กลยุทธ์การรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปฏิบัติการแบบโรงไฟฟ้าเสมือน

นายสิปปนันท์ บรรณาวิการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Strategy of Solar Power Aggregation for Virtual Power Plant Operation

Mr. Sippanan Bannavikarn

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กลยุทธ์การรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปฏิบัติการแบบโรงไฟฟ้าเสมือน
โดย	นายสิปปนันท์ บรรณาวิการ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สมภพ อัษฎมงคล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สิปปนันท์ บรรณาวิการ : กลยุทธ์การรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปฏิบัติการแบบโรงไฟฟ้าเสมือน. (Strategy of Solar Power Aggregation for Virtual Power Plant Operation) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน (Virtual Power Plant: VPP) เพื่อกำหนดรูปแบบธุรกิจของโรงไฟฟ้าเสมือนที่ตอบสนองต่อตลาดซื้อขายไฟฟ้า (Energy market) โดยการสร้างกลยุทธ์การจัดการรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้า (Power aggregation) ที่รวบรวมจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar power plant) ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนแบบกระจายขนาดตั้งแต่ 10 เมกะวัตต์ ขึ้นไป หรือที่เรียกว่าผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (Small Power Producer: SPP) โรงไฟฟ้าเสมือนนั้นจะสร้างกำหนดการเดินเครื่องเพื่อส่งกำลังไฟฟ้าเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า อ้างอิงตามสัญญาในตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบตลาดขายส่ง (Wholesale market) แบ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลังงาน (Energy product) และผลิตภัณฑ์กำลังการผลิตสำรอง (Operating reserve product) โดยมีเป้าหมาย คือ การทำกำไรในการดำเนินธุรกิจของโรงไฟฟ้าเสมือนให้ได้สูงสุดจากการซื้อขายไฟฟ้า นอกจากนี้ คำนึงถึงการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไฟฟ้า (Ramp-rate limit) ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ดูแลระบบโครงข่าย ใช้กระบวนการแก้ปัญหาหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) ด้วยขั้นตอนโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming) เป็นเครื่องมือหลัก ทำให้ทราบกำหนดการกำลังผลิตไฟฟ้า (Power scheduling) ที่เหมาะสมในแต่ละชั่วโมงล่วงหน้า โดยอาศัยราคาซื้อขายพลังงานไฟฟ้าเป็นฐานในการพิจารณา (Price-based unit commitment) ในการศึกษานี้ พิจารณาตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบล่วงหน้า 1 วัน (Day-ahead market) และแบบล่วงหน้า 1 ชั่วโมง (Hour-ahead market) กลยุทธ์ที่นำเสนอนี้จะสร้างมูลค่าทางธุรกิจของโรงไฟฟ้าเสมือน อีกทั้งช่วยควบคุมให้การรวบรวมกำลังผลิตไฟฟ้าแบบกระจายที่จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น ผลการศึกษาแสดงผลลัพธ์เปรียบเทียบดัชนีสมรรถนะเชิงรายได้ ในช่วงการทดสอบ 10 วัน กรณีศึกษาโรงไฟฟ้าเสมือนที่รวบรวมกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จริงจาก 6 โรงไฟฟ้า สามารถเพิ่มมูลค่าของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในรูปของการทำรายได้ให้กับธุรกิจโดยรวมคิดเป็นอัตราร้อยละ 1.28 และค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปรของรายได้โดยรวมดีขึ้นร้อยละ 8.66 (เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีโรงไฟฟ้าจริงทั้ง 6 โรงไฟฟ้า แยกดำเนินการแบบรายโรง) จากนั้นสร้างกลยุทธ์การแบ่งสัดส่วนราคาไฟฟ้าให้กับสมาชิก และการกำหนดค่าความปลอดภัยของความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจากข้อมูลการพยากรณ์ ด้วยการวิเคราะห์ความไว นอกจากนี้ นำเสนอกลยุทธ์การเพิ่มกำไรในการดำเนินธุรกิจของโรงไฟฟ้าเสมือนด้วยการกำหนดขนาดแบตเตอรี่เสมือน เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนพลังงานกับโครงข่ายไฟฟ้าตามกลไกด้านราคาที่เปลี่ยนแปลงแบบรายชั่วโมง ซึ่งผลการทดสอบสามารถเพิ่มผลกำไรให้แก่โรงไฟฟ้าเสมือนได้สูงสุดร้อยละ 1.86 ที่ขนาดความจุของแบตเตอรี่เสมือนที่ร้อยละ 30 ของพิกัดกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าเสมือน

สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2563	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6270289021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Energy trading, Energy market, Power aggregation, Solar power plant, Virtual power plant

Sippanan Bannavikarn : Strategy of Solar Power Aggregation for Virtual Power Plant Operation. Advisor: Assoc. Prof. NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D.

This thesis presents strategy of solar power aggregation for Virtual Power Plant (VPP) operation to formulate the VPP business which responds to the energy market. The proposed power aggregation strategy gathers forecasted solar power data from an individual distributed solar power plant, which is rated 10 MW or above, also defined as a Small Power Producer (SPP). VPP operation will provide hourly unit commitment to supply power to the grid with reference to a wholesale market which includes energy product and operating reserve product. The objective function is to maximize the profit of VPP business for energy trading, while complying with the power ramp-rate limits as required by grid codes of the System Operator (SO). The formulated optimization can be solved using Linear Programming (LP) to provide optimal hourly power scheduling in priory, according to the Price-Based Unit Commitment (PBUC), for a day-ahead energy market and an hour-ahead operating reserve market. Therefore, the strategy will create business value for the VPP, at the same time help regulate the aggregated power from distributed energy resources (DER) to the grid to be more reliable. Test results, for the 10-day period, from the case studies with solar power aggregation of 6 actual SPPs show that the total revenue can be increased by 1.28%, and the total revenue coefficient of variation can be improved by 8.66% (compared with those of separate operation of the 6 individual SPPs). Then, the sensitivity analysis was conducted to strategically determine key parameters of the member unit price ratio and the forecasted solar power safety factor. Additionally, it examines how to increase profit of the VPP by suitable sizing of the virtual battery for energy trading in an arbitrage scheme. Test results confirm that profit of the VPP can be improved by 1.86%, when sizing virtual battery at 30% with respect to the VPP power rating.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study:	Electrical Engineering	Student's Signature .....
Academic Year:	2020	Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้รับการสนับสนุนจากโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้านสมาร์ทกริด ข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำเป็นอย่างดี ตลอดจนคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์ ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย และ ดร.สมภพ อัษฎมงคล ที่ให้คำชี้แนะเพื่อปรับปรุงวิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น สุดท้ายขอขอบคุณครอบครัวและทุกท่านที่ให้การสนับสนุนตลอดมา

สิปปนันท์ บรรณาวิการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

..... ค

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน 3

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ 5

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 6

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 โรงไฟฟ้าเสมือน 7

2.1.1 นิยามและแนวคิด 7

2.1.2 การดำเนินการของโรงไฟฟ้าเสมือนบนโครงข่ายไฟฟ้าสมาร์ทกริด 8

2.1.3 การวางแผนโรงไฟฟ้าเสมือน 11

2.2 รูปแบบเชิงธุรกิจของโรงไฟฟ้าเสมือน 14

2.2.1 รูปแบบรายได้ 15

2.2.2 รูปแบบรายจ่าย 17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.3 การสั่งการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าด้วยฐานราคา 19
2.2.4 งานวิจัยและการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับตลาดซื้อขายไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือน 19
2.3 ระบบกักเก็บพลังงานสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือน 31
2.3.1 การใช้งานเชิงกำลังไฟฟ้า 32
2.3.2 การใช้งานเชิงพลังงานไฟฟ้า 32
2.3.3 การประยุกต์และประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือน 32
2.4 สัญญาซื้อขายไฟฟ้าและนโยบายการกำหนดราคาในตลาดซื้อขายไฟฟ้า 35
บทที่ 3 แบบจำลองและข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา 36
3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 36
3.2 ระบบกักเก็บพลังงาน 38
3.3 ข้อมูลราคาสำหรับแบบจำลอง 39
บทที่ 4 กรอบปัญหาของปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน 42
4.1 ข้อมูลขาเข้า 43
4.1.1 ข้อมูลพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้า 43
4.1.2 ข้อมูลพยากรณ์ราคาไฟฟ้า 43
4.2 ข้อมูลขาออก 47
4.2.1 สัญญาซื้อขายพลังงาน 47
4.2.2 สัญญาซื้อขายกำลังผลิตสำรอง 47
4.3 ปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน 49
4.3.1 การรวบรวมกำลังการผลิต 49
4.3.2 การกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนล่วงหน้า 1 วัน 50
4.3.3 การกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนล่วงหน้า 1 ชั่วโมง 53
บทที่ 5 ผลการศึกษา 55
5.1 กรณีศึกษาและสมมติฐาน 55

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 ขั้นตอนการทดลอง 57
5.3 ดัชนีชี้วัดที่ใช้ในการทดสอบ 61
5.4 กลยุทธ์การปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน 62
5.5 กลยุทธ์ด้านสัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิกและด้านความไม่แน่นอนของการพยากรณ์ 68
5.6 กลยุทธ์การเพิ่มกำไรจากฟังก์ชันการกักเก็บพลังงานเสมือน 74
5.7 การวิเคราะห์และอภิปรายผล 80
บทที่ 6 บทสรุป 84
6.1 สรุปผลการดำเนินงาน 84
6.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต 85
บรรณานุกรม 87
ประวัติผู้เขียน 93

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตาราง 2-1 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการวางแผนโรงไฟฟ้าเสมือน [1],[3],[5] 12
ตาราง 2-2 ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียและประโยชน์ของโรงไฟฟ้าเสมือน 13
ตาราง 2-3 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการจัดการพลังงานโรงไฟฟ้าเสมือน [3] 15
ตาราง 2-4 เปรียบเทียบลักษณะกลยุทธ์เพื่อตอบสนองรูปแบบตลาด 18
ตาราง 2-5 สรุปตลาดพลังงานแบบต่างๆ ตามช่วงเวลาและความสำคัญ ในสหรัฐอเมริกา 21
ตาราง 2-6 สรุปตลาดพลังงานแบบต่างๆ ตามช่วงเวลาและความสำคัญ ในยุโรป 22
ตาราง 2-7 ตลาดซื้อขายไฟฟ้าล่วงหน้า 1 วันในทวีปยุโรป [22], [23] 23
ตาราง 2-8 ตลาดซื้อขายไฟฟ้าระหว่างวัน ในทวีปยุโรป [22], [23] 27
ตาราง 3-1 เปรียบเทียบแนวทางการกำหนดราคาของสมาชิก 40
ตาราง 4-1 ตารางข้อมูลขาเข้า 43
ตาราง 4-2 ตัวอย่างข้อมูลพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้า 43
ตาราง 4-3 ตัวอย่างข้อมูลพยากรณ์ราคาสำหรับผลิตภัณฑ์พลังงานไฟฟ้า 44
ตาราง 4-4 ตัวอย่างข้อมูลพยากรณ์ราคาสำหรับผลิตภัณฑ์กำลังการผลิตสำรอง 45
ตาราง 4-5 ตารางข้อมูลขาออก 47
ตาราง 5-1 กรณีศึกษา 55
ตาราง 5-2 พิกัดกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า 55
ตาราง 5-3 ข้อมูลสมมติฐานสำหรับการทดลอง 56
ตาราง 5-4 ผลการทดสอบกลยุทธ์การเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อตอบสนองตลาดซื้อขายไฟฟ้า 63
ตาราง 5-5 การเปรียบเทียบรายได้กรณีแบบรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้า และกรณีแบบแยกดำเนินการรายโรง 64
ตาราง 5-6 การเปรียบเทียบการดำเนินงานต่อวันของโรงไฟฟ้าจริงและโรงไฟฟ้าเสมือน 66
ตาราง 5-7 ผลกำไรเมื่อกำหนดราคาไฟฟ้าสมาชิกต่อราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้า 69
ตาราง 5-8 กำไร (บาทต่อวัน) ของโรงไฟฟ้าเสมือนผ่านกลยุทธ์การกำหนดค่า α และ γ 72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง 5-9 ตารางการกำหนดค่า α ที่อัตราผลตอบแทน 15 % 72

ตาราง 5-10 ผลทดสอบกำไรจากการกำหนดค่าพิกัดของระบบกักเก็บพลังงาน 74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

รูป 1-1 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ 4
รูป 2-1 ภาพรวมระบบไฟฟ้าและโรงไฟฟ้าเสมือน 8
รูป 2-2 การดำเนินการโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อตอบสนองต่อตลาดซื้อขายไฟฟ้าและสมาชิก 9
รูป 2-3 แผนผังสถาปัตยกรรมโรงไฟฟ้าเสมือน [4] 11
รูป 2-4 กรอบการตลาด [2] 17
รูป 2-5 การรับส่งคำสั่งซื้อขายพลังงานไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ [20] 23
รูป 2-6 การใช้ระบบกักเก็บพลังงานสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้า [26] 31
รูป 3-1 ราคาพลังงานไฟฟ้าตามบริบทต่างๆ 41
รูป 4-1 ธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน 42
รูป 4-2 ข้อมูลขาออกพลังงานไฟฟ้า 48
รูป 5-1 การรวบรวมกำลังการผลิตจากสมาชิก 57
รูป 5-2 ขั้นตอนการปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน 58
รูป 5-3 ขั้นตอนด้านสัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิกและด้านความไม่แน่นอนของการพยากรณ์ 59
รูป 5-4 ขั้นตอนการเพิ่มกำไรจากฟังก์ชันการกักเก็บพลังงานแบบเสมือน 60
รูป 5-5 ราคาอ้างอิงที่ใช้ในการทดสอบ 62
รูป 5-6 ผลกำหนดการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเสมือน 64
รูป 5-7 ผลกำหนดการเดินเครื่องล่วงหน้า 1 วันของโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก 65
รูป 5-8 ผลกำหนดการเดินเครื่องล่วงหน้า 1 ชั่วโมงของโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก 65
รูป 5-9 ราคาค่าไฟฟ้าอ้างอิงตลาด NYISO 68
รูป 5-10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกำไรกับสัดส่วนราคาไฟฟ้าสมาชิก (α) 69
รูป 5-11 ผลกำหนดการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเสมือนต่อสัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิก 70
รูป 5-12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกำไรกับสัดส่วนราคาไฟฟ้าสมาชิกและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์กำลังการผลิต 71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูป 5-13 การเปรียบเทียบการกำหนดราคาไฟฟ้าของธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน 73

รูป 5-14 ผลทดสอบความไวของกำไรต่อค่าพิกัดของระบบกักเก็บพลังงาน 75

รูป 5-15 ผลกำหนดการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเสมือนจากฟังก์ชันการกักเก็บพลังงานเสมือน..... 77

รูป 5-16 ผลการทดสอบกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก กรณีมีแบตเตอรี่ 0% ของพิกัดกำลังการผลิต 78

รูป 5-17 ผลการทดสอบกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก กรณีมีแบตเตอรี่ 10% ของพิกัดกำลังการผลิต 78

รูป 5-18 ผลการทดสอบกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก กรณีมีแบตเตอรี่ 20% ของพิกัดกำลังการผลิต 79

รูป 5-19 ผลการทดสอบกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก กรณีมีแบตเตอรี่ 30% ของพิกัดกำลังการผลิต 79

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

บทนี้นำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน ตลอดจนประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) มีการพัฒนาและเติบโตสูงขึ้นพร้อมกับการเติบโตของแหล่งพลังงานผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed energy resource) ประกอบกับตลาดซื้อขายไฟฟ้า (Energy market) ที่จะเกิดขึ้น สิ่งเหล่านี้ต้องการ การจัดการกำลังไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนและเพิ่มโอกาสทางธุรกิจ โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่กำลังเติบโต การเติบโตอย่างมีนัยสำคัญนำมาซึ่งการมีสัดส่วนและมีศักยภาพมากในฐานะผู้ผลิตไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นนั้นยังส่งผลกระทบกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

การจัดการความไม่แน่นอนมีความจำเป็นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและการใช้ประโยชน์พลังงานหมุนเวียน ส่งผลให้การใช้พลังงานจากพลังงานหมุนเวียนอยู่รอดในธุรกิจไฟฟ้า ประกอบกับการพัฒนาของเทคโนโลยีการสื่อสาร (Infrastructure communication technology) เทคโนโลยีอินเตอร์เนต (Internet of things) ที่พัฒนาอย่างรวดเร็ว และ มาตรฐานระบบส่งและระบบจำหน่ายที่รองรับการไหลของไฟฟ้าแบบสองทิศทาง (Bi-directional power flow) เป็นการส่งเสริมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายให้มีความรวดเร็วและสอดคล้องกับตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตลาดซื้อขายไฟฟ้านั้นจะเปิดกว้างสำหรับผู้เล่นทุกระดับและแบ่งคุณลักษณะของพลังงานไฟฟ้าตามเงื่อนไขให้ตรงตามการใช้งาน ส่งทันเวลาและราคาที่มีการแข่งขัน ทั้งนี้การสร้างกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าสอดคล้องกับตลาดซื้อขายไฟฟ้านั้นจำเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการเปลี่ยนแปลงนี้เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าเป็นไปตามสัญญาที่กำหนดไว้

การสร้างคุณค่าให้กับโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนทำได้หลากหลายตามแต่วัตถุประสงค์ของธุรกิจ การใช้ประโยชน์จากหลักการโรงไฟฟ้าเสมือนเป็นวิธีหนึ่งในการจัดการพลังงานหมุนเวียน และยังสามารถกำหนดการเดินเครื่องกำลังการผลิตที่มีความยืดหยุ่นตอบสนองต่อตลาดซื้อไฟฟ้าโดยใช้การจัดการกำลังไฟฟ้าของสมาชิกที่รวบรวมมาตลอดจนการคำนึงถึงการตอบสนองต่อคุณลักษณะโครงข่ายไฟฟ้า โรงไฟฟ้าเสมือนจึงได้รับความสนใจเพราะความสามารถการจัดการพลังงานไฟฟ้าได้หลายระดับส่งผลดีให้กับโครงข่ายไฟฟ้าแต่ละประเทศเข้ากับบริบทและยุคสมัยที่มุ่งมั่นในการเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียน

โรงไฟฟ้าเสมือน (Virtual Power Plant; VPP) นี้เป็นแนวคิดในการจัดการพลังงานที่รวบรวมระบบผลิตไฟฟ้าโดยผู้รวบรวมกำลังไฟฟ้า (Power aggregator) ทำให้ผู้ประกอบการโรงไฟฟ้ารายเล็กมีโอกาสในการซื้อขายในตลาดซื้อขายไฟฟ้าระดับขายส่ง (Wholesale market) ประกอบด้วยแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานประเภทแบตเตอรี่จากที่ต่างๆ เพื่อตอบสนองต่อราคาและตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในประเทศไทย

การจัดการกำลังผลิตที่รวบรวมกำลังการผลิตแบบกระจายนี้ร่วมกับการใช้การกักเก็บพลังงานเทคโนโลยีแบตเตอรี่แบบเสมือน (Virtual Battery Energy Storage) จะช่วยในการเพิ่มโอกาสให้กับธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนโดยจ่ายพลังงานตามความต้องการของตลาดบนพื้นฐานราคา ทำกำไรให้กับธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน

หน้าที่ของโรงไฟฟ้าเสมือน มีบทบาทชัดเจนมากขึ้นสำหรับการจัดการพลังงาน แก้ปัญหาและสนับสนุนแหล่งพลังงานหมุนเวียนแบบกระจาย โดยการสั่งการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าผ่านการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) เพื่อหาวิธีการ (Solution) สร้างกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือน โดยมีวัตถุประสงค์ทางพาณิชย์คือผลกำไรของการประกอบการธุรกิจและทางเทคนิคเพื่อผู้ดูแลโครงข่ายไฟฟ้าได้ประโยชน์ร่วมกันจากการกำหนดคุณลักษณะทางกำลังไฟฟ้า

ดังที่กล่าวมาข้างต้นและเพื่อนำเสนอธุรกิจใหม่ การสร้างกลยุทธ์การรวบรวมกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงงานแสงอาทิตย์จึงเป็นที่มางานวิจัยนี้ เพื่อกำหนดรูปแบบธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนที่มีสมาชิกโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานประเภทแบตเตอรี่ที่ส่งตอบสนองตลาดซื้อขายไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

1. สร้างกลยุทธ์การจัดการกำลังการผลิตที่รวบรวมจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กเพื่อผลการดำเนินการธุรกิจของโรงไฟฟ้าเสมือนที่เหมาะสมตามตลาดซื้อขายไฟฟ้าล่วงหน้า 1 วันและตลาดซื้อขายไฟฟ้าล่วงหน้า 1 ชั่วโมง

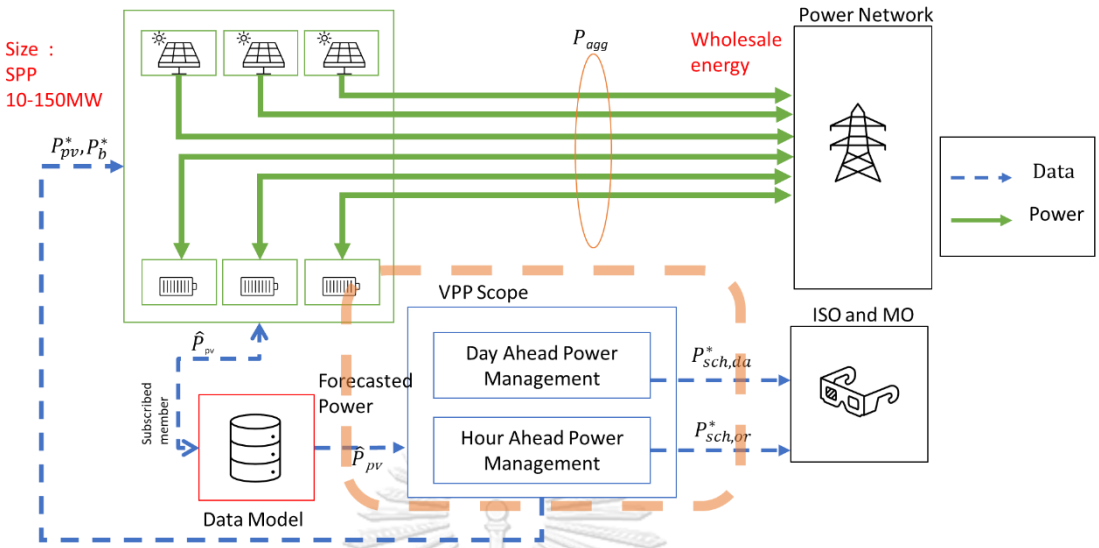
2. เพิ่มความสามารถของปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือนด้านผลกำไรทางธุรกิจด้วยฟังก์ชันการกักเก็บพลังงานเสมือนอย่างเหมาะสม

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการหากลยุทธ์กำหนดการเดินเครื่องสำหรับโรงไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือนรวบรวมไว้ซึ่งโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจาย ซึ่งระบบปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือนจะตอบสนองต่อหน่วยงานควบคุมระบบส่ง (System Operator; SO) และหน่วยงานควบคุมการตลาดซื้อขายไฟฟ้า (Market Operator; MO) โดยส่งกำลังไฟฟ้าให้โครงข่ายไฟฟ้าระดับขายส่ง ดังรูป 1-1 โดยมีขอบเขตดังนี้

1. การรวบรวมโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกำลังการผลิตมากกว่า 10MW ขึ้นไป
2. ทดสอบและปฏิบัติการกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือน
3. กลยุทธ์ธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อกำหนดราคาไฟฟ้าสมาชิกและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์กำลังไฟฟ้า
4. การกำหนดค่าขนาดของแบตเตอรี่เสมือนเพื่อเพิ่มมูลค่าธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนตั้งแต่ 0 – 30% ของขนาดกำลังการผลิต
5. การซื้อขายพลังงานบนตลาดขายส่งพลังงานไฟฟ้า
6. การสั่งการเดินเครื่องด้วยฐานราคา
7. สมมติฐานค่าพยากรณ์การผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์แพลตฟอร์ม
8. สมมติฐานค่าพยากรณ์ราคาไฟฟ้าจากตลาดซื้อขายไฟฟ้า New York Independent System Operator (NYISO)
9. รายได้ 2 ส่วนคือ ขายผลิตภัณฑ์พลังงาน และขายผลิตภัณฑ์กำลังผลิตสำรอง
10. รายจ่าย 3 ส่วนคือซื้อพลังงานจากสมาชิก ซื้อพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้า และซื้อการสนับสนุนของแบตเตอรี่
11. การละเลยประกอบด้วย ต้นทุนการลงทุน ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของเทคโนโลยี ต้นทุนการสื่อสาร เวลารอคอยของอินเวอร์เตอร์ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูป 1-1 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

จากรูป 1-1 นำเสนอขอบเขตวิทยานิพนธ์มีทิศทางการไหลของข้อมูล (ลูกศรเส้นประ) และทิศทางการไหลของไฟฟ้า (ลูกศรเส้นทึบ) เริ่มจากการรับข้อมูล $\hat{P}_{pv,i,da}$ และ $\hat{P}_{pv,i,ha}$ ส่งไปกระบวนการปฏิบัติการในขอบเขตโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อหาค่าที่เหมาะสม จากนั้นส่งผลลัพธ์กำหนดการ $P^*_{sch,da}$ และ $P^*_{sch,or}$ เพื่อส่งสัญญาณการเดินเครื่องให้กับหน่วยงานควบคุมระบบส่งและหน่วยงานควบคุมตลาดซื้อขายไฟฟ้า เมื่อถึงเวลาส่งมอบจะทำการส่งคำสั่ง $P^*_{pv,i}$ และP^*_b ไปยังสมาชิกโรงไฟฟ้าทำการส่งมอบพลังงานไฟฟ้าที่รวบรวม P_{agg} ไปยังโครงข่ายไฟฟ้าต่อไป

โดยที่ $\hat{P}_{pv,i,da}$ คือ ค่าพยากรณ์การผลิตล่วงหน้าตั้งแต่ 1 วัน

$\hat{P}_{pv,i,ha}$ คือ ค่าพยากรณ์การผลิตล่วงหน้าตั้งแต่ 1 ชั่วโมง

$\hat{P}_{agg}$ คือ ค่าพยากรณ์กำลังโรงไฟฟ้าเสมือน

P^*_b คือ ค่าคำสั่งการกำลังแบตเตอรี่

$P^*_{pv,i}$ คือ ค่าคำสั่งการกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์

$P^*_{sch,da}$ คือ ค่ากำหนดการเดินเครื่องผลิตภัณฑ์พลังงานสำหรับตลาดแบบล่วงหน้าตั้งแต่ 1วัน

$P^*_{sch,or}$ คือ ค่ากำหนดการเดินเครื่องผลิตภัณฑ์กำลังผลิตสำรองสำหรับตลาดแบบล่วงหน้าตั้งแต่ 1ชั่วโมง

P_{agg} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่รวบรวมผ่านปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ศึกษาเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าเสมือน ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และระบบกักเก็บพลังงาน
2. ศึกษาประเภทผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ ขนาดเล็ก และขนาดเล็กมาก
3. ศึกษาสัญญาซื้อขายไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบผสมผสาน (SPP Hybrid firm) นโยบายรับซื้อไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ค่าบริการสายส่ง และการตลาดซื้อขายไฟฟ้า
4. ศึกษาการประยุกต์การใช้งานของระบบกักเก็บพลังงาน
5. ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์โรงไฟฟ้าเสมือน ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และระบบกักเก็บพลังงาน
6. ศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming)
7. ตั้งสมมติฐานและออกแบบการทดลอง
8. สร้างแบบจำลองของธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนและสภาวะตลาด
9. กำหนดสถานการณ์สำหรับแบบจำลอง (Scenario)
10. ทดสอบสมรรถนะแบบจำลองที่ออกแบบไว้
11. วิเคราะห์และสรุปผล
12. เรียบเรียงผลวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานพนธ์
13. เขียนบทความทางวิชาการ
14. เผยแพร่บทความทางวิชาการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สร้างรูปแบบธุรกิจใหม่สำหรับโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อตอบสนองตลาดซื้อขายไฟฟ้าในอนาคต
2. เพิ่มการส่งเสริมการใช้และการบูรณาการพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับการจัดการเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้า

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 6 บท ดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานและรายงานวิชาการโรงไฟฟ้าเสมือน รูปแบบเชิงธุรกิจของโรงไฟฟ้าเสมือน และการประยุกต์ระบบกักเก็บพลังงานสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือน สุดท้ายคือสัญญาซื้อขายไฟฟ้าและนโยบายการกำหนดราคาในตลาดซื้อขายไฟฟ้า

บทที่ 3 นำเสนอแบบจำลองและข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบกักเก็บพลังงานและข้อมูลราคาไฟฟ้าที่ใช้เปรียบเทียบในแบบจำลอง

บทที่ 4 นำเสนอกรอบปัญหาของปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลขาเข้า ข้อมูลขาออก ปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือนซึ่งประกอบด้วยการรวบรวมกำลังการผลิตและการกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือน

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการศึกษา ซึ่งประกอบด้วย กรณีศึกษาและสมมติฐาน ขั้นตอนการทดลอง ดัชนีชี้วัดเชิงคุณภาพที่ใช้ในการทดสอบ ผลการทดลองการสร้างกลยุทธ์ปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน กลยุทธ์ราคาไฟฟ้าสมาชิกและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ กลยุทธ์เพิ่มกำไรจากการกำหนดระบบกักเก็บพลังงานเสมือน ลำดับสุดท้ายคือการวิเคราะห์และอภิปรายผล

บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินงานและงานในอนาคต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้นำเสนอความรู้พื้นฐานและงานวิจัยเพื่อเป็นแนวทางการศึกษาวิจัยโรงไฟฟ้าเสมือนรูปแบบเชิงธุรกิจของโรงไฟฟ้าเสมือน การประยุกต์ระบบกักเก็บพลังงานตลอดจนสัญญาซื้อขายไฟฟ้าและนโยบายการกำหนดราคาในตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง

2.1 โรงไฟฟ้าเสมือน

2.1.1 นิยามและแนวคิด

โรงไฟฟ้าเสมือน คือ ระบบจัดการพลังงานชนิดหนึ่ง ที่รวบรวมไว้ซึ่งเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าจากพลังงานต่างๆ ดังแสดงในรูป 2-1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานทดแทนแบบกระจัดกระจาย (Distributed Energy Resources; DERs) ประกอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม โคเจนเนอเรชั่น ระบบกักเก็บพลังงาน รถยนต์ไฟฟ้า การตอบสนองจากผู้ใช้งาน ด้วยการใช้นวัตกรรมต่างๆ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะที่สามารถเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตได้ (Internet of things) ปัญญาประดิษฐ์ (AI) แพลตฟอร์มออนไลน์หรือแม้กระทั่งนำรูปแบบการตลาดเพื่อกำหนดราคาและปริมาณพลังงาน สร้างมูลค่าเพิ่มขึ้นให้พลังงานหมุนเวียน ผู้ประกอบการ และสังคม โดยโรงไฟฟ้าเสมือนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [1],[2] คือ

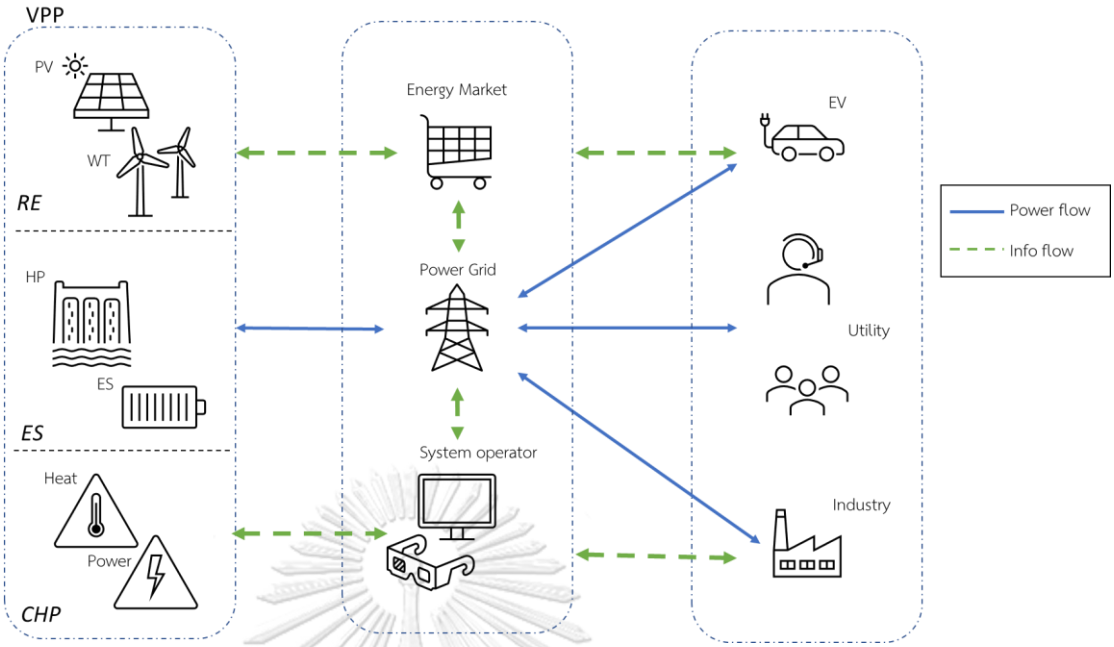
1. โรงไฟฟ้าเสมือนทางพาณิชย์ (Commercial Virtual Power Plant; CVPP)

