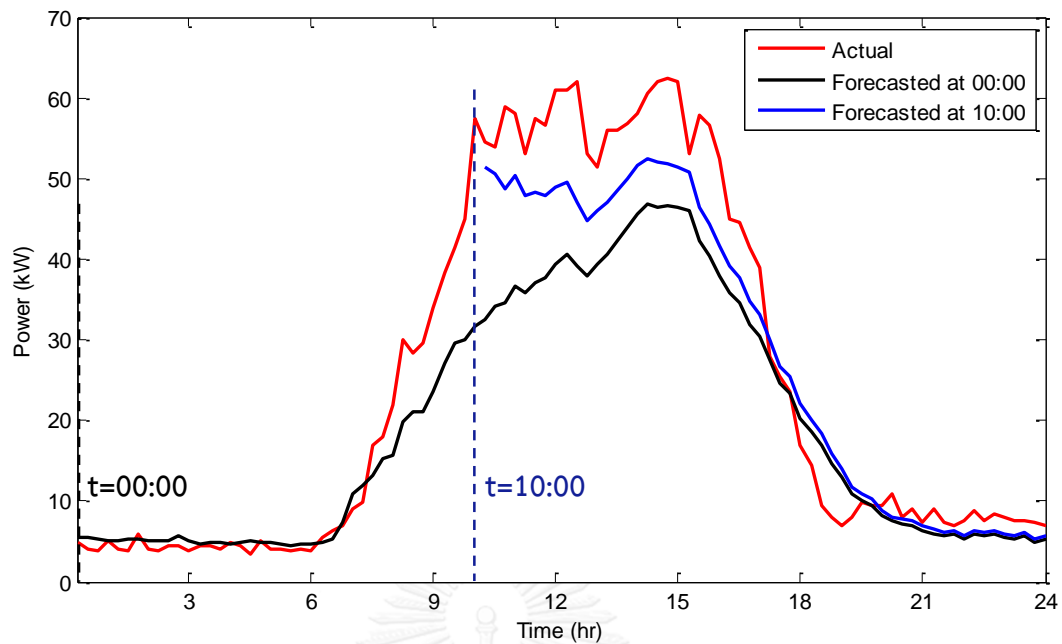
โดยที่ y_t คือ ค่าโหลดจริง ณ เวลา t

\hat{y}_t คือ ค่าโหลดพยากรณ์ ณ เวลา t

n คือ จำนวนข้อมูลโหลดพยากรณ์



รูปที่ 3.9 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 จำนวน 10 วัน ด้วยแบบจำลอง ARIMA(4, 1, 1)×(1, 1, 1)₉₆



รูปที่ 3.10 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ในวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ด้วยแบบจำลอง ARIMA $(4, 1, 1) \times (1, 1, 1)_{96}$ แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์

ตารางที่ 3.6 ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ด้วยแบบจำลอง ARIMA $(4, 1, 1) \times (1, 1, 1)_{96}$

วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์		วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์	
		ณ เวลา	ณ เวลา			ณ เวลา	ณ เวลา
		00:00 น.	10:00 น.			00:00 น.	10:00 น.
10	14:45	14:15	14:15	17	12:15	14:15	14:15
11	14:15	14:15	14:15	18	14:45	14:15	14:15
12	15:15	14:15	14:45	19	14:15	14:45	14:45
13	14:45	14:15	15:00	20	13:45,14:30	14:45	14:45
14	11:30	15:00	15:00	21	15:00	14:15	14:15

ผลการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในวันทำงานจำนวน 10 วันดังแสดงในรูปที่ 3.9 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) เท่ากับ 20.08% แม้ว่าจะมีค่าค่อนข้างมากแต่หากพิจารณาถึงการปรับการพยากรณ์ให้เป็นปัจจุบัน โดยการเปลี่ยนจุดกำเนิดการพยากรณ์เมื่อมีข้อมูลใหม่ จากรูปที่ 3.10 แสดงผลการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าระหว่างวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เมื่อเปลี่ยนจุดกำเนิดการพยากรณ์จากเดิม ณ เวลา 00:00 น. เป็นเวลา 10:00 น. จะพบว่าค่าโหลดที่พยากรณ์ใหม่จะช่วยให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเฉพาะช่วงเวลา 10:00 น. – 24:00 น. จากเดิมมีค่า 27.80% ลดลงเหลือเพียง 21.14% ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงความแม่นยำของตำแหน่งเวลาความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ การเปลี่ยนจุดกำเนิดการพยากรณ์ใหม่ช่วยให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 3.6

3.2.5 เปรียบเทียบการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในกรณีต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในกรณีต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 6 กรณีดังตารางที่ 3.3 ในกรณีที่ 1 และ 2 แสดงถึงการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลในช่วงการเปิดภาคการศึกษา (ภาคการศึกษาต้น) ส่วนกรณีที่ 3 และ 4 แสดงถึงการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลในช่วงฤดูฝน และในลำดับสุดท้ายกรณีที่ 5 และ 6 แสดงถึงการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลในอดีตทั้งหมด ทั้งนี้ยังแยกพิจารณาเป็นแบบใช้ข้อมูลทุกวัน (วันจันทร์ – วันศุกร์) และแยกเฉพาะวันอีกด้วย ตารางที่ 3.7 - ตารางที่ 3.9 แสดงแบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้ง 6 กรณี และรูปที่ 3.11 – รูปที่ 3.16 เป็นผลการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้ง 6 กรณี

ตารางที่ 3.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้ง 6 กรณี เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยของการพยากรณ์ ณ จุดกำเนิดที่เวลา 00:00 น. จะพบว่ากรณีที่ 3 มีค่าต่ำสุดคือ 19.156% หากเปลี่ยนจุดกำเนิดการพยากรณ์ใหม่เป็นเวลา 10:00 น. จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย เฉพาะช่วงเวลา 10:00 น. ถึง 17:00 น. (ช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการพยากรณ์ ณ จุดกำเนิดที่เวลา 00:00 น. นอกจากนี้จะพบว่าปริมาณข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลองมีผลต่อความแม่นยำในการพยากรณ์ด้วย จากตารางที่ 3.10 จะพบว่ากรณีที่ 2 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยสูงสุด โดยตารางที่ 3.11 – ตารางที่ 3.16 แสดงถึงตำแหน่งเวลาที่มีความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ทั้ง 6 กรณี

จากการเปรียบเทียบการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้ง 6 กรณี สาเหตุที่แบบจำลองในกรณีที่ 3 มีความแม่นยำกว่ากรณีอื่นๆเนื่องจาก 1) เราทำการประมาณโหลดในช่วงฤดูฝน (ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559) และ 2) การใช้ข้อมูลของกรณีที่ 3 เป็นการใช้อัตราข้อมูลแบบฤดูกาลสำหรับฤดูฝนพร้อมกับใช้ข้อมูลรวมจากทุกวัน (วันจันทร์ – วันศุกร์) ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกแบบจำลองในกรณีที่ 3 คือ $ARIMA(4, 1, 4) \times (0, 1, 1)_{96}$ สำหรับพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าเพื่อตัดยอดโหลดซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป

ตารางที่ 3.7 แบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในกรณีที่ 1 และ 2

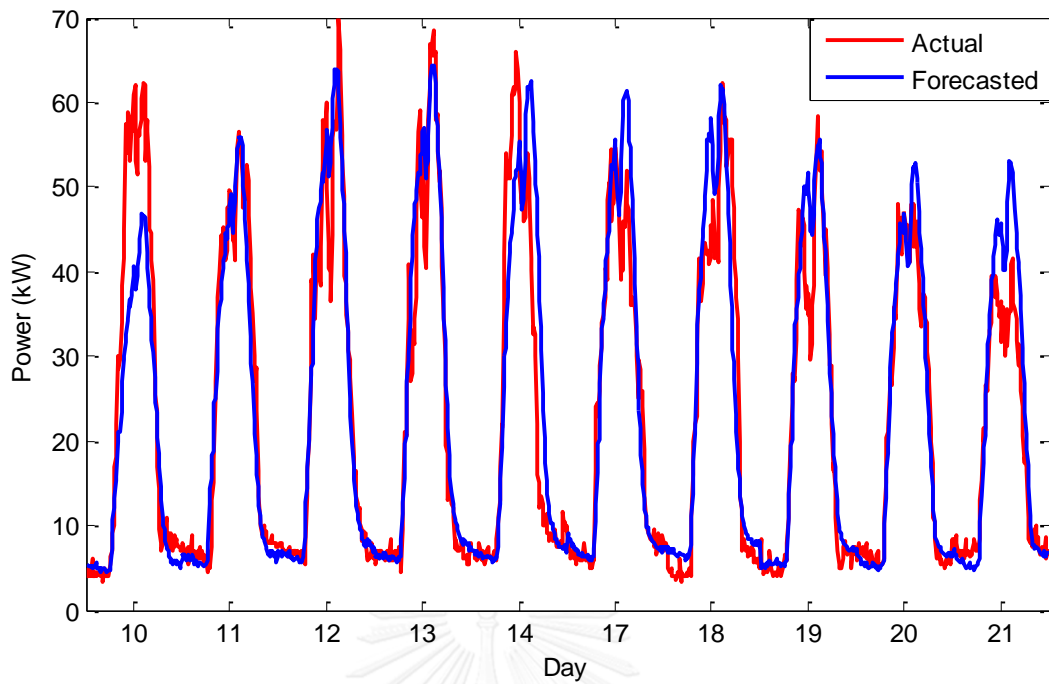
แบบจำลอง	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
วันจันทร์	$ARIMA(4, 1, 1) \times (1, 1, 1)_{96}$	$ARIMA(3, 1, 7) \times (0, 1, 1)_{96}$
วันอังคาร		$ARIMA(5, 1, 1) \times (0, 1, 1)_{96}$
วันพุธ		$ARIMA(4, 1, 4) \times (1, 1, 1)_{96}$
วันพฤหัสบดี		$ARIMA(2, 1, 2) \times (0, 1, 1)_{96}$
วันศุกร์		$ARIMA(3, 1, 2) \times (1, 1, 1)_{96}$

ตารางที่ 3.8 แบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในกรณีที่ 3 และ 4

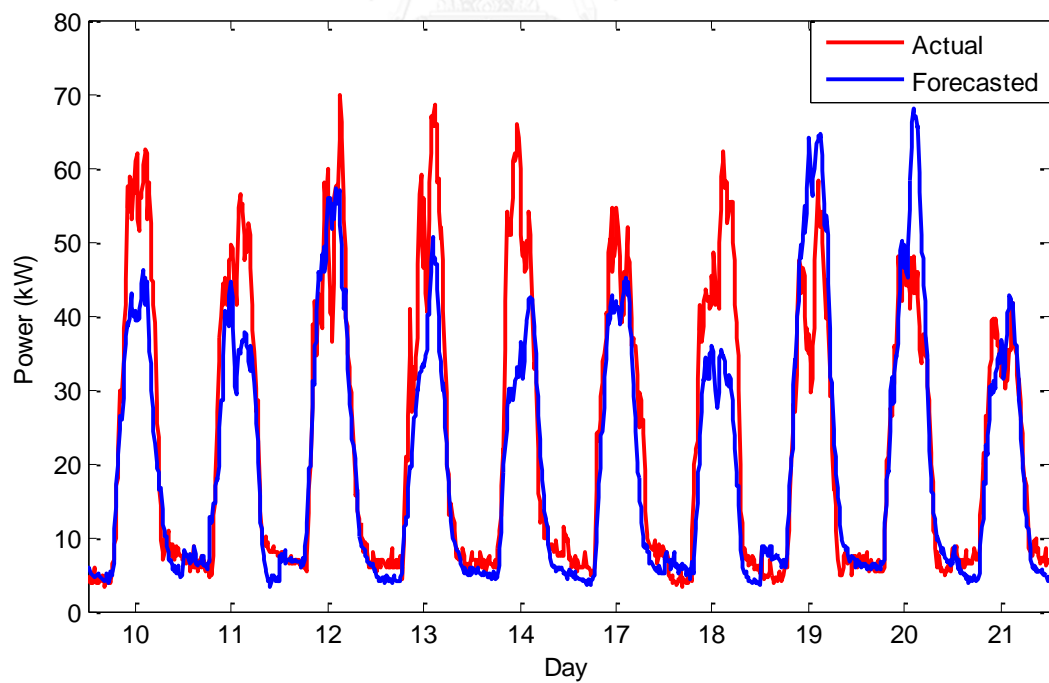
แบบจำลอง	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
วันจันทร์	$ARIMA(4, 1, 4) \times (0, 1, 1)_{96}$	$ARIMA(2, 1, 7) \times (0, 1, 1)_{96}$
วันอังคาร		$ARIMA(3, 1, 2) \times (0, 1, 1)_{96}$
วันพุธ		$ARIMA(10, 1, 2) \times (0, 1, 1)_{96}$
วันพฤหัสบดี		$ARIMA(1, 1, 2) \times (0, 1, 1)_{96}$
วันศุกร์		$ARIMA(1, 1, 2) \times (1, 1, 1)_{96}$

ตารางที่ 3.9 แบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในกรณีที่ 5 และ 6

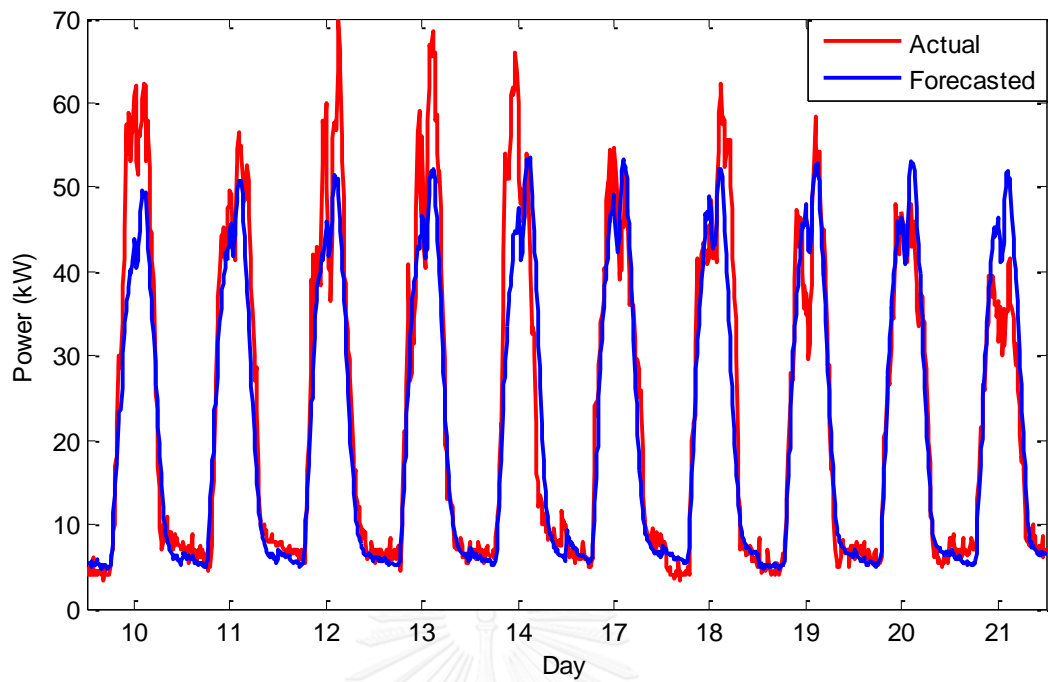
แบบจำลอง	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6
วันจันทร์	$ARIMA(4, 1, 3) \times (0, 1, 1)_{96}$	$ARIMA(8, 1, 3) \times (0, 1, 1)_{96}$
วันอังคาร		$ARIMA(4, 1, 3) \times (0, 1, 1)_{96}$
วันพุธ		$ARIMA(2, 1, 4) \times (0, 1, 1)_{96}$
วันพฤหัสบดี		$ARIMA(3, 1, 2) \times (0, 1, 1)_{96}$
วันศุกร์		$ARIMA(3, 1, 4) \times (0, 1, 1)_{96}$



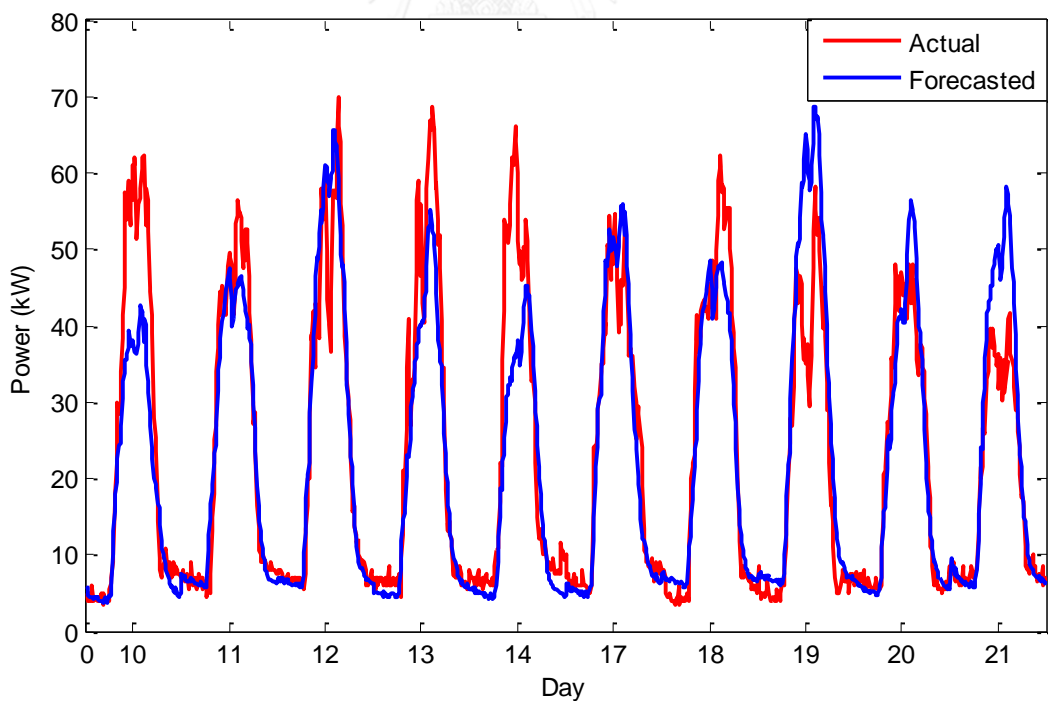
รูปที่ 3.11 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีที่ 1



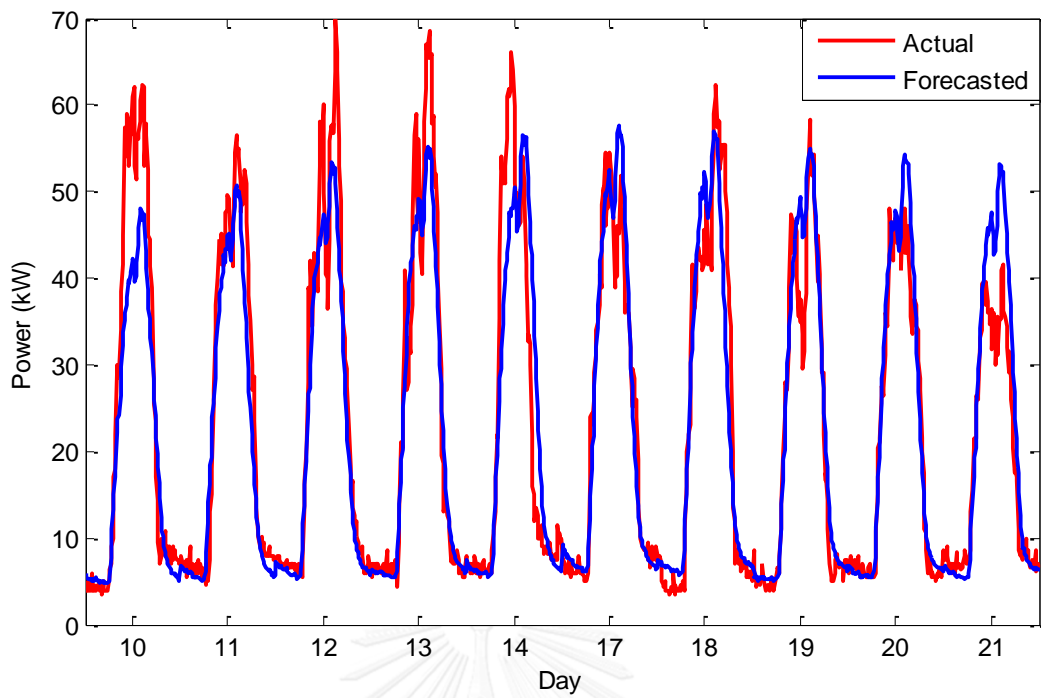
รูปที่ 3.12 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำการของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีที่ 2



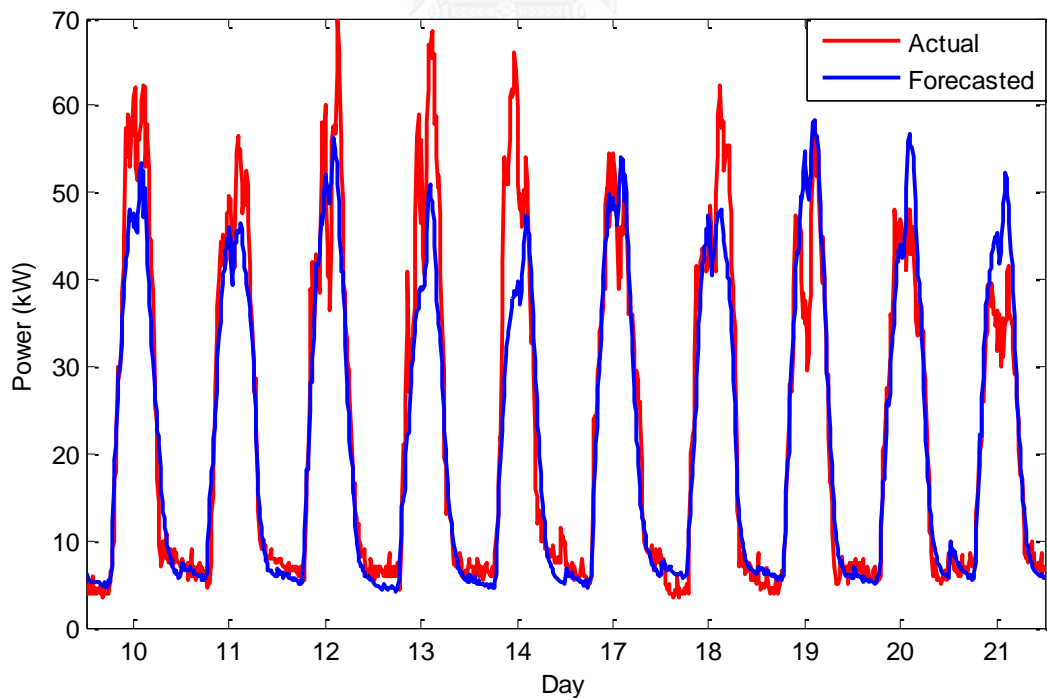
รูปที่ 3.13 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำการของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีที่ 3



รูปที่ 3.14 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำการของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีที่ 4



รูปที่ 3.15 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำการของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีที่ 5



รูปที่ 3.16 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวันทำการของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่างวันที่ 10 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ในกรณีที่ 6

ตารางที่ 3.10 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) ทั้ง 6 กรณี

	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6
MAPE(%)* (ทั้งวัน)	20.082	26.197	19.156	21.941	19.518	19.973
MAPE(%)* (10:00 น. – 17:00 น.)	19.250	24.812	17.481	22.472	18.352	17.308
MAPE(%)** (10:00 น. – 17:00 น.)	19.283	17.836	16.739	20.100	17.867	15.930

หมายเหตุ: * คือ มีจุดกำเนิดที่เวลา 00:00 และ ** คือ มีจุดกำเนิดที่เวลา 10:00

ตารางที่ 3.11 ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 1

วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์		วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์	
		ณ เวลา	ณ เวลา			ณ เวลา	ณ เวลา
		00:00 น.	10:00 น.			00:00 น.	10:00 น.
10	14:45	14:15	14:15	17	12:15	14:15	14:15
11	14:15	14:15	14:15	18	14:45	14:15	14:15
12	15:15	14:15	14:45	19	14:15	14:45	14:45
13	14:45	14:15	15:00	20	13:45,14:30	14:45	14:45
14	11:30	15:00	15:00	21	15:00	14:15	14:15

ตารางที่ 3.12 ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 2

วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์		วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์	
		ณ เวลา	ณ เวลา			ณ เวลา	ณ เวลา
		00:00 น.	10:00 น.			00:00 น.	10:00 น.
10	14:45	14:00	11:00	17	12:15	14:30	14:30
11	14:15	11:45	11:45	18	14:45	12:00	12:00
12	15:15	14:00	14:00	19	14:15	15:00	15:00
13	14:45	14:15	14:15	20	13:45,14:30	14:15	14:15
14	11:30	14:30	10:15	21	15:00	14:15	14:15

ตารางที่ 3.13 ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 3

วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์		วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์	
		ณ เวลา	ณ เวลา			ณ เวลา	ณ เวลา
		00:00 น.	10:00 น.			00:00 น.	10:00 น.
10	14:45	14:15	14:15	17	12:15	14:15	14:15
11	14:15	14:15	14:15	18	14:45	14:15	14:15
12	15:15	14:15	14:15	19	14:15	14:45	14:45
13	14:45	15:00	15:00	20	13:45,14:30	14:15	14:15
14	11:30	15:00	14:15	21	15:00	14:30	14:30

ตารางที่ 3.14 ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 4

วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์		วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์	
		ณ เวลา	ณ เวลา			ณ เวลา	ณ เวลา
		00:00 น.	10:00 น.			00:00 น.	10:00 น.
10	14:45	14:00	10:15	17	12:15	14:30	14:30
11	14:15	12:00	12:00	18	14:45	12:00	12:00
12	15:15	14:15	14:00	19	14:15	14:00	12:45
13	14:45	14:15	14:15	20	13:45,14:30	14:15	14:15
14	11:30	14:15	14:15	21	15:00	14:15	14:15

ตารางที่ 3.15 ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 5

วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์		วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์	
		ณ เวลา	ณ เวลา			ณ เวลา	ณ เวลา
		00:00 น.	10:00 น.			00:00 น.	10:00 น.
10	14:45	14:15	14:15	17	12:15	14:15	14:15
11	14:15	14:15	14:15	18	14:45	14:15	14:15
12	15:15	14:15	14:15	19	14:15	14:15	14:15
13	14:45	14:15	15:00	20	13:45,14:30	14:15	14:15
14	11:30	14:15	14:15	21	15:00	14:15	14:15

ตารางที่ 3.16 ตำแหน่งเวลาความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดระหว่างข้อมูลโหลดจริงและข้อมูลโหลดพยากรณ์ในกรณีที่ 6

วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์		วันที่	ตำแหน่ง โหลดค่าจริง	ตำแหน่ง โหลดพยากรณ์	
		ณ เวลา	ณ เวลา			ณ เวลา	ณ เวลา
		00:00 น.	10:00 น.			00:00 น.	10:00 น.
10	14:45	14:00	14:00	17	12:15	14:00	14:00
11	14:15	15:00	12:00	18	14:45	15:00	12:00
12	15:15	14:15	14:15	19	14:15	14:15	14:00
13	14:45	14:15	14:15	20	13:45,14:30	14:15	14:15
14	11:30	14:15	14:15	21	15:00	14:15	14:15

