

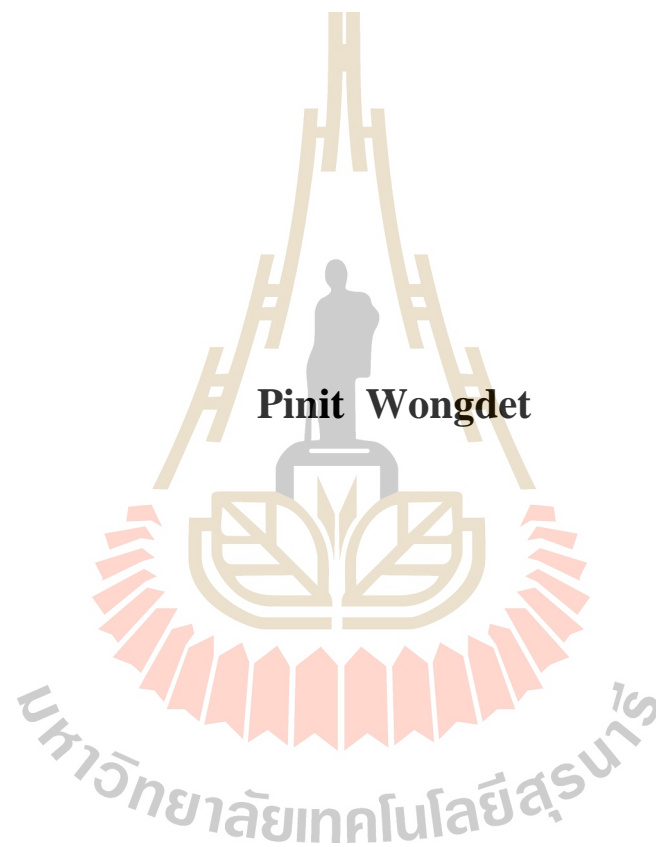
กลยุทธ์การจัดการพลังงานที่เหมาะสมสำหรับไมโครกริดที่ใช้ระบบกักเก็บ
พลังงานแบบไฮบริด โดยพิจารณาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่



นายพินิจ วงศ์เดช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**OPTIMAL ENERGY MANAGEMENT STRATEGY FOR
MICROGRID WITH HYBRID ENERGY STORAGE
SYSTEM BY CONSIDERING BATTERY LIFETIME**



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

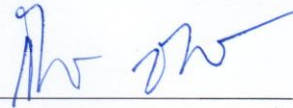
Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

กลยุทธ์การจัดการพลังงานที่เหมาะสมสำหรับไมโครกริดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงาน
แบบไฮบริด โดยพิจารณาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

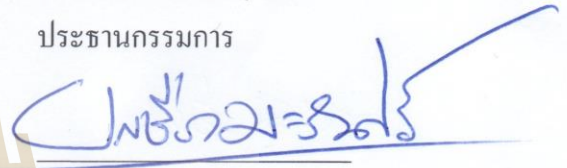
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร. กীরติ ชยะกุลคีรี)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร. จีรวดี ผลประเสริฐ)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พินิจ วงศ์เดช : กลยุทธ์การจัดการพลังงานที่เหมาะสมสำหรับไมโครกริดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด โดยพิจารณาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (OPTIMAL ENERGY MANAGEMENT STRATEGY FOR MICROGRID WITH HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM BY CONSIDERING BATTERY LIFETIME) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 139 หน้า.

แบตเตอรี่เป็นระบบกักเก็บพลังงานที่นิยมใช้ในการควบคุมประสิทธิภาพของพลังงานในไมโครกริดที่มีการใช้พลังงานทดแทนในการผลิตกำลังไฟฟ้า เนื่องจากมีข้อดีหลายอย่าง แต่ก็มีข้อจำกัดเรื่องอายุการใช้งานและการติดตั้งใหม่หลายครั้งส่งผลให้ค่าใช้จ่ายรวมของระบบกักเก็บพลังงานสูงขึ้น ในทศวรรษที่ผ่านมาจึงเกิดการศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้น โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ งานวิจัยนี้นำเสนอกลยุทธ์การจัดการพลังงานที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดเพื่อหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับลดค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงาน โดยพิจารณาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จากการประเมินด้วยวิธีการนับฝนตก (Rain-flow counting method) งานวิจัยนี้ได้แบ่งการจัดการออกเป็น 3 กรณีเพื่อเปรียบเทียบประกอบด้วย กรณีที่ 1 ระบบกักเก็บพลังงานใช้เฉพาะแบตเตอรี่ ซึ่งมีการปรับขนาดให้ใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการยืดอายุการใช้งาน โดยใช้การปรับขนาดที่เหมาะสมเพื่อหาขนาดแบตเตอรี่ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด กรณีที่ 2 เป็นระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด วงจรกรองความถี่ต่ำถูกใช้เพื่อควบคุมการจัดสรรกำลังไฟฟ้า โดยมีการกรองความถี่ต่ำให้แบตเตอรี่และความถี่สูงให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำมีผลต่อความสามารถในการยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่และขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม โดยค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมทำให้ได้ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด และกรณีที่ 3 เป็นระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมเช่นเดียวกับกรณีที่ 2 แต่เพิ่มการปรับขนาดแบตเตอรี่ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการยืดอายุขึ้นได้อีก จากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งประกอบด้วยค่าความถี่ตัดและค่าการปรับขนาดแบตเตอรี่ ทำให้ได้ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization method: PSO) ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของทุกกรณี ผลจากการจำลองไมโครกริดตัวอย่างพบว่า ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดของแต่ละกรณีมีค่าเท่ากับ 5,475,500 บาท 4,348,284 บาทและ 4,089,084 บาท ตามลำดับ โดยหากเปรียบเทียบเป็นระบบพบว่าระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมเมื่อมีขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่เหมาะสมแล้ว (กรณีที่ 2 และ 3) มีค่าใช้จ่ายลดลง 20.58% และ 25.32% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้เฉพาะแบตเตอรี่ถึงแม้จะมีการติดตั้งแบตเตอรี่ด้วยขนาดที่

เหมาะสมก็ตาม (กรณี 1) หากเปรียบเทียบผลของแต่ละวิธีการจัดการพบว่า กรณีที่ 3 ทำให้ระบบมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดเนื่องจากสามารถยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ได้ดีที่สุด ดังนั้น จากผลการศึกษาก็สรุปได้ว่าการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ใช้วิธีการจัดการที่เหมาะสมนั้นเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในไมโครกริด



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา พิเชจ วงศ์เพชร
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.วิมลพร

PINIT WONGDET : OPTIMAL ENERGY MANAGEMENT STRATEGY
FOR MICROGRID WITH HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM BY
CONSIDERING BATTERY LIFETIME. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
BOONRUANG MARUNGSRI, D. Eng., 139 PP.

HYBRID ENERGY STORAGE/BATTERY LIFETIME /SUPERCAPACITOR /
CAPACITY OPTIMIZATION/ENERGY MANAGEMENT STRATEGY

A battery energy storage system is widely used to manage the intermittent power of renewable energy generation on a microgrid because it has many advantages. However, the lifetime limitation and the need for replacement of battery increase the capital cost of a battery energy storage system. For the last decade, the hybrid energy storage system which composed battery and supercapacitor has been studied. The main goal is usually to extend the battery lifetime. This thesis presents the optimal energy management strategy for the energy storage system on a microgrid. The aim of this thesis is to determine the optimal capacity and the optimal capital cost of the energy storage system by considering the lifetime of battery. The rain-flow counting method is used to estimate the lifetime of battery. The proposed energy management strategy consists of 3 cases as follows: The first case considers a microgrid with the battery energy storage system. To extend the lifetime of battery, the battery size is expanded by using an adjusting factor. The optimal size of battery with the lowest capital cost is obtained by using the optimal adjusting factor. The second case considers the hybrid energy storage system, i.e. battery and supercapacitor. The low-pass filter is used to control the allocation of the low frequency power for battery and high frequency for supercapacitor. The expanding of

the battery lifetime and the capacity of hybrid energy storage system depend on the cut-off frequency. The optimal size of battery and supercapacitor with the lowest capital cost are obtained by using the optimal cut-off frequency. The third case considers the hybrid energy storage system as in second case with combined the expansion of battery size. The optimal size of the battery and supercapacitor with the lowest capital cost are obtained by using the optimal cut-off frequency and the optimal adjusting factor. Optimal corresponding parameters in this thesis have been determined by using an artificial intelligence technique namely particle swarm optimization (PSO). The simulation results show that the lowest capital costs of each study cases are 5,475,500 THB 4,348,284 THB and 4,089,084 THB, respectively. Comparison with the study case 1, the capital cost of the study case 2 and the study case 3 reduce by 20.58% and 25.32% even all cases having their optimal parameters. The lowest capital cost with the most effectiveness to extension the lifetime of battery is the case 3. By the study results, the hybrid energy storage system with the optimal parameters is the most suitable energy storage system for apply to a microgrid system.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature พิสิษ วัฒนเดช

Advisor's Signature คณบดี

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย อันได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจผู้วิจัยระหว่างการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติ ชยะกุลศิริ และอาจารย์ ดร.อุเทน ลีตน ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางสำหรับการทำวิจัยและให้กำลังใจมาโดยตลอด

อาจารย์ ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยตรวจทานและให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลวรรณพงษ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอาจารย์ทุกท่านประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำแนะนำและสั่งสอนความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือทั้งด้านวิชาการ การใช้ชีวิต รวมทั้งการให้กำลังใจซึ่งกันและกัน

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่รักและเคารพ ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาตลอด รวมทั้งครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนความรู้ให้ข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน จนทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถในการทำงานเป็นอย่างดี

พินิจ วงศ์เดช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 วิธีการดำเนินการวิจัยโดยสังเขป.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญ์นั้วรรณกรรม.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ไมโครกริด.....	5
2.3 พลังงานทดแทน.....	8
2.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.3.2 กังหันลม.....	11
2.4 ระบบกักเก็บพลังงาน.....	13
2.4.1 แบตเตอรี่.....	15
2.4.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	17
2.4.3 พารามิเตอร์ของระบบกักเก็บพลังงาน.....	21
2.4.4 การใช้งานและการจัดการพลังงานของไมโครกริด.....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.5	การประยุกต์ใช้งานตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	26
2.4.6	การเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม	27
2.5	ปริทัศน์วรรณกรรม	29
2.6	สรุป	34
3	วิธีดำเนินการวิจัย	35
3.1	บทนำ	35
3.2	โมเดลคณิตศาสตร์ของระบบกักเก็บพลังงาน.....	35
3.2.1	โมเดลของแบตเตอรี่.....	35
3.2.2	โมเดลของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	36
3.3	การจัดการพลังงานและขนาดของระบบกักเก็บพลังงาน	37
3.4	อายุการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงาน.....	44
3.4.1	อายุการใช้งานของแบตเตอรี่.....	44
3.4.2	วิธีการประเมินอายุแบตเตอรี่.....	47
3.4.3	การประเมินอายุแบตเตอรี่ด้วยวิธีการนับแบบฝนตก.....	49
3.4.4	อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	53
3.5	ค่าใช้จ่ายรวมของระบบกักเก็บพลังงาน.....	53
3.5.1	ค่าติดตั้งเริ่มต้น.....	54
3.5.2	ค่าติดตั้งใหม่.....	54
3.5.3	ค่าการทำงานและบำรุงรักษา.....	55
3.6	การหาค่าที่ดีที่สุดแบบฝูงอนุภาค.....	56
3.7	กรณีศึกษาและวิธีดำเนินการวิจัย.....	59
3.7.1	ไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวที่ใช้ทดสอบ	59
3.7.2	พารามิเตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานในงานวิจัย	63
3.7.3	กรณีศึกษาและขั้นตอนการดำเนินงาน	64
3.7.4	พารามิเตอร์และการประยุกต์ใช้วิธีแบบฝูงอนุภาค.....	68
3.8	สรุป.....	70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	71
4.1 บทนำ	71
4.2 กรณีที่ 1 ไมโครกริดที่ติดตั้งเฉพาะแบตเตอรี่กับการปรับขนาด	72
4.2.1 ผลของขนาดแบตเตอรี่ต่ออายุการใช้งาน	73
4.2.2 ผลของขนาดแบตเตอรี่ต่อค่าใช้จ่ายรวม	77
4.3 กรณีที่ 2 ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมกับค่าความถี่	79
4.3.1 ผลของค่าความถี่ตัดต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่	80
4.3.2 ผลของค่าความถี่ตัดต่อค่าใช้จ่ายรวม	89
4.4 กรณีที่ 3 ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมกับค่าความถี่ และการปรับขนาด	91
4.4.1 ผลของค่าความถี่ตัดและตัวปรับขนาด ต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่	92
4.4.2 ผลของค่าความถี่ตัดและตัวปรับขนาดต่อค่าใช้จ่ายรวม	95
4.5 การอภิปรายและเปรียบเทียบผล.....	99
4.6 สรุป.....	100
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	102
5.1 บทสรุป.....	102
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	103
รายการอ้างอิง	105
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	111
ภาคผนวก ข. ชุดคำสั่งของโปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองผล	130
ประวัติผู้เขียน	139

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การเปรียบเทียบระบบไฟฟ้าเดิมกับไมโครกริด 7
2.2	คุณสมบัติของเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน 14
2.3	บริษัทนวัตกรรมกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 30
3.1	ตัวอย่างค่าการนับด้วยวิธีฝนตก 51
3.2	พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด 63
3.3	กรณีศึกษาและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง 67
3.4	พารามิเตอร์ของวิธีการแบบฝูงอนุภาค 68
4.1	ผลของค่าตัวปรับขนาดต่อค่าใช้จ่ายรวมของระบบแบตเตอรี่ 78
4.2	ค่าความถี่ตัดกับขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม 86
4.3	ผลของค่าความถี่ตัดต่อค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม 91
4.4	ผลของค่าตัวปรับขนาดแบตเตอรี่เมื่อให้ค่าความถี่ตัดเท่ากับค่าที่เหมาะสม 98
4.5	ผลของค่าความถี่ตัดเมื่อให้ตัวปรับขนาดเท่ากับค่าที่เหมาะสม 98
4.6	เปรียบเทียบพารามิเตอร์และค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานของทั้ง 3 กรณี 100

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบของระบบไมโครกริด 6
2.2	เซลล์แสงอาทิตย์ 9
2.3	ผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิต่อลักษณะกระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะการทดสอบมาตรฐาน 10
2.4	กึ่งนำลบ 11
2.5	ความเร็ววมกับการผลิตไฟฟ้าของกึ่งนำลบ 12
2.6	วงจรพื้นฐานของแบตเตอรี่ 17
2.7	การอัดและปล่อยประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด 18
2.8	แรงดันของตัวเก็บประจุเมื่อปล่อยประจุที่กำลังไฟฟ้ค่าต่าง ๆ 20
2.9	แรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่การอัดประจุด้วยกระแสคงที่ค่าต่าง ๆ 20
2.10	ลักษณะแรงดันของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุขณะอัดและปล่อยประจุ 21
2.11	ไมโครกริดกับระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม 23
2.12	การปรับความราบเรียบของโหลด 24
2.13	การย้ายช่วงการใช้งานไฟฟ้า 24
2.14	การควบคุมความถี่ 25
2.15	การเชื่อมระบบกักเก็บพลังงานแบบพาสซีฟ 28
2.16	การเชื่อมระบบกักเก็บพลังงานแบบกึ่งแอทีฟ 28
2.17	การเชื่อมระบบกักเก็บพลังงานแบบแอทีฟ 29
3.1	แผนภาพของไมโครกริดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ 38
3.2	แผนภาพของไมโครกริดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม 38
3.3	การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวงจรรองความถี่ต่ำ 39
3.4	ผลกระทบของความถี่ในการปล่อยประจุต่อรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ 46
3.5	ผลกระทบของอุณหภูมิต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ 46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 ผลกระทบของอัตราการผลิตหรือคลายประจุต่อรอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่	47
3.7 ค่าระดับความลึกกับจำนวนรอบใช้งานและค่าพลังงานทั้งหมดของแบตเตอรี่	48
3.8 แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานของวิธีการนับแบบฝนตก.....	50
3.9 ข้อมูลตัวอย่างสำหรับการนับแบบฝนตก.....	51
3.10 การบินของฝูงนก	57
3.11 ขั้นตอนการทำงานของวิธีแบบฝูงอนุภาค	58
3.12 กำลังไฟฟ้าของโหลด.....	60
3.13 กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	60
3.14 กำลังไฟฟ้าของกังหันลม	61
3.15 กำลังไฟฟ้าของโหลด เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลมและกำลังไฟฟ้าส่วนต่าง.....	62
3.16 กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงาน.....	62
3.17 จำนวนรอบการใช้งานและระดับความลึกการปล่อยประจุของแบตเตอรี่อ้างอิง	64
3.18 ขั้นตอนกรณีที่ 1 หาขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมด้วยตัวปรับคูณ q_B	65
3.19 ขั้นตอนกรณีที่ 2 และ 3 หาขนาดติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม ด้วยค่าความถี่ตัด f_C และตัวปรับคูณ q_B	67
3.20 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมของการวิจัยด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค	69
4.1 กำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าทำงานของแบตเตอรี่ กรณีที่ 1.....	72
4.2 การหาคำตอบของกรณีที่ 1 ด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค	73
4.3 ผลของตัวปรับคูณขนาดกับระดับความลึกการปล่อยประจุของแบตเตอรี่	74
4.4 สถิติจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ กรณีที่ 1	75
4.5 ผลของตัวปรับคูณต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่.....	76
4.6 ผลของตัวปรับคูณต่อจำนวนการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่.....	77
4.7 ผลของตัวปรับคูณขนาดต่อค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่	78
4.8 การหาคำตอบของกรณีที่ 2 ด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค	79
4.9 การจัดสรรกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่ตัด 1 mHz.....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 การจัดสรรกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่ตัด 0.091 mHz.....	82
4.11 การจัดสรรกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่ตัด 0.05 mHz.....	83
4.12 การจัดสรรกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่ตัด 0.01 mHz.....	84
4.13 ความถี่ตัดกับกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในช่วง 3 ชั่วโมงแรก.....	85
4.14 ความถี่ตัดกับกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในช่วง 3 ชั่วโมงแรก.....	85
4.15 สถิติจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ กรณีที่ 2	87
4.16 ผลของค่าความถี่ตัดต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่	88
4.17 ผลของค่าความถี่ตัดต่อจำนวนการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่	89
4.18 ผลของค่าความถี่ตัดต่อค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม	90
4.19 การรู้เข้าหาคำตอบของกรณีที่ 3 ด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค	92
4.20 ตัวปรับขนาดกับอายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่ค่าความถี่ตัดเหมาะสม	93
4.21 ตัวปรับขนาดกับจำนวนการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่ที่ค่าความถี่ตัดเหมาะสม	94
4.22 ความถี่ตัดกับอายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่ตัวปรับขนาดเหมาะสม	94
4.23 ความถี่ตัดกับจำนวนการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่ที่ตัวปรับขนาดเหมาะสม	95
4.24 ตัวปรับขนาดต่อค่าใช้จ่ายรวมเมื่อให้ค่าความถี่ตัดเท่ากับค่าเหมาะสม	96
4.25 ความถี่ตัดกับค่าใช้จ่ายรวมเมื่อให้ตัวปรับขนาดมีค่าเท่ากับค่าเหมาะสม	97



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอนาคตมีการคาดการณ์ว่าความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจ อุตสาหกรรมการเกษตร การพัฒนาเทคโนโลยีการขนส่ง ซึ่งในระบบไฟฟ้าแบบดั้งเดิมเน้นการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งานจะถูกผลิตโดยโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่และส่งจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าเพื่อส่งไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้งานเป็นระยะทางไกล โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงไฟฟ้าส่วนมากคือ ก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน เรียกการผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบนี้ว่า แบบรวมศูนย์ ในปัจจุบันมีการพัฒนาและปรับปรุงระบบไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงาน มีความยั่งยืน มีความปลอดภัยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น ซึ่งเรียกว่า ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ เกิดขึ้นได้โดยการพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ การสื่อสาร การควบคุมอัตโนมัติ การเก็บข้อมูล มาบริหารจัดการระบบไฟฟ้าทั้งด้านผลิต การส่งจ่ายและตัวผู้ใช้งานไฟฟ้า โดยลักษณะของระบบการจัดการระบบไฟฟ้าจะมีลักษณะกระจายตัวเป็นระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก (Microgrid) มากยิ่งขึ้น โดยส่วนประกอบหลักของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กส่วนที่หนึ่งคือระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กจากพลังงานหมุนเวียนที่กระจายตัวอยู่ทั่วไป โดยจะใช้แหล่งพลังงานตามความเหมาะสมของพื้นที่ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ก๊าซชีวภาพ เป็นต้น ส่วนที่สองคือกลุ่มโหนดการใช้งาน ส่วนที่สามคือระบบควบคุม ส่วนที่สี่คือระบบกักเก็บพลังงานซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในระบบไฟฟ้าที่ใช้ระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนซึ่งมีความผันผวนสูง เพื่อควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสม โดยจุดประสงค์หลักของระบบกักเก็บพลังงานคือทำให้ไมโครกริดสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้โหลดได้ตลอดเวลาด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้ามีหลายรูปแบบ มีขนาดและคุณลักษณะการใช้งานแตกต่างกันไป เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบสูบกลับ ระบบอัดอากาศ ระบบฟลายวีล แบตเตอรี่ ตัวนำยิ่งยวด และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในปัจจุบันอุปกรณ์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้าคือ แบตเตอรี่ เนื่องจากสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้จำนวนมาก มีเวลาการตอบสนองที่เร็ว มีการควบคุมจัดการได้ง่าย มีชนิดและขนาดในท้องตลาดมากมายให้เลือกใช้งาน จึงเหมาะเพื่อใช้งานรอง

รับการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียน การทำกำไรจากส่วนต่างราคาไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ การปรับเปลี่ยนเวลาความต้องการใช้งานไฟฟ้า การใช้เป็นตัวสนับสนุนเพื่อรักษาความถี่ไฟฟ้าและรักษาแรงดันไฟฟ้าของระบบ เป็นต้น อัตราการคายและอัดประจุมีลักษณะคงที่ตามปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและสารเคมีที่ใช้ในแต่ละชนิด ดังนั้นการใช้งานจึงต้องการลักษณะการจ่ายกระแสที่คงที่ เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ แต่การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนและโพลินในระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่มีลักษณะที่ไม่คงที่เนื่องจากมีช่วงที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสที่เข้าหรือออกของแบตเตอรี่มีความผันผวนสูง และทำให้แบตเตอรี่เกิดความร้อนเป็นอันตรายต่อการใช้งานได้ จึงต้องมีระบบกักเก็บพลังงานอื่นมาเสริมประสิทธิภาพ จึงทำให้เกิดการศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมขึ้น โดยนำเอาข้อดีของเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานแบบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่นระหว่างแบตเตอรี่กับล้อยูนิตกำลัง แบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดหรือแบตเตอรี่ต่างชนิดเข้าด้วยกันเอง ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่มีการศึกษามากที่สุดคือแบบแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีคุณสมบัติที่เหมาะสม เนื่องจากความพร้อมในการใช้งาน มีพื้นฐานการทำงานคล้ายกัน โดยสามารถตอบสนองต่อการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าสูงและเวลาชาร์จที่เร็วกว่าแบตเตอรี่หลายเท่า มีจำนวนครั้งในการอัดประจุมากกว่า แต่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อย จึงเหมาะสำหรับการจ่ายหรือรับกระแสไฟฟ้าในลักษณะการกระชากในเวลาอันรวดเร็ว โดยเกิดความร้อนน้อยกว่าแบตเตอรี่เพราะมีค่าความต้านทานภายในน้อย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าเนื่องจากแบตเตอรี่ต้องมีขั้นตอนในการกำจัดทิ้งที่ดีเมื่อหมดอายุการใช้งาน เพราะทำจากสารเคมี จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีคุณสมบัติที่ดีกว่าแบตเตอรี่อยู่หลายประการ แต่ในปัจจุบันตัวเก็บประจุยิ่งยวดอยู่ในช่วงการพัฒนาและยังไม่นิยมใช้งานมากเนื่องจากมีขนาดและราคาแพงกว่าแบตเตอรี่มากในระดับความจุพลังงานไฟฟ้าเดียวกัน จึงได้คิดค้นงานวิจัยชิ้นนี้ขึ้นเพื่อจัดการระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่น่าข้อดีของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาใช้เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของไมโครกริด โดยจุดประสงค์หลักคือช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่ได้

การใช้งานระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมนั้นมี 2 ปัจจัยหลักสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ปัจจัยแรกคือ การควบคุมจัดการพลังงานไฟฟ้าของการปล่อยและอัดประจุระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อประสิทธิภาพในการทำงาน ปัจจัยที่สองคือ ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด เพื่อให้การลงทุนมีความคุ้มค่าและประหยัดที่สุด

โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอกลยุทธ์การจัดการพลังงานที่เหมาะสมของไมโครกริด และการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ด้วยเทคนิคอันชาญฉลาดแบบปัญญาประดิษฐ์ เพื่อศึกษาหาค่าใช้จ่ายรวมจากค่าการติดตั้ง ค่าบำรุงรักษาและพิจารณาติดตั้งใหม่จากอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ร่วมด้วยในระบบไมโครกริดที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงาน

แสงอาทิตย์และพลังงานลม โดยศึกษาความคุ้มค่าและเหมาะสมของการลงทุนของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ใช้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด

1.2.2 เพื่อพัฒนากลยุทธ์การจัดการพลังงานที่เหมาะสมสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมในไมโครกริดแบบแยกเดี่ยว

1.2.3 เพื่อหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานทั้งแบบเฉพาะแบตเตอรี่และแบบผสมเพื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด

1.3 วิธีการดำเนินการวิจัยโดยสังเขป

1.3.1 สืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมในไมโครกริด

1.3.2 ศึกษาการทำงานและโมเดลทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดและไมโครกริด

1.3.3 จำลองการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมในไมโครกริดที่เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาอายุการทำงานของแบตเตอรี่

1.3.4 หาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมเพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าด้านการลงทุน

1.3.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองและการคำนวณ

1.3.6 สรุปผลที่ได้จากการศึกษา เขียนบทความวิจัยและนำเสนอข้อคิดเห็น

1.3.7 เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 พิจารณาการทำงานของไมโครกริดที่มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1.4.2 ในงานวิจัยนี้สนใจการประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

1.4.3 ไม่พิจารณาการทำงานและประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

1.4.4 ให้อุณหภูมิในสภาวะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานเป็นค่าคงที่

- 1.4.5 ไม่พิจารณาพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบ
- 1.4.6 ไม่พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
- 1.4.7 ให้ราคาและคุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงานมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
- 1.4.8 ใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองและตรวจสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้แนวทางการจัดการพลังงานและการควบคุมที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมในไมโครกริดที่ติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน
- 1.5.2 ได้แนวทางการจัดสรรขนาดของระบบกักเก็บพลังงานเพื่อให้คุ้มค่าการลงทุน
- 1.5.3 ได้แนวทางและหลักการในการยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งใหม่ลดลง

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วย 5 บท 2 ภาคผนวก ซึ่งได้จัดเรียงตามความเหมาะสมได้ดังต่อไปนี้

- บทที่ 1** กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย วิธีการดำเนินการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย
 - บทที่ 2** อธิบายถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย
 - บทที่ 3** อธิบายถึงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานของการวิจัยและการประยุกต์ใช้ทฤษฎี
 - บทที่ 4** แสดงผลที่ได้จากการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองของระบบที่ศึกษา
 - บทที่ 5** เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะของการวิจัย
- ภาคผนวก ก แสดงบทความทางวิชาการที่ได้ตีพิมพ์ระหว่างการศึกษา
- ภาคผนวก ข แสดงชุดคำสั่งของโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการจำลองผลของงานวิจัย

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรม

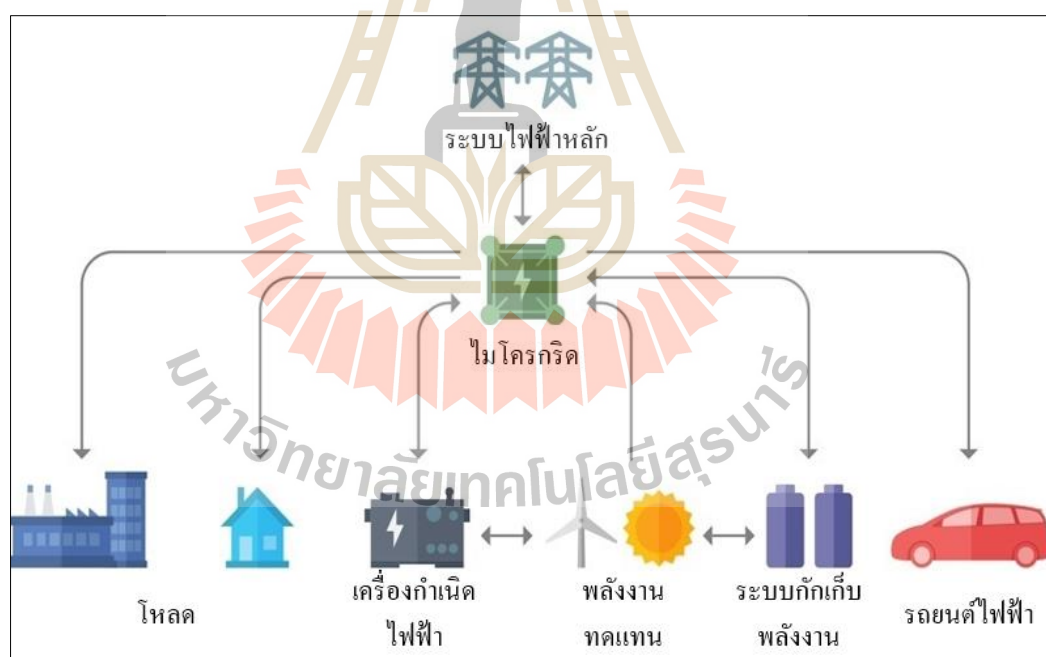
2.1 บทนำ

ในปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนในไมโครกริด แบตเตอรี่เป็นระบบกักเก็บพลังงานที่นิยมใช้เนื่องจากข้อดีหลายอย่าง ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่นำมาใช้ควบคุมประสิทธิภาพการทำงานของไมโครกริด แต่มีข้อจำกัดคืออายุการใช้งานมักจะสั้น จากความผันผวนของกำลังไฟฟ้าในไมโครกริด เนื่องจากแบตเตอรี่มีราคาแพง การเปลี่ยนใหม่ทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น จึงมีการศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม โดยระบบแบบแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้รับความสนใจศึกษามากที่สุด โดยใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อช่วยลดความผันผวนของกำลังงานไฟฟ้าบนแบตเตอรี่ ซึ่งจะช่วยให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ออกไปได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีหลายวิจัยได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ และเพื่อหาความเป็นไปได้ในการลดค่าใช้จ่ายโดยรวมของการใช้ระบบกักเก็บพลังงานภายในไมโครกริด เพื่อความเข้าใจถึงความสำคัญของปัญหาและรายละเอียดที่เป็นความรู้ทั่วไปที่ใช้เป็นพื้นฐานของงานวิจัย เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและเนื้อหาเกี่ยวกับรายละเอียดของไมโครกริด พลังงานทดแทน เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานและการใช้งานในไมโครกริด รวมถึงปรัทัศน์วรรณกรรมของการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมในไมโครกริด วัตถุประสงค์ในการใช้งาน วิธีการจัดการพลังงานระหว่างระบบกักเก็บพลังงาน ผลของขนาดติดตั้งและการประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแนวคิดและองค์ความรู้ของงานวิจัยนี้

2.2 ไมโครกริด

ไมโครกริด (Microgrid) คือ ระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำขนาดเล็ก ที่ประกอบไปด้วยระบบการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ ส่วนมากใช้แหล่งเชื้อเพลิงจากพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล เป็นต้น มีกลุ่มโหลดซึ่งสามารถจำแนกตามประเภทผู้ใช้งาน เช่น ภาคครัวเรือน ภาคอาคารพาณิชย์ โรงงานอุตสาหกรรมและหน่วยงานต่าง ๆ เป็นต้น มีระบบกักเก็บพลังงาน :ซึ่งจัดการพลังงานผ่านเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารและควบคุม (Hatziaegyriou, 2013) โดยมีการทำงาน 2 โหมดคือ ไมโครกริดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลัก

(Connected-grid mode) เพื่อเสริมความมั่นคงและสามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้าหลักได้อีกด้วย ไมโครกริดมีจุดเชื่อมต่อกับระบบหลัก (Point of common coupling: PCC) ซึ่งในโหมดนี้ไมโครกริดสามารถเป็นได้ทั้งผู้ใช้งานหรือผลิตส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และโหมดที่สามารถแยกตัวเป็นอิสระได้เมื่อต้องการ (Islanded mode) ส่วนระบบไมโครกริดที่แยกตัวเป็นอิสระจากระบบไฟฟ้าหลักอย่างถาวรหรือแบบแยกเดี่ยว (Standalone microgrid) คือระบบที่ไม่เชื่อมต่อกับระบบหลัก ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จึงมาจากระบบผลิตไฟฟ้าภายในไมโครกริดทั้งหมด เหมาะสำหรับพื้นที่ห่างไกลจากระบบไฟฟ้าหลัก แต่ระบบมีความน่าเชื่อถือต่ำ แต่ละไมโครกริดนั้นจะมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดโหลดและชนิดของระบบผลิตไฟฟ้า สำหรับแนวคิดของไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวคือการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอใช้ในระบบ ควบคุมและจัดการข้อเสียของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนไม่สามารถควบคุมให้สมดุลกับโหลดได้ ดังนั้นระบบกักเก็บพลังงานจึงมีความสำคัญอย่างมากในไมโครกริดแบบแยกเดี่ยว องค์ประกอบของระบบไมโครกริดแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของระบบไมโครกริด

แหล่งที่มา: <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-a-microgrid-and-a-DG-in-power-systems> (เข้าถึงเมื่อ 5/05/2561)

ประโยชน์ของไมโครกริดคือเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับระบบไฟฟ้าและผู้ใช้งาน ช่วยลดอัตราการเกิดไฟฟ้าดับและการติดตั้งระบบการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวใกล้กับผู้ใช้งานช่วยลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากการส่งจ่ายไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงในระยะทางไกล ช่วยลดการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยใช้พลังงานหมุนเวียนซึ่งเป็นพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถใช้พลังงานที่เหลือไปผลิตเป็นพลังงานความร้อน ทำให้มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ดังตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระบบไฟฟ้าแบบเดิมและแบบไมโครกริด

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระบบไฟฟ้าเดิมกับไมโครกริด (Modern manufacturing, 2017)

ส่วนประกอบ	ระบบไฟฟ้าเดิม	ไมโครกริด
การผลิตไฟฟ้า	เป็นโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ใช้พลังงานจากฟอสซิลหรือเขื่อนขนาดใหญ่ มีเสถียรภาพสูง	มีระบบการผลิตแบบกระจายขนาดเล็กใกล้ผู้ใช้ โดยส่วนมากใช้พลังงานทดแทน มีความไม่แน่นอนสูง
ระบบส่งจ่าย	มีระบบไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการส่งจ่าย เนื่องจากโรงไฟฟ้าอยู่ไกลจากผู้ใช้งาน ต้องมีอุปกรณ์ป้องกันและเทค โนโลยี หากเกิดความผิดปกติขึ้น นั้นหมายถึงจะเกิดไฟดับเป็นบริเวณกว้าง	ไม่ต้องมีระบบส่งจ่ายแรงสูง
ระบบจำหน่าย	เชื่อมระหว่างระบบส่งจ่ายกับผู้ใช้งาน กำลังไฟฟ้าไหลทิศทางเดียวจากระบบส่งจ่ายเข้าสู่ผู้ใช้งาน	เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าเข้ากับผู้ใช้ระบบควบคุมมีความซับซ้อน เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสามารถไหลได้ 2 ทิศทาง
ระบบกักเก็บพลังงาน	อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ เนื่องจากระบบการผลิตไฟฟ้ามีความแน่นอนสูง	จำเป็นต้องมีเพื่อรองรับและจัดการความไม่แน่นอนของระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน
บทบาทของผู้ใช้งาน	มีบทบาทน้อยในการมีส่วนร่วมในการบริหารพลังงาน	ผู้ใช้สามารถบริหารพลังงานและจัดการการใช้ไฟฟ้าได้ สามารถรู้ราคาไฟฟ้าเพื่อจัดเวลาการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า และเป็นได้ทั้งผู้ผลิตและใช้งานไฟฟ้าเอง