มีจุดมุ่งหมายด้านเศรษฐศาสตร์ ด้านตลาด มุ่งหากำไรสูงสุดจากการรวบรวมเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าทั้งพลังงานหมุนเวียนแบบกระจาย ขั้นตอนการจัดซื้อพลังงาน อยู่บนพื้นฐานตัวแปร เช่น ต้นทุนกำลังการผลิต การตลาด และปรับเปลี่ยนการผลิตเพื่อให้เหมาะสมกับข้อกำหนด โดยเฉพาะยังมีการควบคุมภายนอกที่ต้องตอบสนองต่อตลาดไฟฟ้า จึงสรุปว่าการใช้หลักการโรงไฟฟ้าเสมือนจะช่วยทำให้เกิดการใช้ประโยชน์สูงสุดด้านการเงินผ่านกลยุทธ์ที่เหมาะสมกับระบบกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบกระจาย (DERs) ในโครงข่ายไฟฟ้าได้มากขึ้นตามการใช้งานแต่ละตลาด [1],[3]

2. โรงไฟฟ้าเสมือนทางเทคนิค (Technical Virtual Power Plant; TVPP)

มีจุดมุ่งหมายด้านความน่าเชื่อถือของการทำงานของโรงไฟฟ้าเสมือน ให้ข้อมูลแบบทันทีทันใดของโรงไฟฟ้าสมาชิก ทำให้กำลังการผลิตแบบกระจายมีความต่อเนื่องและแม่นยำผ่านกลไกควบคุม สร้างแผนการเดินเครื่อง ตอบสนองต่อคุณลักษณะตามผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Independent system operator; ISO) เช่น คุณภาพกำลังไฟฟ้า การรักษาเสถียรภาพของระบบฯ ลดผลกระทบจากพลังงานหมุนเวียน ที่เกิดจากการรวบรวมและควบคุมแหล่งพลังงานที่หลากหลายเทคโนโลยีที่เป็นสมาชิกของโรงไฟฟ้าเสมือน ทำให้มีคุณลักษณะทางกำลังไฟฟ้ามีความเสถียรและมีความน่าเชื่อถือ [1],[3]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



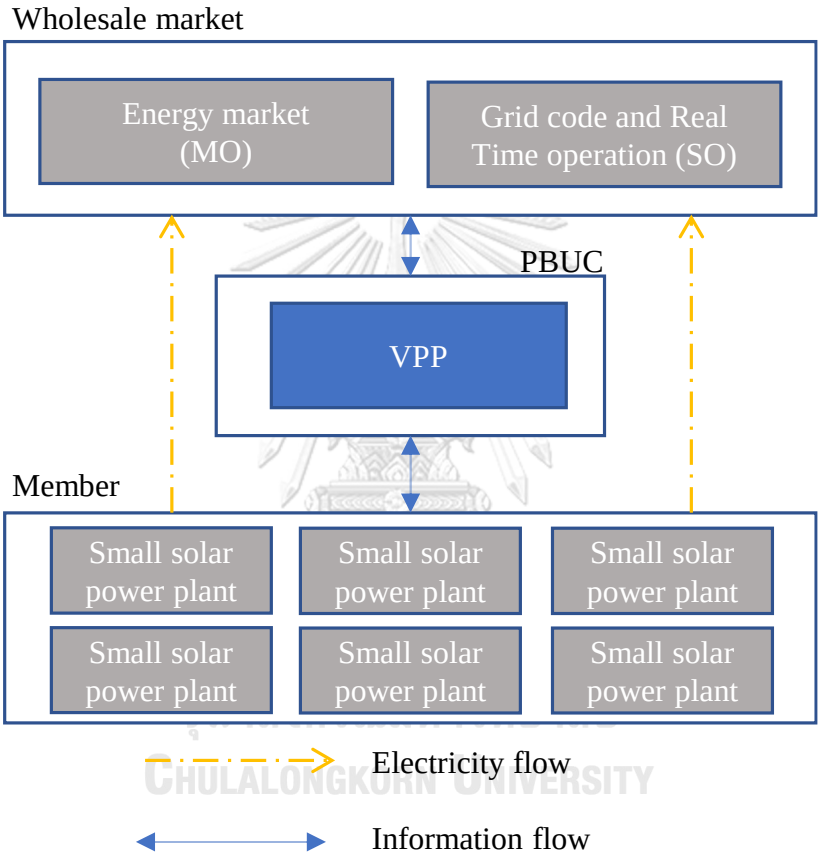
รูป 2-1 ภาพรวมระบบไฟฟ้าและโรงไฟฟ้าเสมือน

2.1.2 การดำเนินการของโรงไฟฟ้าเสมือนบนโครงข่ายไฟฟ้าสมาร์ทกริด

การดำเนินการของโรงไฟฟ้าเสมือนจะเป็นส่วนหนึ่งของระบบโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งจะดำเนินการบริหารจัดการและสร้างกลยุทธ์กำลังผลิตไฟฟ้าตอบสนองต่อผู้ให้บริการโครงข่ายไฟฟ้าและสมาชิก โดยคำนึงถึงผู้ที่เกี่ยวข้องจากการจัดการกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการรวบรวมสมาชิกเช่นโรงไฟฟ้าแสงอาทิตย์ โรงไฟฟ้าพลังงานลม โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำโรงไฟฟ้าโคเจนเนอเรชั่น รวมถึงแบตเตอรี่ ซึ่งโรงไฟฟ้าเสมือนจะจัดการกำลังผลิตในรูปแบบปันส่วน (Power commitment Allocation and Technical rescheduling) [1] ระหว่างมุมมองทางพาณิชย์และทางเทคนิคโดยมีผู้ส่วนได้ส่วนเสียหลักนั้นแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

- ธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน ทำหน้าที่รวบรวมและจัดการสมาชิกในโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อเพิ่มมูลค่าให้พลังงานหมุนเวียน ตอบสนองทั้งผู้ซื้อและผู้ขายพลังงานไฟฟ้า
- ตลาดซื้อขายไฟฟ้าระดับขายส่ง ประกอบด้วยผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้าและผู้ดูแลตลาดซื้อขายไฟฟ้า ทำหน้าที่ควบคุมระบบโครงข่ายไฟฟ้า ตลอดจน ราคา อุปทาน และอุปสงค์ของระบบกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามกลไกตลาด
- สมาชิกของโรงไฟฟ้าเสมือน ทำหน้าที่ส่งมอบพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแต่ละไซต์และข้อมูลพยากรณ์เพื่อนำเสนอกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้านั้นๆ รวมถึงความต้องการการใช้ไฟฟ้า

โดยโรงไฟฟ้าเสมือนนั้นจะสร้างกลยุทธ์กำหนดกำลังผลิตไฟฟ้าตอบสนองต่อตลาดซื้อขายไฟฟ้าระดับขายส่งซึ่งในที่นี้คือการกำหนดการเดินเครื่องด้วยฐานราคา ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์แล้วส่งคำสั่งการผ่านระดับชั้นโครงข่ายสมาร์ทกริด ผ่านตัวควบคุม ไปจนถึงสมาชิกโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่กระจายอยู่ในระบบเพื่อส่งมอบกำลังไฟฟ้าตามกำหนดการเดินเครื่องที่วางแผนไว้ [1],[3] ดังรูป 2-2



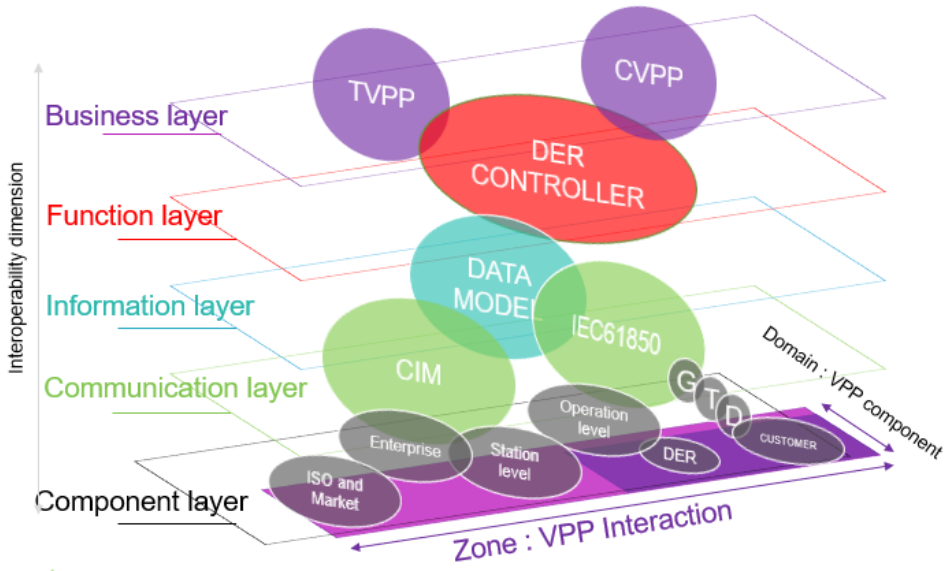
รูป 2-2 การดำเนินการโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อตอบสนองต่อตลาดซื้อขายไฟฟ้าและสมาชิก

เพื่อส่งทอดนโยบายและกลยุทธ์จากโรงไฟฟ้าเสมือน ขอบเขตโรงไฟฟ้าเสมือนจะเกี่ยวข้องระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย (DER) ผู้ใช้ไฟฟ้าและระบบจำหน่าย ตามลำดับ ซึ่งการพัฒนาโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อตอบสนองด้านพาณิชย์และด้านเทคนิค นั้นจะถูกส่งทอดการจัดการผ่านลำดับชั้นอาศัยข้อมูลจากชั้นข้อมูลที่ได้จากระบบต่างๆ ผ่านมาตรฐาน IEC61850 เป็นหลัก ทั้งการรับ-ส่งข้อมูลการสั่งการไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ (Intelligent Electronic Device; IED) เพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของสมาชิกโรงไฟฟ้าเสมือน [4]

นอกจากนี้โรงไฟฟ้าเสมือนจะต้องตอบสนองและสั่งการโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบกระจายต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าในชั้นส่วนประกอบ (Component layer) ส่วนการสื่อสารเพื่อส่งข้อมูลให้สถานี องค์กร หรือผู้กำกับดูแล ผ่านการสื่อสารกลาง (Common information model; CIM) จะเป็นการสื่อสารตั้งแต่ระดับสถานีขึ้นไป [4]

การดำเนินการของโรงไฟฟ้าเสมือนในระบบโครงข่ายสมาร์ทกริดแบ่งระบบไฟฟ้าตามขอบเขตและพื้นที่ (Domain and Zone) บนโครงสร้างสถาปัตยกรรมโครงข่ายไฟฟ้าสมาร์ทกริดดังรูป 2-3 สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ระดับ [4] คือ

1. ระดับชั้นส่วนประกอบของระบบ (Component layer) คือชั้นที่เป็นส่วนต่างๆของระบบไฟฟ้าที่สำคัญในทางกายภาพประกอบด้วยส่วนต่างๆของระบบไฟฟ้ากำลังคือ ระบบการผลิต ระบบส่ง ระบบจำหน่าย ผู้ใช้ไฟฟ้า ระบบการผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย ผู้ดูแลระบบระดับปฏิบัติการ ผู้ดูแลระบบระดับสถานี องค์กร และผู้กำกับดูแลตลาดและระบบไฟฟ้า
2. ระดับสื่อสาร (Communication layer) คือชั้นที่เป็นการสื่อสารของข้อมูลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ แต่ละขอบเขตก็จะใช้มาตรฐานที่แตกต่างกัน ประกอบด้วยการสื่อสารผ่านมาตรฐาน IEC61850 และการสื่อสารกลาง (Common information model; CIM)
3. ระดับชั้นข้อมูล (Information layer) คือชั้นสารสนเทศที่ได้จากการเก็บรวบรวมและจัดการกับข้อมูลสำหรับนำไปใช้ในการสร้างมูลค่าให้กับชั้นธุรกิจต่อไป
4. ระดับชั้นหน้าที่ (Function layer) คือชั้นที่มีหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากชั้นข้อมูล จากนั้นนำมาสร้างเป็นกลยุทธ์ต่างๆ ผ่านกลไกที่สร้างขึ้นแล้วสั่งการให้ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตอบสนองในรูปแบบต่างๆตามชั้นธุรกิจต้องการ
5. ระดับชั้นธุรกิจ (Business layer) คือชั้นที่รวบรวมไว้ซึ่งความต้องการต่างๆทางธุรกิจประกอบด้วย CVPP และ TVPP



รูป 2-3 แผนผังสถาปัตยกรรมโรงไฟฟ้าเสมือน [4]

2.1.3 การวางแผนโรงไฟฟ้าเสมือน

การวางแผนโรงไฟฟ้าเสมือน จำเป็นต้องศึกษาจุดประสงค์ของโรงไฟฟ้าเสมือนทำให้การกำหนดการเดินเครื่องเหมาะสมกับการออกแบบที่ตั้งเป้าหมายไว้โดยจะส่งมอบกำลังไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพตามขั้นตอนนั้น แบ่งเป็นขั้นตอนการวางแผนวัตถุประสงค์ และ ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสม [3] คือ

1. ขั้นตอนการวางแผนวัตถุประสงค์ (Objective Planning) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ
   - ทางพาณิชย์ เช่นการหาจุดต่ำสุดของต้นทุนการผลิต การหาจุดต่ำสุดจากการสูญเสียในสายส่ง และการหาจุดสูงสุดสำหรับกำไร
   - ทางเทคนิค เช่นการหาจุดสูงสุดของความน่าเชื่อถือของระบบ การเพิ่มประสิทธิภาพการรักษาระดับแรงดัน การลดการรบกวนระบบจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า และการบริการบำรุงรักษา
   - ทางสิ่งแวดล้อม เช่น การหาจุดต่ำสุดของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การหาจุดสูงสุดของการให้พลังงานหมุนเวียนเข้ามาในระบบ และการสนับสนุนพลังงานหมุนเวียนมากที่สุด

2. ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization of VPP)

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์จำเป็นต้องทราบข้อมูลที่จำเป็นต่อการหาวิธีการที่เหมาะสมต่อเป้าหมาย เช่น ต้นทุนต่อการผลิตของพลังงาน สมดุลพลังงาน ความสูญเสียจากการผลิตและการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับพลังงานหมุนเวียน โดยการหาค่าที่เหมาะสมผ่านระเบียบวิธีการ [1],[3] สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทดังนี้

- การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างพลังงาน คือเมื่อมีการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนใหม่หรือต้องการทราบกำลังการผลิตจากพลังงานหมุนเวียน ระบบกักเก็บพลังงาน การใช้ไฟฟ้า การติดตั้งโรงไฟฟ้าใหม่บนโครงข่ายไฟฟ้าเดิม
- การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเสมือน คือเมื่อทราบขนาดโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ขนาดแบตเตอรี่ ผลิตภัณฑ์ทางด้านพลังงาน จึงทำการหาค่ากำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน อัตราการรับและปล่อยพลังงานของระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าต่อไป

โดยระเบียบวิธี (Methodology) ที่แนะนำใช้ในงานหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือนมีดังนี้ a) ระเบียบวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล b) ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข เช่น โปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming) โปรแกรมที่ไม่ใช่เส้นตรง (Non-linear programming) โปรแกรมเชิงพลวัต (Dynamic programming) c) วิธีฮิวริสติก (Heuristic method) และเทคนิคที่จะนำมาทำแบบจำลองเช่น Monte Carlo simulation

แบบจำลองความไม่แน่นอนสำหรับการวางแผนการทำงานโรงไฟฟ้าเสมือน และการจัดการกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วยตัวแปร 3 ด้าน ดังตาราง 2-1

ตาราง 2-1 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการวางแผนโรงไฟฟ้าเสมือน [1],[3],[5]

Technical parameter	Economical parameter	Climatological parameter
• Voltage and Frequency regulation • Unplanned line outage • Equipment failure • Network losses • Load Demand and Production • Ramp-rate control	• Distributed Generation • Distributed Energy Resources • Energy market • Energy pricing • Cost of Energy • Energy Policy	• Power of Renewable energy resource • Renewable energy forecast

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากขั้นตอนและระเบียบวิธีการ สามารถลำดับการจัดการพลังงานของโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อตอบสนองต่อผู้ใช้งานและสมาชิก ได้ 4 ลำดับ [1],[3],[5] คือ

1. การนำเข้าข้อมูลพยากรณ์การกำลังผลิตที่ได้จากพลังงานหมุนเวียน ข้อมูลหน่วยพลังงานที่คาดการณ์สามารถผลิตได้
2. ใช้การแก้ปัญหาความเหมาะสมแบบสุ่ม (Stochastic Optimization) เพื่อหาสัญญาณการผลิตและกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือน
3. เมื่อเข้าใกล้เวลาส่งมอบพลังงาน จากการกำหนดกำลังการผลิตต้องยืนยันและอัพเดทค่าพยากรณ์ เพื่อทำการปรับตัวการเดินเครื่องของระบบการผลิตแบบกระจาย
4. การกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้จากการวางแผนนั้นจะเกิดประโยชน์ของโรงไฟฟ้าเสมือนต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสียดังนี้ ตาราง 2-2

ตาราง 2-2 ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียและประโยชน์ของโรงไฟฟ้าเสมือน

ผู้กำหนดนโยบาย	• เพิ่มการใช้งานพลังงานหมุนเวียนแบบกระจายเป็นวงกว้าง • ลดสภาวะเรือนกระจก เพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนของประเทศ
ด้านอุปทานและผู้รวบรวมกำลังการผลิต	• ลดความเสี่ยงทางเศรษฐศาสตร์ด้านอุปทาน • สร้างโอกาสสำหรับผู้ซื้อและผู้ผลิตพลังงานหมุนเวียนแบบกระจาย • ทำให้ความเบี่ยงเบนของอุปสงค์และอุปทานน้อยลง • ทำให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ • ลดการสูญเสียจากสายส่ง • สร้างโอกาสทางธุรกิจและการจ้างงาน
ด้านอุปสงค์	• ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับประสบการณ์ใหม่พลังงานทางเลือก • เพิ่มคุณภาพให้พลังงานด้านความน่าเชื่อถือของพลังงานหมุนเวียน
ด้านผู้ผลิตพลังงานหมุนเวียนแบบกระจาย	• สามารถจัดการพลังงานได้ตรงตามความต้องการ • สามารถจัดการพลังงานที่เหมาะสมภายในหน่วยงาน
ด้านผู้ให้บริการระบบจำหน่ายและระบบส่ง	• มีบริการเสริมสำหรับช่วยในการบริหารระบบ • สร้างการดำเนินงานร่วมกันระหว่างหน่วยงาน • ทำให้สามารถทราบถึงข้อมูลโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบกระจายที่ต่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 รูปแบบเชิงธุรกิจของโรงไฟฟ้าเสมือน

รูปแบบเชิงธุรกิจของโรงไฟฟ้าเสมือนกำหนดจากโครงสร้างโรงไฟฟ้าเสมือนพบว่าการเข้าถึงแหล่งผลิตไฟฟ้าที่กระจายตัวอยู่จำเป็นต้องมีการวางแผนให้เข้ากับความไม่แน่นอนของพลังงานหมุนเวียน โดยการจัดการพลังงานโรงไฟฟ้าเสมือน เพื่อ 1. การลดต้นทุนการผลิตพลังงาน 2. การลดความสูญเสียจากระบบจำหน่ายและระบบส่ง (Losses in distribution and transmission network) 3. ลดผลกระทบด้านการเกิดก๊าซเรือนกระจก 4. เพิ่มอัตรากำไรต่อหน่วยของพลังงาน (Profit margin of energy) 5. ทำให้พลังงานไฟฟ้ามีคุณภาพ [3]

ด้านการบริการพลังงานไฟฟ้าของธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนสร้างโอกาสสำคัญ [3] ดังต่อไปนี้

1. ด้านการแลกเปลี่ยนพลังงาน (Energy Trading) : เพื่อสร้างโอกาสใหม่ให้กับผู้ผลิตไฟฟ้าที่กระจายตัวทั่วไปในลักษณะแข่งขันแบบขายส่ง
2. ด้านบริการแก่โครงข่ายไฟฟ้า (Network services) : เพื่อให้การสนับสนุนทั้งระบบส่งและระบบจำหน่าย
3. ด้านบริการสมดุลพลังงาน (Balance services) : เพื่อรักษาระดับระหว่างกำลังการผลิตและปริมาณการใช้ไฟฟ้าให้เป็นไปอย่างราบรื่น ณ เวลาจริง ทำให้เกิดประโยชน์ด้านเศรษฐศาสตร์ คุณภาพไฟฟ้า และสิ่งแวดล้อมทุกๆภาคส่วน
4. ด้านการหาค่าเหมาะสม (Optimization) : สำหรับการผลิตและการใช้ไฟฟ้าภายในโรงไฟฟ้าเสมือนเอง หรือ การจ่ายหรือรับพลังงานกับภายนอกเช่นตลาด ผู้ดูแลระบบส่งและผู้ดูแลระบบจำหน่าย

หลังจากนิยามโรงไฟฟ้าเสมือนว่าเป็นเทคโนโลยีการจัดการที่รวบรวมแหล่งกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้เหมือนโรงไฟฟ้าดังเดิมหรือมีคุณสมบัติจากการผลิตไฟฟ้าในลักษณะโรงไฟฟ้าหนึ่ง (As a unique power plant) นั้น โรงไฟฟ้าเสมือนจะสร้างฟังก์ชันอัลกอริทึมเพื่อหาค่าสัญญาณเป็นตัวแทนจากการรวบรวมกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานต่างๆ และเชื่อมประสานงานกับหน่วยงานกลาง ระบบจำหน่าย หรือระบบส่งที่จะทำให้โรงไฟฟ้าเสมือนสามารถจ่ายพลังงานที่เป็นไปตามความต้องการในรูปแบบขายส่งพลังงานไฟฟ้า รวมไปถึงการให้บริการกับผู้ให้บริการระบบจำหน่ายและระบบส่ง และผู้ดูแลตลาด ซึ่งเป้าหมายหลักคือการให้ผลกำไรแก่ธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนและผู้ผลิตพลังงานหมุนเวียนแบบกระจายโดยที่คำนึงถึงสถานะหรือการลดผลกระทบกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าโดยการจ่ายและรับพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสม เพิ่มมูลค่าทางสิ่งแวดล้อม และลดต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ [4]

สำหรับทางปฏิบัติแล้วตลาดพลังงานในสหภาพยุโรปจะดำเนินการด้านรวบรวมอุปทานพลังงาน โรงไฟฟ้าเสมือนจะทำหน้าที่ซื้อและขายไฟฟ้า เพื่อทำให้พลังงานหมุนเวียนมีความหลากหลายเข้าไปในตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบขายส่ง (Wholesale market) ตลาดพลังงานในอเมริกา

ส่วนมากจะดำเนินการด้านอุปสงค์โรงไฟฟ้าเสมือนจะทำหน้าที่รวบรวมการใช้ไฟฟ้าในสภาวะต่างๆ เช่นตั้งแต่ปี 2017 มีการใช้การตอบสนองด้านผู้ใช้งานจากผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่ การใช้มาตรการด้านราคาตามช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้ามาก (Peak critical pricing programs) เมื่อความต้องการ การใช้ไฟฟ้าจากระบบสูงมาตรการเหล่านี้ก็จะทำให้โรงไฟฟ้ารูปแบบเดิม (Conventional power plant) สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อไปได้ โดยมีความมั่นคงของระบบเช่นเดิมโดยการวางแผนจะมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการจัดการพลังงานโรงไฟฟ้าเสมือน [3],[4] ดังตาราง 2-3

ตาราง 2-3 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการจัดการพลังงานโรงไฟฟ้าเสมือน [3]

Power plant information	Power prediction	Market data	Usage data
• Availability • Install capacity • Storage capacity • Operator Specification	• Wind power • Solar power	• Market price • Contract • Power balancing	• Grid usage • Load forecast • Purchase contract

2.2.1 รูปแบบรายได้

รูปแบบรายได้ขอโรงไฟฟ้าเสมือน ปัจจุบันตลาดไฟฟ้ามีการวางแผนล่วงหน้าหนึ่งวัน (Day ahead market; DAM) และ การวางแผนระหว่างวัน (Intraday market) เป็นที่นิยมวงกว้างเพื่อทำให้โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเช่นพลังงานแสงอาทิตย์สามารถจ่ายไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องรวมไปถึงโรงไฟฟ้าเสมือนที่รวบรวมเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนและระบบกักเก็บพลังงาน โดยการตลาดมีจุดประสงค์เพื่อจัดสรรกำลังการผลิตและระบบกักเก็บพลังงานตอบสนองต่อ 3 ตลาดซื้อขายไฟฟ้าพื้นฐาน [5] คือ

1. ตลาดล่วงหน้าหนึ่งวัน (Day ahead market) : การซื้อขายแบบส่งที่ต้องการวางแผนล่วงหน้าตั้งแต่ 1 วันขึ้นไป
2. ตลาดระหว่างวัน (Intraday market) : การซื้อขายแบบระหว่างวันจะมีตลาดรองรับแผนการเสนอซื้อขายทุกๆ 4 ชั่วโมง จนถึงระดับ 1 ชั่วโมงเพื่อรองรับความไม่แน่นอนที่เกิดจากตลาดล่วงหน้าหนึ่งวัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

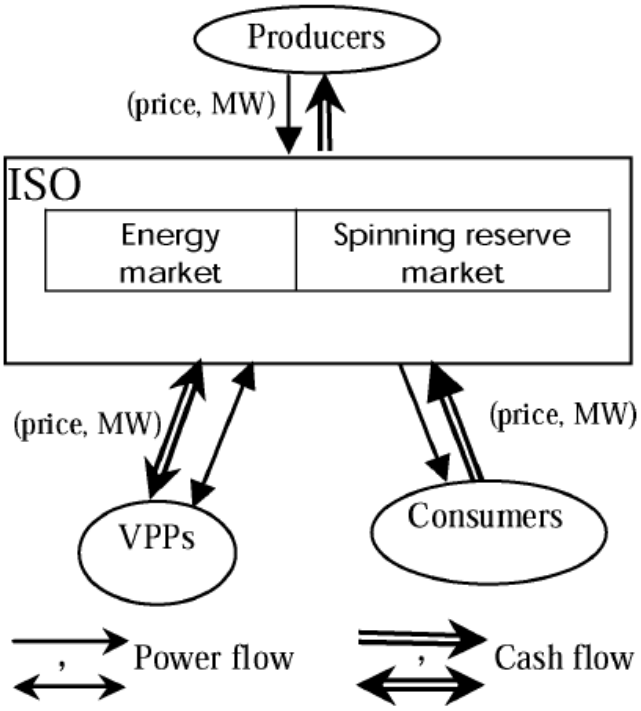
3. ตลาด ณ เวลานั้นที่จุดเชื่อมต่อหรือตลาดสมดุลพลังงาน (Real-time balancing) เพื่อรักษาสมดุลระหว่างกำลังการผลิตและความต้องการใช้ไฟฟ้า การซื้อขาย ณ เวลานั้นเพื่อแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดจากตลาดระหว่างวัน

มีงานวิจัย [6] นำเสนอการตอบสนองด้านโหลด (Demand response; DR), Distributed Generation, Distributed energy storage (DES) และ Distributed energy resources (DER) ในมุมมองของโรงไฟฟ้าเสมือน จะเสนอพลังงาน (Energy), บริการเสริม (Ancillary service; A/S) ให้กับผู้ให้บริการโครงข่าย (Independent system operator; ISO)/(Regional transmission organization; RTO) โดยโรงไฟฟ้าเสมือนจะเสนอผลิตภัณฑ์ สำหรับ 3 ตลาด คือ

1. ตลาดกำลังการผลิต (Install capacity or Unit commitment availability)
2. ตลาดพลังงาน (Day-ahead, Real-time balancing)
3. ตลาดบริการเสริม (Ancillary service) 3 ด้าน
    - บริการด้านการควบคุม (Regulating reserve)
    - บริการด้านกำลังผลิตสำรองพร้อมจ่ายแบบการเดินเครื่อง (Spinning reserve)
    - บริการด้านอื่นๆ ที่เป็นกำลังผลิตสำรองและกำลังสำรองผลิตพร้อมจ่ายแบบไม่เดินเครื่อง (non-spinning reserve)

งานวิจัยนี้ [2, 7, 8] กำหนดรูปแบบรายได้จากกรอบการตลาด (Framework) โรงไฟฟ้าเสมือนสามารถเข้าร่วมในการซื้อขายพลังงานในตลาดพลังงานไฟฟ้า (Energy market) และตลาดบริการเสริม (Ancillary service market) ในที่นี้คือกำลังการผลิตสำรองแบบเดินเครื่อง (Spinning reserve market) ทำให้โรงไฟฟ้าเสมือนสามารถขายพลังงานไฟฟ้าให้กับหน่วยงานกับกำดูแล (Independent System operator) จะเห็นว่า กระแสเงินจะสามารถไหลเข้าและออกจากโรงไฟฟ้าเสมือนเนื่องจากสามารถซื้อและขายพลังงานได้ 2 ทิศทาง ขึ้นอยู่กับราคาและช่วงเวลาของวันจึงสรุปได้ว่า รายได้สามารถเกิดจากการขายพลังงานให้กับ 2 ตลาด ซึ่งจะมีราคาของพลังงานที่แตกต่างกัน ดังรูป 2-4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูป 2-4 กรอบการตลาด [2]

2.2.2 รูปแบบรายจ่าย

รูปแบบรายจ่ายสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือน มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากการรับซื้อไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบกระจายแบบต่างๆ จากการสร้างกลยุทธ์การเดินเครื่องสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือนที่มีความยืดหยุ่นด้านการรวบรวมพลังงานหมุนเวียนแบบกระจายได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับเวลา สถานที่ ขอบเขตที่สนใจ และทรัพยากรนั้น จึงเกิดเป็นแนวทางได้หลายวิธีนำมาเปรียบเทียบเพื่อตอบสนองผู้ซื้อและผู้ขายได้ โดยที่ระดับชั้นล่าง (Lower-level agent) จะตอบสนองความต้องการด้านไฟฟ้าซึ่งเป็นต้นทุนด้านการรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าเสมือนต่อความต้องการใช้ระดับชั้นด้านบน (Upper-level agent) เป็นผู้รับซื้อไฟฟ้าในตลาดต่างๆ ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของพลังงานดังตาราง 2-4

ต้นทุนของโรงไฟฟ้าเสมือนหรือรายจ่ายนั้นจะขึ้นอยู่กับ ประเภทของสมาชิกที่รวบรวมมาในโรงไฟฟ้าเสมือนแตกต่างกันออกไปแบ่งออกได้เป็น ต้นทุนจากการผลิตไฟฟ้านั้นๆเช่น ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า ต้นทุนเทียบกับราคาตลาด ต้นทุนตามนโยบายการรับซื้อไฟฟ้า ต้นทุนของแบตเตอรี่ ต้นทุนระบบกักเก็บพลังงาน ต้นทุนการเก็งกำไร ต้นทุนการกักเก็บพลังงานอ้างอิง [2, 7, 8] โดยงานวิจัยนี้จะใช้การจัดสรรราคาแก่สมาชิก

ตาราง 2-4 เปรียบเทียบลักษณะกลยุทธ์เพื่อตอบสนองรูปแบบตลาด

Literatures	Participation				
	Upper-level agent	*Lower-level agent*	*Market*	*Objective function*	*Optimization method*
[9]	ISO	DER	Wholesale	Maximize profit	Linear programming and Robust optimization
[10]	ISO	Large Consumer	Wholesale	Maximize utility benefit	Mixed-integer linear programming
[11]	ISO	Distribution system operator	Wholesale and Reserve	Maximize profit	Non-linear programming
[12]	Distribution system operator	DER and Load	Wholesale	Minimize cost	Mixed-integer linear programming and Nonlinear Programming
[13]	Distribution system operator with ISO	DER and Load	Wholesale	Maximize revenue	Linear Programming
[14]	ISO	Plug-in Electric vehicle	Ancillary Service	Maximize profit	Mixed-integer linear programming
[15]	Plug-in Electric vehicle	Consumers	Retail	Maximize profit	Mixed-integer linear programming
Proposed	ISO	Solar Power Plant	Wholesale	Maximize profit	Linear programming

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตาราง *2-4* นำเสนองานวิจัยในอดีต เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบธุรกิจของโรงไฟฟ้าเสมือน โดยรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อลูกค้า รูปแบบการตลาด วัตถุประสงค์ และระเบียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

2.2.3 การสั่งการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าด้วยฐานราคา