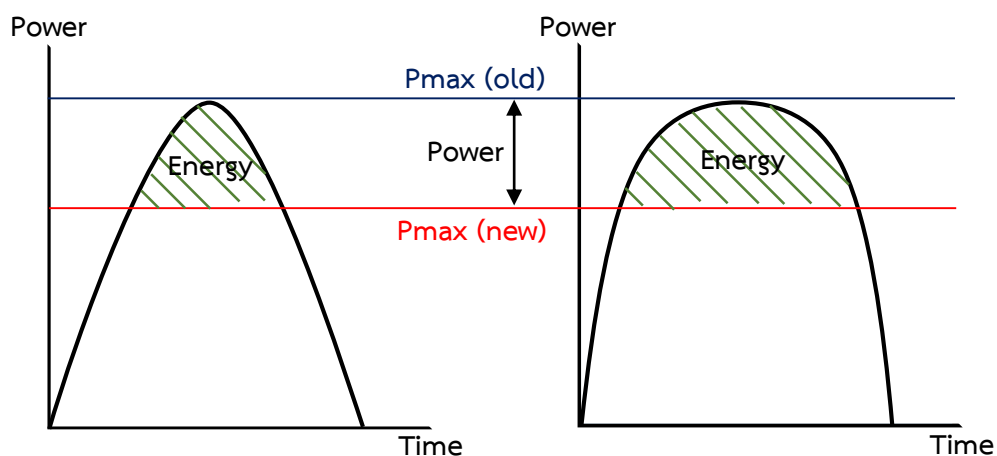
บทที่ 4

การตัดยอดโหลดสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอแนวคิดการตัดยอดโหลดและพร้อมสาธิตการตัดยอดโหลดสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารด้วยตัวเก็บพลังงานแบตเตอรี่ชนิดเชื่อมต่อกิต การทดสอบการตัดยอดโหลดจะอาศัยการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าล่วงหน้า(ตามแบบจำลองที่นำเสนอในบทที่ 3) เพื่อกำหนดรูปแบบการอัดและคายประจุของตัวเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ต่างๆในระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารด้วยมาตรฐาน IEEE1888 โดยระบบสามารถสนับสนุนส่วนโปรแกรมประยุกต์ของการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าเพื่อให้การตัดยอดโหลดมีประสิทธิภาพได้

4.1 แนวคิดในการตัดยอดโหลด

การตัดยอดโหลดในอาคารมีนัยสำคัญต่อการลดค่าไฟฟ้า โดยทั่วไประบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารมีการบริหารจัดการด้านอุปทาน แต่ปัจจุบันมีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อลดค่าไฟฟ้าเช่นกัน แต่ลักษณะการใช้ไฟฟ้าและลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจไม่สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงอาศัยระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อลดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุด กล่าวคือระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่มีความยืดหยุ่นที่สามารถกำหนดรูปแบบการทำงานได้ต่างจากแหล่งผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน จากรูปที่ 4.1 แสดงแนวคิดการตัดยอดโหลดด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ทั้งนี้ขนาดกำลัง (Power) และปริมาณพลังงาน (Energy) ที่ใช้ตัดยอดโหลดนั้นขึ้นอยู่กับความจุ (Capacity) และคุณลักษณะ (Specification) ของแบตเตอรี่และอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้ไฟฟ้าด้วย หากต้องการลดขนาดกำลังที่ค่าเดียวกัน ลักษณะการใช้ไฟฟ้าในรูปแบบที่ 4.1(ก) จะใช้ปริมาณพลังงานมากกว่าในรูปแบบที่ 4.1(ข) ดังนั้นการเลือกขนาดระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จึงต้องพิจารณาจากลักษณะการใช้ไฟฟ้า โดยตัวอย่างแนวคิดในการออกแบบขนาดระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับอาคารบูธรอด บิณฑสันต์สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ง

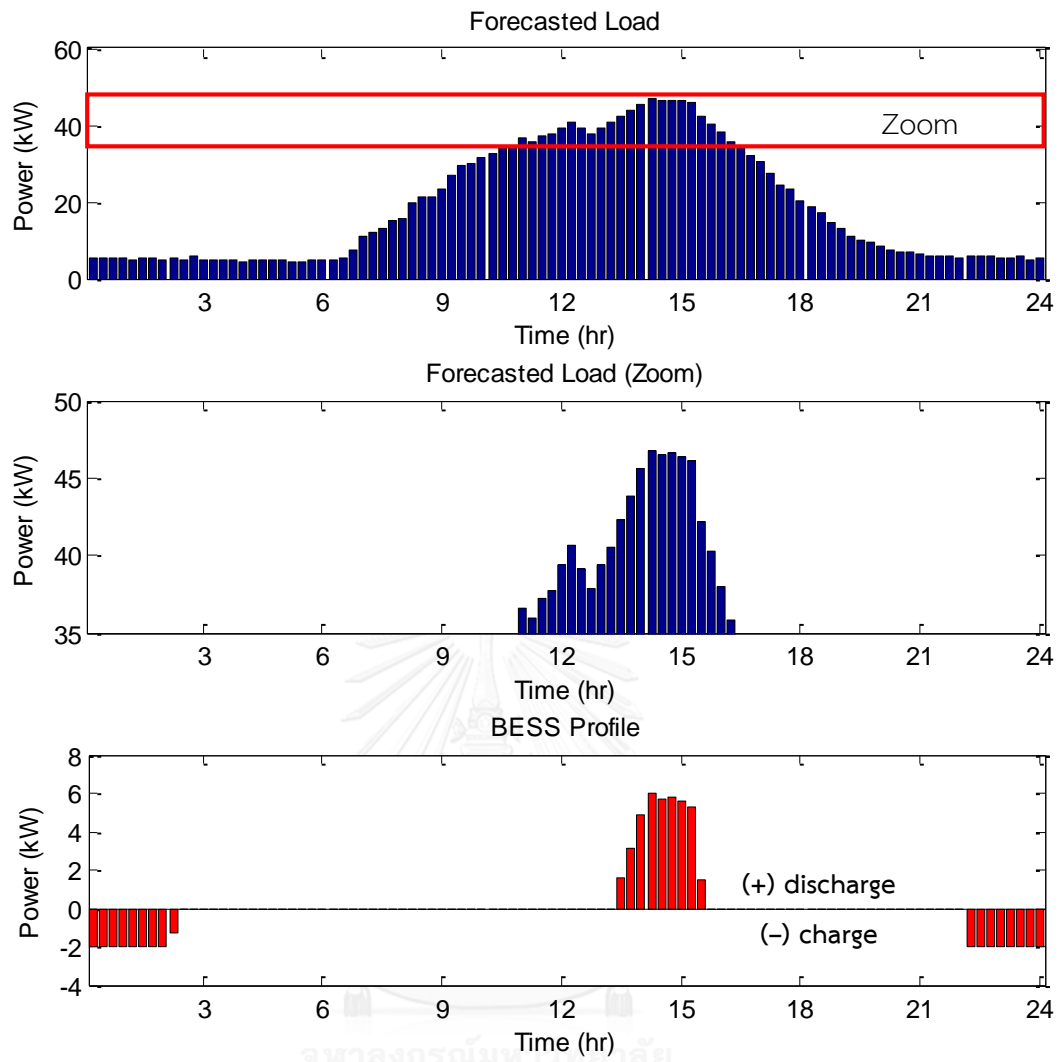


(ก) แบตเตอรี่มีพิกัดพลังงาน (kWh) น้อย (ข) แบตเตอรี่มีพิกัดพลังงาน (kWh) สูง

รูปที่ 4.1 แนวคิดการตัดยอดโหลดด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

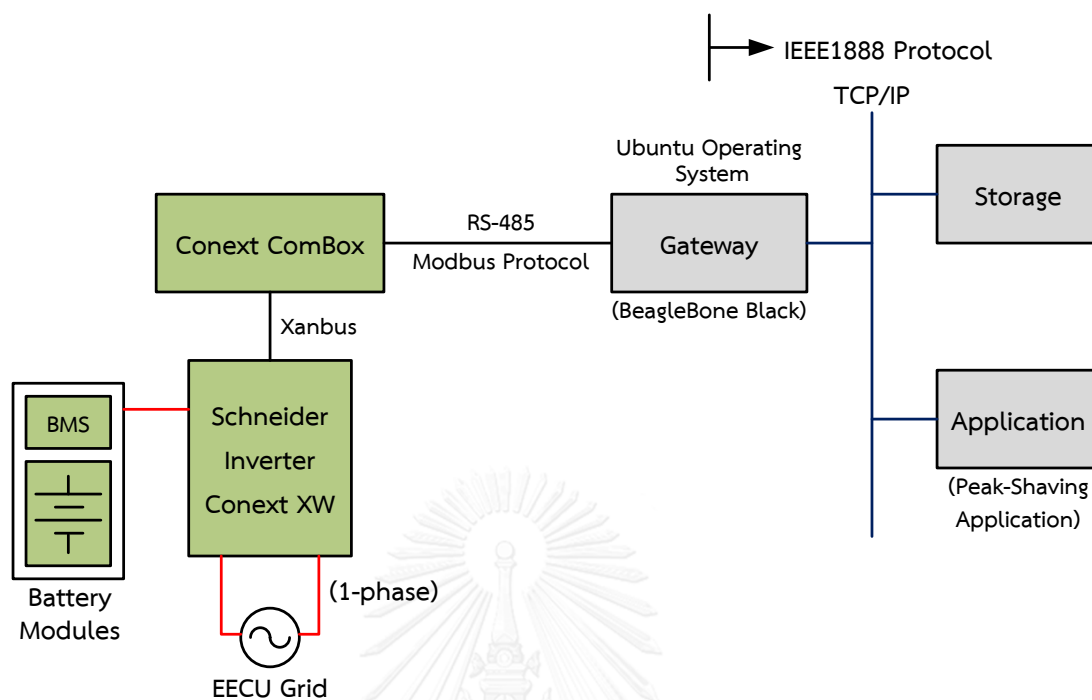
การตัดยอดโหลดด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่อาจทำได้ด้วยการกำหนดระดับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น 60 kW ถ้าความต้องการใช้ไฟฟ้ามีค่าสูงกว่า 60 kW ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะเริ่มการคายประจุเพื่อตัดยอดโหลด หากความต้องการใช้ไฟฟ้าลดลงต่ำกว่า 60 kW ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะหยุดการคายประจุหรืออาจเปลี่ยนเป็นเริ่มการอัดประจุแทนได้ แต่แนวทางนี้มีข้อจำกัดในการตัดยอดโหลดกล่าวคือ พิกัดของตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (กำลัง kW, พลังงาน kWh, C-Rate) อาจจะมีขนาดใหญ่มาก ทำให้ไม่เหมาะสมในเชิงวิศวกรรมและไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงอาศัยการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าล่วงหน้าในการตัดยอดโหลดเพื่อสามารถใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่อย่างเหมาะสมทั้งในเชิงวิศวกรรมและเชิงเศรษฐศาสตร์

การกำหนดรูปแบบการอัดและคายประจุของตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะพิจารณาจากลักษณะการใช้ไฟฟ้าที่ได้จากการพยากรณ์และขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ จากรูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการตัดยอดโหลดด้วยตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 6 kW 14.4 kWh จะพบว่ามีการคายประจุแบตเตอรี่ในช่วงเวลา 13:15 น. ถึง 15:30 น. ด้วยปริมาณพลังงาน 9.86 kWh และเริ่มการอัดประจุแบตเตอรี่หลังเวลา 22:00 น. เป็นต้นไป



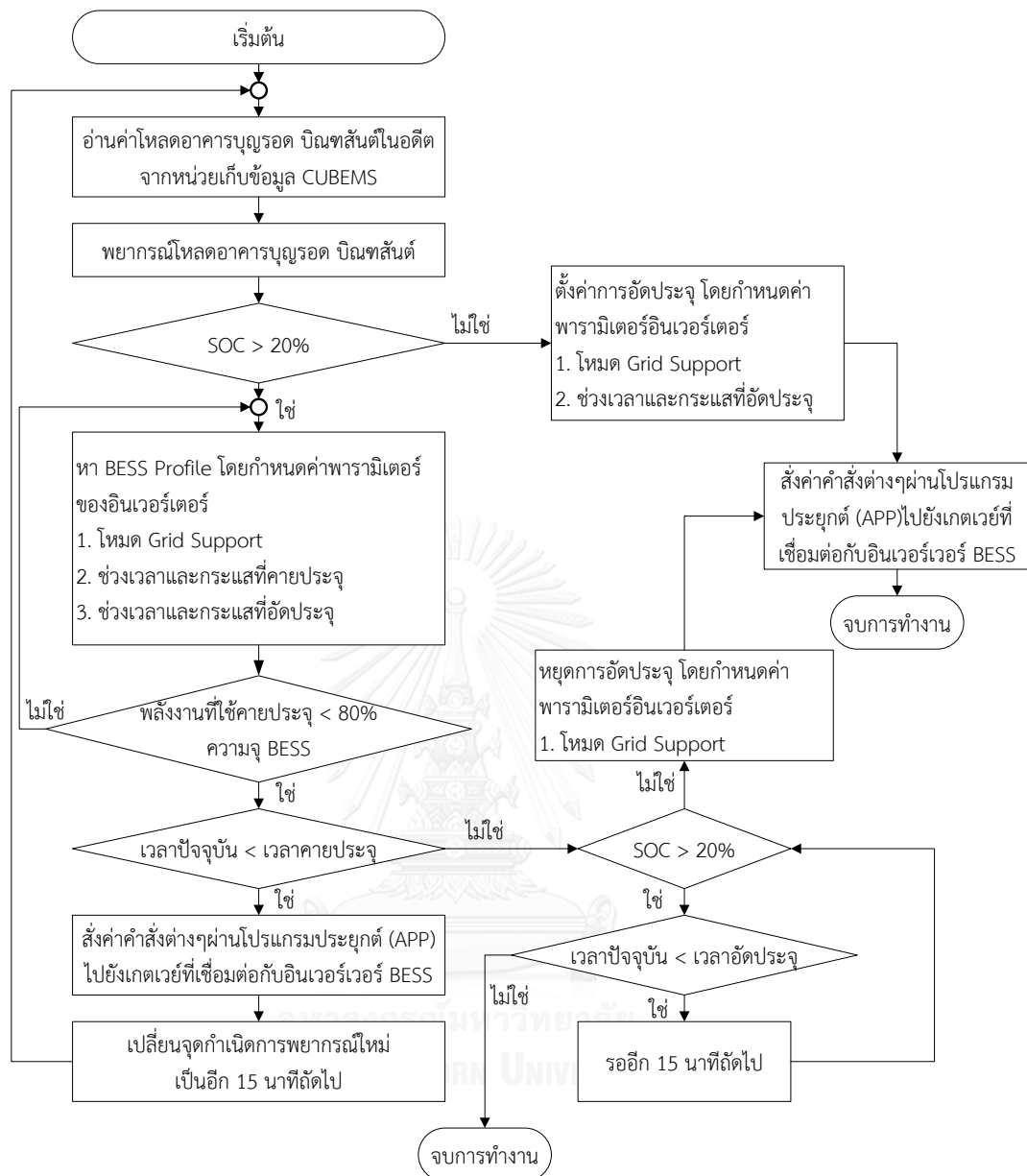
รูปที่ 4.2 สถิติการตัดยอดโหลดด้วยตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 6 kW 14.4 kWh

4.2 โครงสร้างของระบบทดสอบ



รูปที่ 4.3 ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารบุงูรอด บินทสันต์ที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ เพื่อตัดยอดโหลด

จากรูปที่ 4.3 แสดงระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารบุงูรอด บินทสันต์ที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์เพื่อตัดยอดโหลด โดยมีโปรแกรมประยุกต์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ทั้งนี้อาศัยเกตเวย์เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างมาตรฐาน IEEE1888 และ Modbus จากตัวอย่างสาดิการรับค่าคำสั่งจากโปรแกรมประยุกต์และสั่งค่าไปยังอินเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 ไว้แล้ว ในบทนี้จะนำเสนอการทำงานในส่วนโปรแกรมประยุกต์เพื่อตัดยอดโหลดดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันของโปรแกรมประยุกต์สำหรับตัดยอดโหลด

จากรูปที่ 4.4 โปรแกรมประยุกต์เริ่มต้นการทำงานด้วยการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าล่วงหน้า 1 วัน แบบราย 15 นาทีจากเวลาปัจจุบันจนถึงเวลา 00:00 น. ของวันถัดไป หลังจากนั้นจะมีการตรวจสอบสถานะการอัดประจุ (State of Charge; SOC) หากสถานะของปัจจุบันมีค่ามากกว่า 20% โปรแกรมประยุกต์จะกำหนดค่าต่างๆสำหรับควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ได้แก่ โหมดสนับสนุนกริด ช่วงเวลาและกระแสในการอัดและคายประจุ แบตเตอรี่ซึ่งรายละเอียดของการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆแสดงในภาคผนวก ก ทั้งนี้พลังงานที่ใช้คายประจุจะต้องน้อยกว่า 80% (Depth of Discharge; DOD) ของความจุแบตเตอรี่ตามรายละเอียดของ

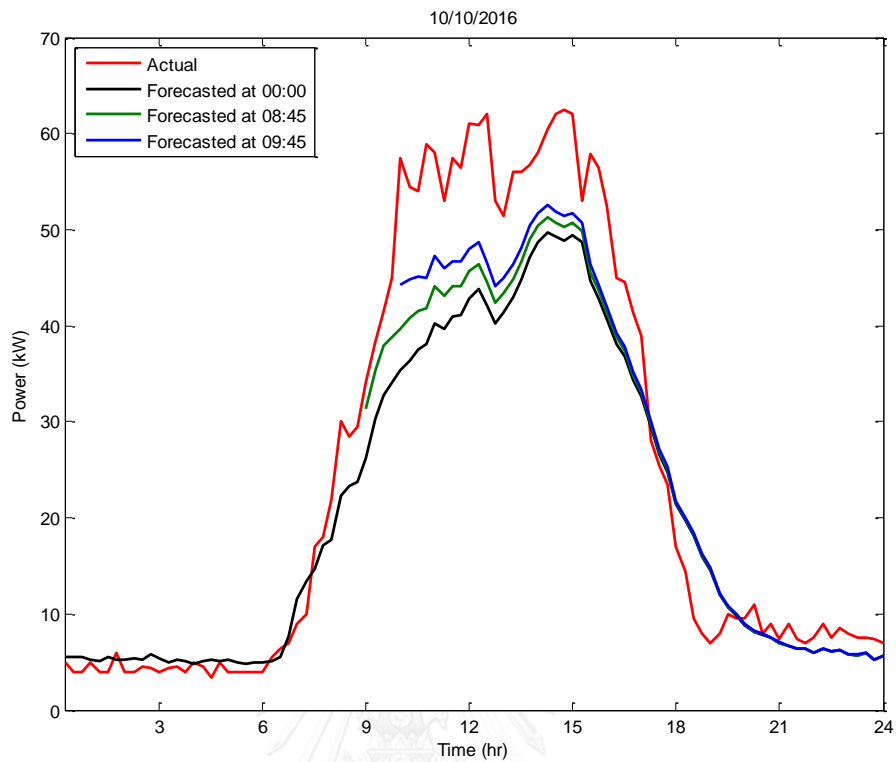
แบตเตอรี่ หากพลังงานที่ใช้คายประจุมีค่ามากกว่า 80% โปรแกรมประยุกต์จะกำหนดค่าสำหรับควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ใหม่เพื่อจำกัดค่าพลังงานไว้ที่ 80% ภายหลังจากที่โปรแกรมประยุกต์ส่งค่าคำสั่งต่างๆไปยังเกตเวย์ที่เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่แล้ว โปรแกรมประยุกต์จะเลื่อนจุดกำเนิดการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าใหม่เป็นอีก 15 นาทีถัดไป เพื่อกำหนดรูปแบบการคายประจุสำหรับควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ใหม่อีกครั้ง ในระหว่างการคายประจุจะมีการตรวจสอบสถานะการอัดประจุ (SOC) ทุก 15 นาที หากสถานะการอัดประจุมีค่าต่ำกว่า 20% โปรแกรมประยุกต์จะสั่งหยุดการคายประจุเพื่อรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

4.3 ผลการทดสอบการทำงาน

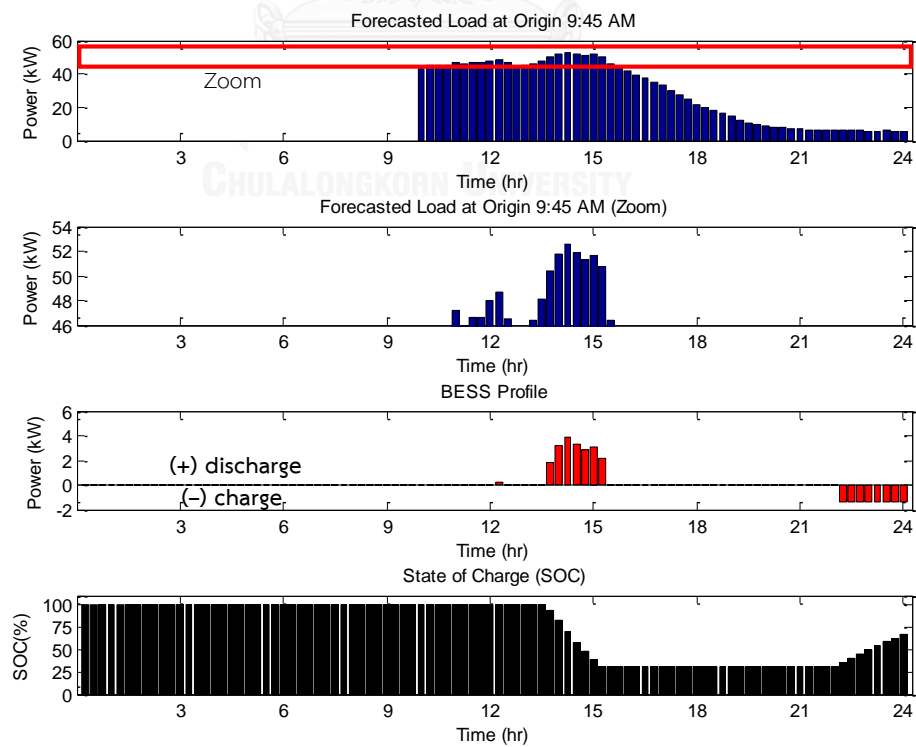
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการทดสอบการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ด้วยตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ชนิดเชื่อมต่อกิต ที่มีกรพยากรณ์โหลดและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ด้วยมาตรฐาน IEEE1888 ระหว่างวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559 – วันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เฉพาะวันทำงาน (วันจันทร์ – วันศุกร์) จำนวน 10 วัน ด้วยแบบจำลอง ARIMA (4, 1, 4) × (0, 1, 1)₆ (จากกรณี 3 รายละเอียดเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ค) โดยผลการทดสอบจะแสดงเปรียบเทียบระหว่างค่าโหลดที่ไม่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และค่าโหลดสุทธิที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ค่าโหลดที่พยากรณ์เมื่อปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์และรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ประกอบด้วย แบตเตอรี่และอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าพิกัด 5 kW 14.4 kWh ซึ่งมีรายละเอียดเพิ่มเติมดังแสดงในภาคผนวก ก หากพิจารณาลักษณะการใช้ไฟฟ้าของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์จะพบว่าช่วงเวลา 22:00 น. – 6:00 น. มีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำกว่า 10 kW และอยู่ในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ (Off Peak) ดังนั้นผู้เขียนจึงกำหนดการอัดประจุแบตเตอรี่ที่เวลา 22:00 น. ของทุกวัน

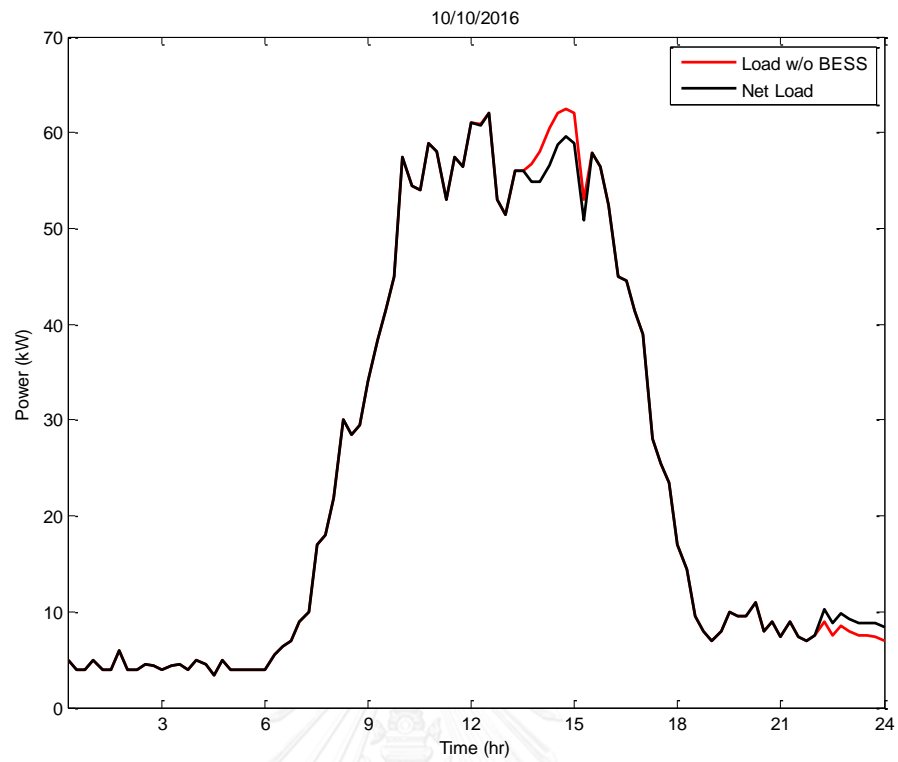
1) วันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.5 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบูรณรอด บิณฑสันต์วันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์



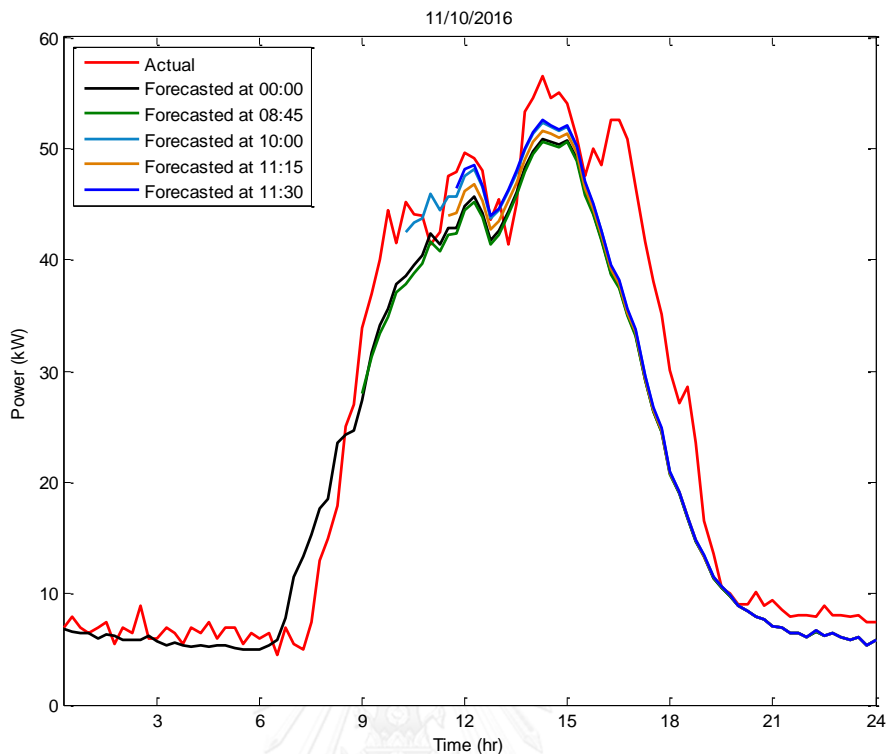
รูปที่ 4.6 การตัดยอดโหลดอาคารบูรณรอด บิณฑสันต์วันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559



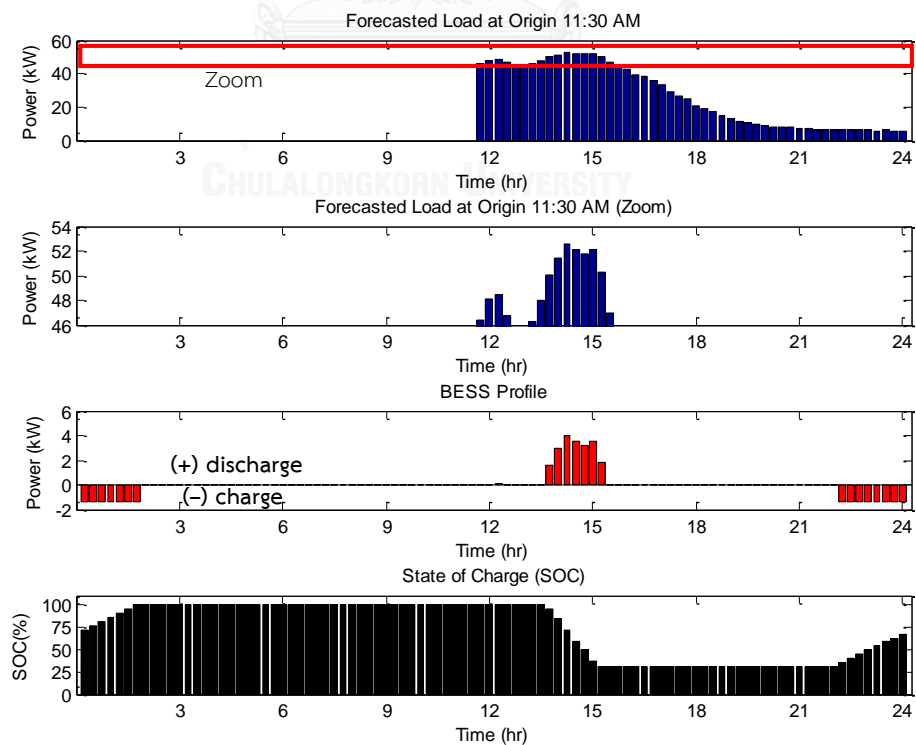
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บินทสันต์วันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ.