เมื่อพิจารณาไมโครกริดในปัจจุบันมีการพัฒนาตลอดเวลา มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ เข้ามาใช้มากขึ้น ระบบไมโครกริดมีขนาดเล็กลง รวมถึงราคาก็ต่ำกว่าที่ผ่านมา ระบบควบคุมและจัดการภายในไมโครกริดจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ที่ต้องมีการวางแผนและจัดการเฉพาะในแต่ละระบบ เพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงสุด และมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ อีกทั้งระบบไฟฟ้าในอนาคตยังต้องออกแบบเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นและครอบคลุมพื้นที่การใช้งานของรถยนต์ไฟฟ้า การบริหารไมโครกริดที่ดีจะช่วยรองรับการอัดประจุของรถยนต์ได้ โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถยนต์ยังสามารถจ่ายไฟฟ้ากลับคืนให้ไมโครกริดได้ในเหตุการณ์ฉุกเฉินเพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพของไมโครกริดได้อีกด้วย

ปัจจุบันมีความต้องการใช้พลังงานจากไมโครกริดเป็นจำนวนมาก จากช่วงปี พ.ศ. 2559 ที่มีการใช้ไมโครกริดขนาดประมาณ 1,480 MW มีการคาดการณ์ว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 6,540 MW ในปี พ.ศ. 2568 โดยสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศที่มีการขยายตัวมากที่สุด ตามมาด้วยสหภาพยุโรป จีน อินเดีย ญี่ปุ่น และออสเตรเลีย อย่างไรก็ตามอุปสรรคในการพัฒนาไมโครกริดก็มีมากมายเช่นกัน เช่น การจัดหาพื้นที่ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือลมที่ใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ การทำงานร่วมกับระบบไฟฟ้าเดิม ระบบป้องกันและปัญหาด้านการลงทุน ทำให้บางประเทศหรือบางพื้นที่ยังไม่สามารถทำได้ โดยในประเทศไทยมีโครงการนำร่องที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ชื่อโครงการคือโครงการจ่ายอัจฉริยะหรือสมาร์ตกริด โดยการเพิ่มการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานน้ำและเครื่องดีเซล และติดตั้งแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนขนาด 1 MWh เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและป้องกันไฟดับในจังหวัด คาดว่า จะเสร็จในปี พ.ศ. 2562 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2018)

2.3 พลังงานทดแทน

พลังงานทดแทน (Renewable energy) คือพลังงานที่ใช้ทดแทนพลังงานแบบเดิมคือ เชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นพลังงานที่ได้รับความสนใจศึกษาและมีการใช้งานในการผลิตไฟฟ้าอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน มีทั้งแบบใช้แล้วหมดไปและแบบไม่มีวันหมด ซึ่งแบบไม่มีวันหมดนี้จะถูกเรียกว่าพลังงานหมุนเวียนเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำและพลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น ซึ่งเป็นพลังงานที่ยั่งยืน เพื่อความเข้าใจในพฤติกรรมและการใช้งานพลังงานทดแทน งานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลพื้นฐานของพลังงานทดแทนที่มีใช้ในไมโครกริดที่มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาและสรุปข้อมูลไว้ โดยสนใจศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมซึ่งเป็นพลังงานหลักที่มีการนำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าในไมโครกริดโดยทั่วไป

2.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดและไม่มีวันหมดไป เป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูงและเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง การใช้ประโยชน์ได้ทั้งการนำมาให้พลังงานความร้อนโดยตรงหรือการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยการผลิตไฟฟ้าจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell หรือ Solar cell) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยแผ่นเซลล์โดยทั่วไปทำมาจากสารกึ่งตัวนำเช่น ซิลิกอน (Silicon) ซึ่งมีราคาถูกแต่ประสิทธิภาพต่ำ และสารอื่น ๆ ที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้กับดาวเทียม แต่ราคาก็จะสูงขึ้นด้วย ข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์คือ สามารถประกอบเป็นโมดูลได้ตามขนาดที่ต้องการ เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ไม่เคลื่อนย้าย ไม่เกิดเสียงดัง อายุการใช้งานยาวนานและค่าบำรุงรักษา น้อยมาก

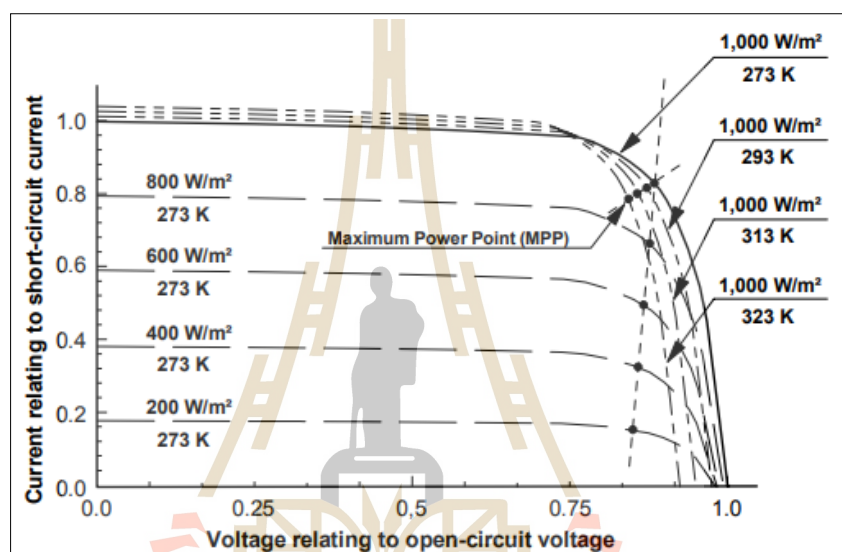


รูปที่ 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์

แหล่งที่มา : <https://cleanmalaysia.com/2017/03/28/japanese-company-set-new-record-solar-cell-efficiency/> (เข้าถึงเมื่อ 10/12/2561)

ส่วนข้อเสียคือ ต้องการพื้นที่จำนวนมากในการติดตั้งและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความผันผวนขึ้นอยู่กับความเข้มแสงและอุณหภูมิที่เซลล์ได้รับ จากกราฟความสัมพันธ์โดยทั่วไปของกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.3 พบว่ากระแสที่ได้จะเป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับความเข้มแสง โดยเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจะทำให้

กระแสเพิ่มขึ้นไปด้วย ในขณะที่แรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หากอุณหภูมิมีค่ามากขึ้นก็จะส่งผลให้แรงดันมีค่าลดลง (-2.1 mV/K) และกระแสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (0.01%/K) เนื่องจากกำลังไฟฟ้าได้จากผลคูณของกระแสและแรงดัน ดังนั้นจึงมีจุดที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดที่เรียกว่า จุด MPP (Maximum power point) ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดัน (Kaltschmitt et al., 2007) ดังนั้นการออกแบบพื้นที่ที่จะต้องคำนึงถึงศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม



รูปที่ 2.3 ผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิต่อลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สภาวะการทดสอบมาตรฐาน (Kaltschmitt et al., 2007)

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.1 (Momoh, 2012) ซึ่งปริมาณของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงและอุณหภูมิ

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_C}{G_{STC}} (1 + k_C (T_C - T_{STC})) \quad (2.1)$$

- โดยที่ P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์
 P_{STC} คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่สภาวะมาตรฐานการทดสอบ (Standard test condition, STC)
 G_{STC} คือ ความเข้มแสงที่สภาวะมาตรฐาน เท่ากับ 1000 W/m^2
 T_{STC} คือ อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน เท่ากับ 25°C

G_C	คือ ความเข้มแสง ณ เวลาใด ๆ (W/m^2)
T_C	คือ อุณหภูมิเซลล์ ณ เวลาใด ๆ ($^{\circ}C$)
k_C	คือ สัมประสิทธิ์ค่าอุณหภูมิ ($^{\circ}C^{-1}$)

2.3.2 กังหันลม

พลังงานลมถือเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูงเช่นเดียวกับพลังงานแสงอาทิตย์ มีการใช้ประโยชน์จากพลังงานลมมาอย่างยาวนาน โดยเฉพาะการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้กังหันลม (Wind turbine) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยใช้พลังงานจลน์ของลมที่พัดผ่านใบพัดเปลี่ยนเป็นพลังงานกล ซึ่งใบพัดนี้มีแกนเชื่อมต่อเพลาลและเกียร์ตรอบเพื่อใช้ขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะทำการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าออกมาใช้งาน ข้อดีของกังหันลมคือ ใช้พื้นที่น้อยและพื้นที่ด้านล่างอาจจะยังใช้ประโยชน์ได้ ส่วนข้อเสียคือ ทำให้ในบางพื้นที่เสียหาย มีเสียงดังจากการหมุนของใบพัดจึงไม่สามารถติดตั้งใกล้พื้นที่ชุมชน เป็นต้น

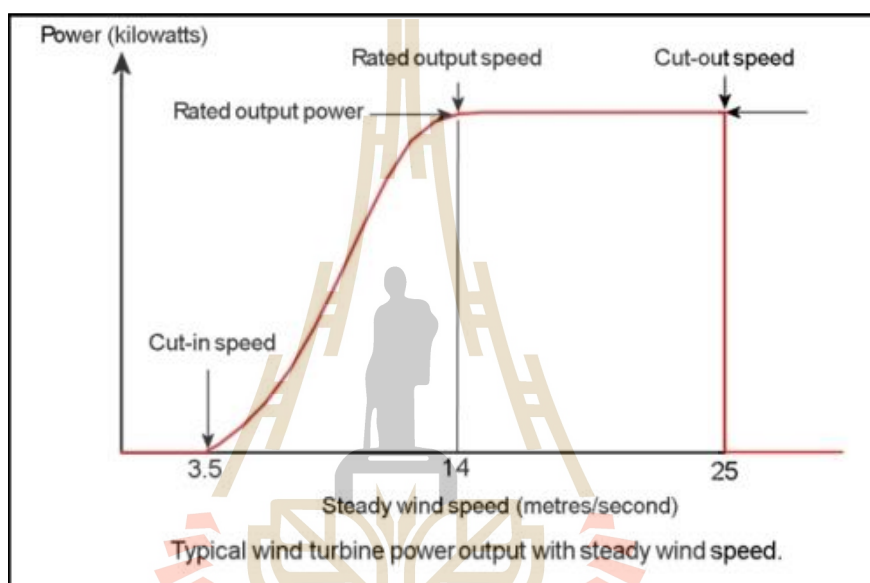


รูปที่ 2.4 กังหันลม

แหล่งที่มา : <https://myfreezer.wordpress.com/2010/11/30/wind-energy/> (เข้าถึงเมื่อ 8/12/2561)

กำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่พัดผ่าน ตัวอย่างความสัมพันธ์ของความเร็วลมและการผลิตกำลังไฟฟ้าของกังหันลมในอุดมคติแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยความเร็วลมตัดเข้าระบบ (Cut-in speed) คือ ความเร็วที่น้อยที่สุดที่ทำให้กังหันลมทำงานหรือผลิตกำลังไฟฟ้าได้

มีค่าประมาณ 3 ถึง 4 m/s เมื่อความเร็วมากกว่าความเร็วตัดออกนี้จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงค่าความเร็วพิกัด (Rated speed) คือ ความเร็วที่กังหันลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องโดยที่ค่าประมาณ 12 ถึง 17 m/s และความเร็วตัดออก (Cut-out speed) คือ ความเร็วที่มีค่าสูงที่อาจทำให้กังหันลมเสียหาย ดังนั้นจึงต้องหยุดทำงานเมื่อความเร็วเกินค่าความเร็วตัดออกนี้ โดยทั่วไปแล้วมีค่าประมาณ 25 m/s (ชานนท์ ธรรมศร, 2557)



รูปที่ 2.5 ความเร็วลมกับการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม

แหล่งที่มา: http://www.wind-power-program.com/turbine_characteristics.htm

(เข้าถึงเมื่อ 12/12/2561)

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.2 (Hetzer et al., 2008) ซึ่งปริมาณของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับความเร็วลม

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \\ P_{WT, rated} (v - v_{ci}) / (v_r - v_{ci}), & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{WT, rated}, & v_r < v < v_{co} \\ 0, & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (2.2)$$

โดยที่ P_{WT} คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม (W)

$P_{WT, rated}$	คือ กำลังไฟฟ้าพิกัดของกังหันลม (W)
v	คือ ความเร็วลม (m/s)
v_{ci}	คือ ความเร็วลมตัดเข้าระบบ (m/s)
v_r	คือ ความเร็วลมพิกัด (m/s)
v_{co}	คือ ความเร็วลมตัดออกจากระบบ (m/s)

2.4 ระบบกักเก็บพลังงาน

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy storage system) เป็นระบบที่ใช้สะสมพลังงานเมื่อพลังงานที่ผลิตได้มากกว่าความต้องการใช้และจ่ายพลังงานเมื่อมีความต้องการใช้ โดยแปลงพลังงานไฟฟ้าจากระบบมาเก็บไว้ในรูปแบบพลังงานแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดและเทคโนโลยี สามารถรองรับความผันผวนของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ข้อดีเมื่อติดตั้งในระบบไฟฟ้ามีดังนี้ โดยคุณสมบัติของเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานประเภทต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

- ความสามารถในการรักษาความสมดุลระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และความต้องการใช้ไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันในช่วงเวลาต่าง ๆ
- ความสามารถในการรับหรือส่งกำลังไฟฟ้าได้ทั้งสองทิศทาง
- เป็นแหล่งพลังงานสำรองในช่วงที่ระบบไฟฟ้าเกิดความผิดปกติ และเป็นแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้าสำรองไว้ใช้ในระบบไมโครกริดแบบแยกเดี่ยว

จากตารางที่ 2.2 พบว่าไม่มีเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานชนิดใดมีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเพื่อใช้งานในทุกประเภท เช่น แบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าสูงแต่มีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่ำและมีรอบการใช้งานต่ำด้วย ส่วนตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นมีความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าต่ำแต่มีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงและมีรอบการใช้งานที่สูงด้วย ในงานวิจัยนี้พิจารณาการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมถูกสร้างขึ้นมาเพื่อรวมเอาเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานต่างประเภทเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานโดยรวม ข้อดีของเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานแต่ละประเภทมาใช้งาน ในการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมต้องคำนึงถึงปัจจัยหลักดังต่อไปนี้ (Ghiassi-Farrokhfal et al., 2016)

- ประเภทของเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานที่จะนำมาใช้
- วิธีการควบคุมขั้นตอนการอัดและปล่อยประจุระหว่างเทคโนโลยีแต่ละประเภท
- ขนาดติดตั้งที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน (Gao, 2015; Farhadi et al., 2015)

	ความ หนาแน่น พลังงาน [Wh/kg]	ความ หนาแน่น กำลัง [W/kg]	เวลาการปล่อย ประจุ	เวลาที่ใช้ ตอบสนอง	จำนวนรอบ การใช้งาน
ลวดนิกเกิล	5-50	400-4,000	วินาที-นาที่	< 1 วินาที	10,000
แบตเตอรี่ตะกั่วกรด	30-50	75-300	นาที่- ชั่วโมง	< 10 วินาที	2,000
แบตเตอรี่ลิเทียม- ไอออน	70-200	150-500	นาที่- ชั่วโมง	< 10 วินาที	<10,000
แบตเตอรี่นิกเกิล- แคดเมียม	45-80	140-180	นาที่- ชั่วโมง	< 10 วินาที	<1,000
แบตเตอรี่โซเดียม- ซัลเฟอร์	110-130	120	นาที่- ชั่วโมง	< 10 วินาที	<5,000
ตัวเก็บประจุยิ่งยวด	0.5-10	1,000- 18,000	วินาที- 1 ชั่วโมง	< 1 วินาที	>100,000
SMES	1-10	500-2,000	มิลลิวินาที- 1 ชั่วโมง	< 5 มิลลิวินาที	>100,000

ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นระบบที่ถูกศึกษามากที่สุด เนื่องจากความพร้อมในการใช้งาน พื้นฐานการทำงานคล้ายกันและสามารถทดแทนข้อด้อยของกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Jing et al., 2016) โดยรวมเอาคุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงและตัวเก็บประจุที่มีกำลังไฟฟ้าสูงและรอบการใช้งานที่มากกว่าเข้าด้วยกัน จุดประสงค์หลักคือยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ตัวอย่างการนำระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมแบบแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปใช้มีดังนี้ (Brane et al., 2017; Akram et al., 2017; Kim et al., 2016)

- แก้ไขปัญหาความไม่แน่นอนของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน
- รองรับความไม่แน่นอนของโหลดไฟฟ้าบางประเภท
- เพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบและปรับปรุงด้านเศรษฐศาสตร์
- รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม

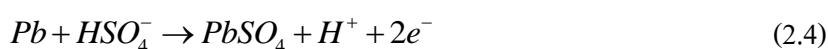
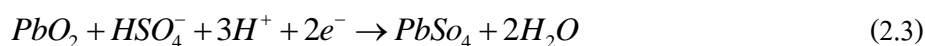
2.4.1 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กักเก็บพลังงานในไมโครกริด เนื่องจากสามารถกักเก็บพลังงานได้มาก และมีให้เลือกใช้หลายชนิดในตลาด ปัจจัยในการเลือกชนิดของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและราคาที่เหมาะสม แบตเตอรี่นั้นมีหลายชนิดซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป จะกล่าวถึงเฉพาะชนิดสำคัญ ๆ ที่ถูกพัฒนาและนิยมใช้ในปัจจุบัน (Gao, 2015; Pengwei, 2015)

1) แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid battery)

เป็นแบตเตอรี่ที่คิดค้นและใช้งานมามากกว่า 100 ปี และยังคงเป็นแบตเตอรี่แบบประจุไฟฟ้าใหม่ได้หรือแบตเตอรี่ทุติยภูมิ (Secondary battery) ที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก ประสิทธิภาพสูง มีความน่าเชื่อถือสูงเนื่องจากมีงานศึกษาที่เกี่ยวข้องมากมายและตอบสนองต่อกระแสกระชากสูงได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่น เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง (Uninterruptible power supply, UPS) และแหล่งปั่นไฟฟ้าสำรอง (Spinning reserve) แต่มีข้อเสียคือค่อนข้างจะมีอายุการใช้งานที่สั้น มีความหนาแน่นของพลังงานต่ำ และอุณหภูมิมีผลต่อการทำงานมากจึงต้องการระบบการจัดการที่ดี

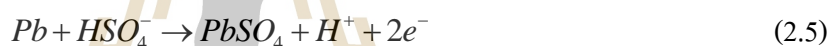
ขั้นตอนการปล่อยประจุ นั้น ไอออนบวกของไฮโดรเจนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปแคโทด โดยในขั้นตอนการเคลื่อนที่นี้จะใช้กรดซัลฟิวริกทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วทั้งสอง และเมื่อต่อเข้ากับแหล่งจ่ายเพื่ออัดประจุนั้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ โดยสมการของปฏิกิริยาที่ย้อนกลับได้ของขั้วแคโทดและแอโนดแสดงไว้ในสมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.4 ตามลำดับ



2) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery)

เป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่นิยมใช้มากอีกชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานสูง มีอายุการใช้งานยาวนาน มีการตอบสนองที่เร็ว และมีอัตราการคายประจุได้เอง (Self-discharge) ที่ต่ำ เหมาะสำหรับใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น มือถือและคอมพิวเตอร์ ถือได้ว่าเป็นแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในปัจจุบัน ส่วนการใช้งานในระบบไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นยังไม่นิยมใช้มากเนื่องจากราคาที่แพงกว่าเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดจึงต้องมีการพิจารณาในการลงทุนและมีปัญหาเรื่องความปลอดภัยในการใช้งานที่ต้องมีระบบป้องกันที่ดี

ขั้นตอนการปล่อยและอัดประจุจะคล้ายกับแบตเตอรี่ตะกั่วกรด เมื่อต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟเพื่ออัดประจุ ไอออนของลิเทียมจะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดผ่านสารอิเล็กโทรไลต์เพื่อไปเก็บสะสมที่ขั้วแอโนดเพื่อสร้างแรงดันระหว่างขั้วและเมื่อต่อเข้ากับโหลดเพื่อปล่อยประจุจะทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับขึ้นสมการของปฏิกิริยาที่ย้อนกลับได้ของขั้วแคโทดและแอโนดแสดงไว้ในสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6 ตามลำดับ



3) แบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (Nickel-cadmium battery)

เป็นแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าและอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด เหมาะสำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง และถูกนำมาใช้ในระบบไฟฟ้าบางส่วน แต่เนื่องจากข้อกำหนดในการเพิ่มการควบคุมสารพิษแคดเมียม หลายหน่วยงานมีการยกเลิกการใช้สารแคดเมียม ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยม อีกทั้งยังมีปัญหาด้าน Memory effect ของแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมที่เกิดจากการประจุไฟฟ้าในขณะที่ยังปล่อยประจุไม่หมด จะทำให้ความสามารถในการเก็บประจุต่ำลง ซึ่งไม่เหมาะสมอย่างมากในระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนซึ่งมีความผันผวนสูง

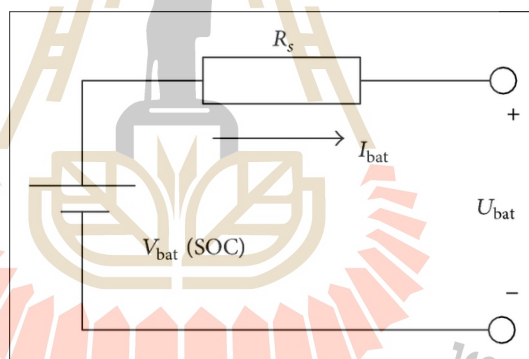
4) แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium-sulfur battery)

เป็นแบตเตอรี่ที่กำลังถูกพัฒนาและเป็นระบบกักเก็บพลังงานที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายจากพลังงานหมุนเวียน เนื่องจากมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่สูง อายุการใช้งานยาวนานและมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ปล่อยมลพิษในขั้นตอนการทำงานและวัสดุที่ใช้โดยส่วนมากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 300-350 °C เพื่อให้โซเดียมเป็น

ของเหลวตลอดเวลา ซึ่งทำให้มีความยุ่งยากและการลงทุนที่สูง จึงเหมาะใช้งานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ ข้อเสียอีกอย่างคือโซเดียมเป็นสารที่อันตรายอย่างมาก ถ้าปล่อยไว้ของเหลวโซเดียมทำปฏิกิริยากับน้ำในอากาศ

ในงานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรด เนื่องจากเป็นแบตเตอรี่ที่มีความน่าเชื่อถือพอสมควร โดยมีการใช้งานมายาวนาน มีความน่าเชื่อถือสูงและประสิทธิภาพสูง มีบริษัทผู้ผลิตมากมายทำให้สามารถเลือกใช้ได้หลายยี่ห้อและขนาด ถึงแม้จะมีความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าและจำนวนรอบการใช้งานต่ำกว่าประเภทอื่น ๆ แต่ข้อดีคือราคาถูก วงจรพื้นฐานของแบตเตอรี่แสดงในรูปที่ 2.6 และแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่คำนวณได้จากสมการที่ 2.7 โดยถ้าอัดหรือปล่อยประจุที่กระแสสูงจะทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง จากความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

$$U_{bat} = V_{bat} - I_{bat} R_s \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.6 วงจรพื้นฐานของแบตเตอรี่

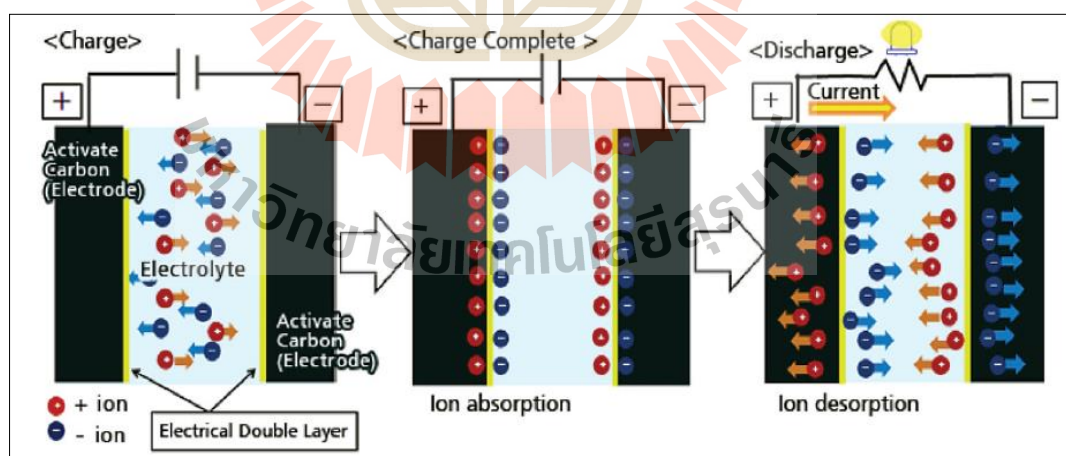
2.4.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) คือตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุมากกว่าตัวเก็บประจุทั่วไปหลายเท่า ตัวเก็บประจุทำงานโดยอาศัยแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic charge) ระหว่างประจุต่างขั้วกัน ซึ่งแตกต่างจากแบตเตอรี่ที่อาศัยปฏิกิริยาเคมี ทำให้อายุการใช้งานยาวนานกว่าแบตเตอรี่มาก เนื่องจากไม่เกิดความเสี่ยงสภาพจากปฏิกิริยาเคมี มีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่สูงมากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ แต่ก็มีมีความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าต่ำเช่นกัน ทำให้การประยุกต์ใช้งานนั้นเหมาะกับการตอบสนองต่อกำลังไฟฟ้าที่สูงในเวลาอันสั้น (Short-term and High power operations) อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม วัสดุที่ใช้แล้วไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

เหมือนแบตเตอรี่ที่เป็นสารเคมี ข้อเสียที่สำคัญของตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือ อัตราการปล่อยประจุได้เองต่อวันสูงมากถึงแม้จะไม่ได้ใช้งาน ส่วนประกอบของตัวเก็บประจุประกอบไปด้วย

- 1) ขั้วบวกและขั้วลบ มักทำจากแผ่นคาร์บอนที่มีพื้นที่มาก และมีรูพรุนเพื่อให้ประจุเกาะตัวได้
- 2) แผ่นกั้นระหว่างขั้ว ไอออนสามารถผ่านไปมาได้เหมือนกับแบตเตอรี่
- 3) สารละลายอิเล็กโทรไลต์

เมื่อให้ความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง เช่น เมื่อต่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดเข้ากับแบตเตอรี่ ประจุที่เป็นบวกภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกดึงดูดเข้าหาขั้วลบของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและประจุที่เป็นลบในสารละลายก็จะเข้าไปหาขั้วบวก การที่ใช้คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการกักเก็บประจุเนื่องจากประจุของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถที่จะแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนได้ จึงมีจุดที่มีการดึงดูดกันระหว่างประจุบวกและลบเพิ่มขึ้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงเสมือนกับการนำตัวเก็บประจุแบบธรรมดาขนาดเล็กๆ มารวมด้วยกันจำนวนมาก ดังรูปที่ 2.7 แสดงการกระจายตัวของประจุภายในตัวเก็บประจุยิ่งยวดขณะอัดประจุ เมื่ออัดประจุจนเต็มแล้ว และขณะคายประจุ (วรวิศ กอปรศิริพัฒน์, 2014)



รูปที่ 2.7 การอัดและปล่อยประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (วรวิศ กอปรศิริพัฒน์, 2014)

ค่าพลังงานที่เก็บไว้ได้ในตัวเก็บประจุ (W_C) จะขึ้นอยู่กับค่าคาปาซิแตนซ์ (C) และค่ากำลังสองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อมระหว่างขั้วของตัวเก็บประจุ (V) ตามสมการที่ 2.8

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.8)$$

โดยตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีค่าแรงดันสูงสุดที่กำหนดไว้ (V_{MAX}) เมื่อพลังงานสูงสุด (W_{MAX}) สามารถคำนวณได้จากแรงดันสูงสุดดังกล่าว และจะไม่มีพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุเมื่อแรงดันที่ตกคร่อมมีค่าเท่ากับศูนย์ ในการอัดหรือปล่อยประจุนั้น ตัวเก็บประจุสามารถควบคุมให้กำลังไฟฟ้าหรือกระแสอยู่ในลักษณะค่าคงที่ ตามสมการที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (2.9)$$

$$P = IV \quad (2.10)$$

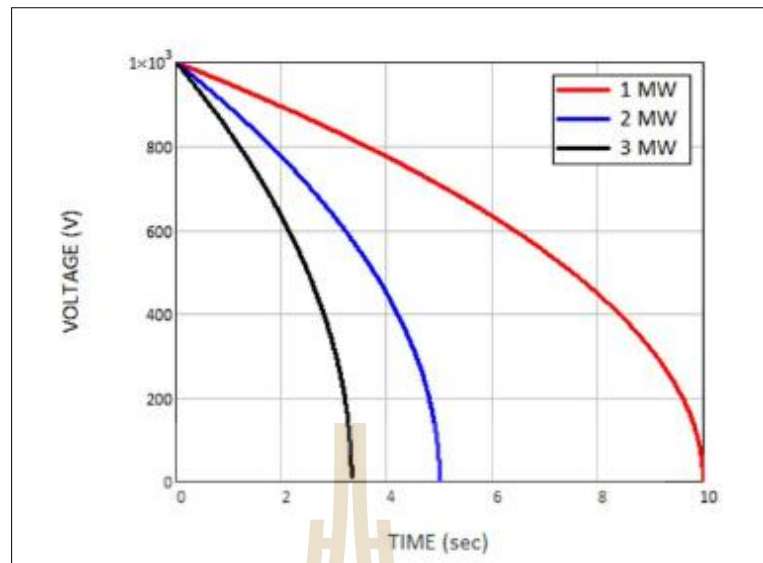
สมการอินทิเกรตคือ

$$\int VdV = \frac{1}{C} \int Pdt \quad (2.11)$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและเวลาคือ

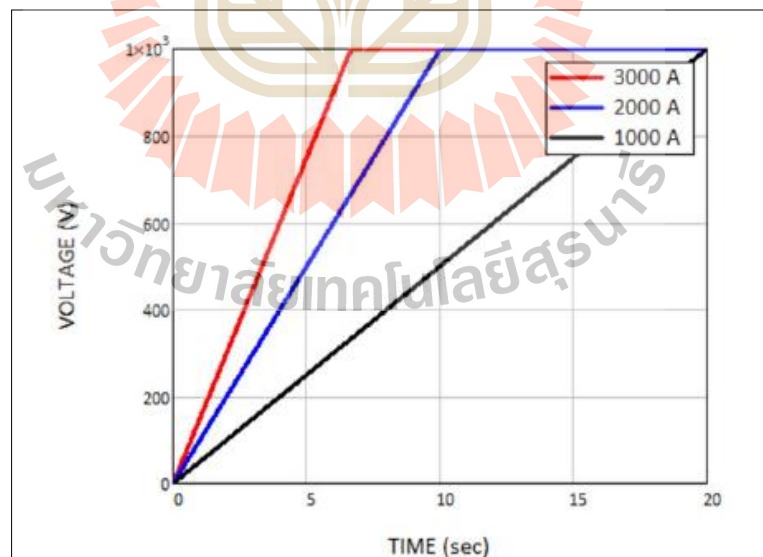
$$V(t) = \sqrt{V_{\max}^2 - \frac{2Pt}{C}} \quad (2.12)$$

เมื่อทดสอบกับตัวเก็บประจุ 20 F แรงดันเริ่มต้น 1000 V ปล่อยกำลังไฟฟ้าคงที่ 1 MW 2 MW และ 3 MW ตามลำดับจะได้กราฟแรงดันและเวลาของตัวเก็บประจูดังรูปที่ 2.8 (Gevorgian et al., 2017)



รูปที่ 2.8 แรงดันของตัวเก็บประจุเมื่อปล่อยประจุที่กำลังไฟฟ้าค่าต่าง ๆ (Gevorgian et al., 2017)

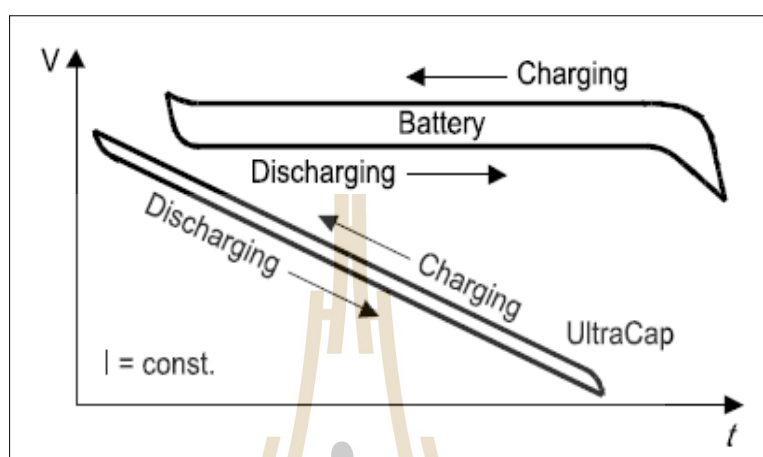
ทดสอบขั้นตอนการอัดประจุในตัวเก็บประจุตัวเดิมด้วยกระแสขนาด 1000 A 2000 A และ 3000 A จะได้กราฟแรงดันดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่การอัดประจุด้วยกระแสที่ค่าต่าง

(Gevorgian et al., 2017)

การเปรียบเทียบลักษณะของแรงดันของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดขณะอัดและปล่อยประจุที่กระแสคงที่ได้ดังรูปที่ 2.10 พบว่าค่าแรงดันของแบตเตอรี่มีลักษณะเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลและตัวเก็บประจุมีลักษณะเป็นเส้นตรง



รูปที่ 2.10 ลักษณะแรงดันของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุขณะอัดและปล่อยประจุ
แหล่งที่มา: https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/fullycharged/archive/2015/07/17/supercapacitors
(เข้าถึงเมื่อ 9/05/2561)

2.4.3 พารามิเตอร์ของระบบกักเก็บพลังงาน

1) ความจุ (Capacity)

ความจุคือค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการอัดหรือเก็บประจุสะสมไว้ได้ของระบบกักเก็บพลังงาน หน่วยที่ใช้ทั่วไปคือ Ah สำหรับแบตเตอรี่และ F สำหรับตัวเก็บประจุ หรือสามารถคำนวณให้อยู่ในหน่วยพลังงานไฟฟ้า Wh ได้

2) จำนวนรอบการใช้งาน (Cycle)

จำนวนครั้งเมื่ออัดประจุจนเต็มพิกัดแล้วนำไปใช้งาน แล้วนำมาอัดประจุจนเต็มอีกครั้ง ซึ่งอยู่ในเงื่อนไขของค่าระดับความลึกของการปล่อยประจุ ซึ่งแต่ละรอบจะปล่อยประจุน้อยหรือมาก โดยระบบกักเก็บพลังงานที่มีค่าระดับความลึกของการปล่อยประจุสูงจะมีรอบการใช้งานมากกว่า ปกติแล้วตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีจำนวนรอบมากกว่าแบตเตอรี่หลายเท่า

3) สถานะการประจุ (State of charge, SOC)

ค่าที่บ่งบอกสถานะความจุในเวลานั้นของระบบกักเก็บพลังงาน โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับความจุทั้งหมด โดยทั่วไปจะกำหนดให้ต้องมีสถานะการประจุในขอบเขตที่กำหนด

เพื่อรักษาประสิทธิภาพการใช้งาน เช่น 30-100 % โดย SOC 100 % หมายถึงระบบกักเก็บพลังงานมีการอัดประจุอยู่ในสถานะประจุเต็มหรือเท่ากับความจุพิกัด

4) ความลึกของการปล่อยประจุ (Depth of discharge, DOD)