การสั่งการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าด้วยฐานราคา (Price-based unit commitment; PBUC) คือการวางแผนกำหนดการกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการกับผู้ใช้งานตามสัญญาโดยคำนึงถึงสัญญาณราคาเป็นหลักเพื่อผลประกอบการทางธุรกิจ ซึ่งมีเงื่อนไขต่างๆเพื่อสนับสนุนพื้นฐานทางกายภาพและโครงสร้างการซื้อขายบนระบบโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อที่จะหาผลกำไรสูงสุดแต่ละชั่วโมง โดยตลาดซื้อขายไฟฟ้าจะแยกการซื้อขายผลิตภัณฑ์พลังงานไฟฟ้าและการซื้อขายบริการเสริมเช่นกำลังผลิตสำรองเพื่อความมั่นคงออกจากกัน ในการคำนึงถึงนั้นสัญญาณราคาจะทำให้เกิดการกำหนดการเดินเครื่องของแหล่งพลังงานหมุนเวียนแบบกระจายแตกต่างกันแต่ละเวลา [16], [17]

การกำหนดเงื่อนไขสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือนโดยใช้การสั่งการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าด้วยฐานราคานั้นจะทำหน้าที่เป็นผู้ส่งพลังงานไฟฟ้าเพื่อการแลกเปลี่ยนพลังงานของสมาชิกและผู้ซื้อไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าเสมือนทั้งผลิตภัณฑ์พลังงานและบริการเสริมตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าของโรงไฟฟ้าเสมือนโดยการสั่งการเดินเครื่องหรือกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้ามีเป้าประสงค์คือผลกำไรของธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน ซึ่งแตกต่างจากการสั่งการเดินเครื่องแบบศูนย์ควบคุมกำลังไฟฟ้า (SO) จะดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้าภาพรวมเพื่อรักษาความมั่นคง เสถียรภาพและต้นทุนของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ทั้งด้านผู้ใช้ไฟฟ้าและผู้ผลิตไฟฟ้าก่อนส่งมอบให้ระบบจำหน่าย โดยการสั่งการเดินเครื่องหรือกำหนด (Unit commitment) การเดินเครื่องโรงไฟฟ้ามีเป้าประสงค์คือต้นทุนต่ำสุด [17]

บทบาทของ PBUC นั้นยังเป็นรูปแบบในการเสนอราคาซื้อขาย (Bidding Strategy) โรงไฟฟ้าเสมือนจะมีหน้าที่เป็นทั้งผู้ซื้อและผู้ขายขึ้นอยู่กับทิศทางการแลกเปลี่ยนพลังงานบนโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดราคาและเงื่อนไขสำหรับสมาชิกให้เข้ากับราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้าหรือนโยบายในประเทศนั้นๆ [2],[9],[10]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.4 งานวิจัยและการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับตลาดซื้อขายไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือน

โรงไฟฟ้าเสมือนสามารถตอบสนองตลาดซื้อขายไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งคุณลักษณะของไฟฟ้าได้ตามความต้องการใช้ไฟฟ้า ทำให้ลูกค้าได้รับคุณสมบัติของการใช้ไฟฟ้าที่ครบถ้วนจากการส่งมอบพลังงานที่มีปริมาณ คุณภาพของพลังงาน คุณภาพของบริการตรงตามช่วงเวลาใช้งาน ในราคาที่เหมาะสมให้แก่ผู้บริโภค อีกทั้งยังเพิ่มทางเลือกเสรีในการใช้พลังงานและความน่าเชื่อถือของระบบส่งผลให้เกิดประโยชน์ทั้งผู้ขายและผู้ซื้อด้านสวัสดิการสังคม (Social Welfare) เพิ่มสูงขึ้น เช่น ปัจจุบันผู้ดูแลตลาดพลังเช่นหน่วยงานแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า (Power Exchange; PX) เกิดขึ้นในยุโรปดูและควบคุมตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบ Day-ahead market และ Intraday market เพื่อทำหน้าที่หาราคาที่เป็นธรรม ให้ความโปร่งใสและความปลอดภัยกับผู้ลงทุน ทำให้การซื้อขายมีลำดับขั้นตอน ลดความเสี่ยงคู่ค้าและมีมาตรการรองรับ มีส่วนช่วยในการบริหารความแออัดระบบส่ง

กิจกรรมการซื้อขายจะทำให้เกิดประสิทธิภาพมากกว่าแบบคู่สัญาทวิภาคี (Bilateral Contract) โดยหลักการแล้วการซื้อขายพลังงานจะมีสภาพคล่อง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของราคาอย่างรุนแรง ดังนั้นการแข่งขันและตลาดเสรีจะทำให้ตลาดประสบความสำเร็จ มีความยุติธรรมคือไม่เลือกปฏิบัติอีกด้วย [18-20]

ตลาดซื้อขายไฟฟ้าและตลาดค้าส่งไฟฟ้าสหรัฐอเมริกา ขึ้นอยู่กับการแข่งขันตลาดและผู้ให้บริการ ปัจจุบันได้เปิดการค้าเสรีบนระบบโครงข่ายไฟฟ้า ประกาศบนฐานข้อมูลอินเตอร์เน็ต ณ ข้อมูลเวลาเดียวกัน (Open-Access Same-Time Information System; OASIS) สำหรับการใช้กำลังสายส่งและการใช้กำลังสำรองสายส่ง(Transmission capacity and Reserving transmission capacity) ระเบียบเหล่านี้มีความสำคัญมากในการเปลี่ยนการควบคุมและจำกัดความสามารถแต่ละบริษัทในการใช้สายส่งและกำลังผลิตไฟฟ้าแต่ละหน่วยให้กับตลาด ขณะที่การควบรวมการตลาดกับการดูแลระบบไฟฟ้า คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานของสหรัฐ (Federal Energy Regulatory Commission; FERC) ได้มอบหมายให้ศูนย์ควบคุมกำลังไฟฟ้าอิสระ (Independent system operators; ISO) เปิดการเข้าถึงระบบส่งโดยให้การดูแลระบบอย่างอิสระ และให้การแข่งขันการขายพลังงานไฟฟ้าบนตลาดค้าส่งและบางกลุ่มสร้างเป็นระบบส่งภูมิภาค (Regional transmission organizations; RTOs) คล้าย ISOs เพื่อดูแลระบบส่งและพัฒนาขั้นตอนการซื้อขายให้เป็นธรรม แต่ละ ISOs และ RTOs มีพลังงานและบริการเสริมด้านอื่นๆเพื่อให้ผู้ซื้อและผู้ขายไฟฟ้าสามารถซื้อขายพลังงานไฟฟ้าได้ โดยที่ ISOs และ RTOs ใช้สัญญาซื้อขายเป็นตัวตัดสินใจเรียกเดินเครื่อง ปัจจุบันมี 2 รูปแบบ [21] คือ

1. ตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบขายส่งเดิม (Traditional Wholesale Electricity Market)

หนึ่งในสามส่วนของประเทศยังอยู่ภายใต้ตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบเดิมซึ่งมีหน้าที่ผลิตไฟฟ้าและส่งไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าในหลายรัฐให้ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายไฟฟ้า สมดุลพลังงาน สั่งเดินเครื่องด้วยต้นทุนต่ำสุด ประสานงานระหว่างพื้นที่ควบคุม วางแผนความต้องการระบบส่ง ประสานงานผู้พัฒนาระบบและระบบพื้นที่ใกล้เคียง

2. ตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบขายส่งภูมิภาค (Regional Electricity Markets; RTO/ISO market)

สองในสามของประเทศ เป็นตลาดซื้อขายไฟฟ้าผ่านกลไกการตลาดแบบแข่งขัน ทำหน้าที่ให้ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดูแลโครงข่ายไฟฟ้าตามพื้นที่ สมดุลพลังงาน ควบคุมการแข่งขันให้เป็นธรรมกับตลาด ให้ความเป็นธรรมกับผู้ผลิต วางแผนสำหรับการขยายโครงข่ายระบบส่งบนพื้นฐานภูมิภาค โดยบทบาทสำคัญคือกำหนดกลไกการซื้อขายให้มีความน่าเชื่อถือทางด้านไฟฟ้า แบ่งเป็นตลาดพลังงานสำหรับหนึ่งวันล่วงหน้า (Day-ahead market) ถึงร้อยละ 95, การตลาดสมดุลพลังงาน (Real-time market or Balancing market) ร้อยละ 5 และการตลาดบริการเสริม (Ancillary Service) เป็นฟังก์ชันหนึ่งสำหรับการผลิตไฟฟ้าเพื่อรองรับความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้น

ในระบบไฟฟ้าเพื่อรักษาความน่าเชื่อถือซึ่งแบ่งออกเป็นกำลังผลิตสำรองแบบเดินเครื่อง (Spinning reserves) กำลังการผลิตสำรองแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning reserves) กำลังการผลิตตามการความคุม (Regulation) และอื่นๆ ดังตาราง 2-5 ปัจจุบันมี 7 ผู้ดูแลและมีกำลังการใช้ไฟฟ้าสูงสุดดังนี้

- PJM, 165 GW (summer of 2011)
- MISO (Midcontinent), 127 GW (summer of 2011)
- ERCOT (Texas), 71 GW (summer of 2016)
- SPP (Southwest Power pool), 51 GW (summer of 2016)
- CAISO (California), 50 GW (summer of 2006)
- NYISO (New York), 34 GW (summer of 2013)
- ISO-NE (New England), 28 GW (summer of 2006)

ตาราง 2-5 สรุปตลาดพลังงานแบบต่างๆ ตามช่วงเวลาและความสำคัญ ในสหรัฐอเมริกา

Energy Market	**ตัวอย่างรายละเอียด**
Day-Ahead Market (DAM)	เพื่อแลกเปลี่ยนพลังงานให้กำลังผลิตเหมาะสมกับผู้ใช้งาน ผู้ซื้อขายต้องตกลงส่งคำสั่งซื้อขายแต่ละชั่วโมงของวัน ล่วงหน้า 1 วันบนระบบก่อนส่งมอบพลังงาน
Hour-Ahead Market (HAM)	เพื่อสมดุลพลังงานที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของการใช้งานหลังจากซื้อขายในตลาดหนึ่งวันล่วงหน้าปิดแล้ว ผู้ซื้อขายต้องตกลงส่งคำสั่งซื้อขายแต่ละชั่วโมงของวันล่วงหน้า 1 ชั่วโมงบนระบบก่อนส่งมอบพลังงาน
Real-Time Market	เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบแบบทันทีทันใด ผู้ซื้อขายต้องตกลงประสานงานกับผู้ดูแลระบบเพื่อให้การสมดุลพลังงานแบบทันทีทันใดสำหรับพลังงานไฟฟ้าทุกๆ 5 นาที
Ancillary and Other Services	เพื่อสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าให้กับการใช้ไฟฟ้าผู้ซื้อขายต้องตกลงซื้อขายตามคุณลักษณะของลักษณะบริการเสริมไฟฟ้าเช่น กำลังผลิตสำรองแบบเดินเครื่อง (Spinning reserves) ให้สามารถขนาดระบบได้ภายใน 10นาที กำลังการผลิตสำรองแบบไม่เดินเครื่อง (Non-Spinning reserves) กำลังการผลิตสำรอง ให้สามารถขนานระบบได้ภายใน 10นาที กำลังการผลิตตามการความคุม (Regulation)

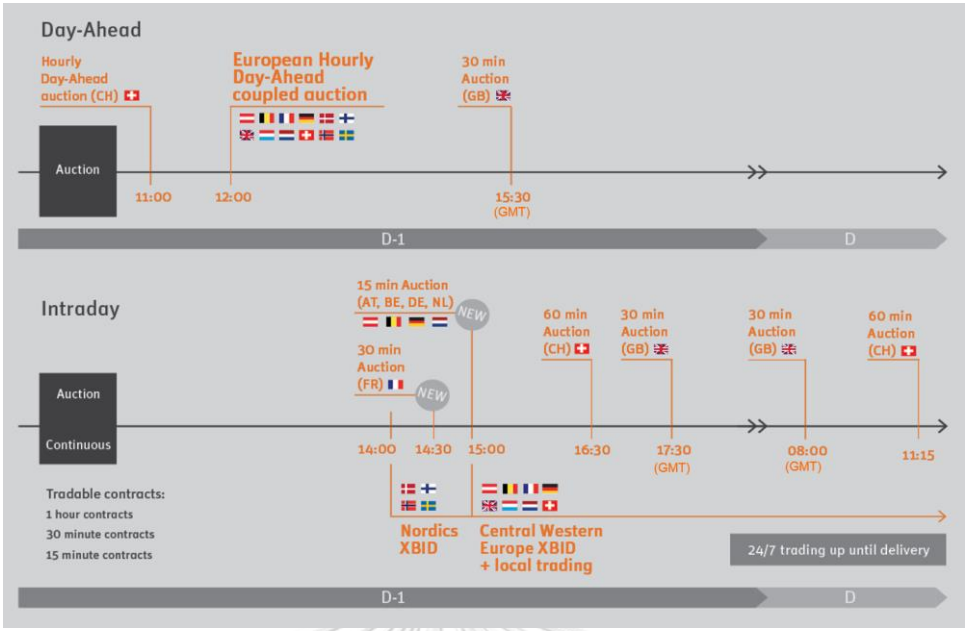
Capacity	สำหรับพื้นที่ที่ต้องการใช้พลังงานภายในระบบและต้องการซื้อขายกันเอง (bilateral arrangements based) ต้องส่งคำสั่งล่วงหน้าเพื่อบอกความต้องการใช้พลังงานบนโครงข่ายระบบส่งทั้งค่าพยากรณ์การใช้ (Forecast Load) และอัตราเบี่ยงเบน (Margin)

ตลาดซื้อขายไฟฟ้าและตลาดค้าส่งไฟฟ้ายุโรปขึ้นอยู่เป็นข้อกำหนดเบื้องต้นเพื่อส่งต่อไปยังการแข่งขันในตลาดค้าปลีกเพราะว่าจะทำให้เกิดประโยชน์กับผู้บริโภคสูงสุด ดังนั้นการมีตลาดซื้อขายไฟฟ้าจะส่งเสริมสภาพคล่องของตลาดส่งผลให้สวัสดิการสังคมสูงขึ้น จึงเป็นที่มาของตลาดซื้อขายไฟฟ้ายุโรป (European Energy market) ก่อตั้งขึ้นเพื่อจัดการการแลกเปลี่ยนและดำเนินการตลาดให้กับสมาชิก การแลกเปลี่ยนพลังงานต้องมีความโปร่งใสและราคาน่าเชื่อถือ ในทางปฏิบัติ หน่วยงานดุลยภาพสินค้ายุโรป (European commodity Clearing; ECC) จะทำงานคู่กับผู้ดูแลระบบส่ง (TSOs) สนับสนุนการตลาดหลายรูปแบบและเชื่อมต่อกับ ผู้ดูแลตลาด (Nominated Electricity Market Operator: NEMOs) ตลาดแลกเปลี่ยนยูโรเปียน (The European Power Exchange; EPEX SPOT) ให้บริการด้านการตลาดรับส่งคำสั่งซื้อขายพลังงานไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ ตลาดหลักของ EPEX spot คือตลาดล่วงหน้า 1 วัน (Day-Ahead) และ ตลาดระหว่างวัน (Intraday market) โดยมีกำหนดการดังตาราง 2-6 การตลาดรับส่งคำสั่งซื้อขายพลังงานไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่อ้างอิง [18-20] ดังรูป 2-5

ตาราง 2-6 สรุปตลาดพลังงานแบบต่างๆ ตามช่วงเวลาและความสำคัญ ในยุโรป

Energy Market	**ตัวอย่างรายละเอียด**
Day-Ahead Market (DAM)	จะปิดตอนเที่ยงวันจากนั้นตลาดจะทำการจับคู่และหาราคาตลาดที่จุดสมดุลระหว่างราคาและปริมาณซื้อขายไฟฟ้าโดยผู้ซื้อที่ส่งราคาซื้อสูงกว่าราคาตลาดจะทำการซื้อขายที่ราคาตลาด และ ผู้ขายที่ส่งราคาขายต่ำกว่าตลาดกจะทำการซื้อขายที่ราคาตลาดเช่นเดียวกัน
Intraday market	จะซื้อขายต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงในวันนั้นสามารถซื้อขายได้ถึง 5 นาทีสุดท้ายก่อนส่งมอบพลังงานประเภทสัญญา ทุกชั่วโมง ทุกครึ่งชั่วโมง หรือทุกสิบห้านาที เพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นสามารถปรับหรือสมดุลพลังงานใกล้เวลาจริงมากที่สุด การซื้อขายข้ามขอบเขตหรือประเทศยังมีความจำเป็นในการซื้อขายระหว่างวัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูป 2-5 การรับส่งคำสั่งซื้อขายพลังงานไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ [20]

จากรูป 2-5 ประเทศในยุโรปที่มีตลาดซื้อขายไฟฟ้ามีการตกลงสัญญาการซื้อขายไฟฟ้าทั้ง Day-ahead market และ Intraday market ดังภาพซึ่งจะเกิดก่อนการส่งมอบพลังงานขึ้นอยู่กับประเภทของสัญญา พบว่าจากนโยบายตลาดซื้อขายไฟฟ้านี้สามารถทำให้เข้าถึงพลังงานหมุนเวียนเพิ่มมากขึ้นถึง 38.5% ในปี 2017 มีการตลาดแต่ละประเทศสำหรับ Day-ahead market ดังตาราง 2-7 และ สำหรับ Intraday market [18-20] ดังตาราง 2-8

ตาราง 2-7 ตลาดซื้อขายไฟฟ้าล่วงหน้า 1 วันในทวีปยุโรป [22], [23]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

COUNTRY	NEMO	STATUS	COMPETITIVE STATUS	DESIGNATING AUTHORITY
AUSTRIA	EPEX Spot SE	designated	Competitive	E-Control (Austrian regulator for electricity and natural gas markets)
	EXAA AG	designated		
	Nord Pool AS	designated		
BELGIUM	Belpex SA	designated	Competitive	Minister of Energy

	Nord Pool AS	designated		
BULGARIA	Independent Bulgarian Power Exchange (IBEX)	designated	Monopoly	EWRC (Energy and water regulatory commission)
CROATIA	CROPEX Ltd	designated	Competitive	HERA (Croatian Energy Regulator Agency)
CZECH REPUBLIC	OTE a.s.	designated	Monopoly	ERU (Energy Regulatory Office)
DENMARK	Nord Pool AS	designated	Competitive	DERA (Danish Energy Regulatory Authority)
	EPEX Spot SE**	-	-	
	Nasdaq**	-	-	
ESTONIA	Nord Pool AS	designated	Competitive	Estonian Competition Authority
	Epex Spot SE**	-	-	
FINLAND	Nord Pool AS	designated	Competitive	Energiavirasto (Energy Authority)
	EPEX Spot SE**			
	Nasdaq**			
FRANCE	EPEX Spot SE	designated	Competitive	CRE (Commission de régulation de l'énergie)
	Nord Pool AS	designated		
	Nasdaq**	-	-	
GERMANY	EPEX Spot SE	designated	Competitive	BNetzA (German Regulatory Authority)
	Nord Pool AS	designated	Competitive	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

	Nasdaq**	-	-	
GREECE	LAGIE SA	designated	Monopoly	Ministry of Environment and Energy
HUNGARY	HUPX Zrt.	designated	Monopoly	MEKH (Hungarian Energy and Public Utility Regulatory Authority)
IRELAND	EirGrid plc	designated	Competitive	CER (Commission for Energy Regulation)
	Nord Pool AS**	-	-	
ITALY	GME Spa	designated	Monopoly	Ministero dello Svilppo Economico
LATVIA	Nord Pool AS	designated	Competitive	PUC (Public Utilities Commission)
	EPEX Spot SE**	-	-	
LITHUANIA	Nord Pool AS	designated	Competitive	NCC (National Commission for Energy Control and Prices)
	EPEX Spot SE**	-	-	
LUXEMBOURG	EPEX Spot SE	designated	Competitive	ILR (Institut luxembourgeois de régulation)
	Nord Pool AS	designated	Competitive	
	Nasdaq**	-	-	
NETHERLANDS	EPEX Spot SE	designated	Competitive	ACM (Authority for Consumers & Markets)
	Nord Pool AS	designated		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POLAND	Towarowa Gielda Energii S.A.	designated	Competitive	President of the Energy Regulatory Office
	Nord Pool AS	designated	Competitive	
	EPEX Spot SE**	-	-	
PORTUGAL	OMIE S.A.	designated	Monopoly	Portuguese Government
ROMANIA	OPCOM S.A.	designated	Monopoly	ANRE (Romanian Energy Regulatory Authority)
SLOVAKIA	OKTE a.s.	designated	Monopoly	URSO (Regulatory Office for Network Industries)
SLOVENIA	BSP Regionalna Energetska Borza d.o.o.	designated	Competitive	AGEN (Agencija za energijo)
SPAIN	OMIE S.A.	designated	Monopoly	Ministry of Industry, Energy and Tourism
SWEDEN	Nord Pool AS	designated	Competitive	Ei (Energimarknadsinspektionen)
	EPEX Spot SE**	-	-	
	Nasdaq**	-	-	
UNITED KINGDOM	EPEX Spot SE	designated	Competitive	OFGEM (Office of Gas and Electricity Markets)
	Nord Pool AS	designated		
	SONI Ltd	designated		UREGNI (Utility Regulator in Northern Ireland)

ตาราง 2-8 ตลาดซื้อขายไฟฟ้าระหว่างวัน ในทวีปยุโรป [22], [23]

COUNTRY	NEMO	OPERATING AS	COMPETITIVE STATUS	DESIGNATING AUTHORITY
AUSTRIA	EPEX Spot SE	designated	Competitive	E-Control (Austrian regulator for electricity and natural gas markets)
	EXAA AG	designated		
	Nord Pool AS	designated		
BELGIUM	Belpex SA	designated	Competitive	Minister of Energy
	Nord Pool AS	designated		
BULGARIA	Independent Bulgarian Power Exchange (IBEX)	designated	Monopoly	EWRC (Energy and water regulatory commission)
CROATIA	CROPEX Ltd	designated	Competitive	HERA (Croatian Energy Regulator Agency)
CZECH REPUBLIC	OTE a.s.	designated	Monopoly	ERU (Energy Regulatory Office)
DENMARK	Nord Pool AS	designated	Competitive	DERA (Danish Energy Regulatory Authority)
	Nasdaq**	-	-	
ESTONIA	Nord Pool AS	designated	Competitive	Estonian Competition Authority
	EPEX Spot SE**	-	-	
FINLAND	Nord Pool AS	designated	Competitive	Energiavirasto (Energy Authority)

Chulalongkorn University

	EPEX Spot SE**	-	-	
	Nasdaq**	-	-	
FRANCE	EPEX Spot SE	designated	Competitive	CRE (Commission de régulation de l'énergie)
	Nord Pool AS	designated		
	Nasdaq**	-	-	
GERMANY	EPEX Spot SE	designated	Competitive	BNetzA (German Regulatory Authority)
	Nord Pool AS	designated	Competitive	
	EXAA AG**	-	-	
	Nasdaq**	-	-	
GREECE	LAGIE SA	designated	Monopoly	Ministry of Environment and Energy
HUNGARY	HUPX Zrt.	designated	Monopoly	MEKH (Hungarian Energy and Public Utility Regulatory Authority)
IRELAND	EirGrid plc	designated	Competitive	CER (Commission for Energy Regulation)
	Nord Pool AS**	-	-	
ITALY	GME Spa	designated	Monopoly	Ministero dello Svilppo Economico
LATVIA	Nord Pool AS	designated	Competitive	PUC (Public Utilities Commission)
	EPEX Spot SE**	-	-	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

LITHUANIA	Nord Pool AS	designated	Competitive	NCC (National Commission for Energy Control and Prices)
	EPEX Spot SE**	-	-	
LUXEMBOURG	EPEX Spot SE	designated	Competitive	ILR (Institut luxembourgeois de régulation)
	Nord Pool AS	designated		
	Nasdaq**	-	-	
NETHERLANDS	EPEX Spot SE	designated	Competitive	ACM (Authority for Consumers & Markets)
	Nord Pool AS	designated		
POLAND	Towarowa Gielda Energii S.A.	designated	Competitive	President of the Energy Regulatory Office
	Nord Pool AS	designated		
	EPEX Spot SE**	-	-	
PORTUGAL	OMIE S.A.	designated	Monopoly	Portuguese Government
ROMANIA	OPCOM S.A.	designated	Monopoly	ANRE (Romanian Energy Regulatory Authority)
SLOVAKIA	OKTE a.s.	designated	Monopoly	URSO (Regulatory Office for Network Industries)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SLOVENIA	BSP Regionalna Energetska Borza d.o.o.	designated	Competitive	AGEN (Agencija za energijo)
SPAIN	OMIE S.A.	designated	Monopoly	Ministry of Industry, Energy and Tourism
SWEDEN	Nord Pool AS	designated	Competitive	Ei (Energimarknadsinspektionen)
	EPEX Spot SE**	-	-	
	Nasdaq**	-	-	
UNITED KINGDOM	EPEX Spot SE	designated	Competitive	OFGEM (Office of Gas and Electricity Markets)
	Nord Pool AS	designated	Competitive	OFGEM (Office of Gas and Electricity Markets)
	SONI Ltd	designated	Competitive	UREGNI (Utility Regulator in Northern Ireland)

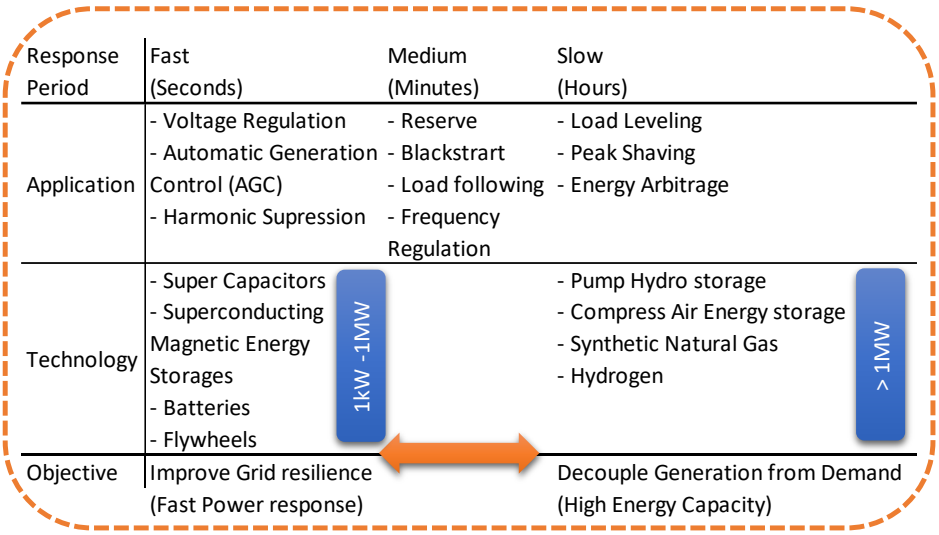
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากที่กล่าวมาข้างต้นตลาดซื้อขายไฟฟ้ามีการสนับสนุนโรงไฟฟ้าเสมือนตัวอย่างเช่น ศูนย์พลังงานเนเธอแลนด์ (the Energy Center of Netherlands; ECN) เปิดการซื้อขายพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ราคาเป็นตัวกำหนดการทำงานให้บริการโดยใช้โรงไฟฟ้าเสมือนจ่ายช่วงที่กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าโหลดในช่วงมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงซึ่งทำให้การปฏิบัติการมีความราบเรียบและเสถียรมากขึ้น โครงการฟีนิกซ์ (Flexible Electricity Network to Integrate the Expected Energy Solution; FENIX) ในปี 2005 สหภาพยุโรปทวนสอบการรวบรวมโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแบบกระจาย (DER) ให้เกิดขึ้นจริงโดยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ 1.) กล่องติดตามและควบคุมสมาชิกโครงการฟีนิกซ์ (FENIX BOX) 2.) โรงไฟฟ้าเสมือนเชิงพาณิชย์ (CVPP) สามารถเข้าร่วมกับตลาดซื้อขายไฟฟ้าได้ 3.) โรงไฟฟ้าเสมือนเชิงเทคนิค (TVPP) สามารถทำงานตอบสนองเกี่ยวกับด้านความมั่นคงของระบบและความน่าเชื่อถือ [1, 3]

ปัจจุบันการตลาดได้แพร่หลายมากขึ้นหลายหน่วยงานมีการทดสอบเกี่ยวกับการนำโรงไฟฟ้าเสมือนเข้ามาในตลาดซื้อขายไฟฟ้าในประเทศออสเตรเลีย เช่น หน่วยงานปฏิบัติการตลาดซื้อขายไฟฟ้าออสเตรเลีย (Australia Energy Market Operator) ทดสอบระบบโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อดูการตอบสนองกับราคาได้โดยจะซื้อพลังงานไฟฟ้าเมื่อถูกและขายพลังงานไฟฟ้าเมื่อราคาแพง และการทดสอบการตอบสนองต่อความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยจ่ายพลังงานให้กับระบบโดยทันทีทำให้ความถี่กลับมาที่ 50 HZ ได้หลังจากเหตุการณ์ความถี่ตก [24] และประเทศในยุโรปมีมาตการรองรับสำหรับการเติบโตของกำลังการผลิตแบบกระจายขนาดเล็กที่ต้องการซื้อขายพลังงานในตลาดไฟฟ้าแบบขายส่งสามารถเข้าร่วมเป็นสมาชิกโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อเพิ่มอำนาจในการเข้าตลาดได้ [25]

2.3 ระบบกักเก็บพลังงานสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือน

การใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบกระจายเพื่อสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้าแบ่งตามช่วงเวลาระดับวินาที ระดับนาที และ ระดับชั่วโมง โดยแต่ละระดับและความเร็วในการตอบสนองจะมีเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังรูป 2-6 อ้างอิง [26]



รูป 2-6 การใช้ระบบกักเก็บพลังงานสนับสนุนโครงข่ายไฟฟ้า [26]

2.3.1 การใช้งานเชิงกำลังไฟฟ้า

การใช้งานเชิงไฟฟ้ากำลังจะคำนึงถึงคุณภาพของไฟฟ้า ความมั่นคง ทนต่อการรบกวน การตอบสนองอย่างรวดเร็ว เช่น 1. การควบคุมแรงดัน (Voltage regulation) 2. การลดฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Suppression) 3. กำลังการผลิตสำรอง 4. การทำแบลคสตาร์ท (Black start) 5. การปรับกำลังไฟฟ้าตามความต้องการ Load following 6. Frequency Regulation ซึ่งเหมาะกับการใช้เทคโนโลยีตัวเก็บประจุยิ่งยวด ตัวเก็บพลังงานโดยใช้สนามแม่เหล็ก แบตเตอรี่ และฟลายวีล อยู่ในช่วงวินาที [26, 27]

2.3.2 การใช้งานเชิงพลังงานไฟฟ้า

การใช้งานเชิงไฟฟ้าพลังงานจะคำนึงถึงปริมาณพลังงาน เช่น 1. การลดการใช้ไฟฟ้าช่วงความต้องการสูง (Peak shaving) 2. การเก็งกำไร ซึ่งเหมาะกับการใช้ ระบบกักเก็บพลังงานแบบสูบกลับ ระบบไฮโดรเจน แบตเตอรี่ อยู่ในช่วงเวลานาทีเป็นต้นไป [26, 27]

2.3.3 การประยุกต์และประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือน

งานวิจัย [28] นำเสนอการใช้งานเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานสามารถตอบสนองต่อรูปแบบใช้งานการใช้งานหลายด้าน ดังนี้ 1. คุณภาพของไฟฟ้า (Power quality) เช่น แบตเตอรี่ลิเธียม แบตเตอรี่ตะกั่วกรด เซลล์นิเกิล-แคดเมียม 2. ระบบจำหน่ายและระบบส่ง เช่น ฟลายวีล ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ 3. ระบบกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ (Bulk power systems) เช่น ระบบน้ำสูบกลับ ระบบอัดอากาศ (Compress air energy storage) โดยงานวิจัยนี้สอดคล้องกับการใช้แบตเตอรี่ที่คาดว่าจะเติบโตอย่างรวดเร็วคือแบตเตอรี่ประเภทลิเธียมไอออนมีสามารถใช้งานได้กับคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) ถึงการช่วยรักษาความเสถียรระบบส่ง (TSO and DSO) ซึ่งมีช่วงการใช้งานตั้งแต่ 0.001 – 1 MW ข้อดีของมันคือมีการคายประจุต่ำ ไม่เกิดภาวะจดจำ (Memory effect) แต่ปัญหาก็คือเรื่องความร้อนจากภายในแบตเตอรี่จำเป็นต้องมีการจัดการงานอย่างเหมาะสมในอนาคตต่อไป

