



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

วิธีการลดขนาดพิกัดระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้ร่วมกับ
ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

A Rating Reduction Technique for Battery Energy Storage System

Utilized with Photovoltaic Distributed Generations

نامผู้วิจัย

นายชัยวัฒน์ งามสมโส

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

วิธีการลดขนาดฟักัดระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้ร่วมกับ
ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

A Rating Reduction Technique for Battery Energy Storage System
Utilized with Photovoltaic Distributed Generations

โดย

นายชัยวัฒน์ งามสมโส

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชัยวัฒน์ งามสมโสศ 2557: วิธีการลดขนาดพิกัดระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้
ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ, Ph.D. 123 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการลดขนาดพิกัดระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้ร่วมกับระบบ
ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการแก้ไขปัญหาค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นการ
ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไปตามมาตรฐานการส่ง
จ่ายไฟฟ้า โดยปัญหาหลักของวิธีการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิมคือ การประวิงของค่าอ้างอิง
กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นที่แปรผันตรงกับความต้องการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าสุทธิส่งผลทำให้ระบบเก็บ
พลังงานด้วยแบตเตอรี่มีขนาดพิกัดที่สูงขึ้น จากผลการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ร่วมกับผลจากการ
ทดสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้นพบว่า วิธีการที่นำเสนอยังคงมีคุณสมบัติในการปรับเรียบกำลังไฟฟ้า
ที่ดีในขณะเดียวกันสามารถลดการประวิงของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าของวิธีการดั้งเดิมลงได้ โดยงาน
วิจัยนี้ได้ทำการประเมินขนาดพิกัดระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ออกแบบไว้เพื่อใช้ปรับปรุง
คุณภาพไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งจริงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน ผลการทดสอบพบว่า ด้วยวิธีการที่นำเสนอ
ร่วมกับเกณฑ์ด้านคุณภาพไฟฟ้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดทำให้สามารถกำหนดขนาดพิกัด
ของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุดได้ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ยืนยันความถูกต้อง
ของผลการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และผลจากการประเมินขนาดพิกัดระบบเก็บพลังงานด้วย
แบตเตอรี่ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงของระบบผลิตไฟฟ้าจาก
พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งกรณีการจ่ายไฟฟ้าแบบปกติและแบบแยกตัวอิสระ ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่า
วิธีการที่นำเสนอมีสภาพในการลดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้จริงโดย
ไม่ลดระดับของคุณภาพไฟฟ้าที่ผลิตได้

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Chaiwat Ngamsomsod 2014: A Rating Reduction Technique for Battery Energy Storage System Utilized with Photovoltaic Distributed Generations. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Siriroj Sirisukprasert, Ph.D.
123 pages.

This research proposes a rating reduction technique for battery energy storage system utilized in photovoltaic power generation for reduce voltage fluctuation, which can improve its quality and meet the related standards. The main concern of the previous power smoothing techniques is the delay shown in the reference power line, which is directly proportional to the required power smoothing level. This leads to the higher rating needed for the battery systems. The proposed technique has been tested by the simulation based on the real power generation profiles of photovoltaic power generation in provincial electricity authority area in Thailand. From the study and the simulation, the proposed technique can reduce the delay of the reference power line without scarifying the quality of generated power. The lowest capacity of the battery can then be achieved. In addition, this research further verifies the proposed technique with a real islanding case. The simulation results point out that the proposed technique can effectively minimize the required battery capacity with acceptable generated power quality level.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ท่านกรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางแก้ไขปัญหาค้นคว้าเป็นประโยชน์
ยิ่งสำหรับงานวิจัย ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์
มากยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตกับผู้วิจัยเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. คมสันต์ หงส์สมบัติ และ ดร. ประดิษฐ์ เพื่องฟู ที่ช่วย
ตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงอาจารย์ภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในด้าน
การศึกษาและดำเนินชีวิตต่อไป และขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ พนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทุกท่าน
ที่ให้คำปรึกษา และข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอขอบแต่ บิดา มารดา ที่อบรม
เลี้ยงดูผู้วิจัยอย่างดีเสมอมา รวมถึงครอบครัว งามสมโสด ทุกท่านที่เป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งในการ
ดำเนินชีวิตและการศึกษาจนสำเร็จด้วยดี

ชัยวัฒน์ งามสมโสด

กรกฎาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	44
ผลและวิจารณ์	69
ผล	69
วิจารณ์	92
สรุปและข้อเสนอแนะ	93
สรุป	93
ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ภาคผนวก	98
ภาคผนวก ก คำพารามิเตอร์ขององค์ประกอบในแบบจำลอง	99
ภาคผนวก ข โพรไฟล์กำลังไฟฟ้า	106
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	123

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ระดับเกณฑ์ด้านแรงดันไฟฟ้า	34
2	สถิติสาเหตุไฟฟ้าขัดข้องที่ อ.แม่สะเรียง	60
3	ระดับความสำคัญของผู้ใช้ไฟฟ้า ข้อมูลการจ่ายไฟและโหลด	62
4	แหล่งผลิตและระบบจำหน่ายในปัจจุบัน	62
5	ความต้องการพลังงานไฟฟ้าแต่ละวงจรของสถานีไฟฟ้าย่อยแม่สะเรียง	63
6	ผลการคำนวณขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่	75
7	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N=15)	76
8	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N=20)	76
9	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N=25)	77
10	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N=30)	77
11	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N=40)	77
12	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N=60)	78
13	แรงดันที่จุดเชื่อมต่อก่อนและหลังชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าและขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในสภาวะปกติ	84
14	แรงดันที่จุดเชื่อมต่อก่อนและหลังชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าและขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในสภาวะแยกตัวอิสระ	90
ตารางผนวกที่		
ข1	โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าสำหรับวัดประสิทธิภาพของวิธีการ	107
ข2	โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานวิธีการที่นำเสนอ	115

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย	10
2	เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์ที่ระดับต่าง ๆ	11
3	การเปรียบเทียบความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีที่ประเทศต่างๆ ได้รับ	11
4	ศักยภาพพลังงานความเข้มรังสีตรงของประเทศไทย	12
5	การแจกแจงของรังสีตรงตามพื้นที่	13
6	ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ	14
7	ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย	15
8	ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน	16
9	โครงสร้างของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด	18
10	โครงสร้างของแบตเตอรี่นิกเคิลแคดเมียมชนิดปิดทึบ	20
11	โครงสร้างแบตเตอรี่นิกเคิลแคดเมียมชนิดมีช่องลม	20
12	โครงสร้างของเซลล์ฟลูออโรโซเดียม	22
13	ชุดเก็บพลังงานโซเดียมเซลล์เฟอร์ขนาด 6 เมกกะวัตต์ 8 ชั่วโมง กรุงโตเกียว ญี่ปุ่น	24
14	ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	25
15	โครงสร้างแบตเตอรี่ชนิดไหลวานาเดียม-รีดอกซ์	27
16	โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดไหลโพลีซัลไฟด์-โบไมด์	28
17	โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดไหลซิงค์-โบไมด์	30
18	การบูรณาการระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงาน หมุนเวียน	32
19	การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE 1159 - 1995	37
20	การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEC 61000-2-8	37
21	การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน EN 50160-1999	38
22	การแบ่งขอบเขตการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน CBEMA	39
23	การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน ITIC	39
24	การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน SEMI	40
25	ความหมายของแรงดันต่ำเกินตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ความหมายของแรงดันต่ำเกิน ตามมาตรฐาน EN 50160-1999 และ IEC 61000	41
27	การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE 1159 – 1995	43
28	การเกิดแรงดันเกินแบบฉับพลัน ตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995	43
29	ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย	45
30	เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA	49
31	เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี EMA	49
32	ขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างจากวิธี SMA	50
33	ขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างจากวิธี EMA	50
34	การชดเชยการเลื่อนเฟสด้วยวิธี LES	53
35	โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ที่สถานีไฟฟ้าบางปะหัน	57
36	การเชื่อมต่อนระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบจำหน่ายของ กฟภ.	58
37	โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ที่สถานีไฟฟ้าย่อยแม่สะเรียง	58
38	ปัญหาแรงดันตกเนื่องจากการเชื่อมต่อโซลาร์ฟาร์ม	61
39	สถานะการจ่ายไฟปกติของสถานีไฟฟ้าย่อยแม่สะเรียง	64
40	การจ่ายไฟในสถานะแยกตัวอิสระของสถานีไฟฟ้าย่อยแม่สะเรียง	66
41	ขั้นตอนการหาเส้นอ้างอิงเพื่อประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่	68
42	ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES (N = 15) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	70
43	ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES (N = 20) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	70
44	ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES (N = 25) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
45 ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES (N = 30) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	71
46 ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES (N = 40) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	72
47 ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES (N = 60) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	72
48 กราฟขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่	73
49 กราฟพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่	74
50 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า	78
51 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของ กำลังไฟฟ้าโดยใช้เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 5)	79
52 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของ กำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 15)	80
53 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของ กำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 25)	80
54 ระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้า จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่	81
55 ผลของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ในช่วงเวลาหนึ่งวันสำหรับสถานะการจ่ายไฟปกติ	82
56 ผลของการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าสะสมของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ในช่วงเวลาหนึ่งวันสำหรับสถานะการจ่ายไฟปกติ	83
57 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของ กำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 40)	85
58 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของ กำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 45)	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
59	การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 50)	86
60	การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 55)	86
61	การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 60)	87
62	ระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่	88
63	ผลของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในช่วงเวลาหนึ่งวันสำหรับการจ่ายไฟในสถานะแยกตัวอิสระ	89
64	ผลของการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าสะสมของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในช่วงเวลาหนึ่งวันสำหรับการจ่ายไฟในสถานะแยกตัวอิสระ	89
65	โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ก่อนและหลังได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าสำหรับกรณีศึกษา	91
ภาพผนวกที่		
ก1	ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองระบบไฟฟ้าจากภายนอก	102
ก2	ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองระบบระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	103
ก3	ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวรักษาระดับแรงดันแบบอัตโนมัติชุดที่ 1	104
ก4	ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวรักษาระดับแรงดันแบบอัตโนมัติชุดที่ 2	105
ก5	ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุ	106
ก6	ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับสายส่งไฟฟ้า	106
ก7	ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับโหลด	107

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

กฟภ.	=	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
พพ.	=	กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
สพส.	=	สำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์
AEDP	=	แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan)
AVR	=	อุปกรณ์ปรับแรงดันอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator)
BESS	=	ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System)
DES	=	การปรับเรียบแบบเลขชี้กำลังสองครั้ง (Double Exponential Smoothing)
DoD	=	ความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge)
EMA	=	การหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบเลขชี้กำลัง (Exponential Moving Average)
ES	=	การปรับเรียบแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Smoothing)
ESS	=	ระบบเก็บพลังงาน (Energy Storage System)
FACT	=	อุปกรณ์ส่งผ่านระบบไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (Flexible AC Transmission System)
HPF	=	ตัวกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)
IEC	=	International Electrotechnical Commission
kW	=	กิโลวัตต์
kWh	=	กิโลวัตต์ชั่วโมง
KWh/m ² -yr	=	กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี
LPF	=	ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)
MA	=	การหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average)
MG	=	ระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Micro Grid)
MJ	=	เมกกะจูล
MJ/m ² -day	=	เมกกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน
MW	=	เมกกะวัตต์
PCC	=	จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling)
PEA	=	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Provincial Electricity Authority)
PSPC	=	หลักเกณฑ์การวางแผนระบบไฟฟ้า (Power System Planning Criteria)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SMA	=	การหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Average)
SMES	=	อุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage)
SMF	=	วิธีตามการเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Following)
STATCOM	=	อุปกรณ์ชดเชยประสาณสถิต (Static Synchronous Compensator)
UPS	=	แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง (Un-Interrupt Power Supply)
Wh/kg	=	วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม

**วิธีการลดขนาดพิกัดระบบเก็บพลังงาน
ด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์**

**A Rating Reduction Technique for Battery Energy Storage System
Utilized with Photovoltaic Distributed Generations**

คำนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ได้จากธรรมชาติ สะอาดและปราศจากการก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมมีปริมาณมากมายมหาศาลอยู่ทั่วทุกหนแห่งของโลก และสามารถนำมาใช้อย่างไม่หมดสิ้น จากความไม่แน่นอนของราคาจากพลังงานน้ำมันที่มีความผันผวนสูงและมีแนวโน้มของราคาที่สูงขึ้น รวมถึงวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงานที่จะเกิดขึ้นในอนาคตเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการพัฒนาของประเทศที่จำเป็นต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมัน และประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบจากปัญหานี้เป็นอย่างมาก ปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25 ปี เป้าหมายในระยะเวลา 10 ปี (AEDP 2012-2021) ของประเทศไทย โดยมีเป้าหมายในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สูงถึง 3,000 เมกะวัตต์ ซึ่งเทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งในด้านราคาและประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่า ความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าที่สูงขึ้นอยู่กับสภาพอากาศแต่ละช่วงเวลา เมื่อมีการเชื่อมต่อบริเวณผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลักทำให้ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ารวมถึงคุณภาพไฟฟ้าในการจ่ายไฟ (Quality of Supply Criteria) อีกด้วย

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เป็นหน่วยงานหนึ่งที่มีหน้าที่ให้บริการจำหน่ายไฟฟ้าแก่ประชาชนด้วยคุณภาพของไฟฟ้าที่ดีและเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด เนื่องจากความพร้อมในด้านโครงสร้างพื้นฐานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าครอบคลุมจำนวน 74 จังหวัดของประเทศไทย และยังเป็นช่องทางหลักที่รองรับการเชื่อมต่อและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งผลิตต่าง ๆ ดังนั้น กฟภ. จึงมีความจำเป็นต้องจัดเตรียมหาแนวทางเพื่อรองรับการเชื่อมตődังกล่าว เพื่อรักษาเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหลักให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

การพัฒนาวิธีการลดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานหมุนเวียนเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ปัจจุบันมีการนำระบบเก็บพลังงาน (Energy Storage Systems, ESS) เข้ามาช่วยลดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าง่ายๆ เพิ่มขึ้น เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าด้านความถี่และแรงดัน อีกทั้งยังใช้ลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าโดยการเก็บพลังงานไฟฟ้าในช่วงที่ความต้องการพลังงานไฟฟ้าน้อย (off-peak) ที่มีราคาไฟฟ้าต่ำเพื่อนำไปจ่ายในช่วงที่ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูง (on-peak) เป็นต้น แต่วิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของการเกิดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ดีคือ การใช้ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System, BESS) หากแต่การลดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าให้ได้กำลังไฟฟ้าคงที่ตลอดเวลาจำเป็นต้องใช้ระบบเก็บพลังงานที่มีพิกัดกำลังและความจุพลังงานไฟฟ้าสูง ซึ่งมีราคาแพงในปัจจุบัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาวิธีการสำหรับประเมินขนาดพิกัดที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บพลังงานด้วยเทคนิคการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าขึ้นด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Average, SMA) วิธีการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เลขชี้กำลัง (Exponential Moving Average, EMA) หรือการใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter, LPF) (Akatsuka, 2010; Sheikh, 2012) อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังคงให้ขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานที่สูงทำให้การลงทุนสูงตามไปด้วยเช่นกัน

ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหามาตรฐานพิกัดของระบบเก็บพลังงานสูงเกินความต้องการใช้งานจริง งานวิจัยนี้จึงถูกนำเสนอขึ้น เพื่อศึกษา และวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ให้ได้วิธีการที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อลดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้ขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานที่ลดลงอย่างเหมาะสมจากวิธีการที่ใช้งานในปัจจุบัน อีกทั้งยังคงคุณสมบัติที่ดีของวิธีการที่ใช้ในปัจจุบันไว้ได้

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาวิธีการลดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพด้วยเทคนิคการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า เพื่อนำขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานที่ประเมินได้ประกอบการประยุกต์ใช้งานลดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อรักษาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด โดยการพิจารณาขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานที่ประเมินได้จากวิธีที่นิยมใช้งานในปัจจุบันร่วมกับวิธีใหม่ที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้ โดยสามารถแยกตามวัตถุประสงค์หลักได้ดังนี้

1. วิเคราะห์ผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ. ในสภาวะคงตัว (Steady State Condition) เนื่องจากการเชื่อมต่อและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยอ้างอิงตามเกณฑ์ด้านคุณภาพในการจ่ายไฟ (Quality of Supply Criteria) ของ กฟภ.
2. ศึกษาวิธีประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้เทคนิคการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า
3. วิเคราะห์และกำหนดวิธีการที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับลดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ทุกระดับพิกัดติดตั้ง

การตรวจเอกสาร

การลดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้งานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยของนักวิจัยต่างๆ ถึงทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานของนักวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดขนาดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ผ่านมา ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความรู้เข้าใจเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า รวมถึงแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความไม่แน่นอนของกำลังการผลิตที่สูง โดยใช้ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มีขนาดที่เหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าที่ต้องการอย่างแท้จริง ดังนี้

Sadegh *et al.* (2012) ได้นำเสนอเทคนิคใหม่สำหรับปรับเรียบกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าแบบรวมจากพลังงานลมและแสงอาทิตย์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าวทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังที่รองรับการเชื่อมต่อมีคุณภาพไฟฟ้าลดลง โดยนำเสนอการพัฒนาเทคนิคควบคุมการทำงานของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ที่มีการบูรณาการร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบรวมจากพลังงานลม (Wind Farm) และแสงอาทิตย์ (PV Farm) แต่ปัจจุบันระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ยังมีราคาที่สูง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การลดขนาดของระบบเก็บพลังงานเพื่อลดค่าใช้จ่ายรวมสำหรับการปรับเรียบความผันผวนของกำลังไฟฟ้า แนวทางของวิธีการควบคุมใหม่นี้จึงนำเสนอการบูรณาการการทำงานร่วมกันระหว่างระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุ งานวิจัยนี้ได้แยกขั้นตอนการทำงานของวิธีการที่นำเสนอออกเป็น 2 ส่วนคือ ในส่วนแรกของตัวควบคุมมีความสามารถตอบสนองต่อการแยกความถี่ ย่านความถี่สามารถแยกโดยตัวกรองความถี่สูง (High Pass Filter, HPF) และความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter, LPF) ทำให้สามารถรักษาคุณภาพไฟฟ้าตามความต้องการของลูกค้าได้ ด้วยการพิจารณาให้มีการเก็บพลังงานในช่วงบวก และนำมาจ่ายกลับคืนในช่วงลบของแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงทำให้เป็นการประหยัดพลังงาน และใช้ขนาดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ไม่มาก รวมถึงมีการนำตัวเก็บประจุต่อขนานกับแบตเตอรี่ เพื่อรักษาระดับของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้คงที่จึงทำให้การลดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ทำได้มากขึ้น จากผลการทดสอบพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถปรับเรียบกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีทำให้กำลังไฟฟ้าสุทธิก่อนส่งจ่ายสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีคุณภาพดีขึ้น อีกทั้งยังเป็นการลดขนาดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้อย่างมาก และคุณภาพไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนแปลงภายใต้ความต้องการของลูกค้า แต่ถ้าสำหรับสถานการณ์ที่ต้องการคุณภาพไฟฟ้าต่ำลงขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถลดลงได้มาก

Watanabe *et al.* (2012) ได้นำเสนอวิธีการกำหนดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่มีการบูรณาการร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic System, PV System) เพื่อลดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ อันเนื่องมาจากการปกคลุมของเมฆ ซึ่งจากผลการศึกษพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถลดขนาดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่และสามารถยับยั้งความผันผวนที่เกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอระบบเก็บพลังงานแบบผสมผสานที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุ ระบบนี้สามารถลดพิกัดความจุของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่และความถี่ของรอบในการเก็บและคายประจุได้ โดยวิธีการกำหนดขนาดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่นำเสนอต้องใช้การสร้างค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจากข้อมูลการวัดจริง ซึ่งวิธีการที่นำเสนอ (Simple Moving Following, SMF) เพื่อสร้างค่าอ้างอิงเป็นการบูรณาการระหว่าง 2 วิธีการแบบดั้งเดิมที่ได้รับการนำไปใช้ในการยับยั้งความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์วิธีแรกคือ วิธีการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average Method, MA) และวิธีการติดตามจุดกึ่งกลางของการผันผวนของกำลังไฟฟ้า (Fluctuation Centered Following Method, FCF) ซึ่งการเก็บและคายประจุของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะตัดสินใจเพื่อที่จะชดเชยส่วนที่ขาดหรือเกินจากค่าเป้าหมายที่ใช้เป็นค่าอ้างอิง ซึ่งวิธี MA เป็นการสร้างค่าอ้างอิงโดยการหาค่าเฉลี่ยโดยมีการกำหนดกลุ่มของจำนวนข้อมูลที่ต้องการหาค่าเฉลี่ยเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งวิธีนี้จะคล้ายกับการใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter, LPF) ถ้าให้กลุ่มของข้อมูลในการหาค่าเฉลี่ยมากจะทำให้ได้ค่าอ้างอิงที่เรียบมีการเปลี่ยนแปลงน้อย แต่จะทำให้ต้องใช้ขนาดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับค่าอ้างอิงมีค่ามากขึ้น และวิธี FCF วิธีนี้เป็นการประมาณค่าอ้างอิงจากค่าเฉลี่ยระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในอดีต วิธี FCF สามารถลดขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าลงได้ เพราะค่าอ้างอิงได้จากจุดกึ่งกลางของความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะที่พิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าอย่างฉับพลัน ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอจึงได้มีการกำหนดให้ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าฉับพลันน้อยให้ใช้วิธี MA ในการสร้างข้อมูลอ้างอิง และในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าฉับพลันด้วยความถี่สูงจะใช้วิธี FCF สร้างข้อมูลอ้างอิงกำลังไฟฟ้าแทน ดังนั้นจึงทำให้สามารถควบคุมทั้งขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้า และขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในขณะที่ความ สามารถในการยับยั้งความผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงประสิทธิภาพที่ดีไว้ได้

Sheikh *et al.* (2012) ได้ทำการศึกษาประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) กับตัวแปลงผันพลังงานทำให้สามารถปรับเรียบกำลังไฟฟ้าและยังรักษาแรงดันที่จุดต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมให้อยู่ที่ระดับที่ต้องการ ด้วยความสามารถในการควบคุมทั้งกำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) พบว่าสำหรับการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของฟาร์มกังหันลม กำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่คงที่นั้นไม่ใช่ทางเลือกที่ดีเพราะต้องใช้ขนาดของระบบเก็บพลังงานที่มากเพื่อใช้ปรับเรียบกำลังไฟฟ้า การศึกษานี้จึงได้นำเสนอการเลือกวิธีการที่เหมาะสมสำหรับสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า โดยได้ทดสอบสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Average, SMA) วิธีหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบเลขชี้กำลัง (Exponential Moving Average, EMA) และการใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter, LPF) จากผลการศึกษาพบว่าการสร้างค่าอ้างอิงจากวิธี LPF มีความเหมาะสมกว่าวิธีอื่นๆ สำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิงของระบบผลิตร่วมกับผลของความจุที่ลดลงของ SMES ด้วยเทคนิคที่นำเสนอสามารถปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้านออกของฟาร์มกังหันลมให้เป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้ารวมกับการลดขนาดความจุของระบบเก็บพลังงานเพื่อลดความผันผวนของความถี่ นอกจากนี้ด้วยวิธีที่นำเสนอยังสามารถรักษาขนาดของแรงดันที่จุดต่อของฟาร์มกังหันลมให้มีค่าคงที่ จึงสรุปได้ว่าการเลือกค่าอ้างอิงที่สร้างจากกับเทคนิค LPF มีประสิทธิภาพมากเพื่อการปรับเรียบความผันผวนของกำลังไฟฟ้ารวมกับการลดขนาดความจุของระบบเก็บพลังงาน และสามารถเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังรวมถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานลมด้วย

Teleke *et al.* (2010) ได้นำเสนอกลยุทธ์การควบคุมการใช้งานที่เหมาะสมของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับฟาร์มกังหันลมขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถปรับเรียบความไม่ต่อเนื่องของกำลังไฟฟ้าจากฟาร์มกังหันลมได้ ทั้งนี้จากการขยายตัวที่เพิ่มขึ้นของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสามารถนำไปสู่ปัญหาต่างๆได้ รวมถึงผลการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในด้าน คุณภาพไฟฟ้าความเชื่อถือได้ การป้องกัน การผลิตส่งจ่ายและการควบคุม โดยวิธีที่นำเสนอได้พิจารณาแบบแผนการควบคุมป้อนกลับแบบดั้งเดิมที่มีการปรับปรุงใหม่ เพื่อที่จะนำข้อจำกัดในการทำงานของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เช่น ข้อจำกัดของสถานะของการชาร์จ อัตราการเก็บหรือคายประจุ และอายุการใช้งาน ซึ่งเป้าหมายของการควบคุมเป็นการมองว่าจัดหาระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อทำการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ฟาร์มกังหันลมสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในแบบรายชั่วโมงอยู่บนพื้นฐานการคาดการณ์ความเร็วลม ในส่วนของประสิทธิภาพของกลยุทธ์การควบคุมนี้ได้รับการทดสอบโดยการใช้ข้อมูลจริงของฟาร์มกังหันลม และยังรวมถึงการกำหนดขนาดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ต้องการสำหรับการประยุกต์ใช้งานในการศึกษานี้ ด้วยการ

มองว่ากำลังไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลมควรมีการควบคุมได้และการลาดเอียงของกำลังไฟฟ้าที่รวดเร็วของฟาร์มกังหันลมทั้งทางด้านบวกและด้านลบควรมีการจำกัด เพื่อที่จะทำให้เกิดการรวมกันของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนจำนวนมากกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ ด้วยเทคนิคการสร้างค่าอ้างอิงแบบรายชั่วโมงเพื่อกำหนดให้เป็นเป้าหมายในการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยประสานสถิต (Static Synchronous Compensator, STATCOM) ที่มีการควบคุมการทำงานของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่อย่างเหมาะสมทำให้ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สามารถปรับเรียบกำลังไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลมให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิที่มีความราบเรียบตามค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่ต้องการได้

Teleke *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาการบูรณาการระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือฟาร์มกังหันลม เพื่อทำให้แหล่งจ่ายพลังงานทดแทนที่ไม่ต่อเนื่องเหล่านี้สามารถส่งจ่ายพลังงานได้มากขึ้น โดยได้นำเสนอการพัฒนากลยุทธ์การควบคุมการใช้งานที่เหมาะสมของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากการพิจารณารูปแบบการควบคุมตามกฎพื้นฐาน ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาการกำหนดการควบคุมที่เหมาะสมจากการรวมกันของเงื่อนไขการทำงานของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เช่น ข้อจำกัดของสถานการณ์เก็บประจุ ข้อจำกัดในการเก็บหรือคายประจุในปัจจุบันและอายุการใช้งาน โดยเป้าหมายของการควบคุมเป็นการมีระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ไว้เพื่อการปรับเรียบกำลังไฟฟ้ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้แหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในแบบรายชั่วโมงที่ขึ้นอยู่กับภาระการดำเนินงานแสงอาทิตย์หรือลม ซึ่งประสิทธิผลของกลยุทธ์การควบคุมนี้ได้รับการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจริงของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และฟาร์มกังหันลม โดยการควบคุมตามกฎได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อกำหนดการอ้างอิงที่เป็นปัจจุบันสำหรับตัวแปลงผันพลังงาน (Power Converter) ซึ่งจะเก็บหรือคายประจุของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่อย่างสอดคล้องกัน ด้วยผลการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการควบคุมที่นำเสนอจากการใช้ 2 กรณีศึกษาที่แตกต่างกันคือ กรณีของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานร่วมกับระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่และอีกกรณีหนึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างฟาร์มกังหันลมกับระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ผลการทำงานของวิธีการควบคุมที่นำเสนอสำหรับฟาร์มกังหันลมมีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าอ้างอิงเพียง ± 0.09 เมกกะวัตต์ เท่านั้น ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ก่อนได้รับการชดเชยความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้าจาก 16 เปอร์เซนต์ ให้ลดลงเหลือเพียง 4 เปอร์เซนต์ เท่านั้น

John (1988) ได้กล่าวถึงผลการศึกษาการพยากรณ์ข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลานั้น ให้ทำการสมมุติว่าข้อมูลทั้งหมดมีส่วนประกอบ 4 ส่วนด้วยกันคือ คุณภาพ ความโน้มเอียง ฤดูกาล และสิ่งรบกวน ซึ่งสิ่งรบกวนนั้นจะเป็นส่วนของความผันผวนของข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และในส่วนของเทคนิคการปรับเรียบแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Smoothing, ES) มีตัวประกอบ ถ่วงน้ำหนัก (Smoothing Factor) ของข้อมูลทำให้มีความสามารถในการปรับผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลได้ (Slope) หรือกล่าวอีกอย่างได้ว่าเป็นการกรองสิ่งรบกวนออกจากข้อมูล ซึ่งวิธีการปรับเรียบเลขชี้กำลังสองครั้ง (Double Exponential Smoothing, DES) ก็มีความสามารถนี้เช่นกัน รวมถึงความสามารถที่เพิ่มขึ้นอีกประการหนึ่งของวิธี DES คือ การปรับการตอบสนองต่อ แนวโน้มการเปลี่ยนทิศทางของข้อมูล (Trend) ทำให้มีความยืดหยุ่นในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากขึ้น ซึ่งด้วยคุณสมบัติของตัวกรองความถี่นี้ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสร้างค่าอ้างอิง สำหรับลดความไม่ต่อเนื่องของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงาน หมุนเวียนที่มีการเชื่อมต่อในระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวแล้ว สำหรับในงานวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาถึง ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติ ที่มีความสะอาดปราศจากการก่อมลพิษต่อ สิ่งแวดล้อมมีปริมาณมากมายมหาศาลอยู่ทั่วทุกหนแห่งของโลก และสามารถนำมาใช้อย่างไม่หมด ลิ่น ดังนั้นหากมนุษย์สามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพก็จะเป็นหนทาง ในการแก้ไขสภาพความไม่แน่นอนของราคาจากพลังงานน้ำมัน ซึ่งนับวันจะมีแนวโน้มที่ราคาพุ่ง สูงขึ้นและมีความผันผวนสูง ส่งผลกระทบต่อการพัฒนาของประเทศที่จำเป็นต้องพึ่งพาการนำเข้า น้ำมัน และประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบจากปัญหานี้เป็นอย่างมาก

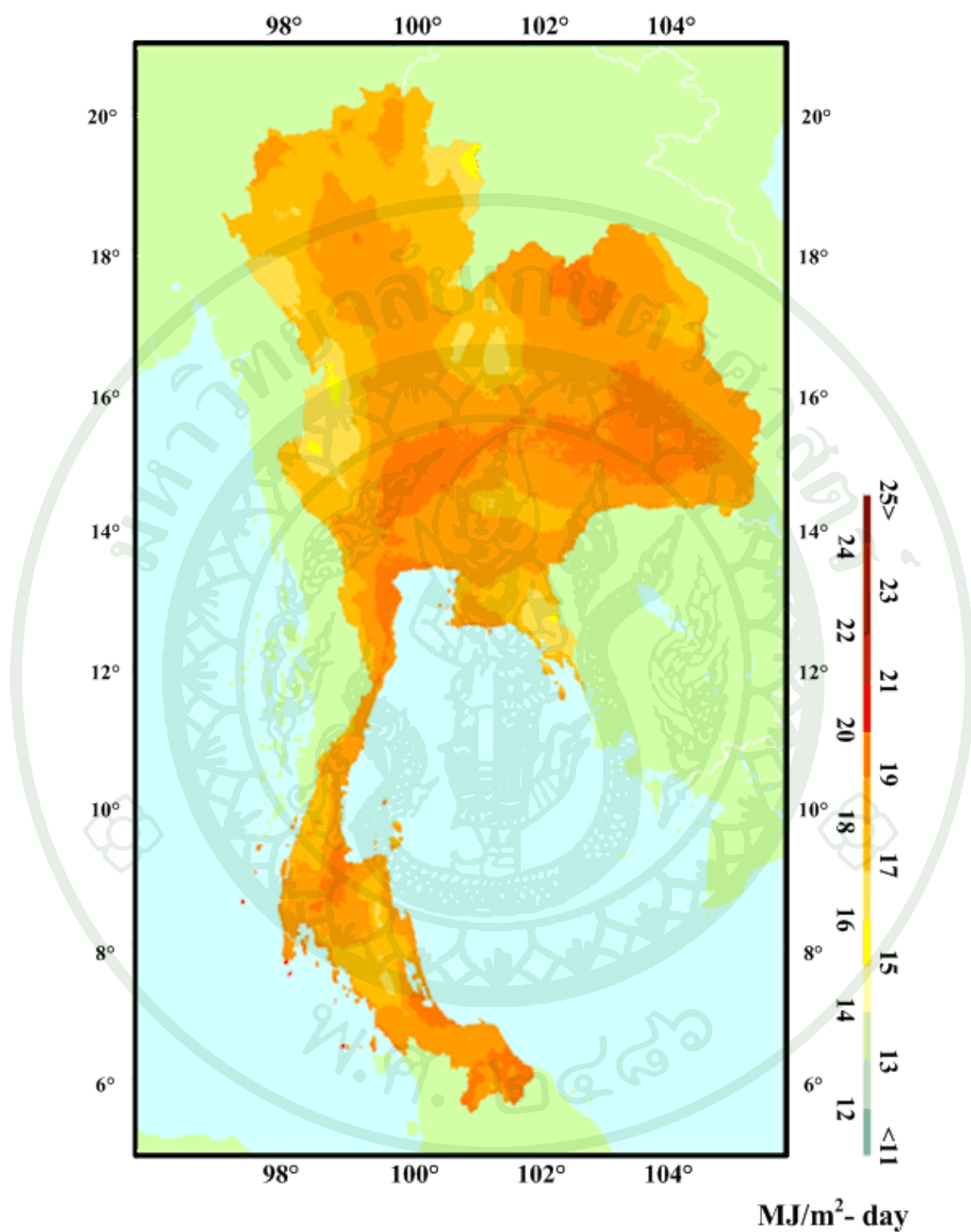
การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์อาจจำแนกเป็นผลที่ได้รับสองด้านหลักๆ คือ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งปัจจุบัน เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับหนึ่งมี สองชนิด คือ การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้า (Solar Cell) และการใช้ระบบรวมแสงอาทิตย์เพื่อ ผลิตไฟฟ้า (Concentrating Solar Power) สำหรับการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

เทคโนโลยีที่นำมาใช้ ได้แก่ การใช้แผงรับแสงอาทิตย์ (Solar Collector) ผลิตน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้ในการอุปโภค บริโภค ซึ่งปัจจุบันมีการใช้อย่างแพร่หลาย และอีกชนิดหนึ่งคือการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Drying) เพื่อทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทั้งผลิตภัณฑ์จากการเกษตรและอุตสาหกรรม เป็นต้น (กระทรวงพลังงาน, 2555)