ค่าเปอร์เซ็นต์ที่ระบบกักเก็บพลังงานปล่อยประจุออกไปเทียบกับความจุทั้งหมด ในการใช้งานระบบกักเก็บพลังงาน ผู้ผลิตจะกำหนดขอบเขตค่าความลึกของการปล่อยประจุไว้ คือเป็นค่าที่ยอมให้ปล่อยประจุไปได้ ถ้ามีการใช้งานนอกขอบเขตนี้จะทำให้ระบบกักเก็บพลังงานมีประสิทธิภาพลดลงหรือไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ อีก โดยมีความสัมพันธ์กับสถานะการประจุตามสมการที่ 2.13

$$DOD = 1 - SOC \quad (2.13)$$

5) แรงดัน

แรงดันที่เข้าของระบบกักเก็บพลังงานจะแปรผันตามชนิดสารเคมีที่ใช้และเซลล์ที่ต่ออนุกรมกันข้างใน โดยแรงดันที่ระบุไว้จะเป็นแรงดันเฉลี่ย โดยแรงดันที่ชั่วขณะเปิดวงจรหรือเมื่อประจุเต็มจะมีค่ามากกว่าเล็กน้อย และจะเปลี่ยนไปเมื่อต่อใช้งานกับโหลด

6) อัตราการอัดหรือปล่อยประจุ

หรือเรียกว่าซีเรต (C-rate) คืออัตราที่ระบบกักเก็บพลังงานปล่อยประจุได้ในหน่วยชั่วโมง เช่น แบตเตอรี่ขนาด 10 Ah ที่การปล่อยประจุ 1 C หมายความว่า แบตเตอรี่จะปล่อยประจุขนาด 10 A เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และที่ 2 C จะปล่อยประจุขนาด 20 A เป็นเวลา 30 นาที และที่ C/2 จะปล่อยประจุขนาด 5 A เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

7) การคายประจุตัวเอง (Self-discharge)

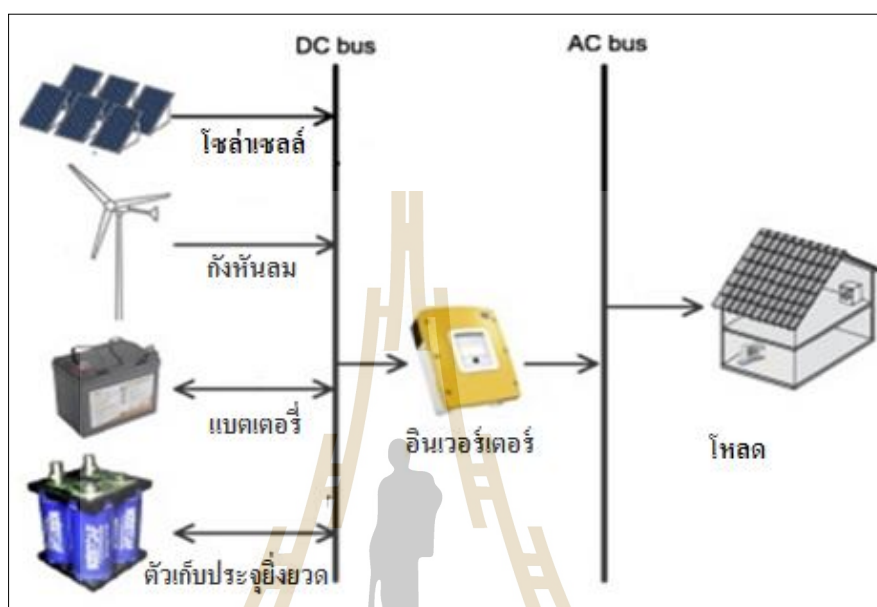
ปริมาณที่ระบบกักเก็บพลังงานปล่อยประจุโดยไม่ได้ต่อใช้งาน ส่วนมากแล้วจะบอกเป็นอัตราส่วนกับความจุพิกัดเป็นรายเดือน เช่น 3% ต่อเดือน เป็นต้น

8) แรงดันคัตออฟ (Cut off voltage)

แรงดันที่ระบบกักเก็บพลังงานยอมได้ขณะปล่อยประจุ ถ้าแรงดันต่ำกว่านี้จะทำให้ระบบกักเก็บพลังงานเสียหายและไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ โดยกำหนดโดยผู้ผลิตขึ้นอยู่กับชนิดของระบบกักเก็บพลังงาน ถ้าใช้แรงดันดังกล่าวกับอัตราการปล่อยประจุที่แตกต่างไป ความจุของระบบกักเก็บพลังงานจะสูงเมื่ออัตราปล่อยประจุต่ำกว่า

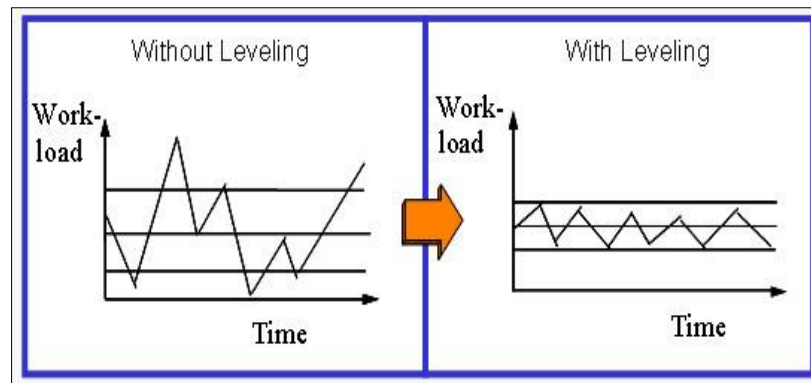
2.4.4 การใช้งานและการจัดการพลังงานของไมโครกริด

ในงานวิจัยชิ้นนี้จะพิจารณาระบบไมโครกริดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดในระบบไมโครกริดดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไมโครกริดกับระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม (Ma et al., 2015)

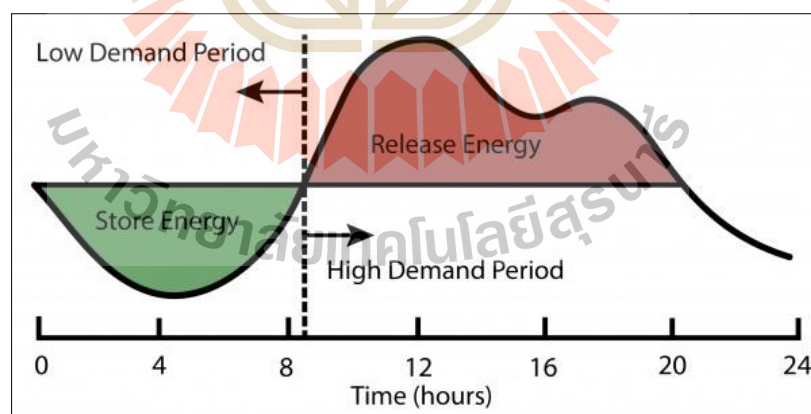
โดยทั่วไปแล้วระบบกักเก็บพลังงานสามารถใช้ปรับปรุงเสถียรภาพและด้านเศรษฐศาสตร์ของไมโครกริดได้ จุดมุ่งหมายในการใช้ระบบกักเก็บพลังงานมีด้วยกันหลายจุดประสงค์ โดยการปรับความราบเรียบของโหลด (Load leveling) ดังรูปที่ 2.12 และการย้ายช่วงใช้ไฟฟ้าสูงสุด (Peak shifting) ดังรูปที่ 2.13 เป็นจุดประสงค์หลักในการบรรเทาความผันผวนและปรับปรุงคุณภาพของกำลังไฟฟ้า เนื่องจากค่าโหลดในแต่ละระบบจะมีความผันผวนตลอดเวลา แต่การผลิตไฟฟ้าของระบบต้องการผลิตในค่าที่คงที่หรือผันผวนน้อย ดังนั้นการปรับความราบเรียบจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าของระบบได้



รูปที่ 2.12 การปรับความราบเรียบของโหลด

ที่มา: <http://www.shmula.com/why-heijunka-is-a-block-in-the-foundation-of-the-toyota-house/10414/> (เข้าถึงเมื่อ 8/05/2561)

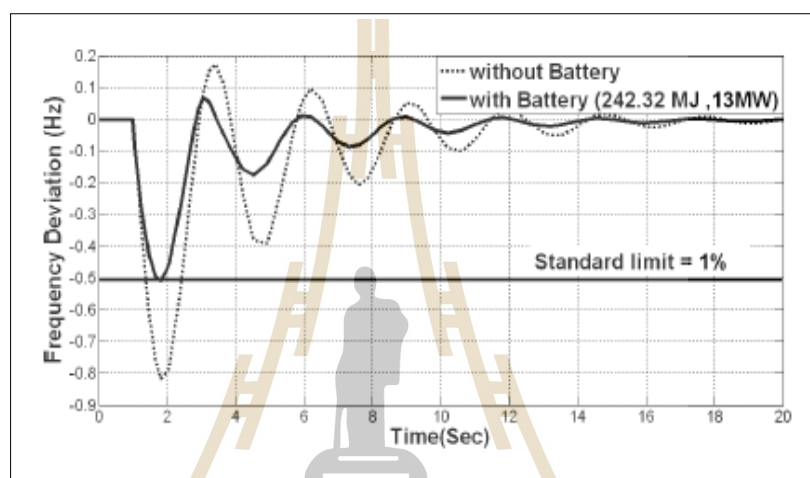
ในระบบไฟฟ้า มักจะมีช่วงเวลาที่การผลิตไฟฟ้าสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าความต้องการใช้ และมีช่วงเวลาที่ความต้องการมากกว่าการผลิต ดังนั้นจึงต้องมีระบบกักเก็บพลังงานมาเก็บพลังงานไฟฟ้าในช่วงที่ผลิตไฟฟ้าได้มาก เพื่อนำไปใช้ในช่วงที่มีความต้องการสูงสุด เพื่อลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าหลัก



รูปที่ 2.13 การย้ายช่วงการใช้งานไฟฟ้า

ที่มา: <http://css.umich.edu/factsheets/us-grid-energy-storage-factsheet> (เข้าถึงเมื่อ 8/05/2561)

การลดอัตราการลาดเอียงของกำลังไฟฟ้า (Ramp rate control) ระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนนั้นขาดต่อการควบคุม เช่นกึ่งหั่นลม ในช่วงที่เกิดที่เกดพายุคะนอง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะพุ่งขึ้นอย่างสูง และในโซล่าเซลล์ในช่วงที่มีเมฆมากกำลังไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดของกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในอัตราที่ต้องการ เพื่อรักษาส่วนเบี่ยงเบนของความถี่ให้อยู่ในระดับที่ต้องการ ตามมาตรฐานความถี่ควรอยู่ในช่วงความถี่ $50 \pm 1\%$ ดังตัวอย่างการควบคุมความถี่ในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การควบคุมความถี่ (ชนเดช ไพรธม, 2556)

เนื่องจากไมโครกริดมีความเสถียรภาพดีกว่าระบบไฟฟ้าหลัก ความผันผวนที่เกิดขึ้นจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนอาจส่งผลให้ความต้องการไฟฟ้าและโหลดไม่บรรจบกัน ในไมโครกริดที่เชื่อมกับระบบหลัก พลังงานไฟฟ้าที่ส่งเข้าระบบหลักอาจจะไม่ได้คุณภาพและปริมาณตามที่ต้องการในแต่ละเวลา และพลังงานจากหลาย ๆ ไมโครกริดอาจนำความล้มเหลวมาสู่ระบบไฟฟ้าหลัก ส่วนในระบบไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวอาจจะทำให้เกิดความผันผวนของความถี่และแรงดันทำให้ขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นการใช้ระบบกักเก็บพลังงานจึงสามารถช่วยจัดการคุณภาพของพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งเทคนิคในการจัดการพื้นฐานทั่วไปประกอบไปด้วย 3 วิธี คือ การควบคุมพลังงานให้คงที่ การกรองความถี่พลังงานและการควบคุมอัตราการลาดชัน ดังต่อไปนี้ (Gao, 2015)

1) การควบคุมพลังงานให้คงที่ (Power constant control)

เป็นวิธีที่ง่ายในการจัดการความผันผวนของพลังงาน ซึ่งเป็นการจำกัดพลังงานให้เป็นค่าคงที่ (P_c) ตลอดรอบการทำงาน จากพลังงานที่ได้จากพลังงานทดแทนที่ไม่สามารถ

ควบคุมได้ เมื่อกำหนดให้ P_{DG} เป็นพลังงานที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทน และ P_{ESS} คือ พลังงานของระบบกักเก็บพลังงานจะหาได้จากสมการที่ 2.14

$$P_{ESS} = P_C - P_{DG} \quad (2.14)$$

2) การกรองความถี่พลังงาน (Output filtering control)

เป็นการใช้ระบบกักเก็บพลังงานเป็นเหมือนวงจรกรองความถี่ โดยความถี่สูงจะถูกกรองออกไปด้วยระบบกักเก็บพลังงาน พลังงานที่มีความถี่ต่ำจะผ่านออกได้และส่งพลังงานที่ราบเรียบ (P_{filter}) เข้าสู่ระบบ เนื่องจากความถี่สูงที่ระบบกักเก็บพลังงานรองรับ ทำให้ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานได้โดยเฉพาะแบตเตอรี่ พลังงานของระบบกักเก็บพลังงานจะหาได้จากสมการที่ 2.15

$$P_{ESS} = P_{filter} - P_{DG} \quad (2.15)$$

3) การควบคุมอัตราการลดชั้นของพลังงาน (Ramp-rate control)

กำลังไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานทดแทนนั้นอาจจะมีเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็ว เช่นในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงที่เมฆผ่านอาจจะลดลงอย่างกะทันหัน หน้าที่ของการควบคุมนี้คือลดอัตราการลดของกำลังไฟฟ้าในช่วงอัตราที่ยอมรับหรือที่ออกแบบไว้ (P_{RR}) โดยพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานจะหาได้จากสมการที่ 2.16

$$\frac{dP_{ESS}}{dt} = \frac{dP_{RR}}{dt} + \frac{dP_{DG}}{dt} \quad (2.16)$$

2.4.5 การประยุกต์ใช้งานตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1) การใช้เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในระบบไฟฟ้า เช่น เมื่อมีเหตุการณ์ที่เกิดการเพิ่มของโหลดอย่างฉับพลันจำเป็นต้องมีระบบพลังงานที่สามารถจ่ายให้โหลดในเวลาอันรวดเร็ว หรือการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่ผลิตจากพลังงานทดแทนที่มีความผันผวนสูงจำนวนมากที่ไม่สามารถควบคุมได้ จำเป็นต้องมีระบบกักเก็บพลังงานไว้ หรือแม้กระทั่งการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบซึ่งจะใช้เวลาการเกิดที่เร็วมากซึ่งตัวเก็บประจุยิ่งยวดนี้สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว (Fast service) และยังมีกำลังไฟที่สูงกว่าแบตเตอรี่เพื่อเป็นการรักษาแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้า ทำให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

2) ใช้ในระบบไฟฟ้าขนาดเล็กที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานงานทดแทน เช่น โซลาร์เซลล์ กังหันลม เนื่องจากระบบไฟฟ้าส่วนมากยังนิยมใช้แบตเตอรี่เป็นตัวกักเก็บพลังงาน ซึ่งความผันผวนของพลังงานทดแทน ทำให้แบตเตอรี่ต้องทำงานในสภาวะชาร์จหรือดิสชาร์จในอัตราพลังงานที่สูง (Depth cycle) ซึ่งทำให้อายุการใช้งานสั้นลง อาจพิจารณาใช้ควบคู่กับตัวเก็บประจุซึ่งสามารถทำงานในอัตรากำลังไฟฟ้าที่สูงได้ ซึ่งรอบการชาร์จและดิสชาร์จที่มากกว่าแบตเตอรี่และสามารถทำงานในอุณหภูมิสูงได้มากกว่า ซึ่งเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและเป็นการช่วยให้ระบบกักเก็บพลังงานมีอายุการใช้งานมากขึ้นเมื่อคิดในแง่ของการลงทุน

3) ใช้งานเสริมในรถยนต์ยานพาหนะ ในช่วงการเริ่มเดินเครื่องซึ่งจะดึงกระแสไปใช้ในอัตราสูง หรือใช้คู่กับแบตเตอรี่ในช่วงการเร่งเครื่องในเวลาอันสั้นในรถยนต์ไฟฟ้า โดยตัวเก็บประจุนั้นสามารถอัดประจุให้เต็มได้ในเวลาอันสั้น เช่น จากตอนเบรก (Regenerative- braking)

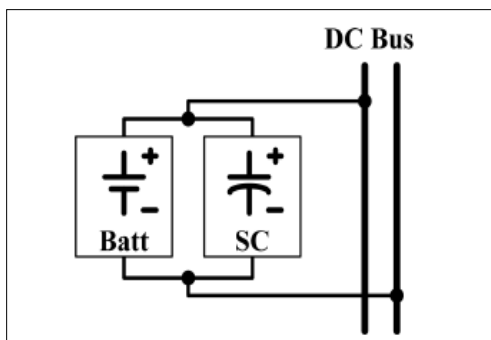
4) ใช้ในอุปกรณ์ไร้สายแบบพกพาที่ใช้งานในเวลาอันสั้น เช่น เครื่องตอกตะปูไฟฟ้า ไร้สาย ส่วนไฟฟ้าไร้สาย ไขควงไฟฟ้า เป็นต้น

2.4.6 การเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม

การเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงาน (HESS topology) มีหลายแบบ โดยทั่วไปแล้วระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ใช้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นจะเชื่อมต่อเข้ากับบัสไฟฟ้ากระแสตรง (DC link) เพื่อข้อดีหลายอย่าง (Xu, 2011; Gu et al., 2014; Che, 2014) ก่อนที่จะแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าบัสไฟฟ้ากระแสสลับผ่านอินเวอร์เตอร์ วิธีการเชื่อมต่อแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเข้ากับระบบไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี (Kuperman, 2011) ดังนี้

1) การเชื่อมต่อแบบพาสซีฟ (Passive topology)

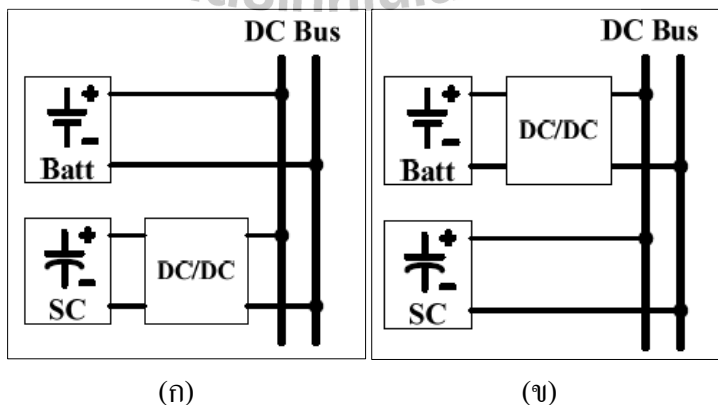
เป็นวิธีการเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานเข้ากับระบบไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด โดยการต่อแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดโดยตรงกับระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 2.15 จะทำให้สามารถลดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าในระบบได้ แต่ในกรณีนี้ที่ขั้วของระบบกักเก็บพลังงานทั้งสองจะมีแรงดันเท่ากัน ทำให้ตัวเก็บประจุไม่สามารถทำงานได้เต็มความสามารถเมื่อมีอัตราการชาร์จหรือดิสชาร์จที่ กำลังไฟฟ้าสูง ด้วยเหตุนี้ทำให้มีความผันผวนของกระแสที่ขั้วของแบตเตอรี่ ทำให้แบตเตอรี่ทำงานในอัตราการชาร์จหรือดิสชาร์จที่สูงเกินไปส่งผลต่อคุณสมบัติการทำงานของแบตเตอรี่และทำให้อายุการใช้งานสั้นลง



รูปที่ 2.15 การเชื่อมระบบกักเก็บพลังงานแบบพาสซีฟ (Jing et al., 2016)

2) การเชื่อมต่อแบบกึ่งแอคทีฟ (Semi-active topology)

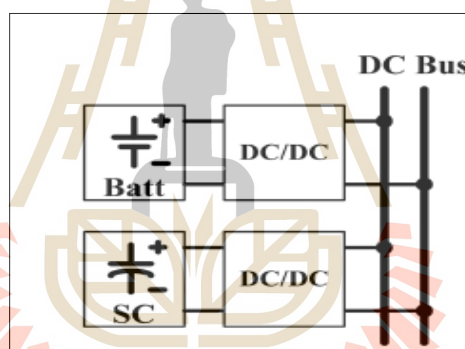
เพื่อปรับปรุงการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน ใช้คอนเวอร์เตอร์ DC/DC แบบสองทิศทางเชื่อมต่อระหว่างระบบกักเก็บพลังงานแต่ละชนิดและระบบไฟฟ้า การต่อแบบกึ่งแอคทีฟนี้มีเพียงระบบกักเก็บพลังงานชนิดเดียวที่ต่อกับคอนเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2.16 (ก) ต่อกอนเวอร์เตอร์ที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพียงตัวเดียว ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะสามารถทำงานได้ตามความสามารถ โดยการทำงานที่แรงดันที่เหมาะสมที่ถูกปรับด้วยคอนเวอร์เตอร์ ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความเสถียรขึ้น แต่ในวิธีนี้ก็ทำให้เกิดความผันผวนขึ้นที่แบตเตอรี่ที่ส่งผลต่อการใช้งานแบตเตอรี่ ในรูปที่ 2.16 (ข) ต่อกอนเวอร์เตอร์ที่แบตเตอรี่เพียงตัวเดียว ทำให้สามารถควบคุมกระแสการทำงานของแบตเตอรี่ได้ โดยทำงานที่แรงดันที่ถูกปรับให้เหมาะสมด้วยคอนเวอร์เตอร์ ส่วนตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะทำงานตามแรงดันของระบบไฟฟ้า เนื่องจากการทำงานที่เป็นเชิงเส้น ทำให้อาจเกิดความผันผวนขึ้นในระบบไฟฟ้า จำเป็นจะต้องใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใหญ่ขึ้นทำให้เสียค่าใช้จ่ายมากขึ้น



รูปที่ 2.16 การเชื่อมระบบกักเก็บพลังงานแบบกึ่งแอคทีฟ (Jing et al., 2016)

3) การเชื่อมต่อแบบแอคทีฟ (Active topology)

การเชื่อมต่อแบบนี้ จะเชื่อมคอนเวอร์เตอร์ DC/DC แบบสองทิศทางทั้งในแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดดังรูปที่ 2.17 ทำให้สามารถควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละชนิดให้ทำงานที่แรงดันที่เหมาะสมของแต่ละชนิด ทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำงานได้อย่างเต็มที่สามารถสมบัติการใช้งานที่ตอบสนองต่ออัตราค่าพลังงานไฟฟ้าสูงได้อย่างรวดเร็ว และลดความผันผวนที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ทำให้อายุการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานเพิ่มมากขึ้น และสามารถปรับปรุงระบบไฟฟ้ามีความเสถียรและความน่าเชื่อถือมากขึ้นด้วยซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการควบคุม ถึงแม้การเชื่อมต่อแบบนี้จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่วิธีการในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ก็จะมีซับซ้อนมากยิ่งขึ้น และต้องการใช้จำนวนคอนเวอร์เตอร์ที่มากยิ่งขึ้นทำให้เสียค่าใช้จ่ายที่มากขึ้น ซึ่งในบางระบบไฟฟ้าอาจพิจารณาให้เชื่อมต่อในแบบสองกรณีแรกได้



รูปที่ 2.17 การเชื่อมระบบกักเก็บพลังงานแบบแอคทีฟ (Jing et al., 2016)

2.5 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาทฤษฎีและปรัชญ่วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ พบว่าเนื้อหามีหลายส่วนที่เกี่ยวข้อง ปรัชญ่วรรณกรรมเกี่ยวข้องกับแนวทางการจัดการพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ใช้แบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดในไมโครกริดที่มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน วิธีการประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ พร้อมทั้งการหาขนาดติดตั้ง ผลการศึกษาวิจัยของนักวิจัยหลายท่านในช่วงหลายปีที่ผ่านมาสามารถสรุปและแสดงเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	ผลการดำเนินงานวิจัย
2005	Bindner, Cronin, Lundsager, Manwell, Abdulwahid and Baring-Gould	นำเสนอและเปรียบเทียบโมเดลการประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่ใช้งานในระบบผลิตกำลังไฟฟ้าแบบพลังงานหมุนเวียน ประกอบไปด้วยวิธีแบบพลังงานผ่านสะสม (Ah/Wh throughput) วิธี FhG/Riso และวิธีการนับแบบฝนตก (Rain-flow counting)
2016	Chalise, Strenhagen, Hansen and Tonkoski	เสนอวิธีการจัดการพลังงานภายในไมโครกริดในพื้นที่ห่างไกลที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลโดยพิจารณาอายุการใช้งานแบตเตอรี่ตะกั่วกรด โดยสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบถ่วงน้ำหนักระหว่างค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่องดีเซลและค่าเสื่อมสภาพอายุของแบตเตอรี่ พบว่าในการยืดอายุการใช้งานจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายค่าดีเซลเพิ่มขึ้น ผลที่ได้คือหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมเพื่อลดค่าใช้จ่ายของไมโครกริดให้น้อยที่สุด
2016	Alam and Saha	ตรวจสอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่มีการกำหนดขนาดติดตั้งไว้ในไมโครกริดที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ การจำลองหาอายุที่สถานะการผลิตกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งมีความผันผวนต่างกันโดยใช้วิธีประเมินแบบฝนตก พบว่าหากใช้แบตเตอรี่ในระบบที่มีกำลังไฟฟ้าผันผวนสูงจะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานสั้นลง
2016	Bettran, Barahona, Vidal, Alfonso, Arino and Perez	ตรวจสอบและแสดงการคำนวณอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ในสถานะเดียวกันเมื่อทำงานในระบบที่มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ แสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่แต่ละชนิดมีอายุต่างกันและแบตเตอรี่ชนิดเดียวกันจะมีอายุต่างกันด้วยหากติดตั้งที่ขนาดต่างกัน

ตารางที่ 2.3 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	ผลการดำเนินงานวิจัย
2016	Jing, Lai, Wallace and Wong	ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งานและความสำคัญในการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด เปรียบเทียบวิธีในการเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานและกลยุทธ์ในการจัดการพลังงานเพื่อลดเงื่อนไขการทำงานที่ไม่เหมาะสมของแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ
2016	Ghiassi-farrokhfal, Rosenberg, Keshav and Adjaho	เสนอการพื้นฐานของโมเดลคณิตศาสตร์ในการออกแบบและการทำงานที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม (แบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด) โดยเสนอว่าควรพิจารณา 3 ปัจจัย คือ ประเภทของเทคโนโลยีกักเก็บพลังงาน ขนาดติดตั้งและวิธีการควบคุม
2016	Bai, Li, Hu, Cui and Fang	เสนอระบบการจัดการระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเพื่อปรับความราบเรียบก่อนส่งเข้าสู่ระบบไฟฟ้าด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำ โดยใช้วงจรกรองความถี่สูงและความถี่ตัดที่เหมาะสมเพื่อจัดสรรพลังงานระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อลดความผันผวนกระแสบนแบตเตอรี่เพื่อยืดอายุการใช้งานให้มากที่สุด
2016	Pang, Shi, Wang and Yuan	เสนอพื้นฐานวิธีการคำนวณหาขนาดพิกัดและการตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ใช้ปรับความราบเรียบกำลังไฟฟ้าของพลังงานลมที่มีการจำกัดอัตราการลาดเอียง โดยใช้วงจรกรองความถี่ในการจัดการพลังงานให้กับระบบกักเก็บพลังงาน พร้อมทั้งให้ค่าความถี่ตัดมีที่ค่ากำหนด

ตารางที่ 2.3 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้วิจัย	ผลการดำเนินงานวิจัย
2017	Abbassi, Dami and Jemli	เสนอวิธีการเชิงสถิติเพื่อคำนวณหาขนาดของระบบ กักเก็บพลังงานแบบผสมในไมโครกริดแบบแยก เดี่ยว โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำในการจัด การพลังงานและควบคุมสถานะการประจุของระบบ กักเก็บพลังงานให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งขนาด ติดตั้งจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ที่กำหนดไว้เป็นตัวอย่าง และสรุปว่าการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมจะ ช่วยยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ได้

การศึกษาการจัดการพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด เกี่ยวข้องกับการพิจารณาอายุการใช้งานแบตเตอรี่และการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม จึงทำให้มีงานวิจัยและเอกสารการประชุมที่เผยแพร่ออกมาเป็นจำนวนมากในช่วงที่ผ่านมา เริ่มจากการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดเพื่อจัดการความผันผวนจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและโหลด แบตเตอรี่เป็นระบบกักเก็บพลังงานที่นิยมมากที่สุดด้วยคุณสมบัติที่ดีในหลายด้าน แต่เนื่องจากแบตเตอรี่มักจะมีอายุการใช้งานที่สั้นเนื่องจากความผันผวนของพลังงานไฟฟ้าในไมโครกริด อีกทั้งยังเป็นส่วนประกอบที่มีราคาแพง จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่เพื่อใช้วางแผนจัดการงบประมาณ โดย Bindner et al. (2005) ได้รวบรวมวิธีการประเมินอายุแบตเตอรี่แบบต่าง ๆ คือ วิธีแบบพลังงานผ่านสะสม (Ah/Wh throughput) วิธี FhG/Riso และวิธีการนับแบบฝนตก (Rain-flow counting) ซึ่งแต่ละวิธีจะมีขั้นตอนและประสิทธิภาพต่างกันขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของระบบที่ต้องการประเมิน โดยอายุการใช้งานถูกนำมาพิจารณาเป็นค่าใช้จ่ายในการลงทุน ตัวอย่างเช่นในงานวิจัยของ Chalise et al. (2016) ที่ใช้แบตเตอรี่ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล โดยพิจารณาค่าใช้จ่ายจากค่าเสื่อมอายุของแบตเตอรี่ด้วยวิธีแบบพลังงานผ่านสะสมและค่าเชื้อเพลิง พบว่าการทำงานหนักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลจะช่วยยืดอายุของแบตเตอรี่แต่จะเพิ่มค่าเชื้อเพลิง แต่หากแบตเตอรี่ต้องทำงานหนักจะช่วยลดค่าเชื้อเพลิงแต่แบตเตอรี่จะอายุสั้น อีกทั้งการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลยังเพิ่มมลพิษต่อสภาพแวดล้อม โดย Alam et al. (2016) ได้จำลองการประเมินอายุแบตเตอรี่ด้วยวิธีการนับแบบฝนตก จากการกำหนดขนาดแบตเตอรี่พบว่าแบตเตอรี่จะมีอายุสั้นเมื่อทำงานที่กำลังไฟฟ้าผันผวนมากขึ้นของพลังงานแสงอาทิตย์ ส่วนของ Bettran et al. (2016) ได้จำลองการประเมินอายุแบตเตอรี่ที่

สภาวะเดียวกันด้วยวิธีแบบฝนตกสำหรับแบตเตอรี่ชนิดต่างกันและมีการกำหนดขนาดต่างกันในแต่ละชนิด ซึ่งทำให้ได้อายุการใช้งานแตกต่างกัน โดยพบว่าแบตเตอรี่ขนาดใหญ่จะมีอายุยาวนานกว่า แต่ไม่ได้มีการวิเคราะห์ถึงค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้น

ในช่วงเวลาเดียวกันนี้ก็มีการศึกษาและประยุกต์ใช้งานระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมจุดประสงค์หลักคือเพิ่มประสิทธิภาพในการยืดอายุของแบตเตอรี่เช่นกัน (Jing et al., 2016) โดยการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมนั้นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลัก 3 อย่าง ปัจจัยแรกคือชนิดของระบบกักเก็บพลังงานที่จะนำมาใช้เพื่อความเหมาะสมในแต่ละประเภทงาน ปัจจัยที่สองคือการควบคุมพลังงานระหว่างระบบกักเก็บพลังงานแต่ละประเภทและปัจจัยที่สามคือขนาดของระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสม (Ghiassi et al., 2016) ซึ่งการใช้แบตเตอรี่ร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีการศึกษาและใช้งานมากที่สุด โดย Bai et al. (2016) ได้เสนอการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมเพื่อปรับความราบเรียบของพลังงานลมเข้าสู่ระบบ โดยใช้วงจรกรองความถี่จัดสรรกำลังไฟฟ้าที่ราบเรียบให้กับแบตเตอรี่และที่ความถี่สูงให้กับตัวเก็บประจุ และการหาความถี่ตัดที่เหมาะสมที่สามารถยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ได้มากที่สุด ในงานนี้มีการกำหนดขนาดระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมไว้ที่ขนาดใหญ่ซึ่งไม่ได้แสดงการหาขนาดที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ในงานของ Pang et al. (2016) ได้เสนอพื้นฐานในการหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมโดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำ ขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ตัด โดยใช้ค่าความถี่ตัดค่าหนึ่งเพื่อแสดงการคำนวณ ในงานนี้ไม่มีการประเมินอายุการใช้งานที่จะเกิดขึ้นเมื่อปรับค่าความถี่ตัด และ Abbassi et al. (2017) ได้เสนอการหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดที่ใช้พลังงานลมและแสงอาทิตย์ โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำในการจัดสรรกำลังไฟฟ้าและควบคุมสถานะการประจุของระบบกักเก็บพลังงาน พบว่าเมื่อค่าความถี่ตัดลดลงกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะราบเรียบขึ้นในขณะที่ต้องมีการใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่นเดียวกัน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอายุการใช้งานแบตเตอรี่สามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่หรือการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่มีการปรับความราบเรียบให้กับแบตเตอรี่ด้วยวงจรกรองความถี่ โดยประสิทธิภาพในการยืดอายุแบตเตอรี่และขนาดติดตั้งจะขึ้นอยู่กับการปรับเพิ่มขนาดแบตเตอรี่และค่าความถี่ตัด แต่งานวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้มีการแสดงการหาพารามิเตอร์เหล่านี้ที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาระหว่างระหว่างขนาดติดตั้ง ความสามารถในการยืดอายุแบตเตอรี่และค่าใช้จ่ายของระบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการจัดการและการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานที่ทำให้ระบบมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าตอบด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์แบบฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization : PSO) ในการหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่เหมาะสม โดยมีค่าใช้จ่ายที่เกิดจากค่าติดตั้ง ค่าการทำงานและค่าการ

ติดตั้งใหม่ตลอดระยะเวลาโครงการเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทั้งนี้ได้แสดงผลการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมทั้งของระบบแบบเฉพาะแบตเตอรี่และแบบผสมเพื่อเปรียบเทียบผลอีกด้วย

2.6 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ใช้แบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด ทั้งวัตถุประสงค์การใช้งาน การควบคุมจัดการพลังงาน และการประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่และการยืดอายุแบตเตอรี่โดยใช้ตัวเก็บประจุ พบว่ามีการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมอย่างต่อเนื่อง โดยมีจุดประสงค์หลักคือการช่วยยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ โดยงานวิจัยนี้นำความรู้ที่ได้จากปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ ทั้งนี้เพื่อความเข้าใจในเนื้อหาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินการวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

จากความสำคัญของปัญหาและปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการจัดการพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดแบบแยกเดี่ยว ที่ประกอบไปด้วยแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหากลยุทธ์การจัดการพลังงานและการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานมีค่าน้อยที่สุด ในการจำลองการจัดการพลังงานและการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานจำเป็นต้องทราบข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินงานวิจัยและโมเดลคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งประกอบไปด้วยโมเดลจำลองการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน การจัดการพลังงาน ปัจจัยที่ใช้ในการกำหนดขนาดติดตั้ง การประเมินอายุการใช้งานระบบกักเก็บพลังงาน ค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานซึ่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้และวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์แบบฝูงอนุภาค ทั้งนี้ กรณีศึกษาและขั้นตอนการดำเนินการวิจัยได้สรุปไว้ในตอนท้ายบท

3.2 โมเดลคณิตศาสตร์ของระบบกักเก็บพลังงาน

เพื่อดำเนินการจำลองการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน จำเป็นต้องทราบโมเดลคณิตศาสตร์ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ทั้งการอัดและปล่อยประจุ สถานะการประจุ เป็นต้น ถึงแม้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีคุณสมบัติการทำงานที่แตกต่างกัน แต่สมการในการคำนวณพลังงานยังคงเหมือนกัน โดยโมเดลคณิตศาสตร์ที่ใช้เป็นโมเดลทั่วไปของระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งถูกใช้ในงานวิจัยที่จำลองการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานโดยทั่วไป (Akram et al., 2017; Wang et al., 2018)