งานวิจัย [29] เสนอกลยุทธ์การเดินเครื่องโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้การตอบสนองที่มีความเป็นมิตรกับผู้บริการโครงข่ายไฟฟ้าโดยการใช้เทคโนโลยีแบตเตอรี่จ่ายและรับพลังงานไฟฟ้าในการทำให้การผลิตไฟฟ้าเป็นไปตามสัญญาประเภทสัญญาล่วงหน้า โดยตัวควบคุมจะรับค่ากำลังการผลิตสูงสุดที่ได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กำลังการผลิตที่จุดเชื่อมต่อกับการไฟฟ้า พลังงานของแบตเตอรี่ จากนั้นตัวควบคุมจะคำนวณและส่งกำหนดการเดินเครื่องแต่ละช่วงเวลาที่เหมาะสมให้ผู้ดูแลระบบ ในขั้นตอนสุดท้ายตัวควบคุมจะส่งคำสั่งเดินเครื่องไปยังโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่เพื่อตอบสนองแต่ชะล่วงเวลาต่อไป

งานวิจัย [30] เสนอแนวคิดกำลังการผลิตไฟฟ้าเสมือนของแบตเตอรี่โดยใช้งานระบบผสมผสานระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวดเพื่อใช้ในการปรับเรียบความผันผวนของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน โดยใช้การควบคุมแบบปรับตัวได้ ของสถานะการเก็บประจุหรือชาร์จไฟของระบบกักเก็บพลังงาน (Adaptive Controlling of the SOC usage based on the measured SOC) ผลจากการประยุกต์ใช้ระบบผสมผสาน ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น ลดความผันผวนจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม และนำเสนอการเลือกขนาดของระบบผสมผสานนี้โดยการสร้างแบบจำลองประยุกต์ใช้ระบบอินเวอร์เตอร์-แบตเตอรี่สำหรับการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าแรงดันสูงมีการใช้งานอย่างแพร่หลายเพราะว่าการทำงานควบคู่กันระหว่าง 2 เทคโนโลยีจะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าขาออกที่มีสมรรถนะเพิ่มมากขึ้น รวมไปถึงการประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

งานวิจัย [31] นำการประยุกต์ใช้โมดูลระบบแบตเตอรี่และคอนเวอร์เตอร์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแบบเสมือน เพื่อเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในการตอบสนองแบบพลวัตของระบบไฟฟ้าที่มีความเสถียรโดยตรวจจับมุมของระบบไฟฟ้ามาเป็นตัวแปรป้อนเข้าระบบ จากความต่างของมุมและความถี่นั้นสั่งให้ระบบกักเก็บพลังงานปล่อยหรือรับพลังงานออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าผ่านโมดูลระบบแบตเตอรี่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การควบคุมการเปลี่ยนแปลงพลังงาน แบตเตอรี่จะมีความสามาถในการควบคุมพลังงานไม่ให้เปลี่ยนแปลงเร็วหรือช้าเกินกำหนด โดยกำหนดประสิทธิภาพการรับและจ่ายพลังงานแบตเตอรี่ตั้งแต่ 80% ขึ้นไป ซึ่งสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก่อนให้แบตเตอรี่รับหรือจ่ายพลังงานต้องทราบสมรรถนะของแบตเตอรี่ ณ เวลานั้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงได้ การควบคุมการเปลี่ยนแปลงจะเป็นไป 2 ทิศทาง คือทิศทางขาขึ้นแบตเตอรี่จะรับพลังงานจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการผลิตพลังงานไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าเสมือนได้มากกว่าสภาวะควบคุมที่ได้สร้างไว้โดยมีพื้นที่ของแบตเตอรี่รองรับและทิศทางขาลงแบตเตอรี่จะจ่ายพลังงานเมื่อต้องการให้พลังงานพลังงานไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าเสมือนได้ต่ำกว่าสภาวะควบคุม โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะกำหนดสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ตั้งแต่ 0.2 – 0.8 แบ่งเป็นการควบคุมได้ 3 กลุ่ม [32-34] คือ

- Feedback control ประยุกต์ใช้เมื่อเกิดความเบี่ยงเบนจากจุดอ้างอิงโดยใช้ Proportional Integral controller
- State of Charge control by droop ประยุกต์ใช้เมื่อเกิดความเบี่ยงเบนของระหว่างจุดอ้างอิงของความถี่และสร้างสถานะควบคุมให้โรงไฟฟ้าเสมือน เช่นเมื่อความถี่สูงกว่าปกติให้ โรงไฟฟ้าเสมือนลดกำลังการผลิตโดยเก็บพลังงานเข้าสู่แบตเตอรี่ทำให้ระดับ SOC สูงขึ้นและโรงไฟฟ้าเสมือนจะเพิ่มกำลังการผลิตโดยให้ระบบกักเก็บพลังงานจ่ายพลังงานเข้าสู่ระบบทำให้ SOC ลดลง
- Predictive control ประยุกต์ใช้เมื่อต้องการให้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถรองรับความไม่แน่นอนของพลังงานหมุนเวียนได้ และยังมีวัตถุประสงค์อื่นๆ เช่นหาจุดกำไรสูงสุด ลดค่าปรับ เพิ่มอายุของแบตเตอรี่ หาขนาดที่เหมาะสม

การใช้เทคโนโลยีกักเก็บพลังงานเพื่อการเกร็งกำไร (Arbitrage) จากตลาดซื้อขายไฟฟ้าในช่วงเวลาราคาไฟฟ้าถูก เป็นอีกการใช้งานหนึ่งสามารถนำมาใช้กับโรงไฟฟ้าเสมือนที่มีระบบกักเก็บพลังงานเช่นแบตเตอรี่ เพื่อทำการถ่วงดุลพลังงานช่วงเวลาที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงได้ผ่านการซื้อขายไฟฟ้าในตลาด อีกนัยหนึ่งสำหรับธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนใช้โอกาสของช่วงเวลาที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าเพื่อเพิ่มผลกำไรหรือสร้างมูลค่าให้กับธุรกิจ [16]

2.4 สัญญาซื้อขายไฟฟ้าและนโยบายการกำหนดราคาในตลาดซื้อขายไฟฟ้า

การรวบรวมพลังงานหมุนเวียนแบบกระจายผ่านโรงไฟฟ้าเสมือนที่จะให้บริการต่างๆแก่ระบบโครงข่ายไฟฟ้านั้น ต้องมีข้อตกลงร่วมกันหรือข้อกำหนดดังนี้ ข้อกำหนดด้านกำลังไฟฟ้า ข้อกำหนดด้านพลังงานไฟฟ้า ข้อกำหนดด้านอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเพื่อที่จะทำให้โรงไฟฟ้าเสมือนที่รวบรวมจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนแบบกระจายสามารถจ่ายไฟฟ้าได้เหมือนโรงไฟฟ้าทั่วไป โรงไฟฟ้าทั่วไปโดยปกติจะทำการส่งสัญญาการเดินเครื่องหรือการสั่งการเดินเครื่อง (Unit commitment) เพื่อกำหนดว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือโรงไฟฟ้าใดอยู่ในสถานะพร้อมจ่าย นั่นคือสามารถเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าและจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้เมื่อถึงเวลาส่งมอบที่ตกลงไว้ในสัญญา [35, 36]

เงื่อนไขการกำหนดค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (Ramp-rate) สำหรับบริบทของตลาดซื้อขายไฟฟ้ายุโรปและสหรัฐ ผู้ซื้อขายรวมถึงโรงไฟฟ้าเสมือนที่มีกำลังการผลิตนำมาซื้อขายต้องถูกคิดลักษณะเหมือนโรงไฟฟ้าทั่วไปโดยกำหนดให้ Ramp-rate มีค่าเท่ากับ 50MW/h ต่อโรงไฟฟ้าจากงานวิจัยศึกษาโรงไฟฟ้าเสมือนสำหรับตลาดซื้อขายไฟฟ้าโดยกำหนดให้ซื้อขายพลังงานโดยคำนึงถึงความสามารถในการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิต (Ramp Ability) แต่ต้องไม่เกินพิกัดจำกัดของโรงไฟฟ้าดังสมการ (4.12) [37] ยังมีงานวิจัยอื่นศึกษากำลังการผลิตของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ต้องผ่านเกณฑ์การอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตในแต่ละประเทศผ่าน เช่น ประเทศเยอรมันนีกำหนดให้ค่าความต้องการอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 10% ของพิกัดกำลังการผลิตต่อนาที [38]

สำหรับบริบทประเทศไทย ราคาตามนโยบายการรับซื้อไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ภาครัฐ จากการประชุมครั้งที่ 8/2563 เมื่อวันที่ 21 ธันวาคม 2563 ในโครงการพลังงานแสงอาทิตย์โซลาร์ภาคประชาชน มีการดำเนินการ ขับเคลื่อนไฟฟ้าแสงอาทิตย์โดยปรับราคารับซื้อไฟฟ้าส่วนเกินจากกลุ่มบ้านผู้อยู่อาศัยที่จำหน่ายเข้าระบบราคา 2.2 บาท/kWh จากเดิม 1.68 บาท/kWh ซึ่งการปรับอัตราเพิ่มให้ผลตอบแทนที่ดีขึ้นคาดว่าผู้เข้าโครงการสามารถคืนทุนได้ภายใน 9ปี และขยายขอบเขตโครงการครอบคลุมหน่วยงานการศึกษา โรงพยาบาล การเกษตรโดยกำหนดราคารับซื้อไฟฟ้าส่วนเกินเข้าระบบอัตรา 1 บาท/kWh โดยมีกำลังการผลิตติดตั้ง 10 -200 kWp [39]

จากงานวิจัย [40] การคำนวณค่าผ่านสายส่งสำหรับตลาดซื้อขายไฟฟ้าเพียร์ทูเพียร์ล่วงหน้าด้วยวิธี Postage Stamp ได้ประเมินค่าผ่านสายส่ง (Wheeling charge) แบบล่วงหน้าหนึ่งวันโดยนำหลักการคำนวณอัตราผลตอบแทนการลงทุน (ROIC) ของกฟภ. ปี 61 เท่ากับ 5.07% มาใช้ร่วมประเมินด้วยพบว่าผลการคำนวนณอัตราค่าผ่านสายส่งพิจารณปีที่ 1 ปีที่ ถึง ปีที่ 17 เท่ากับ 0.232 - 0.32 บาท/kW โดยค่าผ่านสายส่งนั้นเป็นค่าบริการเรียกเก็บต่อธุรกรรม (Transaction) ที่เกิดขึ้นบนระบบซื้อขายซึ่งในที่นี้กำหนดให้ทั้งผู้ใช้และผู้ผลิตจ่ายรายได้ส่วนนี้

บทที่ 3
แบบจำลองและข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

บทนี้นำเสนอแบบจำลองที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษาเพื่อทราบคุณลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบกักเก็บพลังงานและข้อมูลราคาสำหรับแบบจำลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการกำหนดราคาให้แก่สมาชิกของโรงไฟฟ้าเสมือน

3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถทำงานทั้งแบบไม่เชื่อมโยงกับระบบสายส่ง (Off-grid) และ เชื่อมโยงกับระบบสายส่ง (On-grid) ซึ่งในอนาคตระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายสามารถเลือกโหมดที่รองรับได้หลายรูปแบบมากขึ้นเช่นผู้บริโภคอยู่บ้านสามารถใช้พลังงานจากระบบผลิตไฟฟ้าภายใน หรือ เมื่อไม่อยู่บ้านต้องการปรับให้ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถส่งพลังงานสู่โครงข่ายไฟฟ้าหรือทำหน้าที่เป็นผู้ผลิตไฟฟ้านั่นเอง

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีส่วนประกอบหลัก คือ 1.แผงโซลาร์เซลล์ 2.อุปกรณ์ป้องกันด้าน DC 3.อินเวอร์เตอร์ (Inverter) 4.ตู้รวมไฟฟ้าและอุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้าด้าน AC 5.ตู้สวิทช์หลัก (MDB) 6 อุปกรณ์ป้องกัน (Protection device) 6. มิเตอร์วัดพลังงาน (Energy meter) 7.สายไฟฟ้าและท่อร้อยสายไฟ 8.โครงสร้างรองรับแผงโซลาร์เซลล์ 9.สายสื่อสารและท่อร้อยสายไฟ 10.เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) 11. อุปกรณ์ตรวจวัดสภาพอากาศอื่นๆ (Weather station)

หลักการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานลงบนแผง พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็คตรอนขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถนำไฟฟ้ากระแสตรงไปใช้งานต่อเป็นพลังงานได้ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประมาณกำลังผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ได้ดังสมการ (3.1)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\mathrm{P}_{pv,t} = \mathrm{P}_{\mathrm{rated}} \frac{G_t}{G_{STC}} (1 - \gamma(T_{cell,t} - T_{STC})) \quad (3.1)$$

โดยที่ $\mathrm{P}_{pv,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ณ เวลาใดๆ (Watt; W)

$\mathrm{P}_{\mathrm{rated}}$ คือ กำลังไฟฟ้าพิกัด (Watt; W)

G_t คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ ณ เวลา t ใดๆ (W/m^2)

G_{STC} คือ ความเข้มแสงที่ STC มีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2

$T_{cell,t}$ คือ อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ (C)

T_{STC} คือ อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ที่ STC มีค่าเท่ากับ 25C

γ คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ

และความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับอุณหภูมิเซลแสงอาทิตย์ สามารถอธิบายได้ดังสมการ (3.2)

$$T_{cell,t} = T_{amb,t} + \left(\frac{NOCT - 20}{800}\right) G_t \quad (3.2)$$

โดยที่ $T_{cell,t}$ คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ณ เวลาใดๆ (C)

$NOCT$ คือ อุณหภูมิเซลแสงอาทิตย์ ณ จุดทำงาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 800 W/m^2 ความเร็วลม 1 m/s (Nominal operating Cell temperature) เท่ากับ 46 องศาเซลเซียส (C)

เนื่องจากระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบกระแสตรงจึงต้องมีการแปลงพลังงานให้อยู่ในรูปกระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์ ทำให้เกิดความสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์แปลงพลังงาน ดังนั้น กำลังไฟฟ้าสุทธิจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ดังสมการ (3.3)

$$\mathrm{P}_{out,t} = \mathrm{P}_{pv,t} \times eff_s \quad (3.3)$$

โดยที่ $\mathrm{P}_{out,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าขาออก ณ เวลาใดๆ (Watt; W)

eff_s คือ ประสิทธิภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ (%)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 ระบบกักเก็บพลังงาน

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage) มีข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น ประสิทธิภาพการรับและจ่ายพลังงาน การอัพเดทระดับพลังงานของแบตเตอรี่ โดยการใช้งานแบตเตอรี่เสมือน (Virtual Battery Capacity) ที่เป็นสมาชิกในโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อตอบสนองต่อการแลกเปลี่ยนพลังงานเพื่อเก็งกำไร (Arbitrage)

งานวิจัยนี้กำหนดระบบกักเก็บพลังงานเสมือนประเภทแบตเตอรี่ซึ่งเป็นลิเธียมไอออนและอินเวอเตอร์ที่ทำงานในระบบโรงไฟฟ้าเสมือนแบ่งเป็น 3 โหมด คือ รับพลังงาน ปล่อยพลังงานและรอคอย ซึ่งปกติแล้วแบตเตอรี่ประเภทนี้จะมีการสูญเสียพลังงานในตัวมันเองเล็กน้อยโดยมีตัวแปรสำคัญ คือ ระดับพลังงาน การคายกำลังไฟฟ้า การอัดกำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ มีสมการสถานะของแบตเตอรี่ถัดไปหลังจากทำงานใน 3 โหมดตามเวลา k แล้วมีการอัพเดทระดับพลังงานดังสมการ (3.4)

$$E_b(k+1) = (1 - r_{sd})E_b(k) - t_s\frac{P_{bd}(k)}{\eta_{bd}} + t_s\eta_{bc}P_{bc}(k) \qquad (3.4)$$

โดยที่ E_b คือ ระดับพลังงานของระบบกักเก็บพลังงาน (MWh)

P_{bd} คือ กำลังไฟฟ้าการคายประจุของระบบกักเก็บพลังงาน (MW)

P_{bc} คือ กำลังไฟฟ้าการอัดประจุของระบบกักเก็บพลังงาน (MW)

t_s คือ ระยะเวลาที่ทำงาน (hour)

η_{bd}, η_{bc} คือ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน (%)

r_{sd} คือ อัตราการสูญเสียพลังงานจากการคายประจุเอง (%)

ระดับพลังงานที่แบตเตอรี่จะทำงานจะถูกกำหนดโดยสมการ (3.5)

$$E_{b,min} \le E_b(k) \le E_{b,max} \qquad (3.5)$$

ระดับกำลังการอัดประจุและคายประจุกำหนดโดยสมการ (3.6) และ (3.7)

$$0 \le P_{bc}(k) \le \delta(k)P_{bc,max} \qquad (3.6)$$

$$0 \le P_{bd}(k) \le (1 - \delta(k))P_{bd,max} \qquad (3.7)$$

โดยที่ δ คือ สถานะการทำงานของแบตเตอรี่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 ข้อมูลราคาสำหรับแบบจำลอง

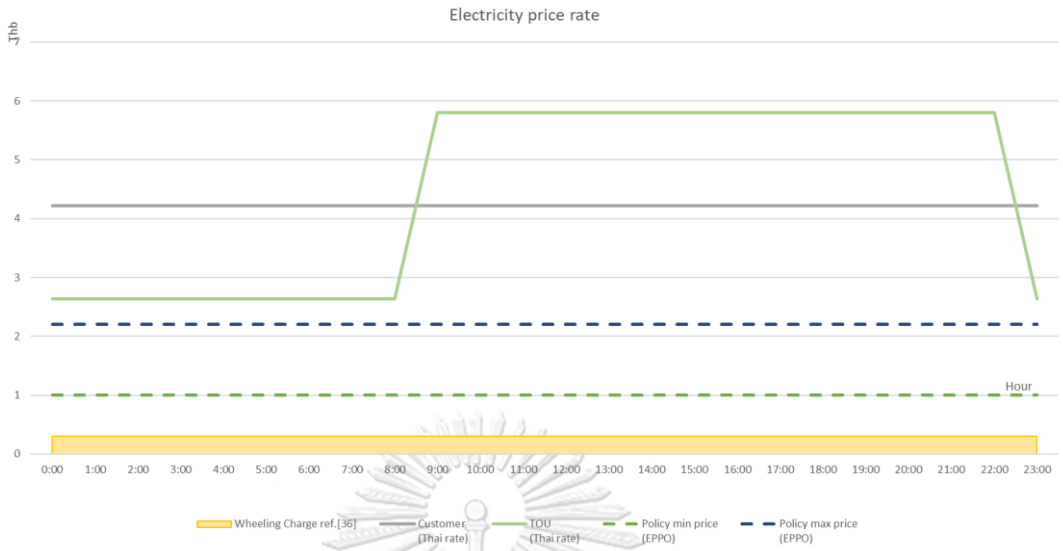
เนื่องจากข้อมูลราคาที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบให้เข้ากับบริบทประเทศไทยนั้น มีกรอบราคาของพลังงานไฟฟ้าดังตาราง 3-1 เพื่อแสดงราคาบาทต่อหน่วยเพื่อเปรียบเทียบตลาดพลังงานไฟฟ้าล่วงหน้า 1 วัน ราคาที่สมาชิกได้รับในตัวแบบ ราคาค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ราคาค่าผ่านสายส่งในบริบทประเทศไทยในงานวิจัย และราคารับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตามนโยบาย กพช. สรุปได้ว่า การแข่งขันในตลาดทำให้ราคามีการเปลี่ยนแปลงตามอุปสงค์การใช้งานแต่ละเวลาซึ่งมีค่าเฉลี่ยราคาไฟฟ้าที่สมาชิกโรงไฟฟ้าเสมือนจะได้รับที่ 0.54 บาทต่อหน่วย ในเดือนมกราคม 2020 นั้นเพื่อทำให้ราคาสามารถเปรียบเทียบได้และมีความน่าดึงดูดสำหรับสมาชิกจึงมีค่าความขยายเท่ากับ 2 เท่าของราคาเฉลี่ยตลาดตลอดทั้งปีจะสามารถทำให้ราคาที่สมาชิกน่าสนใจและมีความสมเหตุสมผล สำหรับความเป็นไปได้ของราคาไฟฟ้าที่ให้แก่สมาชิกนั้น กอปรกับเมื่อหาค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาอื่นพบว่าราคาไฟฟ้าในช่วงต่างๆของตลาดสามารถสูงขึ้นไปทำให้ราคาผู้ใช้พลังงานของสหรัฐฯอยู่ที่ 6-7 บาทต่อหน่วยสำหรับผู้ใช้งานระดับครัวเรือนช่วงฤดูหนาวแบ่งเป็น ค่าพลังงานสะอาดที่ 2.2 บาทต่อหน่วยและค่าส่งพลังงาน 4.4 บาทต่อหน่วย คิดเป็น 33.3% และ 66.6% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับราคาที่ถูกสเกลนั้นประมาณ 1.08 บาทต่อหน่วยซึ่งตกอยู่ในช่วงของค่าพลังงานสะอาดที่กล่าวมา ดังรูป 3-1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง 3-1 เปรียบเทียบแนวทางการกำหนดราคาของสมาชิก

Hour	Market price Ref NYISO (THB/kWh)	Member unit price .5psch (THB/kWh)	Customer (MEA rate) (THB/kWh)	TOU<12kV (Thai rate) (THB/kWh)	Wheeling Charge ref. [40] (THB/kWh)	Policy (EPPO) [39] (THB/kWh)
0:00	0.76	0.38	3.25-4.42	2.64	0.23-0.32	1.0-2.2
1:00	0.68	0.34		2.64		
2:00	0.64	0.32		2.64		
3:00	0.71	0.36		2.64		
4:00	0.7	0.35		2.64		
5:00	0.91	0.46		2.64		
6:00	1.37	0.68		2.64		
7:00	1.49	0.75		2.64		
8:00	1.5	0.75		2.64		
9:00	1.35	0.67		5.80		
10:00	1.25	0.63		5.80		
11:00	1.15	0.57		5.80		
12:00	1.07	0.53		5.80		
13:00	1.05	0.52		5.80		
14:00	1.01	0.5		5.80		
15:00	1	0.5		5.80		
16:00	1.07	0.53		5.80		
17:00	1.32	0.66		5.80		
18:00	1.46	0.73		5.80		
19:00	1.41	0.71		5.80		
20:00	1.23	0.61		5.80		
21:00	1.05	0.52		5.80		
22:00	0.95	0.47		5.80		
23:00	0.87	0.43		2.64		
Mean	**1.08**	**0.54**	**4.0**		**0.3**	**1.0**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

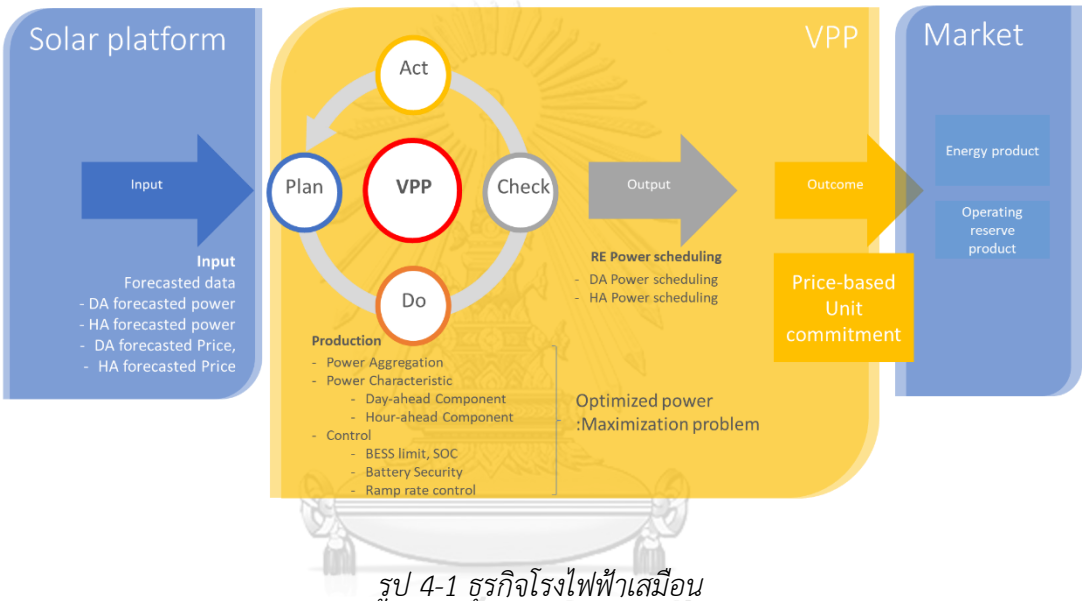


รูป 3-1 ราคาพลังงานไฟฟ้าตามบริบทต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
กรอบปัญหาของปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน

บทนี้นำเสนอวิธีการดำเนินการวิจัย และแบบจำลองเบื้องต้นสำหรับการออกแบบธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน วิเคราะห์ข้อมูลสมาชิกพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานที่จัดการวางแผนและประเมินการทำงานแบบผสมผสาน เพื่อการหาผลกำไรจากการดำเนินการธุรกิจปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน และการเพิ่มผลกำไรโดยการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ควบคู่ไปในการผลิตไฟฟ้า ดังรูป 4-1



รูป 4-1 ธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การจัดการปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือนผู้รับผิดชอบโดยตรงคือผู้จัดการธุรกิจ VPP ที่ต้องเริ่มรับข้อกำหนดคำตอบขั้นพื้นฐาน คือค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าของโครงข่ายไฟฟ้า อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า ราคาซื้อขายไฟฟ้าล่วงหน้า เพื่อกำหนดเป็นผลลัพธ์ (Outcome) ซึ่งประกอบด้วยผลิตภัณฑ์และบริการทางไฟฟ้าในที่นี้คือผลิตภัณฑ์พลังงานไฟฟ้า (Energy product) และผลิตภัณฑ์กำลังผลิตสำรอง (Operating reserve product) ส่งไปยังผู้ควบคุมระบบโครงข่ายไฟฟ้าและผู้ควบคุมตลาดซื้อขายไฟฟ้าขายส่งที่กำหนดไว้ หลังจากทราบผลลัพธ์แปรเป็นข้อมูลขาออก (Output) คือกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อทำการกำหนดข้อมูลขาเข้าต่างๆ ที่จำเป็นต่อการดำเนินการคือ ค่าพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าล่วงหน้า ค่าพยากรณ์ราคาจากตลาดซื้อขายไฟฟ้า จากนั้นจัดการกำลังการผลิตที่รวบรวมมาและดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมของกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือน เพื่อส่งมอบพลังงานไฟฟ้าให้เป็นไปตามคุณลักษณะและข้อกำหนดต่างๆ สามารถแบ่งกระบวนการเป็น 3 ส่วน ข้อมูลขาเข้า ข้อมูลขาออก และปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน ดังนี้

4.1 ข้อมูลขาเข้า

ข้อมูลขาเข้าเพื่อใช้ในปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือนที่จะรวบรวมสมาชิกที่มีกำลังผลิตไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีตัวแปรดังตาราง *4-1* ประกอบด้วย

4.1.1 ข้อมูลพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้า

ข้อมูลพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าเก็บรวบรวมจากข้อมูลพยากรณ์จริงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์หรือคำนวณข้อมูลพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าดังสมการ (3.1) แบ่งเป็น

- ข้อมูลพยากรณ์กำลังการผลิตไฟฟ้าสำหรับ DAM มีตัวอย่างดังตาราง 4-2
- ข้อมูลพยากรณ์กำลังการผลิตไฟฟ้าสำหรับ HAM มีตัวอย่างดังตาราง 4-2

4.1.2 ข้อมูลพยากรณ์ราคาไฟฟ้า

ข้อมูลพยากรณ์ราคาไฟฟ้าอ้างอิงจากตลาดซื้อขายไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ผู้ควบคุมระบบไฟฟ้าอิสระนิวยอร์ก (New York Independent System Operator; NYISO) เป็นผู้ดูแล แบ่งเป็น

- ข้อมูลพยากรณ์ราคาผลิตภัณฑ์พลังงานไฟฟ้าสำหรับ DAM มีตัวอย่างดัง
- ตาราง *4-3*
- ข้อมูลพยากรณ์ราคาผลิตภัณฑ์กำลังการผลิตสำรองสำหรับ HAM มีตัวอย่างดังตาราง *4-4*

ตาราง 4-1 ตารางข้อมูลขาเข้า

No.	Output	Parameter	Unit
1	DA forecasted power	$P_{sf,agg,da}(k)$	MW
2	HA forecasted power	$P_{sf,agg,ha}(k)$	MW
3	DA forecasted price	$p_{fc,da}(k)$	Baht/MWh
4	HA forecasted price	$p_{fc,ha}(k)$	Baht/MWh

ตาราง 4-2 ตัวอย่างข้อมูลพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้า

Timestamp	**Avg. Power (MW)**
1/1/2020 0:00	0.0
1/1/2020 1:00	0.0
1/1/2020 2:00	0.0
1/1/2020 3:00	0.0

1/1/2020 4:00	0.0
1/1/2020 5:00	0.0
1/1/2020 6:00	0.0
1/1/2020 7:00	0.5
1/1/2020 8:00	3.9
1/1/2020 9:00	11.2
1/1/2020 10:00	16.2
1/1/2020 11:00	18.1
1/1/2020 12:00	15.9
1/1/2020 13:00	12.6
1/1/2020 14:00	10.2
1/1/2020 15:00	7.3
1/1/2020 16:00	3.9
1/1/2020 17:00	1.2
1/1/2020 18:00	0.0
1/1/2020 19:00	0.0
1/1/2020 20:00	0.0
1/1/2020 21:00	0.0
1/1/2020 22:00	0.0
1/1/2020 23:00	0.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง 4-3 ตัวอย่างข้อมูลพยากรณ์ราคาสำหรับผลิตภัณฑ์พลังงานไฟฟ้า

Eastern Date Hour	DAM Gen LBMP (Baht/MWh)
1/1/2020 0:00	653.1
1/1/2020 1:00	590.4
1/1/2020 2:00	538.8
1/1/2020 3:00	512.1
1/1/2020 4:00	528
1/1/2020 5:00	566.1
1/1/2020 6:00	642.9

1/1/2020 7:00	587.1
1/1/2020 8:00	578.1
1/1/2020 9:00	611.7
1/1/2020 10:00	596.7
1/1/2020 11:00	585.9
1/1/2020 12:00	579.6
1/1/2020 13:00	597
1/1/2020 14:00	620.4
1/1/2020 15:00	636.3
1/1/2020 16:00	728.4
1/1/2020 17:00	945.6
1/1/2020 18:00	863.1
1/1/2020 19:00	781.2
1/1/2020 20:00	715.2
1/1/2020 21:00	671.1
1/1/2020 22:00	652.8
1/1/2020 23:00	658.2

ตาราง 4-4 ตัวอย่างข้อมูลพยากรณ์ราคาสำหรับผลิตภัณฑ์กำลังการผลิตสำรอง

Eastern Date Hour	30 Min Non-Sync (Baht/MWh)
1/1/2020 0:00	79.5
1/1/2020 1:00	79.5
1/1/2020 2:00	79.5
1/1/2020 3:00	79.5
1/1/2020 4:00	79.5
1/1/2020 5:00	79.5
1/1/2020 6:00	88.5
1/1/2020 7:00	90
1/1/2020 8:00	90
1/1/2020 9:00	90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1/1/2020 10:00	90
1/1/2020 11:00	90
1/1/2020 12:00	90
1/1/2020 13:00	88.5
1/1/2020 14:00	89.7
1/1/2020 15:00	89.7
1/1/2020 16:00	90
1/1/2020 17:00	90
1/1/2020 18:00	90
1/1/2020 19:00	90
1/1/2020 20:00	90
1/1/2020 21:00	90
1/1/2020 22:00	60
1/1/2020 23:00	79.5

นอกจากนี้ต้องการพารามิเตอร์สำหรับการทดลองคือขนาดกำลังผลิตของโรงไฟฟ้า ขนาดแบตเตอรี่ ราคาไฟฟ้าสมาชิก ราคาอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า ราคาสนับสนุนแบตเตอรี่ ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตไฟฟ้า ค่าประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้า จะกล่าวในหัว 5.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 ข้อมูลขาออก

ข้อมูลขาออกคือกำหนดการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเสมือนจะวางแผนกำลังการผลิตเพื่อสร้างเป็นสัญญาซื้อขายพลังงานไฟฟ้าหรือการสั่งการเดินเครื่องตอบสนองตลาดซื้อขายไฟฟ้าแบบขายส่ง (Wholesale market) แบ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลังงานและผลิตภัณฑ์กำลังผลิตสำรอง มีรูปแบบคำตอบดังตาราง 4-5 แสดงดังรูป 4-2 คือ

4.2.1 สัญญาซื้อขายพลังงาน

สัญญาซื้อขายพลังงานเกิดจาก กำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าล่วงหน้า 1 วัน (Day-ahead scheduling; DAS) สำหรับผลิตภัณฑ์พลังงานไฟฟ้า (Energy product) คือพลังงานไฟฟ้ารายชั่วโมงของวันที่มีการตกลงสัญญาซื้อขายไฟฟ้าล่วงหน้าก่อนส่งมอบพลังงาน 24 ชั่วโมง