1.1 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

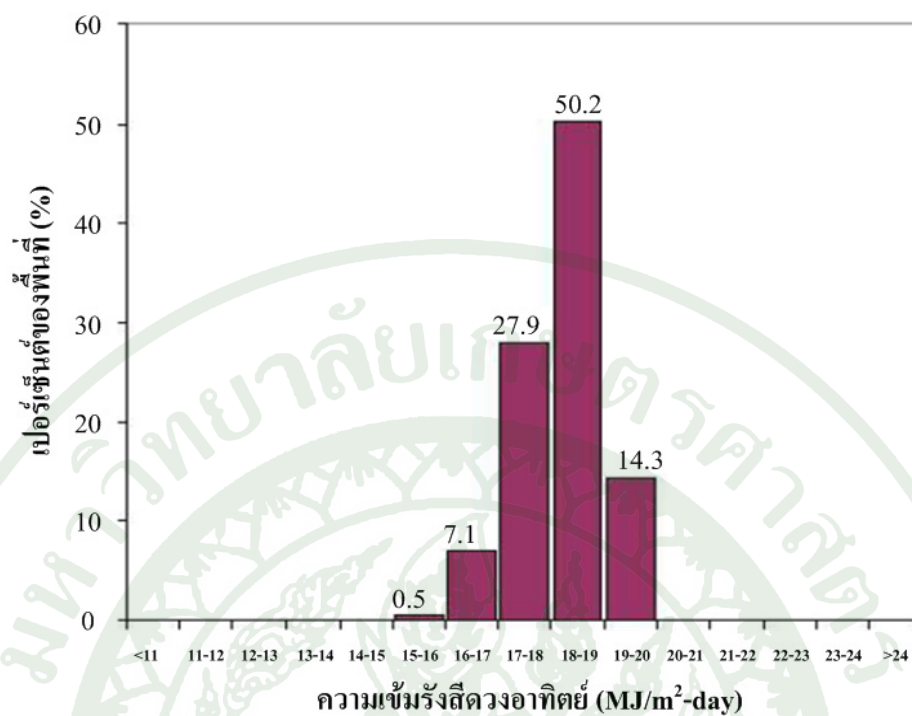
โดยทั่วไปศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูงหรือต่ำขึ้นกับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้น โดยบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากก็จะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้สูง สำหรับการนำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ต้องใช้อุปกรณ์รวมแสงจำเป็นต้องทราบศักยภาพรังสีของดวงอาทิตย์ด้วย ในกรณีของประเทศไทยศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในบริเวณต่าง ๆ โดยเฉลี่ยทั้งปีสามารถแสดงได้ด้วยแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ดังภาพที่ 1 จากภาพจะเห็นว่าบริเวณที่มีศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์สูงแผ่เป็นบริเวณกว้างทางตอนล่างของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และตอนบนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่จังหวัดอุดรธานี รวมทั้งบางส่วนของภาคกลางสำหรับส่วนที่เหลือจะมีศักยภาพลดหลั่นกันตามที่แสดงในแผนที่เมื่อทำการจำแนกเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ได้รับจะได้ผลดังภาพที่ 2

จากภาพที่ 2 จะเห็นว่า 14.3 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สูง คือได้รับรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีในช่วง $19-20 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ และที่ 50.0 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์ในช่วง $18-19 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ซึ่งถือว่ามีความเหมาะสมแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง ส่วนบริเวณที่มีศักยภาพค่อนข้างต่ำมี 0.5 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ทั้งหมด เมื่อทำการเฉลี่ยความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ทั่วประเทศจากทุกพื้นที่เป็นค่ารายวันเฉลี่ยต่อปีจะได้เท่ากับ $18.2 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ จากการนำค่าดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากประเทศอื่น ๆ ดังภาพที่ 3 จะเห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง



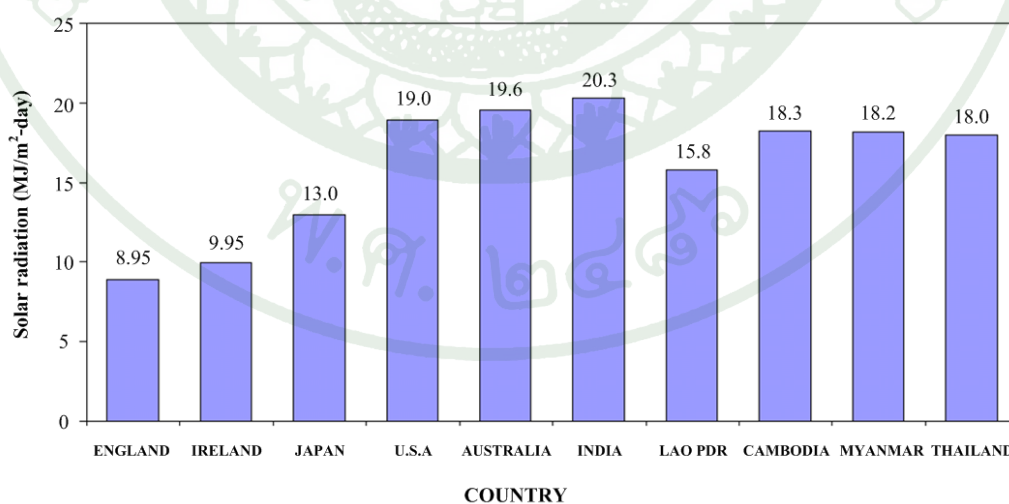
ภาพที่ 1 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันต่อปี)

ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2555)



ภาพที่ 2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์ที่ระดับต่าง ๆ

ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2555)



ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีที่ประเทศต่างๆ ได้รับ

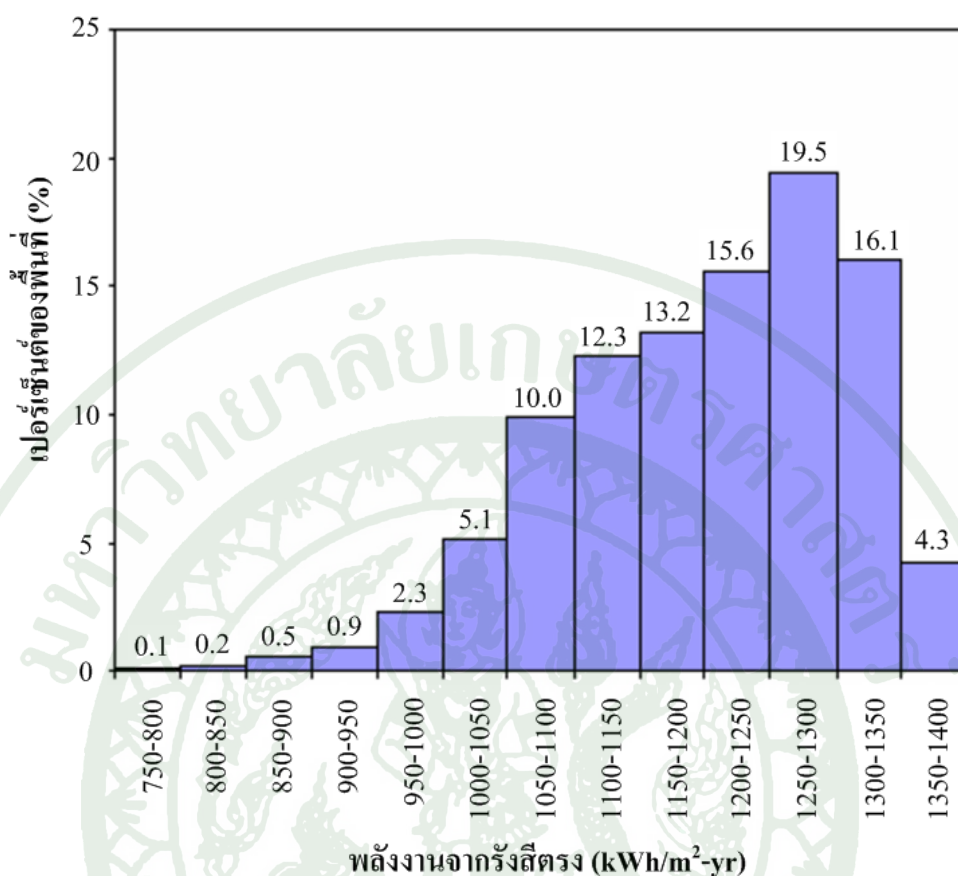
ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2555)

เมื่อพิจารณาพลังงานรังสีตรงที่ได้รับรวมทั้งปีดังภาพที่ 4 จะเห็นว่าบริเวณที่ได้รับรังสีตรงสูงสุดจะอยู่ในภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่างในพื้นที่บางส่วน โดยพื้นที่ดังกล่าวได้รับรังสีตรงต่อไปในช่วง 1,350-1,400 KWh/m²-yr จากการแจกแจงระดับของรังสีตรงในช่วงต่างๆ โดยหาว่ารังสีตรงในระดับนั้นๆ ครอบคลุมพื้นที่กี่เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมดดังภาพที่ 5 พบว่าการแจกแจงดังกล่าวมีลักษณะไม่สมมาตร โดยเบ้ไปทางค่ารังสีตรงที่มีค่ามากและบริเวณที่มีความเข้มรังสีตรงสูงสุด (1,350-1,400 KWh/m²-yr) ครอบคลุมพื้นที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ที่บางส่วนของภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง



ภาพที่ 4 สักยภาพพลังงานความเข้มรังสีตรงของประเทศไทย

ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2555)



ภาพที่ 5 การแจกแจงของรังสีตรงตามพื้นที่

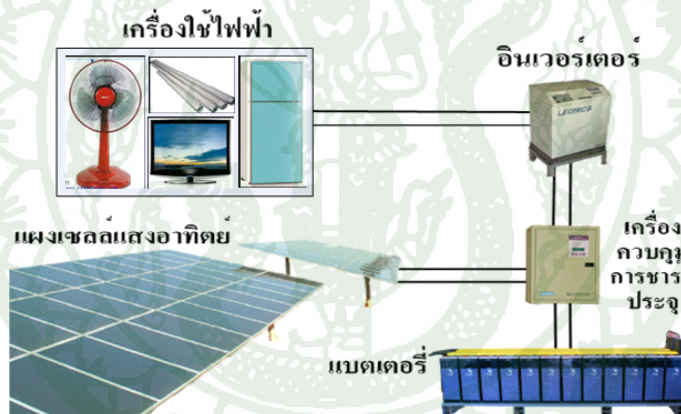
ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2555)

1.2 เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์

เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์จำแนกเป็น 2 รูปแบบ โดยคำนึงถึงประโยชน์ที่จะได้รับ คือ รูปแบบที่ 1 เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และรูปแบบที่ 2 เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน โดยในโครงการวิจัยนี้จะกล่าวถึงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เท่านั้น ซึ่งสามารถจำแนกเป็น 2 แบบคือเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์และเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าด้วยระบบรวมแสงอาทิตย์ ซึ่งเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 3 แบบคือ (กระทรวงพลังงาน, 2555)

1.2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

ระบบนี้ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งมีองค์ประกอบโดยรวมแสดงดังภาพที่ 6 โดยหลักการทำงานแบ่งได้เป็น 2 ช่วงเวลา กล่าวคือ ช่วงเวลากลางวันเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดพร้อมทั้งประจุพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินไว้ในแบตเตอรี่พร้อมๆ กันส่วนในช่วงกลางคืนเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้รับแสงแดดจึงไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ดังนั้นพลังงานจากแบตเตอรี่ที่เก็บไว้ในช่วงกลางวันจะถูกจ่ายให้แก่โหลดจึงสามารถกล่าวได้ว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลดได้ทั้งกลางวันและกลางคืน อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่แบตเตอรี่และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดแยกอิสระเป็นต้น



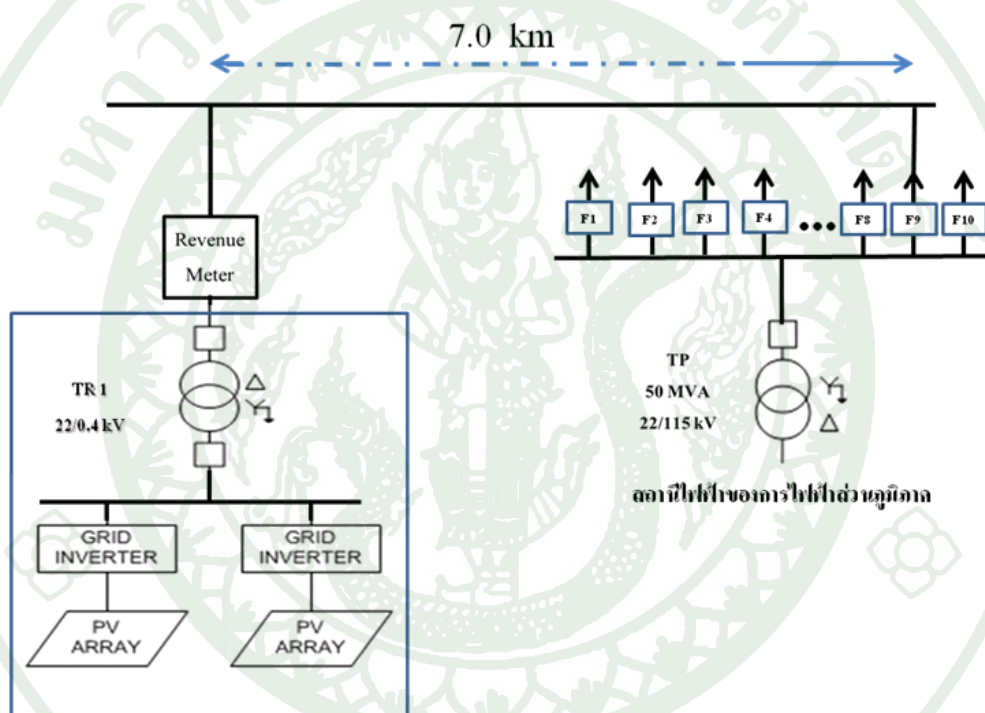
ภาพที่ 6 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2555)

1.2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนกระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยตรง มีหลักการทำงานแบ่งเป็น 2 ช่วง กล่าวคือ ในช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลดได้โดยตรง โดยผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และ

หากมีพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกจ่ายเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า สังเกตได้จากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนกลับทาง ส่วนในช่วงกลางคืนเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ กระแสไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะจ่ายให้แก่โหลดโดยตรง สังเกตได้จากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจะหมุนปกติ ดังนั้น ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายจะเป็นการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าในเขตเมืองหรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Grid Connected) เป็นต้น โดยมีรูปแบบการเชื่อมต่อพื้นฐานดังภาพที่ 7



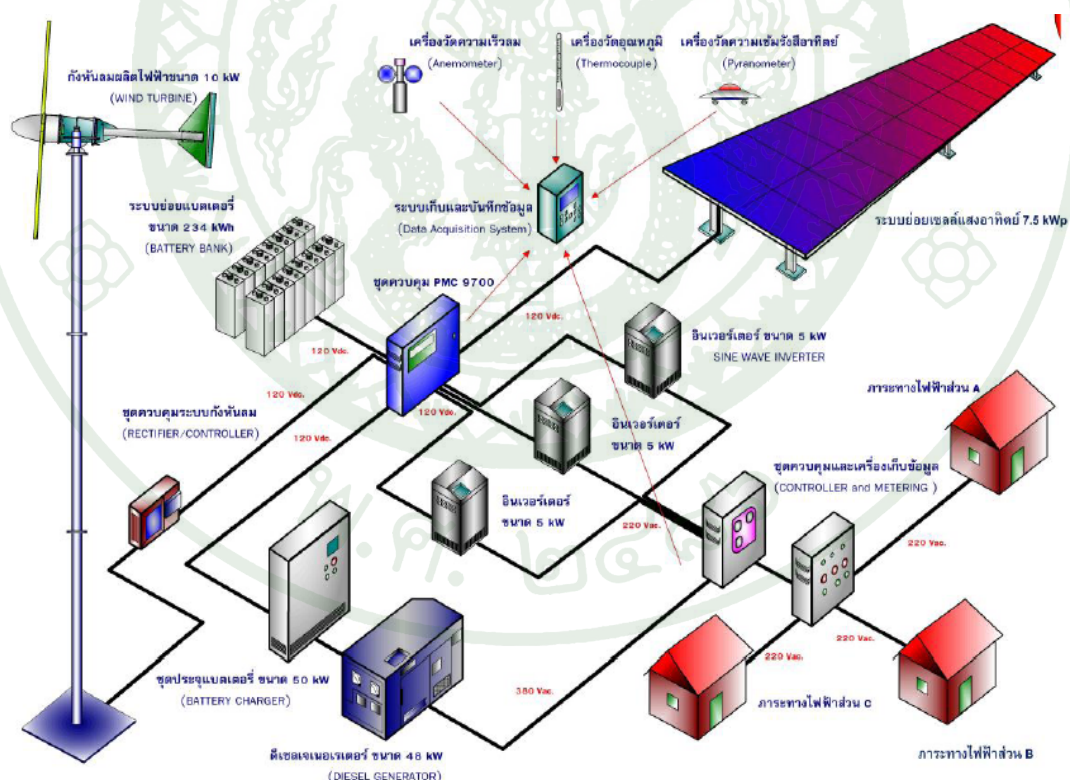
ภาพที่ 7 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย

ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [กฟภ.] (2555)

1.2.3 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบตาม

วัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและเครื่องยนต์ดีเซล มีหลักการทำงาน กล่าวคือ ในช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงแดดสามารถผลิตไฟฟ้าได้ จะจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดทำงานได้หลายฟังก์ชันทำงานร่วมกับไฟฟ้าจากพลังงานลมจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โหลดพร้อมทั้งทำงานประจุไฟฟ้าส่วนที่เกินไว้ในแบตเตอรี่ ในกรณีพลังงานลมต่ำไม่สามารถผลิตไฟฟ้าหรือในเวลากลางคืนไม่มีไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ชุดแบตเตอรี่จะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โหลด และกรณีแบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้ามากเกินไปจนถึงพิกัดที่ออกแบบไว้ เครื่องยนต์ดีเซลจะทำงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งเครื่องยนต์ดีเซลเป็นอุปกรณ์สำรองพลังงาน กล่าวคือ จะจ่ายกระแสไฟฟ้าประจุแบตเตอรี่โดยตรงและแบ่งจ่ายให้แก่โหลดพร้อมกัน และหากโหลดมีมากเกินไประบบจะหยุดทำงานทันที และจะทำงานใหม่อีกครั้งเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์หรือพลังงานลมสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าประจุแบตเตอรี่ได้ปริมาณตามพิกัดที่ออกแบบไว้พร้อมทั้งขนาดโหลดอยู่ในพิกัดที่ชุดแบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ ระบบโดยรวมแสดงได้ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

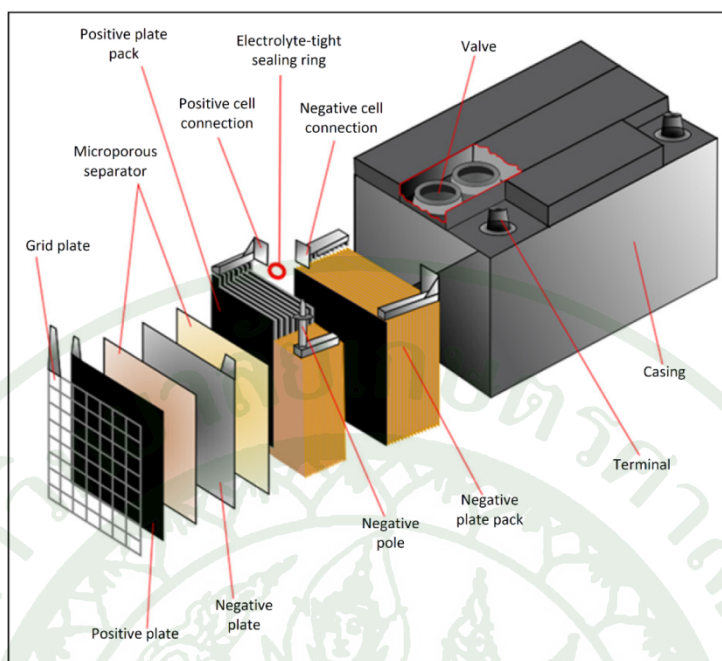
ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2555)

2. แหล่งเก็บพลังงานแบตเตอรี่

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การบูรณาการระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อปรับปรุงคุณภาพของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเฉพาะแหล่งเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ เท่านั้น โดยแหล่งเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ที่สำคัญ จะกล่าวถึง 4 ชนิด ที่ประกอบไปด้วย แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-Acid, LA) นิกเกิลแคดเมียม (NiCd) โซเดียมซัลเฟต (NaS) และลิเทียมไอออน (Li-Ion) ซึ่งการทำงานของแบตเตอรี่เหล่านี้เหมือนกับแบตเตอรี่ทั่วไปที่มีอิเล็กโทรดที่จมอยู่ในอิเล็กโทรไลต์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นทำให้มีกระแสไหลเวียนมีขนาดใหญ่

2.1 แบตเตอรี่ตะกั่วกรด

ในปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแหล่งเก็บพลังงานที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมากที่สุด เนื่องจากหลายปัจจัย อาทิเช่น เป็นเทคโนโลยีที่อ้อมตัวแล้ว เพราะได้มีการดำเนินการวิจัยมากกว่า 140 ปี มีราคาถูก อายุการใช้งานนาน ตอบสนองได้รวดเร็ว และมีอัตราการดิสชาร์จด้วยตัวเองน้อย เป็นต้น แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถประยุกต์ใช้กับการใช้งานระยะเวลายาว (ในช่วงเวลาวินาที) และระยะเวลายาว (สูงสุด 8 ชั่วโมง) แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Flooded Lead-Acid (FLA) และ Valve Regulated Lead-Acid (VRLA) แบตเตอรี่ FLA ทำด้วย 2 อิเล็กโทรดที่มีโครงสร้างโดยใช้แผ่นทองแดงที่อยู่ในสารที่มีส่วนผสมน้ำ 65 เปอร์เซ็นต์ และกรดซัลฟิวริก 35 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 9 ส่วนแบตเตอรี่ VRLA มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับ FLA เพียงแต่มีการปิดทึบที่มิวาล์วในการรักษาความดัน ซึ่งกำจัดอากาศที่ต้องเข้าไปรวมทั้งป้องกันการไหลออกของก๊าซไฮโดรเจน VRLA มีค่าบำรุงรักษาต่ำ น้ำหนักน้อยกว่าและใช้พื้นที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตามข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นค่อนข้างสูงและอายุใช้งานสั้นกว่า ทั้งกำลังไฟฟ้าและความจุพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอิเล็กโทรด กำลังไฟฟ้าสามารถเพิ่มได้โดยเพิ่มพื้นที่ของอิเล็กโทรดซึ่งหมายถึงเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดที่ขนาดบางมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ความจุพลังงานไฟฟ้าสามารถเพิ่มได้โดยเพิ่มน้ำหนักของแต่ละอิเล็กโทรดซึ่งหมายถึงลดจำนวนอิเล็กโทรดโดยที่มีขนาดที่หนาขึ้น แบตเตอรี่ตะกั่วกรดสามารถตอบสนองได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดภายในเวลา มิลลิวินาที โดยที่ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการแปลงผันไฟตรง (DC to DC) ของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดอยู่ที่ 75 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงการทำงานปกติ โดยมีอายุการใช้งานประมาณ 5 ปี หรือ 250-1,000 รอบของการชาร์จหรือดิสชาร์จขึ้นอยู่กับความลึกของการดิสชาร์จ (Baxter, 2006)



ภาพที่ 9 โครงสร้างของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด

ที่มา: University of Cambridge (2007)

การประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่ FLA ใช้งานหลักอยู่ 2 ประเภทคือ การสตาร์ทและการจุด-ชนวน ต้องการกำลังสูงในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น แบตเตอรี่ในรถยนต์และการใช้งานที่มีการดิสชาร์จมาก จ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยๆเป็นเวลานาน ซึ่งแบตเตอรี่ VRLA มักใช้สำหรับสำรองไฟ แหล่งจ่ายสำรองในระบบสื่อสารและสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าต่อเนื่อง (Un-Interrupt Power Supply, UPS)

ค่าใช้จ่าย ค่าใช้จ่ายสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดอยู่ที่ 200-300 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ และอาจจะอยู่ที่ 580 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ใช้

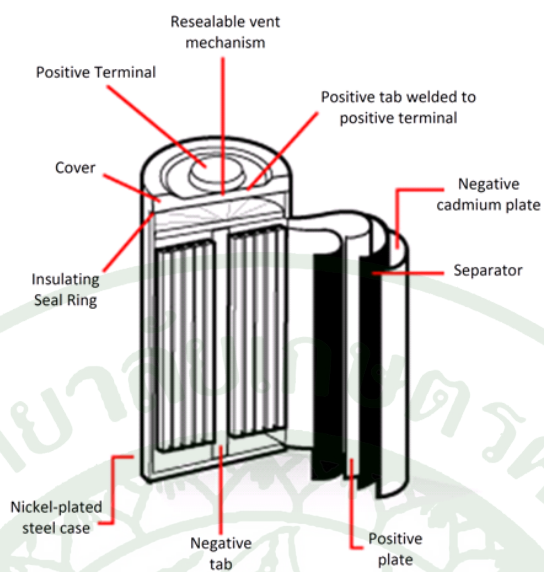
ข้อด้อย แบตเตอรี่ตะกั่วกรดค่อนข้างอ่อนไหวต่อสิ่งแวดล้อม โดยอุณหภูมิสำหรับแบตเตอรี่อยู่ที่ประมาณ 27 องศาเซลเซียส แต่ถ้ามมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่า 5 องศาเซลเซียส จะทำให้อายุการใช้งานลดลงมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งหากความลึกการดิสชาร์จมากเกินไปก็ทำให้อายุการใช้งานลดลงเช่นกัน นอกจากนั้นอัตราการชาร์ตต่อการดิสชาร์ตปกติจะอยู่ที่ 5 ต่อ 1 ซึ่งถ้าหากอัตราการชาร์ตเร็วเกินไปจะทำให้เซลล์เสียหายได้

อนาคต แบตเตอรี่ตะกั่วกรดมีราคาต่ำและเป็นเทคโนโลยีที่อึดตัวแล้ว ดังนั้นจะมีประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้งานในบางประเภท ซึ่งทางกลุ่มผู้ผลิตแบตเตอรี่ตะกั่วกรดได้พยายามพัฒนาเทคนิคที่ปรับปรุงความจุพลังงาน และลดเวลาในการชาร์จจากหลายชั่วโมงให้เหลือเพียงไม่กี่นาที อย่างไรก็ตาม ความต้องการอุปกรณ์เก็บพลังงานขนาดใหญ่ทำให้จำกัดอายุของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด ทำให้มีการดำเนินการวิจัยเพื่อไปสู่ด้านอุปกรณ์เก็บพลังงานขนาดใหญ่มากขึ้น ดังนั้น เป็นการยากที่แบตเตอรี่ตะกั่วกรดจะแข่งขันในการประยุกต์ใช้งานในการเก็บพลังงานขนาดใหญ่ระดับเมกะวัตต์

2.2 แบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (NiCd Battery)

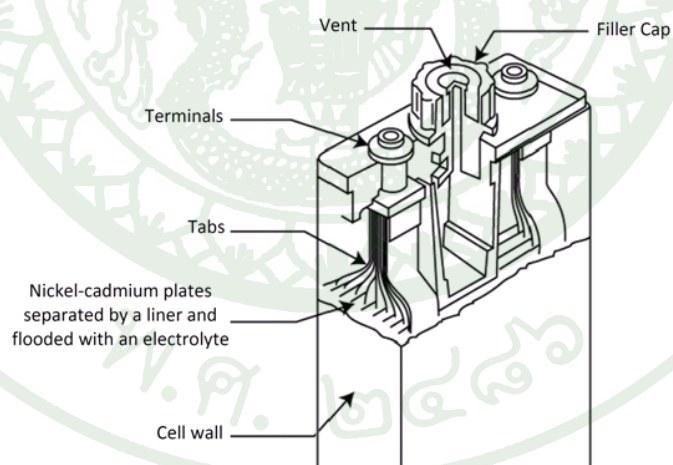
แบตเตอรี่ NiCd มีโครงสร้างโดยขั้วบวกด้วยนิกเกิลออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (Nickel Oxyhydroxide) และขั้วลบจากโลหะแคดเมียม โดยแยกจากกันด้วยในลอน โดยอิเล็กโทรไลต์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) ในระหว่างการดิสชาร์จ นิกเกิลออกไซด์ไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดเป็นนิกเกิลไฮดรอกไซด์ (Nickel Hydroxide) และไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide Ion) และจะเกิดแคดเมียมไฮดรอกไซด์ที่ขั้วลบ ในการชาร์จแบตเตอรี่ กระบวนการจะทำการกลับกัน อย่างไรก็ตามในช่วงการชาร์จออกซิเจนจะเกิดขึ้นที่ขั้วบวกและไฮโดรเจนจะเกิดที่ขั้วลบ ดังนั้นต้องมีช่องลมและเติมน้ำ แต่ปริมาณจะน้อยกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด

แบตเตอรี่ NiCd แยกเป็น 2 ชนิด คือแบบปิดทึบ ดังในภาพที่ 10 และแบบมีช่องลม ดังในภาพที่ 11 แบตเตอรี่ NiCd แบบปิดทึบจะพบเห็นมากกว่าเช่น แบตเตอรี่แบบชาร์ตได้ที่ใช้สำหรับอุปกรณ์รีโมท เป็นต้น ซึ่งจะไม่มีการปล่อยแก๊สออกจากแบตเตอรี่ชนิดนี้ นอกจากมีความผิดปกติเกิดขึ้น แบตเตอรี่ NiCd แบบมีช่องลมมีหลักการทำงานเช่นเดียวกันกับแบบปิดผนึก แต่จะมีแก๊สถูกปล่อยออกมาถ้าเกิดการชาร์จเกินหรือ การดิสชาร์จเร็วเกินไป โดยมีแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจนปล่อยออกมาจากช่องวาล์วความดันต่ำทำให้ปลอดภัยขึ้น และมีราคาต่ำกว่า รวมทั้งคงทนมากกว่าแบบปิดทึบ ซึ่งในการทำงานปกติ ประสิทธิภาพการแปลงผันไฟตรง (DC to DC) ของแบตเตอรี่ NiCd อยู่ที่ 60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ อายุการใช้งานอยู่ที่ 10 ถึง 15 ปี ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน แบตเตอรี่ NiCd ที่ใช้แบบ Pocket-Plate จะมีอายุใช้งาน 1,000 รอบของการชาร์จหรือดิสชาร์จ ถ้าใช้แบบ Sintered Electrodes จะมีอายุการใช้งาน 3,500 รอบ การตอบสนองที่กำลังเต็มที่ภายในเวลาไม่กี่วินาที ที่ความถี่ของการดิสชาร์จที่ต่ำประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ แบตเตอรี่ NiCd จะมีอายุใช้งานนานกว่าประมาณ 50,000 รอบ และสามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรดโดยสามารถทำงานได้สูงถึง 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 10 โครงสร้างของแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมชนิดปิดทึบ

ที่มา: กฟผ. (2556)



ภาพที่ 11 โครงสร้างแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมชนิดมีช่องลม

ที่มา: กฟผ. (2556)

การประยุกต์ใช้งาน แบตเตอรี่ NiCd ชนิดปิดที่พบมากในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น รีโมท เป็นต้น ในอุปกรณ์ที่ต้องมีน้ำหนักเบา สามารถชาร์จเพิ่มได้ ขณะที่แบตเตอรี่ NiCd ชนิดมีช่องลมใช้ในเครื่องบินและตัวสตาร์ทในเครื่องดีเซลหรือในที่ที่จำเป็นต้องมีอัตราส่วนพลังงานต่อน้ำหนักและปริมาตรสูง แบตเตอรี่ NiCd เหมาะสำหรับป้องกันปัญหาคุณภาพไฟฟ้าเกี่ยวกับแรงดันตกชั่วขณะและช่วยเป็นไฟฟ้าสำรองในสภาวะอากาศเลวร้ายเร็วๆนี้ แบตเตอรี่ NiCd เริ่มได้รับความสนใจในการใช้เป็นแหล่งเก็บพลังงานสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์เพราะสามารถทนทานในสภาวะอากาศสูงได้ แต่ทำงานได้ไม่ดีในการนำไปประยุกต์เพื่อใช้ในการตัดค่าสูงสุดของความ ต้องการพลังงาน (Peak Shaving)

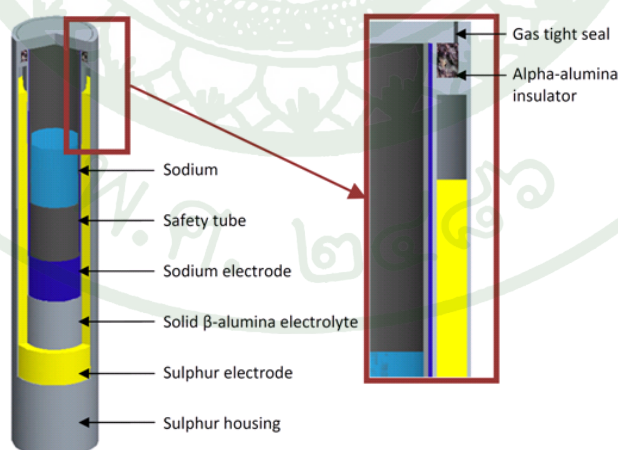
ค่าใช้จ่าย แบตเตอรี่ NiCd มีราคาสูงกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด มีราคาอยู่ที่ 600 ดอลลาร์ต่อ กิโลวัตต์ (Baxter, 2006) อย่างไรก็ตามค่าบำรุงรักษามีค่าต่ำกว่าเนื่องจากทนทานต่อสภาวะแวดล้อม ได้ดีกว่า

ข้อด้อย อายุของแบตเตอรี่ NiCd ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความถี่ของการดิสชาร์จและ อัตราการชาร์ตดิสชาร์ตรวดเร็ว เช่นเดียวกับแบตเตอรี่ตะกั่วกรด นอกจากนี้แบตเตอรี่ NiCd ยังมีผลกระทบจากการจำ (Memory Effects) และการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากการดิสชาร์ตตัวเองระหว่าง ารการใช้งานมากกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด ที่มีค่าประมาณ 2 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ต่อเดือน ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่มีค่าประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ต่อเดือน นอกจากนี้ผลกระทบที่มีต่อ สิ่งแวดล้อมของแบตเตอรี่ NiCd เริ่มมีการให้ความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากแคดเมียมเป็นสารที่เป็น พิษทำให้เป็นปัญหาต่อการจัดการแบตเตอรี่ที่หมดอายุ

อนาคตคาดเดาได้ว่าแบตเตอรี่ NiCd จะยังคงเป็นที่น่าสนใจในตลาดปัจจุบัน แต่เช่นเดียวกับแบตเตอรี่ตะกั่วกรด ที่ว่าคงจะมีโอกาสน้อยที่จะถูกนำไปใช้ในโครงการขนาดใหญ่ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะได้การติดตั้งแบตเตอรี่ NiCd เพื่อเก็บพลังงานขนาด 40 เมกกะวัตต์ ที่ลาสกัส ซึ่งเป็นเขต ที่มีอุณหภูมิต่ำที่เป็นเหตุผลหลักในการใช้แบตเตอรี่ NiCd เป็นที่เก็บพลังงานแบตเตอรี่ NiCd ยังคง มีราคาแพงกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรดแต่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามเนื่องจากความเป็น สารพิษของแคดเมียมทำให้มาตรฐานและข้อบังคับสำหรับแบตเตอรี่ NiCd จะเพิ่มขึ้น

2.3 แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ (NaS Battery)

แบตเตอรี่ NaS มีความหนาแน่นของพลังงานเป็น 3 เท่าของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด มีอายุการใช้งานนานกว่าและการบำรุงรักษาค่ากว่า แบตเตอรี่นี้ประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีทรงกระบอกที่บรรจุขั้วอิเล็กโทรดลบทำจากโซเดียมหลอมละลาย (Molten-Sodium) และขั้วอิเล็กโทรดบวกทำจากซัลเฟอร์หลอมละลาย (Molten-Sulphur) สารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ β -alumina ระหว่างการดิสชาร์จ ไอออนโซเดียมจะไหลผ่าน β -alumina ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยาที่ขั้วบวกกับซัลเฟอร์ทำให้เกิดเป็นโซเดียมโพลีซัลไฟด์ (Sodium Polysulfide) ดังแสดงในภาพที่ 12 ในระหว่างชาร์ต ปฏิกิริยาจะย้อนกลับจนทำให้โซเดียมโพลีซัลไฟด์แตกตัวและไอออนโซเดียมแปลงเป็นโซเดียมที่ขั้วบวก เพื่อให้โซเดียมและซัลเฟอร์หลอมละลายอยู่ในแบตเตอรี่และให้มีความหนาที่เหมาะสมในอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นทุกอย่างจะถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนที่รักษาอุณหภูมิที่เกินกว่า 270 องศาเซลเซียส มักจะอยู่ที่ 320 ถึง 340 องศาเซลเซียส แบตเตอรี่ NaS ขนาด 50 กิโลวัตต์ ที่ 360 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือ 50 กิโลวัตต์ ที่ 430 กิโลวัตต์ชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 86 ถึง 89 เปอร์เซ็นต์ (Baxter, 2006; Gonzalez, 2004) ซึ่งมีความอายุการใช้งานดีกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรดหรือแบตเตอรี่ NiCd โดยที่การดิสชาร์จที่ 100 เปอร์เซ็นต์ แบตเตอรี่ NaS สามารถใช้งานได้ถึง 2,500 รอบที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ของความลึกในการคายประจุได้ (Depth of Discharge, DoD) สามารถใช้งานได้ 4,500 รอบ และที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ของ DoD สามารถใช้งานได้ 40,000 รอบ