2559

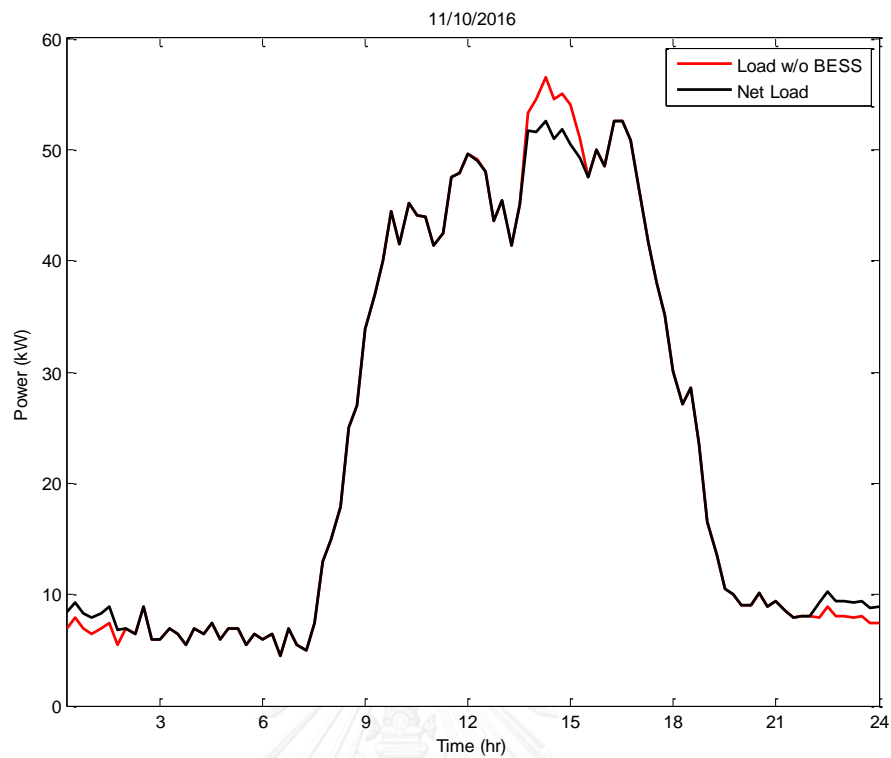
2) วันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.8 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบูรณรอด บิณฑสันต์วันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์

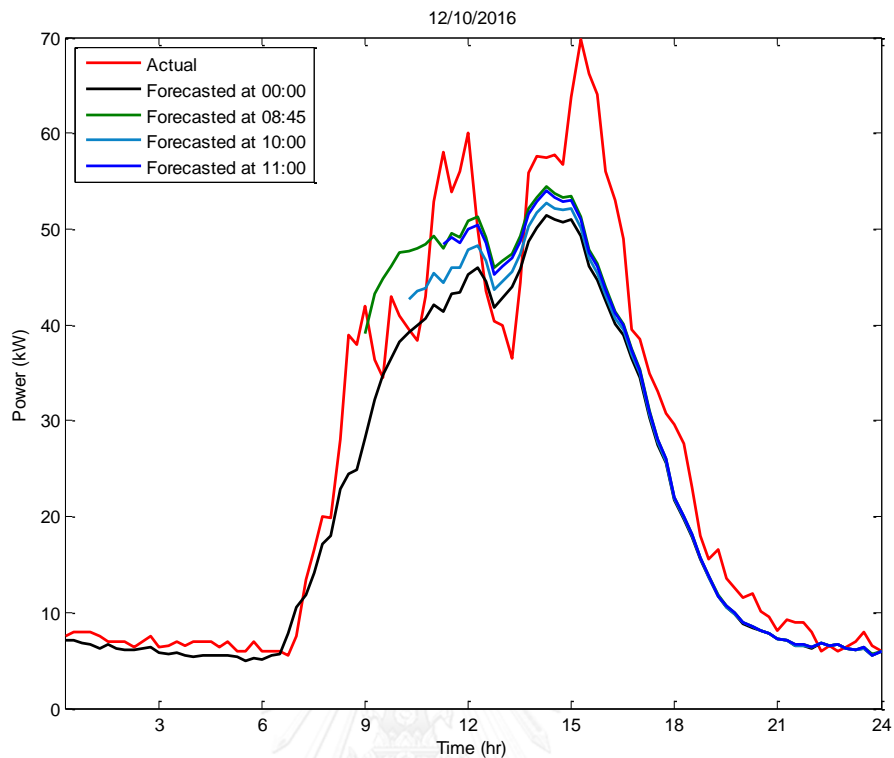


รูปที่ 4.9 การตัดยอดโหลดอาคารบูรณรอด บิณฑสันต์วันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2559

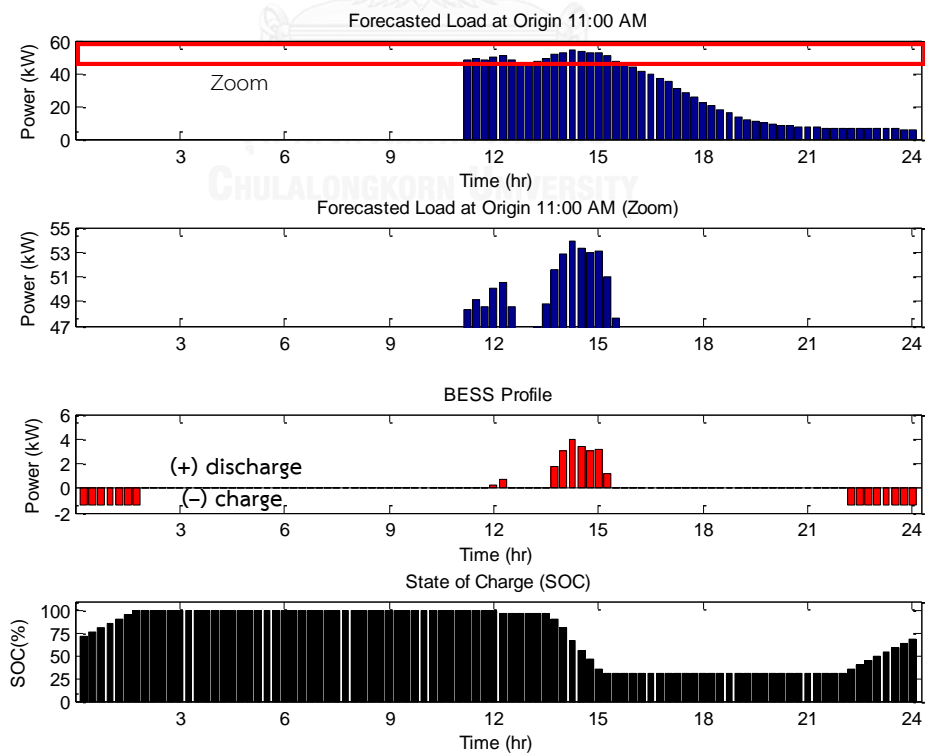


รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2559

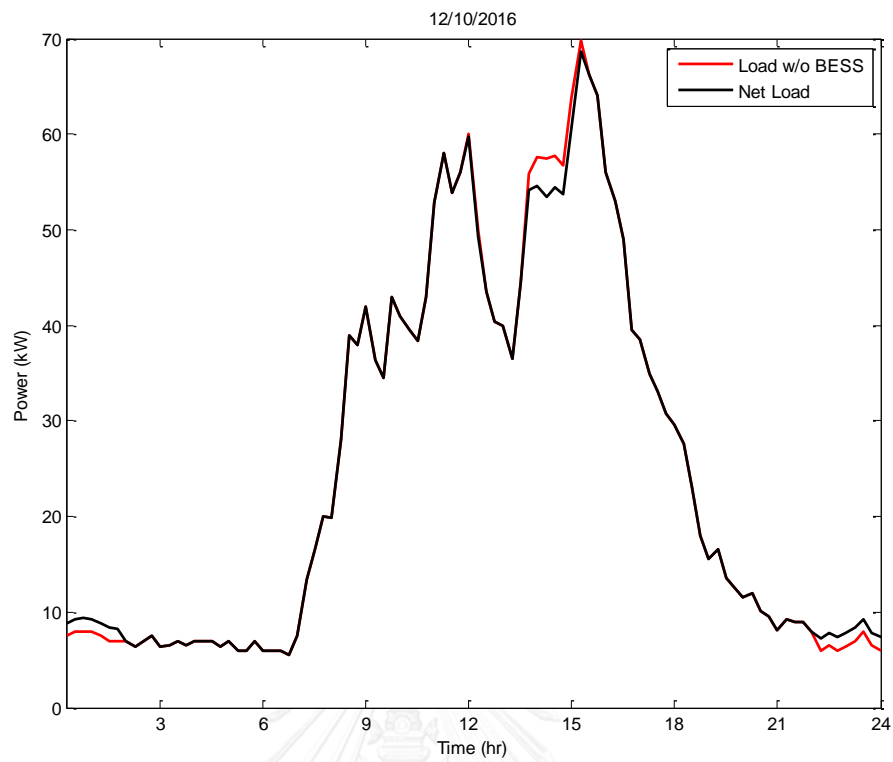
3) วันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.11 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์

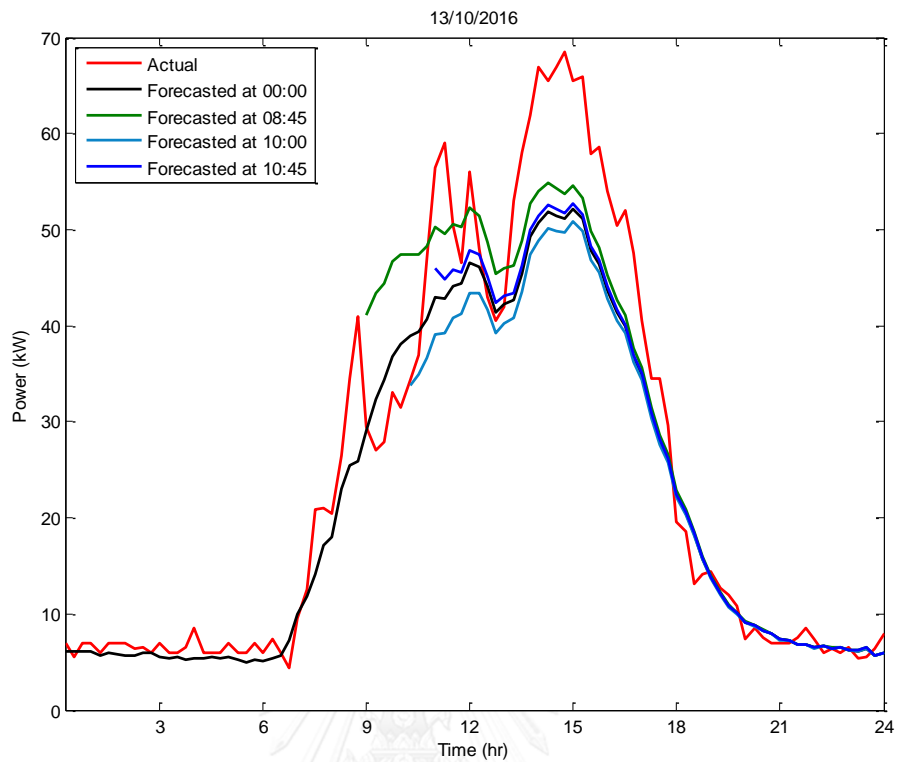


รูปที่ 4.12 การตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2559

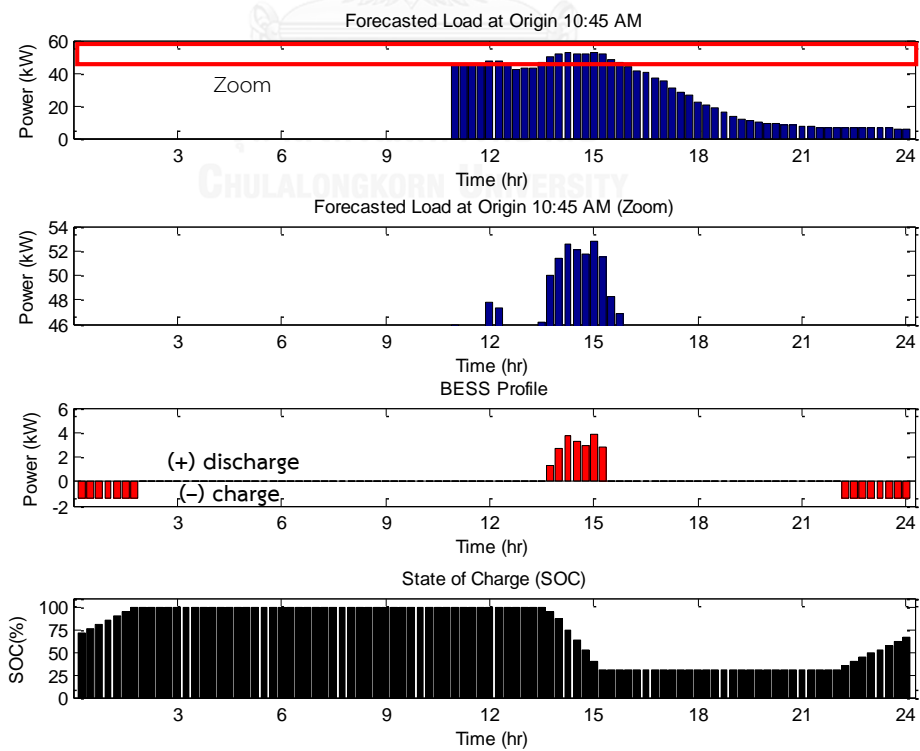


รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2559

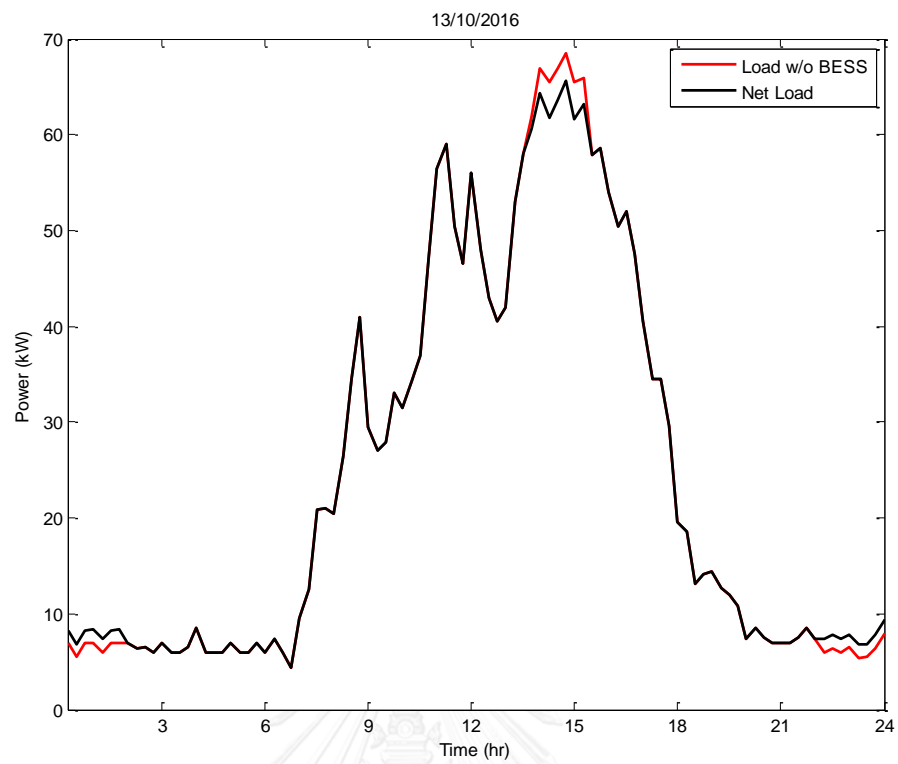
4) วันที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.14 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบูรณารอด บิณฑสันต์วันที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์

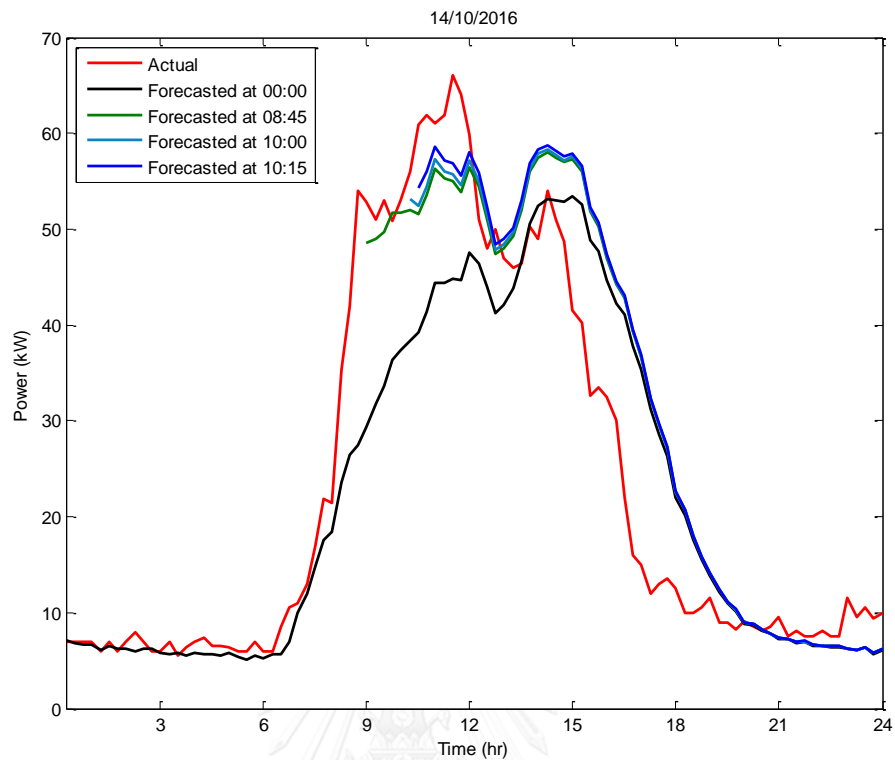


รูปที่ 4.15 การตัดยอดโหลดอาคารบูรณารอด บิณฑสันต์วันที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2559

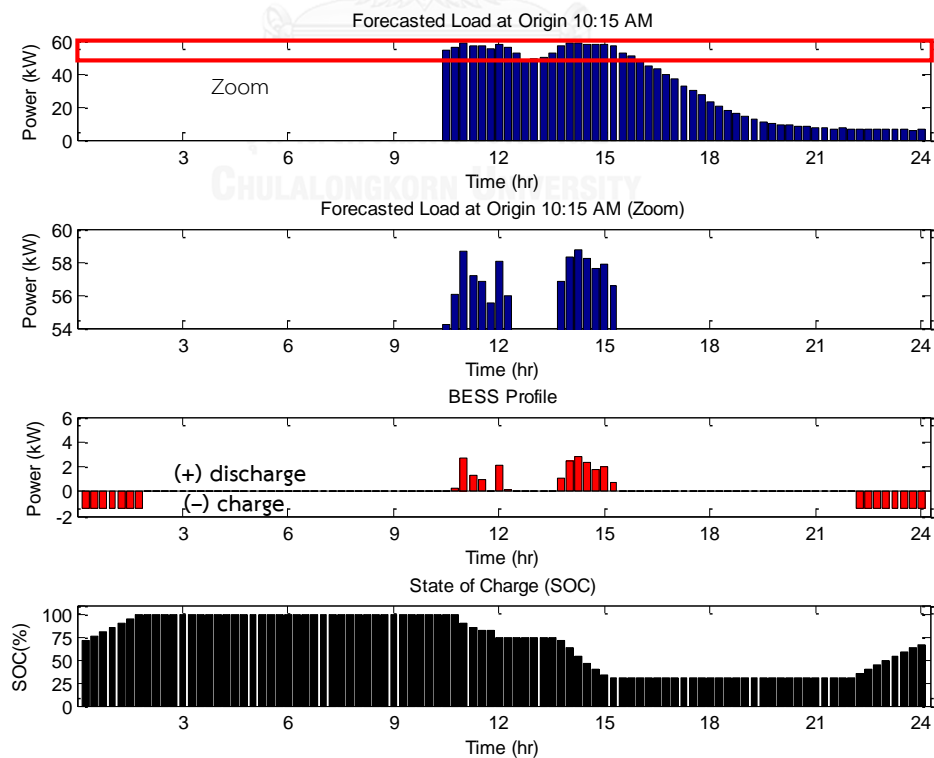


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บินทสันต์วันที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2559

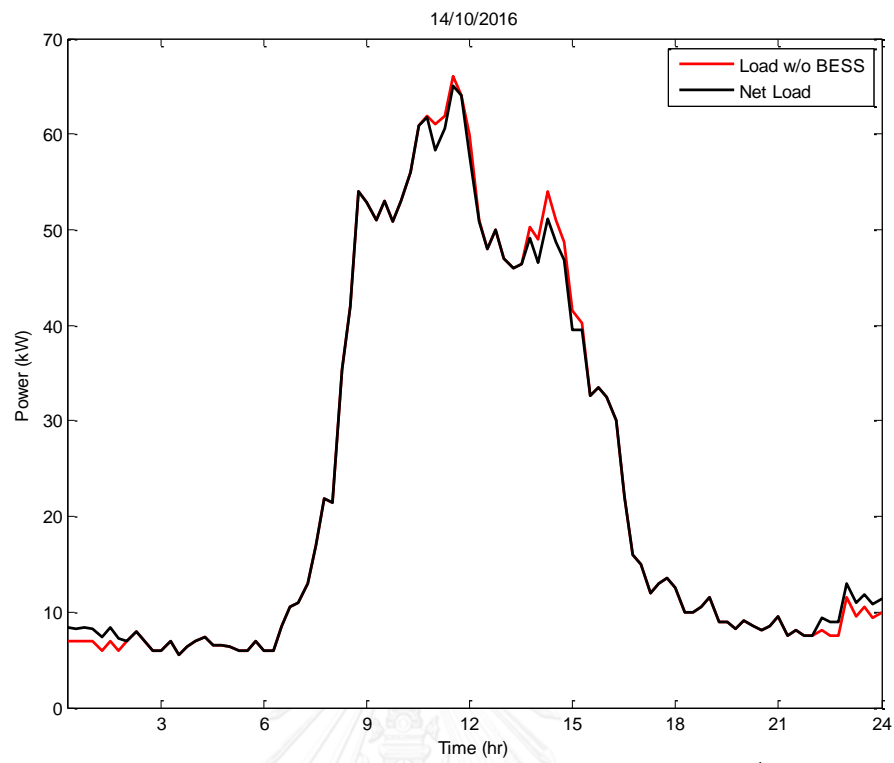
5) วันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.17 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบูรณารอด บิณฑสันต์วันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์

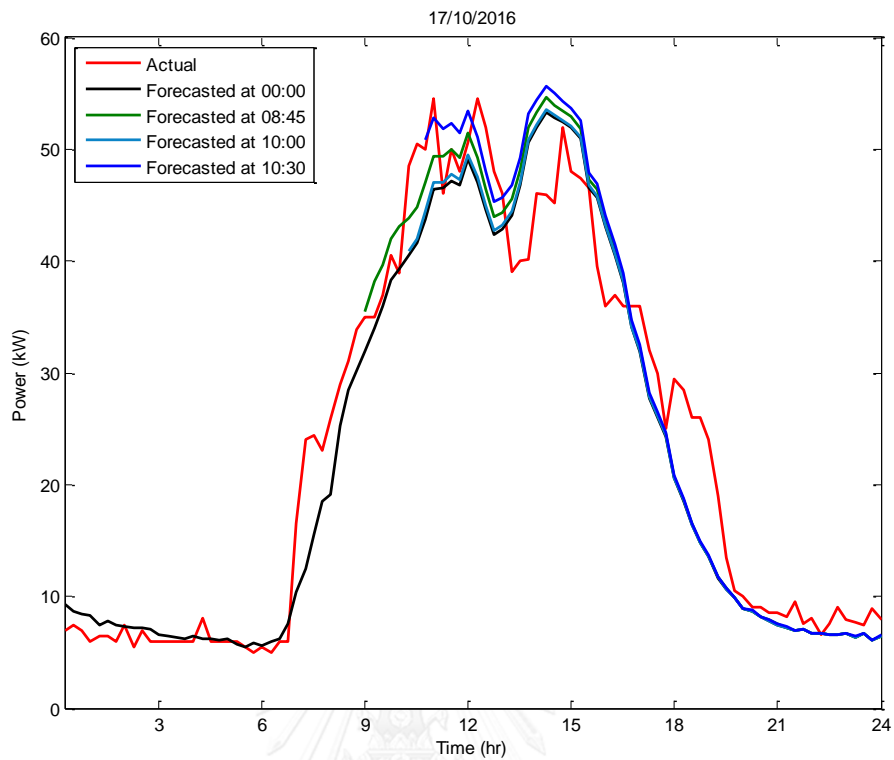


รูปที่ 4.18 การตัดยอดโหลดอาคารบูรณารอด บิณฑสันต์วันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2559