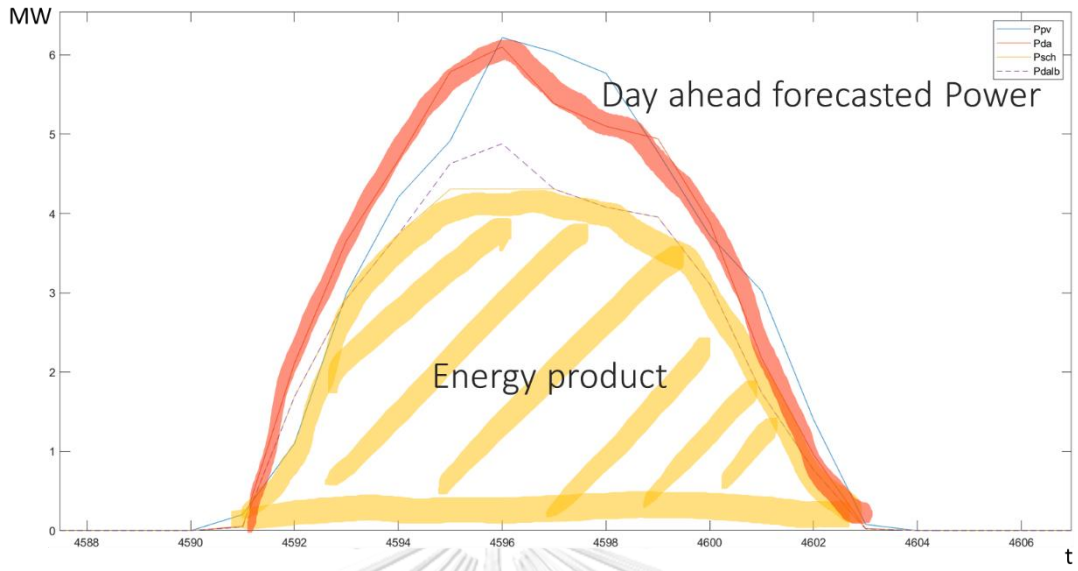
4.2.2 สัญญาซื้อขายกำลังผลิตสำรอง

สัญญาซื้อขายกำลังผลิตสำรองเกิดจาก กำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าล่วงหน้า 1 ชั่วโมง (Hour ahead scheduling; HAS) สำหรับผลิตภัณฑ์กำลังผลิตไฟฟ้าสำรอง (Operating reserve product) คือพลังงานไฟฟ้ารายชั่วโมง ระหว่างวันที่มีการตกลงสัญญาซื้อขายไฟฟ้าล่วงหน้าก่อนส่งมอบพลังงาน 1 ชั่วโมง

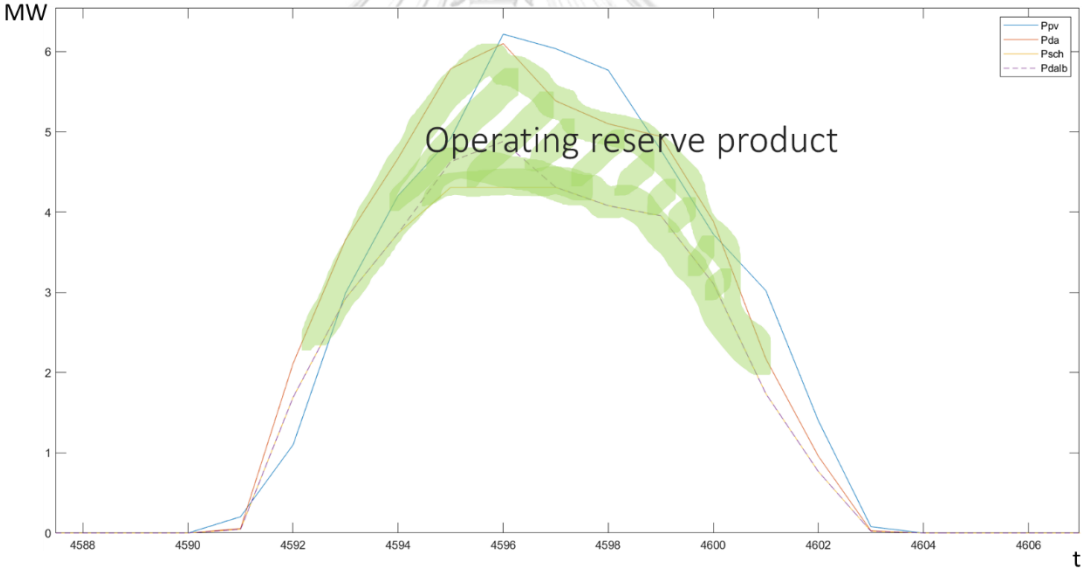
ตาราง 4-5 ตารางข้อมูลขาออก

No.	Output	Parameter	Unit	Size of Parameter per site per day	No. of Individual Sites (i)	Size of Vector Output per day
1	DA Scheduling	$P_{sch,\mathrm{i},da}(k)$	MW	24	6	144
2	HA Scheduling	$P_{sch,\mathrm{i},or}(k)$	MW	24	6	144
3	Battery-Discharged Scheduling	$P_{sch,bd,da}(k)$	MW	24	1 (Ensemble)	24
4	Battery-Charged Scheduling	$P_{sch,bc,da}(k)$	MW	24	1 (Ensemble)	24

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



a) Day-ahead scheduling



b) Hour-ahead scheduling

รูป 4-2 ข้อมูลขาออกพลังงานไฟฟ้า

4.3 ปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน

โรงไฟฟ้าเสมือนจะทำหน้าที่รวบรวมกำลังการผลิตที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าที่เป็นสมาชิกอยู่กับโซลาร์แพลตฟอร์มซึ่งจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลการพยากรณ์การผลิตแต่ละพื้นที่เป็นข้อมูลนำเข้าส่งให้ปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือนกำหนดการเดินเครื่องโดยใช้การแก้ปัญหาที่เหมาะสม (Optimization problem) เพื่อตอบสนองตลาดซื้อขายไฟฟ้าล่วงหน้า 1 วันและตลาดซื้อขายไฟฟ้าล่วงหน้า 1 ชั่วโมง คือ

4.3.1 การรวบรวมกำลังการผลิต

โรงไฟฟ้าขนาดเล็ก i บนฐานข้อมูลโซลาร์แพลตฟอร์ม ตามค่าเวลา k ตั้งแต่ k_i ถึง k_fมีหน่วยเป็น kW หรือ MW กำลังการผลิตขึ้นอยู่กับขนาดและกำลังการผลิตของแต่ละโรงไฟฟ้าสมการ (4.1)

$$P_{agg}(k) = \sum P_i(k) + P_b(k) \tag{4.1}$$

โดยที่ P_{agg} คือ กำลังการผลิตที่รวมจากโรงไฟฟ้า

P_i คือ กำลังการผลิตสมาชิกโรงไฟฟ้า

ค่าพยากรณ์การผลิตไฟฟ้าสำหรับการสร้างสัญญาณโรงไฟฟ้าเสมือนดังสมการ (4.2)

$$\hat{P}_{agg}(k) = \sum \hat{P}_i(k) \tag{4.2}$$

โดยที่ $\hat{P}_{agg}$ คือ ค่าพยากรณ์กำลังการผลิตที่รวมจากโรงไฟฟ้า

$\hat{P}_i$ คือ ค่าพยากรณ์กำลังการผลิตสมาชิกโรงไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ก็อาจใช้ข้อมูลความเข้มแสง (Solar irradiation intensity) และประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (Conversion efficiency) เพื่อนำมาประมาณข้อมูลการผลิตไฟฟ้าได้ดังสมการ (4.3)

$$\hat{P}_i = I_{pv} A\eta(1 - cT_{pv}) \tag{4.3}$$

โดยที่ I_{pv} คือ ค่าพยากรณ์รังสีดวงอาทิตย์

$A\eta$ คือ พื้นที่รับแสงอาทิตย์

C คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ

T_{pv} คือ ค่าพยากรณ์อุณหภูมิ

4.3.2 การกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนล่วงหน้า **1** วัน

กำหนดกำลังไฟฟ้าสำหรับการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนล่วงหน้า 1 วัน (Day-Ahead Scheduling) สำหรับผลิตภัณฑ์พลังงานไฟฟ้า (Energy product) ตอบสนองตลาดล่วงหน้ามากกว่า 1 วัน (Day-Ahead market) ผ่านตัวแปร $P_{sch,agg,da}$ ซึ่งสัญญาจะตกลงซื้อขายก่อน 24 ชั่วโมงก่อนเวลาส่งมอบพลังงานไฟฟ้า

เริ่มจากการพยากรณ์การผลิตไฟฟ้าล่วงหน้ามากกว่า 1 วัน การดำเนินการจะกำหนดค่าเวลา k ตั้งแต่ t_i ถึง t_f จากนั้นเพื่อแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสม คำนวณกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนล่วงหน้า 1 วัน มีวิธีการหาค่าที่เหมาะสมดังนี้

a) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

เพื่อที่จะทำให้ธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนได้กำไรสูงสุดมาจาก รายได้หักด้วยรายจ่ายของธุรกิจแต่ละเวลา k ดังสมการ (4.4)

$$Max \sum_{k=t_1}^{k=t_f} (R_{et}(k) - C_{et}(k) - A(k) - L(k) - B(k)) \qquad (4.4)$$

โดยที่

R_{et} คือ รายได้ที่ได้จากการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ตลาดซื้อขายไฟฟ้า (Baht)

C_{et} คือ รายจ่ายต้นทุนค่าพลังงานให้สมาชิก (Baht)

A คือ รายจ่ายต้นทุนซื้อพลังงานสำหรับเก็งกำไร (Baht)

L คือ ค่าปรับสำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (Baht)

B คือ รายจ่ายต้นทุนค่าพลังงานแบตเตอรี่ (Baht)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

มีรายละเอียดดังสมการ (4.5)-(4.10)

$$Revenue\ R_{et}(k) = p_{fc,da}(k)P_{sch,agg,da}(k) \quad (4.5)$$

$$Expense\ C_{et}(k) = m_{fc,i,da}(k)P_{sch,agg,da}(k) \quad (4.6)$$

$$Arbitrage\ A(k) = p_{fc,da}(k)P_{sch,bc,da}(k) \quad (4.7)$$

$$Ramp\ cost\ L(k) = c_R R_{sch}(k) \quad (4.8)$$

$$Battery\ cost\ B(k) = c_b E_b(k) \quad (4.9)$$

$$Aggregate\ Power\ P_{sch,agg,da}(k) = \sum P_{sch,i,da}(k) + P_{sch,bd,da}(k) \quad (4.10)$$

โดยที่

$p_{fc,da}$ คือ ราคาไฟฟ้าตลาดล่วงหน้า 1 วัน (Baht/MWh)

$m_{fc,da,i}$ คือ ราคาไฟฟ้าสมาชิกในโรงไฟฟ้าเสมือน (Baht /MWh)

c_R คือ ราคาอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (Baht-h/MW)

c_b คือ ราคาสนับสนุนสมาชิกประเภทแบตเตอรี่ (Baht/MWh)

$P_{sch,agg,da}$ คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าที่รวบรวมล่วงหน้ามากกว่า 1 วัน (MW)

R_{sch} คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (MW/h)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

และมีตัวแปรตัดสินใจ คือ

$P_{sch,i,da}$ คือ กำลังการผลิตไฟฟ้ารายโรงไฟฟ้าล่วงหน้ามากกว่า 1 วัน (MW)

$P_{sch,bd,da}$ คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าล่วงหน้ามากกว่า 1 วันของแบตเตอรี่ (MW) (ค่าบวกคือจ่ายพลังงานให้ตลาด)

$P_{sch,bc,da}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ซื้อจากระบบหรือตลาด (MW) (ค่าบวกคือการเกร็งกำไรซื้อพลังงานจากตลาด)

b) สมการเงื่อนไข (Constraint)

เงื่อนไขสถานะของแบตเตอรี่ ดังสมการที่ (3.4)-(3.7) โดยกำหนดให้ ระดับพลังงานอยู่ในช่วง 0.2- 0.8 [8] ของพิกัดพลังงานแบตเตอรี่ และให้สถานะระดับพลังงานของแบตเตอรี่ที่สิ้นสุดการคำนวณอยู่ในช่วงเท่ากับ 0.5 ของพิกัดพลังงานแบตเตอรี่ เงื่อนไขสมการรวบรวมกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (4.1)-(4.2) เงื่อนไขขอบเขตสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า และเงื่อนไขขีดจำกัดขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าดังนี้

เงื่อนไขขอบเขตของอัตราความเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า เพื่อให้โรงไฟฟ้าเสมือนมีคุณสมบัติความเปลี่ยนแปลงเสมือน ดังสมการ (4.11)

$$0 \leq R_{sch,agg}(k) \leq R_{lim,agg} \qquad (4.11)$$

มีรายละเอียดการกำหนดค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของเสมือนโรงไฟฟ้าเสมือนเมื่อมีการจ่ายไฟฟ้าเปลี่ยนไปช่วงเวลา k ได้ดังสมการ (4.12)

$$R_{sch,agg,da}(k) = \frac{|P_{sch,agg,da}(k) - P_{sch,agg,da}(k-1)|}{t_s} \qquad (4.12)$$

และอัตราการเปลี่ยนแปลงของการรวบรวมกำลังการผลิตคำนวณได้ดังสมการแต่ละเวลา k มีดังสมการ (4.13)

$$R_{sch,agg}(k) = \sum R_{sch,i}(k) \qquad (4.13)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เงื่อนไขขีดจำกัดพลังงาน สำหรับสำหรับการวางแผนการเดินเครื่องล่วงหน้ามากกว่า 1 วัน โรงไฟฟ้าเสมือนจะรับค่าพยากรณ์เพื่อสร้างสัญญาณการเดินเครื่อง ตั้งแต่ 0 MW แต่ไม่เกินค่าที่วางแผนและควบคุมจากการพยากรณ์ไว้ดังสมการ (4.14)

$$0 \leq P_{sch,agg,da}(k) \leq P_{sf,agg,da}(k) \qquad (4.14)$$

โดยที่ $P_{sf,i,da}$ ได้จากค่าพยากรณ์ที่ได้จากโซลาร์แพลตฟอร์ม $\hat{P}_{sf,agg,da}$และความปลอดภัยของการพยากรณ์ (Day-ahead Forecastable safety factor; r_{da}) ดังสมการ (4.15)

$$P_{sf,agg,da} = r_{da} \sum \hat{P}_{sf,i,da} \qquad (4.15)$$

เมื่อดูจากสมการแล้วเมื่อค่า r_{da} น้อยลง หมายความว่าค่ากำลังการผลิตที่จะวางแผนจะลดลงด้วย ส่งผลต่อรายได้ของโรงไฟฟ้าเสมือน

4.3.3 การกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนล่วงหน้า 1 ชั่วโมง

กำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าล่วงหน้า1 ชั่วโมง (Hour-Ahead scheduling) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์กำลังการผลิตสำรอง (Operating reserve product) ตอบสนองตลาดล่วงหน้ามากกว่า 1 ชั่วโมง (Hour-Ahead Market) ผ่านตัวแปร $P_{sch,agg,or}$ ซึ่งสัญญาจะตกลงซื้อขายก่อน 1 ชั่วโมง ก่อนเวลาส่งมอบพลังงานไฟฟ้า มีวิธีการหาค่าที่เหมาะสมดังนี้

a) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

เพื่อที่จะทำให้ธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนได้กำไรสูงสุดมาจากรายได้หักด้วยรายจ่ายของธุรกิจ แต่ละเวลา k ดังสมการ (4.4)

$$Max \ \sum_{k=t_1}^{k=t_f}(R_{or}(k) - C_{or}(k) - L(k)) \qquad (4.16)$$

โดยที่

R_{or} คือ รายได้ที่ได้จากกำลังผลิตไฟฟ้าสำรอง (Baht)

C_{or} คือ รายจ่ายต้นทุนค่าพลังงานให้สมาชิก (Baht)

L คือ ค่าปรับสำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลง (Baht)

มีรายละเอียดดังสมการ (4.17)-(4.20)

$$Revenue \ R_{or}(k) = p_{fc,ha}(k)P_{sch,agg,or}(k) \qquad (4.17)$$

$$Expense \ C_{or}(k) = m_{fc,i,ha}(k)P_{sch,agg,or}(k) \qquad (4.18)$$

$$Ramp \ cost \ L(k) = c_R R_{sch}(k) \qquad (4.19)$$

$$Aggregate \ Power \ P_{sch,agg,or}(k) = \sum P_{sch,i,or}(k) \qquad (4.20)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่

$p_{fc,ha}$ คือ ราคาไฟฟ้าตลาดล่วงหน้า 1 ชั่วโมง (Baht/MWh)

$m_{fc,i,ha}$ คือ ราคาไฟฟ้าสมาชิกในโรงไฟฟ้าเสมือน (Baht/MWh)

c_R คือ ราคาอัตราเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (Baht-h/MW)

$P_{sch,agg,or}$ คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าที่รวบรวมล่วงหน้ามากกว่า 1 ชั่วโมง (MW)

R_{sch} คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (MW/h)

และมีตัวแปรตัดสินใจ คือ

$P_{sch,i,or}$ คือ กำลังการผลิตไฟฟ้ารายโรงไฟฟ้าล่วงหน้ามากกว่า 1 ชั่วโมงโรงไฟฟ้า i (MW)

b) สมการสมการเงื่อนไข (Constraint)

เงื่อนไขสมการรวบรวมกำลังการผลิต (4.1)-(4.2) เงื่อนไขขอบเขตสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าโดยที่การหา $R_{sch}(k)$ ดังสมการ (4.21) และ อัตราการเปลี่ยนแปลงของการรวมรวมกำลังการผลิตคำนวณดังสมการ (4.13)

$$R_{sch,agg,or}(k) = \frac{|P_{sch,agg,or}(k) - P_{sch,agg,or}(k-1)|}{t_s} \quad (4.21)$$

เงื่อนไขขีดจำกัดกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรอง สำหรับการวางแผนการผลิตสำรอง โรงไฟฟ้าเสมือนจะรับค่าพยากรณ์เพื่อสร้างสัญญาณการเดินเครื่อง ตั้งแต่ 0 MW แต่ไม่เกินค่าที่วางแผนและควบคุมจากการพยากรณ์ ไว้ดังสมการ (4.22)

$$0 \leq P_{sch,agg,or}(k) \leq P_{sf,agg,or}(k) \quad (4.22)$$

มีรายละเอียดเพื่อทราบค่าพยากร์กำลังการผลิตสำรอง ดังสมการ (4.23) และการรวบรวมค่าพยากรณ์กำลังผลิตสำรองดังสมาการ (4.2)

$$P_{sf,i,or}(k) = \begin{cases} P_{sf,i,ha}(k) - P_{sch,i,da}(k) & \text{, if } P_{sf,i,ha}(k) > P_{sch,i,da}(k) \\ 0 & \text{, } \quad Otherwise \end{cases} \quad (4.23)$$

โดยที่ $P_{sf,i,or}$ คือ ค่าพยากรณ์กำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองสูงสุด

$P_{sf,i,ha}$ คือ ค่าพยากรณ์กำลังการผลิตไฟฟ้าล่วงหน้ามากกว่า 1 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

และ $P_{sf,i,ha}(k)$ ได้จากค่าพยากรณ์ที่ได้จากโซลาร์แพลตฟอร์ม $\hat{P}_{sf,i,ha}$และค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ (Hour-ahead Forecastable safety factor; r_{ha} ดังสมการ (4.24)

$$P_{sf,i,ha}(k) = r_{ha}\hat{P}_{sf,i,ha}(k) \quad (4.24)$$

บทที่ 5
ผลการศึกษา

เนื้อหาบทนี้นำเสนอกรณีศึกษาและสมมติฐาน ขั้นตอนการทดลอง ดัชนีชี้วัดเชิงคุณภาพที่ใช้ในการทดสอบ ผลการทดลองสร้างกลยุทธ์ปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน ผลการทดลองกลยุทธ์การกำหนดราคาไฟฟ้าสมาชิกและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ ผลการทดลองกลยุทธ์การเพิ่มกำไรจากการกำหนดระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เสมือน ลำดับสุดท้ายคือการวิเคราะห์และอภิปรายผล

5.1 กรณีศึกษาและสมมติฐาน

กรณีศึกษาการรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 สถานะคือสถานะโรงไฟฟ้าจริง 6 กรณี และสถานะรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้า 3 กรณีได้แก่ 1. การรวบรวมกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ 2 โรงไฟฟ้า 2. การรวบรวมกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ 3 โรงไฟฟ้า 3. การรวบรวมกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ 6 โรงไฟฟ้าดังตาราง 5-1 มีรายละเอียดพิกัดกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าดังตาราง *5-2* โดยการกำหนดสมมติฐานเพื่อให้ทราบข้อมูลที่มาและสภาวะของการทดลองซึ่งประกอบด้วยข้อมูลขาเข้าและพารามิเตอร์ตอบสนองต่อตลาดซื้อขายไฟฟ้าดังตาราง 5-3

ตาราง 5-1 กรณีศึกษา

	CASE0	CASE1	CASE2	CASE3
Status	Non-Aggregated	Aggregated	Aggregated	Aggregated
Member	Individual SPP1 SPP2 SPP3 SPP4 SPP5 SPP6	SPP1 SPP2	SPP1 SPP2 SPP3	SPP1 SPP2 SPP3 SPP4 SPP5 SPP6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตาราง 5-1 แสดงกรณีศึกษาฐาน CASE 0 ไม่มีการรวบรวมกำลังไฟฟ้าแสดงผลในการทดลองที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบกับ CASE1 ที่รวบรวม 2 โรงไฟฟ้า CASE2 ที่รวบรวม 3 โรงไฟฟ้า และ CASE3 ที่รวบรวม 6 โรงไฟฟ้า มีขนาดกำลังการผลิตแต่ละโรงไฟฟ้าดังตาราง *5-2*

ตาราง 5-2 พิกัดกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า

Site	**SPP1**	**SPP2**	**SPP3**	**SPP4**	**SPP5**	**SPP6**
Rated Capacity (MW)	30	90	90	55	40	41

ตาราง 5-3 ข้อมูลสมมติฐานสำหรับการทดลอง

No	List	Type	Range	Unit	Source
1	Forecasted power	Input (Hourly)	Vary	MW	CU solar platform: https://www.cusolarforecast.com/
2	Forecasted price	Input (Hourly)	Vary	Convert to Baht/MWh	NYISO https://www.nyiso.com/energy-market-operational-data
3	Rated capacity	Configurable parameter	10+	MW	CU solar platform https://www.cusolarforecast.com/
4	Ramp-rate limit	Configurable parameter	0.3* Capacity	MW/h	Grid code and Tuning setup (Response Maximum for Profit)
5	Promoted ES unit price	Configurable parameter	1%* Standard Deviation of Market Price	Convert to Baht/MWh	Member standby status in hour for round cycle
6	Battery efficiency (η)	Configurable parameter	85	%	General reference
7*	Ramp-rate unit price (c_R)	Configurable parameter	405 (Round min. of Market Price)	Baht-h/MW	Tuning setup (Response 2-4 hours flatten power curve characteristic)
8*	Day-ahead Forecastable safety factor (γ_{da})	Configurable parameter & Sensitivity parameter	0-80	%	CU solar platform https://www.cusolarforecast.com/ อ้างอิงค่า Root Mean Square Error (RMSE) จากการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้า และ Assigned (Sensitivity Analysis)
9*	Hour-ahead	Configurable	100	%	Assigned

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

	Forecastable safety factor (γ_{ha})	parameter & Sensitivity parameter			
10*	Member unit price (α)	Sensitivity parameter	0-100	%	Assigned (Sensitivity Analysis)
11*	Battery capacity	Sensitivity parameter	0-30	%	Assigned (Sensitivity Analysis)

* เป็นตัวแปรสำคัญใช้สำหรับการออกแบบธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน โดยหน้าที่ตัวแปรมีดังนี้

c_R คือตัวแปรสำหรับการออกแบบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า

γ_{da} ,γ_{ha} และ α คือตัวแปรสำหรับนำเสนอกลยุทธ์ในหัวข้อ 5.5

$Battery\ Capacity$ คือตัวแปรสำหรับนำเสนอกลยุทธ์ในหัวข้อ 5.6

5.2 ขั้นตอนการทดลอง

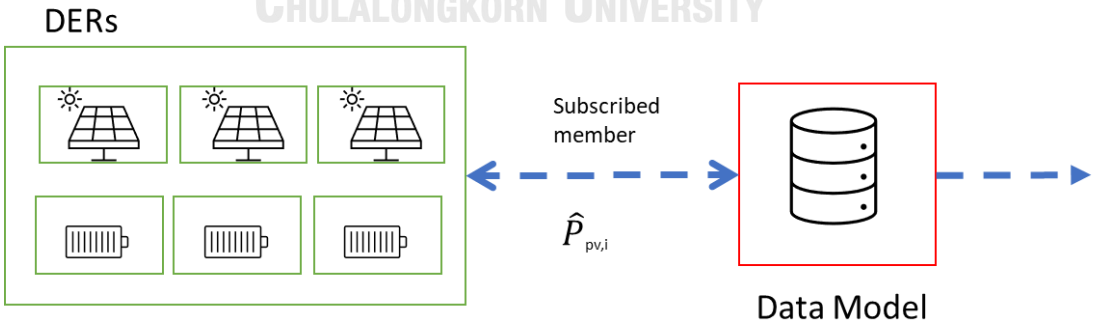
การทดลองจะรวบรวมกำลังการผลิตจากสมาชิกผ่านผู้รวบรวมกำลังการผลิตเพื่อเป็นข้อมูลขาเข้าดังรูป 5-1 แบ่งเป็นกรณีศึกษาดังตาราง 5-1 และมีการทดลองทั้งหมด 3 การทดลอง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1.) ขั้นตอนกลยุทธ์ปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือนดังรูป 5-2

2.) ขั้นตอนกลยุทธ์ราคาไฟฟ้าสมาชิกและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ดังรูป 5-3

3.) ขั้นตอนกลยุทธ์เพิ่มกำไรจากการกำหนดระบบกักเก็บพลังงานดังรูป 5-4

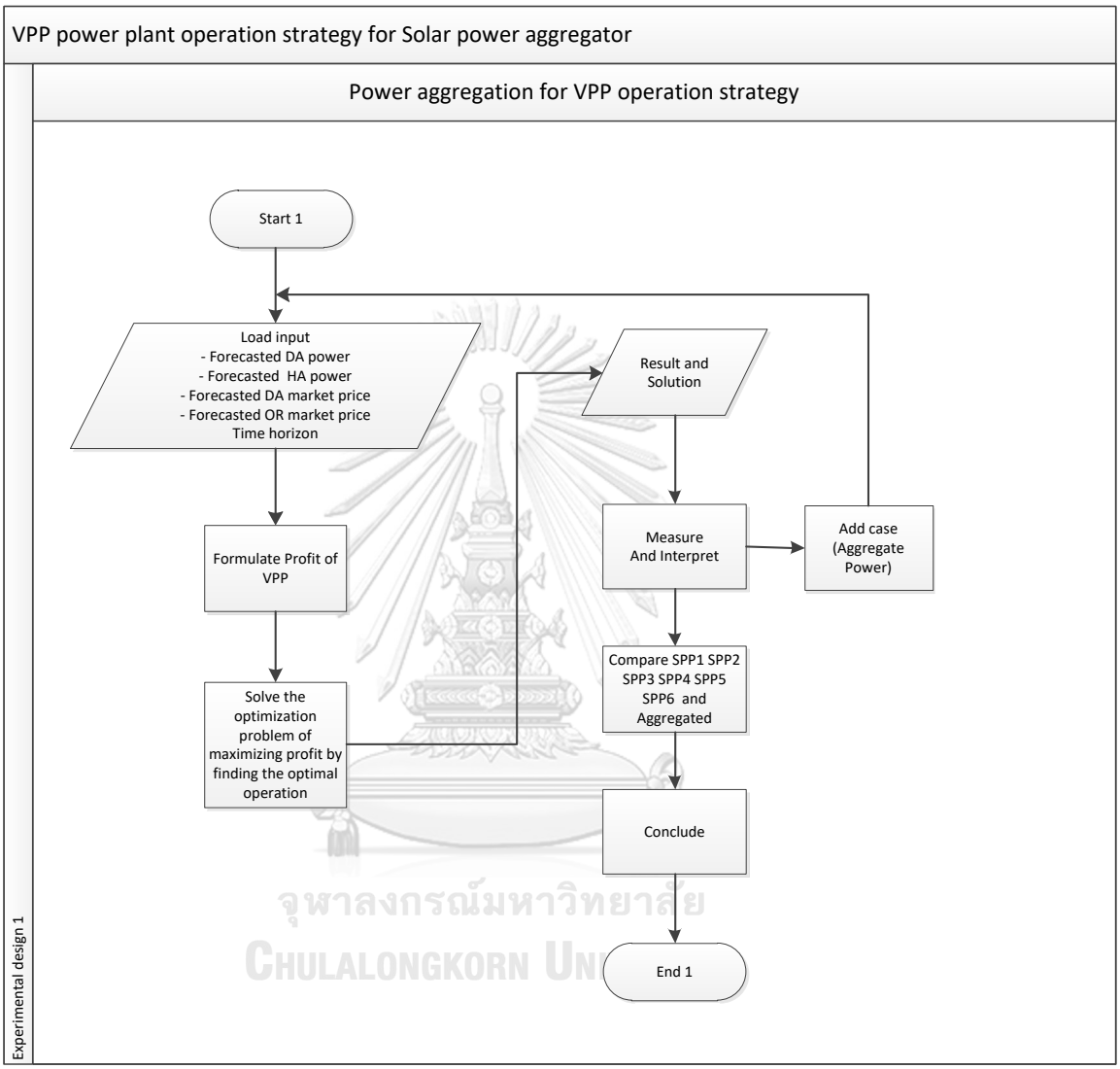
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูป 5-1 การรวบรวมกำลังการผลิตจากสมาชิก

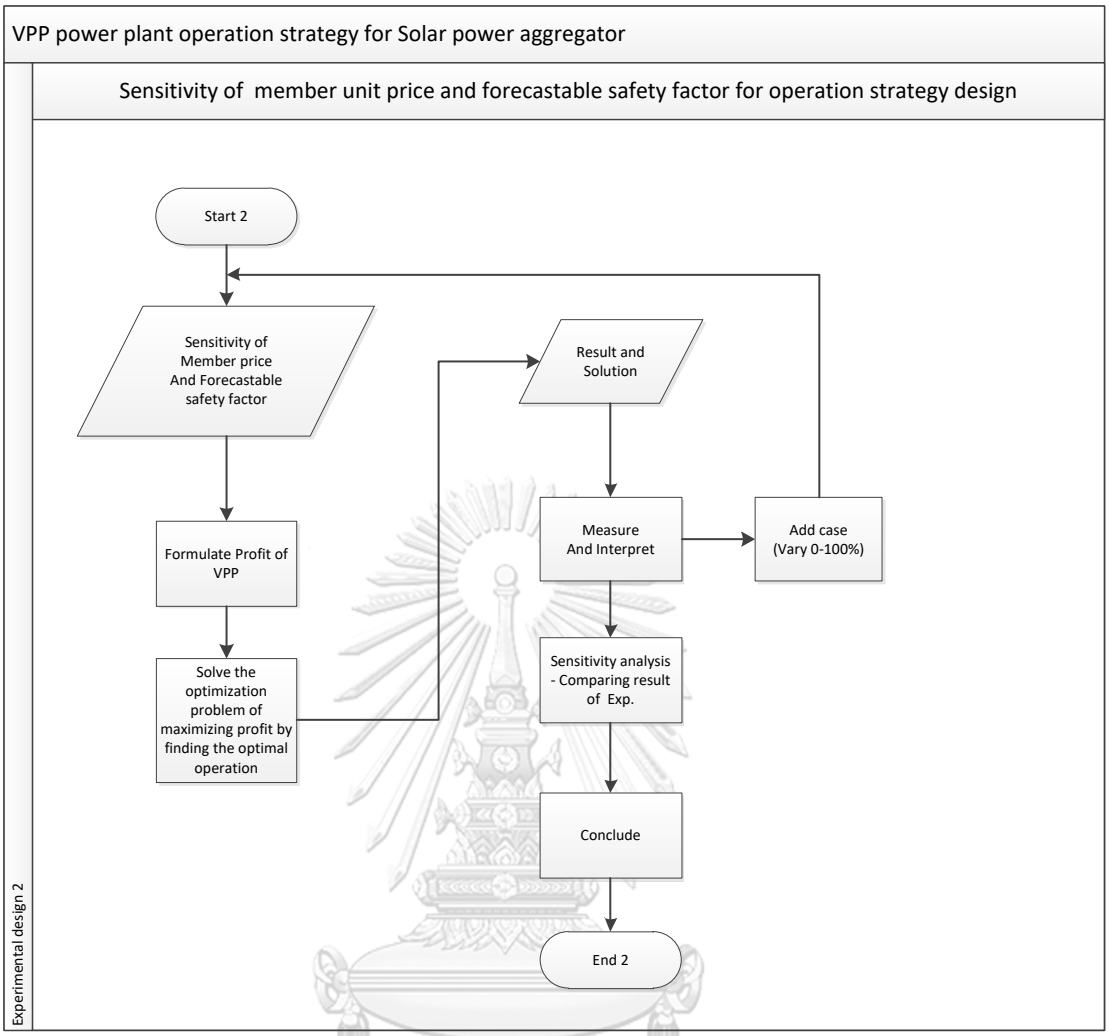
จากรูป 5-1 การรวบรวมกำลังการผลิตจากสมาชิกประกอบด้วยเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ผ่านผู้รวบรวมกำลังการผลิต รวบรวมค่าพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าดังสมการ (4.2) โดยขนาดระบบกักเก็บพลังงานประเภทแบตเตอรี่จะเป็นการกำหนด

ขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองที่ 3 จากนั้นส่งข้อมูลเหล่านี้ไปยังกระบวนการทดลองจัดการและวิเคราะห์ทั้งแบบแยกรายโรงและแบบรวบรวมกำลังการผลิตดังกรณีศึกษา ต่อไป



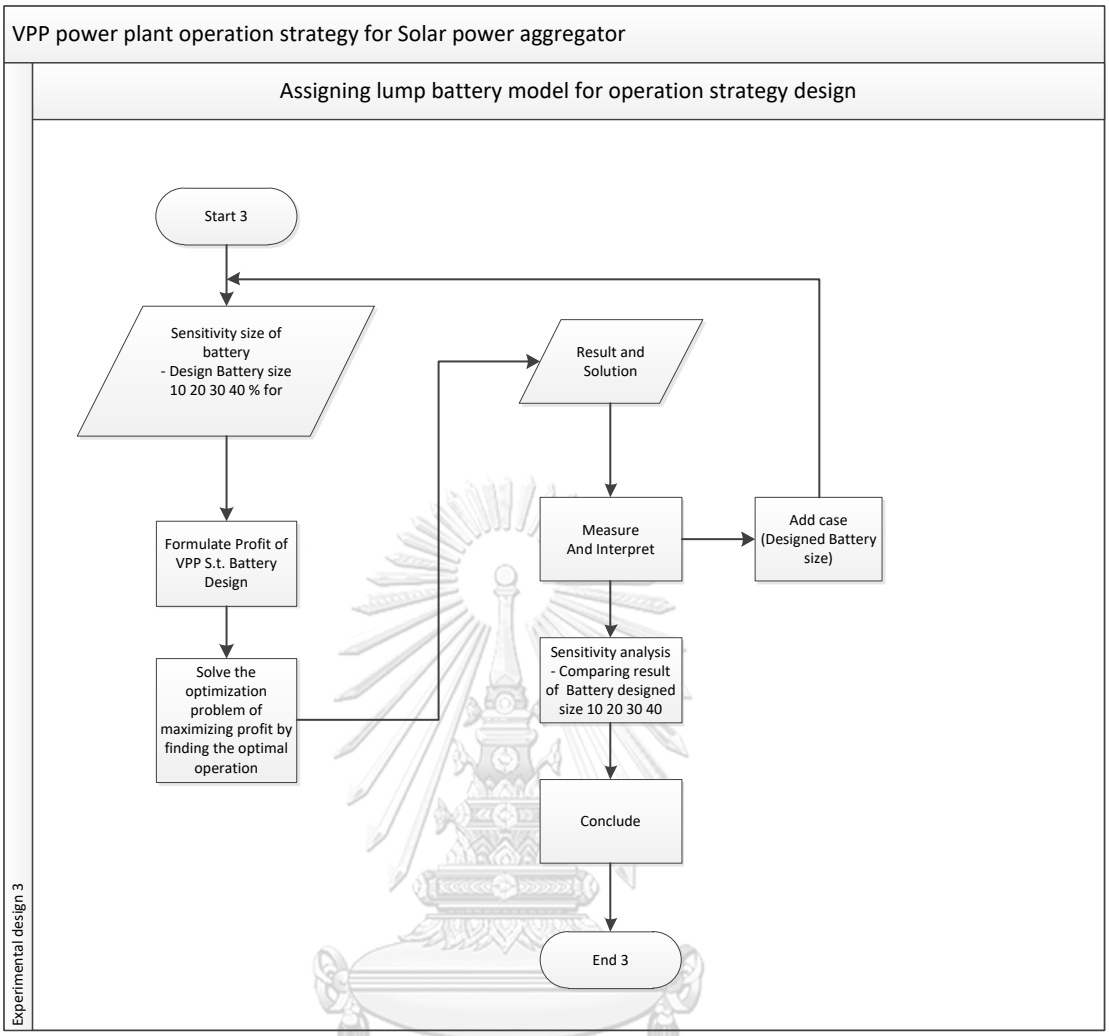
รูป 5-2 ขั้นตอนการปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน

จากรูป 5-2 ขั้นตอนปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือนเริ่มจาก เริ่มต้น รับข้อมูลขาเข้าได้แก่ค่าพยากรณ์กำลังการผลิตล่วงหน้า 1 วัน ค่าพยากรณ์กำลังการผลิตล่วงหน้า 1 ชั่วโมง ค่าพยากรณ์ราคาไฟฟ้าล่วงหน้า 1 วัน และค่าพยากรณ์ราคาไฟฟ้าล่วงหน้า 1 ชั่วโมง ส่งไปยังกำหนดนิยามปัญหาแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสม เก็บผลลัพธ์ วัดผล วิเคราะห์และเปรียบเทียบจากนั้นเพิ่มกรณีที่รวบรวมกำลังผลิตจนครบ 6 โรงไฟฟ้า สรุปและสิ้นสุดการทดลองที่ 1 หลังจากสิ้นสุดการทดลองที่ 1 จะเลือกกรณีศึกษา CASE ที่ดีที่สุดทำการทดลองที่ 2



รูป 5-3 ขั้นตอนด้านสัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิกและด้านความไม่แน่นอนของการพยากรณ์

จากรูป 5-3 การวิเคราะห์ความไวของกำไรเมื่อกำหนดสัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิกและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ เริ่มต้นรับข้อมูลขาเข้าได้โดยกำหนดราคาไฟฟ้าสมาชิกและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ ส่งไปยังกำหนดนิยามปัญหา แก้ปัญหาหาค่าที่เหมาะสม เก็บผลลัพธ์ วัดผลและวิเคราะห์ เพิ่มกรณีค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์จนครบ (0-80%) เพิ่มกรณีราคาต้นทุนรายจ่ายโรงไฟฟ้าที่เสนอแก่สมาชิกจนครบ (0-100%) สรุปและสิ้นสุดการทดลองที่ 2 หลังจากสิ้นสุดการทดลองที่ 2 จะเลือกกรณีศึกษาค่าที่เหมาะสมของราคาไฟฟ้าสมาชิกและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ เข้าสู่การทดลองที่ 3



รูป 5-4 ขั้นตอนการเพิ่มกำไรจากฟังก์ชันการกักเก็บพลังงานแบบเสมือน

จากรูป 5-4 การวิเคราะห์ความไวของกำไรเมื่อกำหนดขนาดระบบกักเก็บพลังงานเพื่อส่งเสริมการแลกเปลี่ยนพลังงาน เริ่มต้นรับข้อมูลขาเข้าได้โดยกำหนดขนาดของระบบกักเก็บพลังงานประเภทแบตเตอรี่ ส่งไปยังกำหนดนิยามปัญหา แก้ปัญหาค่าที่เหมาะสม เก็บผลลัพธ์ วัดผลและวิเคราะห์ เพิ่มกรณีขนาดแบตเตอรี่ตั้งแต่ 0-30% สรุปและสิ้นสุดการทดลองที่ 3

5.3 ดัชนีชี้วัดที่ใช้ในการทดสอบ

ดัชนีชี้วัดเชิงคุณภาพที่ใช้ในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างการจัดการแบบไม่มีการรวบรวมกำลังการผลิตและการรวบรวมกำลังการผลิต

- ผลรายได้เฉลี่ยต่อวัน

รายได้ที่ได้จากการดำเนินงานโรงไฟฟ้าเสมือนจ่ายพลังงานให้ตลาดซื้อขายไฟฟ้ารวมกันทุกตลาด ดังตัวแปรรายได้ในสมการ (4.4) และ (4.16)

- ผลรายได้เฉลี่ยต่อกำลังการผลิตที่รวบรวมได้

ผลรายได้จากการดำเนินงานต่อกำลังการผลิตที่รวบรวมได้ สำหรับการรวบรวมกำลังการผลิตรายได้ที่ได้ต่อวันที่สนใจต้องสูงขึ้นตามการรวบรวมสะท้อนให้เห็นความสามารถในกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่ก่อเกิดรายได้และใช้ประโยชน์จากรวบรวมสมาชิกในโรงไฟฟ้าเสมือนได้สูงขึ้นดังสมการ (5.1)

$$Average\ Revenue\ per\ Capacity = \frac{Average\ Revenue\ per\ day}{Rated\ Capacity} \qquad (5.1)$$

- สัมประสิทธิ์ของความผันแปรของรายได้

สัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient of variation; CV) คือตัววัดการกระจายของรายได้ที่เปรียบเทียบภายใต้ค่าเฉลี่ยเดียวกันมีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลที่ความแตกต่างด้านหน่วยการวัดหรือหน่วยเดียวกันแต่แตกต่างกันมากดังสมการ (5.2) หากมีค่าน้อยลงแสดงถึงรายได้ที่ได้มีค่าความผันแปรน้อยลง หรือศักยภาพในการรักษาผลรายได้จากการจัดการดีขึ้น [5]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

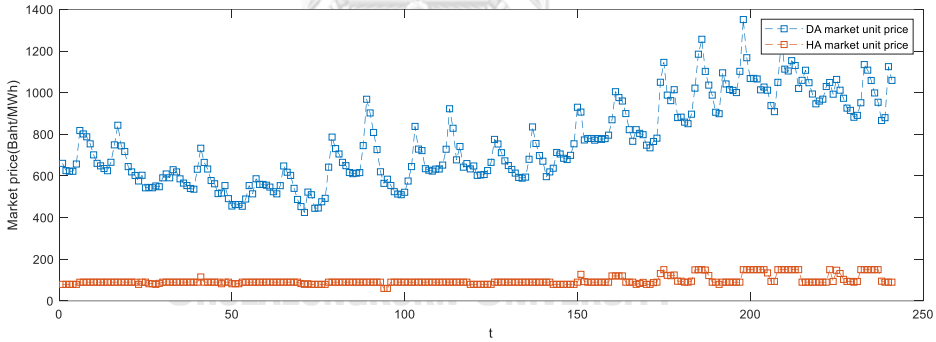
$$CV = \frac{SD}{\bar{y}} \qquad (5.2)$$

โดยที่ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของรายได้

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลียของรายได้

5.4 กลยุทธ์การปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน

การทดสอบรูปแบบการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อตอบสนองตลาดซื้อขายไฟฟ้าสำหรับตลาดซื้อขายไฟฟ้าล่วงหน้ามากกว่า 1 วัน มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้ อ้างอิงตลาดซื้อขายไฟฟ้า NYISO Zone PTID 61757 วันที่ 10-19 มกราคม 2020 เป็นเวลา 10 วัน ราคาไฟฟ้าตามตลาดล่วงหน้า 1 วันอยู่ในช่วง 0.46-1.36 บาทต่อหน่วย ราคาไฟฟ้าตามตลาดล่วงหน้า 1 ชั่วโมง อยู่ในช่วง 0.08 - 0.15 บาทต่อหน่วย ดังรูป 5-5 โดยให้สัดส่วนราคาไฟฟ้าสมาชิกเท่ากับ 0.5 เท่าของราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้า คาบการคำนวณ 1 วัน ไม่มีสมมติฐานขนาดแบตเตอรี่ ประเภทข้อมูลรายชั่วโมง ค่าปรับอัตราการเปลี่ยนแปลง 405 บาท-ชั่วโมงต่อเมกะวัตต์ Ramp-rate limit 0.3 เท่าของพิกัดกำลังการผลิต ได้ผลทดสอบดัชนีชี้วัดดังตาราง 5-4 และเปรียบเทียบรายได้กรณีรวบรวมกำลังการผลิตและแยกดำเนินการแบบรายโรงดังตาราง 5-5 โดยนำเสนอตัวอย่างผลการกำหนดการเดินเครื่องสำหรับผลิตภัณฑ์พลังงานไฟฟ้าและผลิตภัณฑ์กำลังไฟฟ้าสำรองของโรงไฟฟ้าเสมือน วันที่ 15 มกราคม 2020 ดังรูป 5-6 ผลการทดสอบกำหนดการเดินเครื่องล่วงหน้า 1 วันของโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิกดังรูป 5-7 ผลการทดสอบกำหนดการเดินเครื่องล่วงหน้า 1 ชั่วโมงของโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิกดังรูป 5-8



รูป 5-5 ราคาอ้างอิงที่ใช้ในการทดสอบ

ตาราง 5-4 ผลการทดสอบกลยุทธ์การเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อตอบสนองตลาดซื้อขายไฟฟ้า

Case	Rated Capacity (MW)	Sum 10-day Revenue (B)	Average Daily Revenue (B)	Average Daily Revenue/Capacity (B/MW)	Revenue CV (%)
SPP1	30	475,188	47,519	1,584	5.7
SPP2	90	1,854,818	185,482	2,061	15.3
SPP3	90	2,308,274	230,827	2,565	12.8
SPP4	55	1,163,858	116,386	2,116	12.1
SPP5	40	644,798	64,480	1,612	14.6
SPP6	41	900,462	90,046	2,196	13.8
CASE 1: VPP (1+2)	120	2,360,302	236,030	1,967	12.3
CASE 2: VPP (1+2+3)	210	4,666,561	466,656	2,222	10.3
CASE 3: VPP (1-6)	346	7,441,467	744,147	2,151	9.1

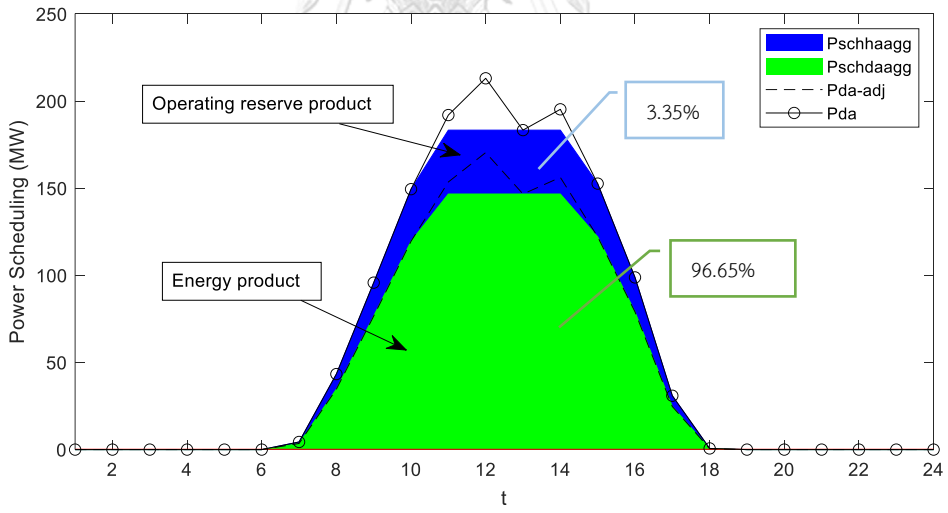
จากผลการทดลองดัง ตาราง 5-4 พบว่าการรวบรวมกำลังการผลิตเพื่อปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน 2 โรงไฟฟ้ากำลังการผลิตเท่ากับ 120 เมกะวัตต์ มีผลรายได้เฉลี่ยเท่ากับ 236,030 บาทต่อวัน ผลรายได้ต่อกำลังการผลิต 1,967 บาทต่อเมกะวัตต์และสัมประสิทธิ์ของความผันแปรของรายได้เท่ากับ 12.3 % เมื่อทำการทดลองการรวบรวมกำลังการผลิตเพื่อปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน 3 โรงไฟฟ้าเท่ากับ 210 เมกะวัตต์ มีผลรายได้เท่ากับ 466,656 บาทต่อวัน ผลรายได้ต่อกำลังการผลิตที่ 2,222 บาทต่อเมกะวัตต์และสัมประสิทธิ์ความผันแปรของรายได้เท่ากับ 10.3 % และการรวบรวมกำลังการผลิตเพื่อปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน 6 โรงไฟฟ้าเท่ากับ 346 เมกะวัตต์ มีผลรายได้เท่ากับ 744,147 บาทต่อวัน ผลรายได้ต่อกำลังการผลิตที่ 2,151 บาทต่อเมกะวัตต์และสัมประสิทธิ์ของความผันแปรของรายได้เท่ากับ 9.1 % สะท้อนให้เห็นว่าการรวบรวมกำลังการผลิตจำนวนไซต์เพิ่มขึ้นทำให้ผลรายได้สูงขึ้น อัตรารายได้ต่อกำลังการผลิตสูงขึ้น และมีสัมประสิทธ์ความผันแปรของผลรายได้ต่อวันดีขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง 5-5 การเปรียบเทียบรายได้กรณีแบบรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้า และกรณีแบบแยกดำเนินการรายโรง

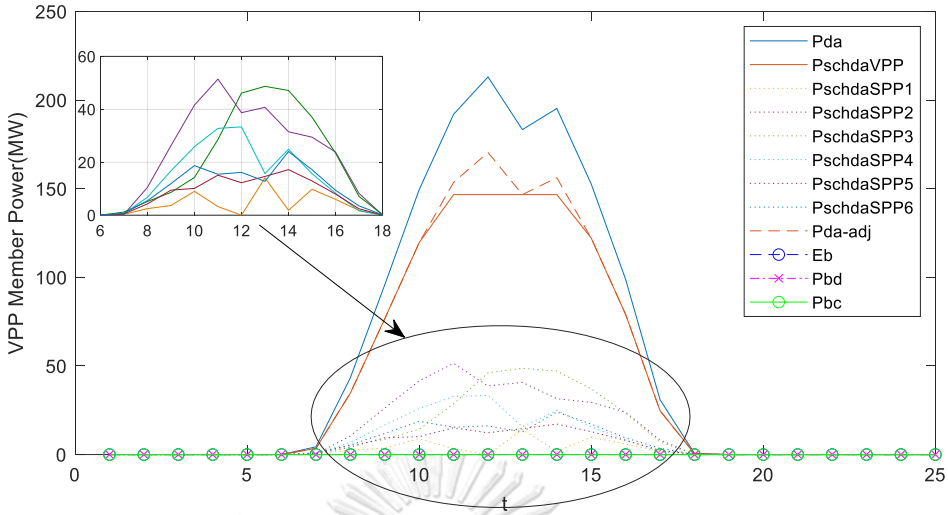
Aggregate Status	Agg. Revenue (Baht per day)	Individual Status	Total Individual Revenue (Baht per day)
CASE 1	236,030	SPP1+SPP2	233,001
CASE 2	466,656	SPP1+SPP2+SPP3	463,828
CASE 3	744,147	SPP1+SPP2+SPP3+SPP4+ SPP5+SPP6	734,740

จากตาราง 5-5 สามารถเปรียบเทียบรายได้ของกรณีศึกษาแบบรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้าเพื่อจัดการแบบโรงไฟฟ้าเสมือนดัง CASE 1 CASE 2 และ CASE 3 มีประสิทธิภาพการดำเนินการด้านรายได้สูงกว่าแบบแยกดำเนินการรายโรง คิดเป็นอัตราร้อยละ 1.30 0.61 และ 1.28 ตามลำดับ

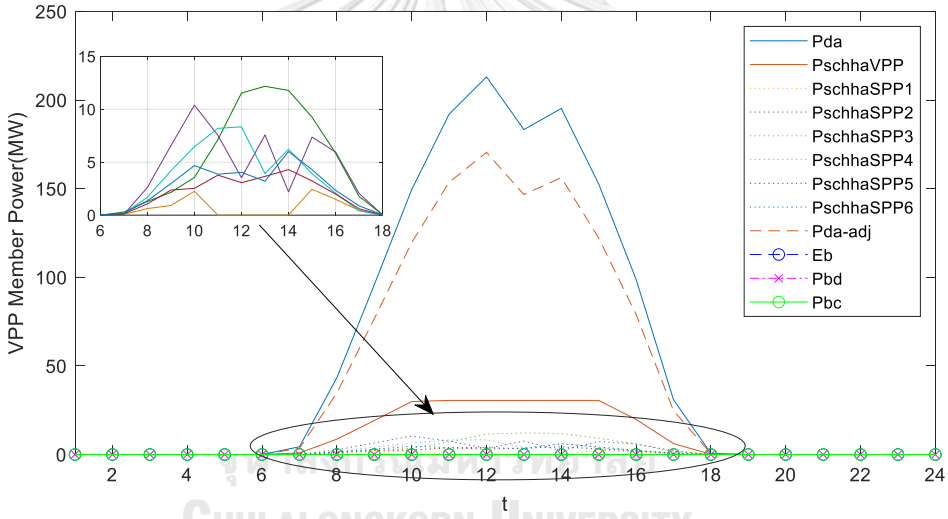


รูป 5-6 ผลกำหนดการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเสมือน

จากรูป 5-6 ผลกำหนดการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเสมือนดังตัวอย่างวันที่ 15 มกราคม 2020 ทั้งผลิตภัณฑ์พลังงานและผลิตภัณฑ์กำลังการผลิตสำรอง โดยกลยุทธ์การกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนที่รวบรวมกำลังผลิต 6 โรงไฟฟ้า พบว่ารายได้ของการกำหนดการเดินเครื่องแบ่ง 1. รายได้จากผลิตภัณฑ์พลังงาน (พื้นที่สีเขียว) มีสัดส่วนรายได้เท่ากับ 96.65% และ 2. รายได้จากผลิตภัณกำลังผลิตสำรอง (พื้นที่สีน้ำเงิน) มีสัดส่วนรายได้เท่ากับ 3.35%



รูป 5-7 ผลกำหนดการเดินเครื่องล่วงหน้า 1 วันของโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก



รูป 5-8 ผลกำหนดการเดินเครื่องล่วงหน้า 1 ชั่วโมงของโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก

จากการหาค่าที่เหมาะสมปฏิบัติโรงไฟฟ้าเสมือนโดยไม่มีแบตเตอรี่ สามารถสร้างกำหนดการเดินเครื่องสมาชิกโรงไฟฟ้าดังเส้นประของโรงไฟฟ้า SPP1 ถึง SPP6 แบ่งเป็นกำหนดการเดินเครื่องล่วงหน้า 1 วัน ดังรูป 5-7และผลกำหนดการเดินเครื่องล่วงหน้า 1 ชั่วโมงดังรูป 5-8 จะเห็นว่าข้อดีของการเป็นสมาชิกของโรงไฟฟ้าเสมือนสามารถสร้างกำหนดการเดินเครื่องโดยรวมที่มีการจัดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตรากำลังผลิตไฟฟ้าน้อยและเรียบช่วงเวลากลางวัน

หากใช้สมมติฐานสัดส่วนของค่าใช้จ่ายต่อรายได้เท่ากันระหว่างโรงไฟฟ้าเสมือนและโรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ดำเนินการเอง จะสามารถเปรียบเทียบผลรายได้ กำไร และรายจ่ายในหน่วยบาทต่อวันจากการดำเนินงานระหว่างโรงไฟฟ้าจริงแบบแยกรายโรง และโรงไฟฟ้าเสมือนที่รวบรวมกำลังไฟฟ้าจาก 6 โรงไฟฟ้าได้ดังตาราง 5-6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง 5-6 การเปรียบเทียบการดำเนินงานต่อวันของโรงไฟฟ้าจริงและโรงไฟฟ้าเสมือน

All Market	Individual AVG Revenue (Baht)	Individual AVG Profit (Baht)	Individual AVG Cost (Baht)	VPP AVG Revenue (AGG6) (Baht)	VPP AVG Profit (AGG6) (Baht)	VPP AVG Expense (AGG6) (Baht)
SPP1	47,519	23,759	(23,759)			
SPP2	185,482	92,741	(92,741)			
SPP3	230,827	115,414	(115,414)			
SPP4	116,386	58,193	(58,193)	744,147	372,073	(372,073)
SPP5	64,480	32,240	(32,240)			
SPP6	90,046	45,023	(45,023)			
Total	734,740	367,370	(367,370)			

DAM	Individual AVG Revenue (Baht)	Individual AVG Profit (Baht)	Individual AVG Cost (Baht)	VPP AVG Revenue (AGG6) (Baht)	VPP AVG Profit (AGG6) (Baht)	VPP AVG Expense (AGG6) (Baht)
SPP1	45,957	22,979	(22,979)			
SPP2	179,412	89,706	(89,706)			
SPP3	223,014	111,507	(111,507)			
SPP4	112,606	56,303	(56,303)	719,214	359,607	(359,607)
SPP5	62,442	31,221	(31,221)			
SPP6	87,129	43,564	(43,564)			
Total	710,561	355,280	(355,280)			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

HAM	Individual AVG Revenue (Baht)	Individual AVG Profit (Baht)	Individual AVG Cost (Baht)	VPP AVG Revenue (AGG6) (Baht)	VPP AVG Profit (AGG6) (Baht)	VPP AVG Expense (AGG6) (Baht)
SPP1	1,562	781	(781)			
SPP2	6,070	3,035	(3,035)			
SPP3	7,813	3,907	(3,907)			
SPP4	3,779	1,890	(1,890)	24,933	12,467	(12,467)
SPP5	2,038	1,019	(1,019)			
SPP6	2,918	1,459	(1,459)			
Total	24,179	12,090	(12,090)			

จากตาราง *5-6* การดำเนินงานระหว่างโรงไฟฟ้าจริงและโรงไฟฟ้าเสมือนที่รวบรวมกำลังไฟฟ้าจาก 6 โรงไฟฟ้าสามารถเปรียบเทียบผลกำไรทุกตลาดซื้อขายไฟฟ้าทั้งตลาดล่วงหน้า 1 วัน และ ตลาดล่วงหน้า 1 ชั่วโมงตามลำดับ อีกทั้งสามารถสรุปได้ว่าโรงไฟฟ้าเสมือนมีความสามารถดำเนินการทั้งกำไรและรายรับสูงกว่าการโรงไฟฟ้าจริงทั้ง 6 โรง (กรณีพิจารณาต้นทุนซื้อพลังงานเท่ากับ 0.5 เท่าของราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้า)

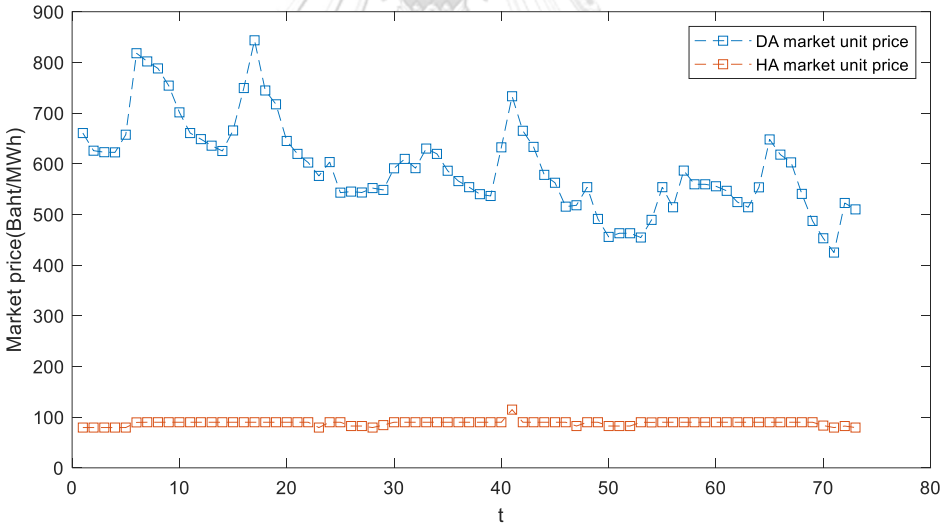
สรุปผลการทดลองการกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือน ทำให้สามารถกำหนดการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเสมือนและกำหนดการเดินเครื่องของสมาชิกของโรงไฟฟ้าเสมือนได้ ซึ่งกรณีโรงไฟฟ้าเสมือนที่รวบรวมกำลังผลิตไฟฟ้า 6 โรงไฟฟ้า มีผลการดำเนินการดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทุกกรณี (สามารถเปรียบเทียบผ่านดัชนีชี้วัดที่กำหนด) โดยโรงไฟฟ้าเสมือนนั้นสามารถสร้างการสั่งการเดินเครื่องผลิตไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 ผลิตภัณฑ์ ได้จากกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าทั้งตลาดล่วงหน้า 1 วัน และกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าตลาดล่วงหน้า 1 ชั่วโมง โดยกำหนดให้กรณีศึกษา CASE3 เป็นกรณีศึกษาในการทดลองที่ 2 ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.5 กลยุทธ์ด้านสัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิกและด้านความไม่แน่นอนของการพยากรณ์

เมื่อกำหนดโรงไฟฟ้าเสมือนที่รวบรวมกำลังการผลิตจาก 6 โรงไฟฟ้ามีผลการทดลองที่ 1 ดีที่สุดแล้ว จากนั้นทำการทดสอบเพื่อประเมินผลกำไรจากสัดส่วนราคาไฟฟ้าสมาชิกและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์กำลังไฟฟ้าผ่านการวิเคราะห์ความไว

การวิเคราะห์ค่าความไวของกำไรโดยกำหนดราคาไฟฟ้าสมาชิกในโรงไฟฟ้าเสมือนตลาดซื้อขายไฟฟ้า มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้ วันที่ 10-12 มกราคม 2020 เป็นเวลา 3 วัน ราคาไฟฟ้าตามตลาดล่วงหน้า 1 วันอยู่ในช่วง 0.42-0.84 บาทต่อหน่วย ราคาไฟฟ้าตามตลาดล่วงหน้า 1 ชั่วโมงอยู่ในช่วง 0.06 - 0.11 บาทต่อหน่วยดังรูป 5-9 โดยให้สัดส่วนราคาไฟฟ้าสมาชิก (α) เท่ากับ 0.1-1 เท่าของราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้า คาบการคำนวณ 3 วัน ไม่มีขนาดแบตเตอรี่ ประเภทข้อมูลรายชั่วโมง ค่าปรับอัตราการเปลี่ยนแปลง 405 บาท-ชั่วโมงต่อเมกะวัตต์ ได้ผลทดสอบการประเมินค่าความไวของกำไรของธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนดัง ตาราง 5-7 แสดงผ่านกราฟดังรูป 5-10 และผลการทดสอบของวันที่ 10-12 มกราคม กำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนรวบรวม 6 โรงไฟฟ้าได้ผลกำหนดการเดินเครื่องดังรูป 5-11

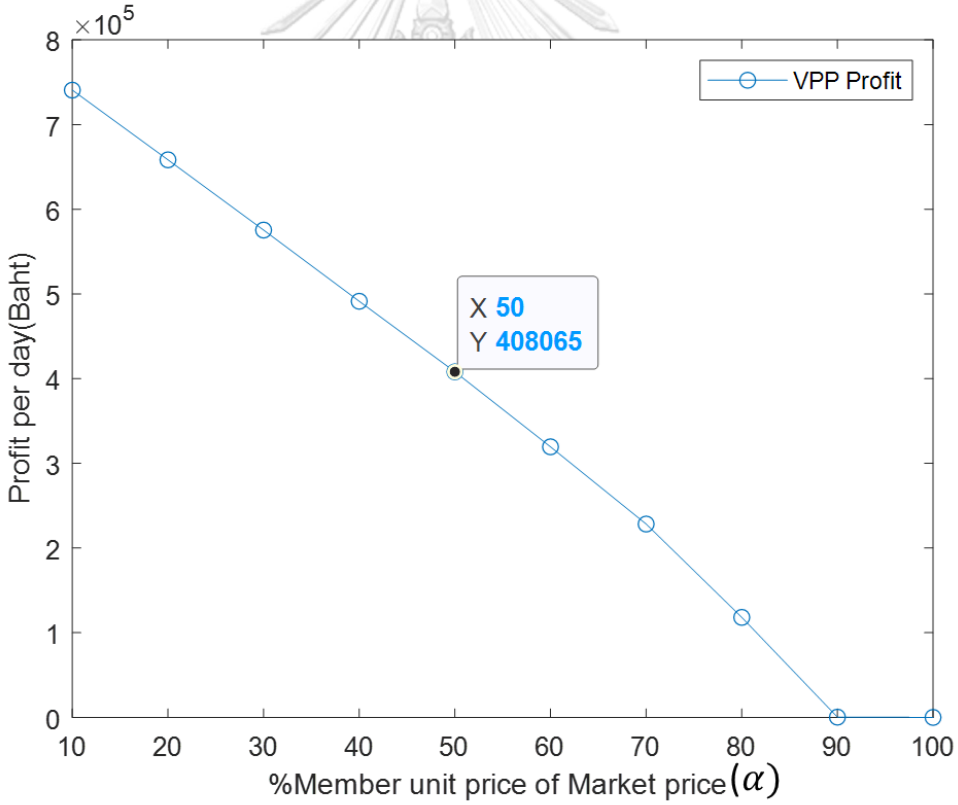


รูป 5-9 ราคาค่าไฟฟ้าอ้างอิงตลาด NYISO

ตาราง 5-7 ผลกำไรเมื่อกำหนดราคาไฟฟ้าสมาชิกต่อราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้า