ภาพที่ 12 โครงสร้างของเซลล์ซัลเฟอร์โซเดียม

ที่มา: กฟภ. (2556)

การประยุกต์ใช้งาน คุณลักษณะที่ดีที่สุดของแบตเตอรี่ NaS คือสามารถจ่ายไฟฟ้าโดยการ
 ดิสชาร์จในแบบครั้งเดียว แบบต่อเนื่อง หรือเป็นแบบพัลส์สั้นๆ ที่มีขนาดสูงถึง 5 เท่าของค่าปกติ
 หรืออาจจะจ่ายรูปแบบพัลส์ในช่วงที่จ่ายไฟต่อเนื่อง ด้วยความยืดหยุ่นในการจ่ายไฟนี้จึงทำให้
 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การจัดการพลังงานและคุณภาพไฟฟ้า แบตเตอรี่
 NaS ยังถูกใช้ในการเลื่อนเวลาในการปรับปรุงสายส่งด้วย

ค่าใช้จ่าย ปัจจุบันค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่ NaS อยู่ที่ 810 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ ซึ่งเป็นราคาที่
 เพิ่งดำเนินการในเชิงพาณิชย์ ซึ่งถ้าหากมีการผลิตเพิ่มขึ้น คาดว่าค่าใช้จ่ายจะลดลงไปอีกประมาณ
 33 เปอร์เซ็นต์

ข้อด้อย ข้อด้อยที่สำคัญคือ แบตเตอรี่ NaS จะต้องรักษาอุณหภูมิการทำงานให้สูงกว่า 270
 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและต้องประสบปัญหาเกี่ยวกับการจัดการด้านความร้อน
 และข้อบังคับด้านความปลอดภัย นอกจากนี้ด้วยสภาพแวดล้อมทางเคมีทำให้นวนอาจเป็นปัญหา
 เนื่องจากนวนจะกลายเป็นตัวนำ และทำให้เกิดการดิสชาร์จตัวเอง

อนาคต ชุดเก็บพลังงานโซเดียมซัลเฟอร์ขนาด 6 เมกกะวัตต์ 8 ชั่วโมง ดำเนินการโดย Tokyo
 Electric Power Company (TEPCO) ร่วมกับ NGK Insulator ติดตั้ง ณ กรุงโตเกียว ญี่ปุ่น ดังแสดงใน
 ภาพที่ 13 ซึ่งมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 75 เปอร์เซ็นต์ วัสดุที่ใช้ในการสร้างแบตเตอรี่ NaS มีราคาไม่แพง
 และมีมาก ซึ่งวัสดุ 99 เปอร์เซ็นต์ ของแบตเตอรี่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ แบตเตอรี่ NaS สามารถนำ
 มาใช้ในขนาดเมกกะวัตต์ โดยนำโมดูลมาต่อเข้าด้วยกันเพื่อนำไปใช้ในการลดปัญหาความผันผวน
 ของไฟฟ้า แบตเตอรี่ NaS สามารถนำไปใช้ในการปรับเรียบ (Smoothing) กำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่าย
 พลังงานลมที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ ซึ่งบริษัท American Electric Power มีแผนที่จะ
 นำแบตเตอรี่ NaS ขนาด 6 เมกกะวัตต์ เข้าใช้กับแหล่งพลังงานลมสำหรับทดสอบเป็นเวลา 2 ปี
 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปกำหนดอนาคตการใช้แบตเตอรี่ NaS กับพลังงานทดแทน

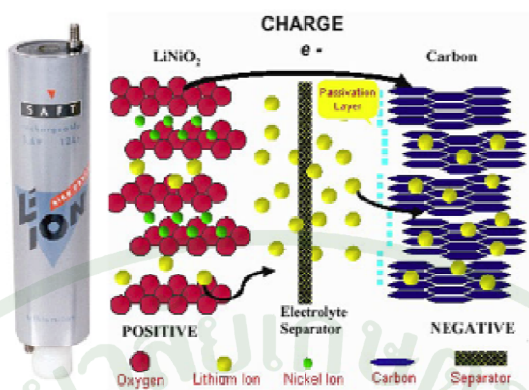


ภาพที่ 13 ชุดเก็บพลังงานโซเดียมซัลเฟอร์ขนาด 6 เมกกะวัตต์ 8 ชั่วโมงที่ติดตั้ง ณ กรุงโตเกียว ญี่ปุ่น

ที่มา: Gonzalez (2004)

2.4 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-Ion)

ลิเทียมเป็นโลหะที่มีความหนาแน่นทางพลังงานที่สูงจึงถูกนำมาใช้พัฒนาเป็นแบตเตอรี่หลายชนิดในกลุ่มที่ถูกเรียกว่า ลิเทียมไอออน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีจำนวนรอบอายุการใช้งานที่สูง มากกว่า 3,000 รอบ ด้วยการคายประจุที่ระดับความลึก 50 เปอร์เซ็นต์ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีหลายชนิดโดยมีความแตกต่างหลัก ที่การเลือกใช้วัสดุขั้วบวก และ ขั้วลบ ที่ประกอบเข้าด้วยกันดังภาพที่ 14 ปัจจุบันขั้วลบนิยมใช้กราฟไฟท์เพื่อลดการหดตัวและขยายตัวของขั้ว สำหรับขั้วบวกมีการเลือกใช้ ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (Lithium Manganese Oxide, LMnO) และลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Cobalt Oxide, LCO) ที่มีความหนาแน่นทางพลังงานสูงกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมแบบอื่น แต่แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอรอนฟอสเฟต (Lithium Iron Phosphate, LIP) มีความเหมาะสมในการใช้งานกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Micro Grid, MG) มากกว่าลิเทียมไอออนชนิดอื่นเนื่องจากไม่มีปัญหาเรื่องความร้อนจากการทำงานต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดปัญหาแบตเตอรี่หลอมเหลวหรือระเบิด เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นในระดับที่ผิดปกติ มีความหนาแน่นทางพลังงานที่ดี ราวๆ 110 ถึง 130 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (ในขณะที่แบตเตอรี่ตะกั่วกรดมีความหนาแน่นของพลังงานที่ระดับ 31 ถึง 35 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม) กำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจ่ายได้อยู่ในระดับที่สูง (กระแสไฟฟ้าในอัตรา 3 ถึง 5 เท่าตัวของระดับความจุ)



ภาพที่ 14 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ที่มา: กฟผ. (2556)

การประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมักจะใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน เป็นแบตเตอรี่ชนิดที่นิยมใช้ที่สุดสำหรับแบตเตอรี่รีชาร์ตสำหรับอุปกรณ์พกพา ซึ่งมีความหนาแน่นของพลังงานที่ดีที่สุด ไม่มีปัญหาเรื่องผลกระทบต่อด้านความจำ (Memory effect) และการสูญเสียเมื่อไม่มีการใช้งาน นอกจากนี้ใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเริ่มมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในทางทหาร รถไฟฟ้า และทางอวกาศ ยกตัวอย่างเช่น ในรถกอล์ฟมักจะเปลี่ยนจากแบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ค่าใช้จ่าย ปัจจุบันค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่ Li-Ion อยู่ที่ 1,200 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ ซึ่งเป็นราคาที่เพิ่งดำเนินการในเชิงพาณิชย์ ซึ่งถ้าหากมีการพัฒนากระบวนการและวัสดุให้ดีขึ้น คาดการณ์ว่าค่าใช้จ่ายจะลดลงไปได้อีก

ข้อด้อย จุดด้อยที่สำคัญของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนคือราคาที่สูงกว่าหลายเท่าตัวเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดในระดับความจุเดียวกันและต้องมีระบบตรวจวัดและจัดการที่ดี (Good battery management system)

อนาคต นักวิจัยพยายามดำเนินการวิจัยในการปรับปรุงในหลายเรื่องอาทิเช่น ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า ความปลอดภัย จำนวนรอบในการอัดประจุใหม่ ต้นทุนและราคา เป็นต้น ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่ Li-Ion มีการนำมาใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ

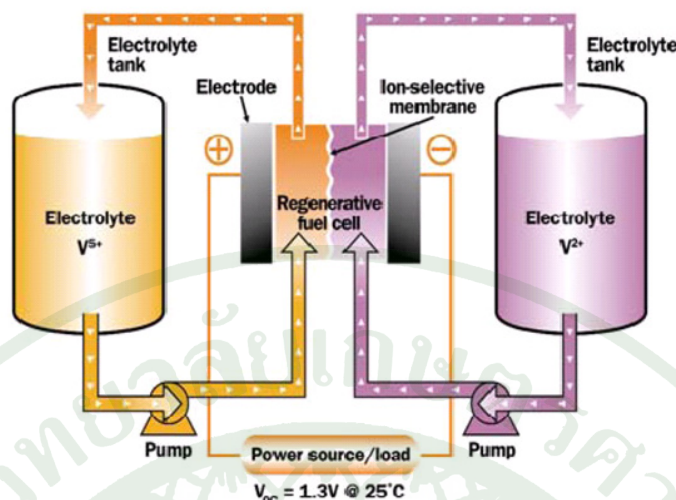
3. แหล่งเก็บพลังงานแบตเตอรี่ชนิดไหล (Flow Battery Energy Storage, FBES)

โดยแบตเตอรี่ FBES มี 3 ชนิดหลักประกอบไปด้วย แบตเตอรี่ชนิดวานาเดียม-รีดอกซ์ (Vanadium-Redox, VR) โพลีซัลไฟด์-โบไมด์ (Polysulphide-Bromide, PSB) และชนิดซิงค์-โบไมด์ (Zinc-Bromine, ZnBr) โดยมีหลักการทำงานเช่นเดียวกัน โดยมีอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิดถูกปั๊มเข้าไปยังเซลล์สแต็กที่จะมีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นทำให้เกิดกระแสไหลได้ โดยการทำงานโดยละเอียดของแต่ละชนิดจะได้กล่าวต่อไป

3.1 แบตเตอรี่ชนิดไหลวานาเดียม-รีดอกซ์ (VR Flow Battery)

แบตเตอรี่ VR ประกอบด้วยเซลล์สแต็ก ระบบแท็งก์อิเล็กโทรไลต์ ระบบควบคุม และชุดเปลี่ยนพลังงานดังแสดงในภาพที่ 15 แบตเตอรี่นี้เก็บพลังงานโดยการเชื่อมต่อกับวานาเดียมไอออนใน 2 รูปแบบที่อยู่ในรูปของสารอิเล็กโทรไลต์กรดซัลฟิวริกในแต่ละขั้ว โดยมีขั้วลบเป็น V^{2+}/V^{3+} และมีขั้วบวกเป็น V^{4+}/V^{5+} ซึ่งขนาดของเซลล์สแต็กจะเป็นตัวกำหนดกำลังไฟฟ้าขณะที่ปริมาตรของสารอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกำหนดความจุพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่ดีสชาร์จ สารอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองจะไหลจากแท็งก์ที่แยกจากกันเข้าไปยังเซลล์สแต็กที่ไอออน H^+ ไหลผ่านระหว่าง 2 ขั้ว ผ่านเมมเบรนที่ซึมผ่านได้ ขบวนการนี้จะทำให้เกิดการแยกตัวกันภายในสารละลาย ดังนั้นการเปลี่ยนรูปแบบของไอออนของวานาเดียมเป็นการเปลี่ยนพลังงานศักย์ (Potential Energy) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยขบวนการจะย้อนกลับในระหว่างรีชาร์จ แบตเตอรี่ VR มีประสิทธิภาพสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำงานที่อุณหภูมิปกติ ด้วยขบวนการปฏิกิริยาที่เหมือนกันสำหรับการชาร์จและดีสชาร์จ ทำให้ได้อัตราส่วนการชาร์จต่อดีสชาร์จเป็น 1 ต่อ 1 แบตเตอรี่ VR สามารถตอบสนองได้เร็ว โดยจากชาร์จไปยังดีสชาร์จภายในเวลา 1 มิลลิวินาที และมีความสามารถเกินไหลได้มากถึง 2 เท่าของอัตราพิกัดกำลังไฟฟ้าเป็นเวลาหลายนาทีก่อน

แบตเตอรี่ VR สามารถทำงานได้ 10,000 รอบซึ่งประมาณอายุการใช้งานได้ 7 ถึง 15 ปี ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน แบตเตอรี่สามารถดีสชาร์จได้หมดโดยประสิทธิภาพไม่ลดลงซึ่งต่างจากแบตเตอรี่ทั่วไป เมื่อสิ้นอายุการใช้งาน (10,000 รอบ) จะต้องการเปลี่ยนเพียงเซลล์สแต็กเพราะสารอิเล็กโทรไลต์ไม่จำกัดอายุและสามารถใช้อีกได้ แบตเตอรี่ VR ได้ถูกออกแบบให้เป็นโมดูลที่สามารถประกอบในสถานที่ที่ต้องการใช้ได้



ภาพที่ 15 โครงสร้างแบตเตอรี่ชนิดไหลวนาเคียม-รีดอกซ์

ที่มา: กฟผ. (2556)

การประยุกต์ใช้งาน แบตเตอรี่ VR นั้นมีขนาดกำลังไฟฟ้าและความจุพลังงานแยกจากกัน ดังนั้นจะเห็นแบตเตอรี่ VR เป็นอุปกรณ์ด้านเก็บพลังงานที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ สามารถใช้สำหรับงานที่มีความต้องการเก็บพลังงาน เช่น UPS การปรับโหลด (Load Leveling) การตัดยอด (Peak Shaving) ด้านระบบสื่อสารในการส่งจ่ายไฟฟ้าและการเชื่อมต่อแหล่งพลังงานทดแทน ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ VR จะมีความสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ แต่การประยุกต์ใช้งานแต่ละรูปแบบก็มีคู่แข่งซึ่งอาจจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าทำให้แบตเตอรี่ VR ใช้ในกรณีที่ต้องการประยุกต์ใช้งานในหลายรูปแบบพร้อมกัน อาทิเช่น การเชื่อมต่อแหล่งพลังงานทดแทน เป็นต้น

ค่าใช้จ่าย ค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่ VR มี 2 ส่วนคือ ค่ากำลังไฟฟ้าและค่าพลังงานไฟฟ้า ซึ่งไม่ขึ้นต่อกัน โดยสำหรับแบตเตอรี่ VR มีค่ากำลังไฟฟ้า 1,828 คอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ และค่าพลังงานไฟฟ้า 300 ถึง 1,000 คอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับการออกแบบ

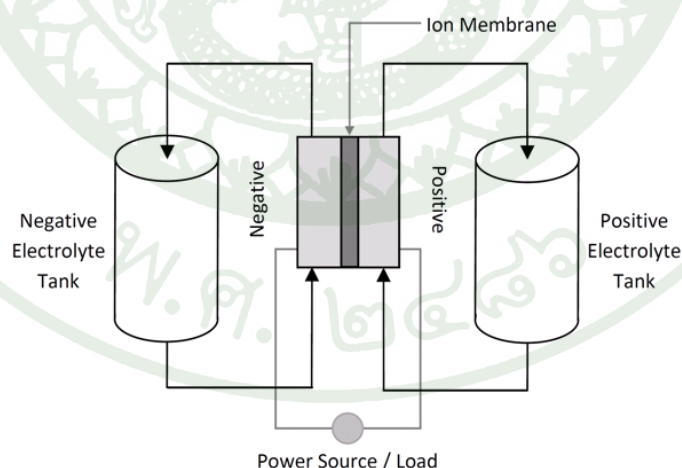
ข้อด้อย แบตเตอรี่ VR มีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่ำที่สุดและต้องการเกือบทุกเซลล์ในการที่จะได้กำลังไฟฟ้าเทียบเท่ากับแบตเตอรี่ชนิดไหลวนชนิดอื่น สำหรับการประยุกต์ใช้งานสำหรับงานขนาดเล็ก แบตเตอรี่ VR มีความยุ่งยากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ทั่วไป เพราะแบตเตอรี่ VR ต้องมีอุปกรณ์มากกว่า เช่น ปั๊ม ตัววัด ชุดควบคุม เป็นต้น ทำให้การตัดสินใจเลือกกระหว่างแบตเตอรี่ VR

กับแบตเตอรี่ทั่วไป ถ้าหากเลือกอุปกรณ์ที่ทำงานเฉพาะและไม่ยุ่งยากก็จะเลือกแบตเตอรี่ทั่วไป แต่ถ้าหากต้องการใช้งานที่หลากหลายแต่มีความยุ่งยากกว่าก็จะเลือกแบตเตอรี่ VR

อนาคต แบตเตอรี่ VR มีโอกาสมากเนื่องจากการใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ โดยเฉพาะการใช้งานในระดับเมกะวัตต์ อย่างไรก็ตามด้วยความที่เป็นเทคโนโลยีที่ยังใหม่อยู่ แบตเตอรี่ VR ยังคงรอการพิสูจน์ต่อไปในอนาคต

3.2 แบตเตอรี่ชนิดไหลโพลีซัลไฟด์-โบไมด์ (PSB Flow Battery)

แบตเตอรี่ PSB ทำงานคล้ายกันกับแบตเตอรี่ VR โดยมีส่วนประกอบเหมือนกันคือ เซลล์สแต็ค ระบบแท็งก์อิเล็กโทรไลต์ ระบบควบคุมไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 16 อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในแบตเตอรี่ PSB คือโซเดียมโบไมด์เป็นอิเล็กโทรไลต์บวก และโซเดียมโพลีซัลไฟด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ลบ ในการดิสชาร์จสารอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองไหลจากแท็งก์ตัวเองไปยังเซลล์ โดยที่ที่จะเกิดปฏิกิริยาจะเกิดที่โพลีเมอร์เมมเบรนที่ยอมให้เดียมไอออนไหลผ่าน ดังเช่นแบตเตอรี่ VR มีการแยกตัวเองเกิดขึ้นในกระบวนการดิสชาร์จ การรีชาร์จจะเป็นกระบวนการย้อนกลับ แรงดันตกรวมแต่ละเซลล์ประมาณ 1.5 โวลท์



ภาพที่ 16 โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดไหลโพลีซัลไฟด์-โบไมด์

ที่มา: PennWell Corp. (2006)

แบตเตอรี่ PSB ทำงานในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส แต่สามารถใช้ในช่วงอุณหภูมิกว้างกว่านี้ถ้าหากมีการใช้ระบายความร้อนให้กับระบบ ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ PSB อยู่ที่ 75 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของการดิสชาร์จ 1 ต่อ 1 เท่ากับแบตเตอรี่ชนิดไหลชนิดอื่น เนื่องจากมีกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมีเช่นเดียวกัน อายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 2,000 รอบ แต่ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน กำลังไฟฟ้าและความจุพลังงานไฟฟ้าแยกจากกันเช่นเดียวกันกับแบตเตอรี่ชนิดไหลชนิดอื่น

การประยุกต์ใช้งาน แบตเตอรี่ PSB สามารถนำไปใช้ในการเก็บสะสมพลังงานในรูปแบบต่างๆ อาทิเช่น การปรับโหลด การตัดยอด และการเชื่อมต่อพลังงานทดแทน อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ PSB มีการตอบสนองเร็วโดยถ้าสารอิเล็กโทรไลต์อยู่ในเซลล์สแตกจะสามารถตอบสนองภายในเวลา 20 มิลลิวินาทีหรือภายในเงื่อนไขการทำงานปกติแบตเตอรี่ PSB สามารถชาร์จและดิสชาร์จภายในเวลา 0.1 วินาที ดังนั้นแบตเตอรี่ PSB สามารถใช้ในการควบคุมความถี่และควบคุมแรงดัน

ค่าใช้จ่าย แบตเตอรี่ PSB มีค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 1,094 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 185 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (Baxter, 2006)

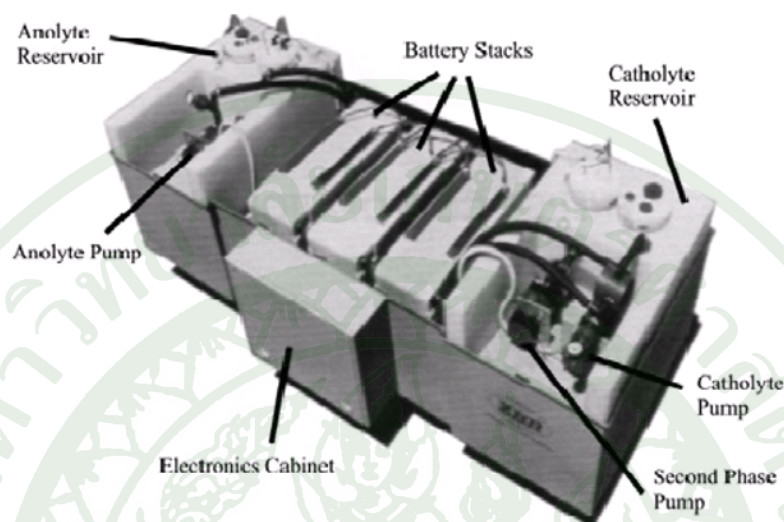
ข้อด้อย ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดสาร โบไมด์ ไฮโดรเจนและฟลักโซเดียมซัลเฟต ในปริมาณน้อยๆ เป็นผลทำให้จะมีการบำรุงรักษาทุก 2 สัปดาห์เพื่อขจัดผลที่เกิดจากโซเดียมซัลเฟต

อนาคต เช่นเดียวกับกับแบตเตอรี่ VR แบตเตอรี่ PSB สามารถขยายขนาดไปสู่ระดับเมกะวัตต์ ซึ่งจะมือนาคตในการเก็บสะสมพลังงาน อย่างไรก็ตามต้องรอผลการทดสอบในเชิงพาณิชย์ก่อนเช่นกัน

3.3 แบตเตอรี่ชนิดไหลซิงค์โบไมด์ (ZnBr Flow Battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความแตกต่างเล็กน้อยจากแบตเตอรี่ VR และ PSB ถึงแม้ว่าจะมีชิ้นส่วนอุปกรณ์เหมือนกันคือ เซลล์สแตก ระบบแบ่งคอลลีโทรไลต์ ระบบควบคุม และ PCS ดังที่แสดงในภาพที่ 17 แต่การทำงานของแบตเตอรี่ ZnBr ไม่เหมือนกัน โดยในระหว่างการชาร์จสารอิเล็กโทรไลต์ของอออนซิงค์และโบไมด์ไหลเข้าสู่เซลล์สแตก สารอิเล็กโทรไลต์แยกด้วยไมโครโพรัสเมมเบรน (Microporous Membrane) ที่แตกต่างจากแบตเตอรี่ VR และ PSB คือขั้วของ

แบตเตอรี่ PSB ทำหน้าที่เป็นซับสเตรต (Substrate) สำหรับการเกิดปฏิกิริยาซึ่งเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้น ซิงค์จะจับเข้าขั้วลบและโบไมด์จะหลุดจากขั้วบวก



ภาพที่ 17 โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดไหลซิงค์-โบไมด์

ที่มา: ZBB Energy Corp. (2002)

โดยจะคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาของแบตเตอรี่ทั่วไปที่มีการใส่สารเอเจนท์เข้าไปในสารอิเล็กโทรไลต์เพื่อลดขบวนการเกิดปฏิกิริยาของโบไมด์ ทำให้ลดการดิสชาร์จตัวเองของโบไมด์ทำให้เพิ่มความปลอดภัยให้ทั้งระบบ ในระหว่างการดิสชาร์จปฏิกิริยาจะกลับกันโดยซิงค์จะหลุดออกจากขั้วลบ และโบไมด์จะจับที่ขั้วบวก แบตเตอรี่ ZnBr สามารถทำงานที่อุณหภูมิ 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส อาจจะต้องมีเครื่องทำความเย็นเพื่อจัดการความร้อนที่เกิดขึ้น สารอิเล็กโทรไลต์จะไม่ไหลออกจากแบตเตอรี่ในระหว่างการใช้งานทำให้สามารถใช้สารอิเล็กโทรไลต์ได้ยาวนาน แต่ตัวเมมเบรนจะเสื่อมสภาพลงในระหว่างการใช้งาน ทำให้อายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 2,000 รอบ แบตเตอรี่ ZnBr สามารถดิสชาร์จได้ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีผลกระทบ และไม่มีปัญหาในด้านผลกระทบความจำ (Memory Effect) ประสิทธิภาพโดยรวมของแบตเตอรี่อยู่ที่ 75 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ (Baxter, 2006; Gonzalez *et al.*, 2004) อัตราส่วนของการชาร์ตต่อดิสชาร์ตเท่ากับ 1 ต่อ 1 แต่แบตเตอรี่ ZnBr มีความหนาแน่นมากที่สุดเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดไหลอื่นๆ โดยมีแรงดันต่อเซลล์เท่ากับ 1.8 โวลท์

การประยุกต์ใช้งาน แบตเตอรี่ ZnBr มีความหนาแน่นสูง 75 ถึง 85 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ทำให้แบตเตอรี่ ZnBr มีขนาดเล็กและเบาเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ทั่วไป และแบตเตอรี่ชนิดไหลชนิดอื่น ทำให้แบตเตอรี่ ZnBr เล็งไปที่การใช้งานในส่วนของพลังงานสำรองสำหรับพลังงานทดแทน เพื่อใช้ในการปรับเรียบ (Smoothing) กำลังไฟฟ้าในฟาร์มพลังงานลมหรือเซลล์แสงอาทิตย์หรือใช้ในการควบคุมความถี่ ปัจจุบันได้มีการนำแบตเตอรี่ ZnBr ไปติดตั้งใช้งานแล้วเช่น UPS การจัดการโหลด แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ สถานีไฟฟ้าและสายส่ง เป็นต้น

ค่าใช้จ่าย แบตเตอรี่ ZnBr มีค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 639 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ และค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 400 ดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (Baxter, 2006)

ข้อด้อย การเพิ่มกำลังไฟฟ้าและความจุพลังงานไฟฟ้าในขนาดเมกะวัตต์เป็นไปได้ยาก เพราะแต่ละโมดูลไม่สามารถเชื่อมโยงทางสารละลายเนื่องจากแต่ละโมดูลมีอิเล็กโทรไลต์แยกจากกัน ดังนั้นแต่ละโมดูลจะเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าซึ่งสามารถเพิ่มขนาดได้ประมาณ 1.5 เมกะวัตต์ รวมทั้งที่ได้กล่าวข้างต้นเมมเบรนจะเสื่อมสภาพเมื่อเกิดปฏิกิริยาซึ่งต้องเปลี่ยนใหม่เมื่อหมดอายุการใช้งานที่ประมาณ 2,000 รอบ

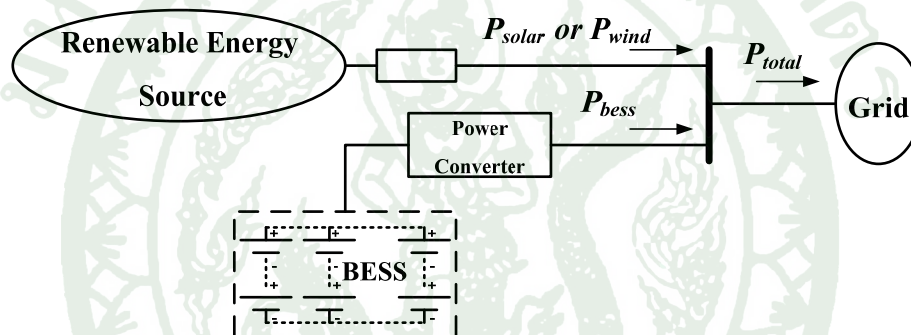
อนาคต อนาคตของแบตเตอรี่ ZnBr มุ่งไปที่การใช้งานกับแหล่งพลังงานทดแทน ซึ่งได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่ขนาด 1.5 เมกะวัตต์ สำหรับใช้กับฟาร์มพลังงานลมในช่วงหลายนาทิจ โดยคาดหวังว่าจะเพิ่มจำนวนชั่วโมงการทำงานของฟาร์มพลังงานลมได้มากกว่า 200 ชั่วโมงต่อปี ผลการทดลองนี้จะเป็นตัวชี้วัดอนาคตของแบตเตอรี่ ZnBr นี้

4. ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์

ท่ามกลางเทคโนโลยีการจัดเก็บพลังงาน การจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เป็นเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมมากที่สุดร่วมกับความสูญเสียที่ต่ำสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระดับโครงข่ายไฟฟ้า (Ribeiro *et al.*, 2001) เนื่องจากระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่นั้นมีความจุพลังงานที่สูงกว่าตัวกลางเก็บพลังงานอื่นๆ ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีความเหมาะสมสำหรับการดำเนินการจ่ายพลังงานให้แก่โหลดในช่วงระยะเวลาที่นาน (Barton and Infield, 2004) นอกจากนี้ใน (Ribeiro *et al.*, 2001) ได้กล่าวว่ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพด้านราคาสำหรับการใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม

สำหรับชนิดของอุปกรณ์ที่จัดเก็บพลังงานที่จะนำไปใช้งานร่วมกับพลังงานลมหรือแสงอาทิตย์ ภาพที่ 18 แสดงให้เห็นการใช้ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อชดเชยการส่งกำลังไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่องของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือฟาร์มกังหันลม โดยระบบเก็บพลังงานเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมและเก็บหรือคายประจุผ่านตัวแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อปรับเรียบกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ส่งจ่ายสู่ระบบไฟฟ้า (Teleke *et al.*, 2010)

STATCOM สามารถใช้เพื่อที่จะแปลงผันกำลังไฟฟ้าในรูปแบบการเชื่อมต่อนี้ เพื่อให้การควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนมีความสมบูรณ์ (Han *et al.*, 2008) นอกเหนือจากการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงโดยระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่



ภาพที่ 18 การบูรณาการระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียน

ที่มา: Teleke *et al.* (2010)

5. การกำหนดขนาดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่และการเลือกกำลังไฟฟ้าอ้างอิง

เราสามารถใช้ข้อมูลในอดีตเพื่อเลือกโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนที่ไม่ต่อเนื่องที่น่าสนใจและคุณลักษณะของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้แก่ การกำหนดพิกัดกำลัง และพลังงานไฟฟ้า ช่วงเวลาในการเก็บและคายประจุเป็นต้น เมื่อมองไปที่รูปแบบการเชื่อมต่องานภาพที่ 18 เราสามารถทราบได้ว่ากำลังไฟฟ้าสุทธิที่ส่งจ่ายสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Teleke *et al.*, 2010) คือ

$$P_{total} = P_{wind} + P_{bess} \quad (1)$$

หรือ

$$P_{total} = P_{solar} + P_{bess} \quad (2)$$

ในสมการเหล่านี้ P_{wind} คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากฟาร์มกังหันลม P_{solar} คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ P_{bess} คือ กำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และ P_{total} คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสู่ผู้ใช้ได้ดี โดยการอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจะต้องได้รับการเลือกเพื่อกำหนดกำลังไฟฟ้าที่ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ต้องส่งจ่ายสู่ระบบร่วมกับฟาร์มกังหันลมหรือระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แสดงดังต่อไปนี้

$$P_{bess,ref} = P_{set} - P_{wind} \quad (3)$$

$$P_{bess,ref} = P_{set} - P_{solar} \quad (4)$$

เมื่อ P_{set} คือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่ต้องการเลือก เพื่อให้สามารถส่งจ่าย P_{total} ได้ตามต้องการ $P_{bess,ref}$ คือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิง ที่ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ต้องจ่ายหรือรับจากระบบ เพื่อให้ได้ค่าผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นไปตามค่า P_{set} ซึ่งการเลือกค่าของ P_{set} เพื่อเป็นค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงอาจมีการเลือกตามช่วงเวลาที่กำหนดเช่น เป็นค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงล่วงหน้าทุกๆ 1 นาที หรือทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นต้น โดยในการเลือกขนาดของ P_{set} เป็นการสมมุติว่าเราสามารถคาดการณ์การส่งออกกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือฟาร์มกังหันลมในชั่วโมงหรือนาทีถัดไปได้ การเลือกค่า P_{set} จะเป็นค่าโดยเฉลี่ยในแบบรายชั่วโมงหรือนาทีจะลดขนาดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เนื่องจากภายใต้พื้นที่ $P_{set} - P_{wind}$ หรือ $P_{set} - P_{solar}$ ซึ่งเป็นพลังงานที่ต้องการส่งจ่ายโดยระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จะไปบรรจบที่ค่าศูนย์ในแต่ละชั่วโมง (Teleke et al., 2009)

เพื่อที่จะให้ได้พิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ดังนั้นมีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูลกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือฟาร์มกังหันลม เพื่อใช้คำนวณหาขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ดังต่อไปนี้ (Teleke et al., 2010)

$$E_{bess,ideal}(t) = E_{bess,ideal}(0) + \int_0^t P_{bess,ref}(t) dt \quad (5)$$

เมื่อ $E_{bess,ideal}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับ BESS

6. มาตรฐานและหลักเกณฑ์การวางแผนระบบไฟฟ้าของ กฟภ.