3.2.1 โมเดลของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานแบบ 2 ทิศทาง หมายความว่าแบตเตอรี่สามารถที่จะเก็บพลังงานซึ่งจะเปรียบเสมือนโหลดไฟฟ้าหรือจ่ายพลังงานซึ่งจะเปรียบเสมือนแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงานที่กำหนด โดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะประกอบขึ้นด้วยแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมและขนานกันเพื่อให้ได้ค่าการทำงานที่ออกแบบไว้ สมการการอัดและปล่อยประจุของแบตเตอรี่คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 ตามลำดับ

$$E_B(t + \Delta t) = E_B(t) + (P_{B,ch}(t) \cdot \eta_{B,c}) \Delta t \quad (3.1)$$

$$E_B(t + \Delta t) = E_B(t) - (P_{B,d}(t) / \eta_{B,d}) \Delta t \quad (3.2)$$

สถานะการประจุของแบตเตอรี่หาได้จากสมการที่ 3.3

$$SOC_B(t) = \frac{E_B(t)}{E_{B,rated}} \quad (3.3)$$

สถานะการประจุของแบตเตอรี่ ณ เวลาใด ๆ หาได้จากสมการที่ 3.4

$$SOC_B(t + \Delta t) = SOC_B(t) \cdot (1 - \beta) + \frac{(P_{B,ch} \eta_{B,c} - P_{B,d} / \eta_{B,d}) \Delta t}{E_{B,rated}} \quad (3.4)$$

โดยที่	$E_B(t)$	คือ พลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่เวลา t (Wh)
	$P_{B,c}(t)$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้อัดประจุของแบตเตอรี่ที่เวลา t (W)
	$P_{B,d}(t)$	คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ปล่อยประจุของแบตเตอรี่ที่เวลา t (W)
	$\eta_{B,c}$	คือ ประสิทธิภาพการอัดประจุของแบตเตอรี่
	$\eta_{B,d}$	คือ ประสิทธิภาพการปล่อยประจุของแบตเตอรี่
	$E_{B,rated}$	คือ ความจุพิกัดของแบตเตอรี่ (Wh)
	β	คือ อัตราการปล่อยประจุตัวเองของแบตเตอรี่
	Δt	คือ ช่วงเวลาของรอบการทำงาน

3.2.2 โมเดลของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งพลังงานแบบ 2 ทิศทางเช่นเดียวกับแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถตอบสนองต่อค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงได้ดีกว่าแบตเตอรี่ การออกแบบระบบตัวเก็บประจุยิ่งยวดโดยการต่ออนุกรมและขนานเช่นเดียวกับแบตเตอรี่ สมการการอัดและปล่อยประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดคำนวณได้จากสมการที่ 3.5 และสมการที่ 3.6 ตามลำดับ

$$E_{SC}(t + \Delta t) = E_{SC}(t) + (P_{SC,ch}(t) \cdot \eta_{SC,c}) \Delta t \quad (3.5)$$

$$E_{SC}(t + \Delta t) = E_{SC}(t) - (P_{SC,d}(t) / \eta_{SC,d}) \Delta t \quad (3.6)$$

สถานะการประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดหาได้จากสมการที่ 3.7

$$SOC_{SC}(t) = \frac{E_{SC}(t)}{E_{SC,rated}} \quad (3.7)$$

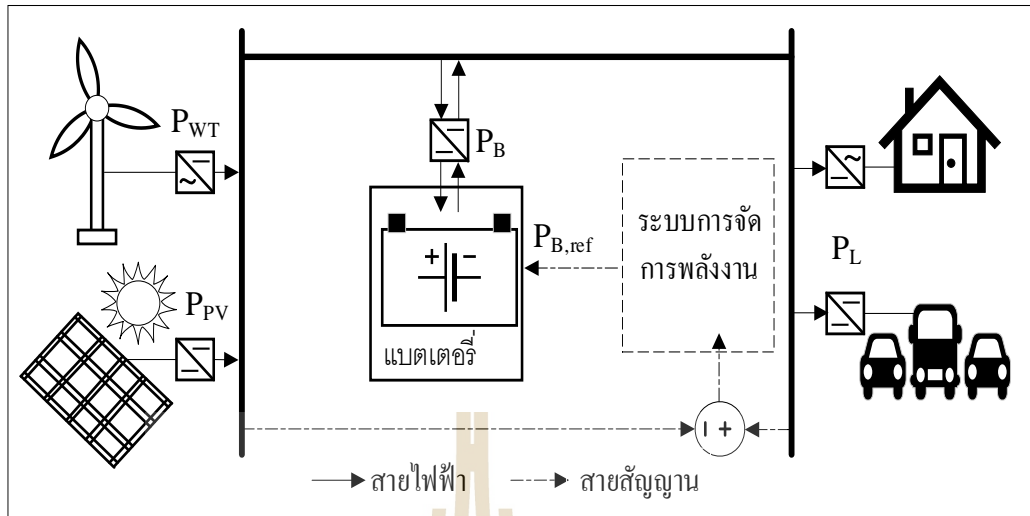
สถานะการประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ณ เวลาใด ๆ หาได้จากสมการที่ 3.8

$$SOC_{SC}(t + \Delta t) = SOC_{SC}(t) \cdot (1 - \sigma) + \frac{(P_{SC,ch} \eta_{SC,c} - P_{SC,d} / \eta_{SC,d}) \Delta t}{E_{SC,rated}} \quad (3.8)$$

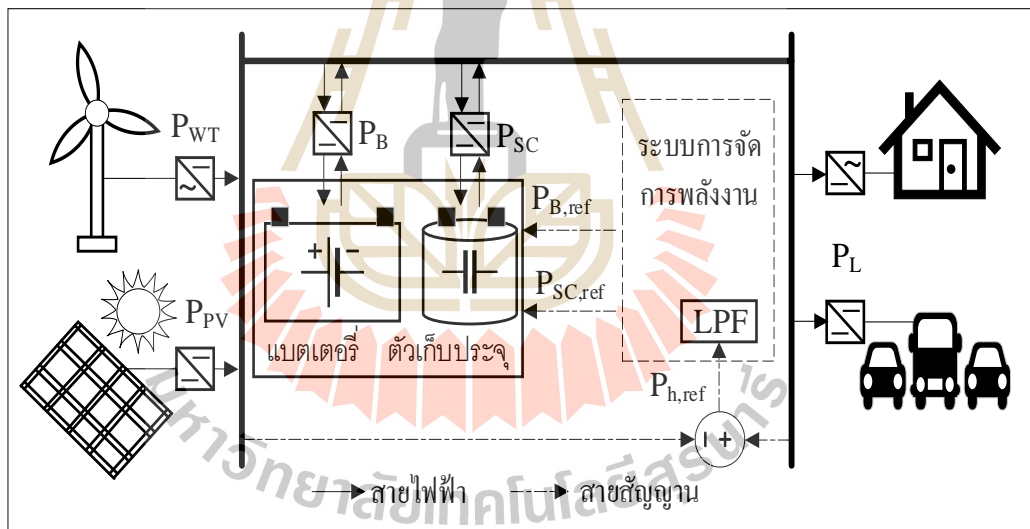
- โดยที่ $E_{SC}(t)$ คือ พลังงานไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่เวลา t (Wh)
 $P_{SC,c}(t)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้อัดประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่เวลา t (W)
 $P_{SC,d}(t)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ปล่อยประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่เวลา t (W)
 $\eta_{SC,c}$ คือ ประสิทธิภาพการอัดประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด
 $\eta_{SC,d}$ คือ ประสิทธิภาพการปล่อยประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด
 $E_{SC,rated}$ คือ ความจุพิกัดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Wh)
 σ คือ อัตราการปล่อยประจุได้เองของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

3.3 การจัดการพลังงานไฟฟ้าและขนาดของระบบกักเก็บพลังงาน

ไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยกลุ่มโหลดเฉพาะ ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และระบบกักเก็บพลังงานที่ใช้เฉพาะแบตเตอรี่และแบบผสม ดังแผนภาพที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้ระบบกักเก็บพลังงานซึ่งเป็นระบบที่ควบคุมได้ในการรักษาสมดุลของกำลังงานไฟฟ้าที่ผันผวนและไม่สามารถควบคุมได้ของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและของโหลดทุกช่วงเวลาทำงานในไมโครกริด โดยไมโครกริดต้องมีค่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยมากกว่าโหลดพอสมควร เพื่อให้สามารถรองรับโหลดได้ตลอดการทำงาน ภายใต้เงื่อนไขการทำงานนี้จะได้กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงาน ดังแสดงในสมการที่ 3.9



รูปที่ 3.1 ไมโครกริดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่



รูปที่ 3.2 ไมโครกริดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม

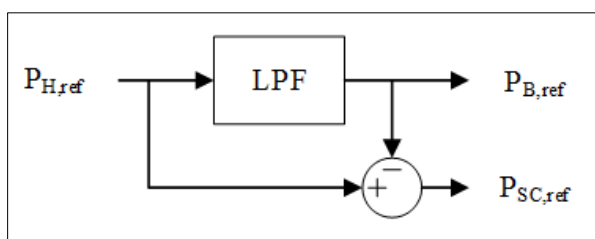
$$P_{H,ref}(t) = P_L(t) - P_{WT}(t) - P_{PV}(t) \quad (3.9)$$

โดยที่	$P_{H,ref}$	คือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงาน (W)
	P_L	คือ กำลังไฟฟ้าของโหลดหรือกำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้งาน (W)
	P_{PV}	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
	P_{WT}	คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม (W)

ในกรณีของระบบกักเก็บพลังงานที่ใช้เฉพาะแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าอ้างอิงของแบตเตอรี่ เนื่องจากมีระบบกักเก็บพลังงานเพียงชนิดเดียว ดังแสดงในสมการที่ 3.10

$$P_{B,ref} = P_{H,ref} \quad (3.10)$$

ในกรณีของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม กำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่ต้องการจากระบบกักเก็บพลังงานจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน เพื่อเป็นกำลังไฟฟ้าอ้างอิงที่ต้องการจากแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดตามคุณสมบัติการทำงานจากระบบกักเก็บพลังงาน โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับหนึ่ง ซึ่งใช้เป็นวงจรควบคุมการจัดสรรกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมซึ่งนิยมใช้และมีประสิทธิภาพ (Victor et al., 2017; Li, F. et al., 2015) เพื่อแบ่งกำลังไฟฟ้าที่ถูกปรับให้มีความราบเรียบหรือความถี่ต่ำให้กับแบตเตอรี่ และส่วนที่มีความผันผวนสูงหรือความถี่สูงให้กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และกำลังไฟฟ้าที่ถูกจัดสรรแล้วด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน แสดงไว้ในสมการที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำ

$$P_{B,ref}(s) = P_{H,ref}(s) \frac{1}{(1 + sT_f)} \quad (3.11)$$

$$P_{SC,ref}(s) = P_{H,ref}(s) - P_{B,ref}(s) \quad (3.12)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ถูกจัดสรรจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่เวลาหรือค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องพิจารณาและหาค่าที่เหมาะสม โดยหาได้จากสมการที่ 3.13 ค่าความถี่ตัดดังกล่าวมีขอบเขตตามหลักการไนควิสต์ นั่นคือมีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของความถี่ในการซ้กตัวอย่างหรือความถี่ไนควิสต์ ตามสมการที่ 3.14

$$T_f = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (3.13)$$

$$0 < f_c < \frac{1}{2T_s} \quad (3.14)$$

โดยที่	$P_{B,ref}$	คือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของแบตเตอรี่ (W)
	$P_{SC,ref}$	คือ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (W)
	T_f	คือ ค่าคงที่เวลาของวงจรกรองความถี่ (sec)
	f_c	คือ ค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำ (Hz)
	T_s	คือ ค่าช่วงเวลาของการซ้กข้อมูลตัวอย่าง (sec)

กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานจะถูกนำมาอ้างอิงเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบกักเก็บพลังงานต้องทำงานจริง ถึงแม้ว่าคุณสมบัติในการทำงานของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะต่างกันแต่พื้นฐานการทำงานและลักษณะการอัดหรือปล่อยกำลังงานไฟฟ้ามีลักษณะเดียวกัน โดยเมื่อคิดค่าประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วย จะได้กำลังไฟฟ้าสำหรับการทำงานของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ตามสมการที่ 3.15 และสมการที่ 3.16 ตามลำดับ

$$P_B(t) = \begin{cases} P_{B,ref}(t) / \eta_{B,d} , & P_{B,ref}(t) > 0 \\ P_{B,ref}(t) \times \eta_{B,c} , & P_{B,ref}(t) < 0 \\ 0 , & P_{B,ref}(t) = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

$$P_{SC}(t) = \begin{cases} P_{SC,ref}(t) / \eta_{SC,d}, & P_{SC,ref}(t) > 0 \\ P_{SC,ref}(t) \times \eta_{SC,c}, & P_{SC,ref}(t) < 0 \\ 0, & P_{SC,ref}(t) = 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

โดยที่ P_B คือ กำลังไฟฟ้าทำงานของแบตเตอรี่ (W)

P_{SC} คือ กำลังไฟฟ้าทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (W)

ถ้าค่ากำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุเป็นค่าบวกหมายถึงการทำงานในสถานะการปล่อยประจุ ส่วนค่าลบคือสถานะการอัดประจุ และค่าศูนย์หมายถึงอยู่ในสถานะเตรียมพร้อม

การหาขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าและขนาดพลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงาน (Liu, Y. et al., 2015; Pang et al., 2016; Zhang et al., 2016) โดยขนาดของกำลังไฟฟ้าพิกัดของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถคำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของกำลังไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุด ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.17 และสมการที่ 3.18 ตามลำดับ

$$P_{B,rated} = \max(|P_B(t)|) \quad (3.17)$$

$$P_{SC,rated} = \max(|P_{SC}(t)|) \quad (3.18)$$

เมื่อได้กำลังงานไฟฟ้าในการทำงานของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุแล้ว สามารถคำนวณพลังงานสะสมในแต่ละรอบเวลาทำงานจากกำลังไฟฟ้าทำงานของระบบกักเก็บพลังงานตามหัวข้อที่ 3.2 เพื่อใช้คำนวณหาขนาดของพลังงานไฟฟ้าฐานที่ต้องการใช้ ดังแสดงในสมการที่ 3.19 และสมการที่ 3.20 ตามลำดับ

$$E_{B,based} = \max(E_B(t)) - \min(E_B(t)) \quad (3.19)$$

$$E_{SC,based} = \max(E_{SC}(t)) - \min(E_{SC}(t)) \quad (3.20)$$

เนื่องจากระบบกักเก็บพลังงานถูกควบคุมให้ทำงานภายในช่วงระดับความลึกการปล่อยประจุที่กำหนดเพื่อความปลอดภัยและผลต่ออายุการใช้งาน ด้วยเหตุนี้ระดับความลึกการปล่อยประจุที่ยอมรับได้มักมีค่าสูงสุดไม่ถึง 100% และต่ำสุดอาจจะมีค่าไม่เท่ากับ 0% ตัวอย่างเช่น

แบตเตอรี่มีค่าระดับความลึกการปล่อยประจุระหว่าง 20-80% ดังนั้นขนาดพิกัดของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเมื่อคิดช่วงของระดับความลึกในการปล่อยประจุ ซึ่งทำให้ขนาดพิกัดของระบบกักเก็บพลังงานมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 3.21 และสมการที่ 3.22 ตามลำดับ

$$E_{B, \text{rated}} = \frac{E_{B, \text{based}}}{DOD_{B, \text{max}} - DOD_{B, \text{min}}} \quad (3.21)$$

$$E_{SC, \text{rated}} = \frac{E_{SC, \text{based}}}{DOD_{SC, \text{max}} - DOD_{SC, \text{min}}} \quad (3.22)$$

โดยที่	$P_{B, \text{rated}}$	คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าพิกัดของแบตเตอรี่ (W)
	$P_{SC, \text{rated}}$	คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าพิกัดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (W)
	$E_{B, \text{based}}$	คือ ขนาดพลังงานไฟฟ้าฐานของแบตเตอรี่ (Wh)
	$E_{SC, \text{based}}$	คือ ขนาดพลังงานไฟฟ้าฐานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Wh)
	$DOD_{B, \text{max}}$	คือ ค่าขอบเขตบนของระดับความลึกการปล่อยประจุแบตเตอรี่
	$DOD_{B, \text{min}}$	คือ ค่าขอบเขตล่างของระดับความลึกการปล่อยประจุแบตเตอรี่
	$DOD_{SC, \text{max}}$	คือ ค่าขอบเขตบนของระดับความลึกการปล่อยประจุของตัวเก็บประจุ ยิ่งยวด
	$DOD_{SC, \text{min}}$	คือ ค่าขอบเขตล่างของระดับความลึกการปล่อยประจุของตัวเก็บประจุ ยิ่งยวด

หลังจากคำนวณหาค่าพิกัดขนาดของระบบกักเก็บพลังงาน จากนั้นก็ตรวจสอบความถูกต้องของขนาดพิกัดที่ได้โดยจำลองการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน โดยระบบกักเก็บพลังงานต้องทำงานภายในขอบเขตสถานะการประจุสูงสุดและต่ำสุดที่กำหนด พารามิเตอร์ที่สำคัญคือการกำหนดค่าสถานะการประจุเริ่มต้นที่ทำให้ระบบกักเก็บพลังงานทำงานในขอบเขต ซึ่งสามารถกำหนดที่ค่าใดค่าหนึ่งได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหรือความเหมาะสม หรือสามารถคำนวณหาสถานะเริ่มต้นของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้จากสมการที่ 3.23 และสมการ 3.24 ตามลำดับ

$$\begin{aligned}
SOC_{B,0} &= \frac{\max(E_B(t))SOC_{B,\max} - \min(E_B(t))SOC_{B,\min}}{\max(E_B(t)) - \min(E_B(t))} \\
&= SOC_{B,\min} + \frac{\max(E_B(t))}{E_{B,\text{rated}}} = SOC_{B,\max} + \frac{\min(E_B(t))}{E_{B,\text{rated}}}
\end{aligned} \tag{3.23}$$

$$\begin{aligned}
SOC_{SC,0} &= \frac{\max(E_{SC}(t))SOC_{SC,\max} - \min(E_{SC}(t))SOC_{SC,\min}}{\max(E_{SC}(t)) - \min(E_{SC}(t))} \\
&= SOC_{SC,\min} + \frac{\max(E_{SC}(t))}{E_{SC,\text{rated}}} = SOC_{SC,\max} + \frac{\min(E_{SC}(t))}{E_{SC,\text{rated}}}
\end{aligned} \tag{3.24}$$

โดยที่ $SOC_{B,0}$ คือ สถานะการประจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่

$SOC_{SC,0}$ คือ สถานะการประจุเริ่มต้นของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาขนาดพิกัดของแบตเตอรี่อย่างต่ำที่คำนวณได้ตามเงื่อนไขสมดุลกำลังงานแล้ว ในงานนี้พิจารณาการปรับขนาดของแบตเตอรี่ให้เกินขนาดพิกัดด้วยตัวปรับคูณ q_B โดยต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 1 ขึ้นไป ($q_B = 1$ หมายถึงขนาดของของแบตเตอรี่เท่ากับค่าพิกัดอย่างต่ำ) เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ขึ้นมีผลต่อช่วงระดับความลึกที่ปล่อยประจุได้ หมายความว่าเมื่อทำงานที่สภาวะเดียวกัน ขนาดพิกัดแบตเตอรี่ที่ใหญ่กว่าจะมีอายุการใช้งานนานกว่า (Beltran et al., 2016; Heeten et al., 2017; Narayan et al., 2016) แต่ทำให้ค่าใช้จ่ายจากการติดตั้งมากขึ้นด้วย ซึ่งค่า q_B เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ โดยค่าที่เหมาะสมจะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นและทำให้ค่าใช้จ่ายรวมของระบบลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นพิกัดพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะถูกปรับคูณด้วย q_B ดังแสดงในสมการที่ 3.25

$$E_{B,Orated} = q_B \times E_{B,\text{rated}} \tag{3.25}$$

โดยที่ $E_{B,Orated}$ คือ ค่าพิกัดพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่เมื่อถูกปรับคูณด้วยตัวปรับขนาด

q_B คือ ค่าปรับคูณขนาดเกินพิกัดอย่างต่ำของแบตเตอรี่ มีค่ามากกว่า 1 ขึ้นไป

3.4 อายุการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงาน

3.4.1 อายุการใช้งานของแบตเตอรี่

เนื่องจากแบตเตอรี่เป็นส่วนประกอบของไมโครกริดที่ค่อนข้างมีราคาแพง อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (Battery lifetime) จึงเป็นตัวชี้วัดด้านเศรษฐศาสตร์และความน่าเชื่อถือที่สำคัญ เนื่องจากอายุการใช้งานที่สั้นจะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งใหม่ que เพิ่มขึ้น อีกทั้งในงานวิจัยนี้ศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งใช้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่เป็นตัววัดประสิทธิภาพ จึงต้องมีการศึกษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่และพิจารณาปัจจัยการทำงานต่าง ๆ ที่มีผลต่ออายุการใช้งาน โดยจากการกำหนดอายุการใช้งานแบตเตอรี่โดยสมาคมเทคโนโลยีแบตเตอรี่สหรัฐอเมริกา (United States Advanced Battery Consortium, USABC) อายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะหมดลงเมื่อความจุ ณ เวลานั้นลดเหลือ 80% จากความจุที่คิดเริ่มต้น (Dubarry et al., 2007) โดยอายุการใช้งานถูกพิจารณาได้เป็น 2 อย่าง คือ

- อายุที่เกิดจากรอบการใช้งาน (Battery cycle life) เป็นอายุที่เกิดจากการใช้งานแบตเตอรี่ เมื่อใช้งานในบางรอบวัฏจักรที่ทำปฏิกิริยาจะหลุดออกจากอิเล็กโทรดและจมสู่ด้านล่างของอุปกรณ์โดยไม่สามารถคืนกลับรูปเดิมได้ ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบที่ใช้งานก่อนที่ความจุจะลดลงเรื่อยๆ ขึ้นกับลักษณะการปล่อยหรืออัดประจุ ความลึกของการปล่อยประจุ อุณหภูมิ เป็นต้น
- อายุปฏิทิน (Calendar life หรือ Float life) ถึงแม้แบตเตอรี่จะไม่ได้ถูกใช้ โดยอัดประจุแล้วทิ้งไว้หรือใช้ในงานที่เป็นตัวกักเก็บพลังงานสำรองหรือฉุกเฉินเช่น UPS โดยไม่ได้ถูกใช้เลยหรือนาน ๆ ครั้ง แบตเตอรี่ก็จะเสื่อมตามกาลเวลา จึงเรียกว่าอายุเป็นปีตามปฏิทิน สิ่ง que ส่งผลกระทบคืออุณหภูมิและเวลา

ในการประเมินอายุของแบตเตอรี่นั้นหากอายุแบบใดถึงเวลาก่อน ให้ถือว่าแบตเตอรี่หมดอายุการใช้งานตามสมการที่ 3.26

$$\text{อายุการใช้งานของแบตเตอรี่} = \text{Min}(\text{อายุจากรอบการใช้งาน}, \text{อายุแบบปฏิทิน}) \quad (3.26)$$

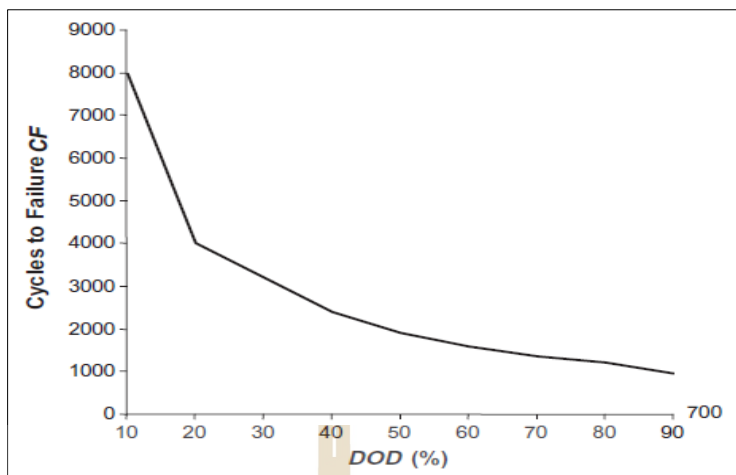
อย่างไรก็ตามเมื่อแบตเตอรี่เหลือความจุ 80% ของประจุเต็มจากพิกัดเริ่มแรก แบตเตอรี่จะยังคงสามารถใช้งานได้ต่อไป ไม่ได้หมายความว่าแบตเตอรี่จะหยุดทำงาน เพียงแต่จะมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ จึงถือว่าหมดอายุการใช้งานตามมาตรฐานและควรเปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่ โดยมีหลายปัจจัยที่ส่งผลให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่สั้นลงได้ จะกล่าวถึงเฉพาะปัจจัยหลักที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมาก ดังต่อไปนี้

1) ความลึกของการปล่อยประจุ (Depth of discharge, DOD)

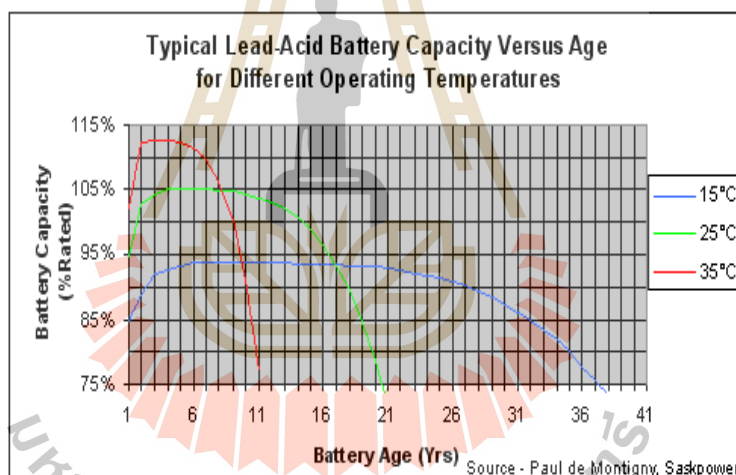
โดยทั่วไปแล้วบริษัทผู้ผลิตจะกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการใช้งานและค่าระดับความลึกที่ใช้จนมาด้วยดังตัวอย่างในรูปที่ 3.4 เพื่อเป็นการบอกอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ นอกจากนั้นยังกำหนดช่วงระดับความลึกในการใช้งานของการปล่อยประจุมาด้วย เพื่อเป็นการรักษาประสิทธิภาพการใช้งาน ตัวอย่างเช่น จากกราฟพบว่าถ้าใช้แบตเตอรี่ โดยให้แบตเตอรี่ประจุเต็มแล้วปล่อยประจุไป 90% และทำอย่างนี้ทุกครั้งในการใช้งาน แบตเตอรี่จะสามารถทำงานได้ประมาณ 1,000 รอบ ในขณะที่ถ้าทำงานที่ 50% สม่าเสมอจะใช้ได้ถึง 2,000 รอบ เป็นต้น การออกแบบขนาดของแบตเตอรี่ในการใช้งานจริง จึงควรพิจารณาลักษณะงานที่ใช้โดยคำนึงถึงความสามารถของช่วงระดับความลึกการปล่อยประจุที่ยอมรับได้ และพบว่าแบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือช่วงความลึกการปล่อยประจุกว้างกว่าจะมีรอบการใช้งานที่ยาวนานกว่า นักออกแบบอาจออกแบบขนาดแบตเตอรี่ให้ใหญ่กว่าความต้องการใช้งานโดยคิดถึงอายุการใช้งานและการลงทุนให้เหมาะสม

2) อุณหภูมิ

ผลกระทบของอุณหภูมิ (Temperature effects) สำหรับแบตเตอรี่ที่เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ เช่น เมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 °C จากอุณหภูมิห้องหรือเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า จะเพิ่มอัตราการปล่อยประจุเป็นสองเท่า เป็นผลทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลงเป็นสองเท่าเช่นกัน และนอกจากนั้น อุณหภูมิสูงยังมีผลในการเร่งการสึกหรอของแผ่นบวก เนื่องมาจากผลของการเกิดก๊าซ และการสูญเสียน้ำ ส่วนอุณหภูมิต่ำมีผลทำให้อายุการใช้งานนานขึ้น อย่างไรก็ตามจะทำให้ความจุลดลงจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นของกรดทำให้น้ำไฟฟ้าได้น้อยลง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิแวดล้อมเป็นสิ่งที่สามารถควบคุมได้ถ้ามีการบริหารจัดการที่ดี ตัวอย่างอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานฉุกเฉินที่ไม่ค่อยได้ใช้งานดังรูปที่ 3.5 จึงมีเพียงอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อ



รูปที่ 3.4 ผลกระทบของความลึกในการปล่อยประจุต่อรอบการใช้งานของแบตเตอรี่

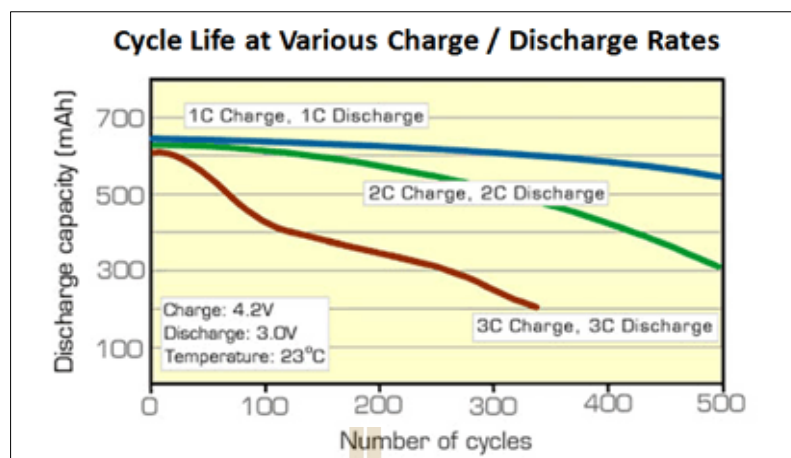


รูปที่ 3.5 ผลกระทบของอุณหภูมิต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่

แหล่งที่มา : <https://www.mpoweruk.com/life.htm>

3) อัตรากระแสนของการอัดหรือปล่อยประจุ

การอัดหรือคายประจุที่กระแสสูง ๆ เช่นที่ 3 C ถึง 5 C เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่อย่างมากดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นไม่ทันตามกระแสที่ต้องการ ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการหรือไม่พึงประสงค์ ทำให้ผลึกอิเล็กโทรดใหญ่ขึ้นได้เป็นสาเหตุทำให้ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียค่าความจุ (Cordoba-Arenas et al., 2015)



รูปที่ 3.6 ผลกระทบของอัตราการอัดหรือคายประจุต่อรอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

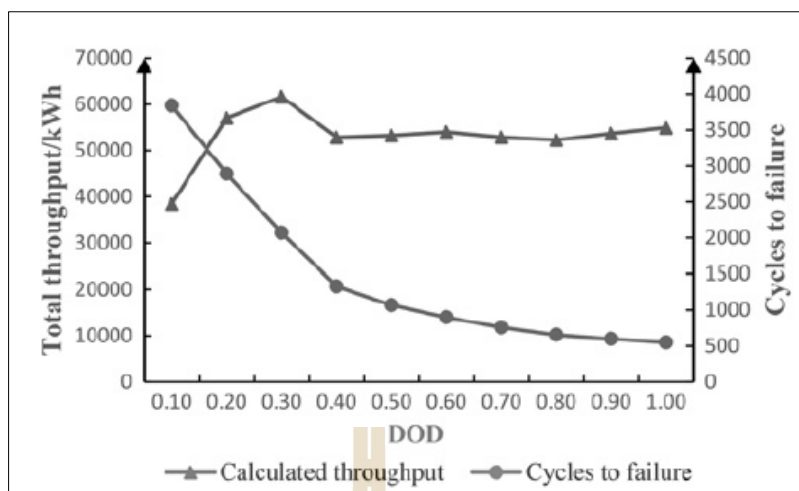
แหล่งที่มา : <https://www.mpoweruk.com/life.htm>

4) ปัจจัยอื่น ๆ เช่น รอบการใช้งานขนาดเล็ก ระยะเวลาในสถานะประจุต่ำและวิธีการอัดประจุ เป็นต้น

3.4.2 วิธีการประเมินอายุแบตเตอรี่

เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่ ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการประเมินอายุที่สมบูรณ์ที่พิจารณาทุก ๆ ปัจจัยรวมกัน มีเพียงแต่วิธีที่พิจารณาปัจจัยหลักที่ส่งผลเท่านั้นและจะไม่คิดผลของบางปัจจัยเพื่อความสะดวกในการประเมินอายุแบตเตอรี่ในเมืองต้น โดยงานวิจัยเล่มนี้พิจารณาวิธีที่มีการใช้อยู่แล้ว ซึ่งถูกวิเคราะห์และสรุปไว้โดย (Bindner et al., 2005) ประกอบไปด้วยวิธีแบบความจุผ่านสะสม (Throughput method) วิธีการนับรอบแบบฝนตก (Rain flow counting method) และวิธี FhG/Riso (FhG/Riso method)

วิธีแบบความจุผ่านสะสมอย่างง่าย มีพื้นฐานจากการกำหนดให้แบตเตอรี่มีค่าพลังงานที่สามารถทำงานได้ตลอดอายุการใช้งานค่าหนึ่ง (Total throughput) ซึ่งคำนวณจากข้อมูลที่ผู้ผลิตให้มา ในรูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างระดับความลึกของการปล่อยประจุ จำนวนรอบใช้งานและค่าพลังงานทั้งหมดของแบตเตอรี่ (Liu, C. et al., 2017) เมื่อพลังงานที่ใช้งานสะสม (Cumulative throughput) มีค่าเท่ากับค่าพลังงานทั้งหมด แบตเตอรี่จะถูกพิจารณาให้หมดอายุการใช้งาน โดยพลังงานผ่านสะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับความลึกในการอัดหรือปล่อยประจุในแต่ละรอบการใช้งาน วิธีนี้ยังถูกใช้ในการประเมินอายุแบตเตอรี่ในโปรแกรม HOMER (HOMER Pro, 2018) ซึ่งเป็นโปรแกรมในการจัดการและออกแบบความเหมาะสมของไมโครกริด นอกจากนี้แล้ว วิธีการนี้ยังมีการพัฒนาให้คูณด้วยค่าน้ำหนักเพื่อความแม่นยำอีกด้วย (Schiffer et al., 2007)



รูปที่ 3.7 ค่าระดับความลึกกับจำนวนรอบใช้งานและค่าพลังงานทั้งหมดของแบตเตอรี่

(Liu, C. et al., 2017)

วิธี FhG/Riso มีพื้นฐานจากการผสมการเสื่อมประสิทธิภาพกับอายุการใช้งานแบตเตอรี่ โดยประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออายุแบตเตอรี่เสื่อมลงเช่นกัน โดยพื้นฐานจากโมเดลแรงดันและค่าต้านทานภายในของแบตเตอรี่ รายละเอียดได้กล่าวไว้ใน (Bindner et al., 2005) วิธีการนี้ค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากต้องพิจารณาหลายปัจจัย โดยต้องการข้อมูลอินพุตและการทดสอบจริง

วิธีการนับรอบแบบฝนตก มีพื้นฐานจากหลักการประเมินความล้าของวัสดุ (Amzallag et al., 1994) โดยมีการใช้วิธีการนับรอบแบบฝนตกเพื่อประเมินอายุแบตเตอรี่ในหลายงานที่ผ่านมา (Shi and Xu et al., 20018; Beltran et al., 2016; Li, J. et al., 2015) นอกจากนี้ยังถูกนำไปใช้ในโปรแกรมจำลองผล HYBRID (Manwell et al., 2005) ซึ่งนิยมใช้จำลองผลระบบกักเก็บพลังงาน โดยมีหลักการจากการนับรอบการใช้งานที่ค่าระดับความลึกการปล่อยประจุต่าง ๆ โดยให้แต่ละจำนวนรอบส่งผลให้อายุแบตเตอรี่เสื่อมไป ค่าเสื่อมอายุคือผลรวมของจำนวนรอบหารด้วยจำนวนรอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด รายละเอียดจะแสดงไว้ในหัวข้อถัดไป