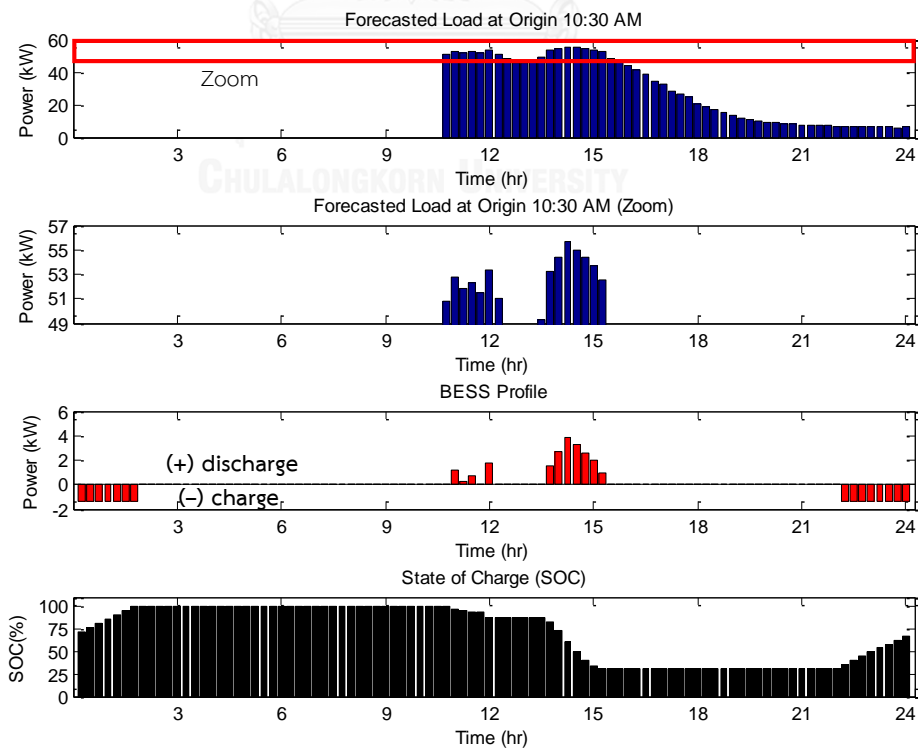


รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บินทสันต์วันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ.
2559

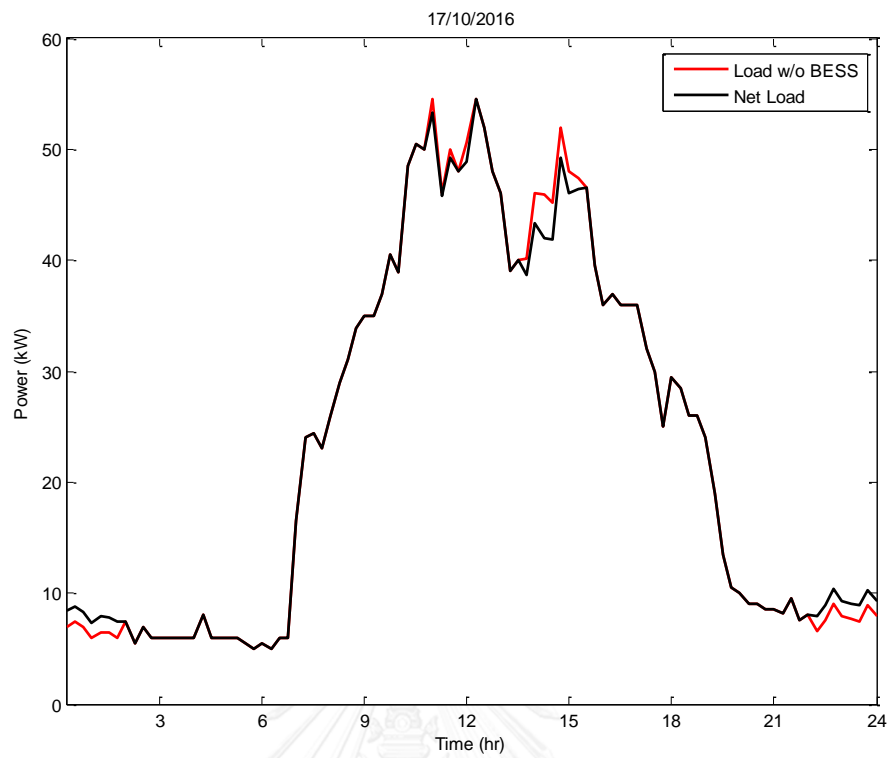
6) วันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.20 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์

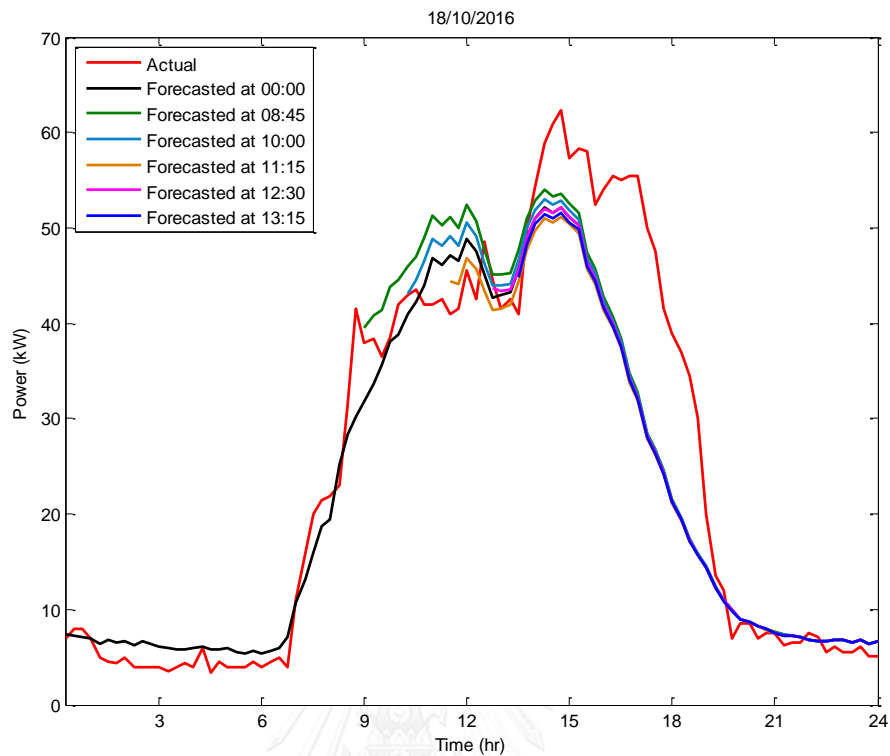


รูปที่ 4.21 การตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ. 2559

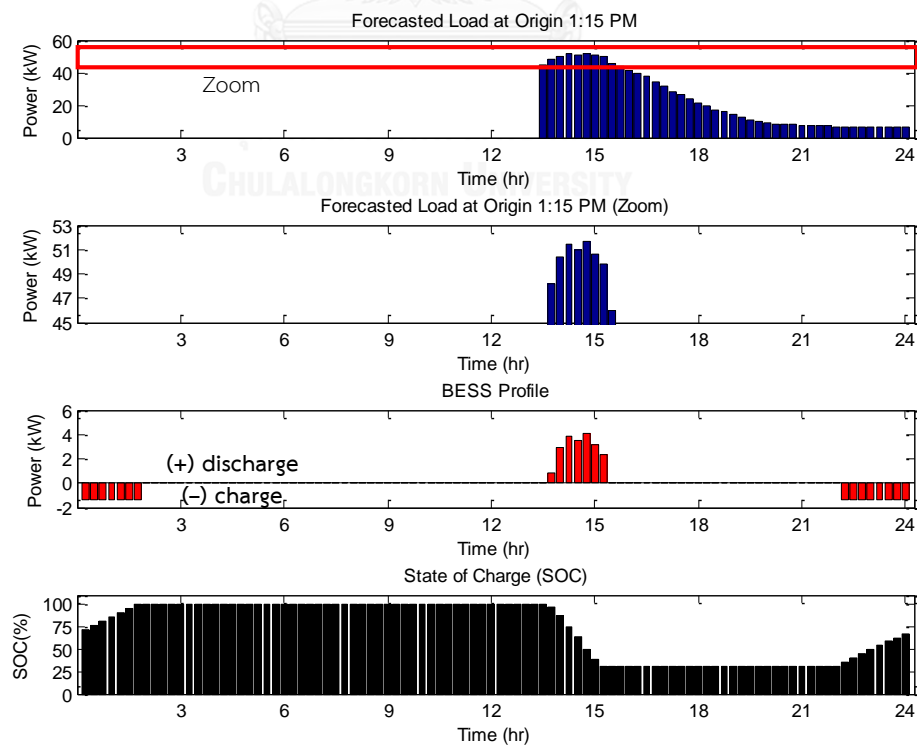


รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บินทสันต์วันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ. 2559

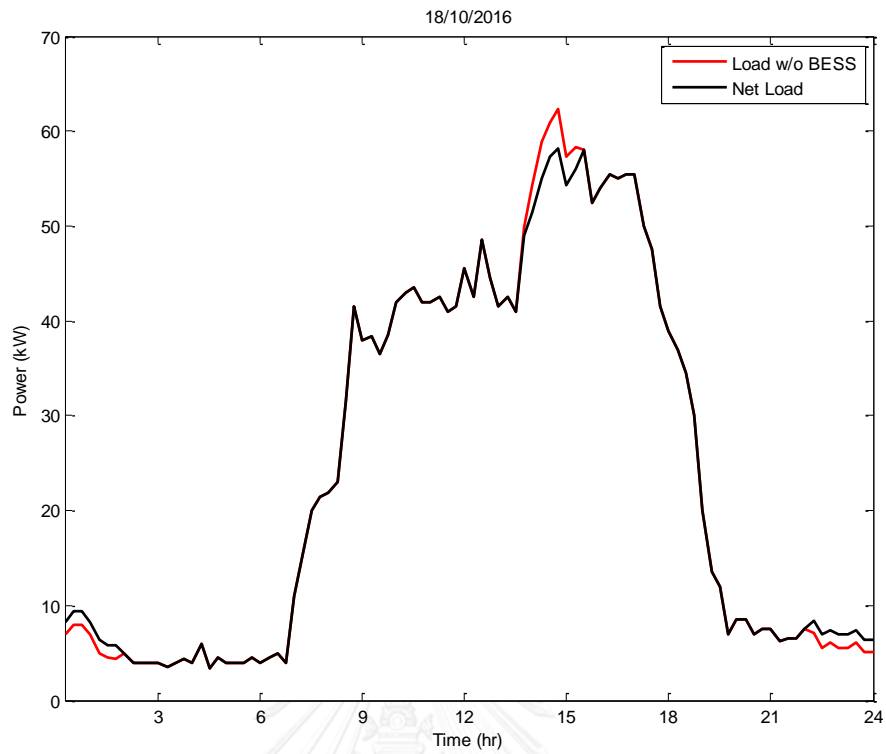
7) วันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.23 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์

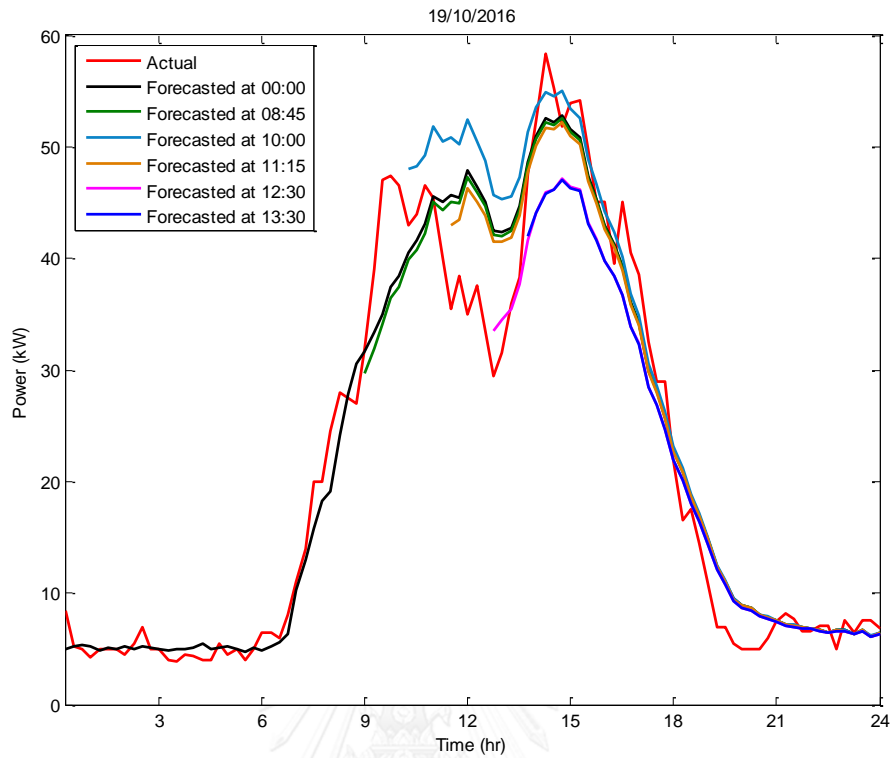


รูปที่ 4.24 การตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2559

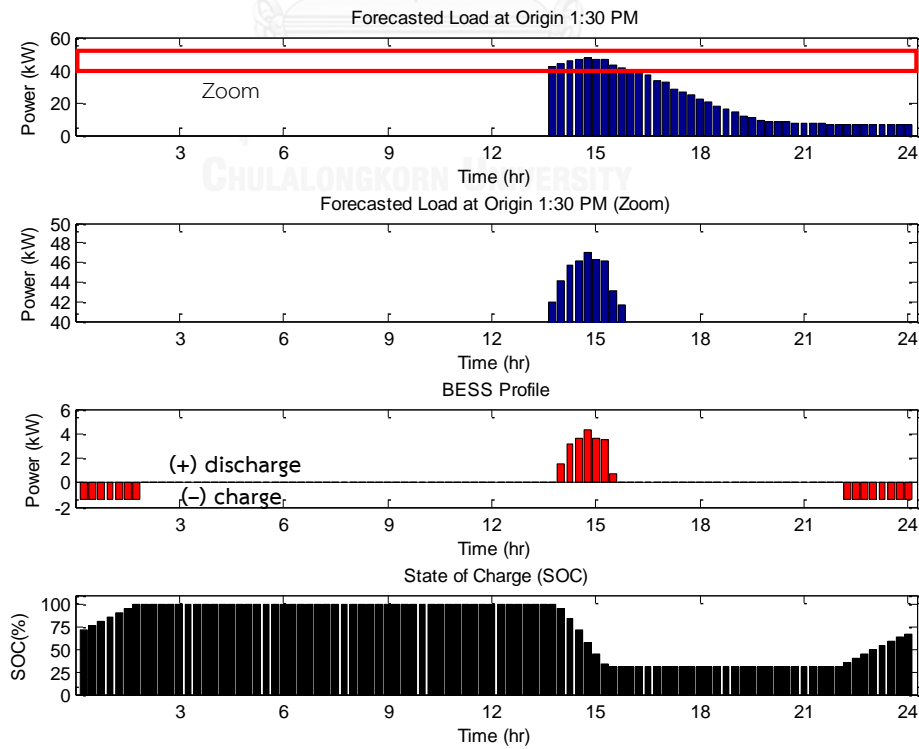


รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2559

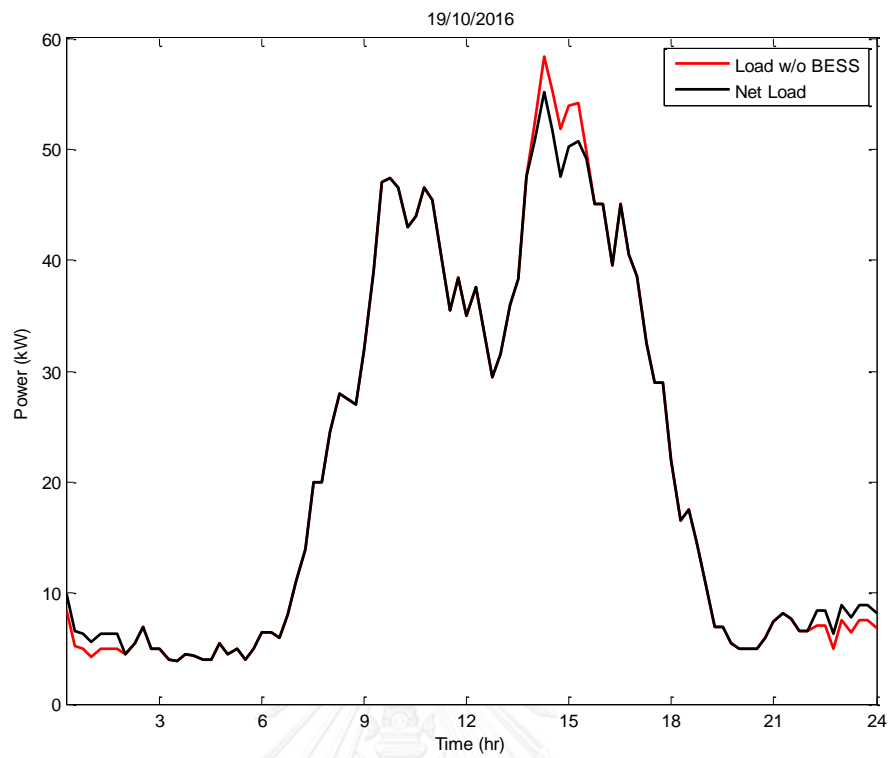
8) วันที่ 19 ตุลาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.26 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 19 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์



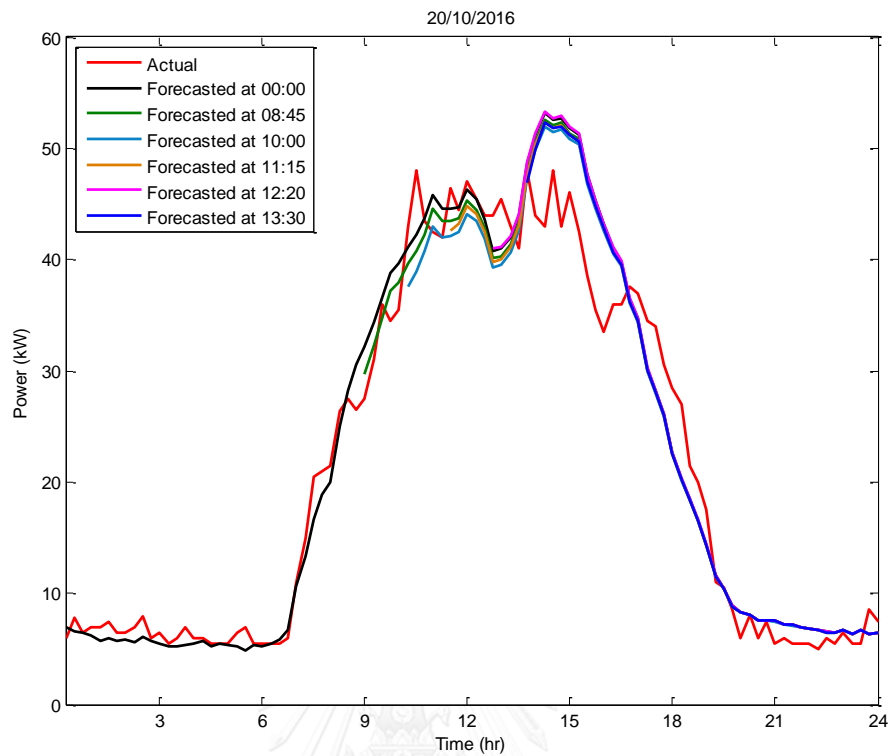
รูปที่ 4.27 การตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 19 ตุลาคม พ.ศ. 2559



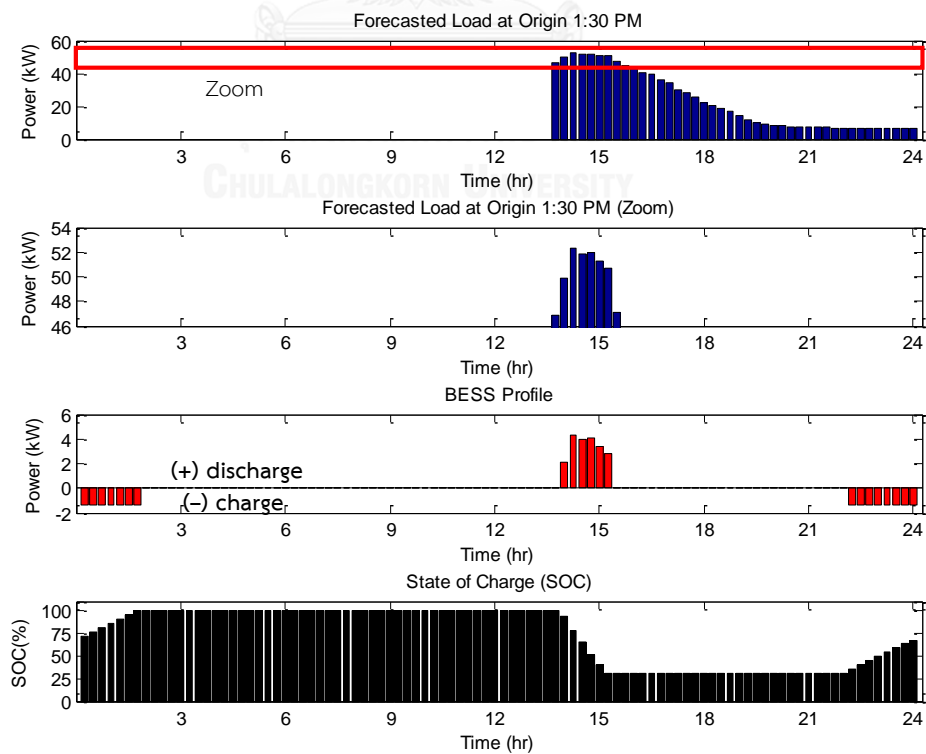
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 19 ตุลาคม พ.ศ.

2559

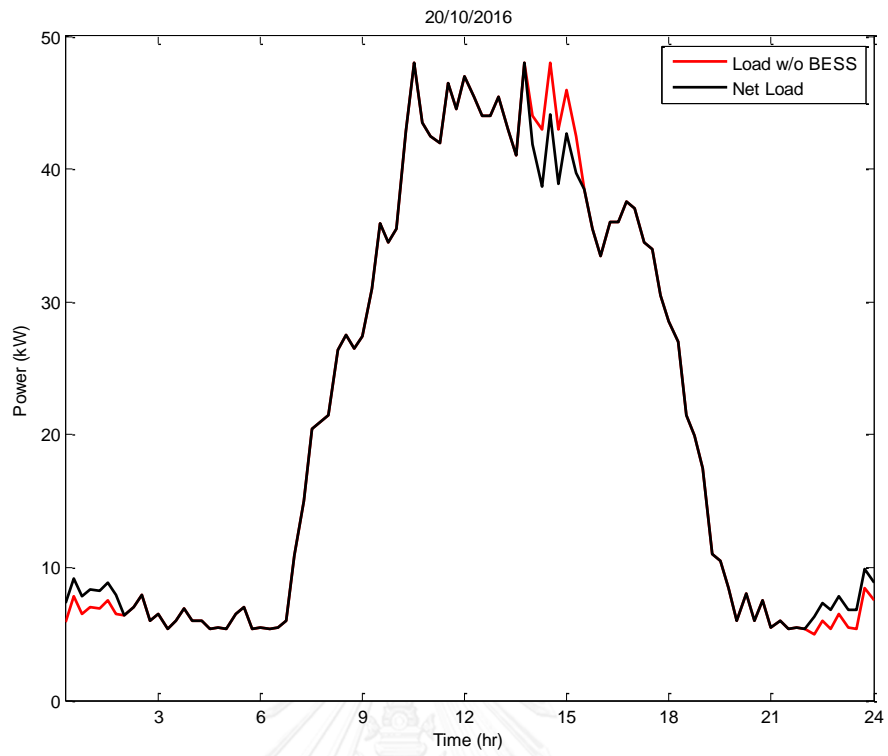
9) วันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.29 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์



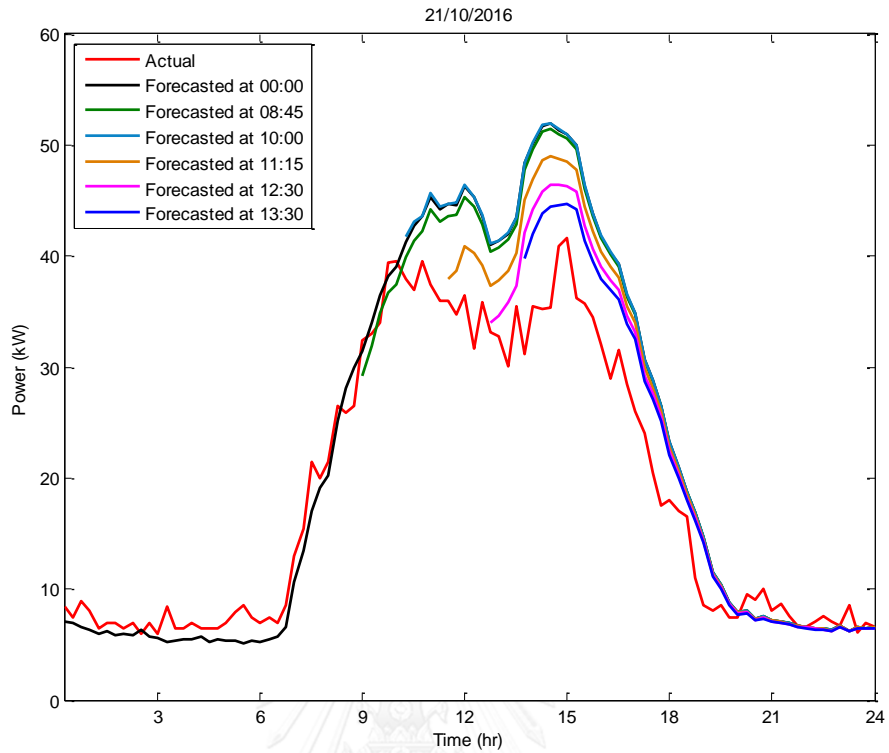
รูปที่ 4.30 การตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2559



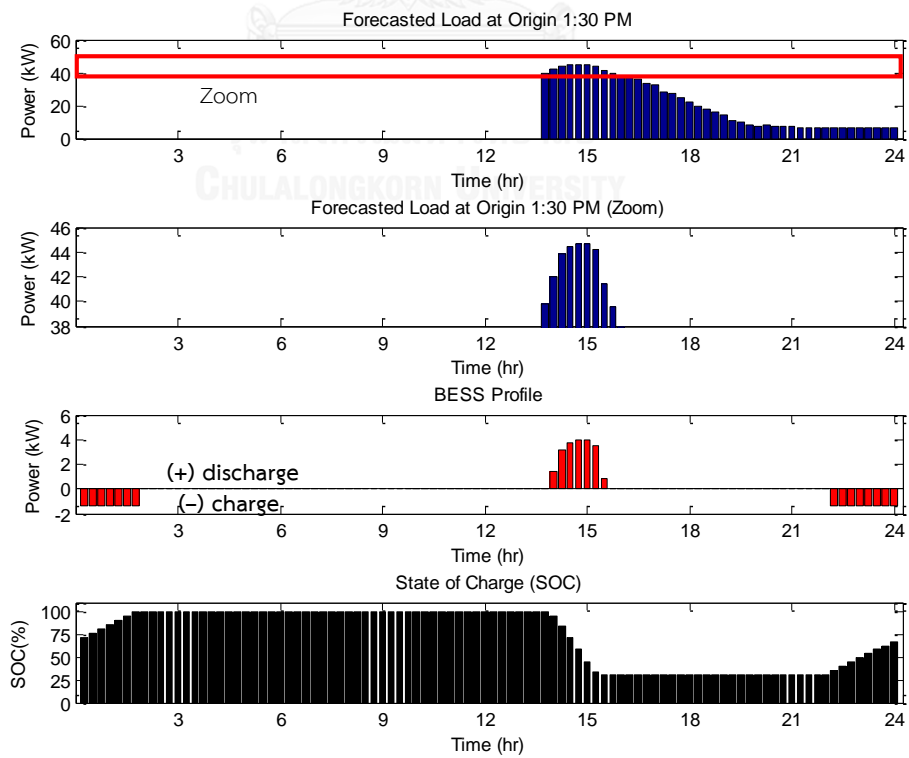
รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ.