ในงานวิจัยนี้มีการศึกษาการประยุกต์ใช้งานระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อในระบบจำหน่ายของ กฟภ. ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับมาตรฐานและหลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เห็นผลการประยุกต์ใช้งานวิธีการที่นำเสนอสำหรับกำหนดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เพียงพอและสอดคล้องเป็นไปตามมาตรฐานและหลักเกณฑ์ที่กำหนด โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.1 เกณฑ์ด้านแรงดัน (Voltage Criteria)

โดยการวางแผนระบบไฟฟ้าของ กฟภ. มีเกณฑ์ด้านแรงดันแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับเกณฑ์ด้านแรงดันไฟฟ้า

แรงดันพิกัด	กรณีปกติ		กรณีฉุกเฉิน	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
230,000	218,500	241,500	207,000	253,000
115,000	109,200	120,700	103,500	126,500
33,000	31,300	34,700	29,700	36,300
22,000	20,900	23,100	19,800	24,200
380	342	418	342	418
220	200	240	200	240

(โวลท์)

ที่มา: กฟภ. (2553)

โดยตามหลักเกณฑ์การวางแผนระบบไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ว่าด้วยการรองรับการเชื่อมโยงของแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กกับระบบจำหน่าย 22 และ 33 เควี ของ กฟภ. การรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในเกณฑ์ด้านแรงดันของระบบไฟฟ้าของ กฟภ. ไม่มีผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าอย่างรุนแรง ไม่ทำให้ความมั่นคงของระบบไฟฟ้าลดลงจนวิกฤติ ระบบไฟฟ้ายังมีเสถียรภาพ กำหนดให้ค่าของแรงดันต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 5\%$ ของแรงดันพิกัด

6.2 เกณฑ์ด้านคุณภาพในการจ่ายไฟ (Quality of Supply Criteria)

สำหรับเกณฑ์ด้านคุณภาพการจ่ายไฟของ กฟภ. สรุปได้ดังนี้

- 1) การเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็ว (Rapid Voltage Change, RVC) โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันของระบบจำหน่ายแรงต่ำต้องไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์
- 2) ความผิดเพี้ยนของแรงดันเนื่องจากฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Voltage Distortion) โดยฮาร์โมนิกส์ที่สามของระบบต้องไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์
- 3) แรงดันไม่สมดุล (Voltage Unbalance) ในสภาวะปกติระบบจำหน่ายแรงสูง และแรงต่ำ ระดับแรงดันไม่สมดุลต้องไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์
- 4) ความถี่ของระบบ (System Frequency) โดยความถี่ของระบบอยู่ในช่วง 50 ± 0.5 รอบต่อวินาที

7. มาตรฐานในการกำหนดปัญหาแรงดันต่ำเกิน

ปัจจุบันปัญหาแรงดันต่ำเกินเป็นปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้าที่เข้ามามีบทบาทและเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างหนึ่งในการกำหนดความต่อเนื่องของกระบวนการผลิตในภาคธุรกิจอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งปัญหาแรงดันต่ำเกินนี้ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้า โดยมีสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดแรงดันต่ำเกินคือ การเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าส่งผลทำให้อุปกรณ์ประเภทที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสหลายชนิด (Sensitive Load) ทำงานผิดปกติ เช่น อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Adjustable Speed Drive, ASD) ตัวควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ (Programmable Logic Controller, PLC) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในบ้าน (Consumer Electronics) คอมพิวเตอร์ และรีเลย์ประเภทต่าง ๆ ในบางครั้งปัญหาแรงดันต่ำเกินอาจรุนแรงถึงขั้นที่ทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวหยุดการทำงาน ซึ่งส่งผลให้เกิดความสูญเสียในกระบวนการผลิตไม่ว่าจะเป็นความเสียหายที่เกิดกับตัว

อุปกรณ์และเวลาที่ต้องสูญเสียไป ซึ่งในบางครั้งอาจต้องมีการเริ่มต้นของกระบวนการผลิตใหม่ทั้งหมด ทำให้ความเสียหายที่เกิดจากแรงดันต่ำเกินเสมือนกับการเกิดปัญหาไฟฟ้าดับ หากแตกต่างกัน ที่ความเสียหายจากแรงดันต่ำเกินมีความถี่ในการเกิดบ่อยครั้งกว่า

ปัญหาแรงดันต่ำเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น มีการกำหนดนิยามที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละมาตรฐาน ซึ่งระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ และขนาดที่ใช้แสดงให้เห็นถึงความรุนแรงของปัญหาแรงดันต่ำเกินที่เป็นตัวกำหนดความแตกต่างของแต่ละมาตรฐาน โดยมาตรฐานนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ มาตรฐานสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้า และมาตรฐานสำหรับผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งมาตรฐานที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

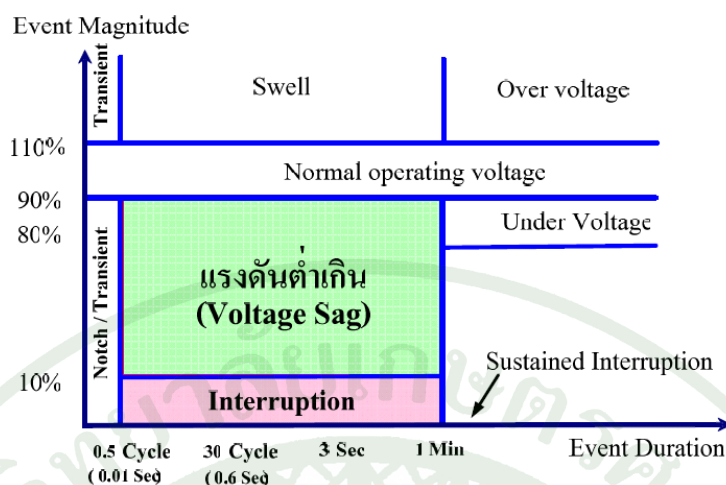
7.1 มาตรฐาน IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

ได้กำหนดให้ปัญหาแรงดันต่ำเกินจัดอยู่ในประเภทของแรงดันที่มีขนาดอยู่ในช่วง 90 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันปกติปกติแสดงในภาพที่ 19 โดยขนาดของแรงดันที่ลดลงดังกล่าว จะเกิดขึ้นนานตั้งแต่ 0.5 ไซเคิล จนถึง 1 นาที หากเกิดขึ้นนานกว่านี้ถือว่าเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าประเภทอื่น ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE นี้สามารถแบ่งช่วงการเกิดแรงดันต่ำเกินออกได้ 3 ช่วงด้วยกัน ดังต่อไปนี้

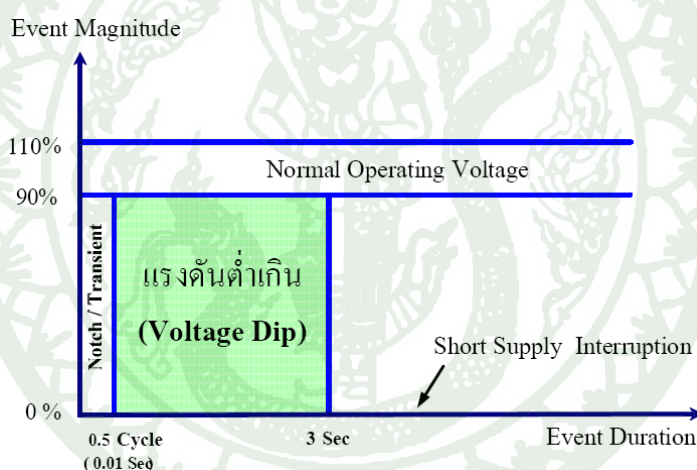
- 1) ทันทีทันใด (Instantaneous) เป็นช่วงที่มีระยะเวลานาน 10 มิลลิวินาที ถึง 30 ไซเคิล
- 2) ชั่วขณะ (Momentary) เป็นช่วงที่มีระยะเวลานาน 30 ไซเคิล ถึง 3 วินาที
- 3) ชั่วครู่ (Temporary) เป็นช่วงที่มีระยะเวลานาน 3 วินาที ถึง 1 นาที

7.2 มาตรฐานของ International Electrotechnical Commission (IEC)

ได้กำหนดให้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่จัดอยู่ในประเภทของแรงดัน มีขนาดแรงดันลดลงจากระดับปกติอย่างทันทีทันใดในช่วง 90 เปอร์เซ็นต์ ถึง 0 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันปกติปกติ โดยที่ขนาดแรงดันที่ลดลงดังกล่าวจะมีระยะเวลานาน 10 มิลลิวินาที ไปจนถึง 3 วินาที ดังภาพที่ 20



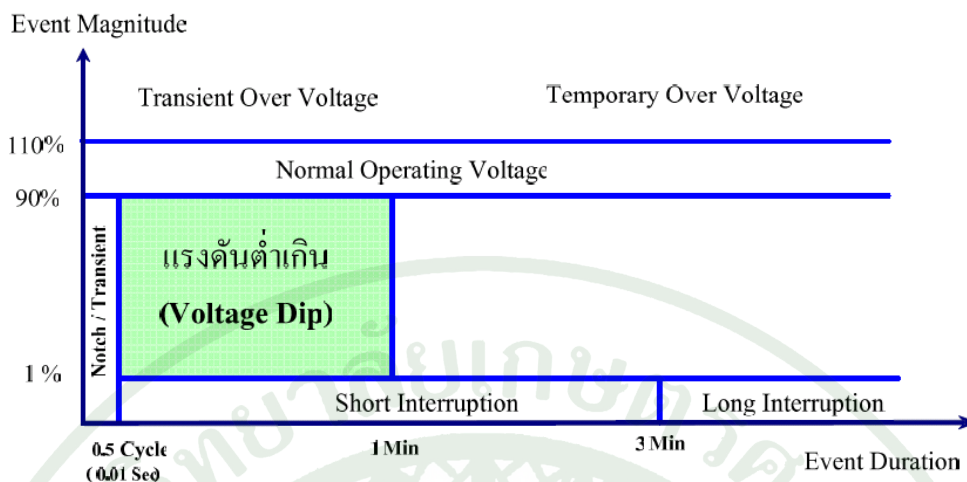
ภาพที่ 19 การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE 1159 - 1995



ภาพที่ 20 การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEC 61000-2-8

7.3 มาตรฐาน EN 50160-1999 (European Standard)

กำหนดให้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่จัดอยู่ในประเภทของแรงดันต่ำเกิน มีขนาดลดลงอยู่ในช่วง 90 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ของพิคแวลจปกติ โดยขนาดแรงดันที่ลดลงดังกล่าวจะมีระยะเวลาการเกิดเหตุการณ์นานตั้งแต่ 10 มิลลิวินาที จนถึง 1 นาที แต่หากแรงดันต่ำเกินมีขนาดลดลงต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ และมีระยะเวลาในการเกิดน้อยกว่า 3 นาที ให้ถือว่าเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าประเภทไฟดับแบบ Short Interruption และถ้าเกิดนานเกินกว่า 3 นาที จะถือเป็นไฟดับแบบ Long Interruption ดังแสดงในภาพที่ 21



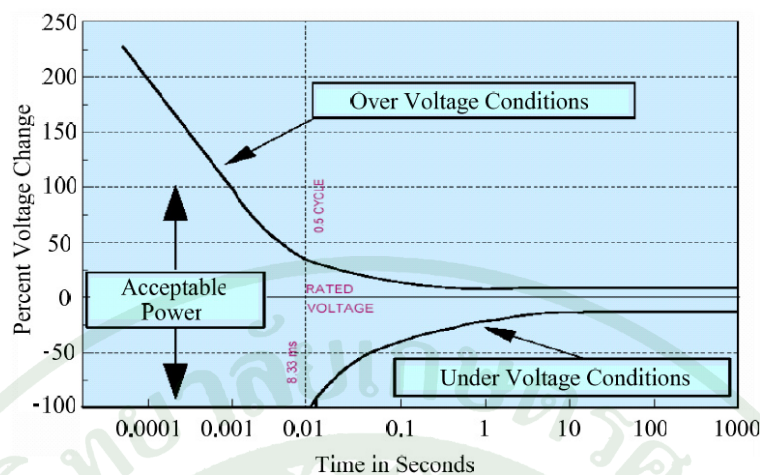
ภาพที่ 21 การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน EN 50160-1999

7.4 มาตรฐาน Computer Business Equipment Manufacturers Association (CBEMA)

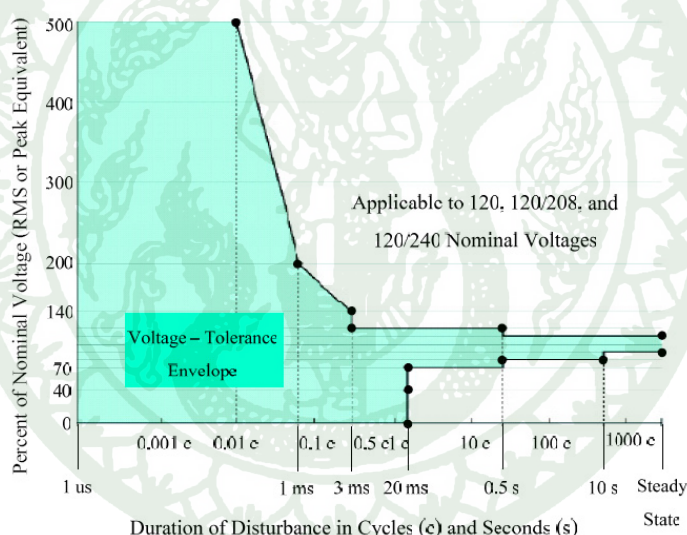
มาตรฐานนี้เกิดจากการรวมกลุ่มกันของผู้ประกอบการคอมพิวเตอร์ เพื่อกำหนดขีดความสามารถของอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในการทนต่อรูปคลื่นแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นที่มาของมาตรฐาน เส้นโค้ง CBEMA (CBEMA Curve) ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานนี้ได้มีการนำเสนออย่างเป็นทางการในมาตรฐาน IEEE 446 ในปี ค.ศ. 1987 หลังจากนั้นได้มีการนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นโดยหากมีอ้างอิงตามมาตรฐานนี้ อุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องทนต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันภายในระยะเวลาที่กำหนดเมื่อเหตุการณ์แรงดันผิดปกติที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 22

7.5 มาตรฐาน ITIC

เส้นโค้ง ITIC นั้นได้รับการพัฒนาจากองค์กรทางด้านข้อมูลเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Information Technology Industry Council) เพื่อกำหนดขีดจำกัดการทนได้ของอุปกรณ์ในลักษณะเดียวกับ CBEMA Curve แต่จะมีความสอดคล้องกับเทคโนโลยีสมัยใหม่มากขึ้น รวมทั้งสามารถประเมินขีดจำกัดของอุปกรณ์ได้ทั้งกรณีแรงดันสูงเกินและแรงดันต่ำเกินหรือแม้กระทั่งแรงดันสูงเกินในสภาวะชั่วขณะดังภาพที่ 23



ภาพที่ 22 การแบ่งขอบเขตการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน CBEMA (IEEE Standard 1250)

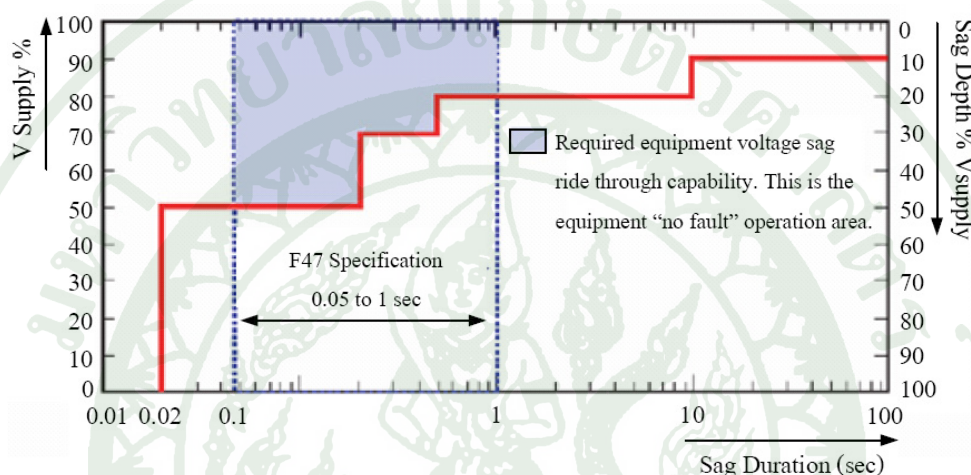


ภาพที่ 23 การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน ITIC (IEEE Standard 446)

7.6 มาตรฐาน Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI)

ในส่วนของเส้นโค้ง SEMI (SEMI Curve) นั้น ได้รับการพัฒนาจากกลุ่มผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (The Semiconductor Equipment and Materials International Group) เพื่อใช้ประเมินผลกระทบเฉพาะปัญหาแรงดันต่ำเกินต่อส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น โดยมีการกำหนดเป็นมาตรฐานที่เป็นทางการนั้นคือ เส้นโค้ง SEMI F47 (SEMI Standard F47 Curve) ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตตามมาตรฐานนี้จะต้องทนต่อขนาดแรงดันต่ำเกินที่ลดลงเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์

ได้นาน 200 มิลลิวินาที ทนต่อขนาดแรงดันต่ำเกินที่ลดลงเหลือ 70 เปอร์เซ็นต์ได้นาน 0.5 วินาที และทนต่อขนาดแรงดันต่ำเกินที่ลดลงเหลือ 80 เปอร์เซ็นต์ได้นาน 1 วินาที นอกจากนี้กลุ่มผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ยังได้กำหนดมาตรฐานเพื่อใช้สำหรับการทดสอบทั้งในส่วนของการทดสอบความปลอดภัย และการนำเสนอผลการทดสอบภายใต้ชื่อมาตรฐาน SEMI F42 ซึ่งจะสัมพันธ์กับมาตรฐาน SEMI F47 ดังภาพที่ 24

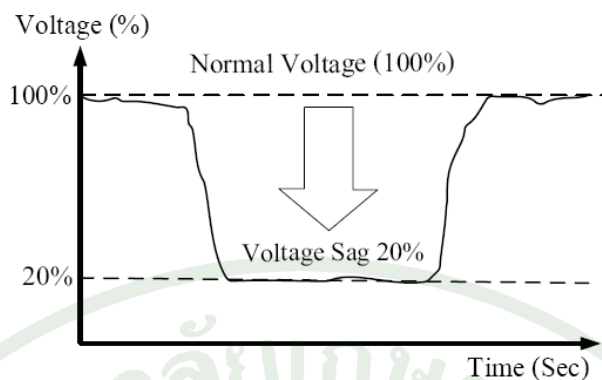


ภาพที่ 24 การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน SEMI

7.7 ความหมายของแรงดันต่ำเกิน (Voltage Sag หรือ Voltage Dip)

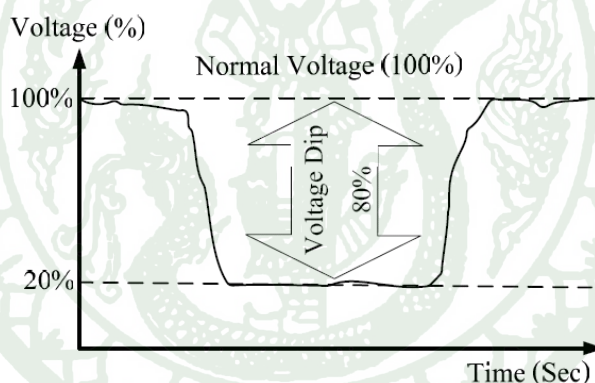
มาตรฐานต่างๆ ที่ได้กล่าวมานั้น โดยทั่วไปแล้วมักกล่าวถึงแต่เพียงขนาดของแรงดันที่ลดลงไปจากพิกัดแรงดันปกติ และระยะเวลาที่เกิดขึ้นของเหตุการณ์เท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วมาตรฐานต่างๆ จะมีความแตกต่างกันในรายละเอียดบางประการ อาทิเช่นในมาตรฐาน IEEE 1159 ปี ค.ศ. 1995 จะใช้คำว่า “Voltage Sag” แต่ในขณะที่มาตรฐานในแถบยุโรปเช่น EN 50160 ปี ค.ศ. 1999 จะใช้คำว่า “Voltage Dip” ชื่อเรียกที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้ จำกัความของทั้งสองกรณียังมีความแตกต่างกันดังนี้คือ

Voltage Sag 20 % หมายถึง แรงดันลดลงไปอยู่ที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ ของพิกัดแรงดันปกติดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ความหมายของแรงดันต่ำเกินตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995

Voltage Dip 80% หมายถึง แรงดันลดลงไปจากพิกัดแรงดันปกติคิดเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดแรงดันปกติดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ความหมายของแรงดันต่ำเกิน ตามมาตรฐาน EN 50160-1999 และ IEC 61000

จากภาพที่ 25 และภาพที่ 26 จะเห็นได้ว่าเป็นการกำหนดเหตุการณ์แรงดันต่ำเกินที่มีขนาดเท่ากันแตกต่างกันเพียงชื่อที่เรียกกันในแต่ละมาตรฐานเท่านั้น

8. มาตรฐานในการกำหนดปัญหาแรงดันเกิน

ปัญหาแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าเกิดจากหลายปัจจัยเช่น การเปิดปิดวงจรของตัวเก็บประจุ การเกิดฟ้าผ่า การสวิตช์ การปลดโหลดอย่างทันทีทันใด การเกิดลัดวงจร และการเกิดเฟลโรว์โรเรโซแนนซ์ นอกจากนี้ยังมีแหล่งกำเนิดแรงดันเกินชั่วคราวจากผู้ใช้ไฟด้วยเช่นกัน (ตฤณ, 2556) โดยปัญหา

แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น มีการกำหนดนิยามที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละมาตรฐาน ซึ่งระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์และขนาดที่ใช้แสดงให้เห็นถึงความรุนแรงของปัญหาของแรงดันเกินนั้นจะเป็นตัวกำหนดความแตกต่างของแต่ละมาตรฐาน โดยมาตรฐานที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

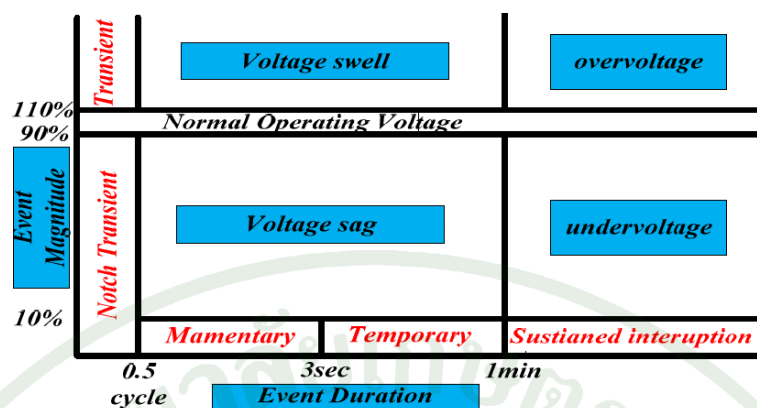
8.1 มาตรฐาน IEEE

ได้กำหนดให้ปัญหาแรงดันเกินจัดอยู่ในประเภทของแรงดันที่มีขนาดอยู่ในช่วง 110 เปอร์เซ็นต์ ถึง 180 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันพิกัดปกติ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 27 โดยขนาดของแรงดันที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวจะเกิดขึ้นนานตั้งแต่ 0.5 ไซเคิล จนถึง 1 นาฬิกา หากเกิดขึ้นนานกว่านี้ถือว่าเป็นปัญหาคูณภาพไฟฟ้าประเภทอื่น ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE นี้สามารถแบ่งช่วงการเกิดแรงดันเกินออกได้ 3 ช่วงด้วยกันดังต่อไปนี้

- 1) ทันทีทันใด (Instantaneous) เป็นช่วงที่มีระยะเวลานาน 10 มิลลิวินาที ถึง 30 ไซเคิล โดยมีขนาดของแรงดันอยู่ในช่วง 110 ถึง 180 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันพิกัดปกติ
- 2) ชั่วขณะ (Momentary) เป็นช่วงที่มีระยะเวลานาน 30 ไซเคิล ถึง 3 วินาที โดยมีขนาดของแรงดันอยู่ในช่วง 110 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันพิกัดปกติ
- 3) ชั่วครู่ (Temporary) เป็นช่วงที่มีระยะเวลานาน 3 วินาที ถึง 1 นาฬิกา โดยมีขนาดของแรงดันอยู่ในช่วง 110 ถึง 120 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันพิกัดปกติ

8.2 มาตรฐาน American National Standard Institute (ANSI)

ตามมาตรฐาน ANSI C84.1-1995 ได้กล่าวถึงแรงดันเกินในสถานะคงตัว (Steady State Over Voltage) โดยได้กำหนดแรงดันระบบสูงสุดไว้ 2 ช่วงคือแรงดันที่ 121 ถึง 115 กิโลโวลต์และที่แรงดัน 362 กิโลโวลต์ มาตรฐานแรงดันระบบสูงสุดอาจเกิดภายใต้สภาวะการทำงานปกติ และแรงดันไฟฟ้าระบบสูงสุดสำหรับอุปกรณ์และส่วนประกอบอื่นๆ ถูกออกแบบให้เพียงพอกับการทำงานแบบต่อเนื่องและกำหนดแรงดันของระบบสูงสุด แรงดันชั่วคราวและแรงดันเกินชั่วคราวเป็นเหตุให้สภาวะของระบบผิดปกติเช่น การผิดปกติหรือการปลดโหลด อย่างไรก็ตามแรงดันชั่วคราวและแรงดันเกินชั่วคราวอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ได้

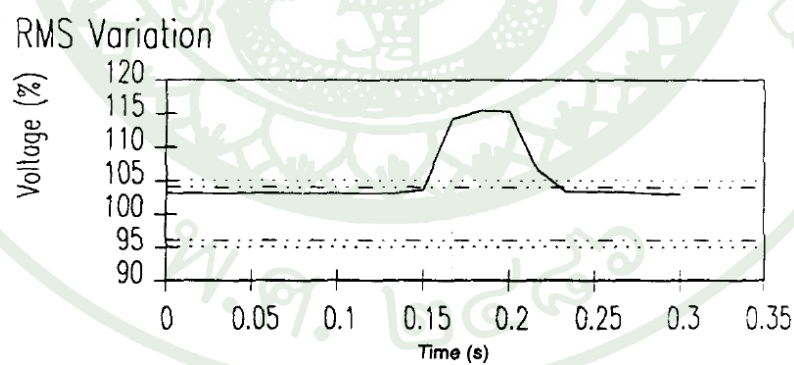


ภาพที่ 27 การแบ่งขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE 1159 – 1995

ที่มา: Torabi *et al.* (2012)

8.3 ความหมายของแรงดันเกิน (Voltage Swell)

Voltage Swell 115 % หมายถึง แรงดันเพิ่มขึ้น ไปอยู่ที่ระดับ 115 เปอร์เซ็นต์ ของพิกัดแรงดันปกติดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 การเกิดแรงดันเกินแบบฉับพลัน ตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

วัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ประกอบไปด้วย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. ระบบปฏิบัติการ MS-Window XP
3. โปรแกรม DIGSILENT Power Factory สำหรับใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง
4. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ข้อมูลทางวิศวกรรม MATLAB
5. โปรแกรม Microsoft Office สำหรับรวบรวมข้อมูล จัดทำเอกสารและอื่นๆ

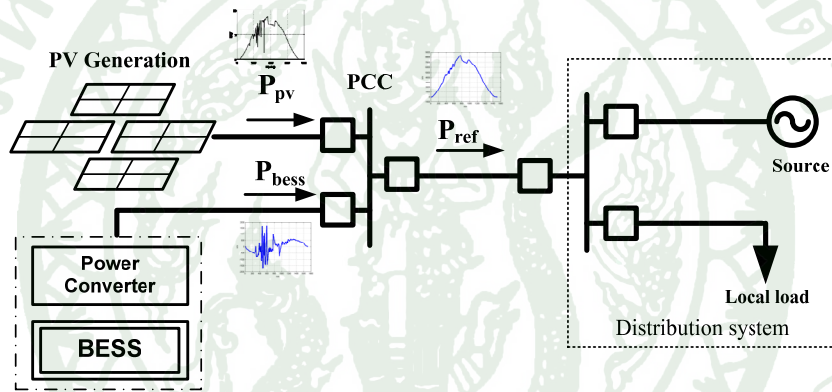
วิธีการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการวิจัยคือ เสนอการประยุกต์ใช้วิธีการที่มีประสิทธิภาพในการประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เพื่อชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อให้ได้ขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งจริงในระบบจำหน่ายของ กฟภ. เพื่อเป็นบรรทัดฐานในการลดผลกระทบที่เกิดจากความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบจำหน่ายของ กฟภ. ซึ่งมีวิธีการและส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. วิธีการประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงาน

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ โดยใช้เทคนิคการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายสู่ระบบไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ (Point of Common Coupling, PCC) ดังภาพที่ 29 แสดงให้เห็นการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ โดยสมการที่ (6) กำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจาก

ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (P_{bess}) และกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (P_{pv}) กำลังไฟฟ้าที่ระบบกักเก็บพลังงานชดเชยให้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการเก็บหรือคายประจุของระบบเก็บพลังงานผ่านตัวแปลงผันกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาใดๆ ($P_{bess,ref}(t)$) เกิดจากผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าอ้างอิง ($P_{ref}(t)$) และกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ($P_{pv}(t)$) หาได้จากสมการที่ (7) จากค่าสมบูรณ์สูงสุดของสมการที่ (7) ทำให้ได้ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงาน ($P_{bess,rated}(t)$) ดังสมการที่ (8) และสามารถหาค่าของพลังงานไฟฟ้าที่ต้องเก็บหรือคายจากระบบเก็บพลังงานที่เวลาใดๆ ($E_{bess}(t)$) ดังสมการที่ (9) และสามารถหาค่าพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงาน ($E_{bess,rated}$) จากผลต่างระหว่างค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของพลังงานไฟฟ้าที่เวลาใดๆ แสดงดังสมการที่ (10) (Teleke *et al.*, 2010)



ภาพที่ 29 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

$$P_{ref} = P_{pv} + P_{bess} \quad (6)$$

$$P_{bess,ref}(t) = P_{ref}(t) - P_{pv}(t) \quad (7)$$

$$P_{bess,rated} = \max |P_{ref}(t) - P_{pv}(t)| \quad (8)$$

$$E_{bess}(t) = \int_{t_0}^{t_1} P_{bess,ref}(t) dt \quad (9)$$

$$E_{bess,rated} = \max(E_{bess}(t)) - \min(E_{bess}(t)) \quad (10)$$

เมื่อ	P_{ref}	คือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิง
	P_{pv}	คือ กำลังไฟฟ้าที่จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
	P_{bess}	คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายชดเชยจากระบบเก็บพลังงาน
	$P_{bess,ref}(t)$	คือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่ระบบเก็บพลังงานจ่ายชดเชยที่เวลาใดๆ
	$P_{bess,rated}$	คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงาน
	$E_{bess}(t)$	คือ พลังงานที่เก็บหรือคายของระบบเก็บพลังงานที่เวลาใดๆ
	$E_{bess,rated}$	คือ พิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงาน

โดยจากสมการที่ (6) การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายสู่ระบบจำหน่าย หรือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงคือเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่ต้องสร้างขึ้นจากวิธีการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า ดังนั้นวิธีการประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยวิธีการนี้จึงมีความจำเป็นต้องมีข้อมูล การตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และส่งจ่ายสู่ระบบ จำหน่ายจริงประกอบการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้สำหรับการประเมินขนาดพิกัดของ ระบบเก็บพลังงานดังแสดงความสัมพันธ์ตามสมการที่ (6) ถึงสมการที่ (10) ดังกล่าวข้างต้น

2. วิธีสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าในด้านการควบคุมขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานที่ประเมินได้จากเทคนิคการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า ระหว่างวิธีการดั้งเดิมที่นิยมใช้งานในปัจจุบันกับวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยรายละเอียดของ วิธีการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้างกล่าวมีดังนี้

2.1 วิธีสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิม

2.1.1 วิธีการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Average, SMA)

วิธีนี้เป็นการสร้างเส้นค่าเฉลี่ยที่ไม่ซับซ้อนง่ายต่อการใช้งาน มีคุณสมบัติในการ รักษาเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าให้มีกำลังไฟฟ้าที่คงที่ เนื่องจากมีผลตอบสนองต่อเมื่อโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า ที่ต้องการปรับเรียบมีความผันผวนที่ความถี่สูง แต่ก็ทำให้ขนาดพิกัดพลังงานของระบบเก็บพลังงานที่ ประเมินได้มีขนาดพิกัดที่สูง (Sheikh *et al.*, 2012) โดยหาค่าได้จากสมการที่ (11)

$$SMA_t = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=(t-N+1)}^t X_i \right] ; (N \leq t) \quad (11)$$

เมื่อ X_i คือ ข้อมูลตำแหน่งที่ i
 SMA_t คือ ค่าของเส้นค่าเฉลี่ยที่เวลา t
 N คือ จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการหาค่าเฉลี่ย

2.1.2 วิธีหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เลขชี้กำลัง (Exponential Moving Average, EMA)

วิธีการนี้จะให้ความสำคัญกับชุดข้อมูลปัจจุบันมากที่สุด ด้วยค่าคงที่ถ่วงน้ำหนัก (Smoothing Factor, α) และลดการถ่วงน้ำหนักสำหรับชุดข้อมูลก่อนหน้าลง เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน โดยมีความสัมพันธ์แสดงตามสมการที่ (12) และสมการที่ (13)

$$F_t = \alpha X_t + (1 - \alpha) F_{t-1} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{2}{(N + 1)} \quad (13)$$

เมื่อ X_t คือ ข้อมูลตำแหน่งที่ t
 α คือ ค่าคงที่ที่กำหนดน้ำหนักมีค่าอยู่ในช่วง ($0 < \alpha < 1$)
 F_t คือ ค่าการทำให้เรียบที่เวลา t

2.2 วิธีการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้านำเสนอในงานวิจัยนี้

2.2.1 วิธีปรับเรียบแบบเลขชี้กำลังเชิงเส้น (Linear Exponential Smoothing, LES)

จากการศึกษาพบว่าวิธี LES ซึ่งเป็นวิธีการทางสถิติที่มีนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการพยากรณ์ด้านเศรษฐศาสตร์ สามารถนำมาใช้กับการจัดการระบบเก็บพลังงาน เพื่อลดข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากวิธี SMA และ EMA ได้เป็นอย่างดี (John, 1988) ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่สำคัญดังสมการที่ (14) ถึงสมการที่ (18)

$$a_t = (2F'_t) - F''_t \quad (14)$$

$$b_t = \left[\frac{\alpha}{(1-\alpha)} \right] (F'_t - F''_t) \quad (14)$$

$$F'_t = \alpha X_t + (1-\alpha)F'_{t-1} \quad (16)$$

$$F''_t = \alpha F'_t + (1-\alpha)F''_t \quad (17)$$

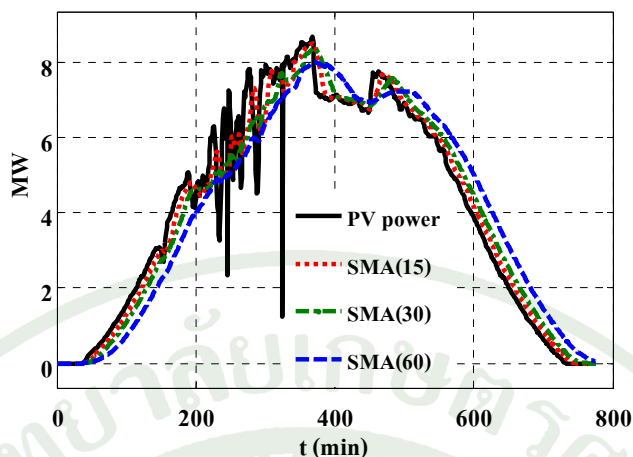
$$F_t = a_t + b_t \quad (18)$$

เมื่อ	F_t	คือ ค่าปรับเรียบตำแหน่ง t
	X_t	คือ ข้อมูลชุดที่ t
	α	คือ ค่าคงที่กำหนดน้ำหนักมีค่าอยู่ในช่วง $(0 < \alpha < 1)$
	F'_t	คือ ค่าปรับเรียบจากวิธีหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เลขชี้กำลังครั้งที่ 1
	F''_t	คือ ค่าปรับเรียบจากวิธีหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เลขชี้กำลังครั้งที่ 2
	a_t	คือ ค่าระยะตัดแกน (Intercept)
	b_t	คือ ค่าความชัน (Slope)

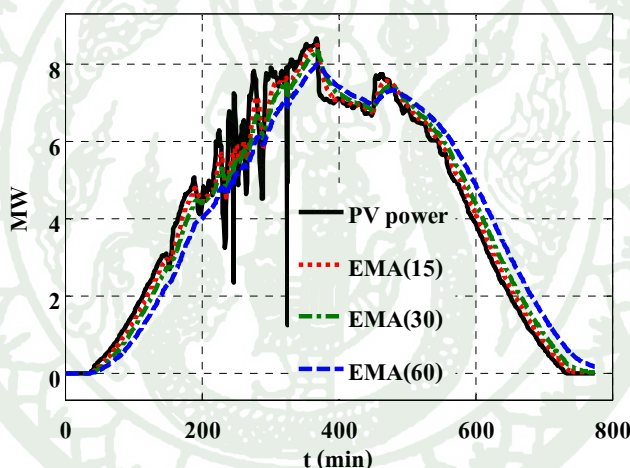
3. การวิเคราะห์วิธีการ

3.1 การประวิงของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้า

เนื่องจากวิธีดั้งเดิมที่ประกอบไปด้วยวิธี SMA และวิธี EMA นั้น เมื่อนำมาใช้สร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ประกอบการประเมินขนาดฟักัดของระบบเก็บพลังงานด้วยวิธีการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า เมื่อต้องการเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่มีความราบเรียบมากขึ้นทำให้เกิดปัญหาการประวิงของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวิธีการทั้งสองที่ส่งผลทำให้ขนาดฟักัดของระบบเก็บพลังงานที่ประเมินได้มีขนาดเพิ่มขึ้น โดยขนาดของระบบเก็บพลังงานที่เพิ่มขึ้นนี้แปรผันตามความราบเรียบของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า ซึ่งปัญหาการประวิงของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากวิธี SMA และ EMA สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 30 และภาพที่ 31 ตามลำดับ