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการที่กล่าวมา พบว่าวิธี FhG/Riso ประเมินอายุแบตเตอรี่ได้เกินค่าที่ได้จากการทดลองไปมาก ส่วนอีกสองวิธีมีค่าการประเมินอายุใกล้เคียงกับอายุการใช้งานที่ได้จากการทดลองจริงเมื่อใช้ข้อมูลในการทดสอบเดียวกัน (Bindner et al., 2005) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ โดยจะช่วยทำงานในรอบการใช้งานที่มีความถี่กำลังไฟฟ้าสูงเพื่อปรับความราบเรียบของกำลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ ซึ่งจะช่วยลดจำนวนรอบของแบตเตอรี่ที่สถานะประจุต่ำได้ ดังนั้นวิธีการนับรอบแบบฝนตกจึงถูกนำมาใช้ใน

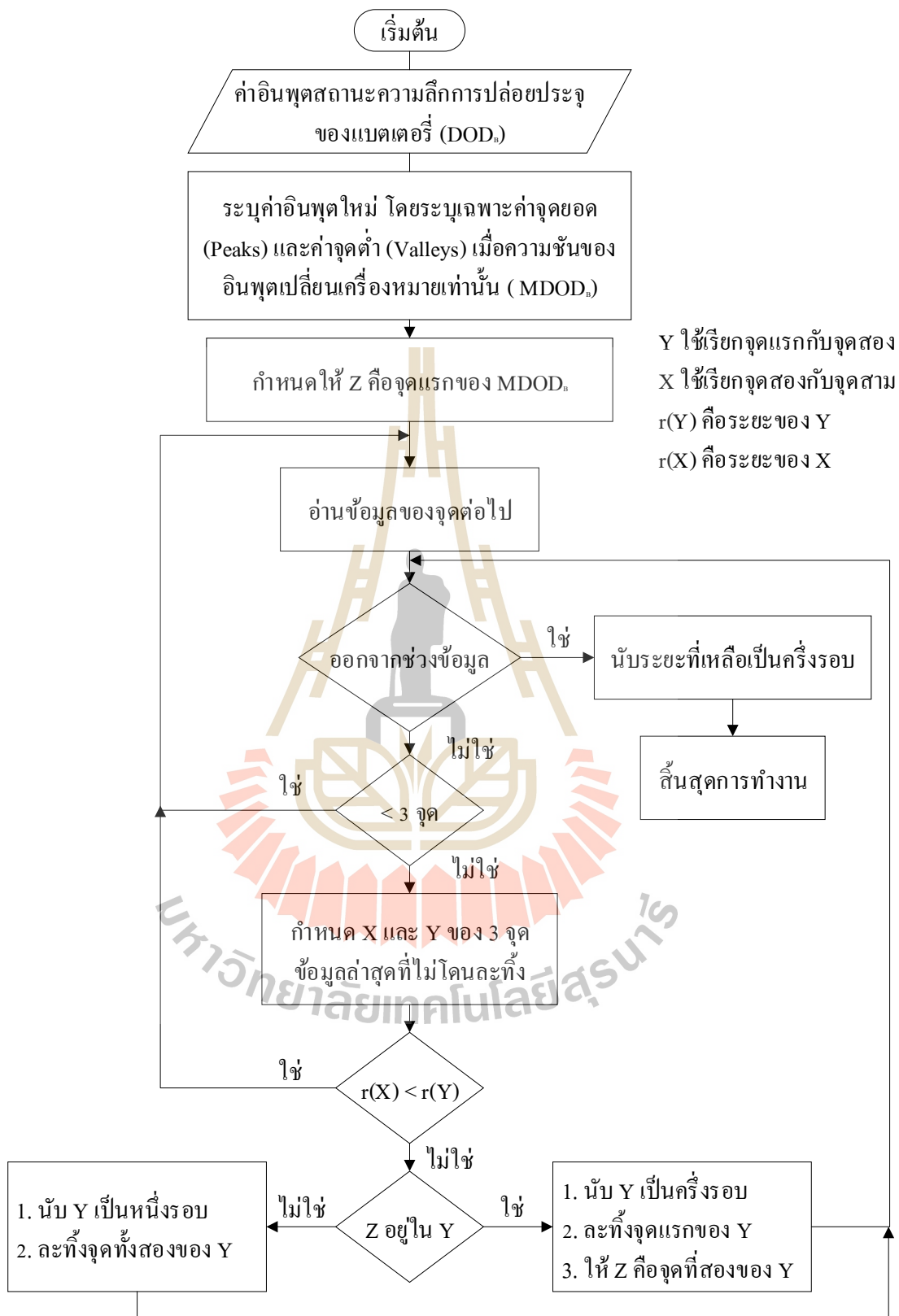
งานวิจัยนี้ เพื่อประเมินความสามารถของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม เนื่องจากวิธีความจุผ่านสะสมอาจจะให้ผลไม่เด่นชัดเมื่อปัจจัยที่พิจารณาคือจำนวนรอบการใช้งานและระดับความลึกในการปล่อยประจุ (Gee, 2012)

3.4.3 การประเมินอายุแบตเตอรี่ด้วยวิธีการนับแบบฝนตก

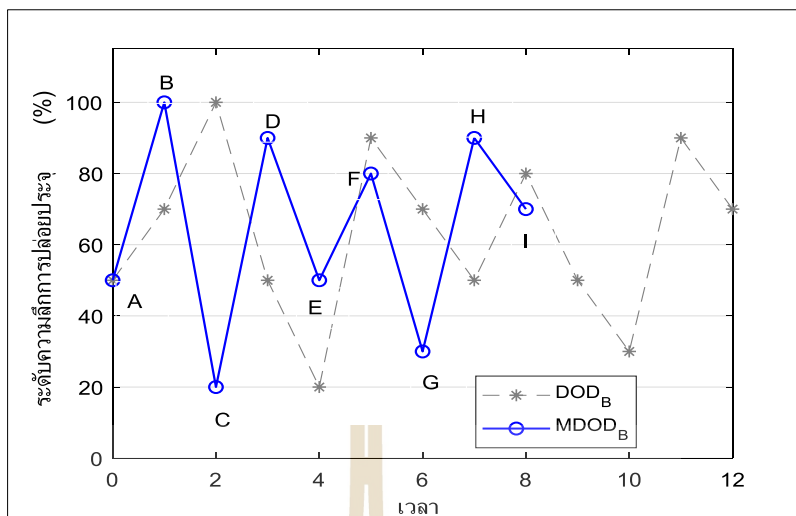
แบตเตอรี่ที่ติดตั้งในไมโครกริดซึ่งมีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน มีการอัดและปล่อยประจุตามการทำงานซึ่งมีลักษณะผันผวนตลอดทั้งวัน เป็นเรื่องยากในการระบุรอบการใช้งานที่เฉพาะเจาะจงสำหรับค่าสถานะการประจุที่คงที่ใด ๆ เนื่องจากแบตเตอรี่ไม่ได้มีรอบการทำงานที่ค่าสถานะการประจุค่าเดียวตลอดเวลา โดยมีสถานะการประจุที่เปลี่ยนแปลงไปตามการใช้งาน จึงจำเป็นต้องมีวิธีการเพื่อระบุจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ที่สถานะการประจุหรือระดับความลึกการปล่อยประจุใด ๆ ที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยในงานนี้ใช้วิธีการนับแบบฝนตกเพื่อระบุจำนวนรอบการใช้งานที่ค่าสถานะประจุต่าง ๆ แผนภาพขั้นตอนพื้นฐานในการทำงานของวิธีแบบฝนตกแสดงไว้ในรูปที่ 3.8 (MathWorks, 2018; Alam, M. J. et al., 2016)

โดยเมื่อจบขั้นตอนการนับจำนวนรอบการใช้งานของค่าระดับความลึกเฉพาะที่ค่าใด ๆ ทั้งแบบเต็มรอบและครึ่งรอบจะถูกจัดเก็บ โดยสามารถใช้ข้อมูลนี้สร้างกราฟสถิติได้ เพื่อความเข้าใจมากขึ้น ให้ศึกษาตัวอย่างการนับแบบฝนตกของข้อมูลตัวอย่างในรูปที่ 3.9 และตารางที่ 3.1 แสดงค่าตัวอย่างที่ได้จากการนับแบบฝนตก





รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานของวิธีการนับแบบฝนตก



รูปที่ 3.9 ข้อมูลตัวอย่างสำหรับการนับแบบฝนตก

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการนับด้วยวิธีฝนตก

รอบ	Z	จุด	จุด ≥ 3	Y/r(Y)	X/r(X)	r(X) < r(Y)	Z ใน Y	ผลการนับ
1	A	ABC	ใช่	AB/50	BC/80	ไม่	ใช่	1. นับ AB = 0.5 รอบ 2. ละทิ้ง A 3. ให้ Z = B
2	B	BC	ไม่	-	-	-	-	อ่านจุด D
3	B	BCD	ใช่	BC/80	CD/70	ใช่	-	อ่านจุด E
4	B	BCDE	ใช่	CD/70	DE/40	ใช่	-	อ่านจุด F
5	B	BCDEF	ใช่	DE/40	EF/30	ใช่	-	อ่านจุด G
6	B	BCDEFG	ใช่	EF/30	FG/50	ไม่	ไม่	1. นับ EF = 1 รอบ 2. ละทิ้ง EF
7	B	BCDG	ใช่	CD/70	DG/60	ใช่	-	อ่านจุด H
8	B	BCDGH	ใช่	DG/60	GH/60	ไม่	ไม่	1. นับ DG = 1 รอบ 2. ละทิ้ง DG
9	B	BCH	ใช่	BC/80	CH/70	ใช่	-	อ่านจุด I
10	B	BCHI	ใช่	CH/70	HI/20	ใช่	-	ออกช่วงข้อมูล 1. นับ BC = 0.5 รอบ 2. นับ CH = 0.5 รอบ 3. นับ HI = 0.5 รอบ

เพื่อประเมินอายุของแบตเตอรี่ที่ต้องการใช้งานด้วยวิธีการนับแบบฝนตก จำเป็นต้องทราบค่าจำนวนรอบการใช้งาน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าระดับความลึกของแบตเตอรี่อ้างอิง โดยปกติบริษัทผู้ผลิตจะให้ข้อมูลจากการทดสอบนี้มา ตัวอย่างดังรูปที่ 3.4 ที่ผ่านมา ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบการใช้งานกับระดับความลึกการปล่อยประจุของแบตเตอรี่ โดยกราฟ ถูกสร้างจากค่าจุดข้อมูลจากการทดสอบ ซึ่งสร้างด้วยฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial) ฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (Exponential) หรือฟังก์ชันกำลัง (Power) ตามความเหมาะสม งานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve fitting) คือฟังก์ชันเลขชี้กำลัง แสดงไว้ในสมการที่ 3.27

$$N_{CTF} = f(DOD) = a \times e^{b \times DOD_B} + c \times e^{d \times DOD_B} \quad (3.27)$$

โดยที่ $a b c d$ คือ ค่าคงที่ของฟังก์ชันเลขชี้กำลัง

เมื่อระบุจำนวนรอบการใช้งานที่สอดคล้องกับค่าระดับความลึกการปล่อยประจุที่ค่าใด ๆ ด้วยวิธีการนับแบบฝนตกแล้ว ค่าการเสื่อมอายุของแบตเตอรี่ (Battery lifetime degradation, D_B) ในรอบการทำงานที่กำหนดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.28 และแบตเตอรี่จะถูกพิจารณาให้หมดอายุการใช้งานเมื่อค่าเสื่อมอายุมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นจำนวนปีของอายุแบตเตอรี่ (L_B) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.29 (Schaltz et al., 2009)

$$D_B = \sum_{i=1}^m \frac{N_{B,cycle}(DOD_i)}{N_{CTF}(DOD_i)} \quad (3.28)$$

$$L_B = \frac{1}{D_{B,1year}} \times years \quad (3.29)$$

โดยที่ $N_{B,cycle}$ คือ จำนวนรอบการใช้งานที่นับได้ด้วยวิธีการแบบฝนตกตามค่าระดับความลึกการปล่อยประจุใด ๆ (ซึ่งถูกแยกออกเป็น m ระดับความลึกในการปล่อยประจุ)

N_{CTF} คือ จำนวนรอบการใช้งานทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่ระดับความลึกการปล่อยประจุ ซึ่งได้จากกราฟความสัมพันธ์ของระดับความลึกการปล่อยประจุกับจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่อ้างอิง

$D_{B,1year}$ คือ ค่าการเสื่อมอายุของแบตเตอรี่ใน 1 ปี

3.4.4 อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีจำนวนรอบการใช้งานที่สูงมาก สามารถทำงานที่ระดับความถี่การปล่อยประจุสูง ๆ ตามคุณสมบัติการทำงาน และโดยทั่วไปแล้วตัวเก็บประจุอาจจะไม่ต้องมีการเปลี่ยนใหม่ตลอดอายุการใช้งาน (Zhang et al., 2016) โดยการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นจะไม่มีปฏิกิริยาของสารเคมีถึงแม้จะทำงานที่ระดับความถี่การปล่อยประจุสูง ดังนั้นความผันผวนของกำลังไฟฟ้าทำงานหรือในการใช้งานจะไม่มีผลต่ออายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในงานทั่วไปหากใช้การประเมินอายุการใช้งานโดยใช้รอบการใช้งานจึงทำให้อายุที่ประเมินได้มีค่ามากกว่าอายุแบบปีปฏิทิน ซึ่งเป็นการประเมินอายุการใช้งานที่เกินค่าที่บริษัทกำหนด โดยอายุการใช้งานนั้นจะได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิที่สูงและแรงดันเป็นปัจจัยหลัก (Khasawneh, 2015; Kaiser, 1995; Wee et al., 2013) อย่างไรก็ตาม เพื่อความง่ายของการวิจัยได้กำหนดให้ตัวเก็บประจุทำงานในขอบเขตแรงดันที่กำหนดไว้ตลอดเวลาตามเงื่อนไขการทำงานที่ให้ไว้ และกำหนดให้อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้และมีค่าคงที่ตามขอบเขตของการวิจัยนี้ ผลของอุณหภูมิและแรงดันต่ออายุการใช้งานตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงถูกละเว้น งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้อายุการใช้งานตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีค่าเท่ากับค่าอายุแบบปีปฏิทิน

3.5 ค่าใช้จ่ายรวมของระบบกักเก็บพลังงาน

ค่าใช้จ่ายรวมของการใช้ระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดถือได้ว่าเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญเพื่อการวางแผนและหาความเหมาะสมของโครงการ โดยงานวิจัยนี้ใช้ค่าใช้จ่ายรวมของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อใช้หาขนาดที่เหมาะสมในการติดตั้ง แสดงไว้ในสมการที่ 3.30 ค่าใช้จ่ายรวมของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด ประกอบไปด้วย 3 ค่าใช้จ่ายหลัก ได้แก่ ค่าติดตั้งเริ่มต้น ค่าการทำงานกับการบำรุงรักษาและค่าการเปลี่ยนหรือติดตั้งใหม่ (Ge et al., 2012; Mustafa, 2017) ทั้งของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดโดยในงานวิจัยนี้ใช้การประเมินด้วยการคิดแบบมูลค่าปัจจุบัน (Net present value, NPV) ของค่าใช้จ่ายรวมตลอดอายุของโครงการ เพื่อแปลงมูลค่าของค่าใช้จ่ายที่เวลาต่างกันให้อยู่ที่มูลค่า ณ ปัจจุบัน ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.31

$$f(x) = \min(NPV(TC)) \quad (3.30)$$

$$NPV(TC) = IC + NPV(RC) + NPV(OC) \quad (3.31)$$

โดยที่ $NPV(IC)$	คือ มูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายรวมของระบบกักเก็บพลังงาน (บาท)
IC	คือ ค่าติดตั้งเริ่มต้น (บาท)
$NPV(RC)$	คือ มูลค่าปัจจุบันของค่าติดตั้งใหม่ตลอดโครงการ (บาท)
$NPV(OC)$	คือ มูลค่าปัจจุบันของค่าการทำงานและบำรุงรักษา (บาท)

3.5.1 ค่าการติดตั้งเริ่มต้น (Initial cost)

คือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียว เมื่อเริ่มต้น โครงการ เพื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน โดยค่าติดตั้งสามารถแสดงในรูปแบบของค่าใช้จ่ายต่อค่ากำลังไฟฟ้าและต่อค่าพลังงานไฟฟ้า สมการในการคำนวณค่าติดตั้งเริ่มต้นของแบตเตอรี่ (IC_B) และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (IC_{SC}) แสดงในสมการที่ 3.32 และสมการที่ 3.33 ตามลำดับ

$$IC_B = (c_{B,p} \times P_{B, \text{rated}} + c_{B,e} \times E_{B, \text{rated}}) \quad (3.32)$$

$$IC_{SC} = (c_{SC,p} \times P_{SC, \text{rated}} + c_{SC,e} \times E_{SC, \text{rated}}) \quad (3.33)$$

โดยที่ $c_{B,p}$	คือ ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (บาท/kW)
$c_{B,e}$	คือ ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (บาท/kWh)
$c_{SC,p}$	คือ ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (บาท/kW)
$c_{SC,e}$	คือ ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (บาท/kWh)

3.5.2 ค่าการติดตั้งใหม่ (Replacement cost)

เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเมื่อระบบกักเก็บพลังงานหมดอายุการใช้งานในช่วงอายุของโครงการ ปัจจัยที่สำคัญคืออายุการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงาน ถ้าอายุการใช้งานที่สั้นก็จะทำให้มีการติดตั้งใหม่หลายครั้ง ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายนี้สูงขึ้นไปด้วย ซึ่งจำนวนครั้งในการเปลี่ยนระบบกักเก็บพลังงานในระหว่างโครงการ (NR) หาได้จากจำนวนเต็มของค่าที่ได้จากการหารอายุของโครงการด้วยอายุการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานลบด้วยหนึ่ง โดยค่าติดตั้งใหม่หาได้จากมูลค่าปัจจุบันของค่าติดตั้งเริ่มต้น ณ ปีที่มีการติดตั้งใหม่ สมการคำนวณค่าติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่ (RC_B) และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (RC_{SC}) แสดงไว้ในสมการที่ 3.34 และสมการที่ 3.35 ตามลำดับ

$$NPV(RC_B) = \sum_{n=1}^{NRB} \frac{IC_B}{(1+d)^{n \times LB}} \quad (3.34)$$

$$NPV(RC_{SC}) = \sum_{n=1}^{NRSC} \frac{IC_{SC}}{(1+d)^{n \times LSC}} \quad (3.35)$$

โดยที่	NRB	คือ จำนวนครั้งการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่ ($LP/LB-1$)
	$NRSC$	คือ จำนวนครั้งการติดตั้งใหม่ของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ($LP/LSC-1$)
	LB	คือ อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (ปี)
	LSC	คือ อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ปี)
	LP	คือ อายุของโครงการ (ปี)
	d	คือ ค่าอัตราการลดมูลค่า (Discounted rate, %)

3.5.3 ค่าการทำงานและบำรุงรักษา (Operation and Maintenance cost)

เกิดจากค่าใช้จ่ายในการทำงานและดูแลระบบกักเก็บพลังงานระหว่างการใช้งานตลอดโครงการ โดยคิดเป็นแบบรายปี เพื่อให้ระบบกักเก็บพลังงานอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานเสมอ หรือเพื่อควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้งาน ซึ่งอาจจะเกิดจากค่าใช้จ่ายหลายอย่างรวมกัน ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของระบบกักเก็บพลังงาน โดยมูลค่าปัจจุบันของค่าการทำงานและบำรุงรักษาของแบตเตอรี่ (OC_B) และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (OC_{SC}) กำหนดได้จากสมการที่ 3.36 และสมการที่ 3.37 ตามลำดับ

$$NPV(OC_B) = c_{B,O} \times E_{B, \text{rated}} \times USW \quad (3.36)$$

$$NPV(OC_{SC}) = c_{SC,O} \times E_{SC, \text{rated}} \times USW \quad (3.37)$$

โดยที่	$c_{B,O}$	คือ ค่าบำรุงรักษาของแบตเตอรี่ (บาท/kWh/ปี)
	$c_{SC,O}$	คือ ค่าบำรุงรักษาของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (บาท/kWh/ปี)
	USW	คือ ค่าปรับคูณเพื่อแปลงค่าใช้จ่ายรายปีเป็นมูลค่าปัจจุบัน (Uniform series worth-factor) โดยค่า USW กำหนดไว้ในสมการที่ 3.38

$$USW = \frac{(1+d)^{LP} - 1}{LP \times (1+d)^{LP}} \quad (3.38)$$

3.6 การหาค่าที่ดีที่สุดแบบฝูงอนุภาค

ในการออกแบบและการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนจำเป็นต้องมีเทคนิคที่เหมาะสม หัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคนิคอันชาญฉลาดที่ประยุกต์ใช้เทคนิคของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) มาใช้งาน สามารถแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีความไม่เชิงเส้นสูงได้ดี โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้แก้ปัญหาอย่างแพร่หลาย (ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์, 2550; Liu, H. et al., 2015; Sreenivasan, 2011) เนื่องจากโครงสร้างที่มีความเข้าใจง่าย มีพารามิเตอร์น้อยและมีความรวดเร็วในการหาคำตอบ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยเคนเนดีและอีเบิร์ตฮาร์ตในปี 1995 (Kennedy et al., 1995) โดยเลียนแบบฝูงอนุภาค (Particle swarm) เป็นการจำลองระบบหรือโครงสร้างของกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่มีการรวมกลุ่มเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะบางประการในแต่ละสิ่งมีชีวิต เช่นการหาอาหาร เป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดการรวมกลุ่มและทำให้ประชากรส่วนใหญ่หรือทั้งหมดมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกัน เช่นฝูงนก ฝูงปลาและฝูงผึ้ง เป็นต้น พิจารณาการล่าเหยื่อของนกในรูปที่ 3.10 ให้นัก 1 ตัวแทนอนุภาค 1 ตัว นกแต่ละตัวจะมีค่าความฟิต (Fitness value) ที่บอกระยะห่างระหว่างเหยื่อและนก ในการหาเหยื่อนั้นนกทั้งฝูงจะบินไปในทิศทางที่สอดคล้องกัน โดยนกตัวที่อยู่ใกล้เหยื่อมากที่สุด (ค่าความฟิตดีที่สุด) จะมีระยะห่างระหว่างฝูงกับเหยื่อน้อยที่สุด ดังนั้นนกในฝูงจะบินตามนกตัวดังกล่าว การจำลองแบบฝูงอนุภาคจะใช้หลักการนี้ โดยกำหนดอนุภาคเพื่อใช้แทนผลเฉลยพร้อมทั้งประเมินค่าความฟิต โดยการบินของนกจะถูกกำหนดเป็นพารามิเตอร์ คือ ตำแหน่งที่บินอยู่ของนก (Position) และความเร็วในการเคลื่อนที่ของนก (Velocity) โดยอนุภาคแต่ละตัวจะถูกปรับปรุงและกระบวนการนี้จะกระทำซ้ำจนได้คำตอบที่ดีที่สุด ตามสมการที่ 3.39 และสมการที่ 3.40 ตามลำดับ

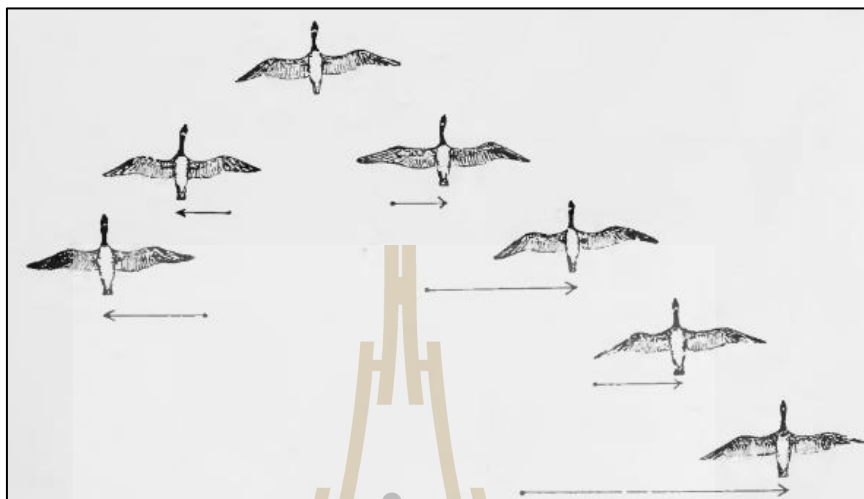
$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (3.39)$$

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(x_i^{pbest} - x_i^k) + c_2r_2(x_i^{gbest} - x_i^k) \quad (3.40)$$

โดยที่	x_i^k	คือ อนุภาคที่ใช้แทนผลเฉลยตัวที่ i รอบการคำนวณที่ k
	x_i^{k+1}	คือ อนุภาคที่ใช้แทนผลเฉลยตัวที่ i รอบการคำนวณที่ $k+1$
	v_i^k	คือ ความเร็วของอนุภาคตัวที่ i รอบการคำนวณที่ k
	v_i^{k+1}	คือ ความเร็วของอนุภาคตัวที่ i รอบการคำนวณที่ $k+1$
	x_i^{pbest}	คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่อนุภาค i ค้นพบ (Personal best)
	x_i^{gbest}	คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่ฝูงค้นพบ (Global best)
	w	คือ ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็ว (Inertia weight)

c_1, c_2 คือ ค่าการถ่วงน้ำหนักการเรียนรู้ (Learning factor)

r_1, r_2 คือ ค่าสุ่มที่มีการกระจายสม่ำเสมอระหว่าง 0-1



รูปที่ 3.10 การบินของฝูงนก

แหล่งที่มา: <http://www.dumdumzine.com/the-birds-observations-on-birds-ii-by-janice-lee/>
(เข้าถึงเมื่อ 8/12/2561)

ค่าการถ่วงน้ำหนักการเรียนรู้ทั้งสองค่าต้องมีค่ารวมกันไม่เกิน 4 ในงานทั่วไปมักจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 ทั้งสองค่า (Shi and Eberhart, 1998) ส่วนค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็วสามารถกำหนดได้หลายแบบ ทั้งแบบค่าคงที่ที่ถูกรอบการคำนวณ โดยทั่วไปจะให้เท่ากับ 1.4 หรือแบบค่าที่ลดลงแบบเชิงเส้นตามจำนวนรอบ ซึ่งมักจะกำหนดให้ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็วสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 0.9 และ 0.4 ตามลำดับ แสดงไว้ในสมการที่ 3.41

$$w = w_{\max} - \frac{k}{k_{\max}} \times (w_{\max} - w_{\min}) \quad (3.41)$$

โดยที่ k คือ รอบของการคำนวณ

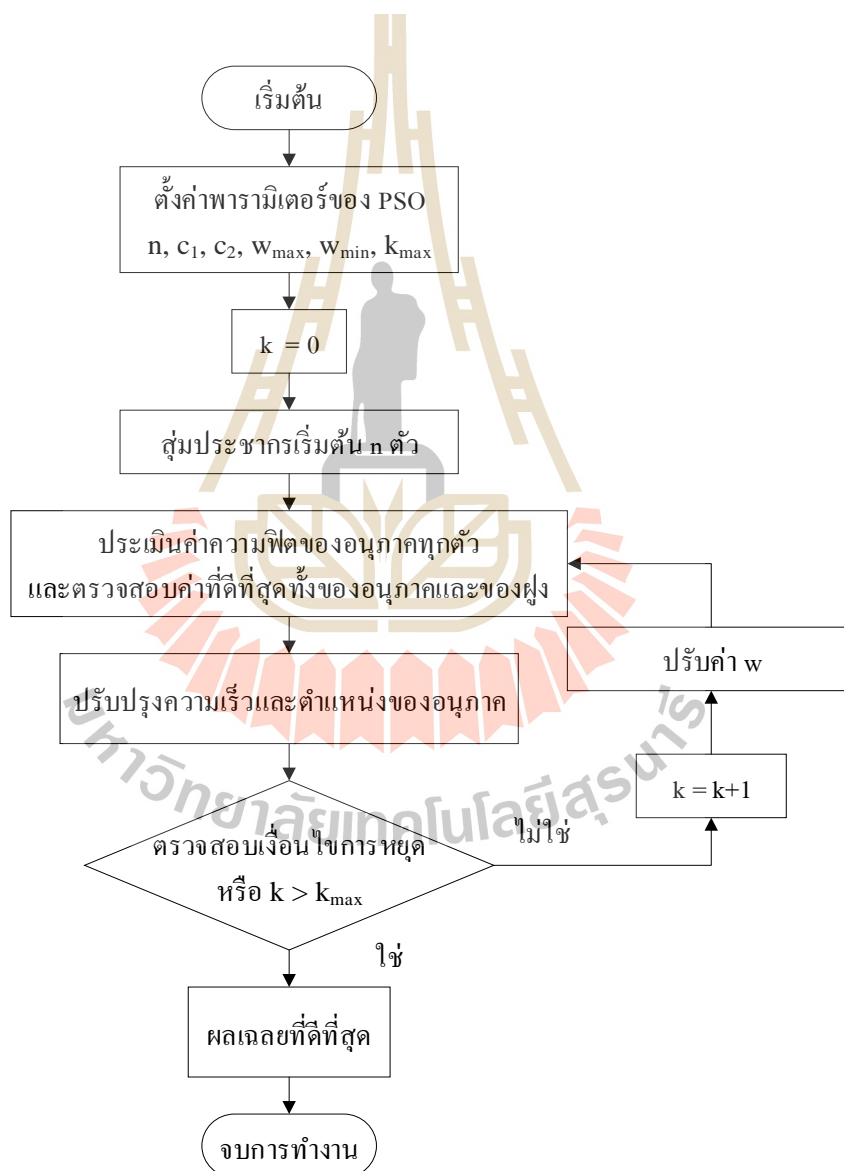
k_{\max} คือ รอบการคำนวณสูงสุด

w_{\max} คือ ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็วสูงสุด

w_{\min} คือ ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็วต่ำสุด

ขั้นตอนการทำงานของวิธีแบบอนุภาคมีดังนี้และดังแสดงได้ในรูปที่ 3.11

- ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพารามิเตอร์ของรอบการค้นหา $k = 0$ และ k_{max} สูงสุด
- ขั้นตอนที่ 2 สุ่มประชากรเริ่มต้นพร้อมกับตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคจำนวน n ตัว
- ขั้นตอนที่ 3 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ประเมินค่าความฟิตของอนุภาคเริ่มต้นทุกตัว
- ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบ x_i^{pbest} และ x_i^{gbest}
- ขั้นตอนที่ 5 ปรับปรุงค่าความเร็วและตำแหน่งแต่ละอนุภาค
- ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ให้ปรับ $k = k+1$ และให้วนกลับไปยังขั้นตอนที่ 3 จนกว่าจะค้นพบผลเฉลย หาก $k = k_{max}$ ให้หยุดการทำงาน



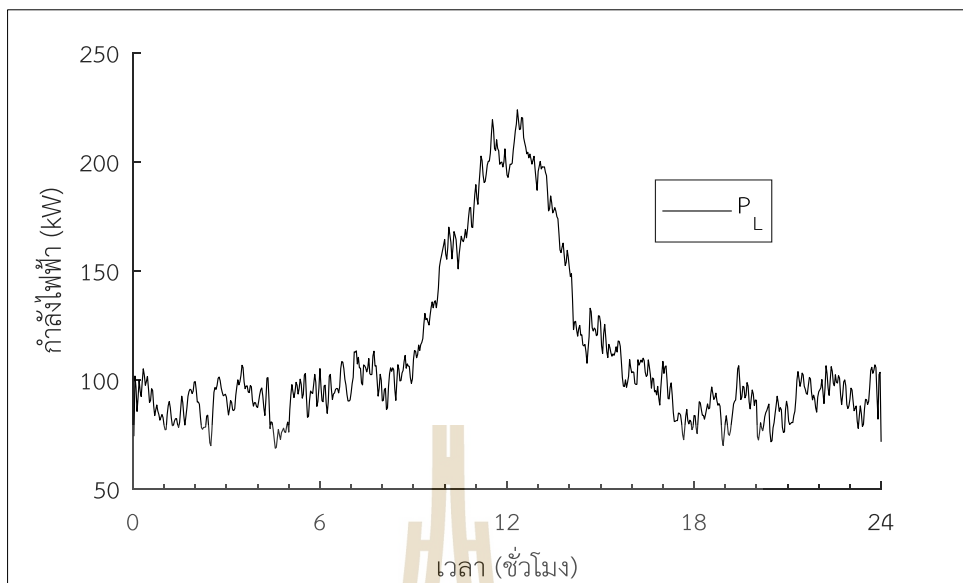
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการทำงานของวิธีแบบฝูงอนุภาค

3.7 กรณีศึกษาและวิธีดำเนินการวิจัย

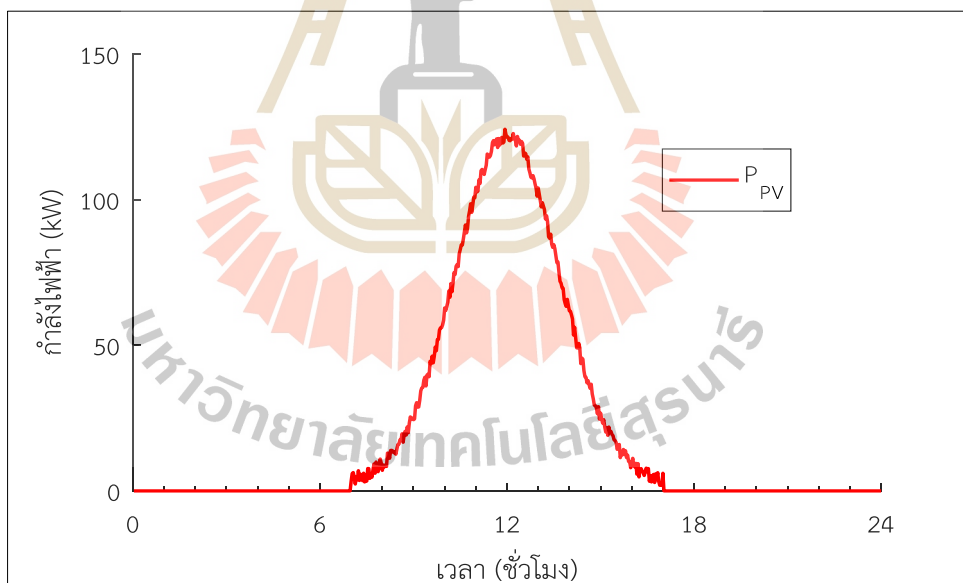
จากรายละเอียดของวิธีการจำลองและการคำนวณการทำงานต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้แสดงขั้นตอนการดำเนินงานและการประยุกต์ใช้วิธีการต่าง ๆ เข้ากับระบบไมโครกริดที่ใช้ในการทดสอบ โดยกล่าวถึงข้อมูลของไมโครกริดที่ใช้ทดสอบ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกรณีศึกษาและขั้นตอนการทำงานของแต่ละกรณีศึกษาอย่างละเอียด ดังต่อไปนี้