2559

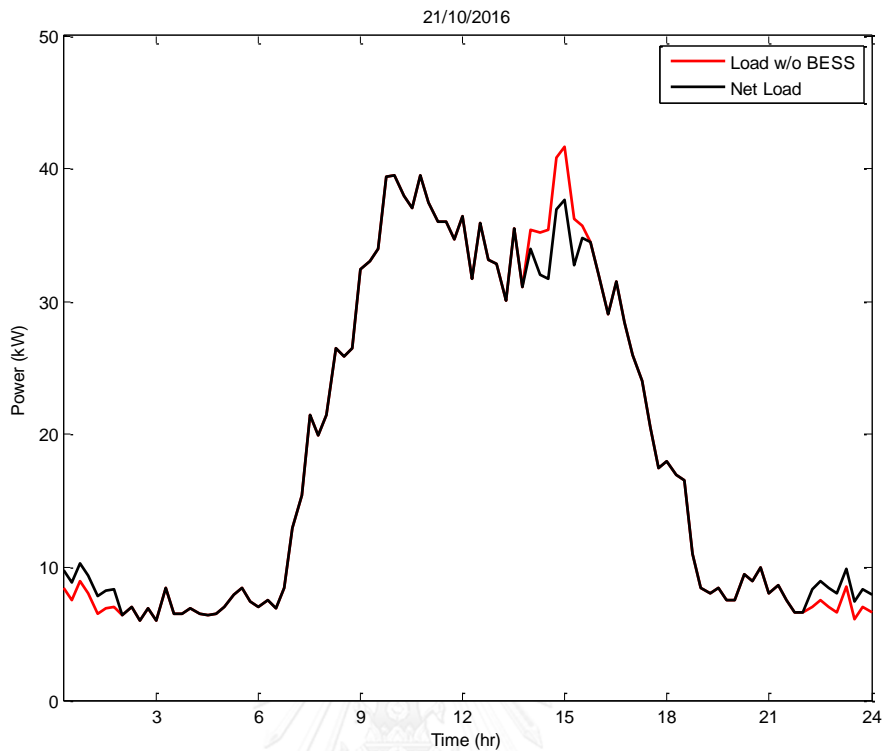
10) วันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.32 การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 แบบปรับจุดกำเนิดการพยากรณ์



รูปที่ 4.33 การตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์วันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559

จากรูปที่ 4.5 – รูปที่ 4.34 แสดงผลการทดสอบการตัดยอดโหลดของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ หากพิจารณาการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์จะพบว่า การเลื่อนจุดกำเนิดสามารถช่วยทำให้การพยากรณ์มีความแม่นยำโดยดูจากค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าจริง ทั้งนี้ หากพิจารณาลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะพบว่าในแต่ละวันมีขนาดกำลังที่แตกต่างกันเนื่องจากความต่างของลักษณะการใช้ไฟฟ้ายกตัวอย่างเช่น วันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2559 มีรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วยขนาดกำลังสูงสุดที่ประมาณ 4 kW ต่างจากวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2559 มีขนาดกำลังสูงสุดประมาณ 2.8 kW เท่านั้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะพบว่า การบริหารจัดการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ด้วยตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ชนิดเชื่อมต่อกิตและระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารที่มีการพยากรณ์โหลดและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ด้วยมาตรฐาน IEEE1888 สามารถใช้งานได้จริงโดยสามารถตัดยอดโหลดสูงสุด 4.06 kW ในวันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2559

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิมทสันต์ทั้ง 10 วัน

วัน/เดือน/ปี	ค่ายอดโหลดที่ลดได้ (kW)	วัน/เดือน/ปี	ค่ายอดโหลดที่ลดได้ (kW)
10/10/2559	0.40	17/10/2559	0
11/10/2559	3.95	18/10/2559	4.06
12/10/2559	1.22	19/10/2559	3.20
13/10/2559	2.97	20/10/2559	0
14/10/2559	0.97	21/10/2559	2.16



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้สาธิตการบริหารจัดการพลังงานด้านอุปทานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ที่มีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ชนิดเชื่อมต่อกฤตเพื่อตัดยอดโหลดด้วยมาตรฐาน IEEE1888 และพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ที่ช่วยบริหารจัดการพลังงานในอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ผ่านระบบ CUBEMS ด้วยมาตรฐาน IEEE1888 ประเด็นสำคัญของวิทยานิพนธ์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1) นำเสนอการบริหารจัดการพลังงานในอาคารด้านอุปทานด้วยมาตรฐานเปิด เนื่องจากงานวิจัย[3-6] เน้นการบริหารจัดการพลังงานในอาคารด้านอุปสงค์เท่านั้น แต่ด้วยการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีแนวโน้มสูงขึ้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการบริหารจัดการพลังงานในอาคารด้วยตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ชนิดเชื่อมต่อกฤต มีการติดตั้งเกตเวย์ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ในระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วยมาตรฐาน IEEE1888 โดยสาธิตการตัดยอดโหลดอาคารอาคารบุญรอด บิณฑสันต์
- 2) นำเสนอการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ล่วงหน้า เพื่อกำหนดรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่สำหรับตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ระเบียบวิธี Box-Jenkins สำหรับพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ เนื่องจากปริมาณการใช้ไฟฟ้าของอาคารนี้มีลักษณะเป็นคาบแบบรายวันและข้อมูลแต่ละช่วงเวลามีความเกี่ยวข้องกัน ทั้งนี้ชนิดและปริมาณข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลองมีผลต่อความแม่นยำในการพยากรณ์ด้วย จากการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าด้วยข้อมูลในช่วงฤดูกาลแบบรวมทุกวัน มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยต่ำที่สุดคือ 19.156% แม้ว่าจะมีค่าค่อนข้างสูงแต่หากพิจารณาถึงการปรับการพยากรณ์ให้เป็นปัจจุบัน ทั้งนี้อาศัยวิธีการเปลี่ยนจุดกำเนิดการพยากรณ์เมื่อมีข้อมูลใหม่ จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยมีค่าลดลง
- 3) พัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ด้วยตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ชนิดเชื่อมต่อกฤต ที่มีการพยากรณ์โหลดและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ด้วยมาตรฐาน IEEE1888 จากการทดสอบการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ระหว่างวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2559 – วันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เฉพาะวันทำงาน (วันจันทร์ – วันศุกร์) จำนวน 10 วัน สามารถตัดยอดโหลดได้สูงสุด 4.06 kW

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

แม้ว่าการทดสอบการตัดยอดโหลดสำหรับอาคารด้วยตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ชนิดเชื่อมต่อกับกริดและระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารที่มีการพยากรณ์โหลดและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ด้วยมาตรฐาน IEEE1888 จะสามารถทำงานได้จริงแล้วก็ตาม แต่ยังมีประเด็นที่สามารถศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารทำงานได้ดียิ่งขึ้นดังต่อไปนี้

- 1) การบริหารจัดการพลังงานในอาคารด้านอุปทานในวิทยานิพนธ์นี้มีเฉพาะตัวกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เท่านั้น หากมีการใช้แหล่งผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมด้วยจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดยอดโหลดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การพยายามใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ด้วยตนเอง (Self-consumption) ภายในอาคารยังเป็นอีกหนึ่งตัวอย่างสาธิตสำหรับระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคารอีกด้วย
- 2) การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้อาศัยข้อมูลการใช้ไฟฟ้าในอดีตเท่านั้น ทั้งนี้การใช้ข้อมูลอุณหภูมิโดยรอบ (Ambient Temperature) อาจทำให้การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้ามีความแม่นยำเพิ่มขึ้นได้

รายการอ้างอิง

- [1] ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน, สถานการณ์พลังงานไทย ปี 2557. 2558.
- [2] ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน, สถานการณ์พลังงานไทย ปี 2558. 2559.
- [3] KyungGyu, P., et al. *Building Energy Management System based on Smart Grid*. in 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). 2011.
- [4] Khamphanchai, W., et al. *Conceptual architecture of building energy management open source software (BEMOSS)*. in IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe. 2014.
- [5] Ochiai, H., et al. *FIAP: Facility information access protocol for data-centric building automation systems*. in 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). 2011.
- [6] Ochiai, H. *Power data management on the Internet space: Green ICT projects in Japan*. in 2012 IEEE Colombian Communications Conference (COLCOM). 2012.
- [7] *Building-To-Grid Technical Opportunities*, U.S.D.o. Energy, Editor. 2014.
- [8] *IEEE Standard for Ubiquitous Green Community Control Network Protocol*. IEEE Std 1888-2011, 2011: p. 1-65.
- [9] *Modbus Application Protocol Specification*. 2012.
- [10] Hernandez, L., et al., *A Survey on Electric Power Demand Forecasting: Future Trends in Smart Grids, Microgrids and Smart Buildings*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014. 16(3): p. 1460-1495.
- [11] Lim, J.H., et al. *Short-term load forecasting for educational buildings with temperature correlation*. in 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. 2013.
- [12] Massana, J., et al., *Short-term load forecasting in a non-residential building contrasting models and attributes*. Energy and Buildings, 2015. 92: p. 322-330.
- [13] Penya, Y.K., C.E. Borges, and I. Fernández. *Short-term load forecasting in non-residential Buildings*. in AFRICON, 2011. 2011.

- [14] Chae, Y.T., et al., *Artificial neural network model for forecasting sub-hourly electricity usage in commercial buildings*. Energy and Buildings, 2016. 111: p. 184-194.
- [15] *Spectrum Power MGMS Application*, Siemens, Editor. 2015.
- [16] Bowerman, B.L. and R.T. O'Connell, *Time Series and Forecasting: an Applied Approach*. 1979: Duxbury Press.
- [17] Box, G.E.P., G.M. Jenkins, and G.C. Reinsel, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 4 ed. 2008: Wiley.
- [18] Makridakis, S.G., S.C. Wheelwright, and R.J. Hyudman, *Forecasting: Methods and Applications*. 2 ed. 1983: Wiley.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ได้ติดตั้งไว้แล้วที่อาคารบุญรอด
บิณฑสันต์ โดยมีรายละเอียดคุณสมบัติต่างๆของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ดังต่อไปนี้

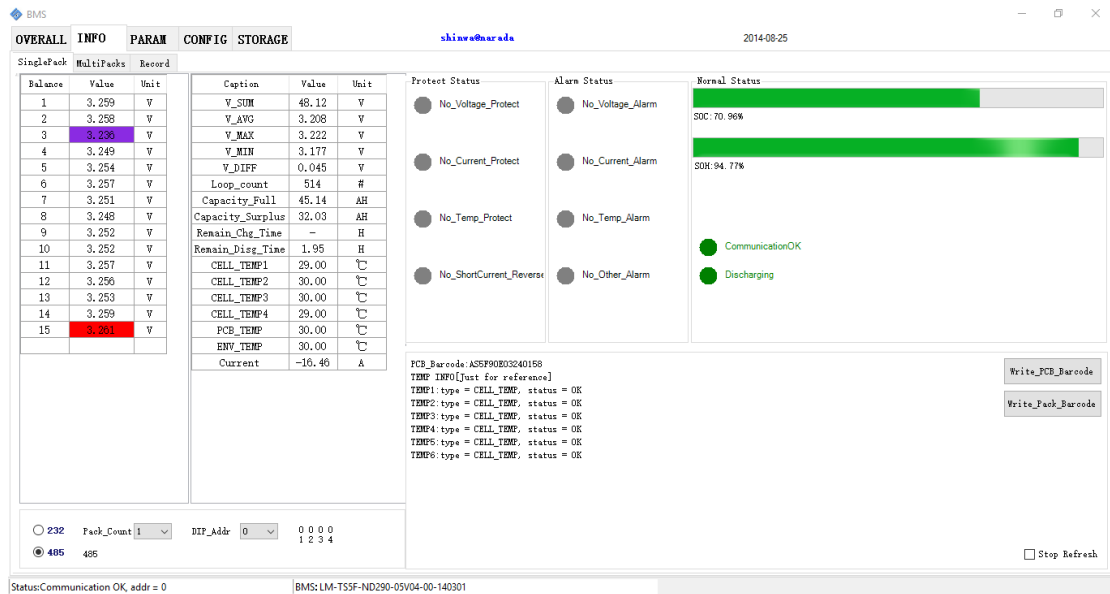
- แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO₄) รุ่น 48NPFC50 ของบริษัท NARADA



รูปที่ ก.1 แบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบ CUBEMS

Battery Specification		
Rated Voltage		48V
Rated Capacity		50Ah (C ₅ , 0.2C to 40.5V at 25°C)
Discharge Current (Max.)		40A
Discharge End Voltage		40.5V
Charge Current (Recomm.)		10A
Charge Current (Max.)		40A
Charge Voltage		54±0.5V
Dimensions	Width	442mm (17.40 inches)
	Depth	390mm (15.35 inches)
	Height	132.5mm (5.21 inches, 3U)
Typical Weight		32.0kg
Layout of Front Pannel		
Status Indicators		SOC / ALM / RUN
Communication Ports		RS232 / RS485
Communication in Parallel		16 models in maximum
Reset Key		Available
Terminal Size		M6 / 13mm (Screw size / Cable Width)
LCD Screen		Optional
Breaker		Optional
Operation Environments		
Temperature Range	Discharge	-20 to +60 °C
	Charge	0 to +60 °C
	Storage	0 to +40 °C
Temperature Recommendation	Discharge	+15 to +35 °C
	Charge	+15 to +35 °C
	Storage	+15 to +30 °C
Humidity		5% to 95%

แบตเตอรี่ที่ได้ติดตั้งมีจำนวน 6 โมดูล มีความจุรวม 14.4 kWh ทั้งนี้แบตเตอรี่ดังกล่าวยังมีระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System; BMS) อาทิ การป้องกันแบตเตอรี่ (Battery Protection), การรักษาสสมดุลเซลล์แบตเตอรี่ (Cell Balancing) และการเฝ้าตรวจสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ (Battery Monitoring) ผ่านการสื่อสารรูปแบบ RS-232/RS-485 โดยมีโปรแกรมแสดงสถานะการทำงานดังแสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 ตัวอย่างสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ในขณะคายประจุ

- อินเวอร์เตอร์รุ่น Conext XW6048 230 50 ของบริษัท Schneider



รูปที่ ก.3 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานในระบบ CUBEMS

Device short name	XW6048 230 50
Electrical specifications	
Output power (continuous) at 40°C	6.0 kVA
Output power (surge) at 40°C	12.0 kVA (15 sec)
Output current	26.1 A
Peak output current (rms)	53 A
Input current at rated power	131 A
Type of signal	True sine wave
Automatic transfer relay	56 A
Typical transfer time	8 ms
DC input voltage (nominal)	50.4 V
Input voltage limits	40 to 64 V
Charging current	100 A
Power factor corrected charging	0.98
Auxiliary relay output	0 to 12 V, maximum 250 mA DC
Power consumption (search mode)	< 7 W
AC input voltage (nominal)	230 V +/- 3%
Input voltage limits (bypass/charge mode)	165 to 280 V (230 V nominal)
Frequency	50 Hz +/- 0.1 Hz
AC input frequency range (bypass/charge mode)	40 to 68 Hz (50 Hz nominal)
Total harmonic distortion (THD)	< 5% at rated power
AC connections	AC1 (Grid), AC2 (Generator)
AC input breaker	60 A single-pole
Efficiency	
Peak	95.4%

- อุปกรณ์เชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ Conext ComBox



รูปที่ ก.4 อุปกรณ์เชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานในระบบ CUBEMS

ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์นั้นต้องอาศัยอุปกรณ์ Conext ComBox ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ผ่านการสื่อสารรูปแบบ RS-485 ด้วยมาตรฐาน Modbus โดย Conext ComBox จะเป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับเกตเวย์ในวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งนี้การสื่อสารระหว่าง Conext ComBox และเกตเวย์จะใช้มาตรฐานการสื่อสาร Modbus สำหรับรายละเอียดของรีจิสเตอร์ที่ใช้งานในวิทยานิพนธ์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ก.1 ทั้งนี้ข้อมูลต่างๆของอินเวอร์เตอร์ Conext XW จะถูกอ่านและบันทึกค่าไปยังหน่วยเก็บข้อมูลของระบบ CUBEMS (<http://www.bems.ee.eng.chula.ac.th>) ทุกๆ 30 วินาทีโดยมี Point ID แสดงได้ดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.1 สถานะของรีจิสเตอร์สำหรับแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์ Conext XW

No.	Modbus Address	Name	Type	Read/write (R/W)	Unit	Scale	Offset	Note
(1)	0x0050	Battery Voltage	uint32	R	V	0.001	0.0	
(2)	0x0052	Battery Current	sint32	R	A	0.001	0.0	
(3)	0x0054	Battery Power	sint32	R	W	1.0	0.0	
(4)	0x0062	Grid AC Voltage	uint32	R	V	0.001	0.0	
(5)	0x0064	Grid AC Current	sint32	R	A	0.001	0.0	
(6)	0x0066	Grid AC Power	sint32	R	W	1.0	0.0	
(7)	0x01B3	Grid Support	uint16	R/W		1.0	0.0	0=disable 1=enable
(8)	0x016F	Maximum Charge Rate	uint16	R/W	%	1.0	0	
(9)	0x01AA	Charge Block Start	uint16	R/W	min	1.0	0.0	
(10)	0x01AB	Charge Block Stop	uint16	R/W	min	1.0	0.0	
(11)	0x01B4	Maximum Sell Amps	uint32	R/W	A	0.001	0.0	
(12)	0x01AC	Load Shave Stop	uint16	R/W	min	1.0	0.0	
(13)	0x01AD	Load Shave Start	uint16	R/W	min	1.0	0.0	

ตารางที่ ก.2 Point ID ของข้อมูลแบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์ Conext XW ในหน่วยเก็บข้อมูล CUBEMS

No.	Point ID	รายละเอียด
(1)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ battery_voltage	แรงดันแบตเตอรี่
(2)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ battery_current	กระแสแบตเตอรี่
(3)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ battery_power	กำลังแบตเตอรี่
(4)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ grid_voltage	แรงดันกริด
(5)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ grid_current	กระแสกริด
(6)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ grid_power	กำลังกริด
(7)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ grid_support_mode	โหมดสนับสนุนกริด กรณีคายประจุ=1, กรณีอัดประจุและอื่นๆ=0
(8)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ max_charge_rate	กระแสอัดประจุสูงสุด (ไม่เกิน 60%)
(9)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ charge_block_start	เวลาเริ่มต้นการหยุดอัดประจุ
(10)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ charge_block_stop	เวลาสิ้นสุดการหยุดอัดประจุ
(11)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ max_sell_current	กระแสคายประจุสูงสุด (ไม่เกิน 26.1 A)
(12)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ load_shave_stop	เวลาสิ้นสุดการคายประจุ
(13)	http://phanumat.test.ee.eng.chula.ac.th/modbus/ load_shave_start	เวลาเริ่มต้นการคายประจุ

ภาคผนวก ข

การแปลงอนุกรมเวลาตามระเบียบวิธี Box-Jenkins

เนื่องจากแบบจำลองของระเบียบวิธี Box-Jenkins ใช้กับอนุกรมเวลาคงที่เท่านั้น แต่ข้อมูลการใช้ไฟฟ้า (y_t) เป็นอนุกรมเวลาไม่คงที่ (Non-stationary Time Series) เพราะค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาไม่คงที่ จึงต้องแปลง (Transformation) ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าให้เป็นอนุกรมเวลาคงที่ (z_t) ก่อน ด้วยการหาผลต่างดังสมการที่ (ข.1)

$$z_t = \underbrace{\nabla_L^D}_{\text{seasonal difference operator}} \underbrace{\nabla^d}_{\text{non-seasonal difference operator}} y_t = \underbrace{(1-B^L)^D}_{\text{seasonal difference operator}} \underbrace{(1-B)^d}_{\text{non-seasonal difference operator}} y_t \quad (\text{ข.1})$$

สัญลักษณ์ B (Backshift Operator) คือการเลื่อนตำแหน่งข้อมูลออกไป k คาบเวลา ดังแสดงในสมการที่ (ข.2)

$$B^k y_t = y_{t-k} \quad (\text{ข.2})$$

ตัวอย่างการหาผลต่างอันดับ 1 (First Differences) แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} z_t &= \nabla y_t \\ z_t &= (1-B)y_t \\ z_t &= y_t - B y_t \\ z_t &= y_t - y_{t-1} \end{aligned} \quad (\text{ข.3})$$

ตัวอย่างการหาผลต่างอันดับ 2 (Second Differences) แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} z_t &= \nabla^2 y_t \\ z_t &= (1-B)^2 y_t \\ z_t &= (1-2B+B^2)y_t \\ z_t &= y_t - 2B y_t + B^2 y_t \\ z_t &= y_t - 2y_{t-1} + y_{t-2} \end{aligned} \quad (\text{ข.4})$$

ตัวอย่างการหาผลต่างอันดับ 1 ของข้อมูลรายเดือน (First Seasonal Differences) กำหนด $D=1$ และ $L=96$ แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 z_t &= \nabla_{96} y_t \\
 z_t &= (1 - B^{96}) y_t \\
 z_t &= y_t - B^{96} y_t \\
 z_t &= y_t - y_{t-96}
 \end{aligned}
 \tag{ข.5}$$

ตัวอย่างการหาผลต่างกรณีกำหนดให้ $D=1$, $d=1$ และ $L=96$ แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 z_t &= \nabla_{96} \nabla y_t \\
 z_t &= (1 - B^{96})(1 - B) y_t \\
 z_t &= (1 - B^{96})(y_t - y_{t-1}) \\
 z_t &= (y_t - y_{t-1}) - B^{96}(y_t - y_{t-1}) \\
 z_t &= y_t - y_{t-1} - y_{t-96} + y_{t-97}
 \end{aligned}
 \tag{ข.6}$$

ภาคผนวก ค

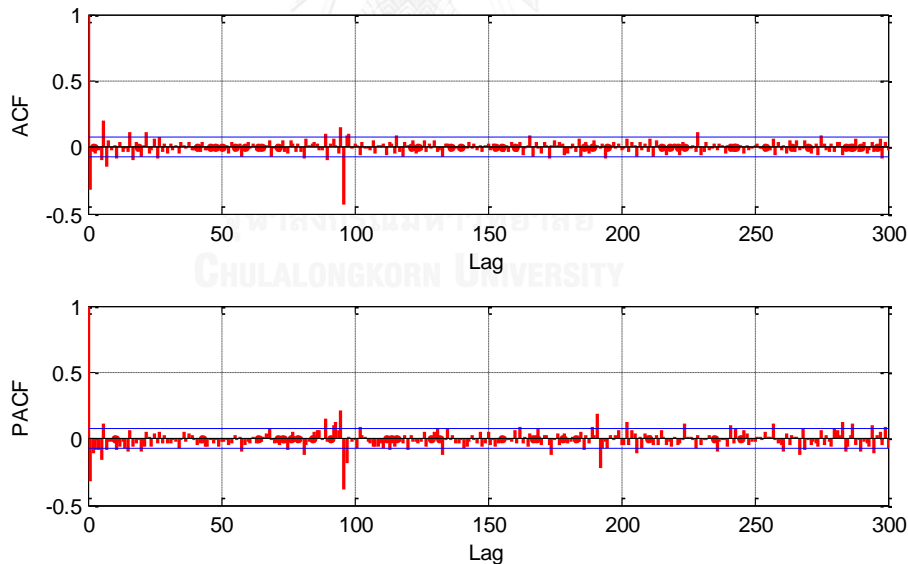
การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์

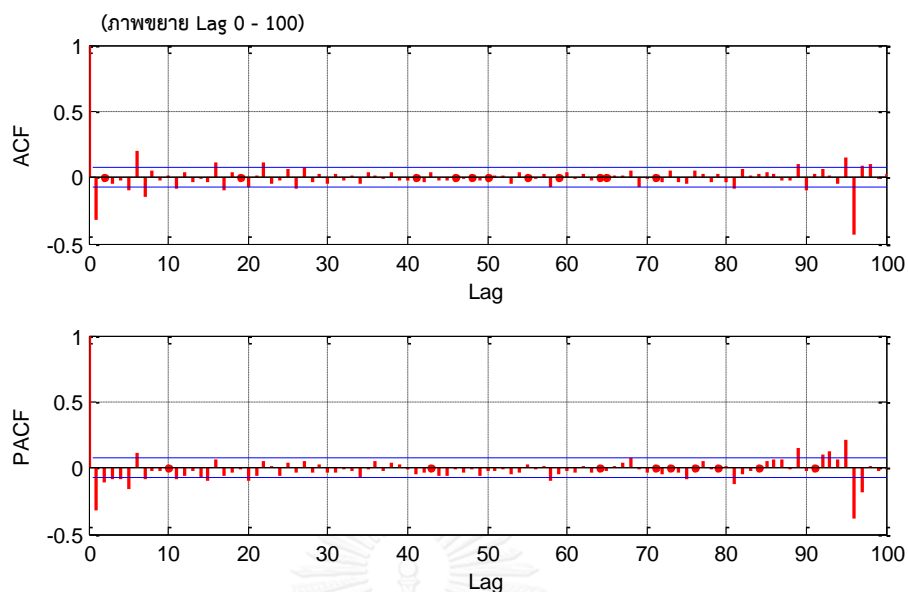
ตารางที่ ค.1 การใช้ข้อมูลย้อนหลังสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า

กรณี	ปริมาณข้อมูลย้อนหลัง	รูปที่
2	8 สิงหาคม พ.ศ. 2559 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559 (แยก จ-ศ)	ค.1 – ค.5
3	16 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559 (รวม จ-ศ)	ค.6
4	16 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559 (แยก จ-ศ)	ค.7 – ค.11
5	1 เมษายน พ.ศ. 2558 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559 (รวม จ-ศ)	ค.12
6	1 เมษายน พ.ศ. 2558 – วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2559 (แยก จ-ศ)	ค.13 – ค.17

การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ กรณีที่ 2

- วันจันทร์





รูปที่ ค.1 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที 2 วันจันทร์)