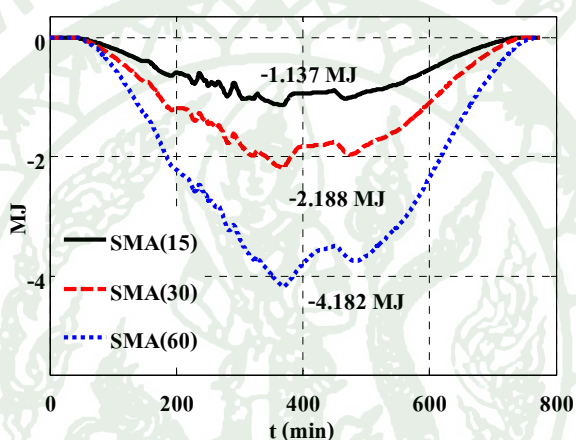
ภาพที่ 30 เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA



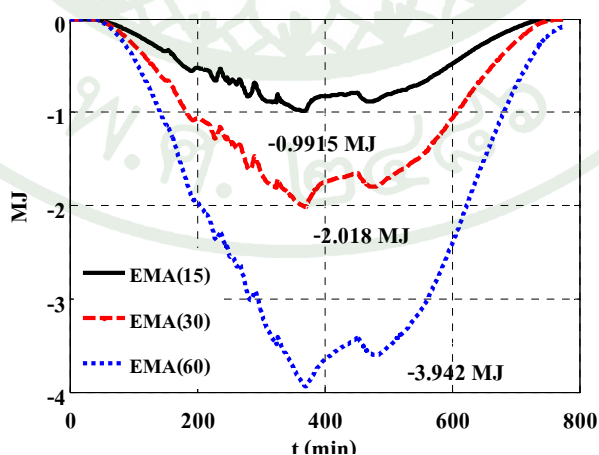
ภาพที่ 31 เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี EMA

จากภาพที่ 30 เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า SMA (15) แสดงถึงเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธีหาค่าเฉลี่ยอย่างง่ายด้วยกลุ่มข้อมูลเฉลี่ย 15 ชุด ($N=15$) เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า SMA (30) แสดงถึงเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธีหาค่าเฉลี่ยอย่างง่ายด้วยกลุ่มข้อมูลเฉลี่ย 30 ชุด และเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า SMA (60) แสดงถึงเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธีหาค่าเฉลี่ยอย่างง่ายด้วยกลุ่มข้อมูลเฉลี่ย 60 ชุด และจากภาพที่ 31 เป็นเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี EMA (15) EMA (30) และ EMA (60) ซึ่งมีความหมายเหมือนกับวิธี SMA ดังกล่าวข้างต้นเช่นกัน เห็นได้ว่าเมื่อจำนวนกลุ่มข้อมูลเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นความผันผวนของกำลังไฟฟ้าของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นลดลง แต่ในทางตรงข้ามขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานกลับมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ขึ้น ซึ่งการประเมินขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากข้อมูลเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า SMA(15), SMA(30) และ SMA(60) ที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA ที่ได้คือ 1.137, 2.188 และ 4.182 เมกกะจูล ตามลำดับ ในส่วนของการประเมินขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากข้อมูลเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า EMA(15), EMA(30) และ EMA(60) ที่สร้างขึ้นจากวิธี EMA ที่ได้คือ 0.996, 2.018 และ 3.942 เมกกะจูล ตามลำดับ โดยการเพิ่มขึ้นของขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ประเมินได้จากเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA และวิธี EMA แสดงได้ดังภาพที่ 32 และภาพที่ 33 ตามลำดับ



ภาพที่ 32 ขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างจากวิธี SMA



ภาพที่ 33 ขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างจากวิธี EMA

3.2 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของวิธีการ

เนื่องจากวิธี LES เป็นวิธีที่น่าเสนอขึ้นเพื่อปรับปรุงวิธี EMA ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยวิธี LES สามารถลดปัญหาการประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี EMA และวิธี SMA ซึ่งสามารถนำข้อได้เปรียบดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการลดขนาดพิกัดกำลัง และพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานได้ โดยการลดการประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าของวิธี LES จากผลการคำนวณเป็นการประมาณค่าส่วนต่างที่เกิดจากการประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจากการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เลขชี้กำลังครั้งที่ 1 (Single EMA) และการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เลขชี้กำลังครั้งที่ 2 (Double EMA) เพื่อนำมาชดเชยปัญหาการประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าง่ายๆ ดังกล่าว โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$EMA = F'_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)F'_{t-1} \quad (19)$$

$$DEMA = F''_t = \alpha F'_t + (1 - \alpha)F''_{t-1} \quad (20)$$

เมื่อ EMA คือ การหาค่าเฉลี่ยเลขชี้กำลังครั้งที่ 1
 $DEMA$ คือ การหาค่าเฉลี่ยเลขชี้กำลังครั้งที่ 2
 F'_t คือ การหาค่าเฉลี่ยเลขชี้กำลังครั้งที่ 1
 F''_t คือ การหาค่าเฉลี่ยเลขชี้กำลังครั้งที่ 2

และ

$$a_t = (2F'_t) - F''_t \quad (21)$$

$$b_t = \left[\frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \right] (F'_t - F''_t) \quad (22)$$

$$LES = a_t + b_t \quad (23)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (21) และสมการที่ (22) สามารถเขียนสมการที่ (23) ใหม่ได้ดังนี้

$$LES = (2F'_t) - F''_t + \frac{\alpha}{(1-\alpha)}(F'_t - F''_t) \quad (24)$$

โดยสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ว่า

$$LES = F'_t + \left[1 + \frac{\alpha}{(1-\alpha)}\right](F'_t - F''_t) \quad (25)$$

เมื่อกำหนดให้

$$k = \left[1 + \frac{\alpha}{(1-\alpha)}\right] \quad (26)$$

$$D = (F'_t - F''_t) \quad (27)$$

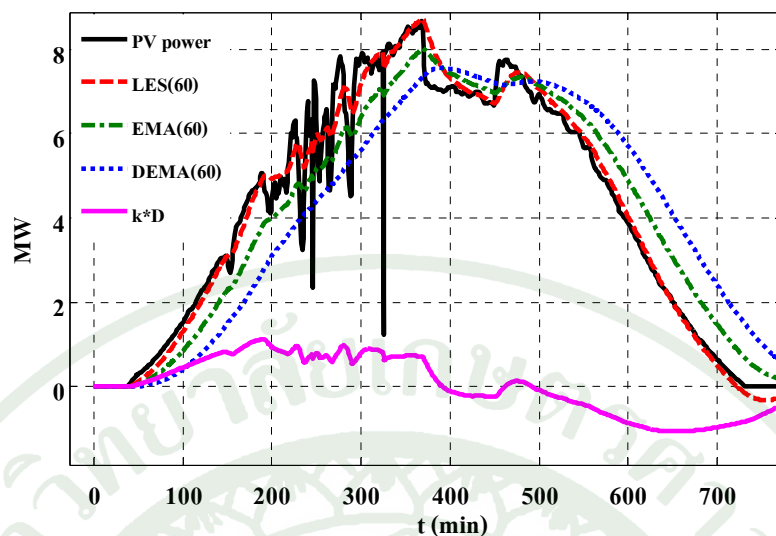
สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปใหม่ได้ดังนี้

$$LES = F'_t + k \cdot D \quad (28)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่

D คือ กำลังไฟฟ้าส่วนต่างจากการประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า

จากสมการข้างต้นพบว่ากำลังไฟฟ้าส่วนต่างระหว่าง F'_t และ F''_t เป็นกำลังไฟฟ้าส่วนต่างที่มีการปรับเรียบแล้ว เมื่อนำมาชดเชยผลการประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่มีการปรับเรียบแล้ว ทำให้ผลการประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้างดกล่าวลดลงแสดงดังภาพที่ 34 จากภาพที่ 34 ผลการชดเชยการประวิงของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าโดยการประมาณผลต่างระหว่าง F'_t และ F''_t เป็นดังเส้นกำลังไฟฟ้า LES (60) ซึ่งสังเกตได้ว่าการชดเชยการประวิงของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าก็ไม่สามารถทำได้ทั้งหมด เนื่องจากกำลังไฟฟ้าส่วนต่างที่นำมาชดเชยนั้นเป็นค่าในอดีตทำให้เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าเส้นใหม่ที่สร้างจากวิธี LES มีพื้นที่ใต้กราฟด้านลบปรากฏอยู่ซึ่งพื้นที่ดังกล่าว



ภาพที่ 34 การชดเชยการเลื่อนเฟสด้วยวิธี LES

แปรผันตามขนาดของค่าคงที่ (k) ของกำลังไฟฟ้าส่วนต่าง (D) ที่นำมาชดเชยการประวิงของค่าอ้างอิง กำลังไฟฟ้างดสมการที่ (28) แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ดังกล่าวก็ยังขึ้นอยู่กับกรณาวีธี LES ไปประยุกต์ใช้งานเพื่อความสะดวกในการควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เราต้องการให้เป็นไปตามเกณฑ์หรือมาตรฐานกำหนดเช่น การใช้วิธี LES สร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นเป้าหมายในการชดเชย ความผันผวนของกำลังไฟฟ้าและประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายของ กฟภ. เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใหม่นั้นต้องมีความเรียบของกำลังไฟฟ้าที่เพียงพอสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบที่จุดเชื่อมต่อให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ดังนั้นค่าคงที่ของกำลังไฟฟ้าส่วนต่างที่ใช้ชดเชยการประวิงของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้างดกล่าวจึงอาจเพิ่มขึ้นตามความต้องการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วย

เนื่องจากวิธี EMA เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มากกว่าวิธี SMA และมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับวิธี LPF (Sheikh *et al.*, 2012) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การวัดประสิทธิภาพในการควบคุมขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ระหว่างวิธี EMA และวิธี LES ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นหลัก ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างวิธี LES และวิธี EMA เมื่อนำวิธีการทั้ง 2 สร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าพบว่าในช่วงที่กราฟการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้ามีความชันเป็นบวกที่เวลาใดๆ ค่ากำลังไฟฟ้าของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES มีค่าที่มากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี EMA และอยู่ใกล้เส้นโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า

ที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธี LES สามารถลดปัญหาการเลื่อนเฟสของวิธี LES ได้จริง โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เมื่อ α คือ ตัวประกอบการทำให้เรียบ (Smoothing Factor) และ N คือจำนวนกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการหาค่าเฉลี่ยที่ใช้สำหรับวิธี EMA และวิธี LES ซึ่งเป็นค่าเดียวกันโดยปกติกำหนดค่าของ α จาก

$$\alpha = \frac{2}{(N+1)} \quad (29)$$

จากสมการที่ (19) และสมการที่ (28) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{LES(t)}{EMA(t)} = \frac{F'_t + (k \cdot D)}{F'_t} \quad (30)$$

$$\frac{LES(t)}{EMA(t)} = 1 + \frac{(k \cdot D)}{F'_t} \quad (31)$$

ดังนั้น

$$EMA(t) < LES(t) \leq \left[1 + \frac{(k \cdot D)}{F'_t} \right] \cdot EMA(t) \quad (32)$$

จากการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้นพบว่าเมื่อค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นเข้าใกล้ค่าโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้นทำให้ส่วนต่างระหว่างค่าทั้งสอง (ΔP) มีค่าลดลง ดังนั้นเป็นผลให้กำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายชดเชยจากระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ทั้งทางด้านบวกหรือลบจึงมีค่าลดลงไปด้วยเป็นผลทำให้พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่ต้องจ่ายจากระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีค่าลดลง ซึ่งการลดของค่า ΔP เป็นผลเนื่องจากการลดการประวิงของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั่นเอง เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการลดการประวิงของค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี LES เทียบกับวิธี EMA ดังนั้นจึงได้กำหนดให้

$$P_{LES}(t) = LES(t) \quad (33)$$

$$P_{EMA}(t) = EMA(t) \quad (34)$$

เมื่อ $P_{LES}(t)$ คือ ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES ที่เวลา t
 $P_{EMA}(t)$ คือ ค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี EMA ที่เวลา t

ทำให้สามารถเขียนสมการที่ (32) ใหม่ได้ดังนี้

$$P_{EMA}(t) < P_{LES}(t) \leq \left[1 + \frac{(k \cdot D)}{F'_t} \right] \cdot P_{EMA}(t) \quad (35)$$

จากความความสัมพันธ์ในสมการที่ (7) สามารถเขียนผลต่างระหว่างค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES และวิธี EMA กับค่ากำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ว่า

$$\Delta P_{LES}(t) = P_{LES}(t) - P_{PV}(t) \quad (36)$$

$$\Delta P_{EMA}(t) = P_{EMA}(t) - P_{PV}(t) \quad (37)$$

เมื่อ $\Delta P_{LES}(t)$ คือ ผลต่างของกำลังไฟฟ้าระหว่างค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES กับโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เวลา t
 $\Delta P_{EMA}(t)$ คือ ผลต่างของกำลังไฟฟ้าระหว่างค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี EMA กับโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เวลา t

จากสมการที่ (35) ถึง (37) เมื่อค่าอ้างอิงที่สร้างขึ้นจากวิธี LES อยู่ใกล้โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าค่าอ้างอิงที่สร้างขึ้นจากวิธี EMA จึงสรุปได้ว่า

$$\Delta P_{LES}(t) < \Delta P_{EMA}(t) \quad (38)$$

จากสมการที่ (38) ปริมาณพลังงานที่เก็บหรือคายของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เวลาใดๆ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นดั่งเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างจากวิธี EMA และวิธี LES คือ

$$E_{bess,EMA}(t) = \int_{t_0}^{t_1} \Delta P_{EMA}(t) dt \quad (39)$$

$$E_{bess,LES}(t) = \int_{t_0}^{t_1} \Delta P_{LES}(t) dt \quad (40)$$

และสามารถประเมินขนาดพิกัดพลังงานของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากสมการที่ (39) และสมการที่ (40) ได้ตามลำดับดังนี้คือ

$$E_{bess,rated,EMA} = \max(E_{bess,EMA}(t)) - \min(E_{bess,EMA}(t)) \quad (41)$$

$$E_{bess,rated,LES} = \max(E_{bess,LES}(t)) - \min(E_{bess,LES}(t)) \quad (42)$$

เมื่อ $E_{bess,EMA}(t)$ คือ ปริมาณพลังงานที่เก็บหรือคายของระบบเก็บพลังงานที่เวลาใดๆ เมื่อใช้เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี EMA
 $E_{bess,LES}(t)$ คือ ปริมาณพลังงานที่เก็บหรือคายของระบบเก็บพลังงานที่เวลาใดๆ เมื่อใช้เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES
 $E_{bess,rated,EMA}$ คือ พิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อใช้เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี EMA
 $E_{bess,rated,LES}$ คือ พิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เมื่อใช้เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES

ดังนั้นจากสมการที่ (38) จึงสรุปได้ว่าวิธี LES ให้ค่าพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ประเมินได้ต่ำกว่าวิธี EMA ดังนี้

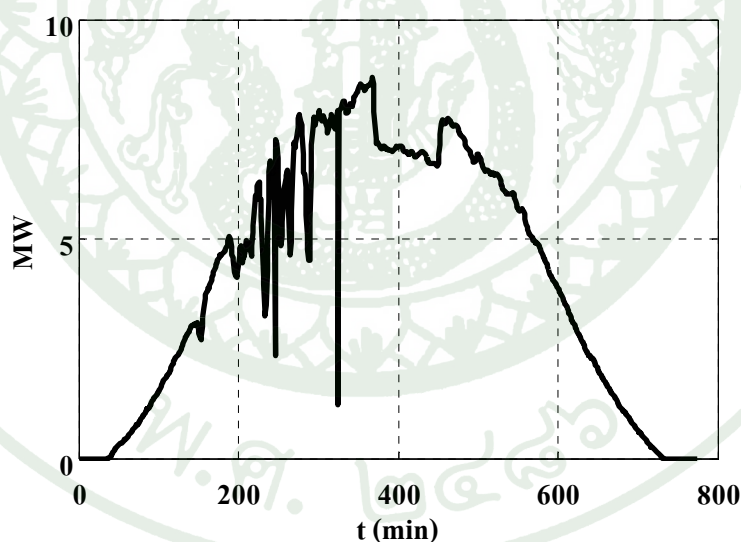
$$E_{bess,rated,LES} < E_{bess,rated,EMA} \quad (43)$$

4. ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า

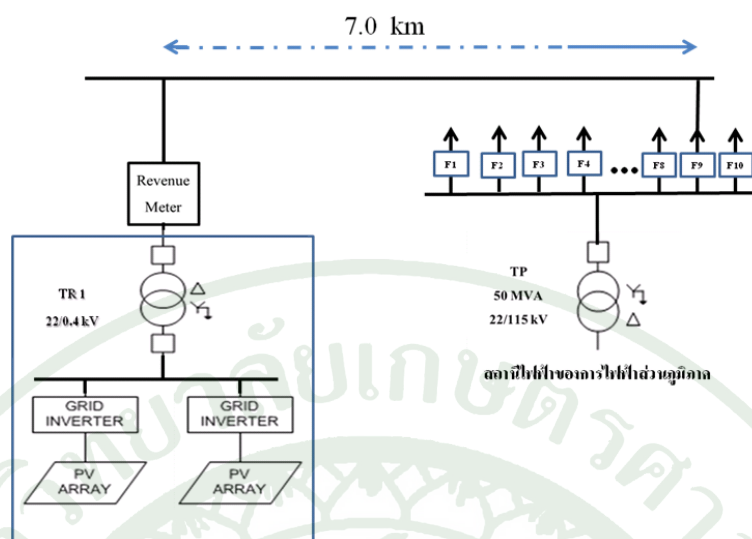
งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจริงจากผลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสู่ระบบจำหน่ายของ กฟภ. ที่ระดับแรงดัน 22 เควี โดยค่าโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าสามารถแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ

4.1 โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าสำหรับวัดประสิทธิภาพของวิธีการ

สำหรับข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าในส่วนนี้ใช้ข้อมูลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และส่งจ่ายสู่ระบบจำหน่ายของ กฟภ. ที่ สถานีไฟฟ้าบางปะหัน วงจรที่ 9 โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีพิกัดกำลังการผลิตที่ 8 เมกะวัตต์ โดยมีโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 35 และมีรูปแบบการเชื่อมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ. ดังภาพที่ 36



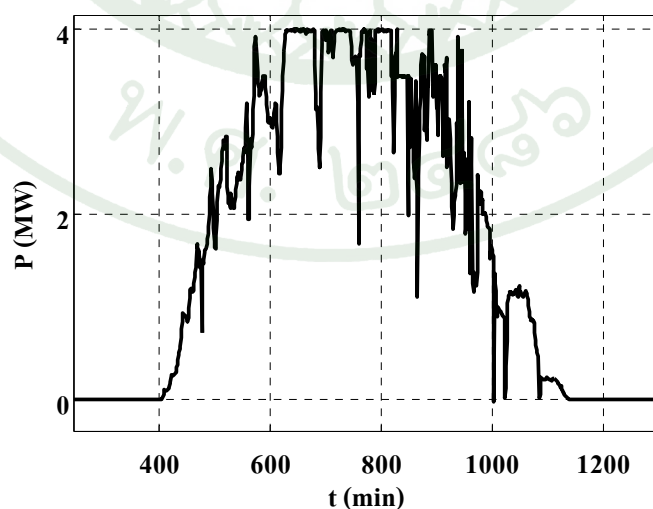
ภาพที่ 35 โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ที่สถานีไฟฟ้าบางปะหัน



ภาพที่ 36 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบจำหน่ายของ กฟภ.

4.2 โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำลอง

สำหรับโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าในส่วนนี้ใช้ข้อมูลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสู่ระบบจำหน่ายของ กฟภ. ที่สถานีไฟฟ้าย่อยแม่สะเรียง อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีพิกัดกำลังผลิตรวมสูงสุดที่ 4 เมกะวัตต์ และมีโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ที่สถานีไฟฟ้าย่อยแม่สะเรียง

โดยโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ได้จากการเลือกผลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในวันที่มีความถี่ของความผันผวนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการตรวจวัดทั้งหมด ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในภาคผนวก ข

5. แบบจำลองการประยุกต์ใช้วิธีการในระบบไฟฟ้ากำลัง

เนื่องจาก กฟภ. ได้จัดทำแผนพัฒนาระบบไฟฟ้า ในช่วงแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 11 โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาระบบไฟฟ้าให้มีความมั่นคง เพียงพอและทั่วถึงตามมาตรฐานคุณภาพการให้บริการและการพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าให้มีความพร้อมในการรองรับแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและพลังงานทดแทน และเทคโนโลยีการบริหารจัดการการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต โดยได้บรรจุโครงการพัฒนาระบบไฟฟ้าแบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กมาก ที่ อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน ซึ่งเป็นหนึ่งในโครงการในแผนพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าของ กฟภ. ให้เป็นโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ หรือ PEA Smart Grid ภายในระยะเวลา 15 ปี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟ ความเชื่อถือได้และคุณภาพของระบบไฟฟ้า

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานวิธีการกำหนดขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้งานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีการติดตั้งและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของ กฟภ. จริง เนื่องจากเหตุผลการวิเคราะห์การจ่ายไฟในปัจจุบันที่สำคัญของ กฟภ. ดังนี้คือ

1. ระบบไฟฟ้าที่ อ.แม่สะเรียง มีสถิติไฟฟ้าดับมากกว่า 20 ครั้งต่อปี มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ชำรุด การซ่อมบำรุงรักษาระบบจำหน่ายและภัยธรรมชาติ ตามลำดับ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2
2. ในช่วงโหลดสูง ต้องเดินเครื่องจักรดีเซลเพื่อช่วยเสริมแรงดัน
3. โซลาร์ฟาร์ม ไม่สามารถจ่ายขนานกับระบบจำหน่ายได้ในบางสถานการณ์ เนื่องจากแรงดันตก แรงดันเกิน หรือแรงดันไม่สมดุล
4. โซลาร์ฟาร์ม ไม่สามารถจ่ายขนานกับระบบจำหน่ายจากสถานีจอมทอง วงจรที่ 6 (ในกรณีที่การจ่ายไฟจากสถานีฮอดเกิดขัดข้อง)
5. ระบบไฟฟ้า อ.แม่สะเรียง มีกระแสลัดวงจรต่ำ (ประมาณ 100 ถึง 200 แอมแปร์) มีพิกัดกำลังการลัดวงจรต่ำ (ประมาณ 10 เมกกะโวลต์แอมแปร์) จึงเป็นระบบที่อ่อนแอมากทำให้การ

เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันมีค่าสูง เมื่อโหลดหรือแหล่งผลิตเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าและอาจทำให้ไม่สามารถสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ได้

6. ระบบไฟฟ้าที่มีกระแสลัดวงจรมีค่าต่ำมักมีปัญหาคุณภาพของแรงดัน เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงฉับพลัน โดยอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเช่น OLTC ไม่สามารถตอบสนองได้ทันหรือ

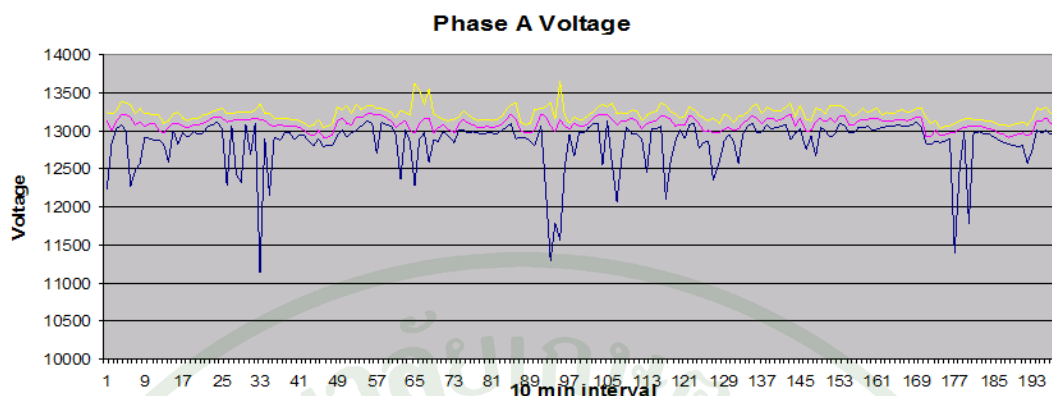
7. เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของระบบผลิตแบบกระจาย (Distribution Generation, DG) อย่างฉับพลันเช่น กรณีโซลาร์ฟาร์มภายใต้ภาวะเมฆมากบังแสงอาทิตย์ทำให้ส่งผลต่อแรงดันเปลี่ยนแปลงฉับพลันเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2 สถิติสาเหตุไฟฟ้าขัดข้องที่ อ.แม่สะเรียง

ข้อมูลการเดินเครื่องยนต์ตามสภาพเหตุการณ์ต่างๆ					
การไฟฟ้าสาขาแม่สะเรียง					
ที่	ดับไฟปฏิบัติงาน (ครั้ง)	ภัยธรรมชาติ (ครั้ง)	อุปกรณ์ในระบบชำรุด (ครั้ง)	เดินเครื่องเสริม (ครั้ง)	หมายเหตุ
1	9	8	5	0	ปี 2554
2	16	1	7	18	ปี 2555

ที่มา: กฟภ. (2556)

จากข้อสรุปข้างต้นของ กฟภ. ยังพบว่าในบางช่วงจากข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าด้วยมิเตอร์วัดคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality meter) บ่งชี้ปัญหาแรงดันไฟตก ตอนกลางวัน ของวันที่ 17 พ.ค. 2555 หลังจากการต่อเชื่อมโซลาร์ฟาร์มเข้าระบบ แสดงดังภาพที่ 38 เนื่องจากผู้ใช้ไฟฟ้าในเขต อ.แม่สะเรียง รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 เควี ที่ อ.ฮอด ผ่านวงจรที่ 9 มีระยะทางประมาณ 106 กม. ผ่านอุปกรณ์ควบคุมแรงดันในวงจร (Automatic Voltage Regulator, AVR) จำนวน 2 เครื่องติดตั้งอยู่กิโลเมตรที่ 37 และกิโลเมตรที่ 89 (แม่เหาะ) ซึ่งมีพิกัด 400 แอมแปร์ และ 300 แอมแปร์ ตามลำดับ จากผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระบบทำให้ AVR ที่ติดตั้งในระบบทำงานบ่อยครั้ง เพื่อปรับระดับของแรงดันของระบบจำหน่ายให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่ กฟภ. กำหนด โดยสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระบบดังกล่าวรวมถึงอาจเกิดจากสาเหตุของความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์ฟาร์มด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 38 ปัญหาแรงดันตกเนื่องจากการเชื่อมต่อโซลาร์ฟาร์ม

ที่มา: กฟภ. (2556)

โดยแบบจำลองระบบจำหน่ายที่ อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน มีรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ประกอบสำหรับกรณีศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีการในระบบไฟฟ้ากำลังในงานวิจัยดังต่อไปนี้

5.1 ข้อมูลการใช้ไฟ

การจ่ายไฟในเขต อ. แม่สะเรียง ประกอบไปด้วย 5 วงจรย่อย ซึ่งแต่ละวงจรย่อยมีระดับความสำคัญของโหลดในระบบจำหน่ายแตกต่างกัน โดยระดับความสำคัญของผู้ใช้ไฟฟ้าแสดงดังในตารางที่ 3

5.2 ความสามารถในการจ่ายไฟฟ้า

ความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าและระบบจำหน่ายในปัจจุบันเพื่อรองรับการจ่ายไฟฟ้าในเขต อ. แม่สะเรียงที่ใช้ประกอบการศึกษาในแบบจำลองสามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ระดับความสำคัญของผู้ใช้ไฟฟ้า ข้อมูลการจ่ายไฟและโหลด

ระดับความสำคัญ	วงจรย่อย	ผู้ใช้ไฟ	โหลด (เมกกะวัตต์)
ระดับ 1 (มากที่สุด)	2	- โรงพยาบาลแม่สะเรียง - ที่ว่าการ อ.แม่สะเรียง - ศาลจังหวัด - พื้นที่ในตัวอำเภอบางส่วน	0.9
ระดับ 2	3	- โรงแรมแหล่งท่องเที่ยว - ร้านอาหาร - สถานีตำรวจ - เทศบาล - พื้นที่ตัวอำเภอบางส่วน	0.9
ระดับ 3	1	- ศูนย์ราชการ อ.สบเมย - อ.แม่สะเรียง-สบเมย	1
ระดับ 4	4	- โรงเรียน - อ.แม่สะเรียง อ.แม่ขาม	1
ระดับ 5	5	- อ.แม่สะเรียง อ.แม่ลาน้อย	1.3
รวม			5.1

ที่มา: กฟภ. (2556)

ตารางที่ 4 แหล่งผลิตและระบบจำหน่ายในปัจจุบัน

แหล่งผลิต	ชนิด	ขนาด (เมกกะวัตต์)	หน่วยงาน
ระบบไฟฟ้าจากกริด	สายจำหน่าย 22 กิโลโวลต์	10	กฟภ.
โรงจักรแม่สะเรียง	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล	4 (จ่ายไฟฟ้าได้ 2.7)	กฟภ.
โรงไฟฟ้าพลังน้ำแม่สะเรียง	พลังน้ำ	1.5 (จ่ายได้ 0.2)	พพ.
นภัส โขลา, แม่สะเรียง โขลา	PV farm	4	เอกชน

ที่มา: กฟภ. (2556)

5.3 ข้อมูลความต้องการพลังงานของโหลด

ข้อมูลความต้องการพลังงานของโหลดที่ สถานีไฟฟ้าย่อยแม่สะเรียง แต่ละวงจร โดยพิจารณาตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ที่ 0.9 ที่ระดับแรงดัน 22kV แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความต้องการกำลังไฟฟ้าแต่ละวงจรของสถานีไฟฟ้าย่อยแม่สะเรียง

(เมกะวัตต์)

ชั่วโมงที่	วงจรย่อยที่ 1	วงจรย่อยที่ 2	วงจรย่อยที่ 3	วงจรย่อยที่ 4	วงจรย่อยที่ 5
0	0.5054	0.4548	0.4548	0.5054	0.6570
1	0.3871	0.3484	0.3484	0.3871	0.5032
2	0.3441	0.3097	0.3097	0.3441	0.4473
3	0.3333	0.3000	0.3000	0.3333	0.4333
4	0.3226	0.2903	0.2903	0.3226	0.4194
5	0.3763	0.3387	0.3387	0.3763	0.4892
6	0.5591	0.5032	0.5032	0.5591	0.7269
7	0.5054	0.4548	0.4548	0.5054	0.6570
8	0.5376	0.4839	0.4839	0.5376	0.6989
9	0.5806	0.5226	0.5226	0.5806	0.7548
10	0.6452	0.5806	0.5806	0.6452	0.8387
11	0.7204	0.6484	0.6484	0.7204	0.9366
12	0.6022	0.5419	0.5419	0.6022	0.7828
13	0.6344	0.5710	0.5710	0.6344	0.8247
14	0.8602	0.7742	0.7742	0.8602	1.1183
15	0.7742	0.6968	0.6968	0.7742	1.0065
16	0.7742	0.6968	0.6968	0.7742	1.0065
17	0.6667	0.6000	0.6000	0.6667	0.8667
18	0.6452	0.5806	0.5806	0.6452	0.8387
19	0.7204	0.6484	0.6484	0.7204	0.9366
20	0.8602	0.7742	0.7742	0.8602	1.1183
21	1.0000	0.9000	0.9000	1.0000	1.3000
22	0.7849	0.7065	0.7065	0.7849	1.0204
23	0.6129	0.5516	0.5516	0.6129	0.7968
24	0.5054	0.4548	0.4548	0.5054	0.6570

ที่มา: กฟภ. (2556)

โดยมีวัตถุประสงค์ของการจำลองสำหรับการจ่ายไฟในสภาวะปกติดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ศึกษาสภาวะการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของระบบจำลองที่เสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงเกินกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด
2. ศึกษาผลของความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากโซลาร์ฟาร์มต่อคุณภาพไฟฟ้าในด้านของแรงดันของระบบจำหน่ายของ กฟภ.
3. ศึกษาผลการทดสอบการใช้วิธีการที่นำเสนอ เพื่อกำหนดขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ให้เพียงพอต่อการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากโซลาร์ฟาร์ม เพื่อให้สามารถรักษาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายของ กฟภ. ให้อยู่ภายในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

ดังนั้นเพื่อให้ผลการทดสอบการทำงานของแบบจำลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการกำหนดเงื่อนไขการจำลองสำหรับสภาวะการจ่ายไฟปกติดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. กำหนดให้โซลาร์ฟาร์มและระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของ กฟภ. ที่จุดเชื่อมต่อเดียวกัน
2. การทดสอบให้ใช้ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของโซลาร์ฟาร์มในวันที่ที่มีความถี่ความผันผวนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากผลการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าในวันที่ 18 กรกฎาคม 2556
3. ช่วงเวลาการจำลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบกำหนดให้เป็นช่วงเวลาที่กำลังผลิตของโซลาร์ฟาร์มเพียงพอกับปริมาณความต้องการพลังงานของโหลดที่ อ.แม่สะเรียง ในช่วงเวลา 10.00 ถึง 14.00 น. เวลานอกเหนือจากนี้เป็นการใช้ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับงานปรับเรียบกำลังไฟฟ้าเท่านั้น
4. กำหนดให้ตัวปรับระดับแรงดันอัตโนมัติทั้งสองตั้งค่าเป้าหมายที่ 1.0 pu และ 1.023 pu ตามลำดับ และให้โหลดแต่ละวงจรมีค่าคงที่ที่ค่าความต้องการพลังงานสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 5
5. เครื่องกำเนิดที่เขื่อนแม่สะเรียงไม่มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากผลการศึกษาของ กฟภ. เครื่องกำเนิดดังกล่าวจะสามารถจ่ายไฟได้เมื่อมีการเก็บน้ำเพียงพอเท่านั้น (กฟภ., 2556)
6. โรงจักดิเซลแม่สะเรียงไม่มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตสำรองในกรณีเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสริมให้แก่ระบบจำหน่าย เมื่อแรงดันไฟฟ้าในระบบตกเกินเกณฑ์มาตรฐานที่ กฟภ. กำหนดเท่านั้น (กฟภ., 2556)