3.7.1 ไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวที่ใช้ทดสอบ

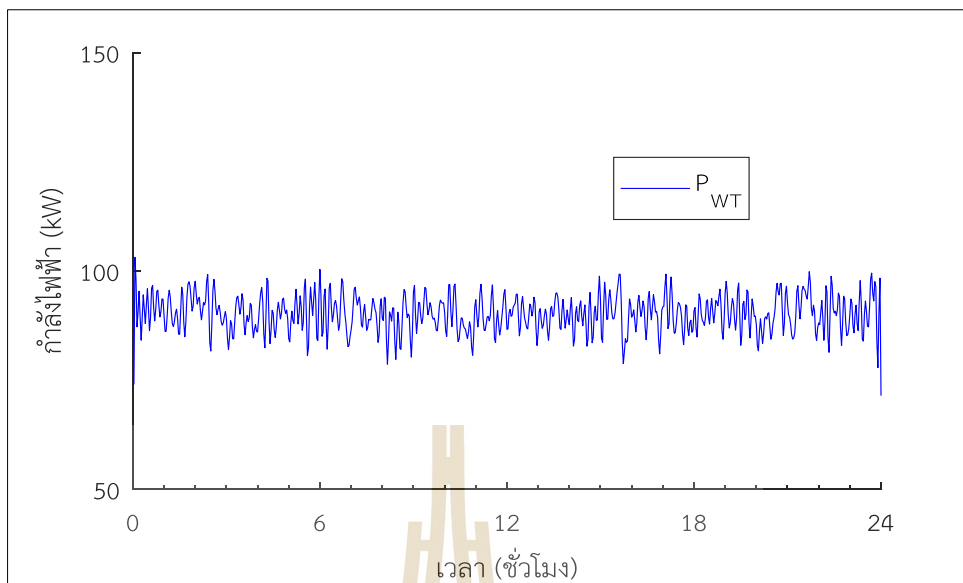
ไมโครกริดที่ใช้ในการศึกษาเป็นไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวที่มีกลุ่มโหลดเฉพาะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวจำเป็นต้องมีระบบกักเก็บพลังงานเนื่องจากไม่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้ารองรับและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างต่ำต้องมีจำนวนมากกว่าความต้องการใช้ในปริมาณที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวในงานวิจัยได้พิจารณาการติดตั้งทั้งระบบกักเก็บพลังงานเฉพาะแบตเตอรี่และแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ที่ผ่านตามลำดับ โดยโครงการนี้มีอายุ 20 ปี กำลังไฟฟ้ายาววันของโหลด เซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมได้ถูกจำลองขึ้นเพื่อทดสอบวิธีการวิจัย ซึ่งมีค่าเท่ากับทั้งระบบที่ใช้เฉพาะแบตเตอรี่และแบบผสม โดยช่วงเวลาของข้อมูลตัวอย่าง (Sampling time) คือทุก ๆ 2 นาที (ในการจำลองเพื่อแสดงประสิทธิภาพการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม ช่วงข้อมูลตัวอย่างทั่วไปควรจะอยู่ในหน่วยวินาทีหรือนาที โดยทั่วไปประมาณ 1 ถึง 5 นาที ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม) ดังนั้นจะได้ช่วงการทำงาน (Time step) ทั้งหมด 720 ช่วงใน 1 วัน งานวิจัยนี้สมมุติให้ไมโครกริดมีการทำงานแบบเดียวกันทุกวันใน 1 ปี โดยข้อมูลของโหลดสามารถแสดงในรูปที่ 3.12 พบว่ามีความผันผวนของการใช้โหลดซึ่งมีแนวโน้มการใช้งานไฟฟ้าส่วนมากในตอนกลางวัน โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 220 kW ในช่วงเวลาประมาณ 12.30 น. สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมในไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวนี้สามารถแสดงในรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในช่วงเวลาประมาณ 7.00-17.00 น. โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 124 kW ที่เวลาประมาณ 12.00 น. ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมนั้นมีลักษณะผันผวนตลอดเวลาทั้งวัน โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 80 kW



รูปที่ 3.12 กำลังไฟฟ้าของโหลด

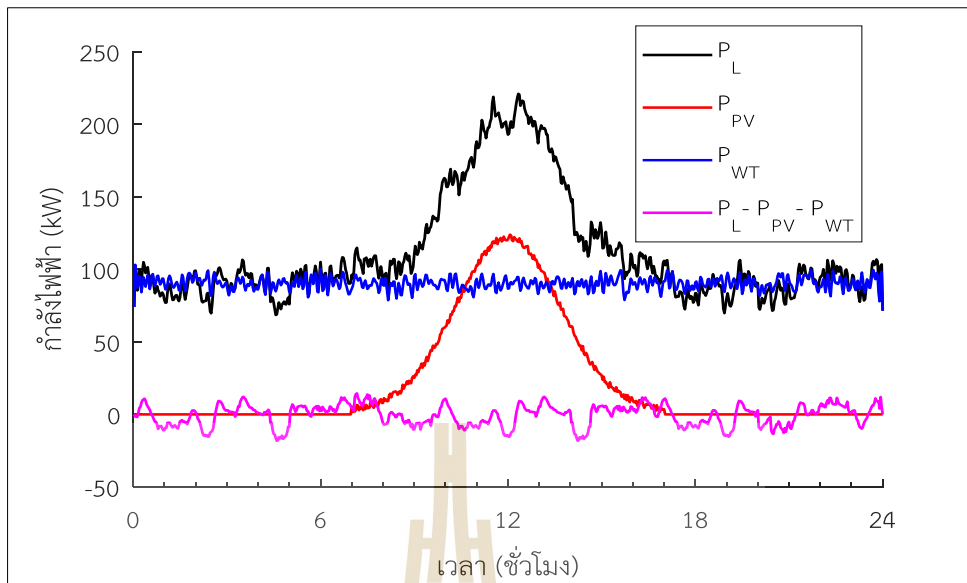


รูปที่ 3.13 กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

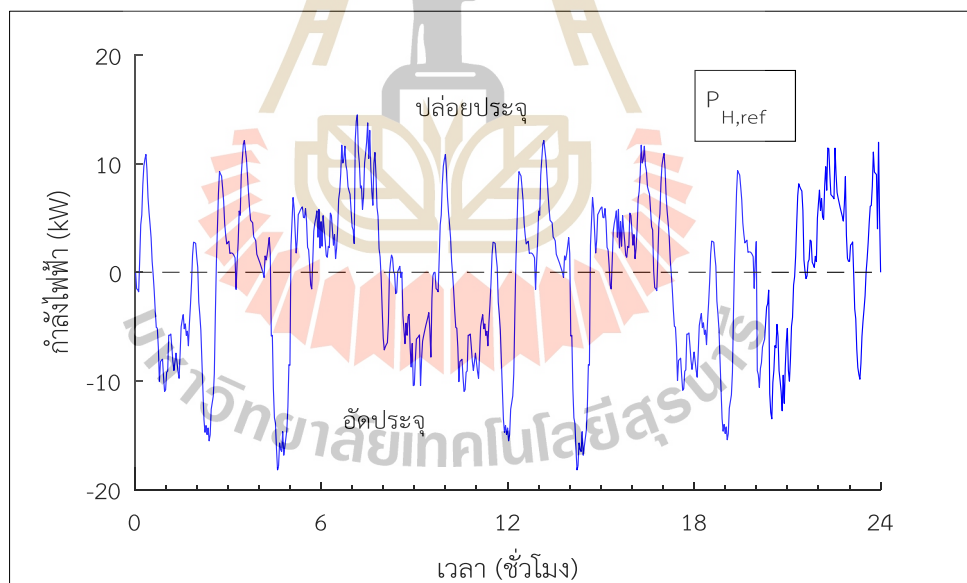


รูปที่ 3.14 กำลังไฟฟ้าของกังหันลม

เมื่อทราบค่ากำลังไฟฟ้าของโหลด ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ และกังหันลม สามารถคำนวณหาส่วนต่างระหว่างโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ตามสมการสมดุลกำลังงานไฟฟ้า ($P_L - P_{PV} - P_{WT}$) โดยกำหนดให้ไม่คิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นจากหลายปัจจัยตามขอบเขตของการวิจัยที่กำหนดไว้แล้ว เพื่อความเข้าใจมากขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าของไมโครกริดและค่าส่วนต่างของกำลังไฟฟ้านี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.15 สำหรับค่าส่วนต่างระหว่างโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้ได้ถูกนำไปใช้เป็นส่วนกำลังไฟฟ้าอ้างอิงให้กับระบบกักเก็บพลังงาน ($P_{H,ref}$) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยกำลังไฟฟ้าค่าบวกหมายถึงความต้องการใช้พลังงานหรือการปล่อยประจุจากระบบกักเก็บพลังงาน ส่วนกำลังไฟฟ้าค่าลบหมายถึงความต้องการเก็บสะสมพลังงานหรือต้องการอัดประจุสะสมให้กับระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 3.15 กำลังไฟฟ้าของโหลด เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลมและกำลังไฟฟ้าส่วนต่าง



รูปที่ 3.16 กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงาน

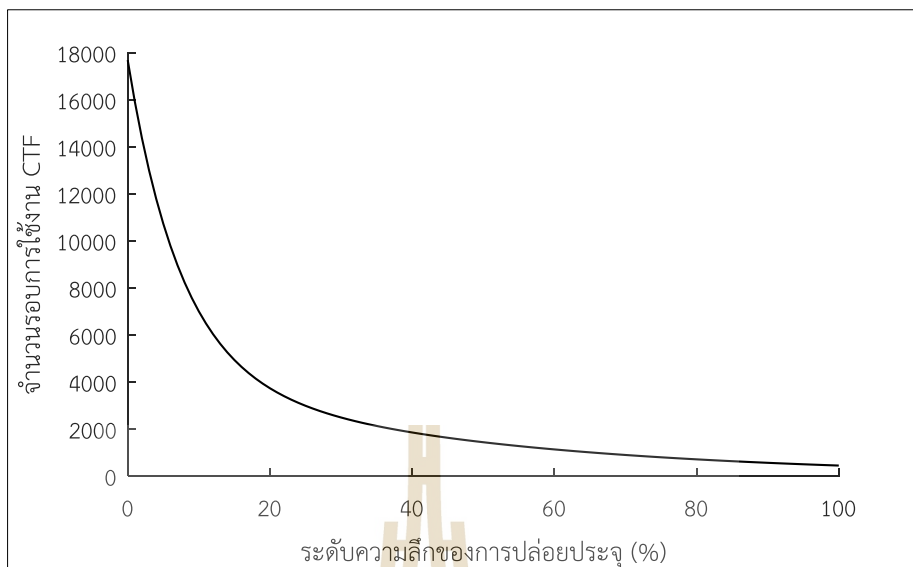
3.7.2 พารามิเตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานในงานวิจัย

คุณสมบัติการทำงานและค่าใช้จ่ายของระบบแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ในไมโครกริดในการวิจัยแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นแหล่งอ้างอิง ซึ่งเป็นข้อมูลโดยทั่วไปของระบบกักเก็บพลังงานที่ถูกนำมาใช้งานในไมโครกริด (Zhao et al., 2014; Sabihuddin et al., 2015; Chen et al., 2009; Dekka et al., 2015)

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด

พารามิเตอร์ (ตัวย่อ)/(หน่วย)	ค่าของพารามิเตอร์
ขอบเขตสถานะการประจุของแบตเตอรี่ ($SOC_{B,max} - SOC_{B,min}$)/(%)	80-20
ขอบเขตสถานะการประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ($SOC_{SC,max} - SOC_{SC,min}$)/(%)	90-10
ประสิทธิภาพการปล่อยประจุของแบตเตอรี่ ($\eta_{B,d}$)/(%)	90
ประสิทธิภาพการอัดประจุของแบตเตอรี่ ($\eta_{B,c}$)/(%)	90
ประสิทธิภาพการปล่อยประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ($\eta_{SC,d}$)/(%)	95
ประสิทธิภาพการอัดประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ($\eta_{SC,c}$)/(%)	95
ราคาแบตเตอรี่ต่อขนาดกำลังไฟฟ้า ($c_{B,p}$)/(บาท/kW)	9,600
ราคาแบตเตอรี่ต่อขนาดพลังงานไฟฟ้า ($c_{B,e}$)/(บาท/kWh)	4,800
ราคาตัวเก็บประจุยิ่งยวดต่อขนาดกำลังไฟฟ้า ($c_{SC,p}$)/(บาท/kW)	6,400
ราคาตัวเก็บประจุยิ่งยวดต่อขนาดพลังงานไฟฟ้า ($c_{SC,e}$)/(บาท/kWh)	64,000
ราคาค่าการทำงานและบำรุงแบตเตอรี่ ($c_{B,o}$)/(บาท/kWh/ปี)	320
ราคาค่าการทำงานและบำรุงตัวเก็บประจุยิ่งยวด ($c_{SC,o}$)/(บาท/kWh/ปี)	320
อายุแบตเตอรี่แบบปีปฏิทิน (ปี)	3
อายุตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบปีปฏิทิน (ปี)	5
อัตราการคิดลดมูลค่า (d)/(%)	5

กำหนดข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการใช้งานและระดับความลึกในการปล่อยประจุของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดประสิทธิภาพสูงที่ใช้ในกรณีศึกษาซึ่งปรับแต่งมาจาก (Layadi et al., 2015; Verdad, 2015) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.17 ได้สมการที่ใช้ในการประเมินอายุการใช้งานแบตเตอรี่เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลตามสมการที่ 3.42



รูปที่ 3.17 จำนวนรอบการใช้งานและระดับความลึกการปล่อยประจุของแบตเตอรี่อ้างอิง

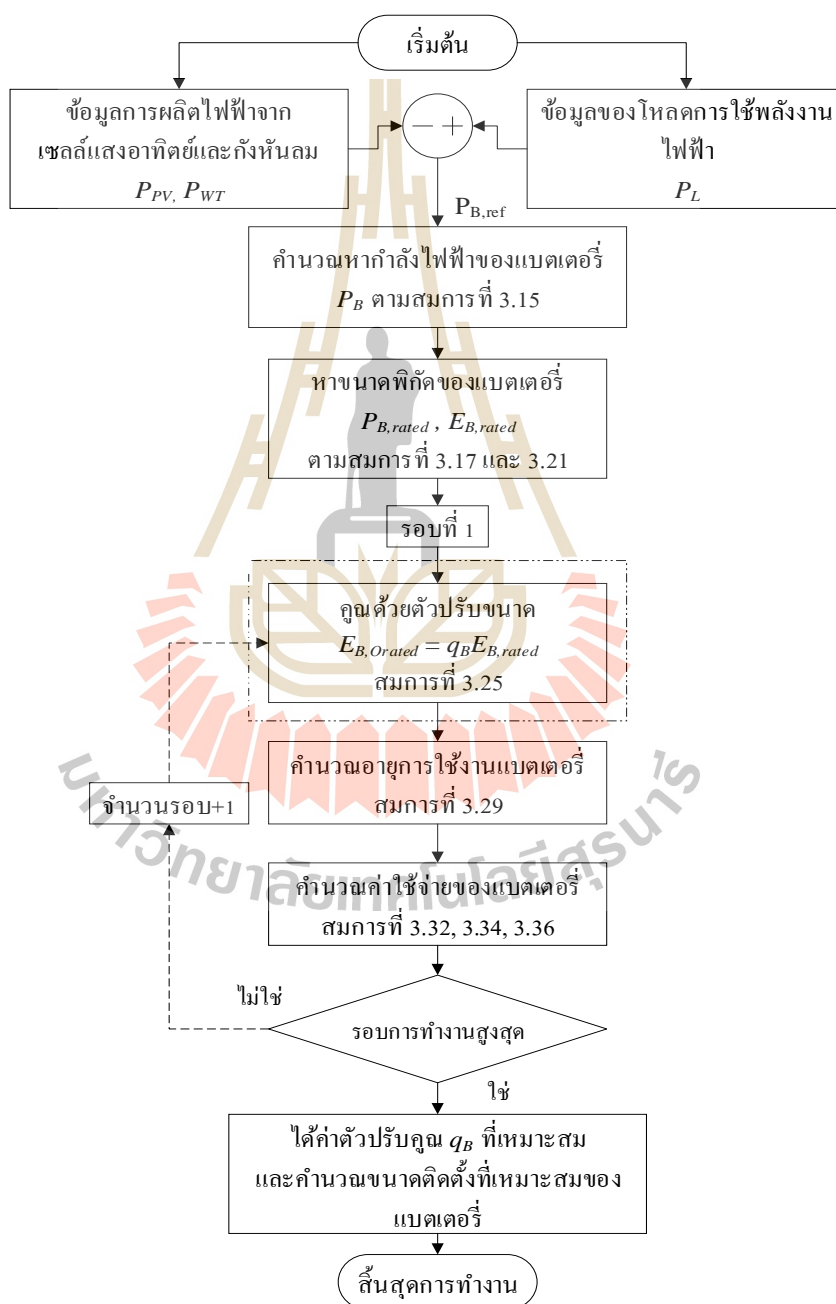
$$CTF(DOD_B) = 13160e^{-0.135DOD_B} + 4528e^{-0.02312DOD_B} \quad (3.42)$$

3.7.3 กรณีศึกษาและขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้แบ่งกลยุทธ์การจัดการของกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณี โดยขั้นตอนการจัดการของแต่ละกรณีศึกษาและวิธีการคำนวณค่าใช้จ่ายจะได้กล่าวรายละเอียดในลำดับต่อไป ในงานวิจัยนี้ ค่าใช้จ่ายรวมของระบบกักเก็บพลังงานถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค รายละเอียดของแต่ละกรณีมีดังนี้

กรณีที่ 1 เป็นการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวที่มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม เพื่อใช้เป็นระบบกักเก็บพลังงาน ขั้นตอนการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ เริ่มต้นจากการหาส่วนต่างระหว่างโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด จากนั้นใช้ส่วนต่างของกำลังงานไฟฟ้าคำนวณหา กำลังไฟฟ้าทำงานของแบตเตอรี่ เมื่อได้ค่ากำลังไฟฟ้าทำงานก็สามารถใช้หาขนาดติดตั้งที่เล็กที่สุดของแบตเตอรี่ แต่ขนาดของแบตเตอรี่ที่ได้ยังไม่มีความเหมาะสม จึงต้องปรับขนาดเพื่อหาขนาดของแบตเตอรี่ด้วยตัวปรับขนาด q_B ที่สุ่มขึ้นมาดังรายละเอียดที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 3.3 จากนั้นก็จำลองการทำงานอีกครั้งเพื่อใช้ค่าระดับความลึกของการปล่อยประจุสำหรับประเมินอายุการใช้งาน เมื่อได้ขนาดติดตั้งและอายุการใช้งานแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดซึ่งประกอบด้วย ค่าการ

ติดตั้งเริ่มต้น ค่าการบำรุงรักษาและค่าการติดตั้งใหม่ ทั้งนี้สมการค่าใช้จ่ายทั้งหมดถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค โดยวิธีแบบฝูงอนุภาคจะใช้ฟังก์ชันนี้ในการสุ่มค่าตัวปรับคูณเพื่อหาค่าตัวปรับคูณที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด ทำให้สามารถหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ได้ ตามลำดับ โดยขั้นตอนการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกรณีนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ขั้นตอนกรณีที่ 1 หาขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมด้วยตัวปรับคูณ q_B

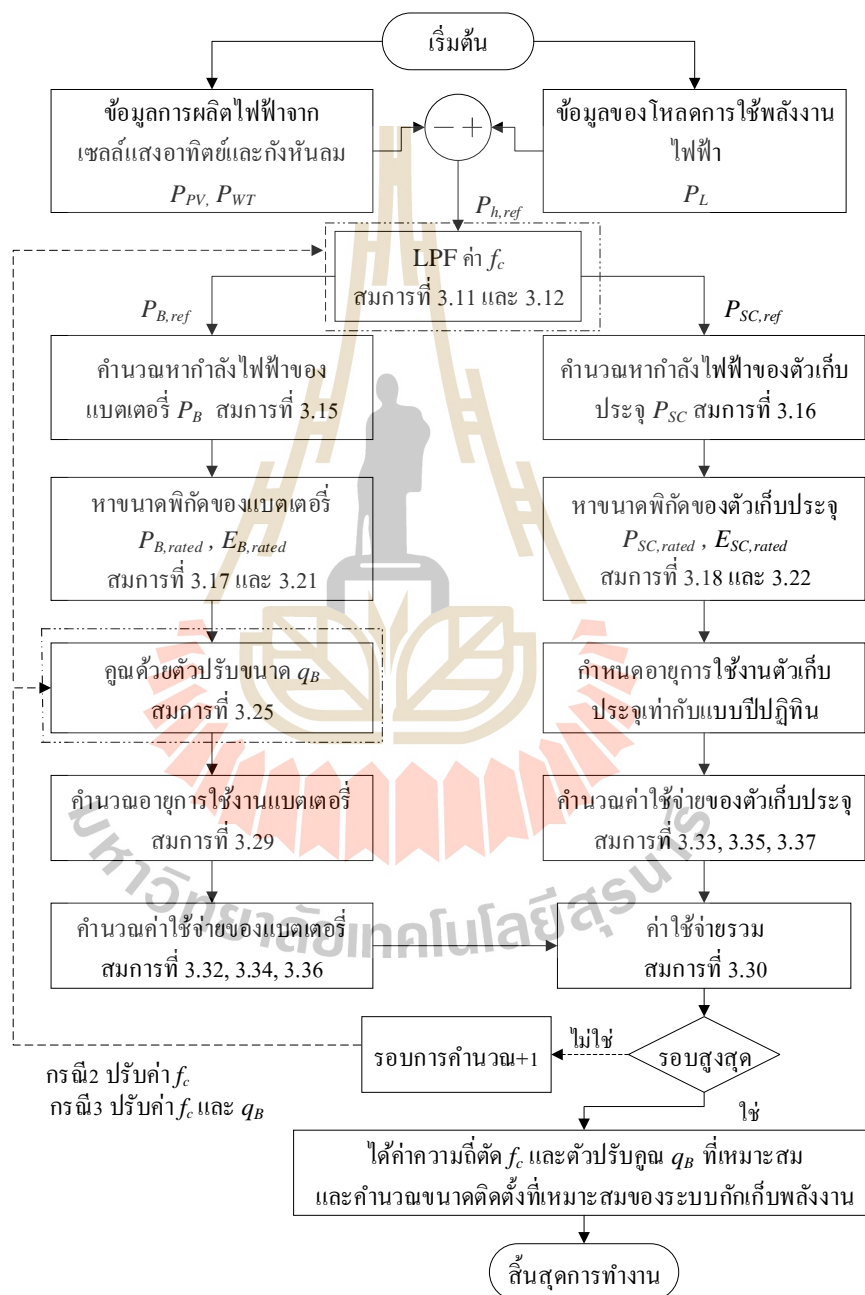
กรณีที่ 2 เป็นการหาขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่เหมาะสม โดยพิจารณาไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวระบบเดียวกันกับกรณีที่ 1 แต่ในกรณีนี้ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมเป็นระบบกักเก็บพลังงาน ขั้นตอนการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสม เริ่มต้นจากการหาส่วนต่างระหว่างโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด จากนั้นแบ่งค่าส่วนต่างของกำลังไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วนด้วยวงจรความถี่ต่ำ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่แบ่งได้ในส่วนที่มีความถี่ต่ำหรือมีความราบเรียบถูกใช้เป็นกำลังไฟฟ้าอ้างอิงให้กับแบตเตอรี่และส่วนที่มีความถี่สูงให้กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่ถูกแบ่งนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ตัด f_c ของวงจรกรองความถี่ต่ำดังรายละเอียดที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 3.3 จากนั้นคำนวณหากำลังไฟฟ้าทำงานทั้งของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุเพื่อใช้หาขนาดติดตั้งพิกัดของระบบกักเก็บพลังงานทั้งสองชนิด ขั้นตอนต่อไปทำการจำลองการทำงานของแบตเตอรี่เพื่อใช้ค่าระดับความลึกของการปล่อยประจุในการประเมินอายุการใช้งาน ส่วนอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุให้มีค่าเท่ากับอายุแบบปีปฏิทิน เมื่อได้ขนาดติดตั้งและอายุการใช้งานแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คำนวณหาค่าใช้จ่ายทั้งหมดซึ่งประกอบด้วย ค่าการติดตั้งเริ่มต้น ค่าการบำรุงรักษาและค่าการติดตั้งใหม่ของระบบกักเก็บพลังงานทั้งสองชนิด ทั้งนี้สมการค่าใช้จ่ายทั้งหมดถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค โดยวิธีแบบฝูงอนุภาคจะใช้ฟังก์ชันนี้ในการสุ่มค่าความถี่ตัดเพื่อหาค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด ทำให้สามารถหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้ ตามลำดับ โดยขั้นตอนการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกรณีนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.19 (ไม่คิดผลของตัวปรับคุณภาพแบตเตอรี่ q_B)

กรณีที่ 3 เป็นการหาขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่เหมาะสมในไมโครกริดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม ขั้นตอนการหาขนาดที่เหมาะสมเหมือนกับกรณีที่ 2 เพียงแต่ในกรณีนี้ให้ปรับคุณภาพแบตเตอรี่ด้วยค่า q_B ก่อนที่จะทำการจำลองการทำงานของแบตเตอรี่เพื่อใช้ค่าระดับความลึกของการปล่อยประจุในการประเมินอายุการใช้งาน เมื่อได้ขนาดติดตั้งและอายุการใช้งานแล้ว ก็ให้ทำการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมด ทั้งนี้สมการค่าใช้จ่ายทั้งหมดถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค โดยวิธีแบบฝูงอนุภาคจะใช้ฟังก์ชันนี้ในการสุ่มค่าความถี่ตัดและค่าการปรับคุณภาพเพื่อหาค่าความถี่ตัดและค่าการปรับคุณภาพที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด ทำให้สามารถหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้ ตามลำดับ โดยขั้นตอนการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกรณีนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.19 (คิดผลของตัวปรับคุณภาพแบตเตอรี่ q_B ด้วย)

สามารถสรุปกรณีของการวิจัยทั้ง 3 กรณีได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 กรณีศึกษาและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

กรณีศึกษา	1	2	3
ระบบกักเก็บพลังงาน	เฉพาะแบตเตอรี่	แบบผสม	แบบผสม
ตัวแปรค่าความเหมาะสม	q_B	f_c	f_c และ q_B



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนกรณีที่ 2 และ 3 หาขนาดติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมด้วยค่าความถี่ตัด f_c และตัวปรับคูณ q_B

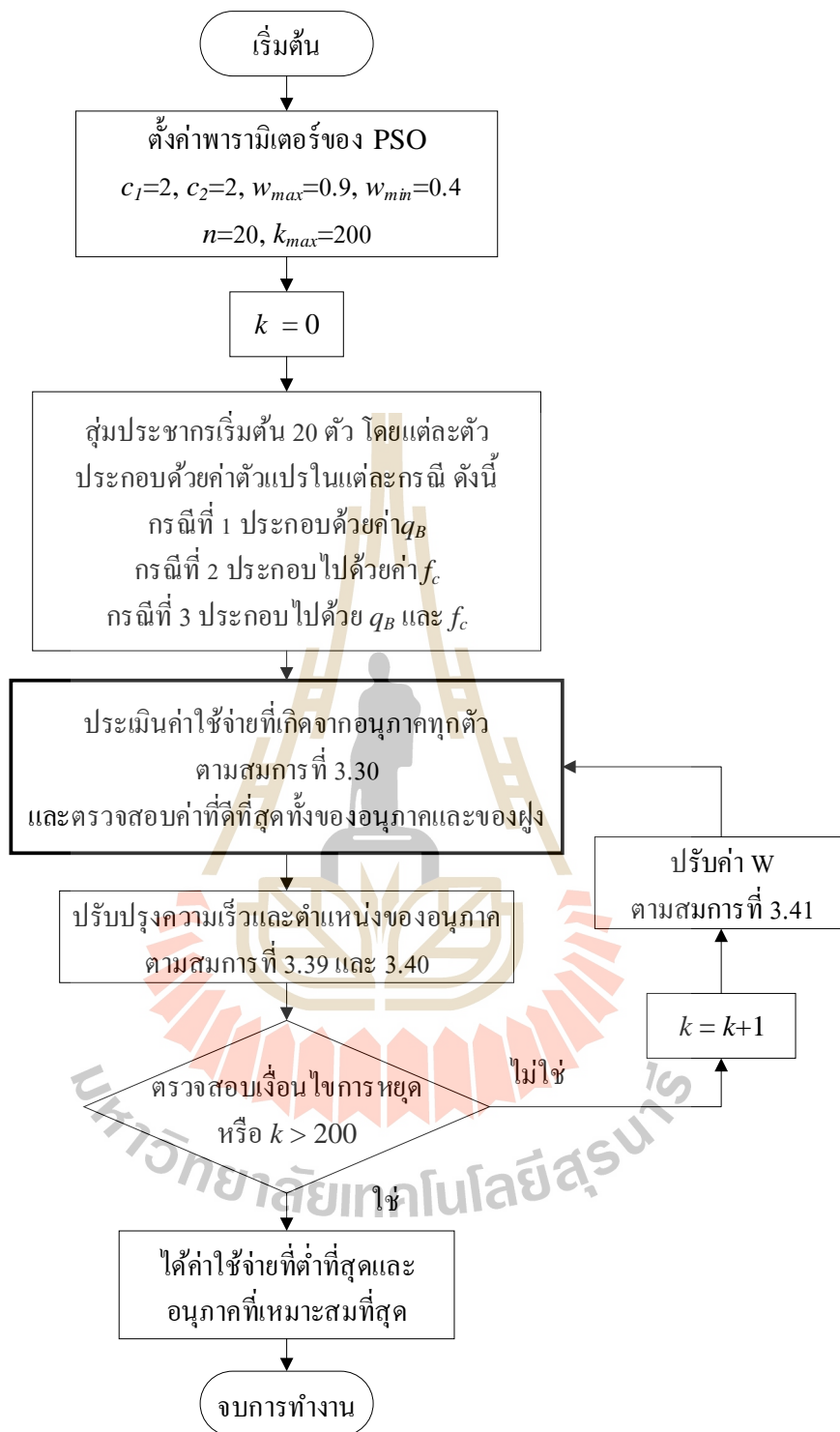
3.7.4 พารามิเตอร์และการประยุกต์ใช้วิธีแบบฝูงอนุภาค

การคำนวณแบบวิธีฝูงอนุภาคต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น โดยวิธีการแบบฝูงอนุภาคเป็นการสุ่มหาค่าคำตอบเริ่มต้นด้วยจำนวนของอนุภาคในฝูง ขนาดของแต่ละอนุภาคหรือจำนวนตัวแปร ค่าขอบเขตของแต่ละอนุภาค จำนวนรอบการทำงานสูงสุด ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็วและค่าการถ่วงน้ำหนักการเรียนรู้ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์มีค่าตามตารางที่ 3.4 โดยจำนวนของอนุภาคและจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ได้จากการจำลองผลหลายครั้งจนได้ค่าที่เหมาะสมกับระบบ ส่วนพารามิเตอร์อื่นเป็นค่าพื้นฐานที่ได้จากการอ้างอิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากวิธีการหาค่าตอบแบบฝูงอนุภาคที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เพื่อหาขนาดติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสมซึ่งขึ้นอยู่กับค่าตัวปรับขนาดแบตเตอรี่และค่าความถี่ตัดของวงจรรองความถี่ต่ำ โดยมีค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานตลอดโครงการเป็นฟังก์ชันประเมินค่าความฟิตหรือความเหมาะสม ซึ่งวิธีการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดของแต่ละกรณีศึกษาได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ขั้นตอนการหาค่าตอบที่เหมาะสมของการวิจัยด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาคสามารถแสดงในรูปที่ 3.20 โดยกำหนดให้อนุภาคในฝูงแทนจุดคำตอบซึ่งอนุภาคแต่ละตัวประกอบไปด้วย 1 ตัวแปรสำหรับกรณีที่ 1 คือ ค่าการปรับขนาด และกรณีที่ 2 คือ ค่าความถี่ตัด ส่วนกรณีที่ 3 มี 2 ตัวแปรคือ ค่าตัวปรับขนาดแบตเตอรี่และค่าความถี่ตัดของวงจรรองความถี่ต่ำ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมเหล่านี้แล้วทำให้หาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมได้

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ของวิธีการแบบฝูงอนุภาค

พารามิเตอร์ (ตัวย่อ)	ค่าของพารามิเตอร์
ค่าขอบเขตของตัวปรับขนาดแบตเตอรี่ (q_B)	$1 \leq q_B \leq 5$
ค่าขอบเขตของค่าความถี่ตัด (f_c)	$0 < f_c < 4.16 \text{ mHz}$
จำนวนของอนุภาคในฝูง (n)	20
จำนวนตัวแปร (m)	1 (กรณีที่ 1 และ 2) 2 (กรณีที่ 3)
จำนวนรอบการทำงานสูงสุด (k_{max})	200
ขอบเขตค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็ว (w_{max}/w_{min})	0.9/0.4
ค่าการถ่วงน้ำหนักการเรียนรู้ (c_1)	2
ค่าการถ่วงน้ำหนักการเรียนรู้ (c_2)	2



รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการหาค่าตอบที่เหมาะสมของการวิจัยด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค

3.8 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน การจัดสรรกำลังงานด้วยวงจรรองความถี่ต่ำ การคำนวณหาขนาดติดตั้ง การประเมินอายุด้วยวิธีแบบฝนตกและค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นของระบบ พร้อมทั้งขั้นตอนการจัดการพลังงานของระบบกักเก็บพลังงาน โดยพิจารณาจากระบบกักเก็บพลังงานทั้งแบบเฉพาะแบตเตอรี่และแบบผสมที่ถูกแบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษา แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่ต้องพิจารณาค่าที่เหมาะสมคือค่าการปรับขนาดแบตเตอรี่และหรือค่าความถี่ตัดของวงจรรองความถี่ต่ำ และยังกล่าวถึงวิธีการหาค่าตอบแบบฝูงอนุภาคซึ่งถูกประยุกต์ใช้หาค่าคำตอบที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ เมื่อทราบทฤษฎีและขั้นตอนของการวิจัยแล้ว เพื่อแสดงการจำลองและตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการวิจัยที่นำเสนอ ไมโครกริดตัวอย่างได้ถูกใช้เพื่อทดสอบการจำลองในงานวิจัยนี้ โดยผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลแสดงไว้ในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

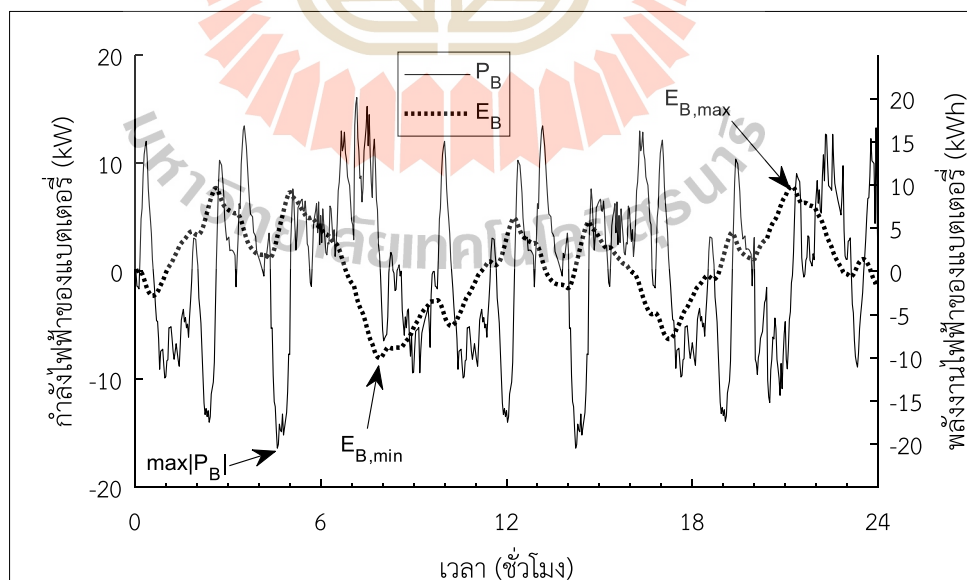
4.1 บทนำ

จากทฤษฎีและขั้นตอนการวิจัยที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา ในบทนี้เป็นการแสดงผลการจำลองของงานวิจัยที่ได้ในแต่ละกรณีศึกษา โดยใช้การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายรวมของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ การหาค่าตอบโดยใช้วิธีการหาค่าตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค PSO เพื่อหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานทั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และแบบผสม โดยงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB 2018a ที่ติดตั้งในคอมพิวเตอร์ Intel i3 Ram 4 GB Windows 7 เพื่อใช้ในการจำลองวิธีการวิจัยและแสดงผลการจำลอง โดยผลการจำลองแบ่งออกเป็น 3 กรณีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกลยุทธ์การจัดการพลังงานที่นำเสนอทั้ง 3 กรณี โดยกรณีที่ 1 เป็นระบบไมโครกริดที่ติดตั้งเฉพาะแบตเตอรี่ซึ่งแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ได้แสดงผลการคำนวณหาขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่ที่ถูกปรับขนาดด้วยตัวปรับขนาด ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานและค่าใช้จ่ายรวมของระบบแบตเตอรี่ตลอดโครงการ ส่วนกรณีที่ 2 เป็นระบบไมโครกริดที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมคือแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ได้แสดงผลการคำนวณของการจัดสรรพลังงานด้วยค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำ การหาสัดส่วนขนาดในการติดตั้งของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานและค่าใช้จ่ายรวมของระบบ และกรณีที่ 3 เป็นระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ติดตั้งผลการคำนวณของค่าความถี่ตัดและตัวปรับขนาดแบตเตอรี่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.4 โดยในแต่ละกรณีได้แสดงวิธีการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมและค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดของกรณีนั้น ๆ ทั้งนี้ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นของทั้ง 3 กรณีได้ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการลงทุนของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมเมื่อเทียบกับระบบกักเก็บพลังงานที่ใช้เฉพาะแบตเตอรี่