ในกรณีนี้แบบจำลอง $ARIMA(3, 1, 7) \times (0, 1, 1)_{96}$ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3 - \theta_4 B^4 - \theta_5 B^5 - \theta_6 B^6 - \theta_7 B^7)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

โดยที่ $\phi_1 = 0.36168$ $\theta_1 = -0.776236$ $\Theta_1 = -0.648062$

$\phi_2 = 0.522696$ $\theta_2 = -0.397909$

$\phi_3 = -0.069799$ $\theta_3 = 0.185586$

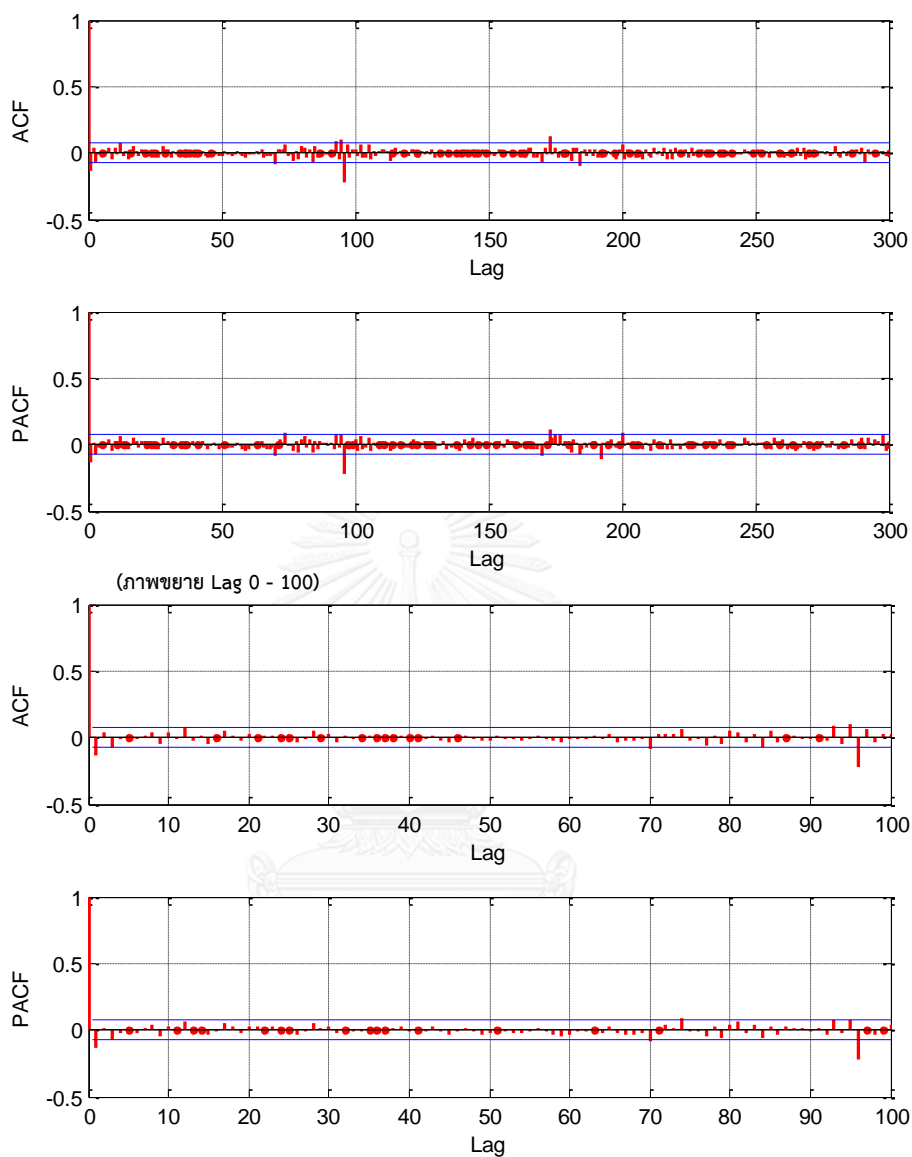
$\theta_4 = -0.0246254$

$\theta_5 = -0.00004295$

$\theta_6 = 0.196232$

$\theta_7 = -0.183004$

- วันอังคาร



รูปที่ ค.2 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที 2 วันอังคาร)

ในกรณีนี้แบบจำลอง ARIMA (5, 1, 1) × (0, 1, 1)₉₆ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3 - \phi_4 B^4 - \phi_5 B^5)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

โดยที่ $\phi_1 = -0.989528$ $\theta_1 = 0.884287$ $\Theta_1 = -0.242568$

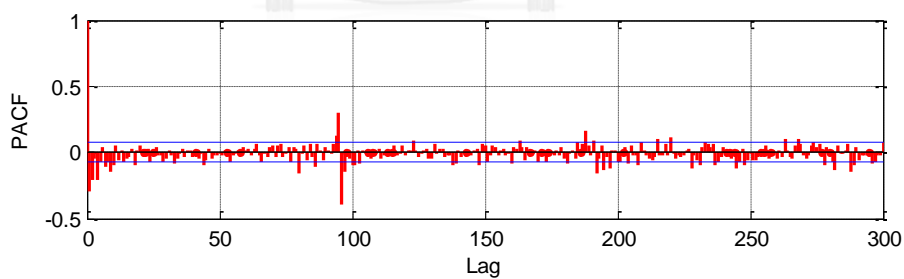
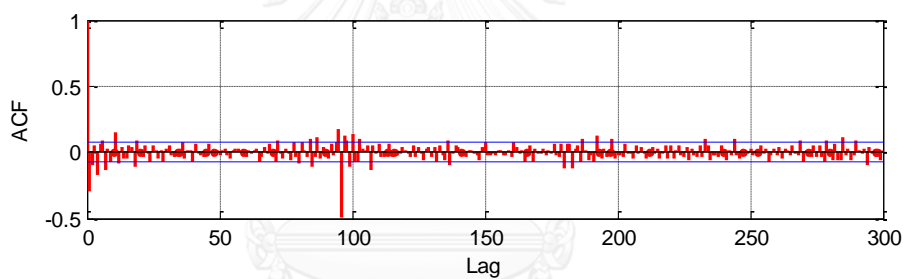
$$\phi_2 = -0.0900751$$

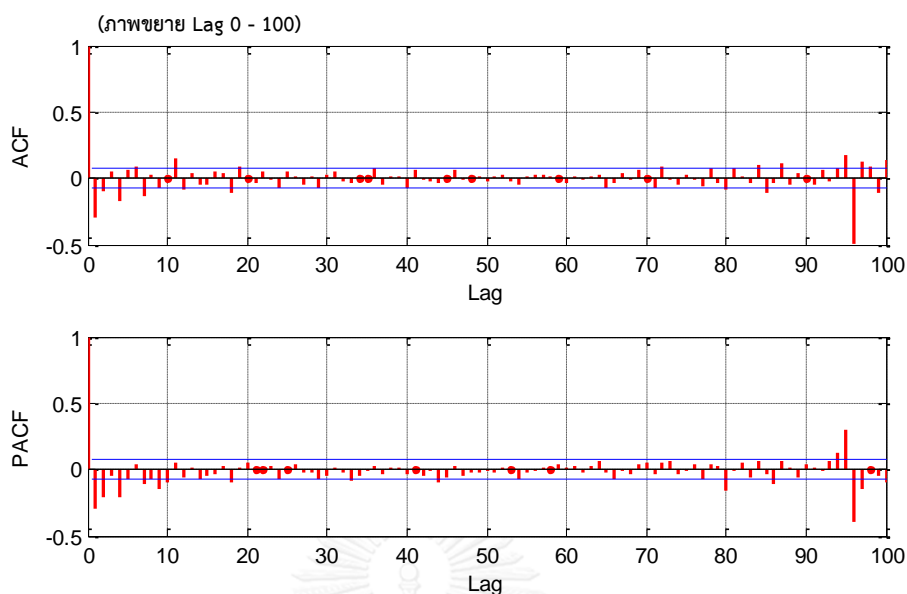
$$\phi_3 = -0.0497229$$

$$\phi_4 = -0.066865$$

$$\phi_5 = -0.0312194$$

- วันพุธ





รูปที่ ค.3 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที 2 วันพุธ)

ในกรณีนี้แบบจำลอง $ARIMA(4, 1, 4) \times (1, 1, 1)_{96}$ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3 - \phi_4 B^4)(1 - \Phi_1 B^{96})(1 - B^{96})(1 - B)y_t \\ = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3 - \theta_4 B^4)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

โดยที่ $\phi_1 = -0.575285$ $\theta_1 = 0.147074$ $\Phi_1 = -0.362997$ $\Theta_1 = -0.499955$

$$\phi_2 = -0.430618$$

$$\theta_2 = 0.157488$$

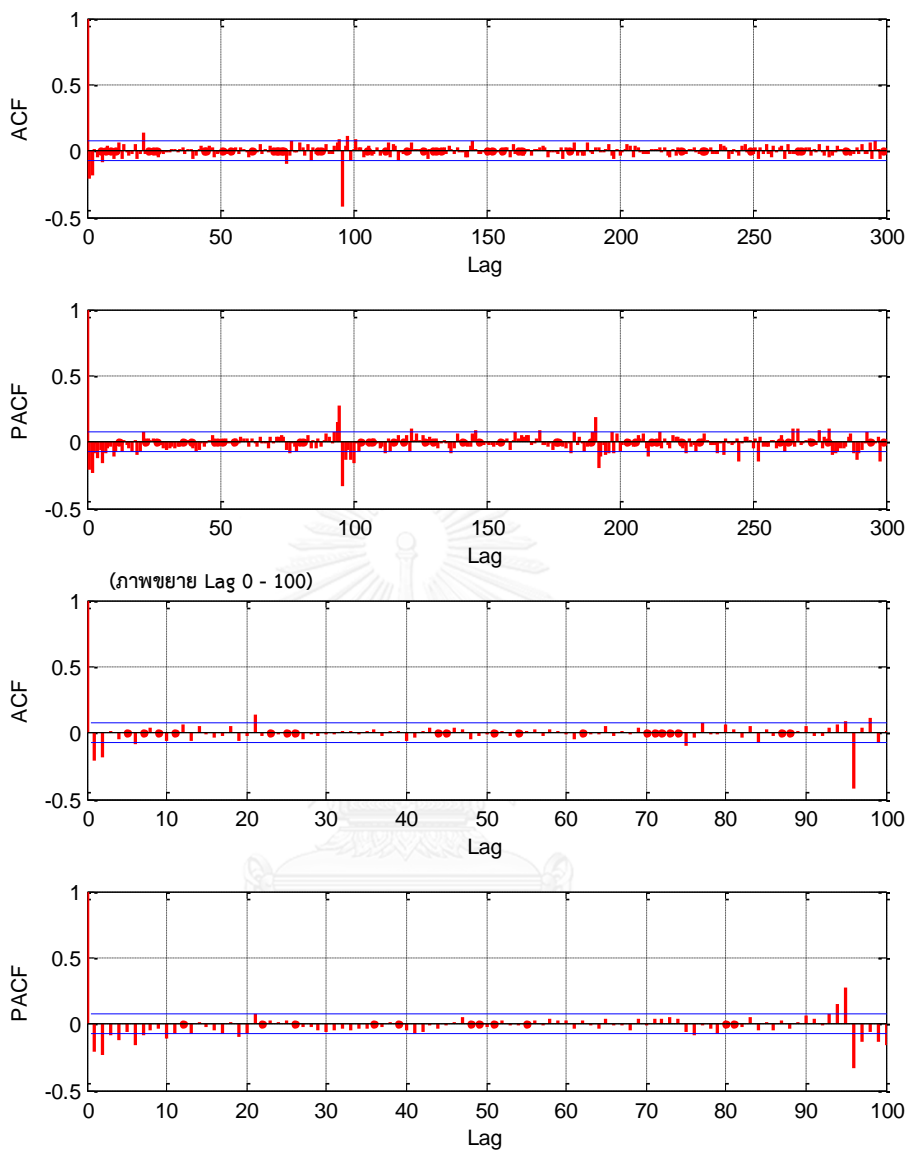
$$\phi_3 = -0.0294784$$

$$\theta_3 = -0.327759$$

$$\phi_4 = 0.209595$$

$$\theta_4 = -0.437236$$

● วันพฤหัสบดี



รูปที่ ค.4 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที 2 วันพฤหัสบดี)

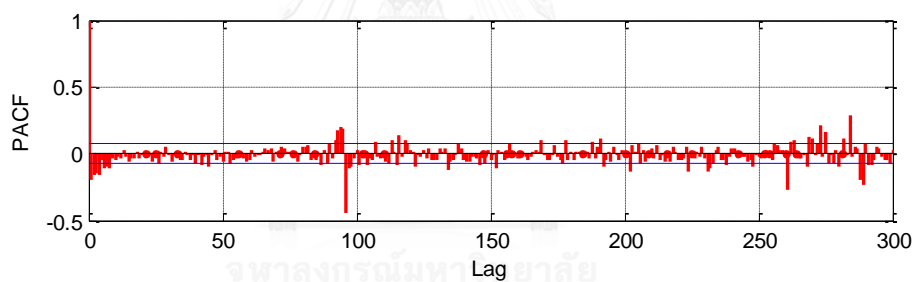
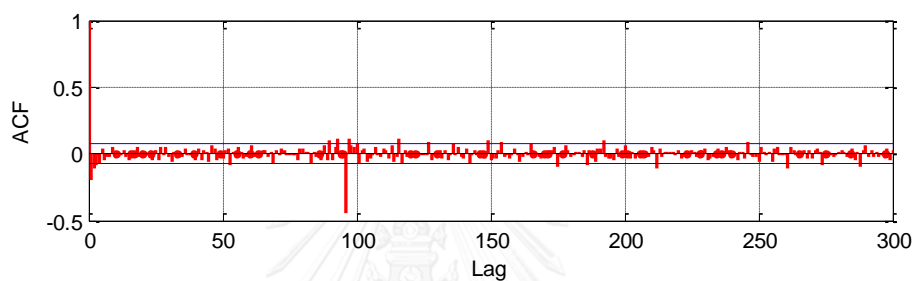
ในกรณีนี้แบบจำลอง ARIMA (2, 1, 2) × (0, 1, 1)₉₆ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

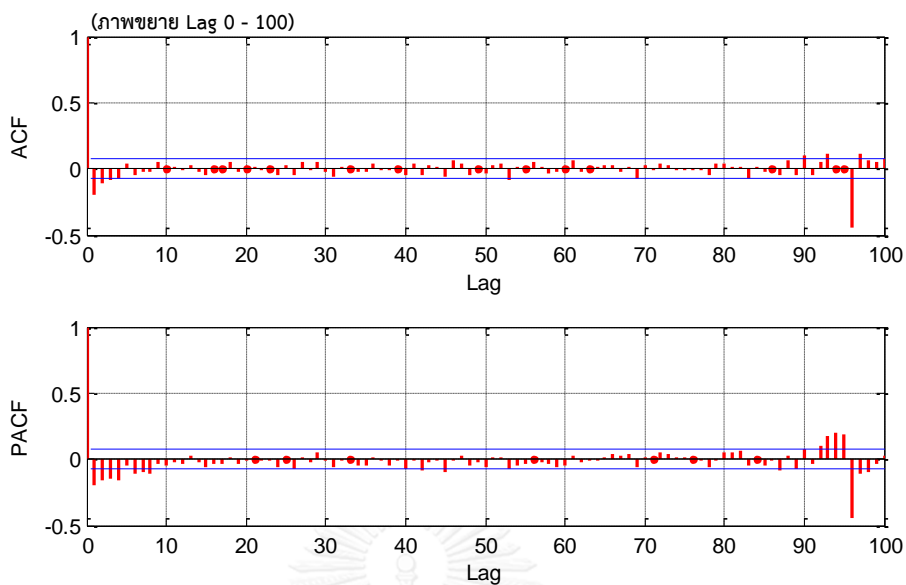
$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

$$\text{โดยที่ } \phi_1 = -0.136995 \quad \theta_1 = -0.232172 \quad \Theta_1 = -0.589416$$

$$\phi_2 = 0.272622 \quad \theta_2 = -0.58246$$

- วันศุกร์





รูปที่ ค.5 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที่ 2 วันศุกร์)

ในกรณีนี้แบบจำลอง $ARIMA(3, 1, 2) \times (1, 1, 1)_{96}$ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

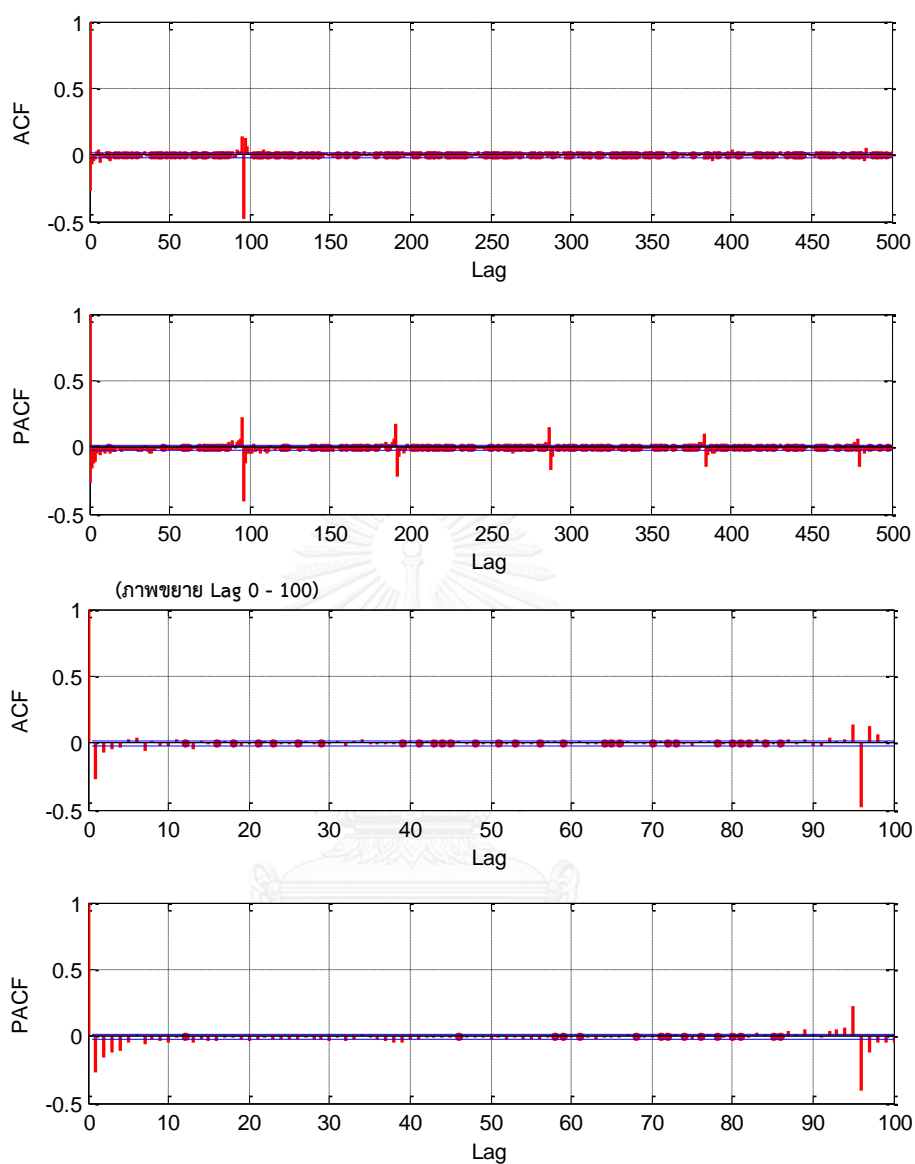
$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3)(1 - \Phi_1 B^{96})(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

โดยที่ $\phi_1 = 0.277234$ $\theta_1 = -0.679856$ $\Phi_1 = -0.307401$ $\Theta_1 = -0.616604$

$\phi_2 = 0.241532$ $\theta_2 = -0.320144$

$\phi_3 = 0.151851$

การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ กรณีที่ 3



รูปที่ ค.6 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที่ 3)

ในกรณีนี้แบบจำลอง ARIMA (4, 1, 4) × (0, 1, 1)₉₆ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3 - \phi_4 B^4)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3 - \theta_4 B^4)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

โดยที่ $\phi_1 = 0.302643$ $\theta_1 = -0.681195$ $\Theta_1 = -0.881305$

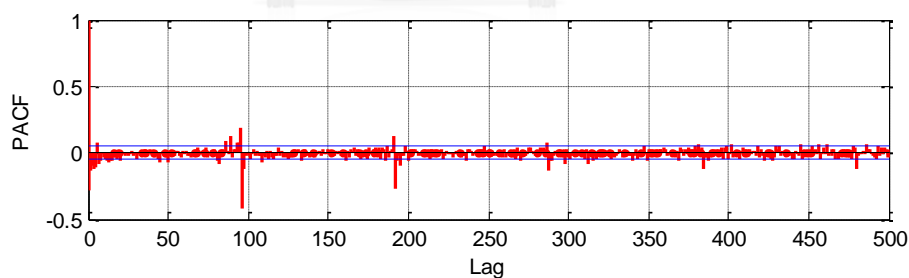
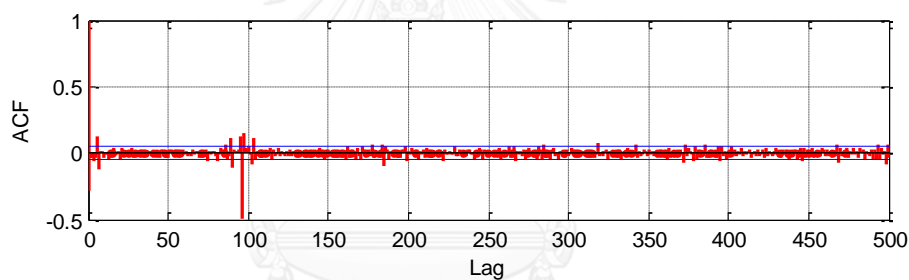
$\phi_2 = 0.163017$ $\theta_2 = -0.159747$

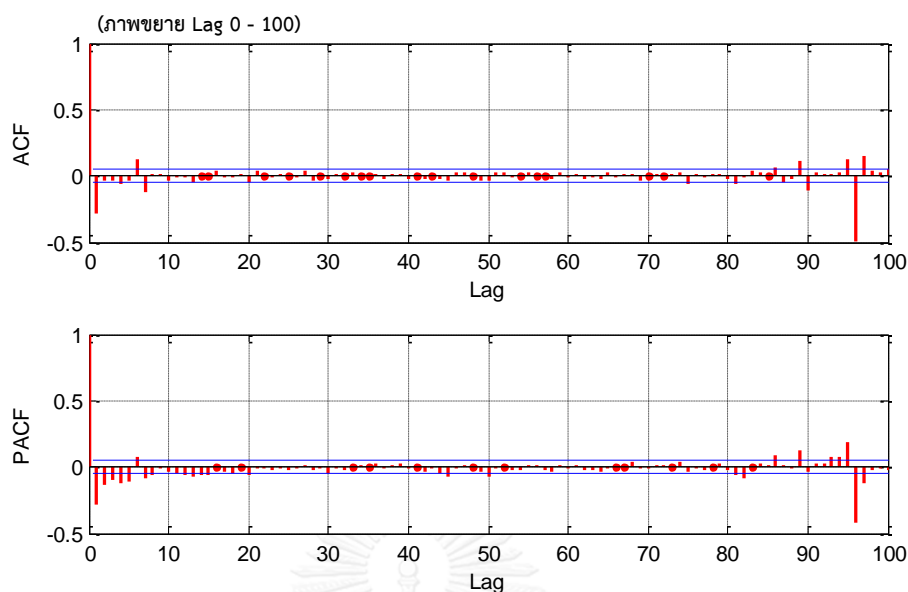
$\phi_3 = 0.661579$ $\theta_3 = -0.634596$

$\phi_4 = -0.258904$ $\theta_4 = 0.475538$

การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ กรณีที่ 4

- วันจันทร์





รูปที่ ค.7 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีี่ 4 วันจันทร์)

ในกรณีนี้แบบจำลอง $ARIMA(2, 1, 7) \times (0, 1, 1)_{96}$ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3 - \theta_4 B^4 - \theta_5 B^5 - \theta_6 B^6 - \theta_7 B^7)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

$$\text{โดยที่ } \phi_1 = 0.482927 \quad \theta_1 = -0.86163 \quad \Theta_1 = -0.749969$$

$$\phi_2 = 0.206913 \quad \theta_2 = -0.115477$$

$$\theta_3 = 0.0237189$$

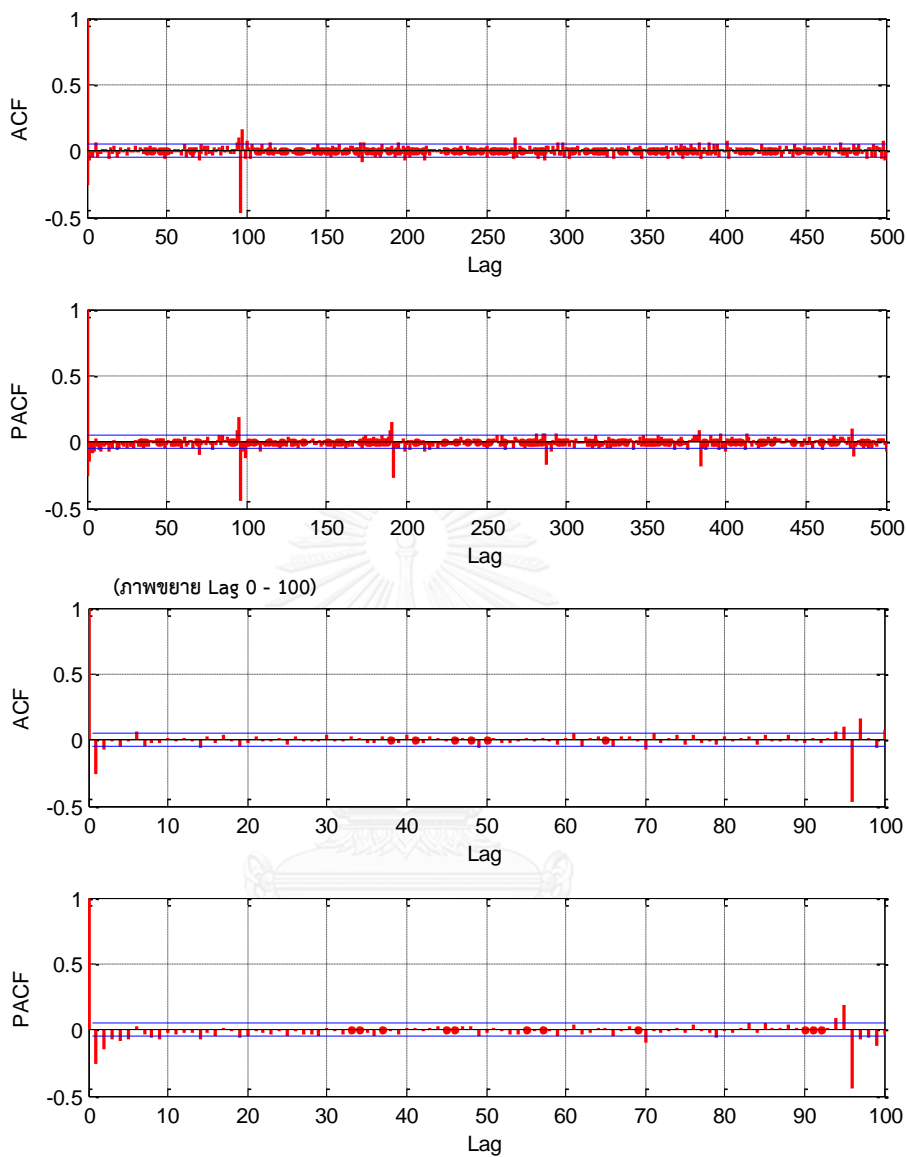
$$\theta_4 = -0.0162367$$

$$\theta_5 = 0.0615493$$

$$\theta_6 = 0.0857656$$

$$\theta_7 = -0.141296$$

- วันอังคาร



รูปที่ ค.8 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีี่ 4 วันอังคาร)