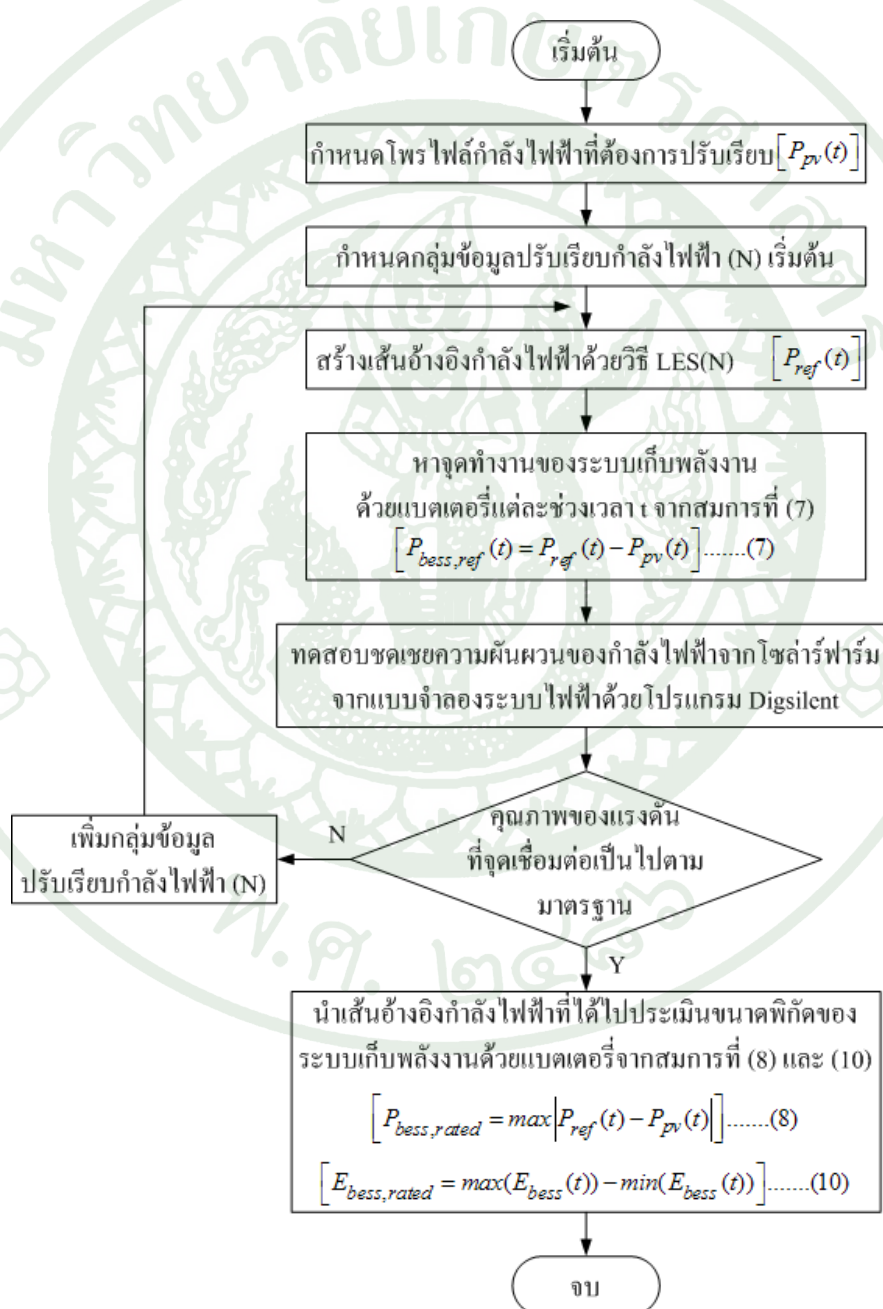
โดยมีวัตถุประสงค์ของการจำลองสำหรับการจ่ายไฟในสถานะแยกตัวอิสระดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ศึกษาสถานะการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันในสถานะคงตัวของระบบจำลองที่เสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงเกินกว่าเกณฑ์ตามที่มาตรฐานกำหนด
2. ศึกษาผลของความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากโซลาร์ฟาร์มที่มีต่อคุณภาพของแรงดันในระบบจำหน่ายของ กฟภ. ในสถานะคงตัว
3. ศึกษาผลการทดสอบการใช้วิธีการที่นำเสนอ เพื่อกำหนดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ให้เพียงพอต่อการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากโซลาร์ฟาร์ม เพื่อให้สามารถรักษาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายในสถานะคงตัวให้อยู่ภายในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด รองรับสถานะแยกตัวอิสระของระบบไฟฟ้าในกรณีมีการวางแผนล่วงหน้า

ดังนั้นเพื่อให้ผลการทดสอบการทำงานของแบบจำลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงได้มีการกำหนดเงื่อนไขการจำลองดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. กำหนดให้สถานีไฟฟ้าย่อยแม่สะเรียงและโครงข่ายไฟฟ้าโดยรอบถูกแยกตัวอิสระจากระบบจำหน่ายของ กฟภ. และอยู่ในช่วงสถานะคงตัว โดยจ่ายไฟเฉพาะวงจรที่ 1 ถึงวงจรที่ 4 เท่านั้น และให้โหลดแต่ละวงจรมีค่าคงที่ที่ค่าความต้องการพลังงานสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 5
2. ช่วงเวลาการจำลองกำหนดให้เป็นช่วงเวลา 10.00 ถึง 12.30 น. ซึ่งกำลังผลิตของโซลาร์ฟาร์มเพียงพอกับปริมาณความต้องการพลังงานของโหลดที่ อ.แม่สะเรียง
3. การทดสอบใช้ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของโซลาร์ฟาร์มในวันที่ 18 กรกฎาคม 2556 ซึ่งเป็นวันที่เกิดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่สูงสุดจากผลการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า
4. เครื่องกำเนิดที่เขื่อนแม่สะเรียงไม่มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากผลการศึกษาของ กฟภ. เครื่องกำเนิดดังกล่าวจะสามารถจ่ายไฟได้เมื่อมีการเก็บน้ำเพียงพอเท่านั้น (กฟภ., 2556)
5. โรงจกดีเซลแม่สะเรียงไม่มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตสำรองในกรณีเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสริมให้แก่ระบบจำหน่าย เมื่อแรงดันไฟฟ้าในระบบตกเกินเกณฑ์มาตรฐานที่ กฟภ. กำหนดเท่านั้น (กฟภ., 2556)
6. กำหนดให้ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่เป็นระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ทางอุดมคติ ดังนั้นระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จึงสามารถปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์ฟาร์มให้เป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างจากวิธีการที่นำเสนอได้

โดยขั้นตอนการหาเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เพื่อใช้เป็นเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับเป็นค่าเป้าหมายในการชดเชยความผันผวนของ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์ฟาร์ม และใช้ประกอบการประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงาน ด้วยแบตเตอรี่ในกรณีการจำลองการจ่ายไฟในสภาวะปกติ และการจำลองการจ่ายไฟในสภาวะ แยกตัวอิสระ มีขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ขั้นตอนการหาเส้นอ้างอิงเพื่อประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

ผลและวิจารณ์

ผล

ผลการทดสอบการทำงานของระบบจำลองที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

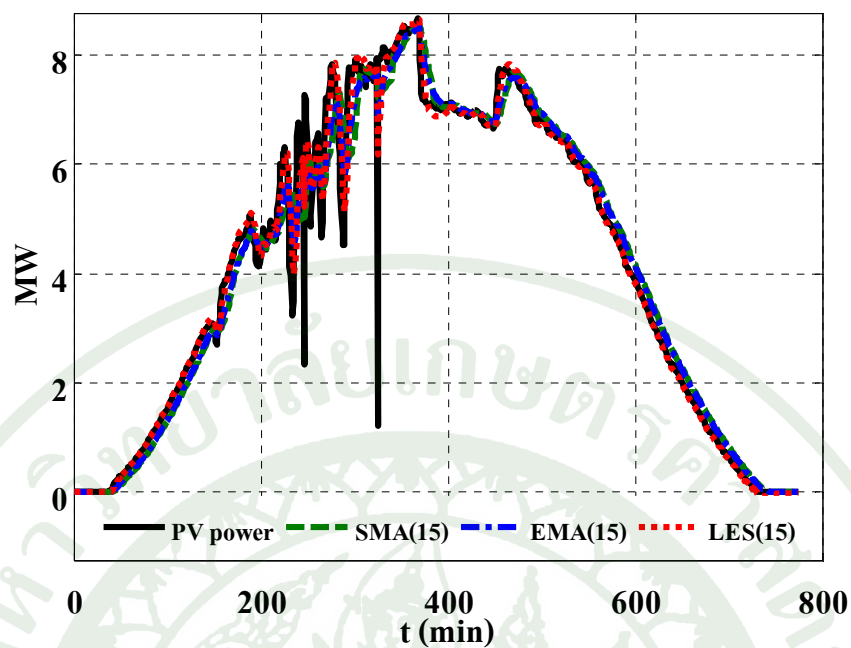
1. ผลการเปรียบเทียบวัดประสิทธิภาพของวิธีการ
2. ผลการการประยุกต์ใช้งานวิธีการที่นำเสนอในระบบไฟฟ้ากำลัง

1. ผลการเปรียบเทียบวัดประสิทธิภาพของวิธีการ

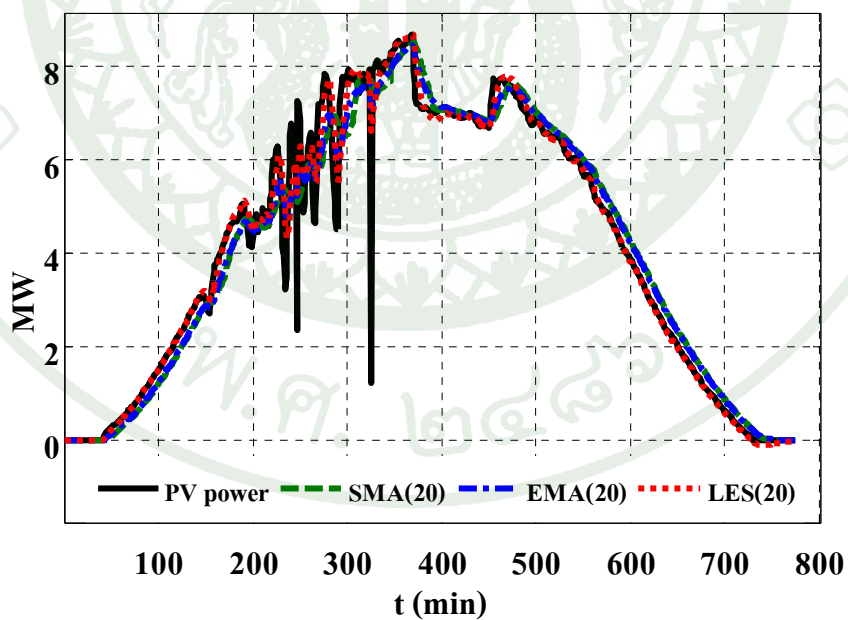
ผลการวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้กับวิธีการที่ใช้ในปัจจุบันได้มีการพิจารณาดำเนินการใน 3 ส่วนหลักคือ การลดการประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าของวิธีการทดสอบวัดประสิทธิภาพการควบคุมขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ของวิธีการ และการทดสอบวัดประสิทธิภาพการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าของวิธีการ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ผลการลดการประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าของวิธีการ

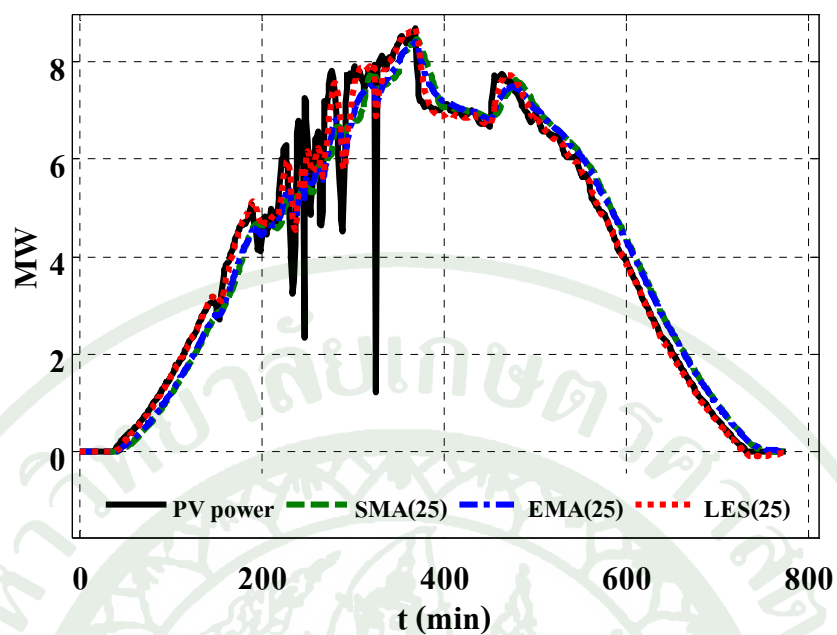
จากผลการทดสอบสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการที่ใช้ในปัจจุบันประกอบด้วยวิธี SMA และวิธี EMA ด้วยจำนวนกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้า (N) ที่ 15, 20, 25, 30, 40 และ 60 เห็นได้อย่างชัดเจนว่าความราบเรียบของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าแปรตามกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้า และผลของการเพิ่มขึ้นของกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าเป็นผลทำให้เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA และ EMA เกิดการประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าเลื่อนไปทางด้านขวาของโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และเมื่อดำเนินการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี LES ซึ่งเป็นวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ด้วยกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ 15, 20, 25, 30, 40 และ 60 เช่นกัน ผลที่ได้ทำให้การประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นลดลงจากวิธี SMA และวิธี EMA แสดงได้ดังภาพที่ 42 ถึง ภาพที่ 47 ตามลำดับ



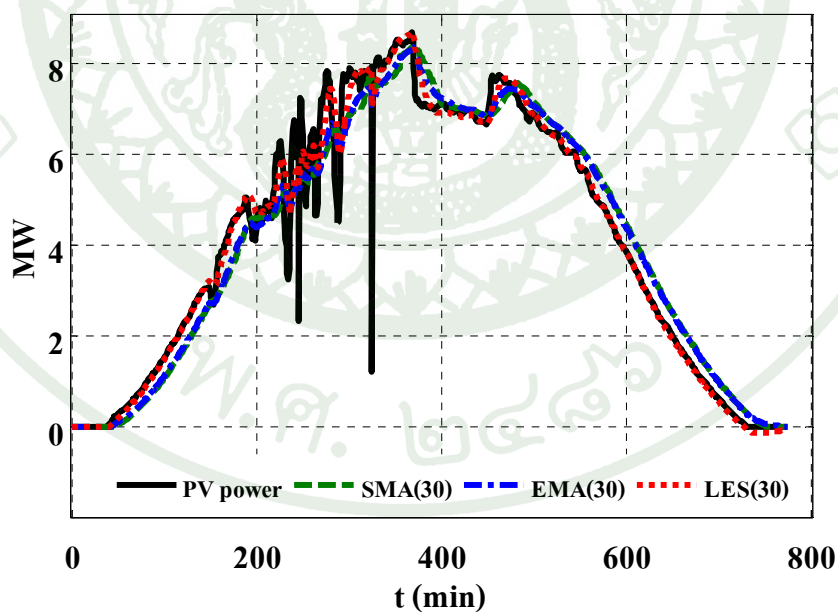
ภาพที่ 42 ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES ($N = 15$) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์



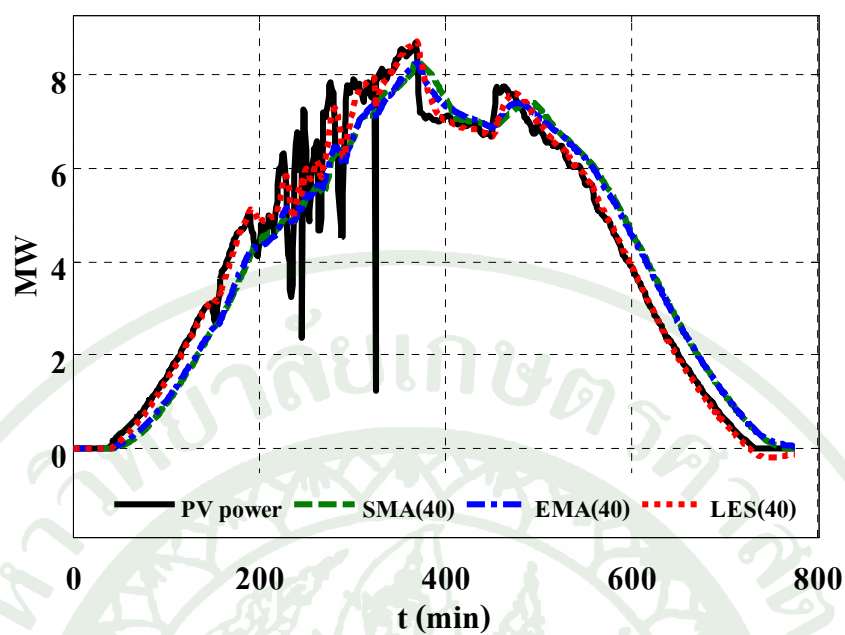
ภาพที่ 43 ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES ($N = 20$) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์



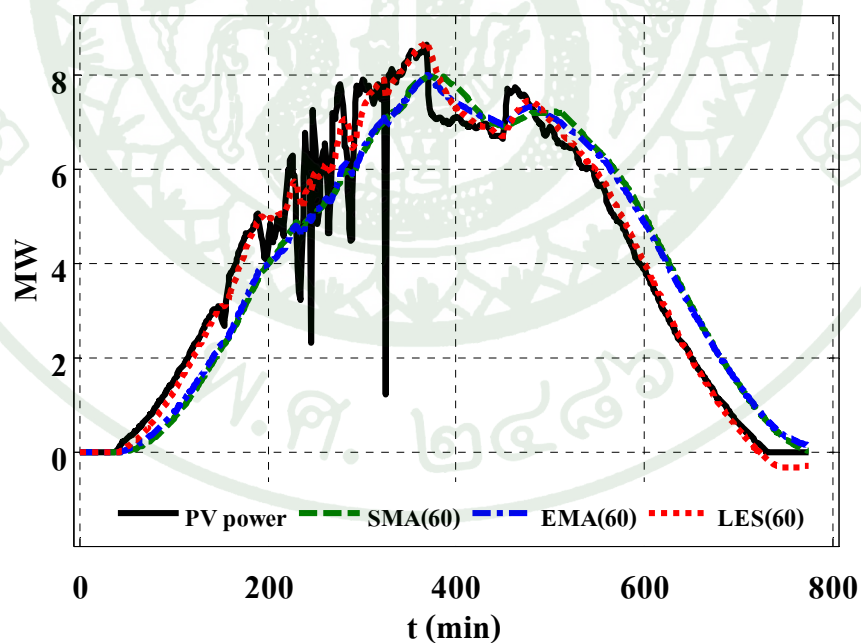
ภาพที่ 44 ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES ($N = 25$) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์



ภาพที่ 45 ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES ($N = 30$) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์



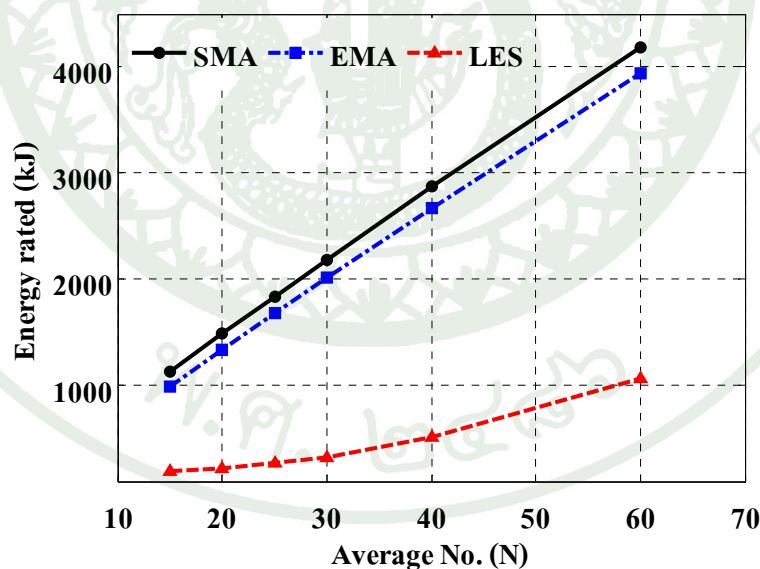
ภาพที่ 46 ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES ($N = 40$) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์



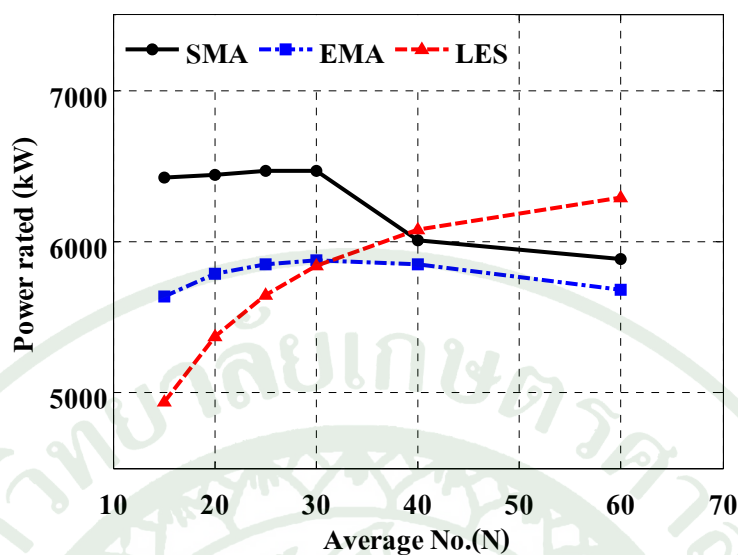
ภาพที่ 47 ข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และ LES ($N = 60$) เทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

1.2 การทดสอบวัดประสิทธิภาพในการลดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

จากเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และวิธี LES ดังกล่าวข้างต้น เมื่อพิจารณาให้เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้างกล่าวเป็นกำลังไฟฟ้าสุทธิหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ซึ่งทำงานได้เสมือนเป็นระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในทางอุดมคติ ทำให้สามารถนำเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นประกอบการประเมินหาขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่โดยใช้เทคนิคการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าได้ ซึ่งผลการคำนวณหาขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และวิธี LES ด้วยเทคนิคการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าจากข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่วัดได้จริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวข้างต้น เห็นได้ว่าทุกขนาดกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้านั้นคือ 15, 20, 25, 30, 40 และ 60 เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES ให้ขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้า (Energy rated) ของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ต่ำกว่าเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA และ EMA ทุกกรณีแสดงดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 กราฟขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของ BESS



ภาพที่ 49 กราฟพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

จากภาพที่ 49 ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ประเมินได้จากเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES ด้วยกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ 15, 20, 25 และ 30 ให้ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ประเมินได้จากเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA และวิธี EMA แต่เมื่อทำการทดสอบเพิ่มกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าเป็น 40 และ 60 ผลการประเมินขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ด้วยเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES ยังให้ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA และวิธี EMA

เพื่อให้เห็นความชัดเจนมากขึ้นสำหรับการพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมขนาดพิกัดพลังงานและกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ระหว่างวิธีการที่ใช้งานในปัจจุบันคือ วิธี SMA และวิธี EMA กับวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้คือ วิธี LES จึงได้จัดทำเป็นการเปรียบเทียบในรูปของเปอร์เซ็นต์การลดลงหรือการเพิ่มขึ้นของขนาดพิกัดพลังงานและกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ โดยเปอร์เซ็นต์ในทางบวก (+) เป็นค่าพิกัดที่วิธี LES สามารถลดลงได้จากวิธี SMA หรือวิธี EMA และเปอร์เซ็นต์ในทางด้านลบ (-) เป็นค่าพิกัดที่วิธี LES ให้ค่าเพิ่มขึ้นจากวิธี SMA หรือวิธี EMA ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

วิธี	พิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วย		ขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วย		
	แบตเตอรี่จากการคำนวณ		แบตเตอรี่ที่ลดลงเมื่อใช้วิธี LES		
	พิกัดกำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	พิกัดพลังงานไฟฟ้า (กิโลจูล)	กำลังไฟฟ้า (เปอร์เซ็นต์)	พลังงานไฟฟ้า (เปอร์เซ็นต์)	
SMA	15	6,419.5	1,136.9	23.12	82.94
	20	6,438.5	1,490.1	16.60	85.06
	25	6,466.1	1,841.1	12.63	85.35
	30	6,466.8	2,188.2	9.69	85.12
	40	6,009.5	2,871.9	-1.10	81.87
	60	5,885.5	4,182.4	-6.88	74.52
EMA	15	5,634.5	991.5	12.41	80.44
	20	5,785.9	1,338.3	7.19	83.37
	25	5,851.8	1,680.3	3.46	83.95
	30	5,872.4	2,017.6	0.55	83.87
	40	5,844.4	2,677.6	-3.96	80.56
	60	5,677.7	3,942.1	-10.79	72.96
LES	15	4,935.5	193.9	-	-
	20	5,369.7	222.6	-	-
	25	5,649.3	269.7	-	-
	30	5,840.3	325.5	-	-
	40	6,075.8	520.6	-	-
	60	6,290.5	1,065.9	-	-

จากตารางที่ 6 เห็นได้ว่าทุกกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าวิธี LES ให้ค่าพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ต่ำกว่าวิธี SMA และวิธี EMA โดยที่กลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้า 60 วิธี LES สามารถลดขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ลงจากวิธี SMA ได้มากกว่า 74 เปอร์เซ็นต์ และลดลงจากวิธี EMA ได้มากกว่า 72 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการควบคุมขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จากการใช้วิธี LES ได้อย่างชัดเจน ในส่วนของขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าวิธี LES สามารถให้ขนาดพิกัดที่ลดลงจากวิธี SMA และวิธี EMA ได้เช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามที่ขนาดกลุ่มข้อมูลปรับ

เรียบกำลังไฟฟ้าที่ 40 และ 60 วิธี LES ยังให้ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่สูงกว่าวิธี SMA และวิธี EMA เนื่องจากพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ประเมินได้ยังขึ้นกับความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก

1.3 การทดสอบวัดประสิทธิภาพในการปรับเรียบกำลังไฟฟ้า

การทดสอบวัดประสิทธิภาพในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในส่วนนี้เป็นการทดสอบวัดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (ΔP_{MAX}) ของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และวิธี LES เมื่อการเปลี่ยนแปลงกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ 15, 20, 25, 30 40 และ 60 โดยผลการวัดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นของแต่ละเส้นอ้างอิงไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 7 ถึงตารางที่ 12 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N = 15)

โพรไฟล์กำลังไฟฟ้า	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุด (กิโลวัตต์ต่อนาทีก)
PV profile	6,735.900
SMA(15)	736.124
EMA(15)	836.931
LES(15)	1,657.000

ตารางที่ 8 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N = 20)

โพรไฟล์กำลังไฟฟ้า	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุด (กิโลวัตต์ต่อนาทีก)
PV profile	6,735.900
SMA(20)	731.184
EMA(20)	737.134
LES(20)	1,270.400

ตารางที่ 9 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N = 25)

โพรไฟล์กำลังไฟฟ้า	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุด (กิโลวัตต์ต่อนาทีก)
PV profile	6,735.900
SMA(25)	732.385
EMA(25)	735.158
LES(25)	1,031.100

ตารางที่ 10 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N = 30)

โพรไฟล์กำลังไฟฟ้า	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุด (กิโลวัตต์ต่อนาทีก)
PV profile	6,735.900
SMA(30)	731.558
EMA(30)	735.158
LES(30)	867.701

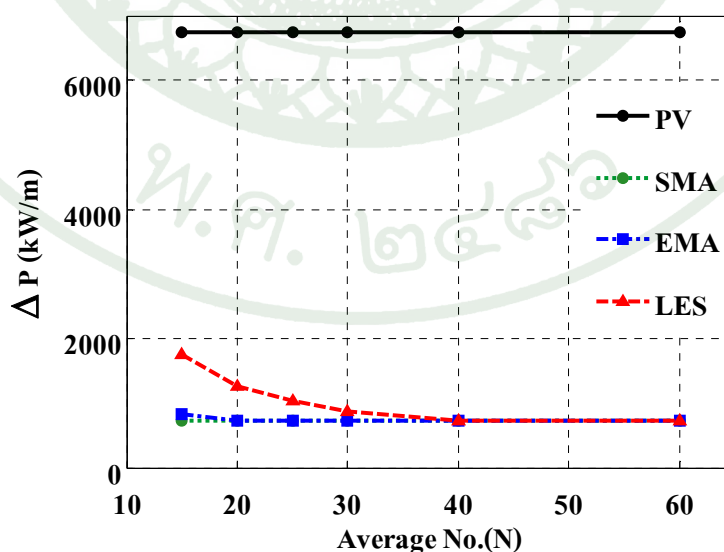
ตารางที่ 11 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N = 40)

โพรไฟล์กำลังไฟฟ้า	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุด (กิโลวัตต์ต่อนาทีก)
PV profile	6,735.900
SMA(40)	732.254
EMA(40)	734.364
LES(40)	736.516

ตารางที่ 12 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า (N = 60)

โพรไฟล์กำลังไฟฟ้า	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุด (กิโลวัตต์ต่ออนาติ)
PV profile	6,735.900
SMA(60)	728.721
EMA(60)	733.444
LES(60)	736.684

จากตารางที่ 7 ถึงตารางที่ 12 เห็นได้ว่าทุกๆ กลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ใช้สร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าวิธี SMA มีคุณสมบัติในการลดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ดีกว่าวิธี EMA และวิธี LES และที่จำนวนกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้ามีค่าน้อยวิธี LES ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูงสุดสูงกว่าวิธีอื่นๆ แต่เมื่อจำนวนกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นวิธี SMA, EMA และวิธี LES ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการลดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของวิธีการที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในภาพที่ 50 เห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่กลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ 40 และ 60 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้จากเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี SMA, EMA และวิธี LES มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก

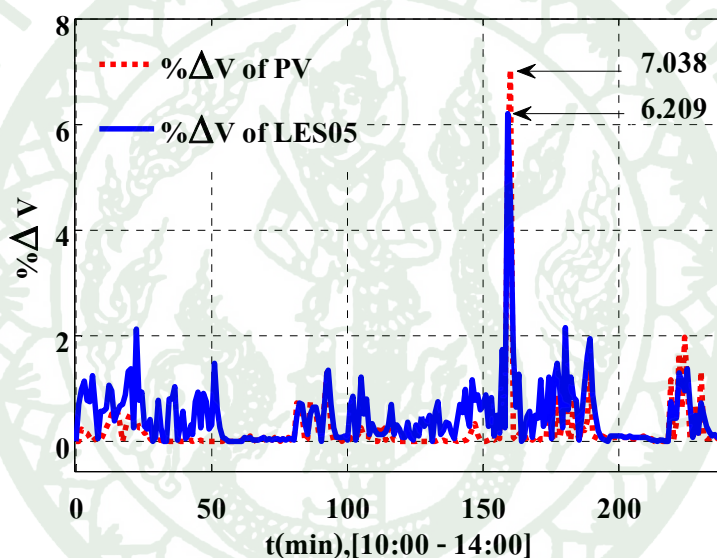


ภาพที่ 50 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละโพรไฟล์กำลังไฟฟ้า

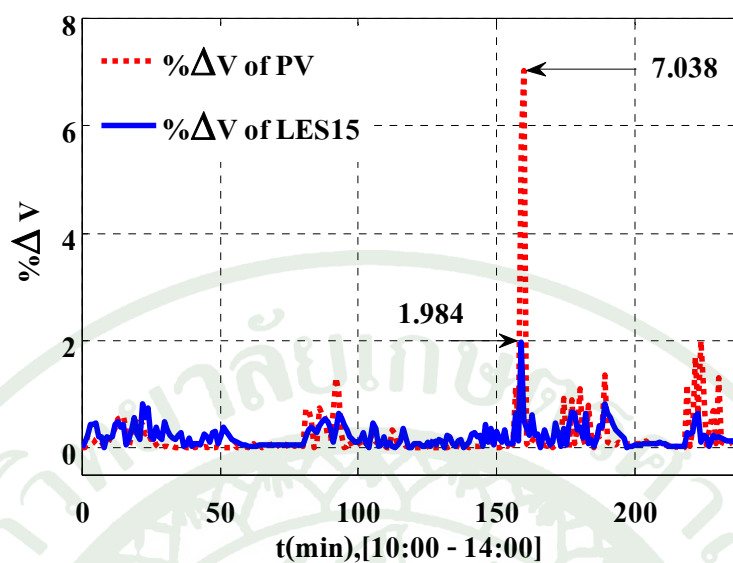
2. ผลการการประยุกต์ใช้งานวิธีการที่นำเสนอในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 การจ่ายไฟในสถานะปกติ

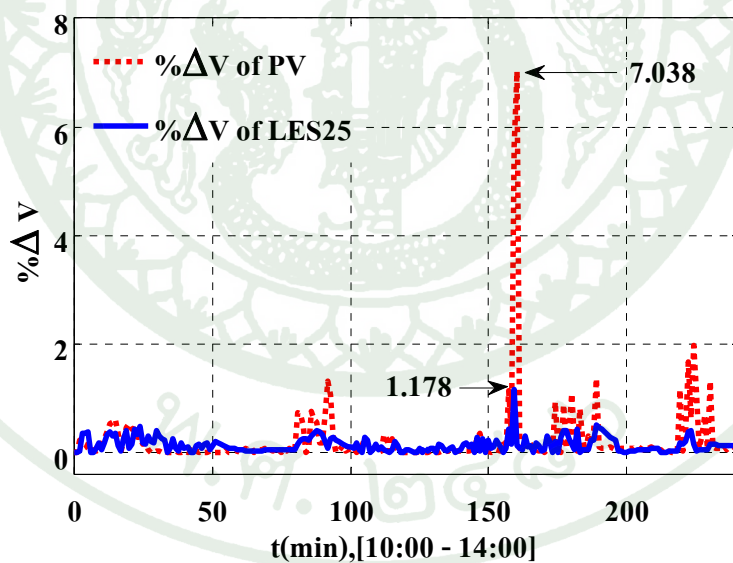
ผลการจำลองการประยุกต์ใช้งานวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้จำลองการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังที่ระดับแรงดัน 22 เควี ภายใต้เงื่อนไขการจำลองดังกล่าวข้างต้นทำให้ได้ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่จุดต่อร่วมแสดงดังภาพที่ 51 ถึงภาพที่ 53 และระดับแรงดันที่จุดต่อร่วมแสดงดังภาพที่ 54



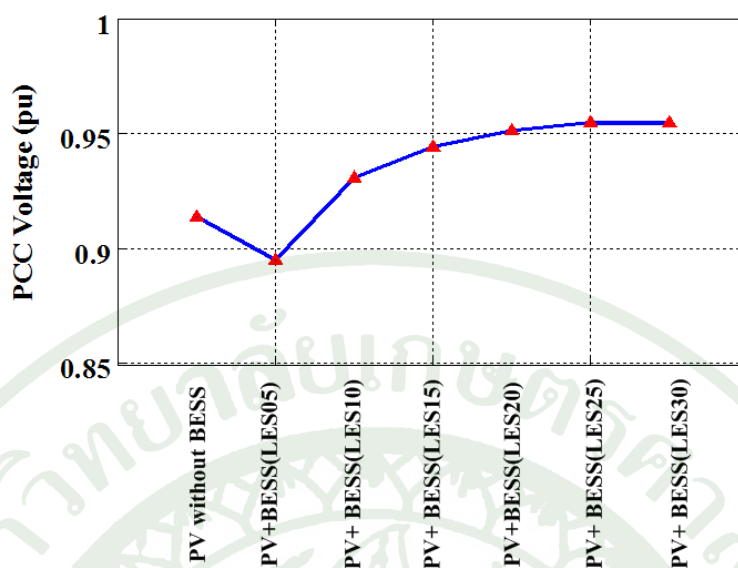
ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้า โดยใช้เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 5)



ภาพที่ 52 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 15)



ภาพที่ 53 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 25)



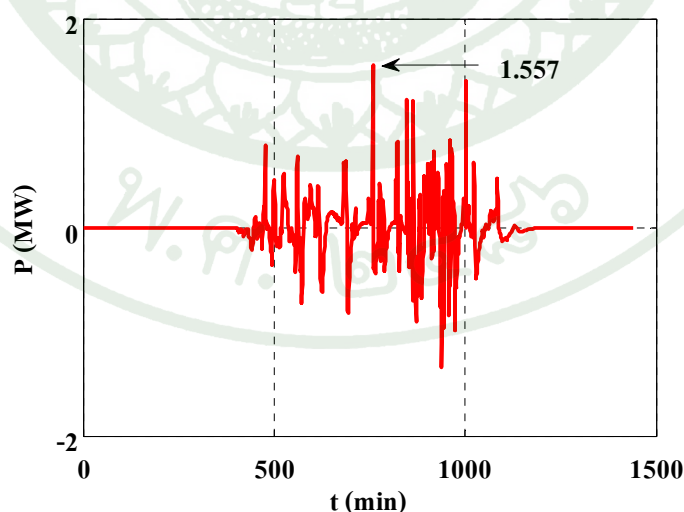
ภาพที่ 54 ระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

จากภาพที่ 51 ถึง ภาพที่ 53 เมื่อจำนวนกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น จากผลของการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีค่าลดลงจากก่อนได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้า โดยก่อนได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสูงถึง 7.038 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปกติตามมาตรฐานของ กฟภ. ได้มีการกำหนดไว้ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ หลังจากได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้กำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เมื่อกำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES โดยใช้กลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ 5, 15 และ 25 เป็นผลให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อลดลงที่ 6.209, 1.981 และ 1.178 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อแปรผกผันกับจำนวนกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้า