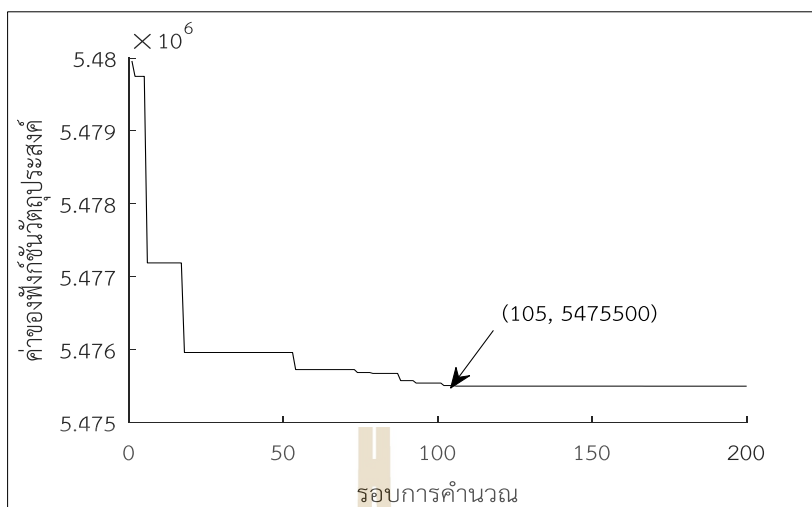
4.2 กรณีที่ 1 ไมโครกริดที่ติดตั้งเฉพาะแบตเตอรี่กับการปรับขนาด

ในกรณีนี้ไมโครกริดทำงานด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่เท่านั้น ดังนั้นกำลังไฟฟ้าอ้างอิงของแบตเตอรี่จึงมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงาน ($P_{B,ref} = P_{h,ref}$) เมื่อจำลองการทำงานโดยคิดประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้างานดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าทำงานของแบตเตอรี่มีความไม่ราบเรียบสูงจากรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3 เมื่อทราบค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าแล้วสามารถหาขนาดติดตั้งอย่างต่ำของแบตเตอรี่ได้คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าพิกัด $P_{B,rated} = 16.37$ kW ได้จากค่าสัมบูรณ์ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดและขนาดพลังงานไฟฟ้าพิกัดอย่างต่ำ $E_{B,rated} = 33.08$ kWh (ขนาดติดตั้งอย่างต่ำของแบตเตอรี่คือ ขนาดที่เล็กที่สุดที่ระบบติดตั้งเพื่อให้สามารถรักษาสมดุลของกำลังไฟฟ้าของโหลดและการผลิตได้ โดยที่แบตเตอรี่ยังทำงานในช่วงขอบเขตของสถานะการประจุที่กำหนด โดยระบบไม่สามารถติดตั้งขนาดเล็กกว่าขนาดอย่างต่ำนี้ได้)

ขั้นตอนมาคือการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ด้วยวิธีการแบบฝูงอนุภาค โดยขนาดแบตเตอรี่ได้ถูกปรับขนาดด้วยค่าการปรับขนาดเพื่อเพิ่มขนาดให้ใหญ่ขึ้นกว่าขนาดอย่างต่ำ ซึ่งในกรณีนี้กำหนดให้อนุภาคแต่ละตัวแทนจุดคำตอบที่ประกอบไปด้วยค่าตัวปรับขนาดแบตเตอรี่ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสม โดยพบว่าค่าใช้จ่ายรวมของระบบแบตเตอรี่มีค่าต่ำที่สุดที่ 5,475,500 บาท ตามการลู่เข้าหาค่าตอบในรอบที่ 105 ของวิธีแบบฝูงอนุภาคในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 กำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าทำงานของแบตเตอรี่ กรณีที่ 1



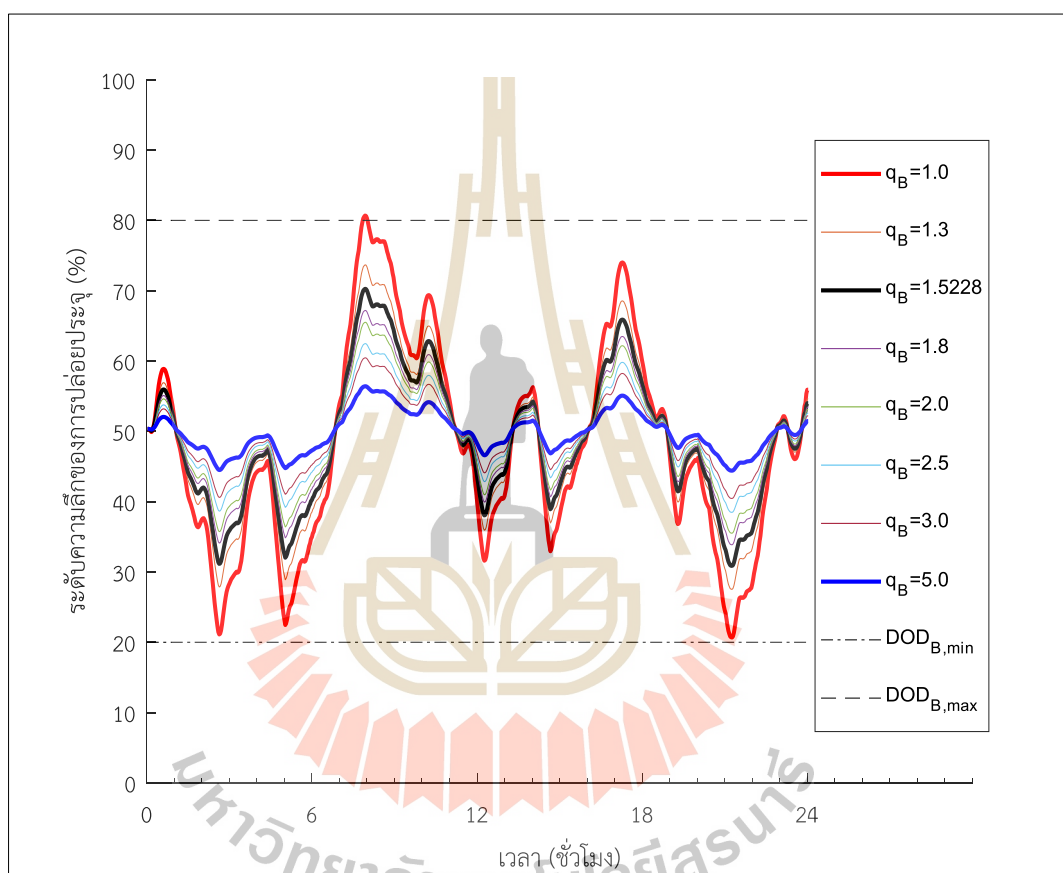
รูปที่ 4.2 การหาค่าตอบของกรณีที่ 1 ด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค

จากการหาค่าตอบด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาคทำให้ได้ตัวปรับคูณขนาดที่เหมาะสมคือ 1.5228 และได้ขนาดแบตเตอรี่ติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดคือขนาด 33.08×1.5228 เท่ากับ 50.37 kWh เพื่อแสดงรายละเอียดของค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้และตรวจสอบความถูกต้องของค่าความเหมาะสมที่ได้ การวิเคราะห์ผลของขนาดติดตั้งแบตเตอรี่ขนาดต่าง ๆ ต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่และค่าใช้จ่ายรวมของระบบเพื่อเปรียบเทียบกับค่าขนาดติดตั้งที่เหมาะสมสามารถแสดงไว้ดังนี้

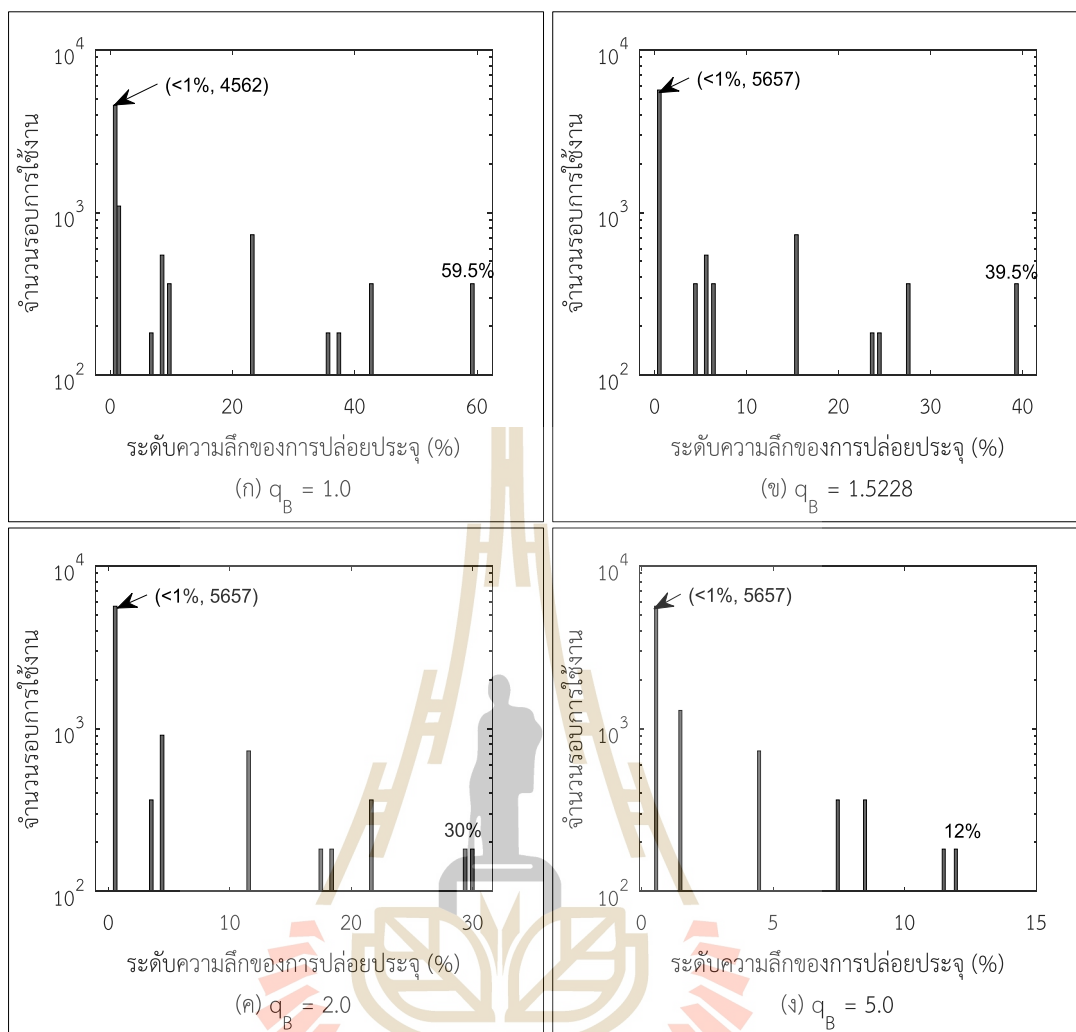
4.2.1 ผลของขนาดแบตเตอรี่ต่ออายุการใช้งาน

เพื่อแสดงผลการเปรียบเทียบของตัวปรับคูณขนาดค่าต่าง ๆ ต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ดำเนินการจำลองการทำงานของแบตเตอรี่ด้วยข้อมูลของกำลังไฟฟ้าอ้างอิง โดยกำหนดให้ค่าตัวปรับคูณตัวอย่างมีค่าระหว่าง 1.0 ถึง 5.0 เพื่อปรับขนาดพิกัดพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ให้ใหญ่ขึ้นและเพื่อเปรียบเทียบกับค่าตัวปรับคูณขนาดที่เหมาะสมคือ 1.5228 เมื่อจำลองการทำงานทำให้ได้ค่าสถานะระดับความลึกของการปล่อยประจุดังรูปที่ 4.3 โดยเส้นหนาสีแดงคือค่าระดับความลึกของการปล่อยประจุเมื่อตัวปรับคูณเท่ากับ 1.0 หรือขนาดติดตั้งอย่างต่ำของแบตเตอรี่และเส้นหนาสีน้ำเงินคือระดับความลึกของการปล่อยประจุของแบตเตอรี่ที่มีค่าตัวปรับคูณมากที่สุดคือ 5.0 ส่วนค่าสถานะระดับความลึกของการปล่อยประจุของขนาดอื่น ๆ อยู่ในช่วงระหว่างสองระดับนี้ไล่ตามลำดับ เมื่อแบตเตอรี่ขนาดต่างกันต้องทำงานที่กำลังไฟฟ้าเท่ากัน เห็นได้ว่าระดับความลึกของแบตเตอรี่ที่มีขนาดติดตั้งอย่างต่ำมีความผันผวนมากที่สุดจากค่าสถานะระดับความลึกของการปล่อยประจุสูงลงไปค่าสถานะต่ำ เนื่องจากแบตเตอรี่มีขนาดเล็กที่สุด โดยค่าระดับความลึกนี้มีแนวโน้มลดน้อยลงเมื่อทำงานด้วยแบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีค่าสถานะผันผวน

น้อยที่สุดที่ตัวปรับคูนมีค่ามากที่สุดหรือขนาดแบตเตอรี่ใหญ่ที่สุดเมื่อตัวปรับคูนเท่ากับ 5.0 ต่อมาเมื่อได้ค่าสถานะระดับความลึกการปล่อยประจุของแบตเตอรี่ขนาดต่าง ๆ แล้ว ต่อไปเป็นการประเมินอายุแบตเตอรี่ด้วยวิธีการนับแบบฝนตกตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ทำให้ได้สถิติของจำนวนรอบการใช้งานที่สถานะระดับความลึกของการปล่อยประจุค่าต่าง ๆ ใน 1 ปี ของแบตเตอรี่ขนาดตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ผลของตัวปรับคูนขนาดกักระดับความลึกการปล่อยประจุของแบตเตอรี่

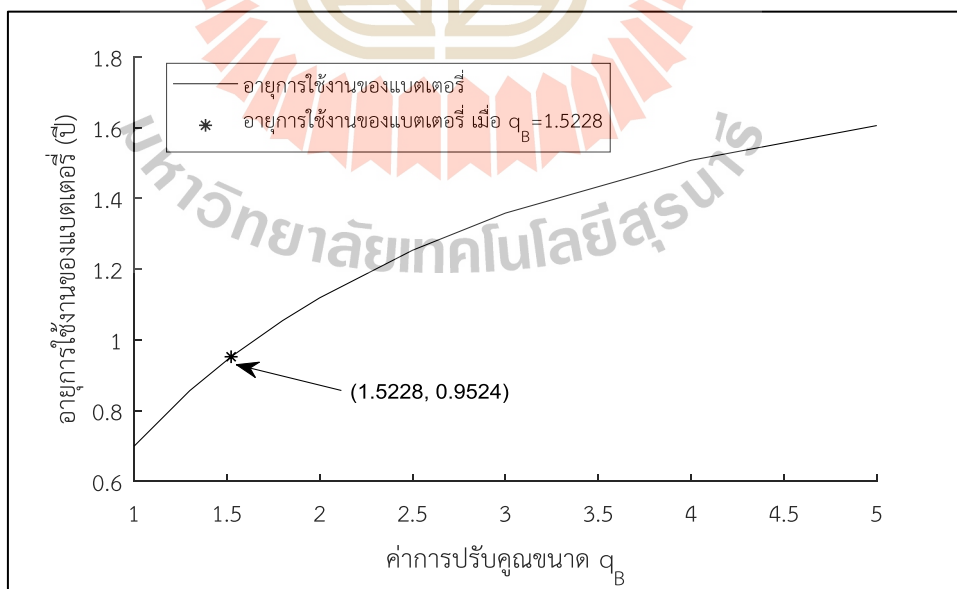


รูปที่ 4.4 สถิติจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ กรณีสี่ 1

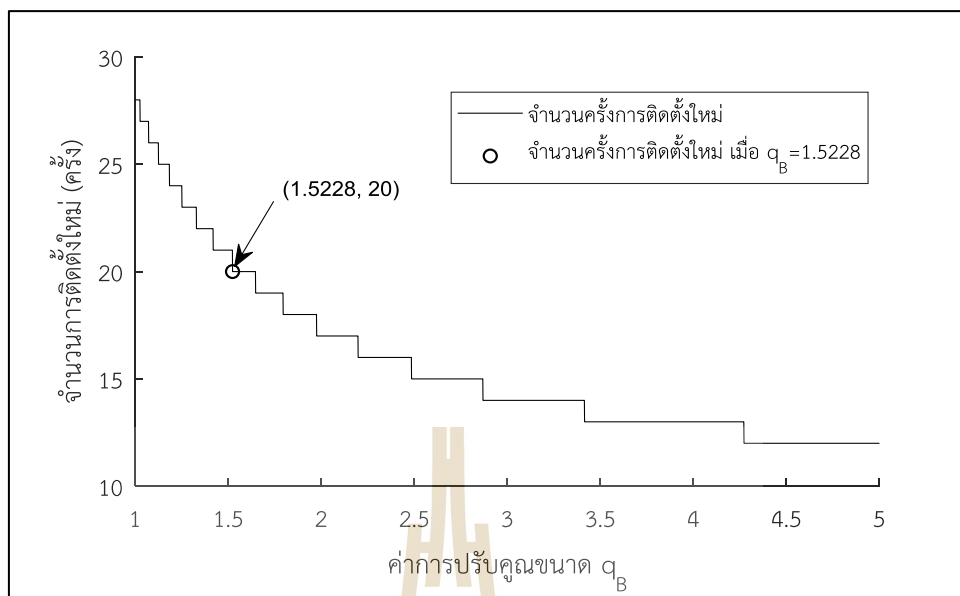
จากสถิติจำนวนรอบการใช้งานตามระดับความลึกของการปล่อยประจุที่ค่า q_B แยกต่างกัน 4 ค่า คือ 1.0 1.5228 2.0 และ 5.0 ในรูปที่ 4.4 พบว่าแบตเตอรี่ที่ปรับคูนด้วยค่า $q_B = 1.0$ มีรอบการใช้งานที่ค่าระดับความลึกสูงถึงช่วง 59.5% มีจำนวนประมาณ 365 รอบ ส่วนค่า $q_B = 1.5228$ แบตเตอรี่มีรอบการใช้งานที่ค่าระดับความลึกลดลงเหลือ 39.5% จำนวนประมาณ 365 รอบ และที่ค่า $q_B = 2.0$ และ 5.0 แบตเตอรี่มีรอบการใช้งานที่ระดับความลึกไม่เกิน 30.0% และ 12.0% ซึ่งมีประมาณ 180 รอบเท่านั้น เห็นได้ว่าเมื่อตัวปรับคูนขนาดหรือขนาดติดตั้งแบตเตอรี่ที่มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีแนวโน้มจำนวนรอบการใช้งานที่ค่าความลึกการปล่อยประจุสูง ๆ มีค่าลดลง เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ขึ้นทำให้สถานะการประจุมีความผันผวนน้อยกว่า ทำให้แบตเตอรี่ขนาดใหญ่มีอายุการใช้งานที่นานกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มขนาดแบตเตอรี่ให้ใหญ่ขึ้น จำนวนรอบการใช้งานที่ระดับ

ความลึกของการปล่อยประจุที่มีค่าต่ำไม่ได้ลดไปด้วย เนื่องจากกำลังไฟฟ้าทำงานไม่มีความราบเรียบ สืบเนื่องจากจำนวนรอบการใช้งานที่ค่าระดับความลึกต่ำ ๆ ที่มีค่าต่างกันในแต่ละขนาดคือที่ตัวปรับคูณเท่ากับ 1.0 มีจำนวนรอบที่ระดับความลึกต่ำกว่า 1.0% อยู่ถึง 4,562 รอบ ในขณะที่ตัวปรับคูณที่เหลือมีค่าประมาณ 5,657 รอบ ทำให้การยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่อาจทำได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งปัญหานี้จะถูกแก้ไขด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมในกรณีที่ 2 และ 3 ต่อไป

โดยในกรณีที่ 1 นี้ เมื่อคำนวณอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ขนาดต่าง ๆ ด้วยวิธีแบบฝนตกแล้ว สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวปรับคูณขนาดต่ออายุการใช้งานและจำนวนครั้งการติดตั้งใหม่ตลอดช่วงเวลาโครงการของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ พบว่าตั้งแต่ค่าตัวปรับคูณเท่ากับ 1.0 ถึง 5.0 แบตเตอรี่จะมีอายุการใช้งานประมาณ 0.7 จนถึง 1.6 ปี ตามลำดับ โดยเมื่อเพิ่มขนาดมากขึ้นจะทำให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่เพิ่มมากขึ้นซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นช้าลงเมื่อค่าตัวปรับคูณมากขึ้นเรื่อย ๆ สังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ ส่วนจำนวนครั้งการติดตั้งใหม่มีจำนวน 28 จนถึง 12 ครั้ง โดยมีลักษณะลดลงเป็นขั้นบันได เนื่องจากขนาดแบตเตอรี่ที่มีค่าใกล้เคียงกันและมีอายุต่างกันเล็กน้อยมีจำนวนครั้งการติดตั้งใหม่เท่ากัน (เช่น ที่ $q_B = 4.5$ และ 5.0 มีการติดตั้งใหม่ 12 ครั้งเท่ากันถึงแม้จะมีอายุต่างกัน) เพื่อความชัดเจนแสดงด้วยค่าตัวปรับคูณที่เหมาะสมเท่ากับ 1.5228 แบตเตอรี่มีอายุ 0.9524 ปีและต้องติดตั้งใหม่ตลอดโครงการ 20 ครั้ง



รูปที่ 4.5 ผลของตัวปรับคูณขนาดต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่

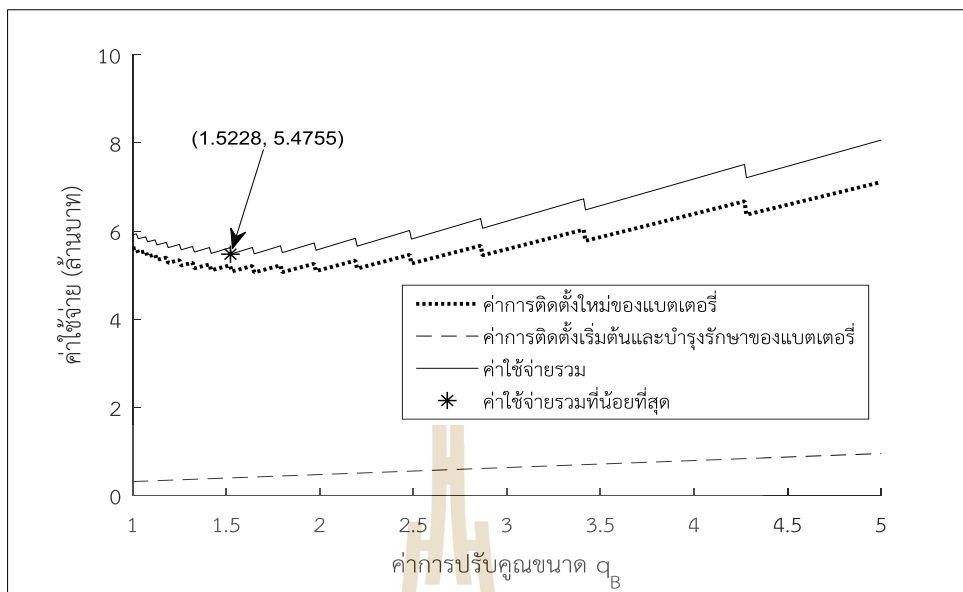


รูปที่ 4.6 ผลของตัวปรับขนาดต่อจำนวนการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่

4.2.2 ผลของขนาดแบตเตอรี่ต่อค่าใช้จ่ายรวม

เมื่อทราบค่าขนาดติดตั้งและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่แล้ว ต่อไปเป็นการคำนวณหาค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงผลของขนาดตัวปรับขนาดต่อค่าใช้จ่ายทั้งหมด โดยค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเริ่มต้นและค่าการบำรุงรักษา ($IC+NPV(OC)$) มีความสัมพันธ์กับตัวปรับขนาดเป็นเชิงเส้น มีค่าประมาณ 316,269 ถึง 952,699 บาท เมื่อปรับ q_B ตั้งแต่ 1.0 ถึง 5.0 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดที่ใหญ่ขึ้น ส่วนค่าใช้จ่ายการติดตั้งใหม่ ($NPV(RC)$) มีแนวโน้มลดลงเมื่อปรับ q_B ตั้งแต่ 1.0 ถึง 1.5228 โดยมีค่าประมาณ 5,600,739 ถึง 5,076,050 บาท เนื่องจากอายุแบตเตอรี่ที่ยาวนานขึ้นทำให้จำนวนการติดตั้งใหม่น้อยลง อย่างไรก็ตามค่าติดตั้งใหม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากนี้จนถึง 7,111,363 บาท เมื่อปรับค่า q_B จนถึง 5.0 เนื่องจากขนาดที่ใหญ่เกินไปทำให้ค่าติดตั้งใหม่ในแต่ละครั้งมีค่าสูงถึงแม้ว่าจะมีจำนวนครั้งในการติดตั้งใหม่น้อยลงก็ตาม โดยเมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดพบว่าที่ค่า $q_B = 1.5228$ ทำให้มีค่าใช้จ่ายรวมน้อยที่สุดที่ 5,475,500 บาท

สามารถสรุปค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองผลของขนาดติดตั้งที่ต่างกันของแบตเตอรี่ได้ตามตารางที่ 4.1 เป็นการยืนยันว่าขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาดพิกัด 50.37 kWh ($q_B = 1.5228$) ซึ่งตรงกับคำตอบที่ได้จากวิธีแบบฝูงอนุภาค ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายของระบบน้อยที่สุดเท่ากับ 5,475,500 บาท ในระบบกักเก็บพลังงานที่ใช้เฉพาะแบตเตอรี่ในกรณีที่ 1 นี้



รูปที่ 4.7 ผลของตัวปรับขนาดต่อค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่

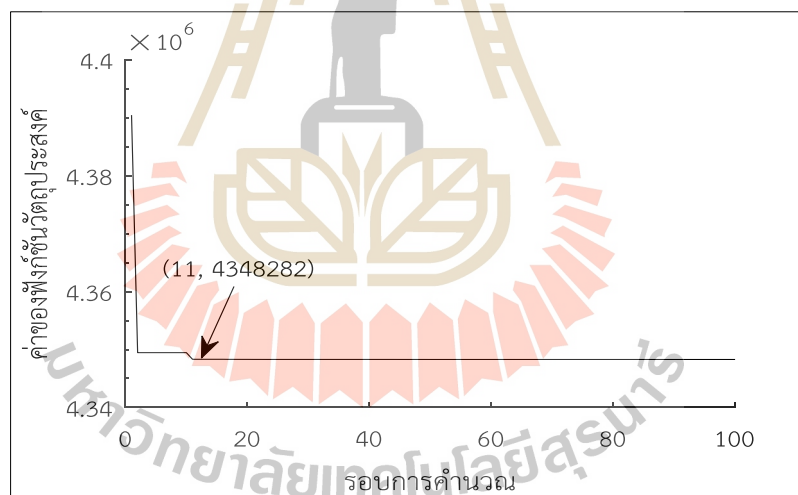
ตารางที่ 4.1 ผลของค่าตัวปรับขนาดต่อค่าใช้จ่ายรวมของระบบแบตเตอรี่

q_B	$E_{B,Orated}$ (kWh)	อายุการใช้ งานแบตเตอรี่ (ปี)	จำนวนการ เปลี่ยน แบตเตอรี่ (ครั้ง)	ค่าติดตั้งเริ่มต้น+ ค่าบำรุงรักษา (บาท)	ค่าติดตั้ง ใหม่ (บาท)	ค่าใช้จ่าย รวม (บาท)
1.0	33.08	0.6994	28	316,269	5,600,739	5,917,008
1.3	43.00	0.8565	23	364,001	5,261,235	5,625,236
1.5228	50.37	0.9524	20	399,450	5,076,050	5,475,500
1.8	59.54	1.0546	18	443,555	5,066,587	5,510,142
2.0	66.16	1.1191	17	475,376	5,115,662	5,591,039
2.5	82.70	1.2536	15	554,930	5,275,195	5,830,125
3.0	99.24	1.3586	14	634,484	5,589,334	6,223,818
5.0	165.40	1.6061	12	952,699	7,111,363	8,064,063

หมายเหตุ : ค่าใช้จ่ายทั้งหมดมาจากการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เท่านั้น

4.3 กรณีที่ 2 ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมกับค่าความถี่ตัด

ในกรณีนี้ไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวได้ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ประกอบไปด้วยแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด จากวิธีการจัดการที่นำเสนอ กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานได้ถูกแบ่งด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อปรับความราบเรียบของกำลังไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ โดยใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดรองรับกำลังไฟฟ้าที่มีความถี่สูง ดังนั้นขนาดติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่มีการแปรผันตามค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำที่ใช้จัดสรรกำลังไฟฟ้า กรณีนี้เป็นการหาค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมเพื่อใช้จัดสรรพลังงานให้กับแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในกรณีนี้เป็นการปรับปรุงอายุการใช้งานแบตเตอรี่ต่อจากกรณีที่ 1 โดยกำหนดให้ค่าปรับคุณภาพขนาดแบตเตอรี่มีค่าคงที่เท่ากับค่าเหมาะสมจากกรณีที่ 1 ($q_B = 1.5228$) จากการหาคำตอบด้วยวิธีการแบบฝูงอนุภาคพบว่าค่าใช้จ่ายรวมของระบบกักเก็บพลังงานที่ต่ำที่สุดคือ 4,348,282 บาท ตามการลู่เข้าหาคำตอบในรอบที่ 11 ของวิธีการแบบฝูงอนุภาคดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.8



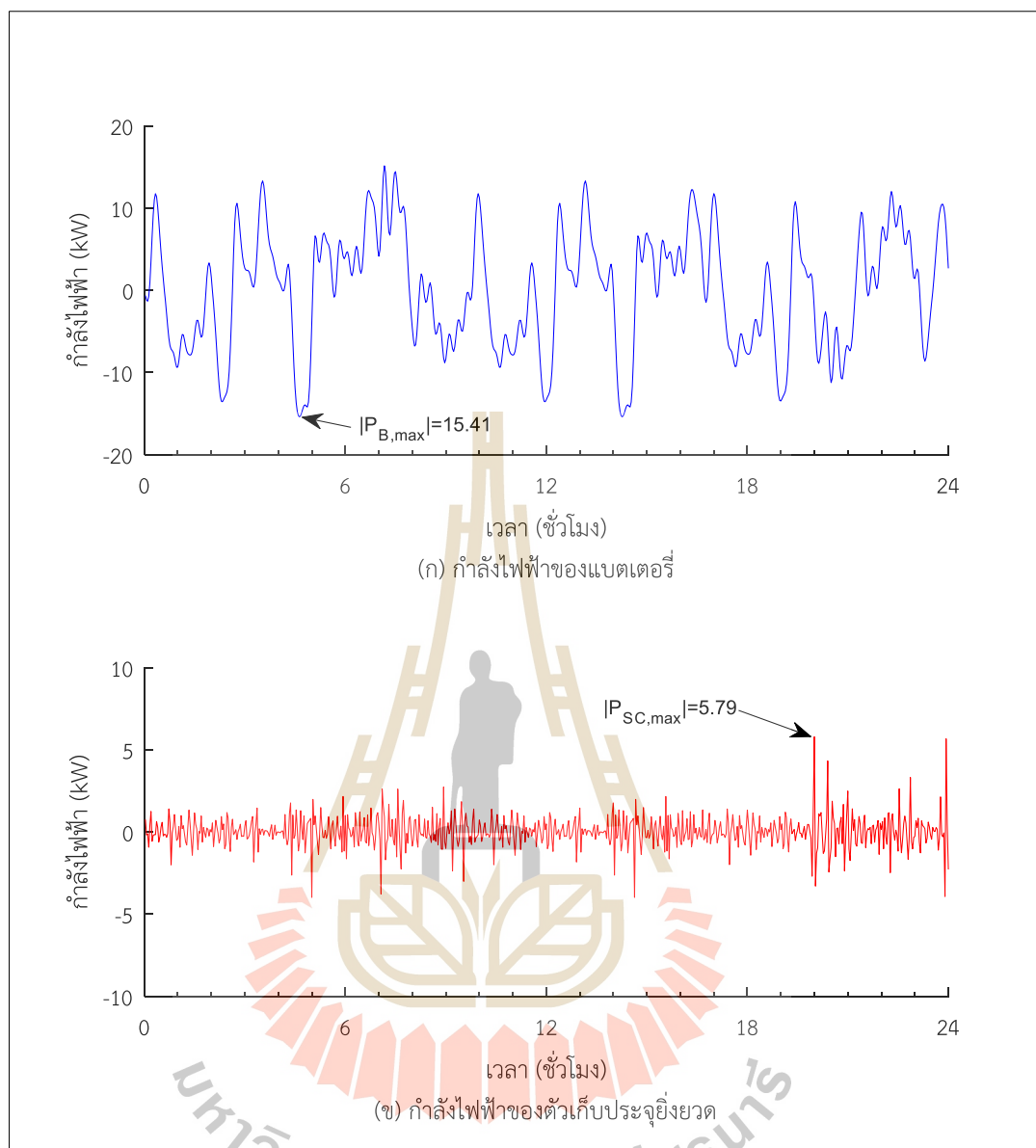
รูปที่ 4.8 การลู่เข้าหาคำตอบของกรณีที่ 2 ด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค

จากการหาคำตอบด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาคทำให้ได้ค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมคือ 0.091 mHz ดังนั้นได้ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 15.30 kW/50.89 kWh และตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาด 6.60 kW/3.49 kWh เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าความเหมาะสมที่ได้และเพื่อให้เข้าใจในขั้นตอนการวิเคราะห์โดยละเอียด จากกรณีศึกษาสามารถแสดง

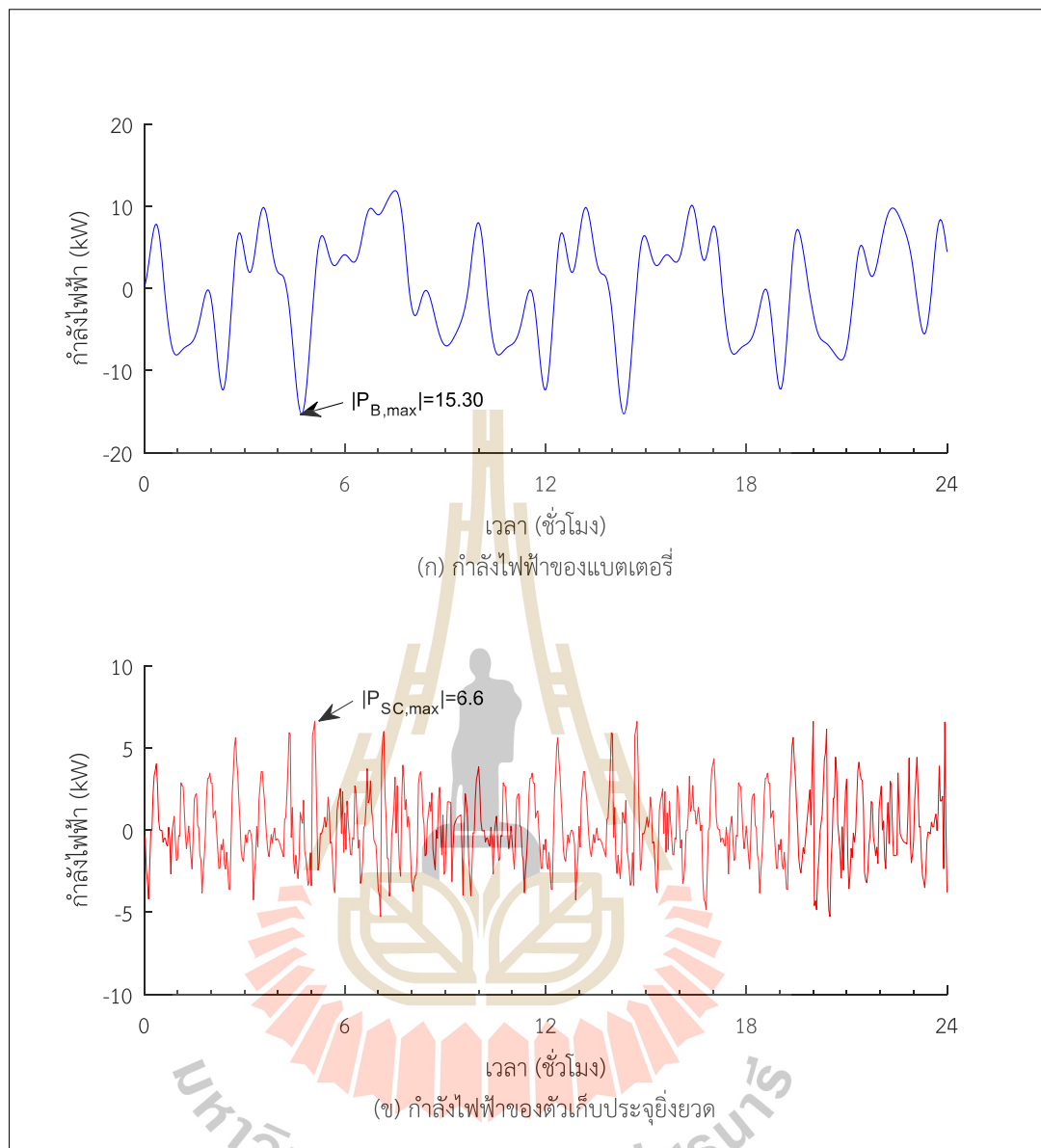
การวิเคราะห์ผลของค่าความถี่ตัดที่ค่าต่าง ๆ ต่ออายุการใช้งานและค่าใช้จ่ายรวมของระบบเพื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่ตัดและขนาดติดตั้งที่เหมาะสม แสดงผลได้ดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลของค่าความถี่ตัดต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่