ในกรณีนี้แบบจำลอง $ARIMA(3, 1, 2) \times (0, 1, 1)_{96}$ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

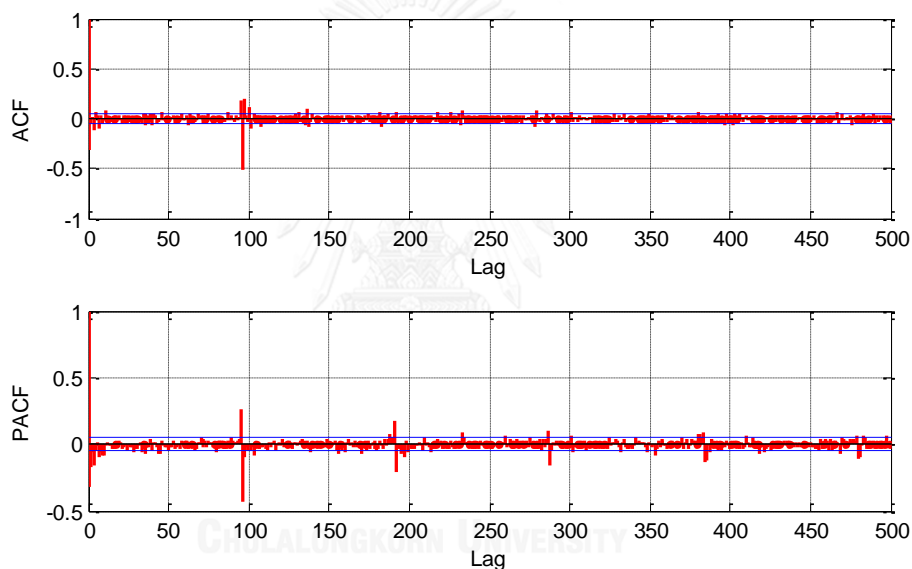
$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

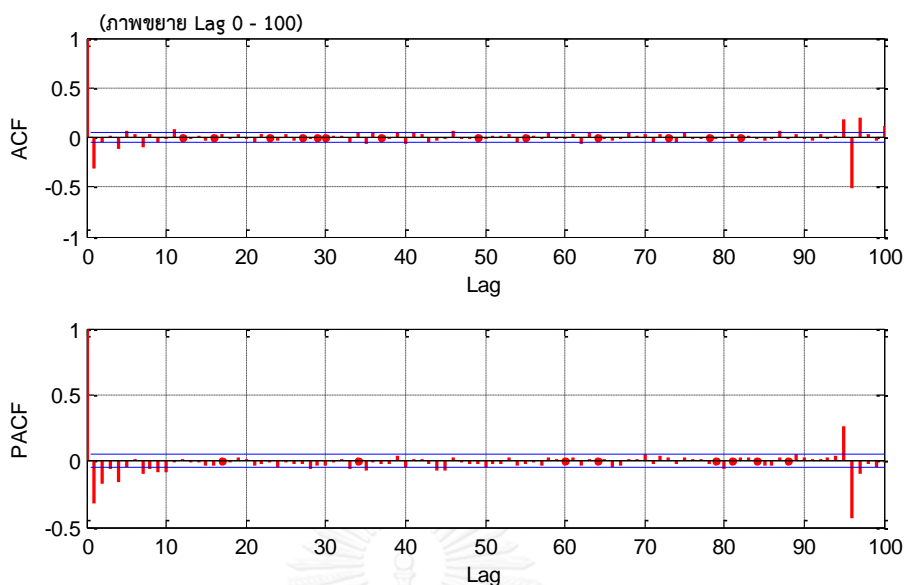
$$\text{โดยที่ } \phi_1 = -0.0385392 \quad \theta_1 = -0.290782 \quad \Theta_1 = -0.824713$$

$$\phi_2 = 0.612374 \quad \theta_2 = -0.682936$$

$$\phi_3 = 0.144649$$

- วันพุธ





รูปที่ ค.9 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีี่ 4 วันพุธ)

ในกรณีนี้แบบจำลอง $ARIMA(10, 1, 2) \times (0, 1, 1)_{96}$ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3 - \phi_4 B^4 - \phi_5 B^5 - \phi_6 B^6 - \phi_7 B^7 - \phi_8 B^8 - \phi_9 B^9 - \phi_{10} B^{10})(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

โดยที่ $\phi_1 = -0.809659$ $\phi_6 = -0.20723$ $\theta_1 = 0.454157$ $\Theta_1 = -0.843091$

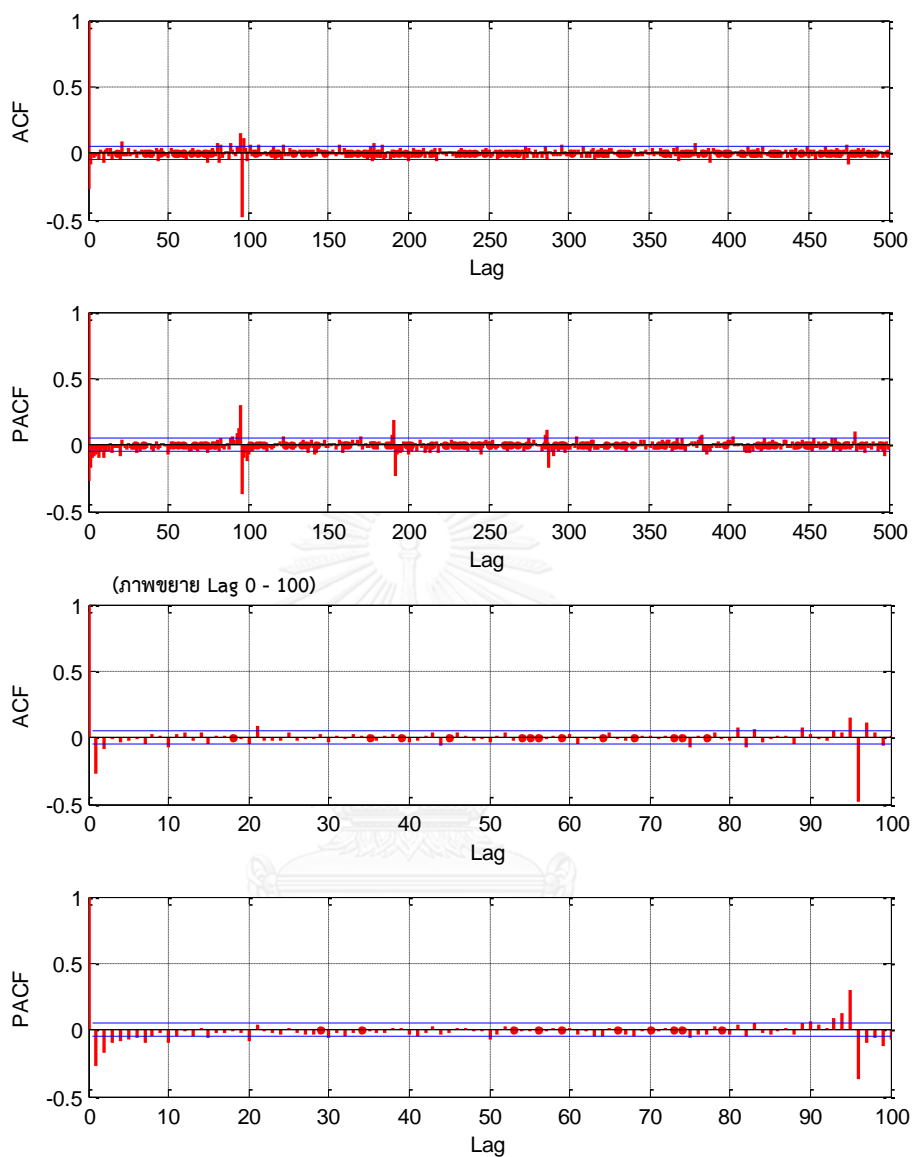
$\phi_2 = -0.91662$ $\phi_7 = -0.21287$ $\theta_2 = 0.53316$

$\phi_3 = -0.440944$ $\phi_8 = -0.163899$

$\phi_4 = -0.361137$ $\phi_9 = -0.140026$

$\phi_5 = -0.251617$ $\phi_{10} = -0.0822879$

- วันพฤหัสบดี



รูปที่ ค.10 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที 4 วันพฤหัสบดี)

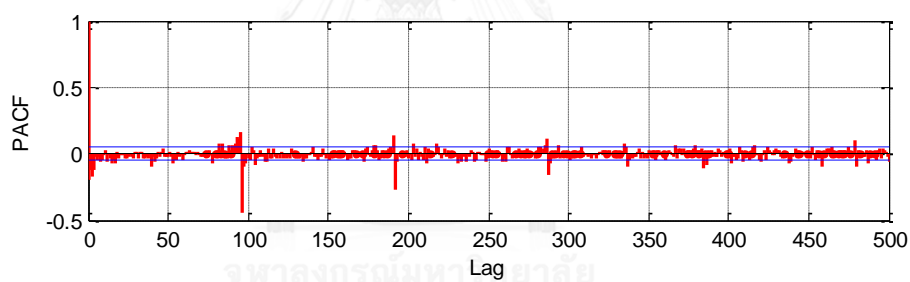
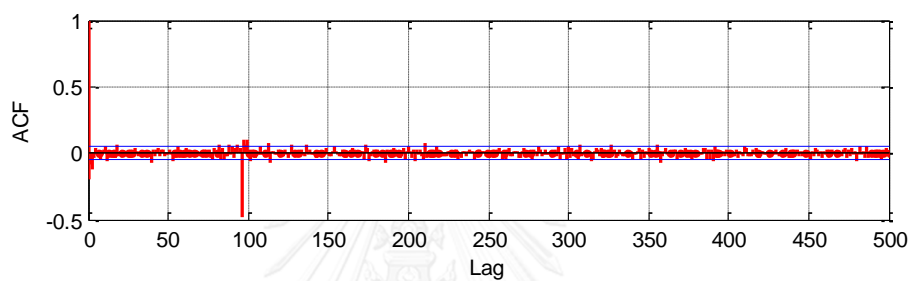
ในกรณีนี้แบบจำลอง ARIMA (1, 1, 2) × (0, 1, 1)₉₆ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

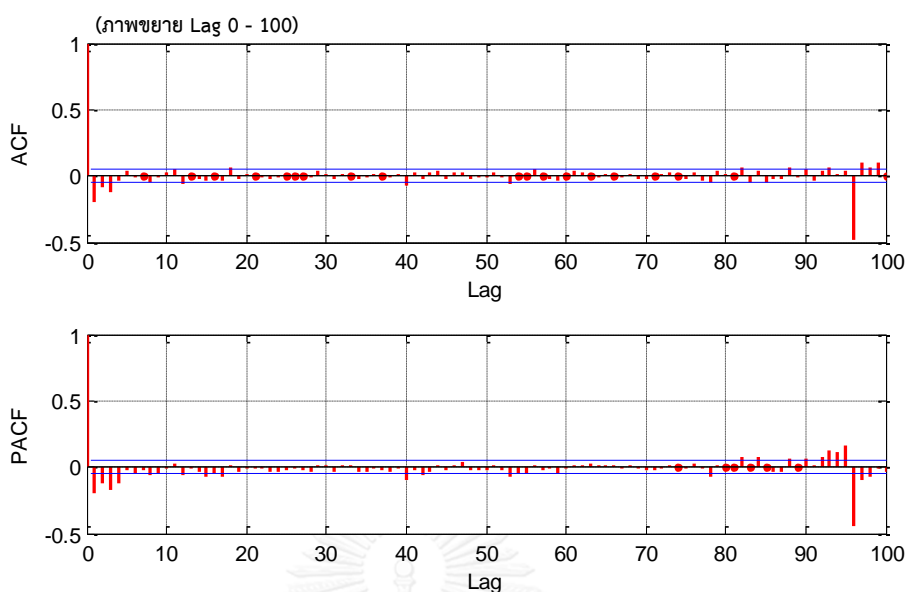
$$(1 - \phi_1 B)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

$$\text{โดยที่ } \phi_1 = 0.866936 \quad \theta_1 = -0.96824 \quad \Theta_1 = -0.78791$$

$$\theta_2 = 0.268236$$

- วันศุกร์





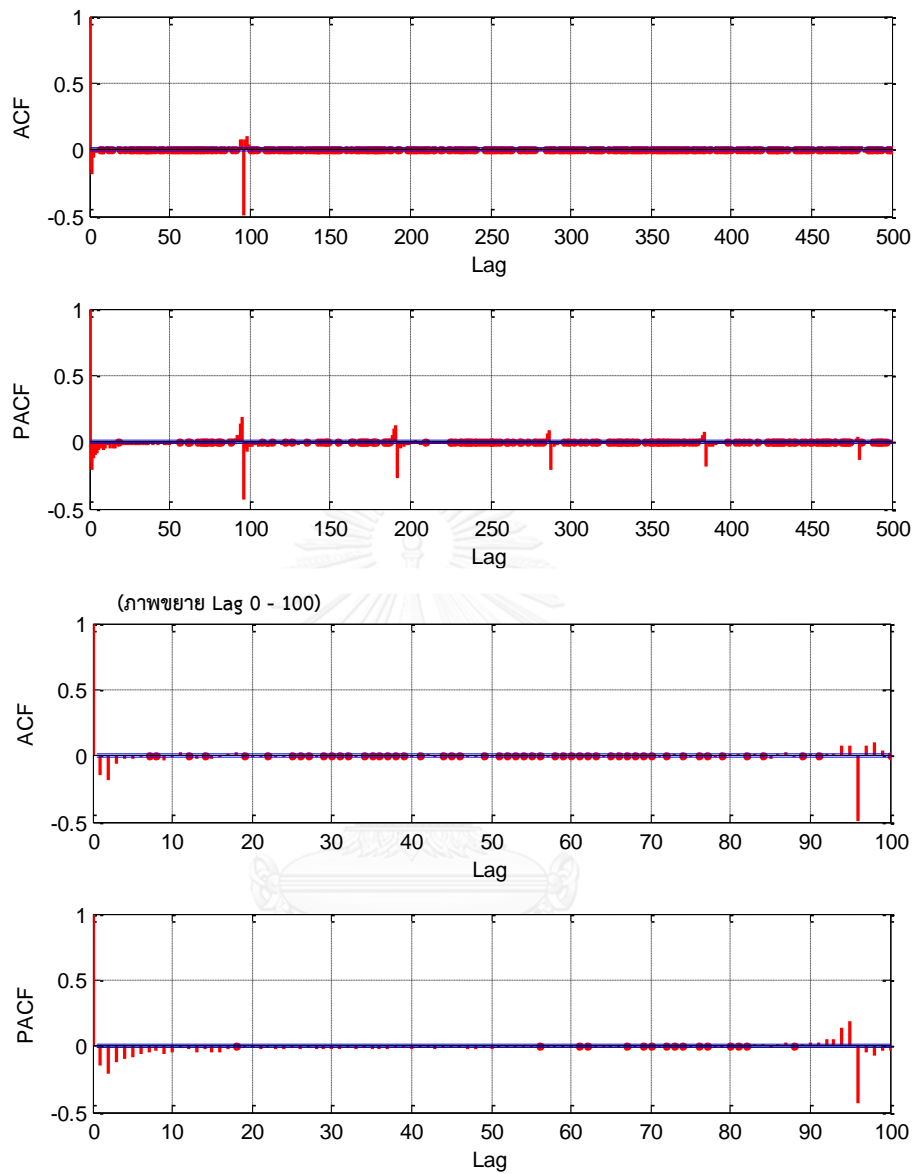
รูปที่ ค.11 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที 4 วันศุกร์)

ในกรณีนี้แบบจำลอง $ARIMA(1, 1, 2) \times (1, 1, 1)_{96}$ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B)(1 - \Phi_1 B^{96})(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

โดยที่ $\phi_1 = 0.814177$ $\theta_1 = -0.9408$ $\Phi_1 = -0.122602$ $\Theta_1 = -0.809468$
 $\theta_2 = 0.165703$

การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บีณทสันต์ กรณีที่ 5



รูปที่ ค.12 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บีณทสันต์ (กรณีที่ 5)

ในกรณีนี้แบบจำลอง ARIMA (4, 1, 3) × (0, 1, 1)₉₆ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3 - \phi_4 B^4)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

$$\text{โดยที่ } \phi_1 = 0.964353 \quad \theta_1 = -0.988601 \quad \Theta_1 = -0.93841$$

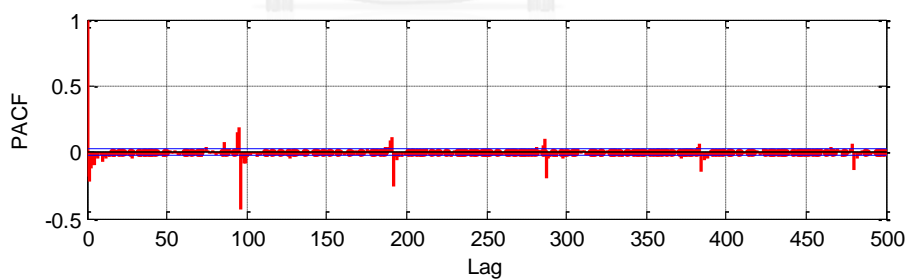
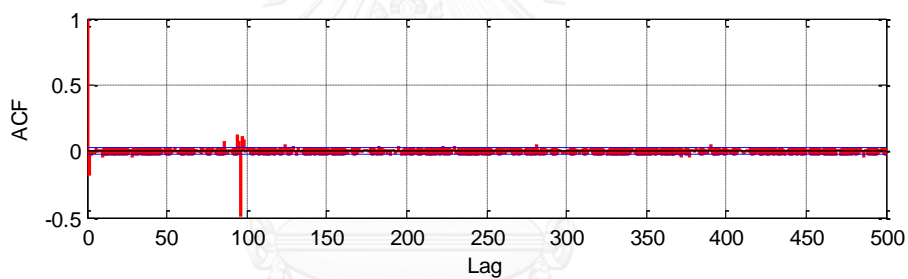
$$\phi_2 = -0.858545 \quad \theta_2 = 0.91981$$

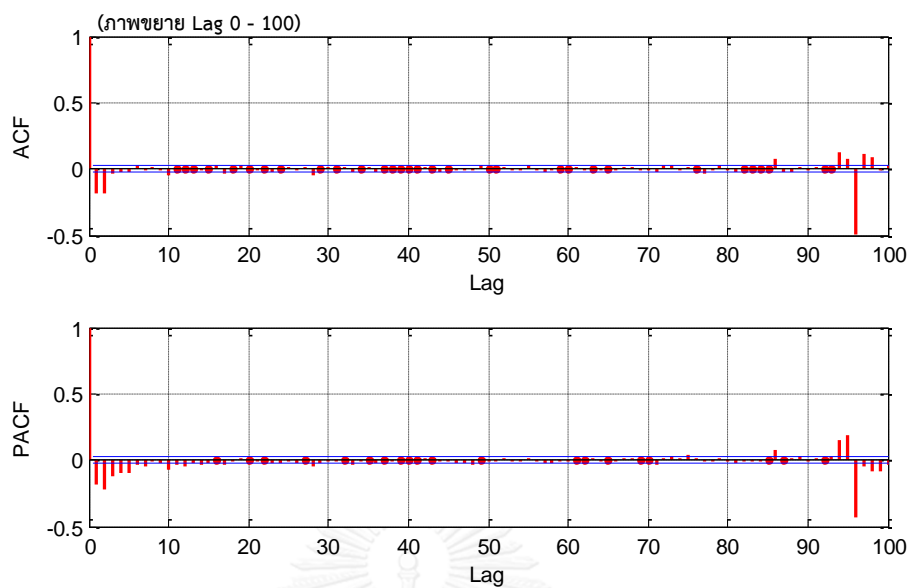
$$\phi_3 = 0.218586 \quad \theta_3 = -0.132881$$

$$\phi_4 = -0.0321333$$

การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ กรณีที่ 6

- วันจันทร์





รูปที่ ค.13 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที 6 วันจันทร์)

ในกรณีนี้แบบจำลอง ARIMA (8, 1, 3) × (0, 1, 1)₉₆ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3 - \phi_4 B^4 - \phi_5 B^5 - \phi_6 B^6 - \phi_7 B^7 - \phi_8 B^8)(1 - B^{96})(1 - B)y_t \\ = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

โดยที่ $\phi_1 = -0.656624$ $\theta_1 = 0.391922$ $\Theta_1 = -0.855855$

$\phi_2 = -0.000718583$ $\theta_2 = -0.395106$

$\phi_3 = 0.75769$ $\theta_3 = -0.987526$

$\phi_4 = 0.115304$

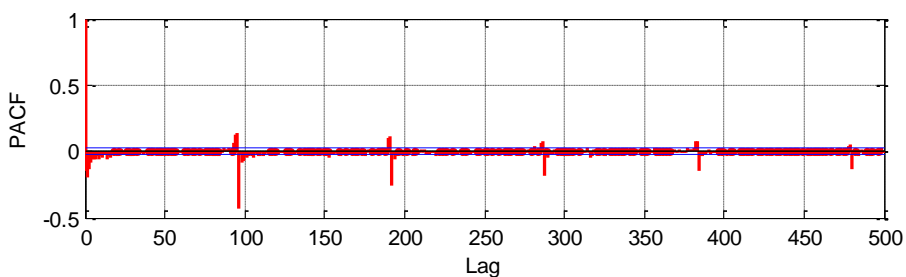
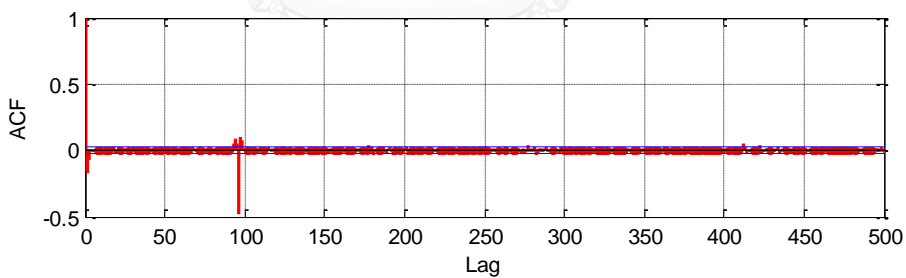
$\phi_5 = 0.154227$

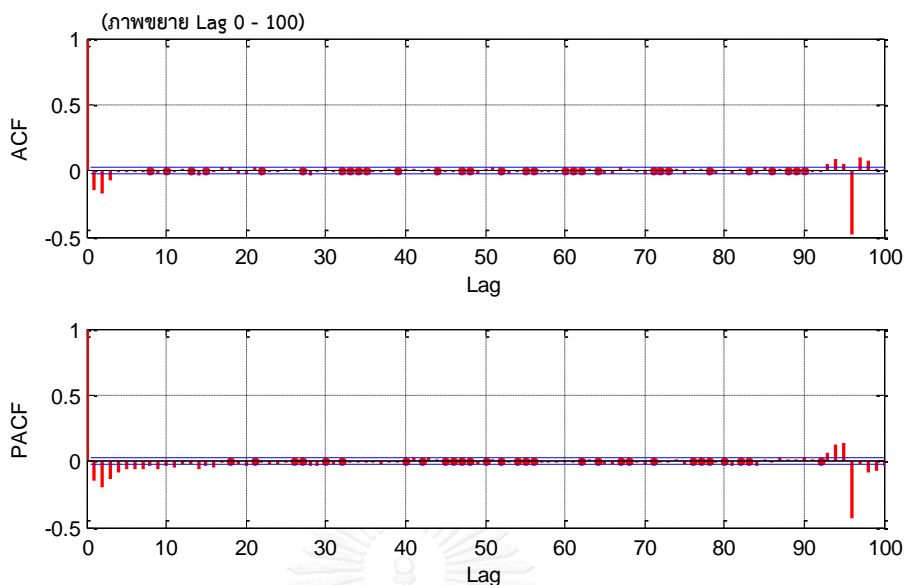
$\phi_6 = 0.133211$

$\phi_7 = 0.0961254$

$\phi_8 = 0.0533969$

● วันอังคาร





รูปที่ ค.14 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที 6 วันอังคาร)

ในกรณีนี้แบบจำลอง $ARIMA(4, 1, 3) \times (0, 1, 1)_{96}$ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3 - \phi_4 B^4)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

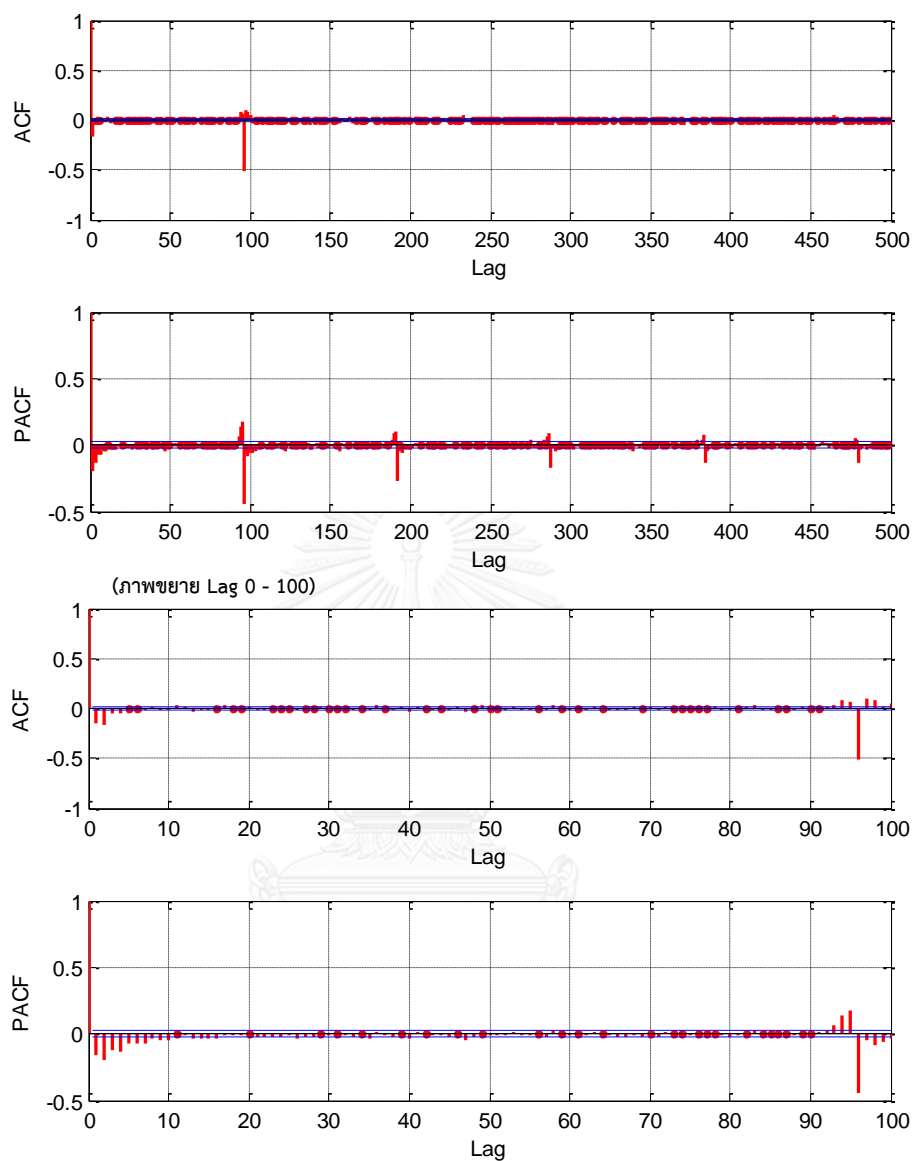
$$\text{โดยที่ } \phi_1 = 0.922232 \quad \theta_1 = -0.994362 \quad \Theta_1 = -0.871414$$

$$\phi_2 = 0.160457 \quad \theta_2 = -0.17714$$

$$\phi_3 = -0.196375 \quad \theta_3 = 0.322586$$

$$\phi_4 = 0.0529539$$

- วันพุธ



รูปที่ ค.15 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที 6 วันพุธ)