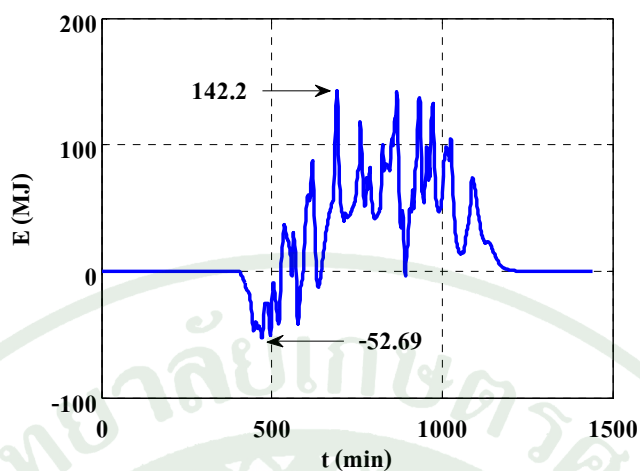
จากภาพที่ 54 เห็นได้ว่าการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แรงดันที่จุดเชื่อมต่อต่ำสุด 0.914 pu ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนด โดยตามหลักเกณฑ์การวางแผนระบบไฟฟ้าของ กฟภ. ได้มีการ

กำหนดขอบเขตของระดับแรงดันไว้ที่ ± 5 เฟอร์เซ็นต์ ของแรงดันพิกัด เมื่อได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES ด้วยระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ทางอุดมคติ ร่วมกับการปรับเปลี่ยนจำนวนกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าเป็น 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ผลทำให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีระดับที่สูงขึ้น และที่กำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่ LES20 ระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อเริ่มอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ของคุณภาพไฟฟ้าจึงควรมีการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิให้เป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่ LES25 ที่ให้ระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสูงขึ้นเป็น 0.955 pu

ดังนั้นการพิจารณาเลือกเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จึงเลือกเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า LES25 เนื่องจากการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่เกิดอย่างรุนแรงให้เป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้างกล่าวทำให้ระดับของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อต่ำสุดมีค่า 0.955 pu และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสูงสุดเพียง 1.178 เฟอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ภายในเกณฑ์ตามที่มาตรฐานกำหนด เมื่อนำเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้างกล่าวประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ทำให้ได้ขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าที่ 194.89 เมกกะจูน และได้ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ 1,557 กิโลวัตต์ โดยโดยกำลังและพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายจากระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในช่วงเวลาหนึ่งวันแสดงดังภาพที่ 55 และภาพที่ 56 ตามลำดับ



ภาพที่ 55 ผลของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในช่วงเวลาหนึ่งวันสำหรับสถานะการจ่ายไฟปกติ



ภาพที่ 56 ผลของการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าสะสมของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ในช่วงเวลาหนึ่งวันสำหรับสถานะการจ่ายไฟปกติ

ผลการประเมินขนาดพิกัดกำลังและพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ โดยจากภาพที่ 55 สามารถหาขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้จากค่าสูงสุดของกราฟ ดังนั้นขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่คือ 1,557 กิโลวัตต์ และจากภาพที่ 56 สามารถหาขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้จากผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของกราฟดังนี้

$$E_{\text{bess, rated}} = 142.2 \text{ MJ} - (-52.69 \text{ MJ}) = 194.89 \text{ MJ}$$

ดังนั้นได้ขนาดพิกัดพลังงานกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่คือ 194.89 เมกกะจูล หรือหาขนาดพิกัดพลังงานกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในหน่วยของวัตต์ชั่วโมงได้จาก

$$194.89 \text{ MJ} / 3600 = 54.136 \text{ kWh}$$

โดยผลของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ และขนาดพิกัดกำลังและพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES ด้วยกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 13

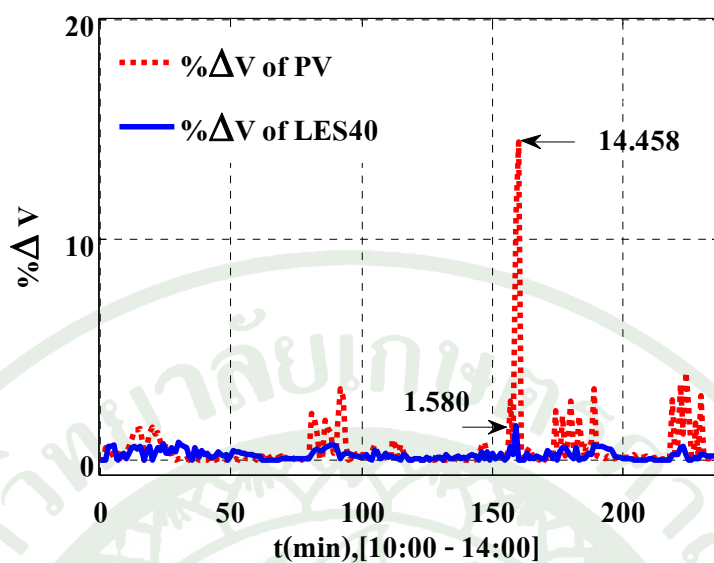
ตารางที่ 13 แรงดันที่จุดเชื่อมต่อก่อนและหลังชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าและขนาด
พิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับการจ่ายไฟในสภาวะปกติ

โพรไฟล์กำลังไฟฟ้า	ค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ		ขนาดพิกัดของระบบ เก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่	
	การเปลี่ยนแปลง ของแรงดันสูงสุด (เปอร์เซ็นต์)	แรงดันไลน์ต่ำสุด (pu)	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
PV without BESS	7.038	0.914	-	-
PV-LES05	6.209	0.895	19.571	777.4
PV-LES10	3.002	0.931	26.315	995.7
PV-LES15	1.985	0.944	36.579	1,261.1
PV-LES20	1.480	0.951	45.430	1,431.3
PV-LES25	1.178	0.955	54.136	1,557.0
PV-LES30	0.978	0.956	67.126	1,654.5

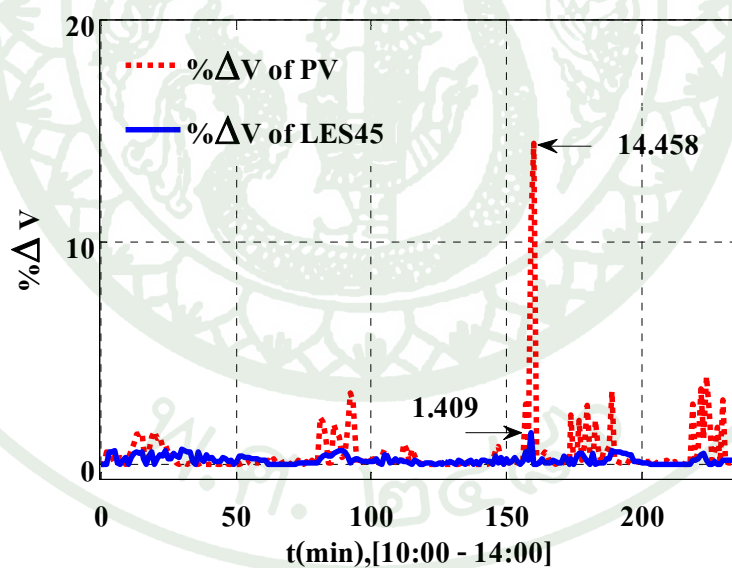
2.2 การจ่ายไฟในสภาวะแยกตัวอิสระ

สถานะนี้เป็นการจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในพื้นที่การจ่ายไฟของ
สถานีไฟฟ้าย่อยแม่สะเรียง เมื่อมีการแยกระบบโครงข่ายไฟฟ้าออกจากระบบจำหน่ายของ กฟภ.
และอยู่ในสภาวะคงตัว โดยมีวัตถุประสงค์การทดสอบเพื่อลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ชนิดเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อกำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายพลังงานทดแทน
ในช่วงที่กำลังการผลิตเพียงพอกับปริมาณความต้องการพลังงานของโหลดในระบบ

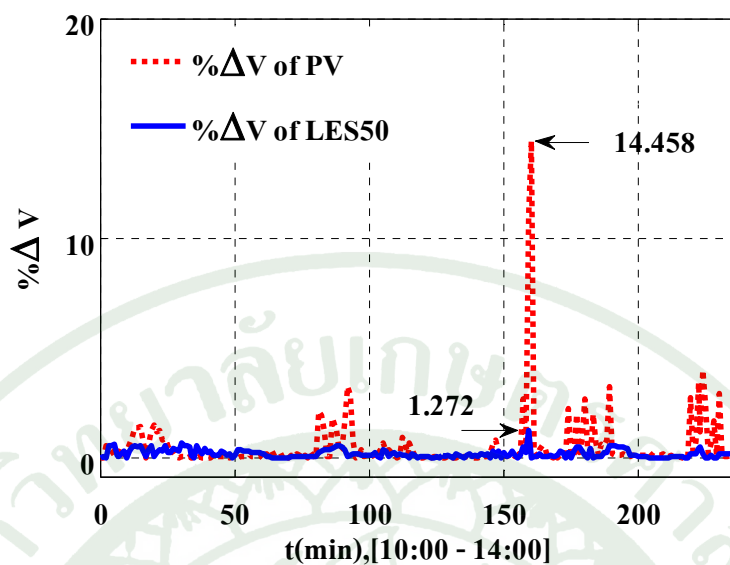
จากเงื่อนไขการจำลองดังกล่าวข้างต้นทำให้ได้ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ
เมื่อผลการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มี
กำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES ด้วยการเปลี่ยนแปลงกลุ่ม
ข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ค่าต่างๆ แสดงดังภาพที่ 57 ถึงภาพที่ 61 และระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ
แสดงดังภาพที่ 62



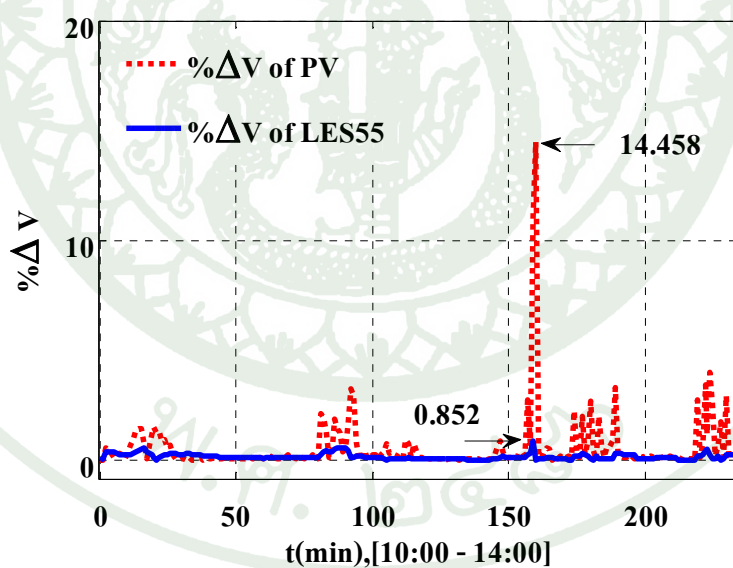
ภาพที่ 57 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 40)



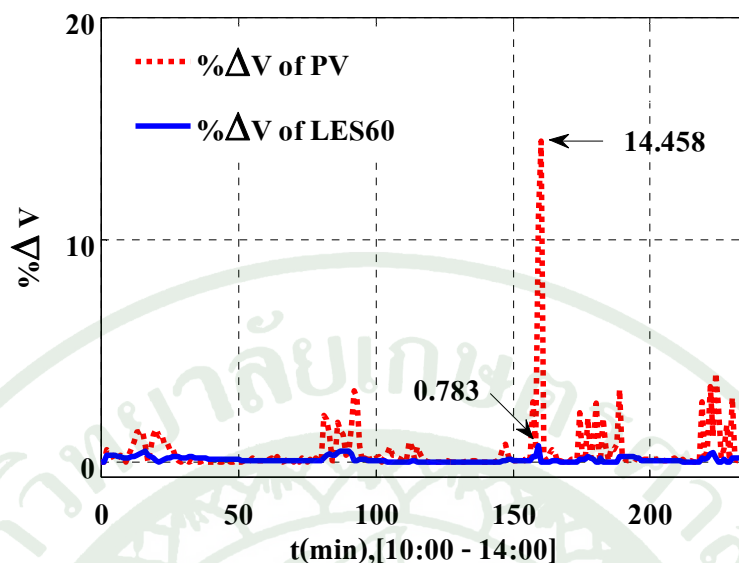
ภาพที่ 58 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 45)



ภาพที่ 59 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 50)

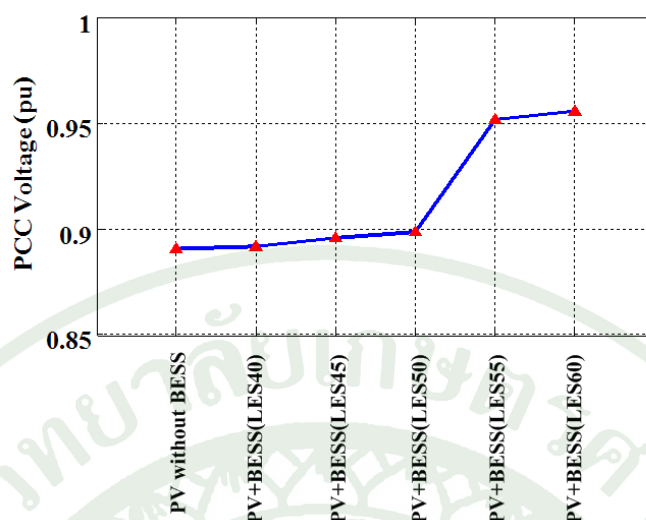


ภาพที่ 60 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 55)



ภาพที่ 61 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES (N = 60)

จากภาพที่ 57 ถึงภาพที่ 61 เมื่อจำนวนกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีค่าลดลงจากก่อนได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยก่อนได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่จุดเชื่อมต่อเนื่องจากความผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สูงถึง 14.458 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก และเกินกว่าค่าตามที่มาตรฐานกำหนด ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันในระบบขึ้นกับกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก โดยปกติตามมาตรฐานของ กฟผ. ได้มีการกำหนดไว้ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ หลังจากได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ให้มีกำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เมื่อกำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES ด้วยกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ 40, 45, 50, 55 และ 60 เป็นผลให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อลดลงอยู่ที่ 1.580, 1.409, 1.272, 0.852 และ 0.783 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อแปรผกผันกับจำนวนกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้า

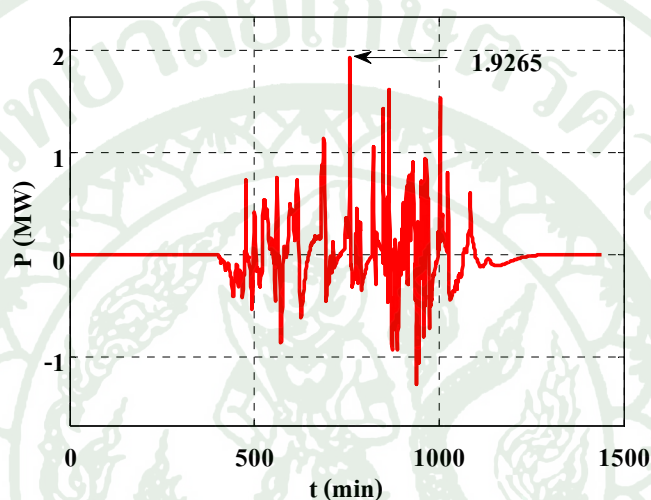


ภาพที่ 62 ระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อก่อนและหลังการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

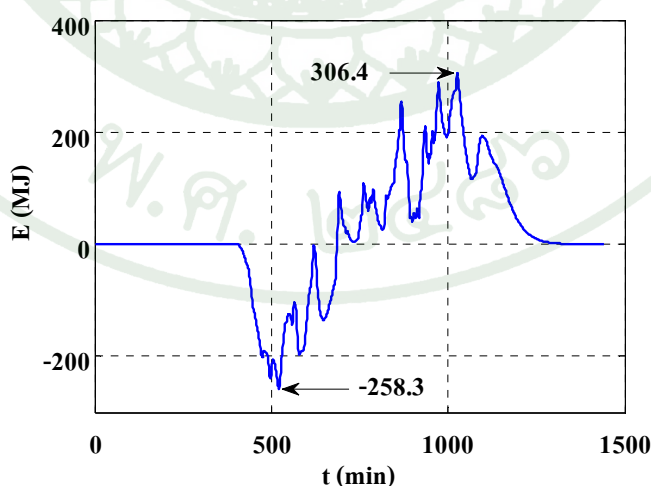
จากภาพที่ 62 เห็นได้ว่า ก่อนมีการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แรงดันที่จุดเชื่อมต่อต่ำสุดที่ 0.891 pu ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดมาก โดยตามหลักเกณฑ์การวางแผนระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้มีการกำหนดขอบเขตของระดับแรงดันไว้ที่ ± 5 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันปกติ เมื่อได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากวิธี LES ด้วยจำนวนกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้า 40, 45, 50, 55 และ 60 ผลทำให้ระดับของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสูงขึ้นตามลำดับ และที่ กำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่ LES55 ทำให้ระดับของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีค่า 0.952 pu ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ดังนั้นเพื่อรักษาคุณภาพไฟฟ้าให้อยู่ภายในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดจึงควรมีการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า LES55 เพื่อให้ผลการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าครอบคลุมทุกสภาวะการเกิดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าสูงสุด เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ดังนั้นการพิจารณาเลือกเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมประกอบการประเมินขนาดพิกัดของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จึงเลือกเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่ LES55 เนื่องจากเมื่อชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้างกล่าวทำให้ระดับของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อต่ำสุดมีค่า 0.952 pu และการ

เปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสูงสุดเพียง 0.852 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้อยู่ภายในเกณฑ์ตามมาตรฐานกำหนด เมื่อนำเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้างกล่าวประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้ขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าคือ 564.70 เมกกะจูล และขนาดพิกัดกำลัง ไฟฟ้าคือ 1,926.5 กิโลวัตต์ โดยกำลังและพลังงานไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในช่วงเวลาหนึ่งวัน แสดงได้ดังภาพที่ 63 และภาพที่ 64 ตามลำดับ



ภาพที่ 63 ผลของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายจากระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในช่วงเวลาหนึ่งวันสำหรับการจ่ายไฟในสภาวะแยกตัวอิสระ



ภาพที่ 64 ผลของการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าสะสมของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในช่วงเวลาหนึ่งวันสำหรับการจ่ายไฟในสภาวะแยกตัวอิสระ

ผลการประเมินขนาดพิกัดกำลังและพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ จากภาพที่ 63 จากค่าสูงสุดทำให้ได้ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่คือ 1.9265 เมกกะวัตต์ และจากภาพที่ 64 สามารถหาขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้จากผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของกราฟดังนี้

$$E_{\text{bess, rated}} = 306.4 \text{ MJ} - (-258.3 \text{ MJ}) = 564.7 \text{ MJ}$$

ดังนั้นสามารถหาขนาดพิกัดพลังงานกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในหน่วยของวัตต์ชั่วโมงได้จาก

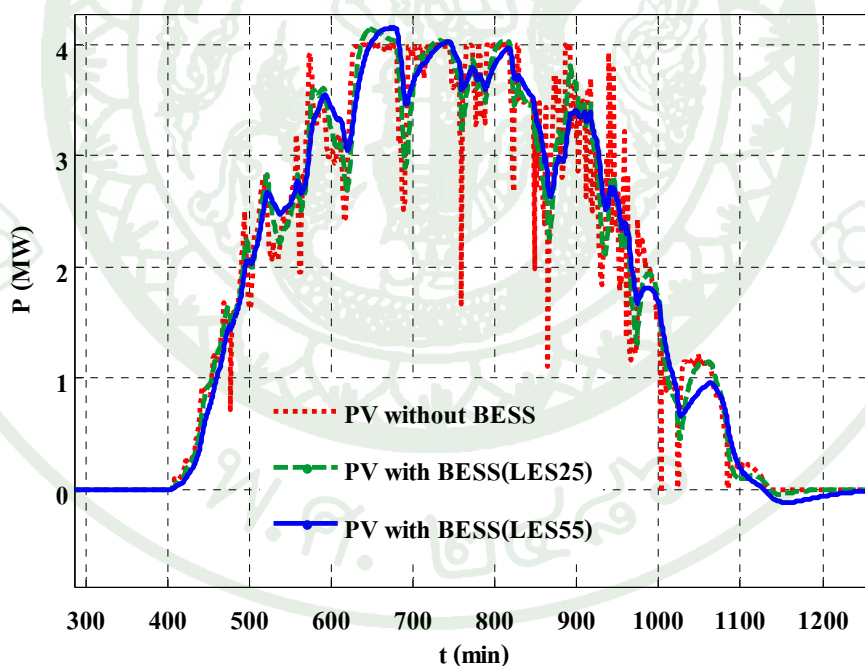
$$564.7 \text{ MJ} / 3600 = 156.861 \text{ kWh}$$

โดยผลของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ และขนาดพิกัดกำลังและพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นไปตามเส้นอ้างอิงที่สร้างจากวิธี LES ด้วยกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 แรงดันที่จุดเชื่อมต่อก่อนและหลังชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าและขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในสภาวะแยกตัวอิสระ

โพรไฟล์กำลังไฟฟ้า	ค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ		ขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่	
	การเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุด (เปอร์เซ็นต์)	แรงดันไลน์ต่ำสุด (pu)	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
PV without BESS	14.458	0.891	-	-
PV-LES40	1.580	0.892	97.488	1,793.8
PV-LES45	1.409	0.896	115.108	1,845.1
PV-LES50	1.272	0.899	134.781	1,888.5
PV-LES55	0.852	0.952	156.861	1,926.5
PV-LES60	0.783	0.956	179.512	1,960.6

จากผลการประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ เพื่อใช้งานชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแสดงผลการเลือกเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมทั้ง 2 กรณีศึกษาในแบบจำลองระบบไฟฟ้าของ กฟภ. โดยเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า LES25 เป็นเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่กรณีจ่ายไฟในสภาวะปกติหรือเป็นกำลังไฟฟ้าสุทธิหลังได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และได้เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า LES55 เป็นเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่กรณีจ่ายไฟในสภาวะแยกตัวอิสระ ซึ่งขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ประเมินได้ทั้งสองกรณีศึกษาดังกล่าวเป็นขนาดที่เพียงพอต่อการรักษาคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาให้อยู่ภายในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าทั้งสองเปรียบเทียบกับโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ก่อนได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังภาพที่ 65



ภาพที่ 65 โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ก่อนและหลังได้รับการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าสำหรับกรณีศึกษา

วิจารณ์

จากผลการวิเคราะห์วิธีการในงานวิจัยนี้พบว่า วิธีการที่นำเสนอสามารถลดปัญหาการประวิงของเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากวิธีการที่ใช้ในปัจจุบันได้ เบื้องต้นผู้วิจัยคาดว่าวิธีการที่นำเสนอจะต้องมีประสิทธิภาพในการควบคุมทั้งขนาดพิกัดพลังงานและกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ได้ทุกกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ใช้สร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า จากผลการทดสอบประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ได้จากโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์พบว่า ประสิทธิภาพในการควบคุมขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ของวิธีการที่นำเสนอสูงกว่าวิธีการที่ใช้ในปัจจุบันทุกๆ กลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้า ในขณะที่ประสิทธิภาพในการควบคุมขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีค่าลดลงเมื่อกลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ประเมินได้นั้นขึ้นกับความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก อย่างไรก็ตามสำหรับการประยุกต์ใช้งานวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จริงในระบบไฟฟ้ากำลังให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด จากผลการจำลองใช้กลุ่มข้อมูลปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ไม่สูงก็เพียงพอสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดได้ ดังนั้นการประเมินขนาดพิกัดกำลังและพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าจึงไม่ได้เป็นการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีความราบเรียบมากที่สุดเท่าที่นั่นยังต้องมีการพิจารณาผลการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามเกณฑ์ตามมาตรฐานกำหนดด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อให้ขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ประเมินได้มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยในครั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการลดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ได้ขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อไปตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด โดยใช้วิธีการปรับเรียบแบบเลขชี้กำลังเชิงเส้นสำหรับสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้า เพื่อเป็นเป้าหมายในการชดเชยความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จากผลการใช้เส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้างดกล่าวประกอบการประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคการสร้างเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าและผลการจำลองการประยุกต์ใช้วิธีการในระบบไฟฟ้ากำลัง เห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการลดขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่สูงกว่าวิธีการที่ใช้ในปัจจุบันมาก โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อขนาดพิกัดพลังงานและกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ประเมินได้จากวิธีการที่นำเสนอประกอบไปด้วย โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีผลโดยตรงต่อขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และมาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนดความเพียงพอสำหรับการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีกำลังไฟฟ้าสุทธิเป็นไปตามเส้นอ้างอิงกำลังไฟฟ้าที่กำหนด ซึ่งเป็นผลให้ได้ขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับใช้ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังอย่างแท้จริง และสุดท้ายสำหรับการยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ และประเมินขนาดพิกัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ของงานวิจัยในครั้งนี้ได้จำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นหลัก

ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่มีความผันผวนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าโดย กฟภ. ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ กฟภ. จริง โดยปกติแล้วความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีความไม่แน่นอนสูง แปรเปลี่ยนตามสภาพอากาศ ดังนั้นการใช้งานจริงอาจต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มความถูกต้องของผลการประเมินขนาดฟักัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ได้ อย่างไรก็ตามสำหรับงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการนำเสนอวิธีการที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดขนาดฟักัดของระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ลงจากวิธีการที่ใช้ในปัจจุบัน และต้องการให้การกำหนดขนาดฟักัดของระบบเก็บพลังงานที่ได้ข้างต้นครอบคลุมทุกชนิดแบตเตอรี่จึงกำหนดให้ระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ทดสอบเป็นอุปกรณ์ทางอุดมคติ ดังนั้นการนำวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ไปใช้ในงานจริงควรมีการพิจารณาในเรื่องประสิทธิภาพการเก็บและคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละชนิดร่วมด้วย ซึ่งชนิดของแบตเตอรี่ที่ใช้นั้นต้องมีความเหมาะสม และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานด้วยเช่นกัน อีกประการหนึ่งการใช้งานระบบเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่สำหรับสถานะแยกตัวอิสระจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลักในสถานะคงตัวนั้นจำเป็นต้องใช้ขนาดฟักัดของระบบเก็บพลังงานที่สูงกว่าในสถานะจ่ายไฟปกติถึงประมาณ 3 เท่า ดังนั้นสำหรับการใช้งานจริงควรมีการพิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุนร่วมด้วย เนื่องจากสถานะแยกตัวอิสระเกิดในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2551. ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบ
โครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, กรุงเทพฯ.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2553. หลักเกณฑ์การวางแผนระบบไฟฟ้า (Power System Planning
Criteria, PSPC). การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, กรุงเทพฯ.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2556. โครงการศึกษาความเหมาะสมการพัฒนาระบบไฟฟ้าแบบโครงข่าย
ไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Micro Grid) ที่ อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค,
กรุงเทพฯ.
- Akatsuka, M., R. Hara, H. Kita, T. Ito, Y. Ueda, S. Miwa, N. Matsuno, K. Takitani and M. Saito.
2010. Suppression of Large-scaled PV Power Station Output Fluctuation using Sodium-
Sulfur Battery. **IEEJ Transaction on PE** 130(2): 223-231.
- _____, _____, _____, _____ and Y. Saito. 2011. Estimation of Battery
Capacity for Fluctuation Suppression of a PV Power Station Output. **IEEJ Transaction
on PE** 131(1): 87-93.
- Araki, I., M. Tatsunokuchi, H. Nakahara and T. Tomita. 2009. Bifacial PV system in Aichi
Airport- site demonstrative research plant for new energy power generation. **Solar
Energy Materials and Solar Cells** 2009 93(6-7): 911-916.
- Barton, J. P. and D. G. Infield. 2004. Energy storage and its use with intermittent renewable
energy. **IEEE Transaction on Energy Conversion** 19(2): 441-448.
- Baxter, R. 2006. **Energy Storage - A Nontechnical Guide**. PennWell Corporation, Oklahoma.

Bergan, A.R. and V. Vittal. 2000. **Power System Analysis**. Prentice Hall, USA.

Gonzalez, A., B. Ó'Gallachóir, E. McKeogh and K. Lynch. 2004. Study of Electricity Storage Technologies and Their Potential to Address Wind Energy Intermittency in Ireland. **Final Report 2004**. 140.

Han, C., A.Q. Huang, M.E. Baran, S. Bhattacharya, W. Litzenberger, L. Anderson, A.L. Johnson and A.A. Edris. 2008. STATCOM Impact Study on the Integration of a Large Wind Farm into a Weak Loop Power System. **IEEE Transaction on Energy Conversion** 23(1): 226-233.

John, T. Mentzer. 1988. Forecasting with Adaptive Extended Exponential Smoothing, pp. 62-70. **Journal of the Academy of Marketing Science of Virginia Polytechnic Institute and State University**.

Meiqin, M., D. Ming, Su Jianhui, L. Chang, S. Min and Z. Guorong. 2008. Testbed for microgrid with multi-energy generators, pp 637-640. **Canadian conference on electrical and computer engineering 2008**.

Norris, B. L., G.J. Ball, P. Lex and V. Scaini. 2002. Grid-Connected Solar Energy Storage Using The Zinc-Bromine Flow Battery. **ZBB Energy Corporation Technical Paper 2002**.

Ribeiro, P. F., B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy and Y. L. Liu. 2001. Energy storage systems for advanced power application. **IEEE Transaction** 89(12): 1744-1756.

Saadat, H. 2004. **Power System Analysis**. Mc Graw Hill, Singapore.

Sadegh Shajari and Reza Key Pour. 2012. Reduction of Energy Storage System for Smoothing Hybrid wind-PV Power Fluctuation. **IEEE IEEEIC 2012**: 115-117.

Sheikh, M.R.I., M. A. Motin, M. A. Hossain and M. Shahed. 2012. Reference Power Selection for Smoothing Wind Power Fluctuations with Reduced Energy Capacity. **IEEE ICECE 2012**: 746-749.

Teleke, S., M. E. Baran, A. Huang, S. Bhattacharya and L. Anderson. 2009. Control Strategies for Battery Energy Storage for Wind Farm Dispatching. **IEEE Transaction on Energy Conversion** 24(3): 725-732.

_____, _____, _____, _____ and _____. 2010. Optimal Control of Battery Energy Storage for Wind Farm Dispatching. **IEEE Transaction on Energy Conversion** 25(3): 787-794.

_____, _____, S. Bhattacharya and A. Q. Huang. 2010. Rule-Based Control of Battery Energy Storage for Dispatching Intermittent Renewable Sources. **IEEE Transactions on SUSTAINABLE ENERGY** 1(3): 117-124.

Watanabe, R., Y. Ito, Y. Hida, R. Yokoyama, K. Iba and T. Tsukada. 2012. Optimal Capacity Selection of Hybrid Energy Storage Systems for Suppressing PV Output Fluctuation. **IEEE PES ISGT ASIA 2012**: 1-5.