Member unit price ratio (α)	10%	20%	30%	40%	50%
3 days Profit (฿)	2,222,003	1,975,114	1,726,274	1,474,074	1,224,194
Profit per day (฿)	740,668	658,371	575,425	491,358	408,065

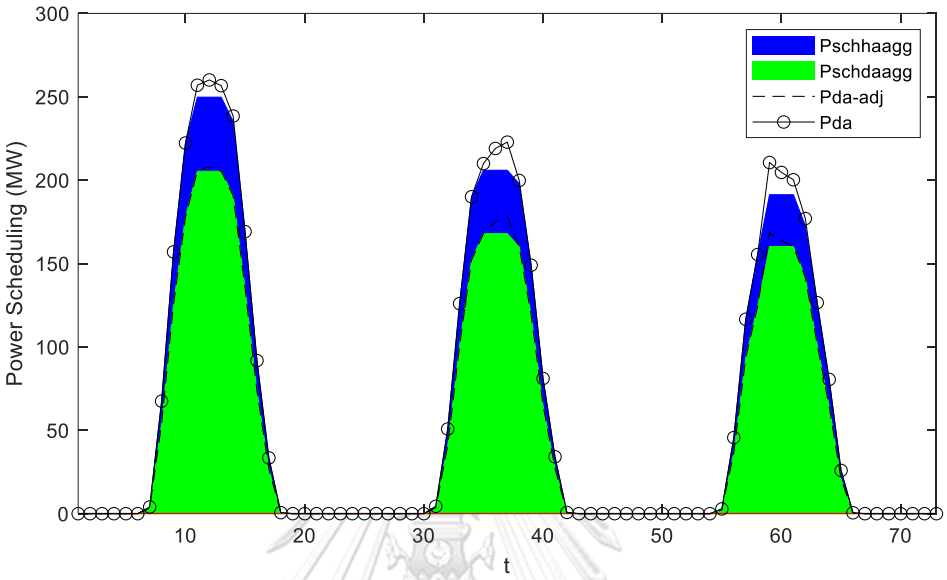
Member unit price ratio (α)	60%	70%	80%	90%	100%
3 days Profit (฿)	958,451	684,918	354,325	891	-
Profit per ฿ay (฿)	319,484	228,306	118,108	297	-



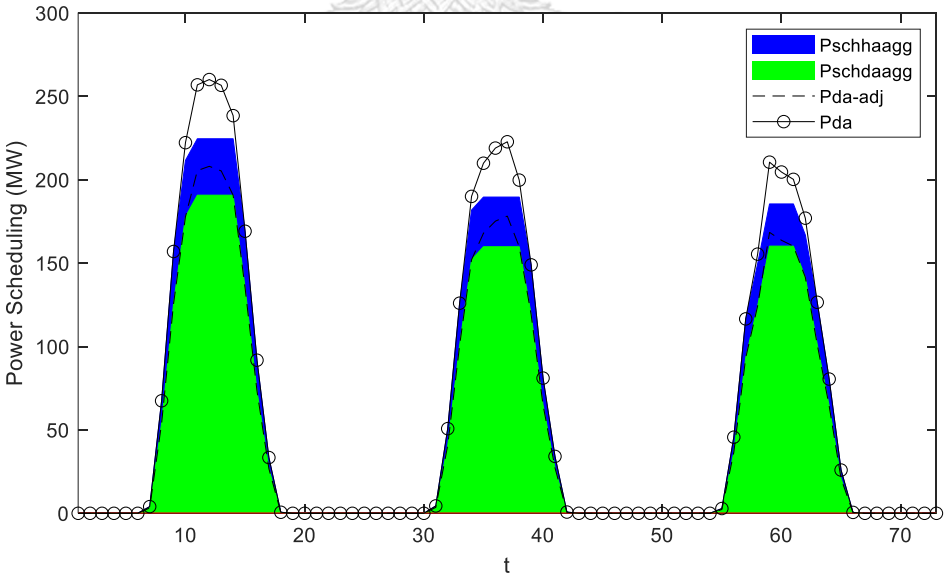
รูป 5-10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกำไรกับสัดส่วนราคาไฟฟ้าสมาชิก (α)

จากรูป 5-10 พบว่าจากสมมติฐานเมื่อกำหนดราคาไฟฟ้าสมาชิกเท่ากับ 10% 20% ... 100% ของราคาอ้างอิงตลาดส่งผลให้กำไรต่อวันลดลงเริ่มตั้งแต่ 740,668 658,371 575,425 491,358 408,065 319,484 228,306 118,108 297 และ 0 บาท ตามลำดับสะท้อนให้เห็นว่า

ตัวแบบการคำนวณมีความถูกต้องเมื่อปรับราคาที่สมาชิกได้รับ โดยผลลัพธ์คือกำไรมีค่าลดลงแบบคาดการณ์ได้จากกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนรวบรวม 6 โรงไฟฟ้าได้ผลกำหนดการเดินเครื่องดังรูป 5-11



a) กำหนดสัดส่วนราคาค่าไฟฟ้าของสมาชิก 50% ของราคาตลาด

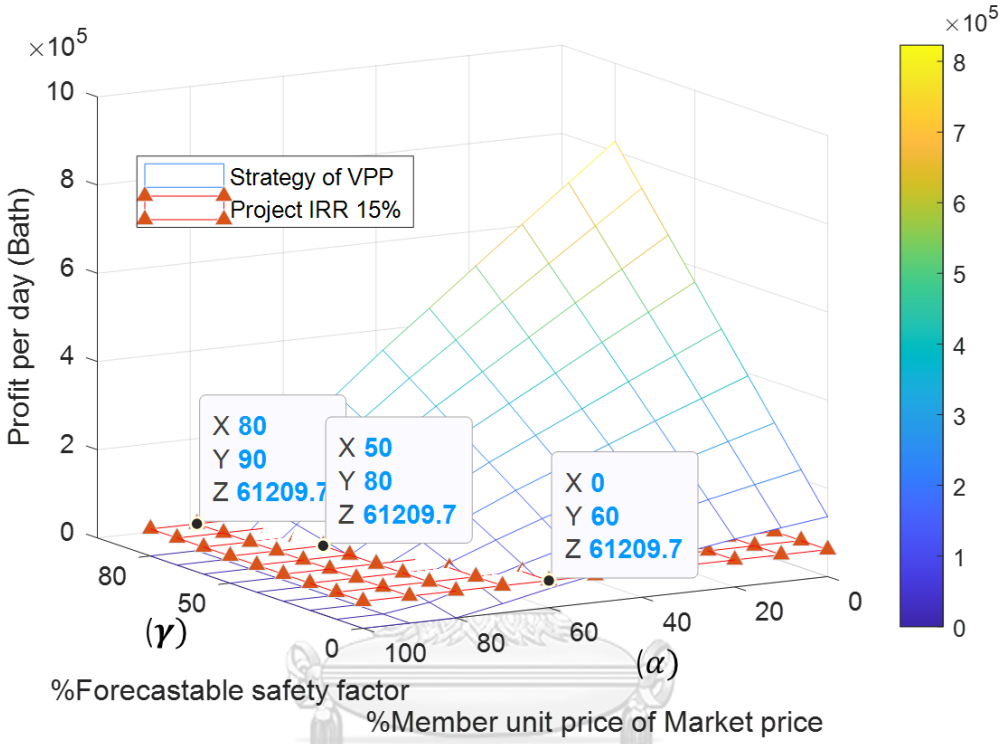


b) กำหนดสัดส่วนราคาค่าไฟฟ้าของสมาชิก 60% ของราคาตลาด

รูป 5-11 ผลกำหนดการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเสมือนต่อสัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิก

จากรูป 5-11 ผลิตภัณฑ์ของโรงไฟฟ้าเสมือนมีกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าลดลงทั้งผลิตภัณฑ์พลังงานและผลิตภัณฑ์กำลังการผลิตสำรองจากกำหนดสัดส่วนราคาค่าไฟฟ้าที่เสนอแก่สมาชิกสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาการกำหนดการเปรียบเทียบค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ (γ) ร่วมกับสัดส่วนราคาไฟฟ้าสมาชิก (α) โดยการวิเคราะห์ความไวดังรูป 5-12



รูป 5-12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกำไรกับสัดส่วนราคาไฟฟ้าสมาชิกและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์กำลังการผลิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูป 5-12 การทดลองการวิเคราะห์ความไวจากค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ (γ) มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้โรงไฟฟ้าเสมือนสามารถสร้างกำไรได้สูงขึ้น ทางกลับกันกำหนดสัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิก (α) สูงขึ้นทำให้ส่งผลให้กำไรลดลงเนื่องจากค่าใช้จ่ายสูงขึ้น และเมื่อเทียบกับเกณฑ์อัตราผลตอบแทนรายปีเฉลี่ยของตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทยเท่ากับ 15% (กราฟสามเหลี่ยมสีแดง) ของต้นทุนพลังงานที่สัดส่วนราคาไฟฟ้าสมาชิก 50% และค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ 80% เท่ากับ 61209.7 บาท สามารถดูข้อมูลเพิ่มเติมการวิเคราะห์ความไวของกำไรเพื่อสร้างกลยุทธ์ได้ดังตาราง 5-8

ตาราง 5-8 กำไร (บาทต่อวัน) ของโรงไฟฟ้าเสมือนผ่านกลยุทธ์การกำหนดค่า α และ γ

α\γ (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
0	135,955	221,831	307,708	393,584	479,460	565,336	651,212	737,088	822,964
10	122,360	199,648	276,937	354,225	431,514	508,802	586,091	663,379	740,668
20	108,764	177,465	246,166	314,867	383,568	452,269	520,969	589,670	658,371
30	91,918	152,356	212,794	273,233	333,671	394,109	454,548	514,986	575,425
40	78,787	130,358	181,929	233,501	285,072	336,644	388,215	439,787	491,358
50	62,816	105,972	149,128	192,284	235,440	278,596	321,753	364,909	408,065
60	42,897	77,471	112,044	146,617	181,190	215,764	250,337	284,910	319,484
70	20,584	46,549	72,515	98,480	124,445	150,410	176,375	202,341	228,306
80	138	14,884	29,630	44,377	59,123	73,869	88,616	103,362	118,108
90	-	37	74	111	149	186	223	260	297
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-

จากตาราง 5-8 แสดงผลลัพธ์การคำนวณการปรับเปลี่ยนค่า α และ γ เพื่อสะท้อนกำไรต่อวัน (บาทต่อวัน) ในตาราง สำหรับเป็นเครื่องมือให้ธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนใช้ตัดสินใจในการเสนอราคาไฟฟ้าสมาชิกเมื่อประเมินกำไรจากค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ ที่เกณฑ์ตัดสินใจผลตอบแทนรายปีเฉลี่ยของตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทยเท่ากับ 15% ของต้นทุนดังตาราง *5-9*

ตาราง 5-9 ตารางการกำหนดค่า $\boldsymbol{\alpha}$ ที่อัตราผลตอบแทน 15 %

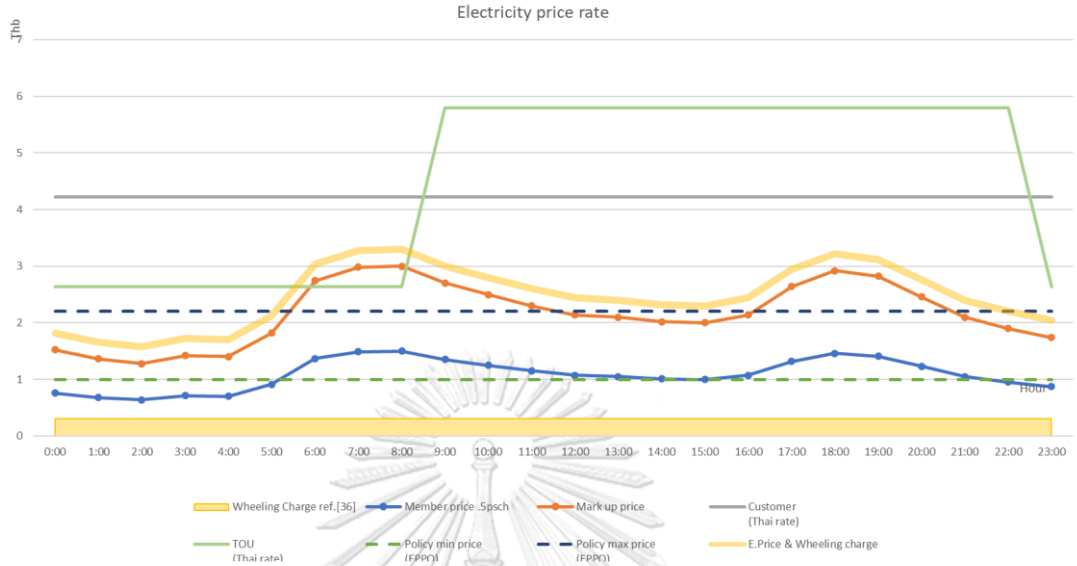
$\boldsymbol{\gamma}$ (%)	$\boldsymbol{\alpha}$ (%)
80	84.8
40	79.7
0	50.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตาราง *5-9* เมื่อค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์ลดลงส่งผลต้องกำหนดค่าราคาไฟฟ้าสมาชิกลดลงเพื่อรักษาผลตอบแทนเฉลี่ยที่เกณฑ์ตัดสินใจอัตราผลตอบแทนรายปีเฉลี่ยของตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทยเท่ากับ 15% ที่ $\boldsymbol{\gamma}$ เท่ากับ 80% 40% 0% ต้องกำหนด $\boldsymbol{\alpha}$ ได้ไม่เกิน 84.8 % 79.7% และ 50.8% ตามลำดับ

จากการทดลองทั้งการกำหนดกลยุทธ์เพื่อเสนอราคาไฟฟ้าแก่สมาชิกและประเมินการประยุกต์ใช้ค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์แสดงสถานะกำไรของธุรกิจ สามารถเปรียบเทียบกับนโยบายและอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยของตลาด นำไปสู่การประเมินค่าที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือนที่จะกำหนดให้สมาชิกได้ราคาที่ 50.8% ถึง 84.8% เท่าของราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้า ทำให้ธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนมีความเป็นเป็นได้ทั้งมุมมองธุรกิจและส่งมอบราคาที่เหมาะสมให้สมาชิกในช่วง

1 และ 2.2 บาทของประเทศไทย ดังรูป 5-13 อีกทั้งสามารถประเมินข้อมูลด้านการพยากรณ์กำลังการผลิตจากพลังงานหมุนเวียนสามารถได้



รูป 5-13 การเปรียบเทียบการกำหนดราคาไฟฟ้าของธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน

จากรูป 5-13 เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นราคาไฟฟ้าตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่นำมาอ้างอิงนั้นมีค่าในช่วง 1 และ 2.2 บาทของโครงการรับซื้อไฟฟ้าจากโซลาร์บนหลังคาของประเทศไทย

สรุปผลการทดลองกลยุทธ์การกำหนดราคาไฟฟ้าสมาชิกและการเปรียบเทียบค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์โดยการวิเคราะห์ความไว สามารถเสนอเครื่องมือสำหรับธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน เพื่อยื่นข้อเสนอราคาที่กำหนดให้แก่สมาชิกของโรงไฟฟ้าเสมือนและประเมินศักยภาพการดำเนินธุรกิจจากค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าเปรียบเทียบเทียบกับที่เกณฑ์ตัดสินใจผลตอบแทนรายปีเฉลี่ยของตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทยเท่ากับ ได้ แต่เพื่อพิจาณาผลตอบแทนตั้งแต่ 15% (61209.7 บาท) จึงกำหนดให้ค่า α เท่ากับ 50% (ครอบคลุมกำไร γ เท่ากับ 0) และ γ เท่ากับ 80% เพื่อใช้ในการทดลองที่ 3 ต่อไป

5.6 กลยุทธ์การเพิ่มกำไรจากฟังก์ชันการกักเก็บพลังงานเสมือน

เมื่อกำหนดโรงไฟฟ้าเสมือนที่รวบรวมกำลังการผลิตจาก 6 โรงไฟฟ้ากำหนดสัดส่วนราคาไฟฟ้าสมาชิกเท่ากับ 50% ของราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้าและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์เท่ากับ 80% แล้ว ทำการประเมินผลกำไรจากการกำหนดระบบกักเก็บพลังงานผ่านการวิเคราะห์ความไว

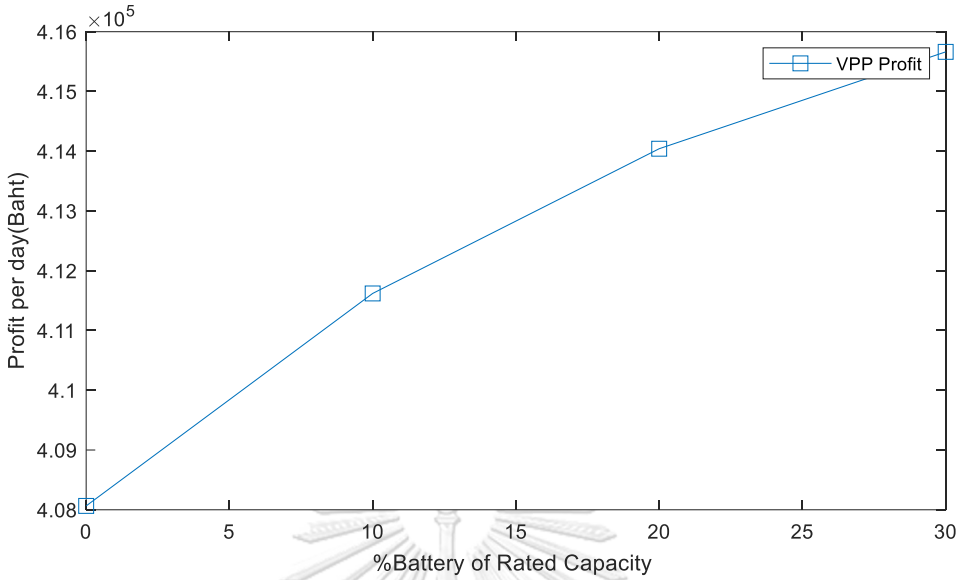
การวิเคราะห์ความไวของกำไรโดยกำหนดค่าพิกัดของระบบกักเก็บพลังงานเพื่อส่งเสริมการแลกเปลี่ยนพลังงานสำหรับการซื้อขายพลังงานล่วงหน้า 1 วัน มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้ วันที่ 10-12 มกราคม 2020 เป็นเวลา 3 วัน โดยออกแบบขนาดของแบบเตอรี่ที่รวบรวมตั้งแต่ 0-30% ของการรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้า คาบการคำนวณการหาค่าที่เหมาะสม 3 วัน ประเภทข้อมูลรายชั่วโมง ค่าปรับอัตราการเปลี่ยนแปลง 405 บาท-ชั่วโมงต่อเมกะวัตต์ กำหนดราคาสนับสนุนแบตเตอรี่แต่ละชั่วโมงเท่ากับค่า .01 ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานราคาช่วงทดลอง ได้ผลทดสอบกำไรจากการกำหนดพิกัดของระบบกักเก็บพลังงานดังตาราง 5-10 แสดงผ่านกราฟดังรูป 5-14 ผลการทดสอบของวันที่ 10-12 มกราคม การกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนไฟฟ้าที่รวบรวม 6 โรงไฟฟ้าได้ผลกำหนดการเดินเครื่องทั้งผลิตภัณฑ์พลังงานไฟฟ้าและกำลังผลิตสำรองดังรูป 5-15 และกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิกไม่มีระบบกักเก็บพลังงาน ดังรูป 5-16 ระบบกักเก็บพลังงาน 10% ดังรูป 5-17 ระบบกักเก็บพลังงาน 20% ดังรูป 5-18 ระบบกักเก็บพลังงาน 30% ดังรูป 5-19

ตาราง 5-10 ผลทดสอบกำไรจากการกำหนดค่าพิกัดของระบบกักเก็บพลังงาน

Virtual member battery-added	3 days profit (Baht)	Per day profit (Baht)	Improvement (%)
0%	1,189,473	408,065	-
10%	1,194,261	411,620	0.87
20%	1,198,862	414,041	1.46
30%	1,203,203	415,662	1.86

จากตาราง *5-10* เสนอผลกำไรสะสม 3วัน กำไรเฉลี่ยและการปรับปรุงแต่ละค่าการกำหนดขนาดของระบบกักเก็บพลังงานเสมือน (เทียบกับกรณีไม่มีแบตเตอรี่)

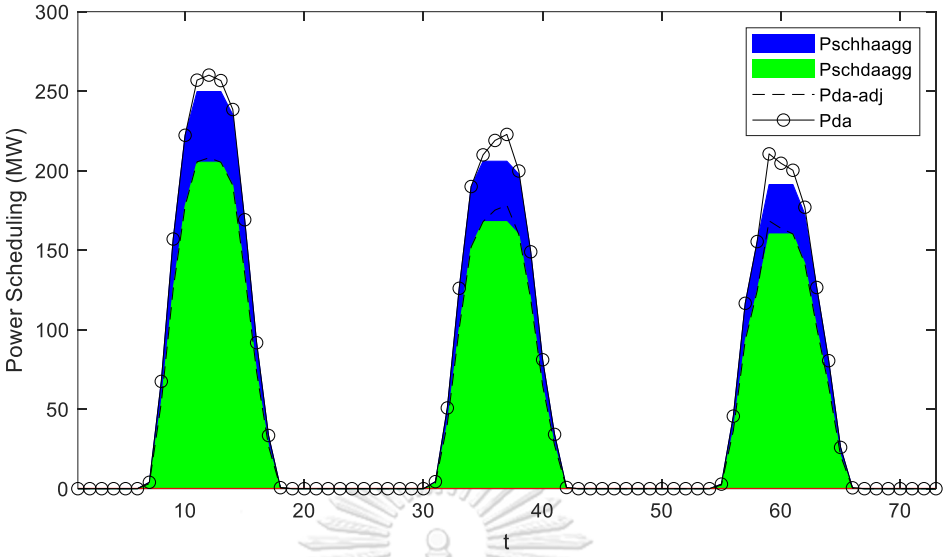
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



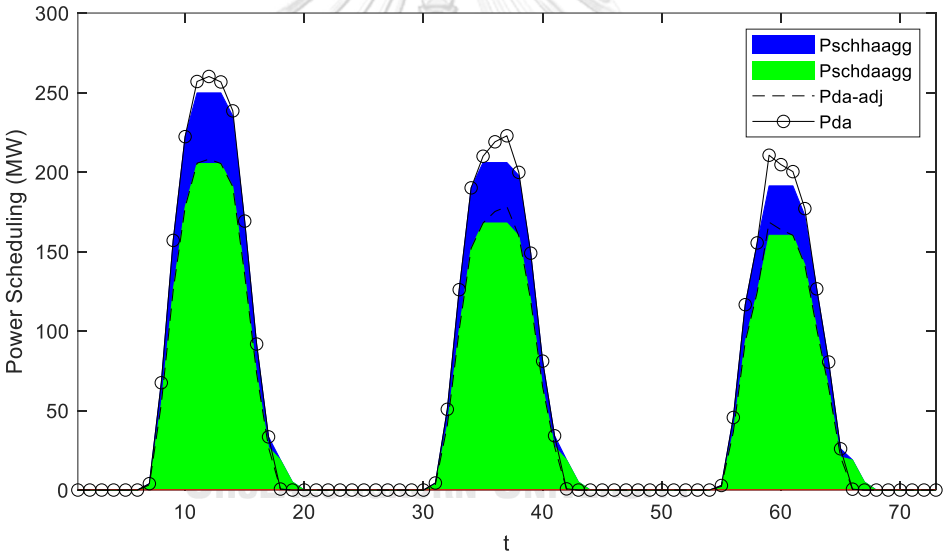
รูป 5-14 ผลทดสอบความไวของกำไรต่อค่าพิกัดของระบบกักเก็บพลังงาน

จากรูป 5-14 พบว่าจากสมมติฐานเมื่อกำหนดค่าพิกัดของระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสมของสมาชิกในโรงไฟฟ้าเสมือนเท่ากับ 0% 10% 20% 30% ของกำลังการผลิตไฟฟ้า ได้ผลกำไรต่อวันเท่ากับ 408,065 411,620 414,041 แล 415,662 บาทคิดการปรับปรุงเป็นอัตราร้อยละ 0 0.87 1.46 และ1.86 (เปรียบเทียบกับกรณีไม่มีแบตเตอรี่) จึงนำไปสู่การเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าเสมือนที่จะกำหนดให้ขนาดของแบตเตอรี่ตั้งแต่ 0.1-0.3 เท่าของกำลังการผลิตไฟฟ้าที่รวบรวมได้ ในเบื้องต้นได้

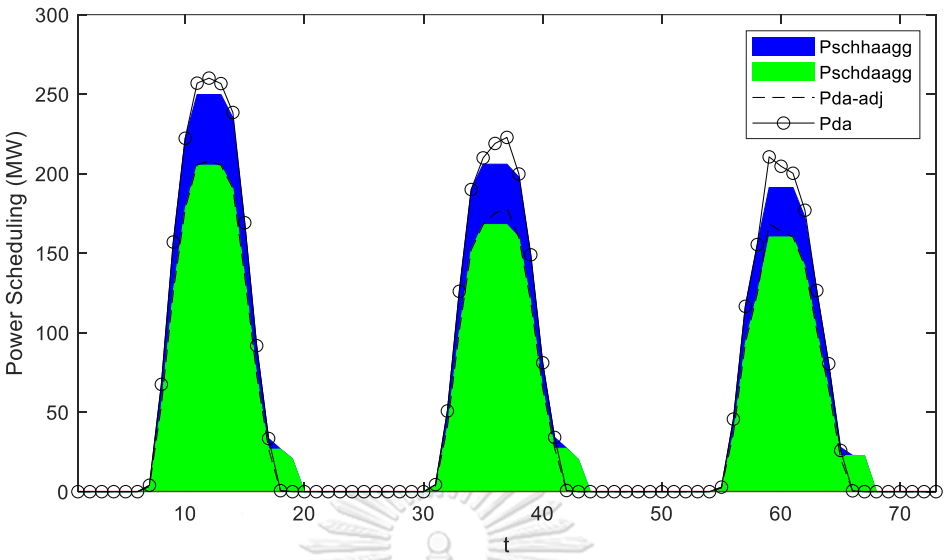
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



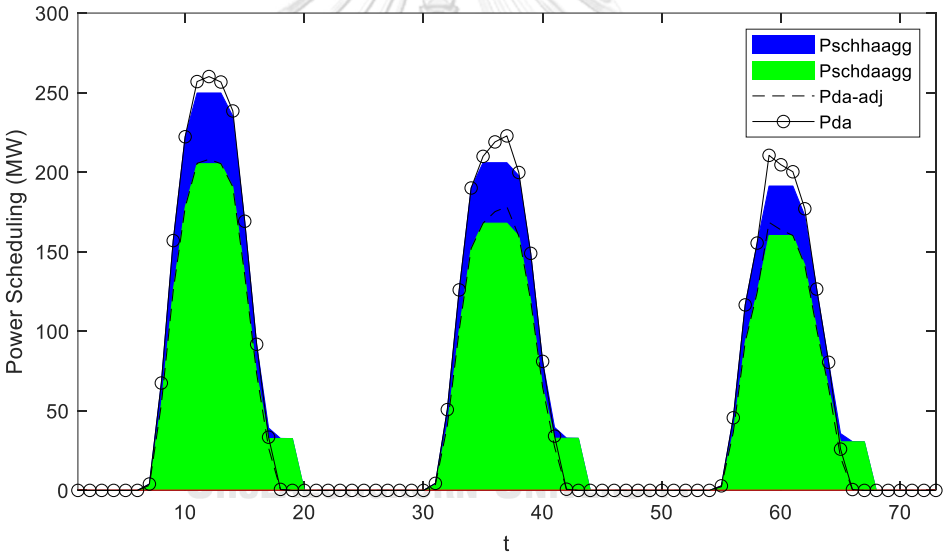
a) กำหนดขนาดแบตเตอรี่ 0% ของพิกัดกำลังการผลิต



b) กำหนดขนาดแบตเตอรี่ 10% ของพิกัดกำลังการผลิต



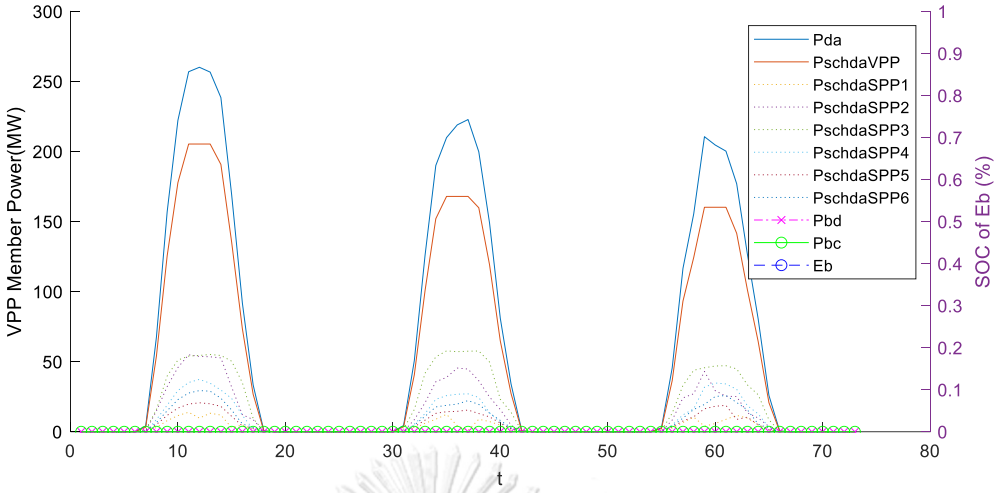
c) กำหนดขนาดแบตเตอรี่ 20% ของพิกัดกำลังการผลิต



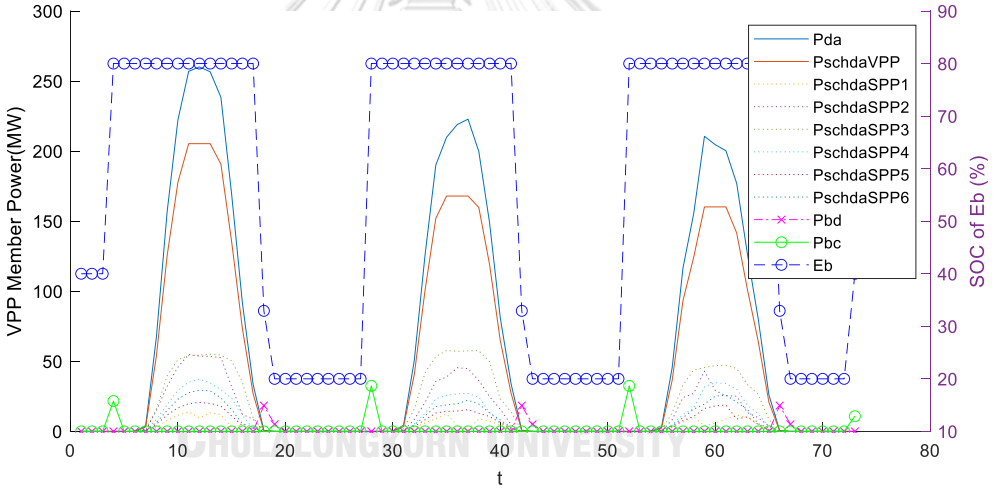
d) กำหนดขนาดแบตเตอรี่ 30% ของพิกัดกำลังการผลิต

รูป 5-15 ผลกำหนดการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าเสมือนจากฟังก์ชันการกักเก็บพลังงานเสมือน

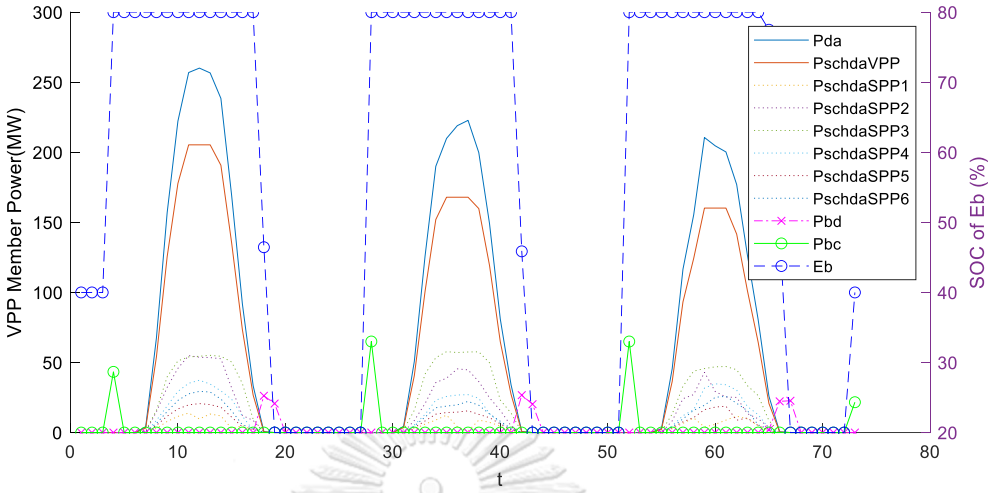
จากรูป 5-15 ผลิตภัณฑ์ของโรงไฟฟ้าเสมือนมีกำหนดการเดินเครื่องเพิ่มขึ้นสำหรับผลิตภัณฑ์พลังงาน (พื้นที่สีเขียว) เมื่อกำหนดขนาดแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นยืนยันผลกำไรที่เพิ่มขึ้น ได้จากกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนสมาชิกแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นช่วง 17.00-20.00 น.