ในกรณีนี้แบบจำลอง ARIMA (2, 1, 4) × (0, 1, 1)₉₆ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3 - \theta_4 B^4)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

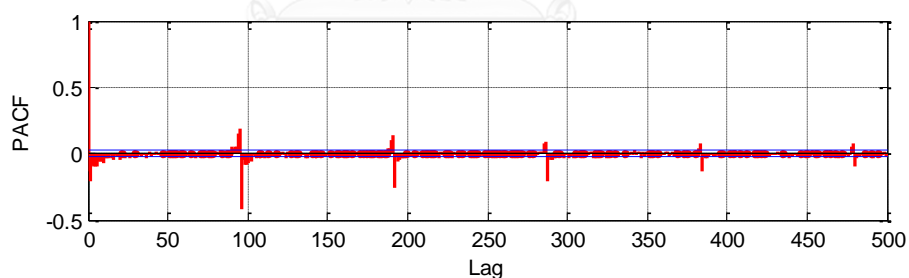
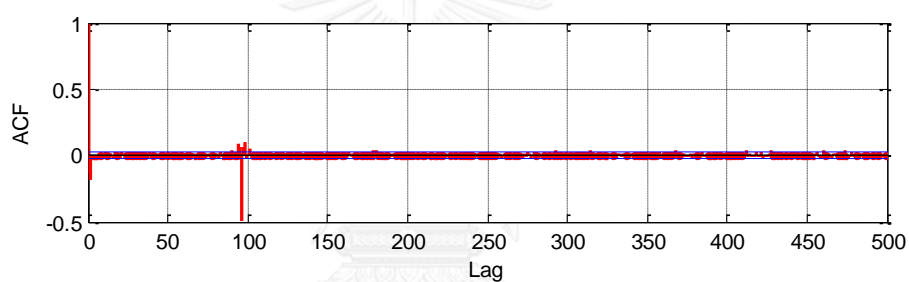
$$\text{โดยที่ } \phi_1 = 0.613357 \quad \theta_1 = -0.861394 \quad \Theta_1 = -0.878873$$

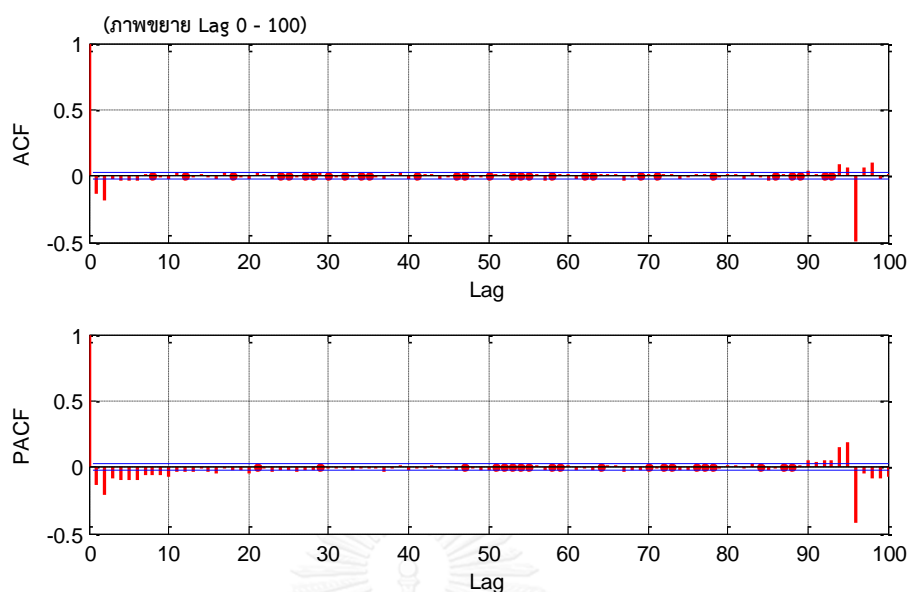
$$\phi_2 = 0.305915 \quad \theta_2 = -0.399178$$

$$\theta_3 = 0.148811$$

$$\theta_4 = 0.114236$$

- วันพฤหัสบดี





รูปที่ ค.16 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีวันที่ 6 วันพฤหัสบดี)

ในกรณีนี้แบบจำลอง $ARIMA(3, 1, 2) \times (0, 1, 1)_{96}$ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

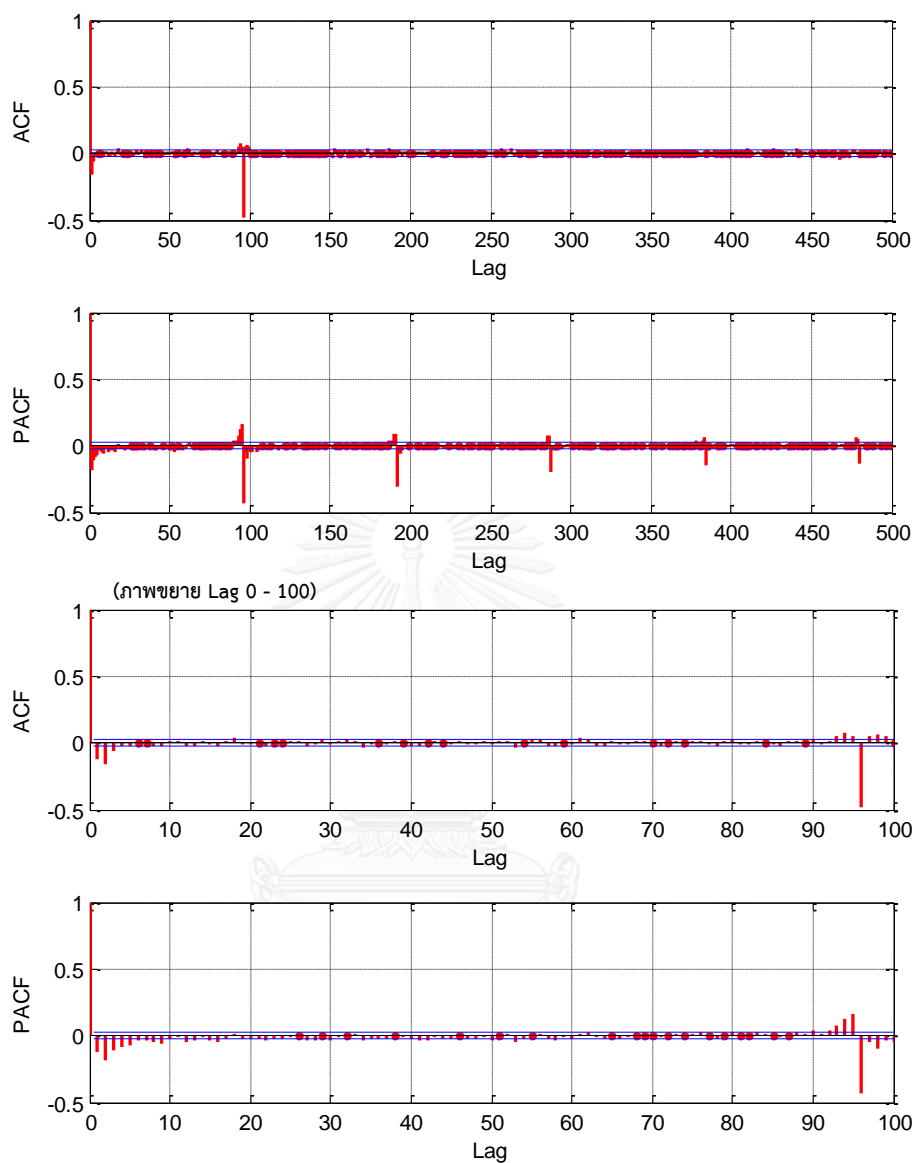
$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

โดยที่ $\phi_1 = 0.952214$ $\theta_1 = -0.975807$ $\Theta_1 = -0.862935$

$\phi_2 = -0.63322$ $\theta_2 = 0.759422$

$\phi_3 = 0.0804919$

- วันศุกร์



รูปที่ ค.17 ACF และ PACF ของผลต่างแบบไม่แปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1 ($d=1$) และ ผลต่างแบบแปรผันตามฤดูกาลอันดับ 1, $D=1$ (หรือผลต่างอันดับ 96, คาบเวลา $L=96$) ของการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (กรณีที 6 วันศุกร์)

ในกรณีนี้แบบจำลอง ARIMA (3, 1, 4) × (0, 1, 1)₉₆ มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังสมการ

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3)(1 - B^{96})(1 - B)y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3 - \theta_4 B^4)(1 - \Theta_1 B^{96})\varepsilon_t$$

$$\text{โดยที่ } \phi_1 = 0.751158 \quad \theta_1 = -0.944918 \quad \Theta_1 = -0.891526$$

$$\phi_2 = 0.220505 \quad \theta_2 = -0.31433$$

$$\phi_3 = -0.0505298 \quad \theta_3 = 0.190382$$

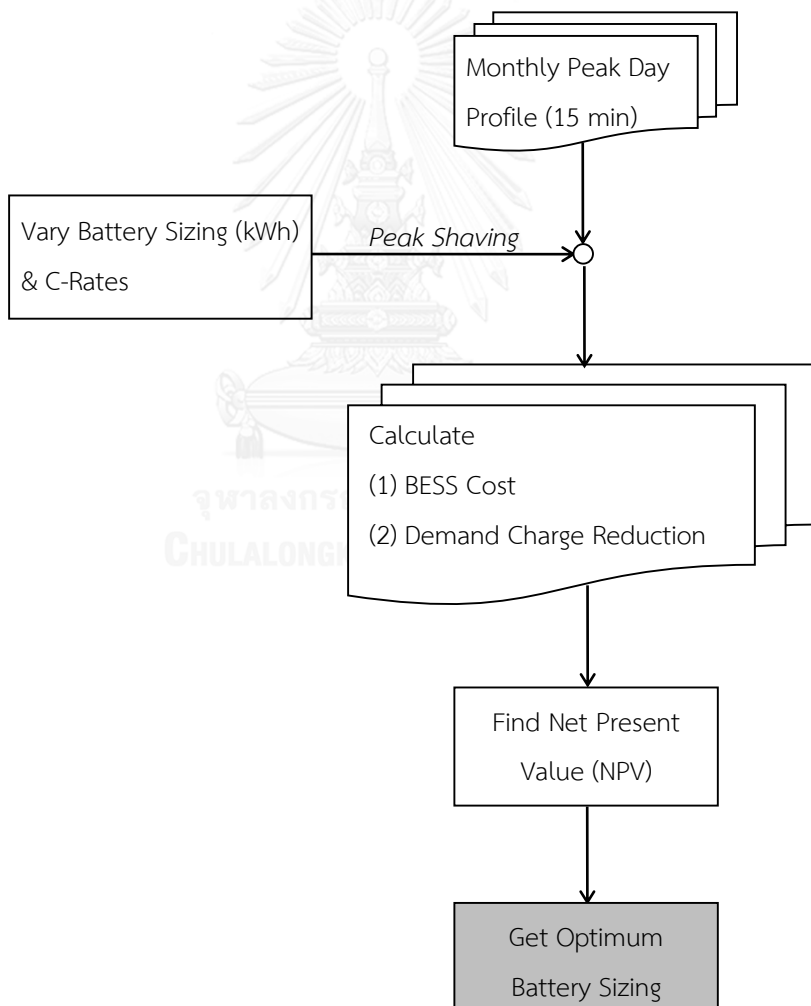
$$\theta_4 = 0.0718102$$



ภาคผนวก ง

การพิจารณาพิกัดและขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

ในวิทยานิพนธ์นำเสนอตัวอย่างแนวคิดการออกแบบขนาดระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ชนิดลิเธียม-ไอออนสำหรับอาคารบูรود บิณฑสันต์ดังแสดงในรูปที่ ง.1 เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้เริ่มใช้งานกันอย่างมากขึ้นโดยเฉพาะด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ ในปัจจุบันยังคงมีการพัฒนาทางเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออนอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มรอบอายุการใช้งาน (Life Cycle) และความหนาแน่นของพลังงาน (Energy Density) ทำให้มีแนวโน้มที่จะนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมด้านอื่นๆในอนาคต



รูปที่ ง.1 ผังงานการพิจารณาพิกัดและขนาดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับอาคารบูรود บิณฑสันต์

จากรูปที่ ง.1 ตัวอย่างแนวคิดการออกแบบขนาดระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับอาคารบูธรอด บิณฑสันต์จะพิจารณาจากข้อมูลโหลดจริงและแปรค่าขนาดกำลังและความจุของแบตเตอรี่ที่ช่วยลดค่ายอด พร้อมกับพิจารณามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) ที่ได้จากการลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในระยะเวลา 12 ปี โดยมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) คำนวณได้จากสมการที่ (ง.1) และค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ลดลง (Demand Charge Reduction) คำนวณได้จากสมการที่ (ง.2)

$$NPV = -C_0 + \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (ง.1)$$

$$\text{Demand Charge Reduction} \Big|_{N \text{ years}} = \sum_{N \text{ years}} \left((P_{\max \text{ w/o BESS}} - P_{\max \text{ w BESS}}) \times \left(210 \frac{\text{Baht}}{\text{kW}} \right) \right) \quad (ง.2)$$

โดยที่ N คือ จำนวนปีที่มีการลงทุน
 C_0 คือ เงินลงทุนเริ่มต้น
 C_t คือ กระแสเงินสดสุทธิในปีที่ t
 r คือ อัตราคิดลด (Discount Rate)

การเลือกขนาดระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะเลือกพิจารณาจากค่าอัตราการจ่ายกระแส (C-Rates) เนื่องจากอัตราการจ่ายกระแสมีผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่รวมถึงต้นทุนการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ด้วย ดังนั้นแนวคิดการออกแบบขนาดระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นี้จึงมีการเปลี่ยนแปลงขนาดอัตราการจ่ายกระแสและความจุ (kWh) โดยในส่วนต้นทุนการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักได้แก่

1. ต้นทุนรวม (Total Capital Cost, TCC) เป็นค่าใช้จ่ายรวมที่ครอบคลุมตั้งแต่การซื้อ การติดตั้ง และการขนส่งประกอบด้วย

- ค่าใช้จ่ายของระบบแปลงกำลัง (Cost of Power Conversion System) คิดเป็นต่อหน่วยของความจุกำลัง (Baht/kW)
- ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์การกักเก็บพลังงาน (Cost of Storage Section) คิดเป็นต่อหน่วยของความจุพลังงาน (Baht/kWh)
- ค่าใช้จ่ายในระบบส่วนอื่นๆ (Cost of Balance of Plant) คิดเป็นต่อหน่วยของความจุกำลัง (Baht/kW) หรือเป็นค่าใช้จ่ายคงที่แน่นอนขึ้นกับเทคโนโลยีและรูปแบบการใช้งาน

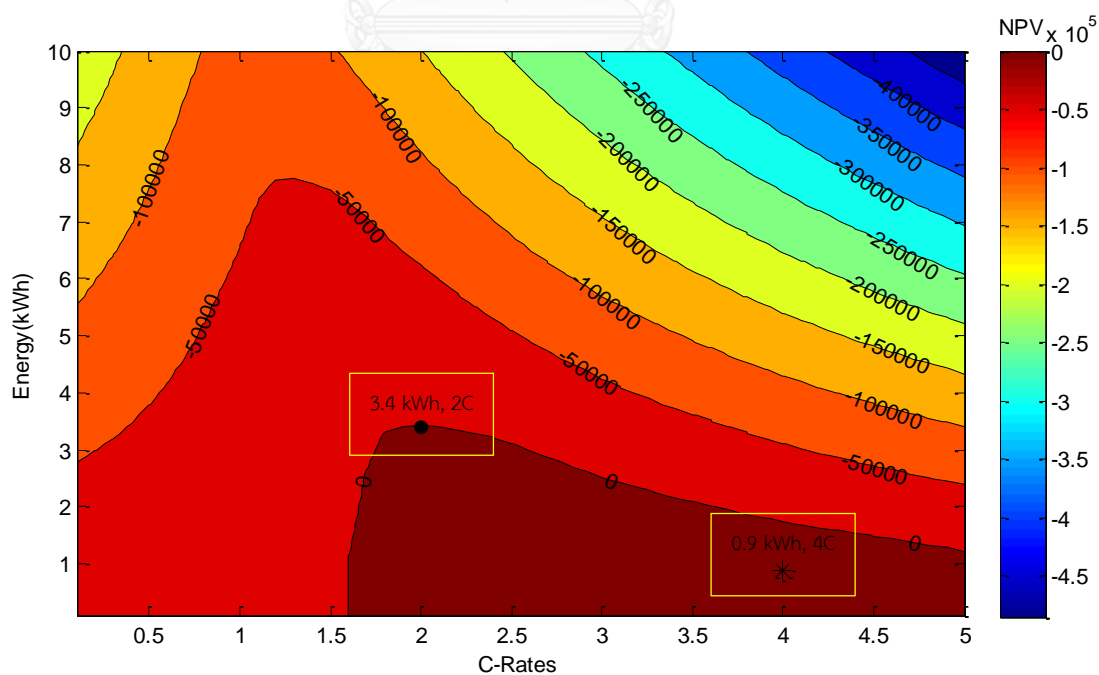
2. ค่าใช้จ่ายในระหว่างการใช้งาน (Life Cycle Costs, LCC) ประกอบด้วย

- ค่าใช้จ่ายดำเนินการและซ่อมบำรุง (Operation and Maintenance, O&M) เป็นทั้งค่าใช้จ่ายคงที่และค่าใช้จ่ายที่แปรผันได้
- ค่าใช้จ่ายการเปลี่ยนอุปกรณ์ (Replacement)
- ค่าใช้จ่ายการกำจัดและการนำกลับมาใช้ใหม่ (Disposal and Recycling)

ตารางที่ ง.1 ต้นทุนรวมสำหรับการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ประเภทแบตเตอรี่	ต้นทุนรวม (TCC)			ค่าใช้จ่ายในระหว่างการใช้งาน (LCC)	
	ค่าใช้จ่ายของระบบแปลงกำลัง (บาท/kW)	ราคาอุปกรณ์การกักเก็บพลังงาน (บาท/kWh)	ค่าใช้จ่ายในระบบส่วนอื่นๆ (บาท/kW)	ค่าใช้จ่ายดำเนินการและซ่อมบำรุงแบบคงที่ (ร้อยละของเงินลงทุนทั้งหมด)	ค่าใช้จ่ายดำเนินการและซ่อมบำรุงแบบแปรผัน (ร้อยละของเงินลงทุนทั้งหมด/kWh)
แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน	8,000	19,200	3,200	0.55	0.00017

ที่มา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, “โครงการศึกษาแนวทางการผสมผสานพลังงานหมุนเวียนกับระบบไฟฟ้าและพัฒนา นโยบายการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่,” กรุงเทพมหานคร, 2558.



รูปที่ ง.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) จากการลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในระยะเวลา 12 ปีด้วยระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

การลงทุนระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในที่นี่จะพิจารณาจากมูลค่าปัจจุบันสูงสุด (NPV) หากมีค่าเป็นบวกแสดงถึงการลงทุนนั้นมีผลกำไรเหมาะแก่การลงทุน หากมีค่าเป็นศูนย์แสดงถึงการลงทุนให้ผลกำไรเท่ากับเงินลงทุน และหากมีค่าเป็นลบแสดงถึงการขาดทุนซึ่งไม่เหมาะแก่การลงทุน จากรูปที่ ง.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) จากการลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในระยะเวลา 12 ปีด้วยระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับอาคารบูธรอด บินทสันต์ โดยเฉลี่ยค่าใช้จ่ายในระหว่างการใช้งาน และใช้อัตราคิดลดเป็นอัตราเงินเฟ้อ 4.3% (อัตราเงินเฟ้อเฉลี่ยระหว่าง พ.ศ. 2520 – 2559) จะพบว่าระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ความจุ 0.9 kWh ด้วยอัตรา 4C จะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) สูงสุดเป็น 14740 อย่างไรก็ตามการออกแบบที่ได้มีประเด็นที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมดังนี้

1) ขนาดแบตเตอรี่ที่ออกแบบมีขนาดค่อนข้างเล็กมากเนื่องจากแบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออน ณ ปัจจุบัน มีราคาสูงมาก (ตามตารางที่ ง.1) ทำให้จุดคุ้มทุนและผลกำไรสะท้อนมาที่ผลการออกแบบของแบตเตอรี่ขนาดเล็ก ซึ่งอาจจะไม่สามารถช่วยลดค่ายอดโหลดได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามก็มีการคาดการณ์กันว่าราคาแบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออนมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างมากในระยะเวลา 3-5 ปี ข้างหน้า พร้อมๆไปกับการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ให้มีจำนวนรอบอายุการใช้งานที่สูงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้แบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออนที่มีขนาดใหญ่เพียงพอในการช่วยลดค่ายอดโหลดของอาคารได้อย่างมีนัยสำคัญและมีความคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์

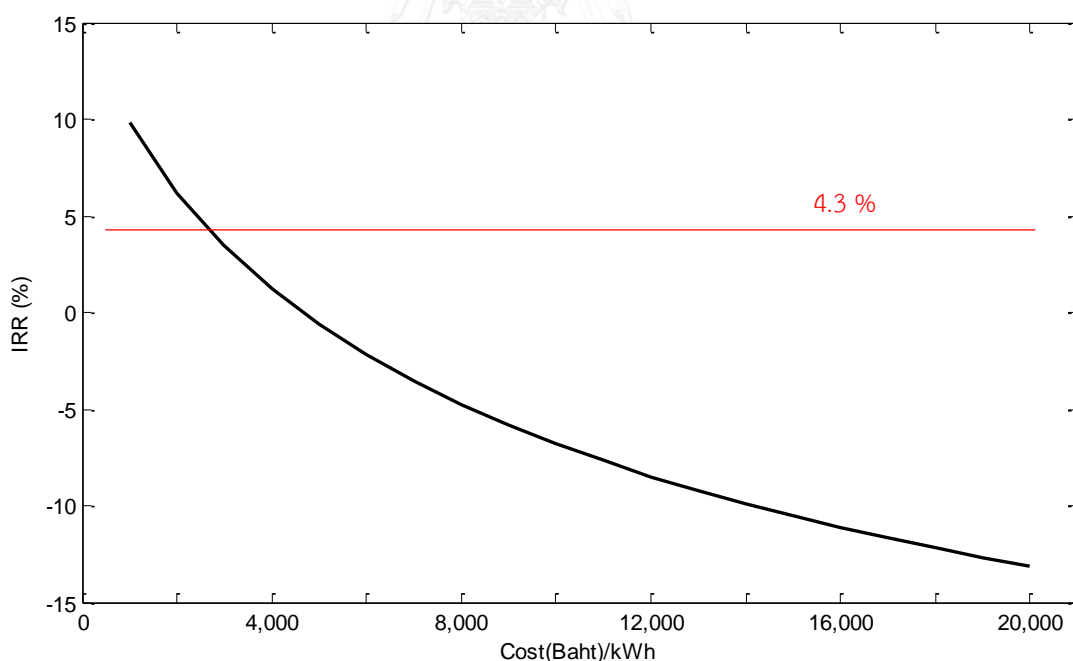
2) จากข้อมูลของผู้ผลิตหลายราย แบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออนในปัจจุบัน จะสามารถใช้งานจริงในทางปฏิบัติได้ไม่เกิน 2C ดังนั้นการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงข้อจำกัดดังกล่าวด้วย ยกตัวอย่างเช่น เราสามารถเลือกออกแบบขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่ 3.4 kWh ด้วยอัตรา 2C ดังแสดงในรูปที่ ง.2 ซึ่งมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เป็นค่าศูนย์ถือเป็นการลงทุนให้ผลกำไรเท่ากับต้นทุน จะเห็นได้ว่าการตัดยอดโหลดเป็นการประยุกต์ใช้แบตเตอรี่ทางด้านกำลังไฟฟ้า (Power Application) ดังนั้นจึงต้องการแบตเตอรี่ที่มี C-Rates สูง ซึ่งเป็นที่คาดการณ์ว่าจะมีการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ให้สามารถทำงานได้ที่ C-Rates สูงยิ่งขึ้นในอนาคต

กล่าวโดยสรุปแล้ว การออกแบบตามผังงานในรูปที่ ง.1 ที่นำเสนอนี้ได้ให้แนวทางในการออกแบบแบตเตอรี่สำหรับการตัดค่ายอดโหลด ซึ่งสามารถปรับใช้ได้ในกรณีที่ราคาของแบตเตอรี่จะปรับเปลี่ยนไปในอนาคต และ/หรือ การพัฒนาเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออนที่สูงขึ้นทั้งจำนวนรอบอายุการใช้งานและ C-Rates

จากรูปที่ ง.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return; IRR) และราคาแบตเตอรี่ (Baht/kWh) ในระยะเวลา 12 ปี (กำหนดให้ค่าใช้จ่ายของระบบแปลงกำลังและค่าใช้จ่ายในระบบส่วนอื่นๆคงที่) ทั้งนี้อ้างอิงจากผลการตัดยอดโหลดอาคารบุญรอดปิณฑสันต์ด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 5 kW 14.4 kW ซึ่งสามารถตัดค่ายอดโหลดได้ 4.06 kW สำหรับอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) คืออัตราผลตอบแทนที่ทำให้ผลกำไรเท่ากับเงินลงทุน (NPV = 0) โดยอัตราผลตอบแทนภายในที่เหมาะสมควรมีค่ามากกว่าอัตราคิดลด คำนวณได้จากสมการที่ (ง.3)

$$0 = -C_0 + \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+IRR)^t} \quad (\text{ง.3})$$

ในปัจจุบันแบตเตอรี่มีราคา 19,200 บาท/kWh แต่ในอนาคตความต้องการแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ราคาแบตเตอรี่มีแนวโน้มลดลง หากต้องการลงทุนติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 5 kW 14.4 kW เพื่อตัดยอดโหลดขนาด 4.06 kW ภายในระยะเวลา 12 ปี แบตเตอรี่จะต้องมีราคา 3,000 บาท/kWh หรือราคาแบตเตอรี่ลดลงประมาณ 6 เท่า จึงจะเหมาะสมสำหรับการลงทุน



รูปที่ ง.3 เปรียบเทียบอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) จากการลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในระยะเวลา 12 ปีด้วยระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ขนาด 5 kW 14.4 kW

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภาณุมาส สอาดวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 ภายหลังได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในภาคการศึกษาต้นปีการศึกษา 2556