ภาคผนวก



จากแบบจำลองระบบจำหน่ายของ กฟภ. ทั้ง 2 สภาวะที่ใช้ศึกษาโดยใช้โปรแกรม Digsilent การกำหนดพารามิเตอร์ภายในของอุปกรณ์ต่างๆ ในแบบจำลองสามารถแสดงรายละเอียดดังนี้

1. แบบจำลองระบบไฟฟ้าจากภายนอก (External Grid)

โดยข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้แบบจำลองระบบไฟฟ้าจากภายนอกในระบบจำลอง แสดงได้ดังภาพผนวกที่ ก1

		DIGSILENT PowerFactory 14.1.3	Project:
			Date: 3/20/2014
Grid:Grid	Syst.Stage:Grid		Annex: / 1
Hot_Sub	External Grid	1	/1
Bus Type	SL		
Input Mode	P, Q		
Setpoint	local		
Operation Point			
Angle		0.0000	deg
Voltage Setpoint		1.0000	p.u.
Reference Busbar			
Use for calculation	Max. Values		
Max. Values			
Short-Circuit Power Sk''max		131.1578	MVA
Short-Circuit Current Ik''max		3.4420	kA
c-Factor (max.)		1.1000	
X/R Ratio (max.)		6.5789	
Impedance Ratio			
Z2/Z1 max.		1.0000	
X0/X1 max.		0.5910	
R0/X0 max.		0.0392	

ภาพผนวกที่ ก1 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองระบบไฟฟ้าจากภายนอก

2. แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

โดยข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำลองแสดงได้ดังภาพผนวกที่ ก2

	DigSILENT PowerFactory 14.1.3	Project: Date: 3/20/2014
Grid:MicrogridMSR_Ca Syst.Stage:MicrogridMSR_Ca	Annex:	/ 1
PV_sys1	Static Generator	1 /1
Category	Photovoltaic	
Number of parallel Machines		1
Ratings		
Nominal Apparent Power		5.0000 MVA
Power Factor		0.8000
Corresponding Bus Type	PQ	
Local Voltage Controller	Power Factor	
External Station Controller		
Dispatch	Default	
Input Mode		
Active Power		0.0000 MW
Reactive Power		0.0000 Mvar
Voltage		1.0000 p.u.
Prim. Frequency Bias		0.0000 MW/Hz
Reactive Power Limits		
Capability Curve		
Min.		0.0000 p.u.
Max.		1.0000 p.u.
Minimum		0.0000 Mvar
Maximum		5.0000 Mvar
Scaling Factor (min.)		100.0000 %
Scaling Factor (max.)		100.0000 %
Active Power		
Min.		0.0000 MW
Max.		4.0000 MW

ภาพผนวกที่ ก2 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองระบบระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

3. แบบจำลองตัวรักษาระดับแรงดันอัตโนมัติ (Auto Voltage Regulator, AVR)

โดยข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้แบบจำลองตัวรักษาระดับแรงดันอัตโนมัติ ทั้ง 2 ชุดในระบบจำลอง แสดงดังภาพผนวกที่ ก3 และภาพผนวกที่ ก4 ตามลำดับ

		DigSILENT PowerFactory 14.1.3	Project:
			Date: 3/20/2014
Grid:Grid	Syst.Stage:Grid		Annex: / 2
AVR_1	2-Winding Transformer	1	/5
Type	...ry\Library\2-Winding Transformer Type		
External Star Point	No		
Number of parallel Transformers	1		
Rating Factor	1.0000		
Tap			
According to Measurement Report	Yes		
Additional Voltage per Tap	-1.2500 %		
Phase of du	0.0000 deg		
Tap Position	10		
External Tap Controller			
Automatic Tap Changing	Yes		
Tap Changer	1		
Controlled Node	LV		
Phase	a-b		
Control Mode	V		
Setpoint	local		
Voltage Setpoint	1.0000 p.u.		
Controller Time Constant	0.5000 s		
Thermal Loading Limit			
Max. Loading	100.0000 %		
Technology	Three Phase Transformer		
Rated Power	16.0000 MVA		
Nominal Frequency	50.0000 Hz		
Rated Voltage			
HV-Side	22.0000 kV		
LV-Side	22.0000 kV		
Positive Sequence Impedance			
Short-Circuit Voltage uk	3.0000 %		
Copper Losses	0.0000 kW		
Vector Group			
HV-Side	YN		
LV-Side	YN		
Internal Delta Winding	No		
Phase Shift	0 *30deg		

ภาพผนวกที่ ก3 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวรักษาระดับแรงดันแบบอัตโนมัติชุดที่ 1 (AVR1)

		DIGSILENT PowerFactory 14.1.3	Project:	
			Date: 3/20/2014	
Grid:Grid	Syst.Stage:Grid		Annex:	/ 3
AVR_2		2-Winding Transformer		2 /5
Type	...ry\Library\2-Winding Transformer Type			
External Star Point	No			
Number of parallel Transformers	1			
Rating Factor	1.0000			
Tap				
According to Measurement Report	Yes			
Additional Voltage per Tap		-1.2500	%	
Phase of du		0.0000	deg	
Tap Position		5		
External Tap Controller				
Automatic Tap Changing	Yes			
Tap Changer	0			
Controlled Node	LV			
Phase	a-b			
Control Mode	V			
Setpoint	local			
Voltage Setpoint		1.0230	p.u.	
Lower Voltage Bound		0.9900	p.u.	
Upper Voltage Bound		1.0500	p.u.	
Controller Time Constant		0.5000	s	
Thermal Loading Limit				
Max. Loading		100.0000	%	
Technology	Three Phase Transformer			
Rated Power		16.0000	MVA	
Nominal Frequency		50.0000	Hz	
Rated Voltage				
HV-Side		22.0000	kV	
LV-Side		22.0000	kV	
Positive Sequence Impedance				
Short-Circuit Voltage uk		3.0000	%	
Copper Losses		0.0000	kW	
Vector Group				
HV-Side	YN			
LV-Side	YN			
Internal Delta Winding	No			
Phase Shift		0	*30deg	

ภาพผนวกที่ ก4 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวรักษาระดับแรงดันแบบอัตโนมัติชนิดที่ 2 (AVR2)

4. แบบจำลองตัวเก็บประจุ (Capacitor)

โดยข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้แบบจำลองตัวเก็บประจุในระบบจำลอง แสดงดังภาพผนวกที่ ก5

	DigSILENT PowerFactory 14.1.3	Project:
		Date: 3/21/2014
Grid:MicrogridMSR_Ca Syst.Stage:MicrogridMSR_Ca		Annex: / 1
Shunt/Filter	Shunt/Filter	1 /1
System Type	AC	
Technology	3PH-'Y'	
Nominal Voltage		22.0000 kV
Shunt Type	C	
Input Mode	Default	
Controller		
Max. No. of Steps		1
Act.No. of Step		1
Design Parameter (per Step)		
Rated Reactive Power, C		1.0000 Mvar
Loss Factor, tan(delta)		0.0000

ภาพผนวกที่ ก5 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุ

5. แบบจำลองสายส่งไฟฟ้า (Conductor)

โดยข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้แบบจำลองสายส่งไฟฟ้าในระบบจำลอง แสดงดังภาพผนวกที่ ก6

	DigSILENT PowerFactory 14.1.3	Project:
		Date: 3/21/2014
Grid: Syst.Stage:		Annex: / 1
185A_22kV/3	Line Type	1 /1
Rated Voltage		22.0000 kV
Rated Current		1.0000 kA
Nominal Frequency		50.0000 Hz
Cable / OHL	Overhead Line	
System Type	AC	
Phases		3
No. of Neutrals		0
Parameters per Length 1,2-Sequence		
Resistance R'		0.0516 Ohm/km
Reactance X'		0.2999 Ohm/km
Parameters per Length Zero Sequence		
Resistance R0'		0.1962 Ohm/km
Reactance X0'		1.5305 Ohm/km

ภาพผนวกที่ ก6 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับสายส่งไฟฟ้า

6. แบบจำลองโหลด (Load)

โดยข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้แบบจำลองโหลดทั้ง 5 วงจรในระบบจำลองสามารถใช้ชนิดเดียวกัน แต่มีข้อแตกต่างในส่วนของพิกัดกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ของโหลดแต่ละวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาการทำงานของระบบจำลองตามค่าที่แสดงในตารางที่ 5 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองโหลดแสดงดังภาพผนวกที่ ก7

	DigSILENT PowerFactory 14.1.3	Project:
		Date: 3/20/2014
Grid:MicrogridMSR_Ca Syst.Stage:MicrogridMSR_Ca		Annex: / 1
LoadFl	General Load	1 /5
Type	...\Library\Equipment Type Library\Lod-1	
Balanced/Unbalanced	Balanced	
Operating Point		
Active Power		1.0027 MW
Power Factor		0.8800
Power Factor		ind.
Voltage		1.0000 p.u.
Scaling Factor		1.0000
Adjusted by Load Scaling	No	
System Type	AC	
Technology	3PH PH-E	

ภาพผนวกที่ ก7 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์สำหรับโหลด



โดยโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ประกอบในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้คือ

1. โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าสำหรับวัดประสิทธิภาพของวิธีการ

โดยโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับวัดประสิทธิภาพของวิธีการเป็นค่าที่วัดได้จริงจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสู่ระบบจำหน่ายของ กฟภ. ที่มีความละเอียดของการวัดทุกๆ 1 นาที ในที่นี้จะแสดงเฉพาะค่าโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าในช่วง 6.00 นาฬิกา ถึง 19.00 นาฬิกา เท่านั้น เนื่องจากในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้ามีรายละเอียดดังนี้

ตารางผนวกที่ ข1 โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าสำหรับวัดประสิทธิภาพของวิธีการ

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
1	0.0000	16	0.0000	31	0.0000	46	0.0814
2	0.0000	17	0.0000	32	0.0000	47	0.1154
3	0.0000	18	0.0000	33	0.0000	48	0.1475
4	0.0000	19	0.0000	34	0.0000	49	0.1759
5	0.0000	20	0.0000	35	0.0000	50	0.2025
6	0.0000	21	0.0000	36	0.0000	51	0.2281
7	0.0000	22	0.0000	37	0.0000	52	0.2505
8	0.0000	23	0.0000	38	0.0000	53	0.2670
9	0.0000	24	0.0000	39	0.0000	54	0.2826
10	0.0000	25	0.0000	40	0.0000	55	0.2979
11	0.0000	26	0.0000	41	0.0000	56	0.3133
12	0.0000	27	0.0000	42	0.0000	57	0.3287
13	0.0000	28	0.0000	43	0.0110	58	0.3443
14	0.0000	29	0.0000	44	0.0296	59	0.3603
15	0.0000	30	0.0000	45	0.0534	60	0.3772

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
61	0.3947	90	1.1000	119	1.9789	148	3.0593
62	0.4133	91	1.1233	120	2.0197	149	3.0454
63	0.4327	92	1.1479	121	2.0709	150	3.0480
64	0.4522	93	1.1751	122	2.1233	151	3.0574
65	0.4713	94	1.2049	123	2.1696	152	3.0728
66	0.4901	95	1.2364	124	2.2071	153	3.0948
67	0.5089	96	1.2680	125	2.2435	154	3.0448
68	0.5284	97	1.3015	126	2.2775	155	2.9450
69	0.5503	98	1.3329	127	2.3004	156	2.8521
70	0.5737	99	1.3625	128	2.3212	157	2.7535
71	0.5983	100	1.3915	129	2.3423	158	2.7026
72	0.6241	101	1.4175	130	2.3766	159	2.8050
73	0.6494	102	1.4419	131	2.4041	160	3.0042
74	0.6726	103	1.4654	132	2.4417	161	3.2077
75	0.6948	104	1.4900	133	2.4781	162	3.4262
76	0.7162	105	1.5179	134	2.5319	163	3.6296
77	0.7365	106	1.5537	135	2.5780	164	3.7420
78	0.7581	107	1.5955	136	2.6247	165	3.7819
79	0.7820	108	1.6409	137	2.6709	166	3.8219
80	0.8076	109	1.6893	138	2.7241	167	3.8674
81	0.8349	110	1.7325	139	2.7582	168	3.8876
82	0.8640	111	1.7645	140	2.7836	169	3.9312
83	0.8942	112	1.7888	141	2.8150	170	3.9944
84	0.9270	113	1.8123	142	2.8529	171	4.0516
85	0.9615	114	1.8329	143	2.8905	172	4.1108
86	0.9944	115	1.8562	144	2.9270	173	4.1838
87	1.0247	116	1.8822	145	2.9618	174	4.2465
88	1.0538	117	1.9119	146	2.9987	175	4.3074
89	1.0785	118	1.9412	147	3.0239	176	4.3598

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
177	4.4136	206	4.5948	235	4.8566	264	6.4003
178	4.4663	207	4.7827	236	4.1424	265	6.4480
179	4.5183	208	4.8412	237	3.9761	266	6.5651
180	4.5592	209	4.5473	238	3.4004	267	6.2099
181	4.6046	210	4.4506	239	3.2447	268	5.4318
182	4.6479	211	4.6650	240	3.4997	269	4.6676
183	4.6394	212	4.5685	241	4.2760	270	4.6497
184	4.6451	213	4.7106	242	5.0612	271	4.9329
185	4.6757	214	4.7519	243	5.8553	272	5.6331
186	4.6955	215	4.9818	244	6.5258	273	6.4857
187	4.6853	216	4.8668	245	6.7750	274	7.2027
188	4.7258	217	4.8414	246	6.1290	275	7.1386
189	4.7450	218	4.7483	247	5.9546	276	7.0786
190	4.8090	219	4.9159	248	6.0347	277	7.1766
191	4.8510	220	4.7662	249	6.0189	278	7.3339
192	4.9652	221	4.5938	250	6.3301	279	7.5378
193	5.0485	222	4.8400	251	2.3501	280	7.7592
194	5.0664	223	5.1536	252	7.2579	281	7.8269
195	4.9883	224	5.2969	253	7.1879	282	7.8103
196	4.8283	225	5.6425	254	6.8328	283	7.6739
197	4.6255	226	6.0023	255	6.3876	284	7.6030
198	4.5904	227	5.9143	256	5.6028	285	7.3850
199	4.5123	228	5.8935	257	5.1227	286	6.9244
200	4.2477	229	6.2080	258	4.8635	287	6.5151
201	4.1493	230	6.2714	259	5.0745	288	6.4794
202	4.2600	231	6.3028	260	5.4076	289	6.1753
203	4.1183	232	5.9178	261	5.8034	290	5.5506
204	4.1731	233	5.8993	262	6.0893	291	5.1057
205	4.3937	234	5.5076	263	6.2403	292	4.7524

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
293	4.5131	322	7.8375	351	8.2739	380	7.1810
294	4.5308	323	7.7534	352	8.3176	381	7.1503
295	5.4404	324	7.5781	353	8.3253	382	7.1252
296	6.4018	325	7.5637	354	8.3504	383	7.0946
297	7.1477	326	7.5128	355	8.3891	384	7.0673
298	7.4392	327	7.5964	356	8.4691	385	7.0849
299	7.7799	328	7.7819	357	8.5127	386	7.1035
300	7.7425	329	7.9325	358	8.5370	387	7.1200
301	7.6109	330	1.2286	359	8.5154	388	7.1145
302	7.6216	331	7.9207	360	8.4830	389	7.0962
303	7.7592	332	7.9155	361	8.4703	390	7.0672
304	7.7604	333	7.9518	362	8.4274	391	7.0521
305	7.7901	334	8.0092	363	8.3805	392	7.0311
306	7.9198	335	8.0617	364	8.4199	393	7.0280
307	7.8800	336	8.1328	365	8.4720	394	7.0314
308	7.7342	337	8.1294	366	8.4620	395	7.0392
309	7.7007	338	8.0759	367	8.4729	396	7.0187
310	7.7033	339	7.9687	368	8.5008	397	6.9936
311	7.7400	340	7.8786	369	8.5063	398	6.9930
312	7.7994	341	7.8565	370	8.5087	399	7.0110
313	7.7228	342	7.9071	371	8.5588	400	7.0176
314	7.6550	343	7.9910	372	8.6200	401	7.0514
315	7.6139	344	8.0593	373	8.6754	402	7.0864
316	7.5342	345	8.0804	374	8.5250	403	7.1026
317	7.4158	346	8.0523	375	7.9117	404	7.0949
318	7.5152	347	8.0308	376	7.6052	405	7.1052
319	7.6257	348	8.0549	377	7.3024	406	7.1100
320	7.6947	349	8.1345	378	7.1846	407	7.1156
321	7.7646	350	8.2271	379	7.2019	408	7.1176

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
409	7.1157	438	6.9489	467	7.7362	496	6.9397
410	7.0817	439	6.9251	468	7.7421	497	6.8756
411	7.0271	440	6.8745	469	7.7335	498	6.8045
412	6.9971	441	6.8266	470	7.7025	499	6.7491
413	6.9911	442	6.8050	471	7.6703	500	6.7409
414	6.9965	443	6.7631	472	7.6359	501	6.7508
415	6.9884	444	6.7230	473	7.5987	502	6.7863
416	6.9802	445	6.7217	474	7.5791	503	6.8645
417	6.9583	446	6.7270	475	7.5943	504	6.9333
418	6.9323	447	6.7158	476	7.5960	505	6.9241
419	6.9328	448	6.7230	477	7.5854	506	6.8869
420	6.9647	449	6.7364	478	7.5883	507	6.8585
421	6.9831	450	6.7344	479	7.5720	508	6.8151
422	6.9888	451	6.7329	480	7.5032	509	6.7534
423	6.9776	452	6.7266	481	7.4433	510	6.7036
424	6.9335	453	6.7016	482	7.4045	511	6.6602
425	6.8920	454	6.6623	483	7.3750	512	6.6135
426	6.8846	455	6.7216	484	7.3549	513	6.5719
427	6.8863	456	6.9317	485	7.3525	514	6.5553
428	6.8908	457	7.1502	486	7.3291	515	6.5633
429	6.9036	458	7.3837	487	7.2891	516	6.5783
430	6.9236	459	7.6302	488	7.2369	517	6.5725
431	6.9404	460	7.7309	489	7.1579	518	6.5600
432	6.9651	461	7.6721	490	7.0918	519	6.5369
433	6.9784	462	7.6351	491	7.0746	520	6.5079
434	6.9860	463	7.6253	492	7.0562	521	6.4853
435	6.9984	464	7.6175	493	7.0132	522	6.4903
436	6.9986	465	7.6587	494	6.9960	523	6.5005
437	6.9731	466	7.7060	495	6.9815	524	6.4958

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
525	6.4767	554	5.7217	583	4.7645	612	3.6032
526	6.4595	555	5.6829	584	4.7134	613	3.5641
527	6.4657	556	5.6597	585	4.6654	614	3.5226
528	6.4705	557	5.6440	586	4.6147	615	3.4799
529	6.4820	558	5.6465	587	4.5754	616	3.4480
530	6.4823	559	5.6717	588	4.5381	617	3.4168
531	6.4633	560	5.6888	589	4.5027	618	3.3737
532	6.3961	561	5.6792	590	4.4677	619	3.3225
533	6.3218	562	5.6391	591	4.4254	620	3.2708
534	6.2521	563	5.5613	592	4.3706	621	3.2157
535	6.1974	564	5.4532	593	4.3153	622	3.1606
536	6.1482	565	5.3430	594	4.2646	623	3.1158
537	6.1140	566	5.2633	595	4.1721	624	3.0834
538	6.0855	567	5.2049	596	4.1417	625	3.0532
539	6.0586	568	5.1632	597	4.1156	626	3.0215
540	6.0443	569	5.1322	598	4.0876	627	2.9836
541	6.0407	570	5.1020	599	4.0566	628	2.9440
542	6.0367	571	5.0747	600	4.0270	629	2.9021
543	6.0304	572	5.0504	601	4.0016	630	2.8623
544	6.0295	573	5.0186	602	3.9750	631	2.8213
545	6.0317	574	4.9832	603	3.9494	632	2.7837
546	6.0372	575	4.9548	604	3.9189	633	2.7518
547	6.0400	576	4.9333	605	3.8832	634	2.7195
548	6.0547	577	4.9209	606	3.8446	635	2.6856
549	6.0576	578	4.9070	607	3.8011	636	2.6526
550	6.0142	579	4.8960	608	3.7578	637	2.6164
551	5.9403	580	4.8845	609	3.7204	638	2.5716
552	5.8708	581	4.8625	610	3.6859	639	2.5244
553	5.7964	582	4.8131	611	3.6442	640	2.4770

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
641	2.4343	670	1.5661	699	0.7793	728	0.1653
642	2.3992	671	1.5346	700	0.7545	729	0.1492
643	2.3725	672	1.5031	701	0.7295	730	0.1328
644	2.3504	673	1.4735	702	0.7046	731	0.1165
645	2.3312	674	1.4458	703	0.6812	732	0.0973
646	2.3103	675	1.4191	704	0.6601	733	0.0713
647	2.2912	676	1.3924	705	0.6397	734	0.0475
648	2.2666	677	1.3630	706	0.6200	735	0.0277
649	2.2395	678	1.3306	707	0.6000	736	0.0112
650	2.2088	679	1.2954	708	0.5789	737	0.0007
651	2.1757	680	1.2583	709	0.5562	738	0.0000
652	2.1388	681	1.2201	710	0.5324	739	0.0000
653	2.1014	682	1.1868	711	0.5085	740	0.0000
654	2.0620	683	1.1571	712	0.4849	741	0.0000
655	2.0229	684	1.1311	713	0.4611	742	0.0000
656	1.9866	685	1.1115	714	0.4386	743	0.0000
657	1.9518	686	1.0969	715	0.4174	744	0.0000
658	1.9178	687	1.0813	716	0.3969	745	0.0000
659	1.8855	688	1.0640	717	0.3759	746	0.0000
660	1.8564	689	1.0441	718	0.3545	747	0.0000
661	1.8260	690	1.0209	719	0.3327	748	0.0000
662	1.7950	691	0.9951	720	0.3110	749	0.0000
663	1.7666	692	0.9673	721	0.2897	750	0.0000
664	1.7418	693	0.9383	722	0.2701	751	0.0000
665	1.7145	694	0.9098	723	0.2519	752	0.0000
666	1.6861	695	0.8816	724	0.2346	753	0.0000
667	1.6582	696	0.8548	725	0.2170	754	0.0000
668	1.6294	697	0.8294	726	0.1995	755	0.0000
669	1.5979	698	0.8047	727	0.1821	756	0.0000

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
757	0.0000	763	0.0000	769	0.0000	775	0.0000
758	0.0000	764	0.0000	770	0.0000	776	0.0000
759	0.0000	765	0.0000	771	0.0000	777	0.0000
760	0.0000	766	0.0000	772	0.0000	778	0.0000
761	0.0000	767	0.0000	773	0.0000	779	0.0000
762	0.0000	768	0.0000	774	0.0000	780	0.0000

2. โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานวิธีการที่นำเสนอในระบบไฟฟ้ากำลัง

โดยโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการประยุกต์ใช้งานวิธีการที่นำเสนอในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นค่าที่วัดได้จริงจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสู่ระบบจำหน่ายของ กฟภ. จริง ที่มีความละเอียดของการวัดทุกๆ 1 นาที ในที่นี้จะแสดงเฉพาะค่าโพรไฟล์กำลังไฟฟ้าในช่วง 6.00 นาฬิกา ถึง 19.00 นาฬิกา เท่านั้น เนื่องจากในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยข้อมูลโพรไฟล์กำลังไฟฟ้ามีรายละเอียดดังนี้

ตารางผนวกที่ ข2 โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานวิธีการที่นำเสนอ

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
1	0.0000	20	0.0000	39	0.0000	58	0.1184
2	0.0000	21	0.0000	40	0.0000	59	0.1342
3	0.0000	22	0.0000	41	0.0000	60	0.1715
4	0.0000	23	0.0000	42	0.0000	61	0.1804
5	0.0000	24	0.0000	43	0.0000	62	0.2419
6	0.0000	25	0.0000	44	0.0000	63	0.2600
7	0.0000	26	0.0000	45	0.0000	64	0.2546
8	0.0000	27	0.0000	46	0.0000	65	0.2538
9	0.0000	28	0.0000	47	0.0296	66	0.2530
10	0.0000	29	0.0000	48	0.0492	67	0.2553
11	0.0000	30	0.0000	49	0.0519	68	0.2569
12	0.0000	31	0.0000	50	0.0973	69	0.2619
13	0.0000	32	0.0000	51	0.0881	70	0.2699
14	0.0000	33	0.0000	52	0.0823	71	0.2849
15	0.0000	34	0.0000	53	0.0815	72	0.3015
16	0.0000	35	0.0000	54	0.0834	73	0.3349
17	0.0000	36	0.0000	55	0.0861	74	0.3711
18	0.0000	37	0.0000	56	0.0915	75	0.4249
19	0.0000	38	0.0000	57	0.1057	76	0.4718

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
77	0.5049	106	1.3740	135	2.4938	164	2.2961
78	0.5364	107	1.4163	136	2.3545	165	2.2003
79	0.5718	108	1.4486	137	2.2211	166	2.1123
80	0.6603	109	1.6720	138	2.0358	167	2.1123
81	0.7541	110	1.6389	139	1.8504	168	2.1111
82	0.8371	111	1.6051	140	1.7012	169	2.0608
83	0.8875	112	1.5701	141	1.6428	170	2.2296
84	0.9252	113	1.6012	142	1.6278	171	2.1557
85	0.9325	114	1.5001	143	1.6608	172	2.1115
86	0.9141	115	1.4197	144	1.7670	173	2.1038
87	0.8994	116	1.4286	145	1.9242	174	2.1019
88	0.8871	117	1.4613	146	2.1342	175	2.0696
89	0.8821	118	0.7164	147	2.2649	176	2.0646
90	0.8787	119	1.4986	148	2.2996	177	2.1207
91	0.8633	120	1.4659	149	2.2915	178	2.1830
92	0.8402	121	1.4997	150	2.3211	179	2.2607
93	0.8471	122	1.5862	151	2.3665	180	2.3342
94	0.8794	123	1.5778	152	2.4099	181	2.3965
95	0.9810	124	1.6039	153	2.4934	182	2.4268
96	1.0948	125	1.6078	154	2.5737	183	2.4522
97	1.1805	126	1.6297	155	2.6726	184	2.4503
98	1.2002	127	1.6824	156	2.7349	185	2.3799
99	1.1802	128	1.7297	157	2.7937	186	2.3661
100	1.1682	129	1.7850	158	2.7848	187	2.3688
101	1.1605	130	1.8681	159	2.7010	188	2.3876
102	1.1682	131	1.9942	160	2.7649	189	2.4795
103	1.2009	132	2.1134	161	2.8371	190	2.5507
104	1.2498	133	2.1857	162	2.8387	191	2.5414
105	1.3144	134	2.2957	163	2.4257	192	2.5557

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
193	2.6237	222	3.2824	251	3.1809	280	3.9888
194	2.7191	223	3.2955	252	3.1132	281	3.9908
195	2.6695	224	3.3124	253	3.0033	282	3.9827
196	2.7406	225	3.3517	254	2.8341	283	4.0000
197	2.9371	226	3.4090	255	2.6660	284	3.9896
198	3.1952	227	3.4632	256	2.5014	285	3.9942
199	3.0744	228	3.4928	257	2.4318	286	3.9781
200	2.6030	229	3.5001	258	2.4418	287	3.9927
201	2.1761	230	3.4982	259	2.5364	288	3.9935
202	1.9496	231	3.4863	260	2.7133	289	3.9877
203	1.9500	232	3.4409	261	2.9364	290	3.9935
204	2.3080	233	3.3709	262	3.1271	291	3.9896
205	2.6937	234	3.2701	263	3.3382	292	3.9842
206	2.8095	235	3.1836	264	3.4874	293	3.9865
207	2.7191	236	3.0729	265	3.6516	294	3.9858
208	2.7429	237	3.0052	266	3.7616	295	3.9681
209	2.8679	238	2.9929	267	3.8889	296	3.9962
210	3.1356	239	2.9902	268	3.9469	297	3.9765
211	3.2740	240	3.0102	269	3.9692	298	3.9792
212	3.3136	241	3.0413	270	3.9815	299	3.9835
213	3.8162	242	3.0256	271	3.9812	300	3.9962
214	3.8873	243	2.9737	272	3.9835	301	3.9865
215	3.9189	244	2.9417	273	3.9815	302	4.0000
216	3.7662	245	2.9271	274	3.9923	303	3.9815
217	3.7608	246	2.9433	275	3.9900	304	3.9862
218	3.5343	247	3.0083	276	3.9854	305	3.9504
219	3.4101	248	3.0886	277	3.9800	306	3.9785
220	3.3559	249	3.1609	278	3.9935	307	3.9912
221	3.3001	250	3.1955	279	3.9896	308	3.9946

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
309	3.9908	338	3.9058	367	3.9773	396	3.6347
310	3.9692	339	3.9019	368	3.9808	397	3.6712
311	3.9892	340	3.8816	369	3.9881	398	3.2171
312	3.9827	341	3.9296	370	3.9819	399	3.1006
313	3.9919	342	3.9800	371	3.9935	400	1.6705
314	3.9700	343	3.9785	372	3.9927	401	3.6716
315	3.9685	344	3.9423	373	3.9942	402	3.7189
316	3.9904	345	3.8777	374	3.9835	403	3.7097
317	3.9842	346	3.7520	375	3.9946	404	3.7800
318	3.9981	347	3.8112	376	3.9858	405	3.8862
319	3.9735	348	3.8835	377	3.9781	406	3.9781
320	3.9812	349	3.9354	378	3.9835	407	3.9804
321	3.9862	350	3.9742	379	3.9835	408	3.9815
322	3.6182	351	3.9835	380	3.9819	409	3.9942
323	3.3109	352	3.9827	381	3.9862	410	3.9785
324	3.1256	353	3.8173	382	3.9819	411	3.9985
325	3.1521	354	3.6981	383	3.9850	412	3.9919
326	3.1544	355	3.7270	384	3.9808	413	3.9815
327	2.8918	356	3.8635	385	3.9715	414	3.9746
328	2.7010	357	3.9439	386	3.9308	415	3.5755
329	2.5430	358	3.9777	387	3.8181	416	3.5632
330	2.5091	359	3.9677	388	3.6681	417	3.5912
331	2.5833	360	3.9769	389	3.6135	418	3.2694
332	2.8268	361	3.9827	390	3.6085	419	3.3194
333	3.3255	362	3.9846	391	3.6301	420	3.4805
334	3.8289	363	3.9831	392	3.6458	421	3.9808
335	3.9758	364	3.9846	393	3.6697	422	3.9123
336	3.9815	365	3.9946	394	3.7054	423	3.8877
337	3.9765	366	3.9873	395	3.6951	424	3.5047

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
425	3.3667	454	3.9835	483	3.4866	512	3.2663
426	3.3278	455	3.9908	484	3.4866	513	3.6193
427	3.4078	456	3.9800	485	3.4936	514	3.7381
428	3.2917	457	3.9815	486	3.4770	515	3.5132
429	3.4090	458	3.9831	487	3.4843	516	3.7258
430	3.9715	459	3.9904	488	3.4913	517	3.4036
431	3.9877	460	3.4947	489	1.9816	518	3.7047
432	3.9919	461	3.4870	490	3.4913	519	3.2286
433	3.9865	462	3.3694	491	2.7060	520	2.9098
434	3.9789	463	2.8364	492	2.8087	521	3.2240
435	3.9950	464	2.6687	493	3.3147	522	2.9879
436	3.9958	465	3.2786	494	2.9021	523	2.8033
437	3.9792	466	3.7054	495	3.4709	524	2.9325
438	3.9931	467	3.7435	496	2.9587	525	3.4551
439	3.9919	468	3.6528	497	2.7376	526	3.3809
440	3.9931	469	3.9950	498	2.7129	527	3.9892
441	3.9906	470	3.9973	499	2.6406	528	3.9758
442	3.9915	471	3.4847	500	2.5537	529	3.9385
443	3.9912	472	3.4801	501	2.4353	530	3.9923
444	3.9946	473	3.4863	502	2.3807	531	3.9915
445	3.9715	474	3.4936	503	3.4332	532	3.9838
446	3.9777	475	3.4955	504	2.4745	533	3.9904
447	3.9865	476	3.4789	505	2.2450	534	3.2609
448	3.9850	477	3.4901	506	1.1083	535	3.3797
449	3.9869	478	3.4882	507	2.2334	536	3.3563
450	3.9765	479	3.4851	508	2.4118	537	3.4932
451	3.9877	480	3.4782	509	2.8260	538	3.4809
452	3.9985	481	3.4936	510	3.0583	539	3.6074
453	3.9819	482	3.4836	511	3.1206	540	3.4697

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

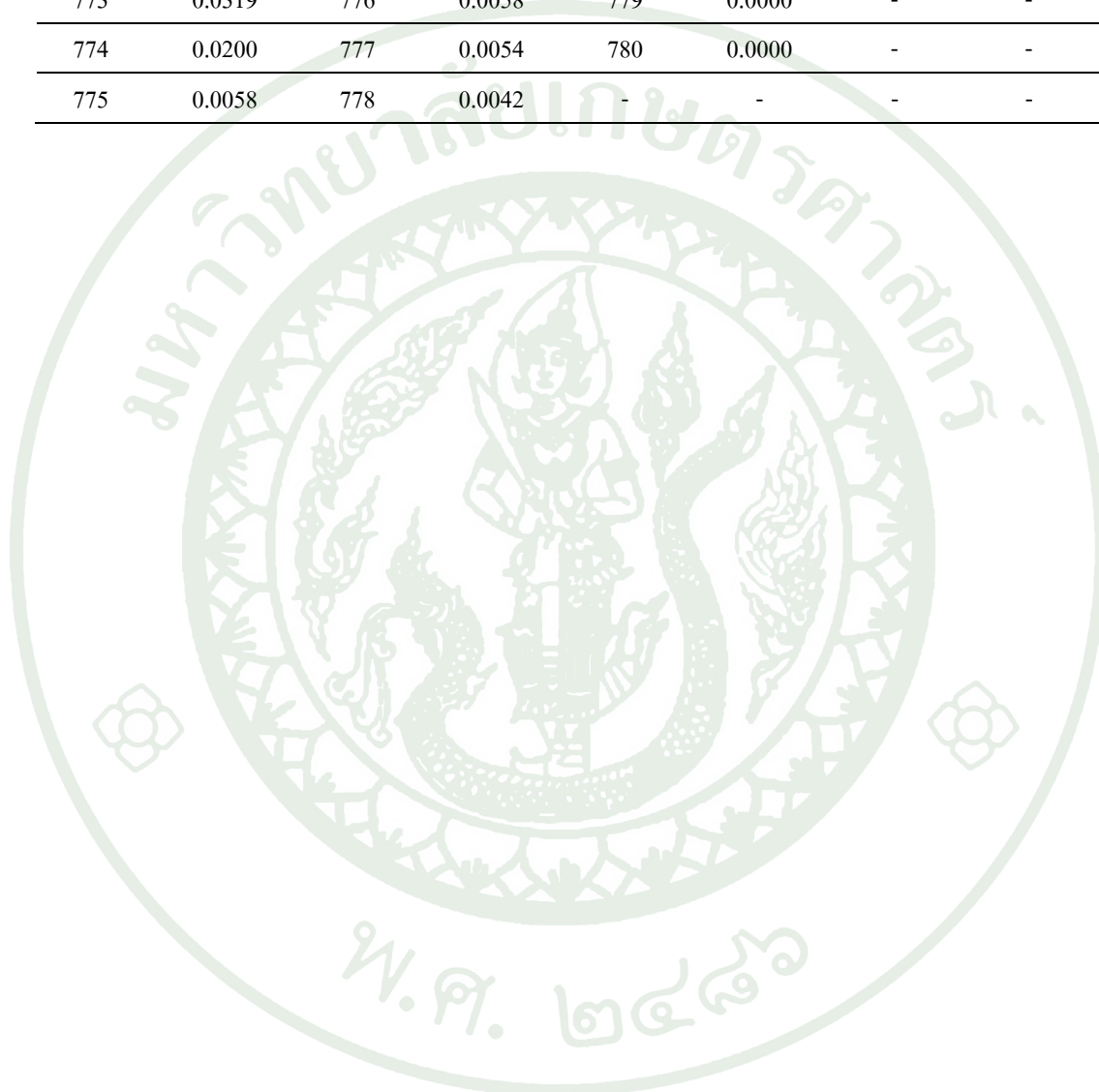
ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
541	3.1448	570	1.9139	599	3.2117	628	2.0065
542	3.3759	571	1.8427	600	2.4334	629	2.0096
543	2.8510	572	1.9858	601	2.3842	630	1.9723
544	3.1013	573	2.1284	602	1.3574	631	1.9266
545	3.4939	574	2.1915	603	2.8260	632	1.8935
546	3.2894	575	2.2226	604	2.5437	633	1.8643
547	3.4824	576	2.3169	605	1.3940	634	1.8577
548	3.4947	577	2.9817	606	1.2505	635	1.8558
549	3.4859	578	2.6237	607	1.1571	636	1.8423
550	3.4820	579	3.0794	608	1.2705	637	1.7804
551	3.4720	580	3.9154	609	1.3751	638	1.5147
552	2.8110	581	3.3843	610	1.3274	639	1.6551
553	2.6256	582	3.2067	611	1.2801	640	1.6531
554	3.6005	583	2.4072	612	1.2251	641	1.6120
555	3.6124	584	2.3269	613	1.2255	642	1.5755
556	3.6085	585	2.7602	614	1.3713	643	1.5370
557	3.5355	586	3.7800	615	2.4280	644	-0.0307
558	3.6901	587	2.3922	616	2.1054	645	1.3570
559	2.6057	588	2.3615	617	2.1580	646	1.2613
560	2.4995	589	2.3488	618	2.2484	647	1.1713
561	2.7499	590	2.4303	619	2.2446	648	1.0886
562	2.8679	591	2.6587	620	2.2000	649	1.0356
563	2.6983	592	2.2203	621	2.2334	650	0.8864
564	3.0187	593	1.7870	622	2.1069	651	0.9948
565	2.8110	594	1.8950	623	2.1515	652	0.9844
566	2.6318	595	1.8420	624	2.0019	653	0.9679
567	2.3296	596	1.9019	625	2.0185	654	0.9544
568	2.1853	597	2.5941	626	2.0165	655	0.9490
569	2.0811	598	2.5714	627	2.0092	656	0.9456

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
657	0.9406	686	1.1179	715	0.8445	744	0.2130
658	0.9341	687	1.1090	716	0.8248	745	0.2096
659	0.9214	688	1.1521	717	0.7745	746	0.2077
660	0.8971	689	1.1790	718	0.7126	747	0.2069
661	0.8825	690	1.2236	719	0.6337	748	0.1984
662	0.8733	691	1.1448	720	0.5760	749	0.1961
663	0.8710	692	1.1605	721	0.5303	750	0.2250
664	0.0062	693	1.1421	722	0.5007	751	0.2242
665	0.1188	694	1.1163	723	0.4668	752	0.2192
666	0.3607	695	1.1171	724	0.4453	753	0.2161
667	0.6272	696	1.1121	725	0.0069	754	0.2111
668	0.8844	697	1.1067	726	0.0069	755	0.2053
669	1.0329	698	1.1209	727	0.0508	756	0.1988
670	1.0848	699	1.1417	728	0.1430	757	0.1919
671	1.1186	700	1.1463	729	0.2323	758	0.1853
672	1.1440	701	1.1640	730	0.2323	759	0.1773
673	1.1498	702	1.1502	731	0.2276	760	0.1734
674	1.1525	703	1.1463	732	0.2188	761	0.1627
675	1.1509	704	1.1109	733	0.2138	762	0.1530
676	1.1452	705	1.0702	734	0.2080	763	0.1434
677	1.1352	706	1.0060	735	0.2107	764	0.1338
678	1.1259	707	0.9440	736	0.2096	765	0.1369
679	1.1236	708	0.9048	737	0.2077	766	0.1219
680	1.1271	709	0.8833	738	0.2046	767	0.1038
681	1.1432	710	0.8602	739	0.2303	768	0.0881
682	1.1598	711	0.8437	740	0.2296	769	0.0761
683	1.1767	712	0.8510	741	0.2288	770	0.0611
684	1.1702	713	0.8560	742	0.2253	771	0.0427
685	1.1455	714	0.8410	743	0.2207	772	0.0354

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)	ลำดับที่	กำลังไฟฟ้า (เมกกะวัตต์)
773	0.0319	776	0.0058	779	0.0000	-	-
774	0.0200	777	0.0054	780	0.0000	-	-
775	0.0058	778	0.0042	-	-	-	-



ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายชัยวัฒน์ งามสมโสด
วัน เดือน ปี ที่เกิด	13 มีนาคม 2520
สถานที่เกิด	อำเภออุทัย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี คอ.บ. (เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร ระดับ 6
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 1 (อยุธยา)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนโครงการความร่วมมือทางวิชาการและพัฒนา ผู้เชี่ยวชาญระหว่าง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์