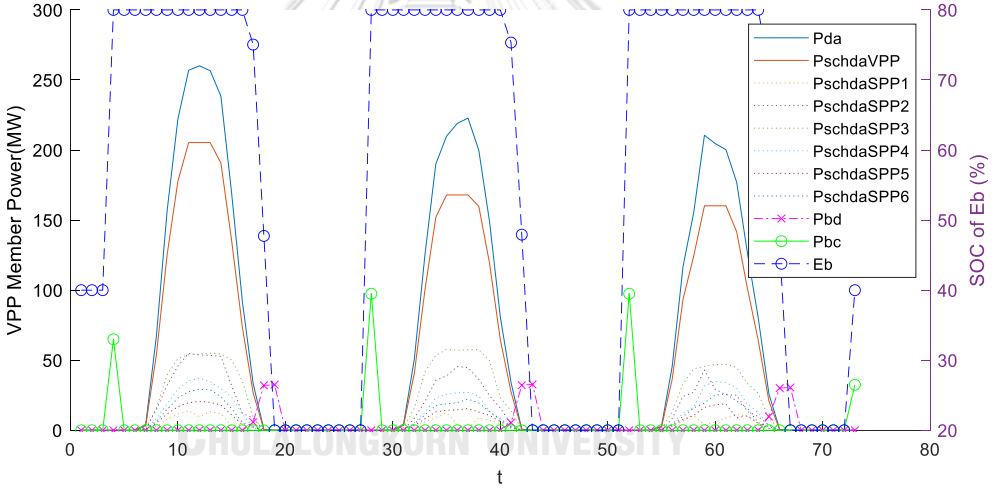
รูป 5-16 ผลการทดสอบกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก กรณีมีแบตเตอรี่ 0% ของพิกัดกำลังการผลิต



รูป 5-17 ผลการทดสอบกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก กรณีมีแบตเตอรี่ 10% ของพิกัดกำลังการผลิต



รูป 5-18 ผลการทดสอบกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก กรณีมีแบตเตอรี่ 20% ของพิกัดกำลังการผลิต



รูป 5-19 ผลการทดสอบกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนและสมาชิก กรณีมีแบตเตอรี่ 30% ของพิกัดกำลังการผลิต

จากผลการทดสอบดังรูป 5-17 ถึงรูป 5-19 สามารถกำหนดการเดินเครื่องของสมาชิกโรงไฟฟ้าเสมือนทั้ง 6 โรงไฟฟ้า ควบคู่กับการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ควบคู่ไปด้วย โดยเส้นกราฟ Eb แสดงถึงระดับพลังงานของแบตเตอรี่ในหน่วยเปอร์เซนต์ของขนาดของแบตเตอรี่ เส้นกราฟ Pbd แสดงกำหนดการการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ให้โครงข่ายไฟฟ้า และเส้นกราฟ Pbc แสดงกำหนดการรับกำลังไฟฟ้าจากโครงข่ายไฟฟ้า

สรุปผลการทดลองกลยุทธ์การเพิ่มกำไรจากการกำหนดระบบกักเก็บพลังงาน นำเสนอการรวบรวมกำลังการผลิตจากแบตเตอรี่เสมือน ซึ่งจะสามารถเพิ่มมูลค่าโดยการเพิ่มกำไรของธุรกิจ

โรงไฟฟ้าเสมือน จากการเก็งกำไรเพื่อแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าในตลาดซื้อขายพลังงานแบบล่วงหน้า 1 วันได้

5.7 การวิเคราะห์และอภิปรายผล

การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานคือเมื่อรวบรวมกำลังไฟฟ้าระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายทำให้กำลังการผลิตไฟฟ้ามีความผันแปรลดลง ส่งผลให้โรงไฟฟ้าเสมือนสามารถสร้างผลรายได้จากการผลิตไฟฟ้าให้เป็นไปตามรูปแบบกลไกตลาดซื้อขายไฟฟ้าทั้งการตลาดล่วงหน้า 1 วันและ ตลาดล่วงหน้า 1 ชั่วโมง ได้สูงขึ้นจากกำหนดการเดินเครื่อง โดยเปรียบเทียบผลรายได้ ผลรายได้ต่อกำลังการผลิต และสัมประสิทธิ์ความผันแปรของรายได้ ทั้งนี้ต้องดูดัชนีชี้วัดเชิงคุณภาพประกอบกันทั้ง 3 ด้าน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้และมีแนวโน้มดีขึ้นจากการรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้า

การเปรียบเทียบการสร้างกลยุทธ์การกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าจริงต้องพิจารณาการกำหนดต้นทุนของโรงไฟฟ้าแบบจริง (กรณีสมาชิกไม่เข้าร่วม VPP) เข้าใกล้ 0 (ไม่มีต้นทุนซื้อพลังงาน) เพื่อยืนยันและเปรียบเทียบรายได้ จากการแก้ปัญหาหาค่าที่เหมาะสมได้โดยกำหนดให้ราคาซื้อขายพลังงานแก่สมาชิกเท่ากับ 0.05 เท่าของราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้า ได้ผลลัพธ์แสดงการเปรียบเทียบการดำเนินงาน และผลลัพธ์ผลิตภัณฑ์ของโรงไฟฟ้าเสมือน ซึ่งการจำลองนี้สามารถกำหนดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเสมือนได้มีประสิทธิภาพด้านรายรับสูงกว่าแต่ลักษณะกำหนดการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าก็จะไม่เหมือนกับการกำหนดสัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิกเท่ากับ 0.5เท่าของราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้าที่นำมาอ้างอิง

งานวิจัยนี้ยังสามารถนำเสนอกลยุทธ์เพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือนเสนอการประเมินผลรายได้จากการกำหนดราคาไฟฟ้าให้แก่สมาชิกและความปลอดภัยของการพยากรณ์กำลังผลิตได้โดยการวิเคราะห์ความไว ซึ่งความปลอดภัยของการพยากรณ์กำลังไฟฟ้าอาจมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา อ้างอิง [41] ที่มีความเคลื่อนจากการพยากรณ์ตั้งแต่ 20% และลดลงจากดำเนินการวิจัยปรับปรุงวิธีการพยากรณ์

อีกทั้งการเพิ่มผลกำไรจากการกำหนดขนาดสมาชิกแบตเตอรี่ของโรงไฟฟ้าเสมือนเพื่อใช้ในการซื้อขายพลังงานรูปแบบเก็งกำไรสำหรับตลาดล่วงหน้า 1 วันเป็นการประเมินผลกำไรของธุรกิจเพื่อรวบรวมสมาชิกโรงไฟฟ้าเสมือนประเภทแบตเตอรี่ต่อไป

ในทางปฏิบัตินั้นเมื่อสร้างกำหนดการเดินเครื่องแล้วจะใช้การดำเนินการ เพื่อตกลงการเดินเครื่องสำหรับผลิตภัณฑ์พลังงานไฟฟ้าล่วงหน้าก่อนถึงเวลาส่งมอบ 24 ชั่วโมง และตกลงการเดินเครื่องสำหรับผลิตภัณฑ์กำลังผลิตสำรองก่อนเวลาส่งมอบตั้งแต่ 1 ชั่วโมงหรือมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่นความสามารถและความถี่ในการพยากรณ์กำลังไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์

การวิเคราะห์ผลกระทบของการหาคำตอบเมื่อปรับตัวแปรพารามิเตอร์ของข้อมูลอื่นๆ ได้แก่

1. สัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิก (α)

การกำหนดสัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิกเท่ากับ 0.5 เท่าของราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้าในการทดลองเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ หากปรับสัดส่วนราคาไฟฟ้าของสมาชิกเป็นค่าอื่นๆที่ขึ้นอยู่กับกลยุทธ์เช่นการทดลองในหัวข้อที่ 5.6 จะทำให้คุณลักษณะของพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากกำหนดการเดินเครื่องจะแตกต่างกันออกไปเช่นกัน ซึ่งทางปฏิบัติจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้การตัดสินใจร่วมกันระหว่างหน่วยงานในการกำหนดตัวแปรที่กระทบต่อการหากำหนดการเดินเครื่องที่ส่งผลต่อการเดินเครื่องที่เป็นมิตรต่อโครงข่ายไฟฟ้าอีกครั้ง

2. Ramp-rate cost (L)

การกำหนดค่าราคาอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิต (c_R) เท่ากับ 405 Baht-h/MW จะมีผลให้โรงไฟฟ้าเสมือนสร้างกำหนดการผลิตไฟฟ้าที่มีความชันของการผลิตไฟฟ้าลดลงจนเป็น 0 และ Ramp-rate ช่วงราบเรียบเป็นเวลานานขึ้น เมื่อมีค่าปรับจากการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตไฟฟ้าสูงกว่ารายได้จากการขายไฟฟ้าให้ตลาดซื้อขายไฟฟ้ามีทิศทางเดียวกับงานวิจัย [29] มีการนำเสนอราคาอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 819 Baht-h/MW

จากการกำหนดราคาอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์ทำให้กำหนดการเดินเครื่องเพื่อตอบสนองตลาดล่วงหน้า 1 ชั่วโมงยังคงช่วงเวลาราบเรียบจากตลาดล่วงหน้า 1 วัน ได้

3. Ramp-rate limit (R_{lim})

จะมีส่งผลบังคับให้โรงไฟฟ้าเสมือนสามารถสร้างกำหนดกำลังการผลิตชั่วโมงถัดไป ได้ไม่เกินค่าที่กำหนด ซึ่งได้ทดสอบตั้งแต่ 0.1 – 0.3 ของกำลังการผลิตไฟฟ้าต่อชั่วโมง โดยสอดคล้องกับข้อกำหนดความต้องการอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโครงข่ายไฟฟ้าเท่ากับ 10% ของพิกัดกำลังการผลิตต่อนาที [38] พบว่าผลกำไรที่เกิดขึ้นนั้นเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 0.3 สำหรับทุกกรณีที่ได้ทดสอบจึงกำหนดเป็นสมมติฐานในการทดลอง

4. การกำหนดค่าประสิทธิภาพการรับจ่ายของแบตเตอรี่ (η)

จะส่งผลกระทบต่อการเลือกรับและจ่ายพลังงานไฟฟ้า และจะเกิดการกำหนดการปฏิบัติการรับซื้อพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าของแบตเตอรี่เมื่อราคาไฟฟ้าถูก/จ่ายไฟฟ้าให้โครงข่ายไฟฟ้าช่วงเวลาค่าไฟฟ้าราคาสูงซึ่งงานวิจัย [29], [32-34] มีการกำหนดค่าประสิทธิภาพตั้งแต่ 80% ขึ้นไป

5. การอ้างอิงราคาของตลาด

การอ้างอิงราคาของตลาดซื้อขายไฟฟ้าล่วงหน้า1 วัน $(p_{fc,da})$ และราคาของตลาดกำลังผลิตสำรอง $(p_{fc,ha})$ (อ้างอิงที่มาของข้อมูล NYISO) ตลอดทั้งปีเฉลี่ยรวม 0.73 บาทต่อหน่วย

ต่างจากราคารับซื้อไฟฟ้าที่นโยบายกระตุ้นภาคประชาชนลงทุนโซลาร์หลังคาเท่ากับ 1.4 – 3.0 เท่า จึงกำหนดส่วนขยายราคาเท่ากับ 2 เท่าของราคาตลาดที่นำมาอ้างอิง เพื่อเปรียบเทียบเชิงนโยบายว่าสามารถทำให้โรงไฟฟ้าเสมือนสามารถเกิดขึ้นจริงเพราะค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดไม่เกินค่าไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าปัจจุบันได้รับและสมาชิกได้รับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ให้โรงไฟฟ้าเสมือนจัดการนั้นอยู่ระหว่างค่าไฟฟ้าตามนโยบายกระตุ้นภาคประชาชนลงทุนโซลาร์หลังคาของประเทศไทยอ้างอิงประกาศ [39]

6. การกำหนดค่าสนับสนุนแบตเตอรี่ (c_b)

งานวิจัยนี้การกำหนดค่าสนับสนุนแบตเตอรี่เท่ากับ 0.01 ของความเบี่ยงเบนมาตรฐานราคาไฟฟ้าเพื่อดึงดูดสมาชิกให้อยู่ในระบบโรงไฟฟ้าเสมือน สามารถทำให้แบตเตอรี่ทำงานตอบสนองต่อราคา และเมื่อกำหนดมากเกินรายได้จะทำให้การทดลองใช้ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ถึงค่าต่ำสุดของ SOC กำหนดและไม่มีการรับไฟฟ้าเข้ามาในระบบ เปรียบเทียบกับงานวิจัย [8] มีการกำหนดค่าความพร้อมจ่ายกำลังการผลิตสำรองในตลาดซื้อขายพลังงานล่วงหน้า 1 วันเช่นกัน

7. การรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้า

โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาศึกษาเมื่อผ่านปฏิบัติการรวบรวมกำลังผลิตจะมีความสม่ำเสมอของกำลังการผลิตไฟฟ้าหรือลดความผันแปรของกำลังไฟฟ้า ส่งผลให้สามารถกำหนดการเดินเครื่องได้มากขึ้น

8. ขอบเขตการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าของสมาชิกแบตเตอรี่

การสร้างสมการ การจ่ายกำลังการผลิตโรงไฟฟ้าพลังงานพลังงานแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ไม่เกินค่าค่าพยากรณ์และระดับกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ทำให้แบตเตอรี่ทำงานสอดคล้องกับพลังงานที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์ ไม่รับและจ่ายมากเกินสัญญาผลิตไฟฟ้า

9. การทำงานของแบตเตอรี่

เนื่องจากโมเดลที่ได้สร้างมาทดลองนั้นกำหนดจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของราคาไฟฟ้าตลาดพบว่าราคาสนับสนุนแบตเตอรี่เท่ากับ 0.6-1 บาทต่อ MW เพื่อให้สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้ ซึ่งปัจจุบันต้นทุนการลงทุนระบบกักเก็บพลังงานเพื่อการแลกเปลี่ยนพลังงานยังไม่เหมาะกับการลงทุนเทคโนโลยีแบตเตอรี่ของตนเอง ณ ปัจจุบัน แต่เป็นแนวทางการปฏิบัติให้มีกำลังผลิตแบตเตอรี่แบบเสมือน [16],[30] หรือ สนับสนุนแบตเตอรี่เสมือนแบบกระจายผ่านการโปรโมทให้ราคาสำหรับการเข้าร่วมปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเมื่อการจำลองสถานการณ์ราคาสนับสนุนแบตเตอรี่เสมือนมากกว่าราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้า การหาค่าที่เหมาะสมจะไม่พบการปฏิบัติการของระบบแบตเตอรี่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลประโยชน์จากการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย สามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

a) ประโยชน์ต่อธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน
   - เพิ่มผลรายได้ของการดำเนินธุรกิจผ่านการรวบรวมกำลังการผลิต
   - เพิ่มผลรายได้ต่อกำลังการผลิตที่รวบรวมของการดำเนินธุรกิจ
   - เพิ่มเสถียรภาพด้านรายได้จากการรวมรวมกำลังการผลิต
   - สร้างกลยุทธ์สำหรับกำหนดราคาไฟฟ้าสมาชิกและค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์
b) ประโยชน์ต่อสมาชิกของโรงไฟฟ้าเสมือน
   - เพิ่มโอกาสการขายในตลาดซื้อขายไฟฟ้าขายส่ง ได้
   - เพื่อเพิ่มโอกาสในการทำรายได้ให้สูงขึ้นและใช้ประโยชน์พลังงานไฟฟ้าส่วนเหลือ
   - เพิ่มทางเลือกการใช้งานจากพลังงานหมุนเวียนในตลาดซื้อขายไฟฟ้า
   - เพิ่มการปรับตัวของการใช้พลังงานหมุนเวียนอันเนื่องมาจากตลาดซื้อขายพลังงาน
c) ประโยชน์ต่อผู้ให้บริการโครงข่ายไฟฟ้า
   - ได้รับกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการจัดการความผันแปรของพลังงานหมุนเวียนผ่านโรงไฟฟ้าเสมือน
   - เพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนในโครงข่ายไฟฟ้า
   - ลดภาระการบริหารจัดการกำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานหมุนเวียน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 6
บทสรุป

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานการศึกษาเป็นไปตามสมมติฐาน โรงไฟฟ้าเสมือนสามารถสร้างผลกำไรจากการผลิตไฟฟ้าให้เป็นไปตามรูปแบบตลาดซื้อขายไฟฟ้าทั้งผลิตภัณฑ์พลังงานและผลิตภัณฑ์กำลังผลิตสำรอง โดยการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมยังคำนึงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าตามข้อกำหนดของผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้า ได้ผลลัพธ์การปฏิบัติการโรงไฟฟ้าเสมือนเพิ่มรายได้โดยรวมคิดเป็นอัตราร้อยละ 1.28 และสัมประสิทธ์ความผันแปรของรายได้ดีขึ้นโดยรวม 8.66% (เมื่อเทียบกับการจัดการแบบแยกรายโรงของกำลังผลิต 6 โรงไฟฟ้า)

คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์พลังงานไฟฟ้าและผลิตภัณฑ์กำลังผลิตสำรองนั้น ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าตัวแปรที่อยู่ในสมการการหาค่าที่เหมาะสมคือ ค่าราคาอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตจึงจำเป็นต้องมีการตกลงร่วมกันอีกครั้งระหว่างธุรกิจกับผู้กำกับดูแลทั้งโครงข่ายไฟฟ้าและตลาดซื้อขายไฟฟ้ารวมถึงธุรกิจกับธุรกิจ ให้มีเกณฑ์ที่เหมาะสมทำให้คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ตอบสนองการใช้งานและได้ประโยชน์ร่วมกันทุกฝ่าย

การจัดการรวบรวมกำลังการผลิตสามารถลดความผันแปรของกำลังไฟฟ้าแต่ละเวลา ทำให้สามารถสร้างสัญญาซื้อขายไฟฟ้าได้มากขึ้น และการจัดการความไม่แน่นอนกำลังการผลิตไฟฟ้าผ่านค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์กำลังการผลิต สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้แม่นยำและยังคงโอกาสในการใช้ประโยชน์จากพลังงานส่วนที่เหลือผ่านการสร้างซื้อขายสัญญาไฟฟ้ากำลังผลิตสำรองได้อีกครั้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติจริงในมุมมองการเสนอค่าพลังงานให้แก่สมาชิกให้มีความน่าสนใจสำหรับสมาชิกได้ และมุมมองความสามารถของการพยากรณ์กำลังไฟฟ้าโดยการกำหนดค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์สำหรับความเหมาะสมสำหรับธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน ทั้ง 2 มุมมองถูกนำเสนอในรูปแบบการวิเคราะห์ความไวของกำไร โดยการกำหนดราคาสมาชิกเท่ากับ 50% ของราคาตลาด และค่าความปลอดภัยของการพยากรณ์เท่ากับ 80% ทำให้ธุรกิจโรงไฟฟ้ามีกำไรเท่ากับ 408,065 บาท ซึ่งสมาชิกได้รับค่าไฟฟ้าในเกณฑ์โครงการรับซื้อไฟฟ้าจากโซลาร์บนหลังคา [39]

การเพิ่มผลกำไรจากการกำหนดขนาดแบตเตอรี่ของโรงไฟฟ้าเสมือนหรือการรวบรวมสมาชิกโรงไฟฟ้าเสมือนประเภทแบตเตอรี่มีศักยภาพในการดำเนินงานในอนาคตเพื่อตอบสนองผลิตภัณฑ์พลังงานถูกกำหนดในสมการหาค่าที่เหมาะ โดยการกำหนดขนาดแบตเตอรี่เท่ากับ 30% ของขนาดโรงไฟฟ้าเสมือนทำให้ธุรกิจโรงไฟฟ้ามีกำไรเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.86%

การตรวจสอบยืนยันการทดลองได้จากผลการทดลองตัวแบบวิธีการทดลองโรงไฟฟ้าเสมือน โดยการนำวิธีการจากการแก้สมการหาค่าความเหมาะสมคำนวณกับตัวอย่างแบบง่าย การนำวิธีการจากการแก้สมการหาค่าความเหมาะสมคำนวณย้อนกลับโดยคูณกับค่าตัวแปรจะได้ผลลัพธ์เท่ากับค่ากำไรที่เกิดขึ้น เมื่อจำลองสถานการณ์หาค่าความไวของกำไรจากการกำหนดค่ารายจ่ายต้นทุนสมาชิกตั้งแต่ 0 ถึง 100% ของราคาตลาดซื้อขายไฟฟ้าพบว่าทำให้ได้กำไรมากสุดถึงไม่เกิดกำไร และการหาค่าความไวจากการกำหนดขนาดแบตเตอรี่เท่ากับ 0 ตัวแบบจะไม่พบการปฏิบัติการของระบบแบตเตอรี่ที่ออกแบบ

นอกจากนี้ การจัดการรวบรวมกำลังการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปฏิบัติการแบบโรงไฟฟ้าเสมือนนั้น จะสามารถสร้างการเข้าถึงพลังงานสะอาดที่ตรงตามการใช้งาน มีการแข่งขันทางด้านราคา มีความน่าเชื่อถือ และใช้แนวคิดการจัดการจากหลากหลายเทคโนโลยีที่ทันสมัย ส่งผลให้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนตอบสนองต่อเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน อีกทั้งเป็นนโยบายส่งเสริมการลดก๊าซเรือนกระจก ลดภาระจากการใช้พลังงานฟอสซิลอีกด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

แนวทางการศึกษาที่ได้แสดงในส่วนนี้จะสามารถพัฒนาต่อยอดไปในอนาคตได้อีก โดยประเด็นที่อาจนำมาพิจารณาในการศึกษาในอนาคตประกอบด้วย การศึกษาการบริหารจัดการ ณ เวลาจริงเพื่อใช้ไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนตอบสนองต่อโหลด การจัดการโรงไฟฟ้าเสมือนด้านการตอบสนองด้านโหลดเพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้ามีส่วนร่วมในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการลดต้นทุนพลังงาน การคำนึงถึงวงจรไฟฟ้าปลายสายเพื่อลดการแออัดของระบบจำหน่ายและลดการสูญเสียพลังงานในสายส่ง การซื้อขายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเป็นบริการเสริมสำหรับธุรกิจโรงไฟฟ้าเสมือน การหากำหนดการราคาของสมาชิกที่แตกต่างกันเพื่อเพิ่มประสิทธิผลในการดำเนินธุรกิจ และการจัดการกำหนดการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าเสมือนที่ผนวกฟังก์ชันการกักเก็บพลังงานแบบเสมือนสำหรับเป้าหมายการใช้พลังงานหมุนเวียน 100% ของหน่วยงานผู้รับซื้อไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

[1] G. Zhang, C. Jiang, and X. Wang, "Comprehensive review on structure and operation of virtual power plant in electrical system," *IET Generation, Transmission & Distribution,* vol. 13, no. 2, pp. 145-156, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5880.

[2] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserve Markets—Part I: Problem Formulation," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 26, no. 2, pp. 949-956, 2011, doi: 10.1109/tpwrs.2010.2070884.

[3] Z. Ullah, G. Mokryani, F. Campean, and Y. F. Hu, "Comprehensive review of VPPs planning, operation and scheduling considering the uncertainties related to renewable energy sources," *IET Energy Systems Integration,* vol. 1, no. 3, pp. 147-157, 2019, doi: 10.1049/iet-esi.2018.0041.

[4] N. Etherden, V. Vyatkin, and M. H. J. Bollen, "Virtual Power Plant for Grid Services Using IEC 61850," *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* vol. 12, no. 1, pp. 437-447, 2016, doi: 10.1109/tii.2015.2414354.

[5] Z. Hu, "Refined Bidding and Operating Strategy for a Renewable Energy Generation and Energy Storage System Union," in *Energy Storage for Power System Planning and Operation*, 2020, pp. 81-115.

[6] F. Rahimi and A. Ipakchi, "Demand Response as a Market Resource Under the Smart Grid Paradigm," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 1, no. 1, pp. 82-88, 2010, doi: 10.1109/tsg.2010.2045906.

[7] H. Yang, D. Yi, J. Zhao, and Z. Dong, "Distributed Optimal Dispatch of Virtual Power Plant via Limited Communication," *IEEE Transactions on*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 3511-3512, 2013, doi: 10.1109/tpwrs.2013.2242702.

[8] W. Tang and H.-T. Yang, "Optimal Operation and Bidding Strategy of a Virtual Power Plant Integrated With Energy Storage Systems and Elasticity Demand Response," *IEEE Access,* vol. 7, pp. 79798-79809, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2922700.

[9] M. Rahimiyan and L. Baringo, "Strategic Bidding for a Virtual Power Plant in the Day-Ahead and Real-Time Markets: A Price-Taker Robust Optimization Approach," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 31, no. 4, pp. 2676-2687, 2016, doi: 10.1109/tpwrs.2015.2483781.

[10] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, and C. Ruiz, "Strategic Bidding for a Large Consumer," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 30, no. 2, pp. 848-856, 2015, doi: 10.1109/tpwrs.2014.2332540.

[11] S. Bahramara, M. Yazdani-Damavandi, J. Contreras, M. Shafie-Khah, and J. P. S. Catalao, "Modeling the Strategic Behavior of a Distribution Company in Wholesale Energy and Reserve Markets," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 9, no. 4, pp. 3857-3870, 2018, doi: 10.1109/tsg.2017.2768486.

[12] A. Safdarian, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Lehtonen, "A Stochastic Framework for Short-Term Operation of a Distribution Company," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 28, no. 4, pp. 4712-4721, 2013, doi: 10.1109/tpwrs.2013.2278076.

[13] K. Oikonomou, M. Parvania, and R. Khatami, "Deliverable Energy Flexibility Scheduling for Active Distribution Networks," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 11, no. 1, pp. 655-664, 2020, doi: 10.1109/tsg.2019.2927604.

[14] M. Gonzalez Vaya and G. Andersson, "Self Scheduling of Plug-In Electric

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Vehicle Aggregator to Provide Balancing Services for Wind Power," *IEEE Transactions on Sustainable Energy,* vol. 7, no. 2, pp. 886-899, 2016, doi: 10.1109/tste.2015.2498521.

[15] I. Momber, S. Wogrin, and T. Gomez San Roman, "Retail Pricing: A Bilevel Program for PEV Aggregator Decisions Using Indirect Load Control," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 31, no. 1, pp. 464-473, 2016, doi: 10.1109/tpwrs.2014.2379637.

[16] H. Nezamabadi and M. Setayesh Nazar, "Arbitrage strategy of virtual power plants in energy, spinning reserve and reactive power markets," *IET Generation, Transmission & Distribution,* vol. 10, no. 3, pp. 750-763, 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0402.

[17] T. Brijs, F. Geth, S. Siddiqui, B. F. Hobbs, and R. Belmans, "Price-based unit commitment electricity storage arbitrage with piecewise linear price-effects," *Journal of Energy Storage,* vol. 7, pp. 52-62, 2016, doi: 10.1016/j.est.2016.05.005.

[18] "Overview of European Electricity Market," Frontier Economics, February 2016. [Online]. Available: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1cff0934-adc1-11e9-9d01-01aa75ed71a1

[19] "Electricity market functions – short overview and description," the European Union, March 2020. [Online]. Available: https://energy-community.org/dam/jcr:ce2c5ded-112c-4a6b-9ddc-45a5de7cf5fc/Elearning_EL_market_032020.pdf

[20] "The European Power Exchange," The European Power Exchange. [Online]. Available: https://www.epexspot.com/

[21] "Energy Primer A Handbook for Energy Market Basics," Staff Report Federal Energy Regulatory Commission April 2020. [Online]. Available: https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-06/energy-primer-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2020.pdf

[22] "List of NEMOs," All NEMO Committee. [Online]. Available: http://www.nemo-committee.eu/nemo_committee#

[23] "Market Coupling," Next Kraftwerke GmbH. [Online]. Available: https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/market-coupling

[24] "AEMO Virtual Power Plant Demonstration," Australian Energy Market Operator Limited. [Online]. Available: https://arena.gov.au/assets/2020/03/aemo-virtual-power-plant-demonstration-knowledge-sharing-report-1.pdf

[25] "Market Access for Smaller Size Intelligent Electricity Generation," Intelligent Energy Europe. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects

[26] L. Chang, "Review on Distributed Energy Storage Systems for Utility Applications," *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications,* vol. 2, no. 4, pp. 267-276, 2017, doi: 10.24295/cpsstpea.2017.00025.

[27] "Grid Energy Storage," Thailand Development Research Institute, JUNE 2562. [Online]. Available: https://tdri.or.th/wp-content/uploads/2019/11/Grid-Energy-Storage.pdf

[28] V. A. Boicea, "Energy Storage Technologies: The Past and the Present," *Proceedings of the IEEE,* vol. 102, no. 11, pp. 1777-1794, 2014, doi: 10.1109/jproc.2014.2359545.

[29] S. Sarute, "Grid-friendly Dispatch Strategy of PV Generation System with Battery Energy Storage," Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Electrical Engineering, Chulalongkorn University, 2019.

[30] V. T. Nguyen and J. W. Shim, "Virtual Capacity of Hybrid Energy Storage Systems Using Adaptive State of Charge Range Control for Smoothing

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Renewable Intermittency," *IEEE Access,* vol. 8, pp. 126951-126964, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3008518.

[31] D. Zhang, J. Jiang, L. Zhang, and Z. Zhou, "Grid‐connected control strategy of modular multilevel converter–battery energy storage system based on VSG," *The Journal of Engineering,* vol. 2019, no. 16, pp. 1502-1505, 2018, doi: 10.1049/joe.2018.8515.

[32] E. Perez, H. Beltran, N. Aparicio, and P. Rodriguez, "Predictive Power Control for PV Plants With Energy Storage," *IEEE Transactions on Sustainable Energy,* vol. 4, no. 2, pp. 482-490, 2013, doi: 10.1109/tste.2012.2210255.

[33] D. N. T. How, M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, K. S. M. Sahari, P. J. Ker, and K. M. Muttaqi, "State-of-Charge Estimation of Li-Ion Battery in Electric Vehicles: A Deep Neural Network Approach," *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 56, no. 5, pp. 5565-5574, 2020, doi: 10.1109/tia.2020.3004294.

[34] D. Wu, F. Tang, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Autonomous Active Power Control for Islanded AC Microgrids With Photovoltaic Generation and Energy Storage System," *IEEE Transactions on Energy Conversion,* vol. 29, no. 4, pp. 882-892, 2014, doi: 10.1109/tec.2014.2358612.

[35] S. Babaei, C. Zhao, and L. Fan, "A Data-Driven Model of Virtual Power Plants in Day-Ahead Unit Commitment," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 34, no. 6, pp. 5125-5135, 2019, doi: 10.1109/tpwrs.2018.2890714.

[36] H. Zhao *et al.*, "Active Dynamic Aggregation Model for Distributed Integrated Energy System as Virtual Power Plant," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,* vol. 8, no. 5, pp. 831-840, 2020, doi:

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

10.35833/mpce.2020.000202.

[37] A. Baringo, L. Baringo, and J. M. Arroyo, "Day-Ahead Self-Scheduling of a Virtual Power Plant in Energy and Reserve Electricity Markets Under Uncertainty," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 34, no. 3, pp. 1881-1894, 2019, doi: 10.1109/tpwrs.2018.2883753.

[38] B. Cräciun, S. Spätaru, T. Kerekes, D. Séra, and R. Teodorescu, "Power ramp limitation and frequency support in large scale PVPPs without storage," in *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 16-21 June 2013 2013, pp. 2354-2359, doi: 10.1109/PVSC.2013.6744947.

[39] "กพช. อนุมัติเพิ่มราคาซื้อไฟฟ้าโซลาร์บนหลังคา 100 เมกะวัตต์ พร้อมขยายผลสู่สถานศึกษา โรงพยาบาล," Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy. [Online]. Available: http://www.eppo.go.th/epposite/index.php/th/ct-menu-item-1?option=com_k2&view=item&id=16437:news-251263

[40] S. Saksitdh, "Calculation of Clearing Price and Wheeling Charge for Day-ahead Peer to Peer Power," Electrical Engineering, Chulalongkorn University, 2019.

[41] X. Zhang, Y. Li, S. Lu, H. F. Hamann, B.-M. Hodge, and B. Lehman, "A Solar Time Based Analog Ensemble Method for Regional Solar Power Forecasting," *IEEE Transactions on Sustainable Energy,* vol. 10, no. 1, pp. 268-279, 2019, doi: 10.1109/tste.2018.2832634.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สิปปนันท์ บรรณาวิการ
วัน เดือน ปี เกิด	26 กรกฎาคม 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University