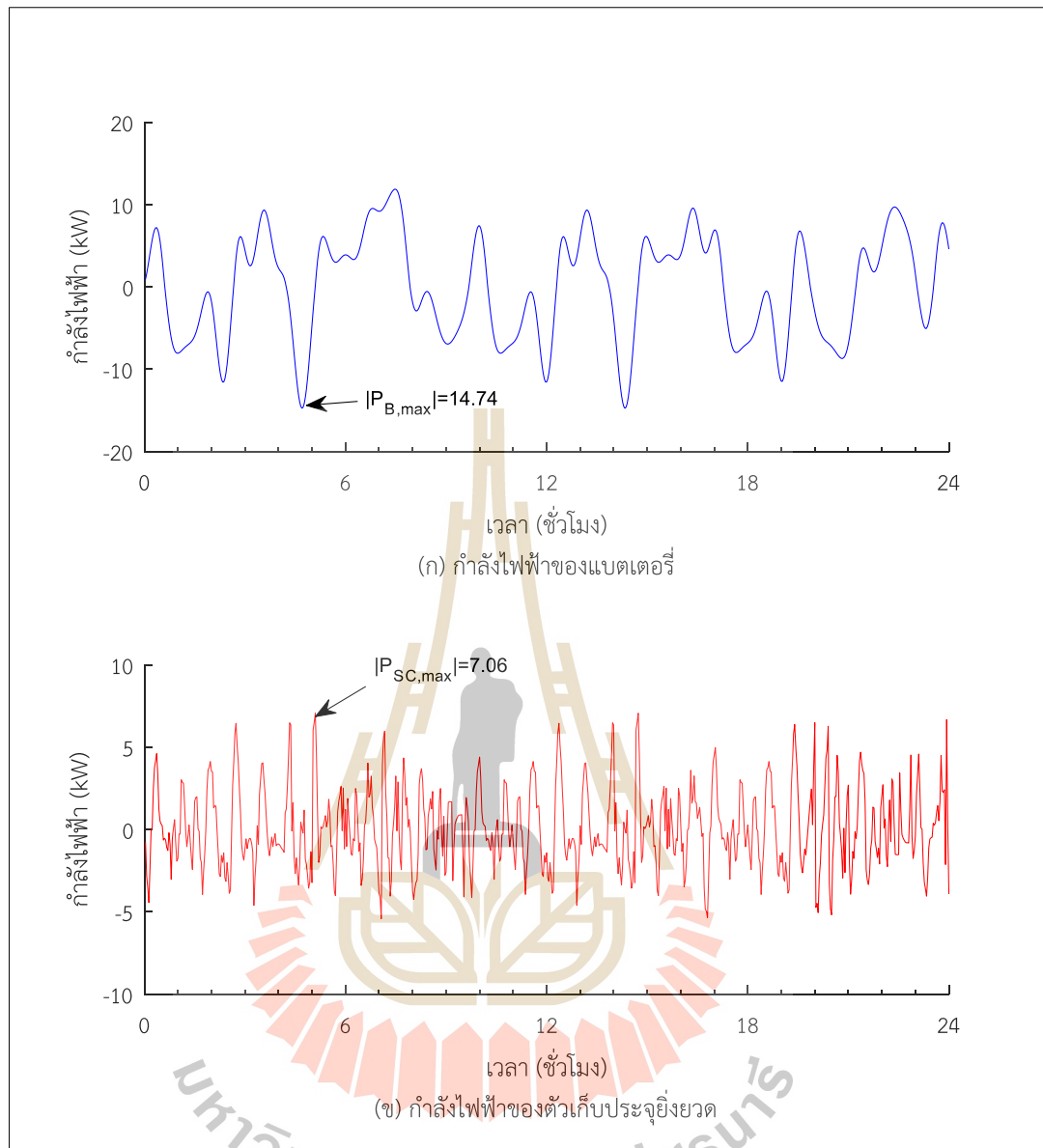
เพื่อแสดงการเปรียบเทียบผลของค่าความถี่ตัดค่าต่าง ๆ ต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่และขนาดติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงาน ให้ทำการจำลองหาค่ากำลังไฟฟ้าทำงานของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด เมื่อกำหนดให้ค่าความถี่ตัดตัวอย่างซึ่งมีค่ามากกว่า 0 และไม่เกิน 4.16 mHz (ตามพื้นฐานของความถี่ในควิสท์) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมคือ 0.091 mHz ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าทำงานของระบบกักเก็บพลังงานทั้งของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ถูกจัดสรรด้วยวงจรกรองความถี่ที่ค่าความถี่ตัดค่าต่าง ๆ (ยกตัวอย่างที่ค่าความถี่ตัด 4 ค่าคือ 1.0 mHz 0.091 mHz 0.05 mHz และ 0.01 mHz) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.12 ตามลำดับ สังเกตว่าเมื่อค่าความถี่ตัดมีค่าน้อยลงตามค่าตัวอย่างทั้ง 4 ค่า ทำให้กำลังไฟฟ้าทำงานของแบตเตอรี่มีแนวโน้มราบเรียบมากยิ่งขึ้น และสามารถลดค่าสัมบูรณ์ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15.41 kW 15.30 kW 14.74 kW และ 13.97 kW ตามลำดับ โดยตั้งแต่ความถี่ตัดต่ำกว่า 0.091 mHz ลงไป ความราบเรียบของกำลังไฟฟ้ามักมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีความถี่หรือความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยมีค่าสัมบูรณ์ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 5.79 kW 6.60 kW 7.06 kW และ 7.64 kW ตามลำดับ เพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้นให้สังเกตได้จากรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นรูปขยายของกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ค่าความถี่ตัดตัวอย่างในช่วงเวลา 3 ชั่วโมงแรก ตามลำดับ



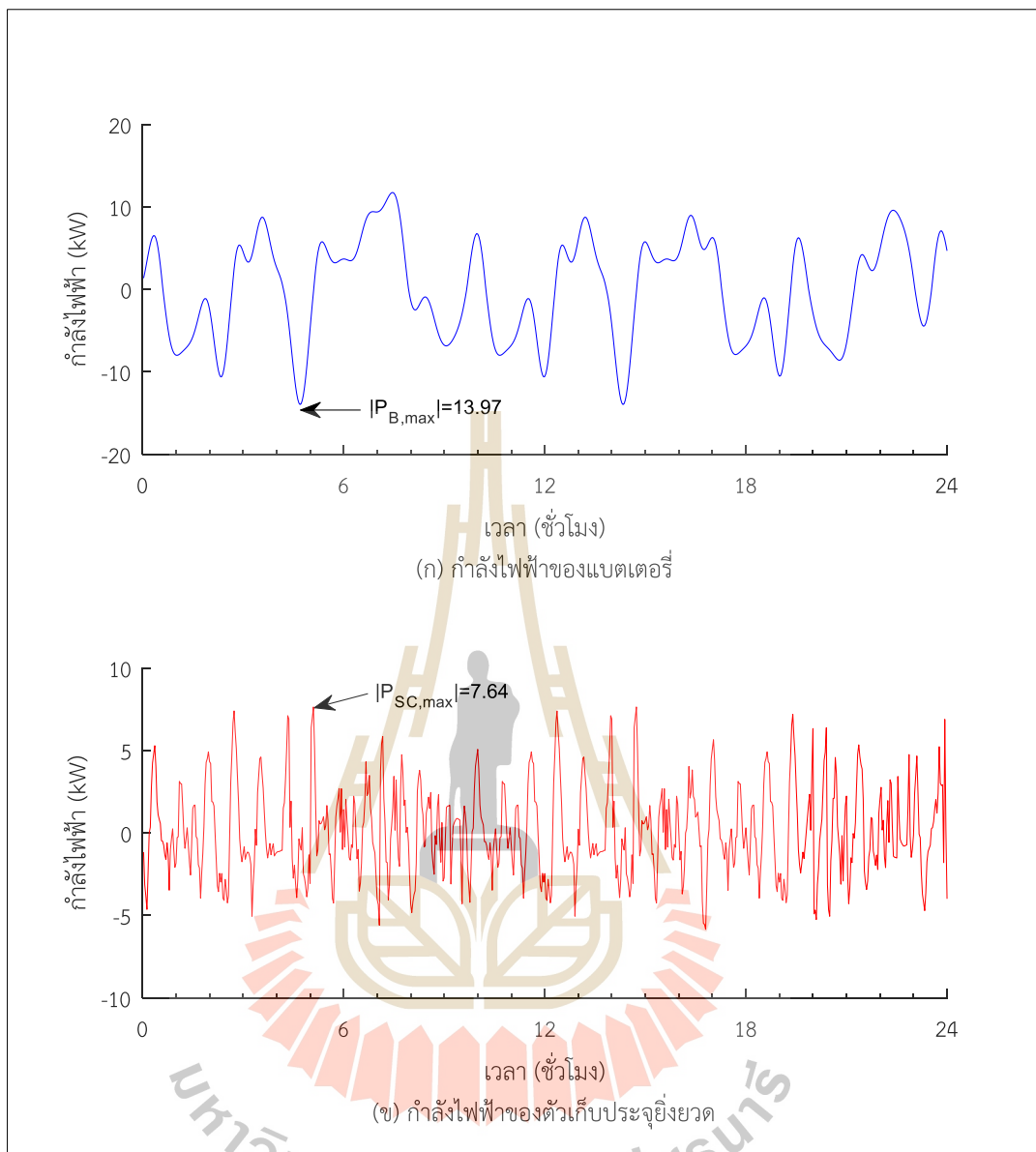
รูปที่ 4.9 การจัดสรรกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่ตัด 1 mHz



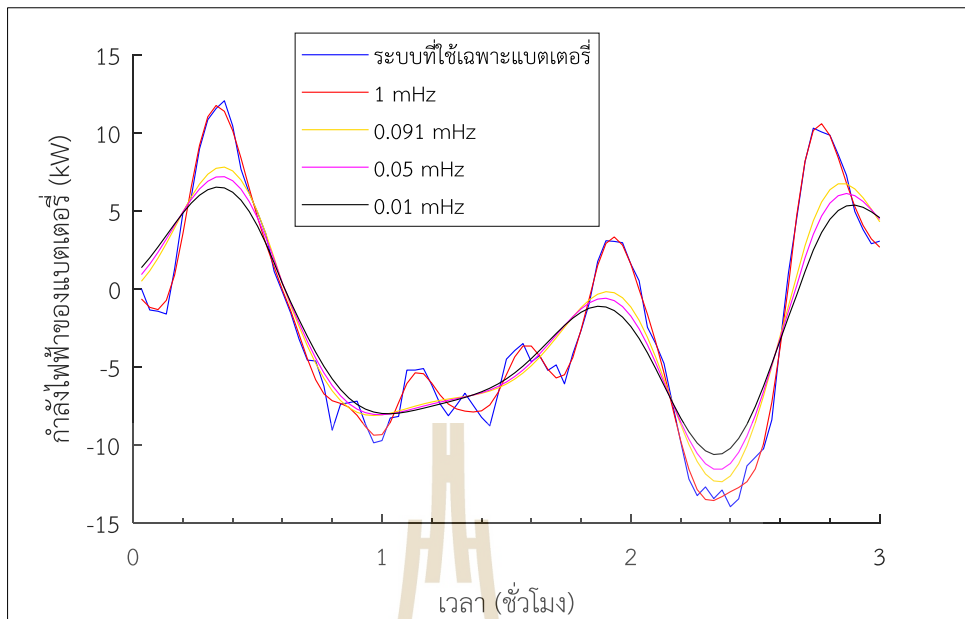
รูปที่ 4.10 การจัดสรรกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่ตัด 0.091 mHz



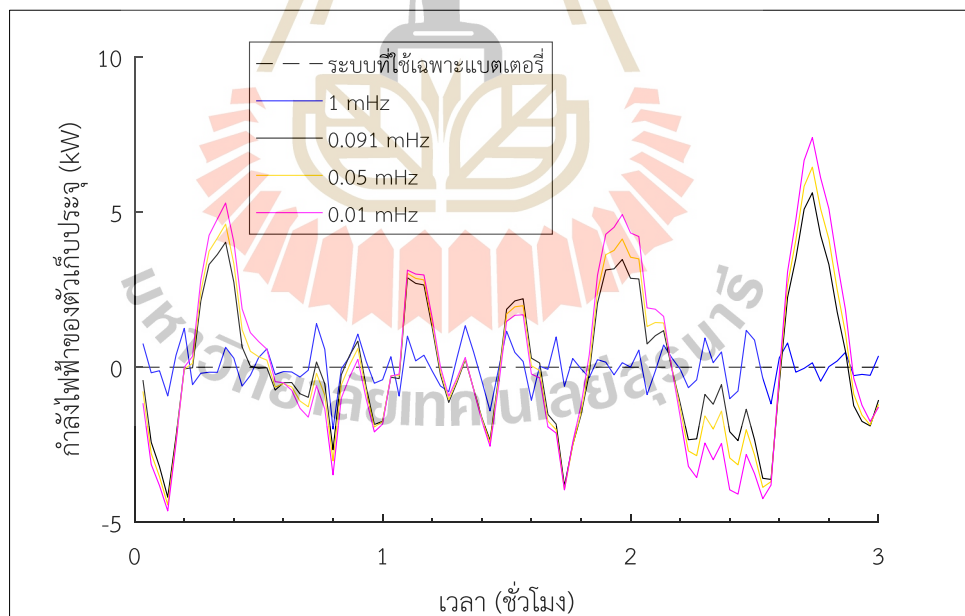
รูปที่ 4.11 การจัดสรรกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่ตัด 0.05 mHz



รูปที่ 4.12 การจัดสรรกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่ตัด 0.01 mHz



รูปที่ 4.13 ความถี่ที่ตัดกับกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในช่วง 3 ชั่วโมงแรก



รูปที่ 4.14 ความถี่ที่ตัดกับกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในช่วง 3 ชั่วโมงแรก

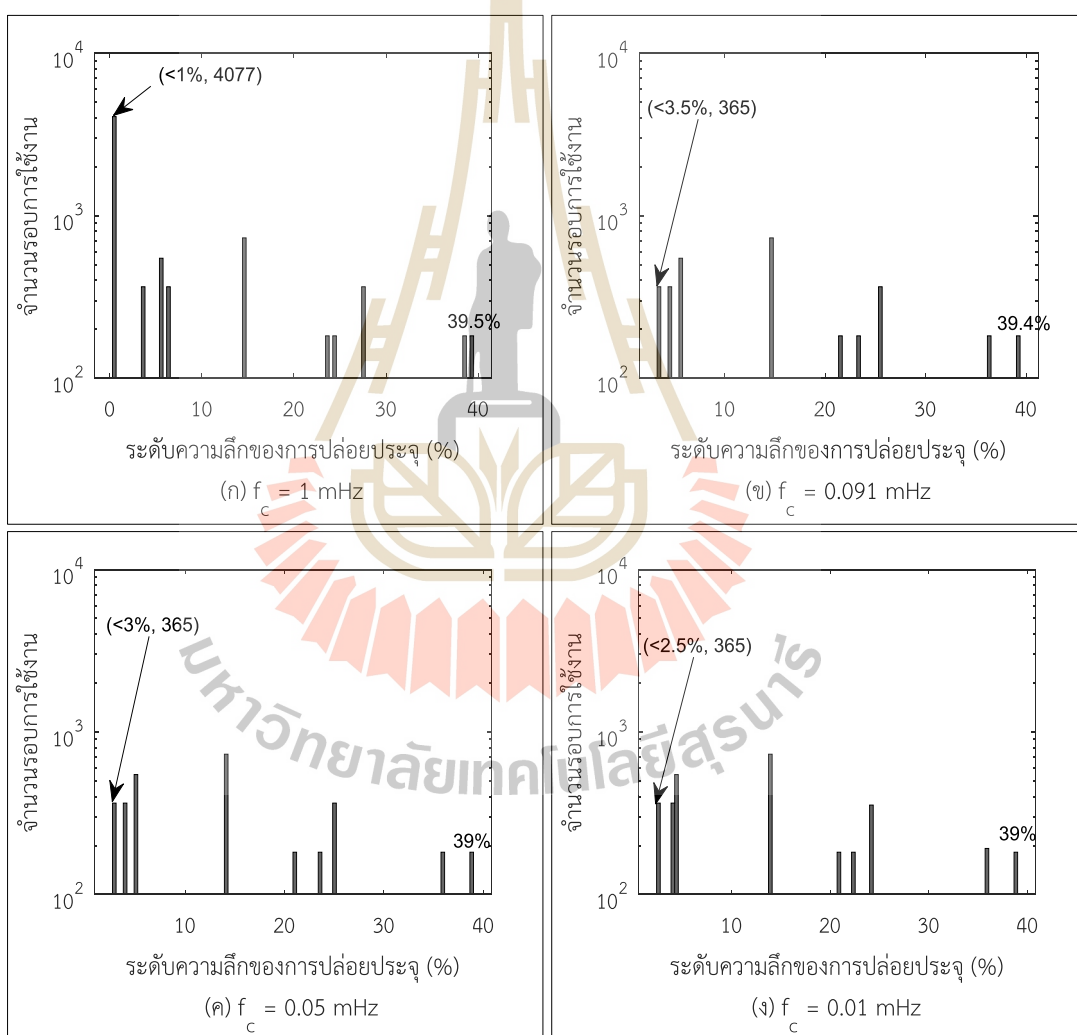
ขนาดติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมขึ้นอยู่กับค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่สรุปไว้ดังตารางที่ 4.2 เห็นได้ว่าเมื่อค่าความถี่ตัดมีค่าลดลงทำให้กำลังไฟฟ้าแบตเตอรี่ราบเรียบขึ้น ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าแบตเตอรี่จึงลดลงไปด้วย แต่ขนาดพิกัดพลังงานแบตเตอรี่มีค่าประมาณเท่าเดิมคือ ประมาณ 33 kWh เท่ากับกรณีที่ 1 ไม่เปลี่ยนแปลงมากเนื่องจากพลังงานสุทธิโดยรวมยังคงมีค่าเกือบเท่าเดิม ในส่วนของขนาดพิกัดกำลังและพลังงานไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ตัดมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.2 ค่าความถี่ตัดกับขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม

f_c (mHz)	$E_{B,rated}$ (kWh)	$P_{B,rated}$ (kW)	$E_{SC,rated}$ (kWh)	$P_{SC,rated}$ (kW)
-	33.08	16.37	-	-
1	33.27	15.41	1.12	5.79
0.5	33.40	15.31	1.69	6.04
0.091	33.42	15.30	3.49	6.60
0.07	33.40	15.04	3.69	6.82
0.05	33.39	14.74	3.92	7.06
0.01	33.39	13.97	4.49	7.64
0.001	33.39	13.73	4.65	7.78

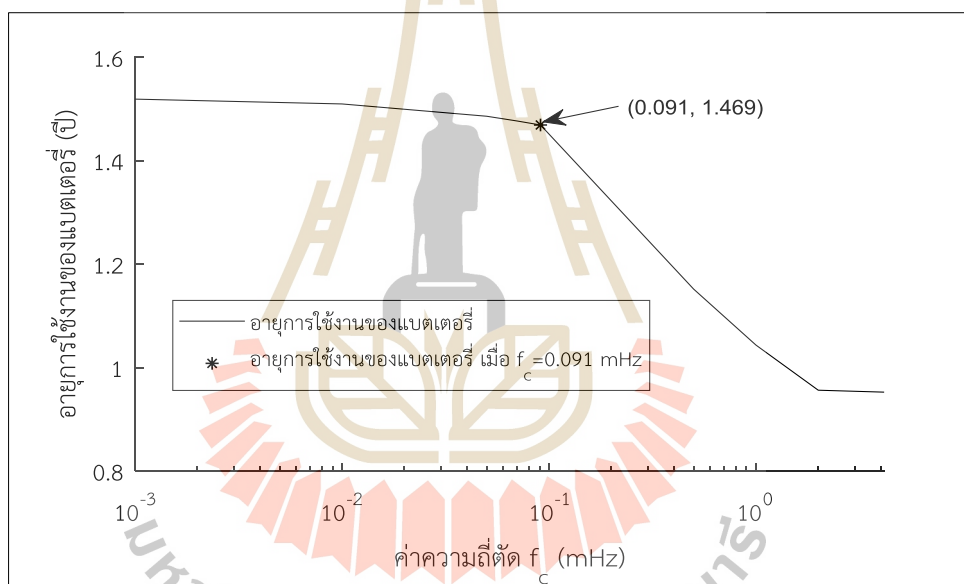
ก่อนทำการจำลองผล ขนาดพิกัดพลังงานของแบตเตอรี่ถูกคูณด้วยตัวปรับคูณที่เหมาะสมจากกรณีที่ 1 ได้ขนาดแบตเตอรี่ที่ถูกปรับคูณแล้ว ($E_{B,Orated} = 1.5228 \times E_{B,rated}$) หลังจากนั้นทำการจำลองการทำงานของแบตเตอรี่เพื่อประเมินอายุการใช้งาน เมื่อนับจำนวนรอบการใช้งานด้วยวิธีแบบฝนตกได้สถิติจำนวนรอบการใช้งานที่ค่าสถานะระดับความลึกต่าง ๆ ใน 1 ปี ของแบตเตอรี่ที่ค่าความถี่ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.15 เมื่อเปรียบเทียบจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมจากกรณีที่ 1 ซึ่งมีขนาดเท่ากันในรูปแบบที่ 4.4 (จ) พบว่าเมื่อใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ค่าความถี่ตัด 1 mHz จำนวนรอบการใช้งานที่ระดับความลึกการปล่อยประจุน้อยกว่า 1.0% ลดลงจาก 5,657 รอบ เหลือ 4,077 รอบ สามารถลดจำนวนรอบที่ระดับความลึก 39.5% จาก 365 รอบ เหลือเพียง 180 รอบ ส่วนจำนวนรอบที่ค่าระดับความลึกอื่น ๆ มีการปรับระดับความลึกลงเล็กน้อย และในการปรับความถี่ที่ 0.091 mHz 0.05 mHz และ 0.01 mHz ทำให้จำนวนรอบที่ระดับการปล่อยประจุน้อยกว่า 1.0% หดหายไป โดยมีระดับการปล่อยประจุน้อยที่สุดอยู่ที่

3.5% 3.0% และ 2.5% ตามลำดับ โดยยังคงมีจำนวนรอบที่ค่าระดับความถี่การปล่อยประจุที่ค่าประมาณ 39.0% จำนวน 180 รอบเท่ากัน แสดงให้เห็นถึงข้อดีของการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่สามารถลดจำนวนรอบการใช้งานที่ค่าระดับความถี่การปล่อยประจุที่ค่าต่ำได้ อย่างไรก็ตามที่ระดับความถี่การปล่อยประจุสูงไม่ได้มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และสังเกตว่าตั้งแต่ความถี่ตัด 0.091 mHz ลงไป จำนวนรอบของแบตเตอรี่ที่ระดับความถี่ของการปล่อยประจุมีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องจากกำลังไฟฟ้าถูกปรับความราบเรียบเพียงพอแล้วจนเกิดการอิมพัลส์ ซึ่งถ้ามีการปรับความถี่ให้ต่ำลงไปเรื่อย ๆ ก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

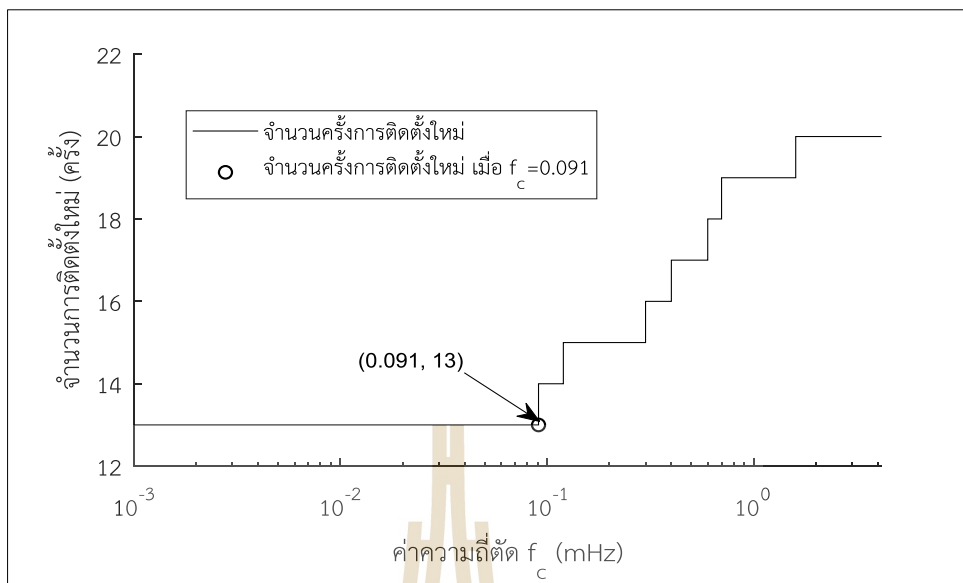


รูปที่ 4.15 สถิติจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ กรณีที่ 2

จากสถิติจำนวนรอบการใช้งานที่ค่าระดับความถี่ของการปล่อยประจุ ทำการคำนวณหาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ด้วยวิธีการนับแบบฝนตกและหาจำนวนครั้งในการติดตั้งใหม่ตลอดระยะเวลาโครงการซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความถี่ตัดดังแสดงในรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ตามลำดับ พบว่าแบตเตอรี่มีอายุ 0.9524 ถึง 1.5190 ปี และมีจำนวนครั้งการติดตั้งใหม่จำนวน 20 ถึง 13 ครั้ง เมื่อปรับลดค่าความถี่ตัดจาก 4.16 ลดลงถึง 0.001 mHz แสดงให้เห็นว่าอายุการใช้งานของแบตเตอรี่มีค่าเพิ่มมากขึ้นและมีจำนวนการติดตั้งใหม่ลดลงเมื่อปรับความถี่ตัดให้น้อยลงซึ่งหมายถึงต้องมีการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย โดยที่ค่าความถี่ตัด 0.091 mHz แบตเตอรี่มีอายุการใช้งาน 1.469 ปี และมีการติดตั้งใหม่จำนวน 13 ครั้ง สันเกตว่าอายุมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและจำนวนครั้งการติดตั้งใหม่มีค่าเท่าเดิมหลังจากค่าความถี่ลดลงต่ำกว่า 0.1 mHz



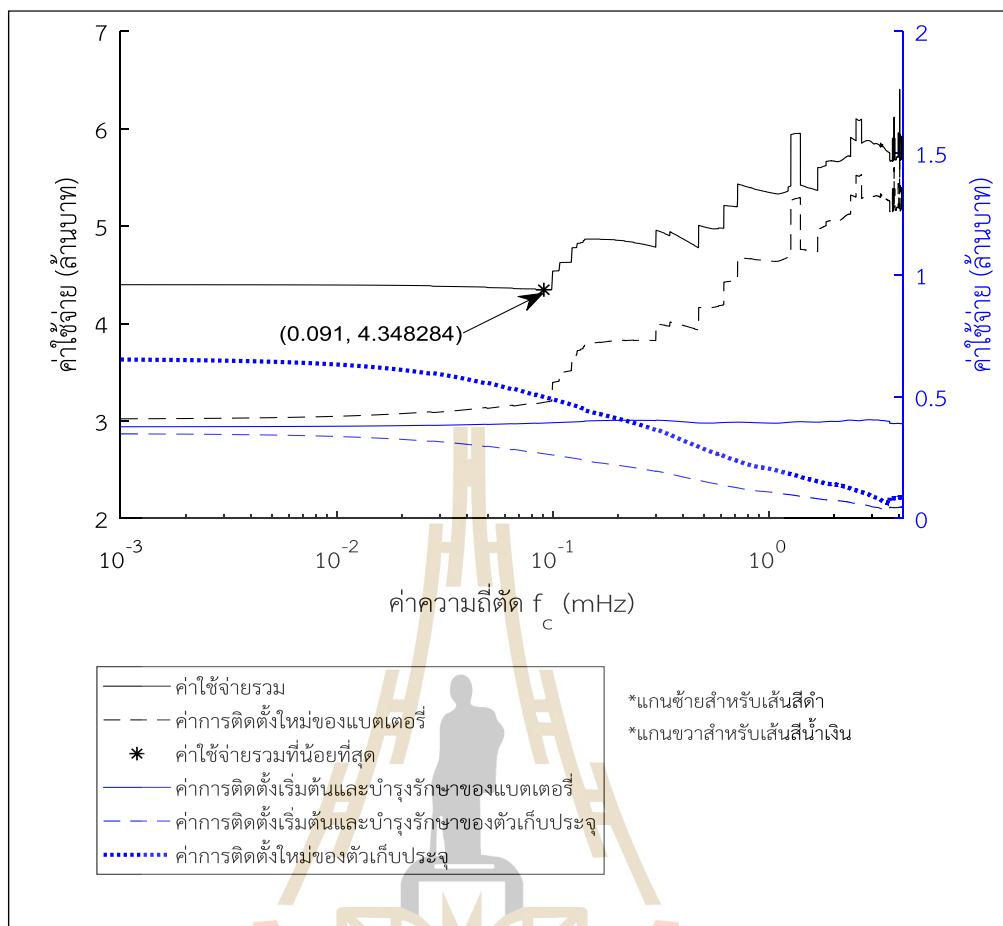
รูปที่ 4.16 ผลของค่าความถี่ตัดต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่



รูปที่ 4.17 ผลของค่าความถี่ตัดต่อจำนวนการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่

4.3.2 ผลของค่าความถี่ตัดต่อค่าใช้จ่ายรวม

เมื่อทราบขนาดติดตั้งและอายุการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อปรับค่าความถี่ตัดเพิ่มขึ้นจาก 0.001 mHz ถึง 4.16 mHz แบตเตอรี่มีค่าติดตั้งเริ่มต้นและทำงานประมาณ 376,546 ถึง 389,690 บาท ซึ่งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากเนื่องจากขนาดติดตั้งมีค่าเกือบเท่าเดิม ส่วนค่าติดตั้งใหม่มีค่าประมาณ 3,022,998 ถึง 5,169,323 บาท ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่ตัดมีค่าน้อยลง สังเกตว่าที่ความถี่สูงกว่า 0.1 mHz ค่าติดตั้งใหม่มีความผันผวนมากจากอายุการใช้งานที่ต่ำและจำนวนการติดตั้งใหม่หลายครั้ง โดยค่าติดตั้งใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความถี่ต่ำกว่า 0.1 mHz เนื่องจากการลดค่าความถี่ต่ำกว่านี้เป็นการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ถึงแม้ว่ามีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่จำนวนครั้งการติดตั้งใหม่ยังคงเท่าเดิม ส่วนตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีค่าติดตั้งเริ่มต้นและทำงานเท่ากับ 347,480 ถึง 46,729 บาท และค่าการติดตั้งใหม่ 652,683 ถึง 87,773 บาท จากข้อมูลอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีค่าเท่ากับ 5 ปี ตามอายุการใช้งานแบบปีปฏิทินดังนั้นจะมีการติดตั้งใหม่ 3 ครั้ง (ปีที่ 5 10 และ 15) ดังนั้นค่าใช้จ่ายของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงแปรผันตามขนาดที่ติดตั้งหรือสูงขึ้นเมื่อความถี่ตัดมีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดพบว่าที่ค่าความถี่ตัด 0.091 mHz ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมน้อยที่สุดคือ 4,348,284 บาท



รูปที่ 4.18 ผลของค่าความถี่ตัดต่อค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม

สามารถสรุปค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองผลและการคำนวณที่ค่าความถี่ตัดต่างกัน ได้ตามตารางที่ 4.3 เป็นการยืนยันว่าค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.091 mHz ทำให้ได้ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เท่ากับ 15.30 kW/33.42 kWh และของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเท่ากับ 6.60 kW/3.49 kWh เท่ากับค่าที่ได้จากวิธีแบบฝูงอนุภาคที่ทำให้ค่าใช้จ่ายของระบบน้อยที่สุดเท่ากับ 4,348,284 บาท ในระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมในกรณีที่ 2 นี้

ตารางที่ 4.3 ผลของค่าความถี่ตัดต่อค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม

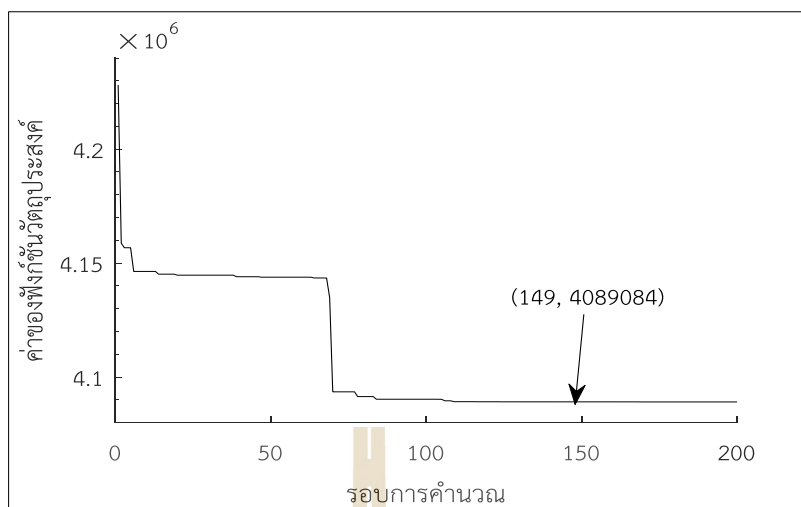
f_c (mHz)	$E_{B,Orated}$ (kWh)	อายุการใช้ งาน แบตเตอรี่ (ปี)	จำนวนการ เปลี่ยน แบตเตอรี่ (ครั้ง)	ค่าติดตั้ง เริ่มต้น+ค่า บำรุงรักษา (บาท)	ค่าติดตั้ง ใหม่ (บาท)	ค่าใช้จ่าย รวม (บาท)
-	50.37	0.9524	20	399,450	5,076,050	5,475,500
1	50.66	1.0435	19	500,570	4,847,143	5,347,713
0.5	50.88	1.1517	17	543,802	4,450,187	4,993,989
0.091	50.89	1.4690	13	657,486	3,690,798	4,348,284
0.07	50.87	1.4768	13	669,263	3,689,152	4,358,415
0.05	50.85	1.4859	13	682,670	3,687,400	4,370,070
0.01	50.84	1.5097	13	715,351	3,681,224	4,396,575
0.001	50.86	1.5190	13	724,026	3,675,682	4,399,708

หมายเหตุ : ค่าใช้จ่ายทั้งหมดมาจากการใช้ระบบแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดรวมกัน

4.4 กรณีที่ 3 ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมกับค่าความถี่และการปรับขนาด

กรณีนี้เป็นการพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมเช่นเดียวกันกับกรณีที่ 2 โดยต่างจากกรณีที่ 2 คือ คัดผลของการปรับขนาดแบตเตอรี่ด้วยตัวปรับขนาดตามแนวคิดที่ว่าขนาดที่ใหญ่ขึ้นจะสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้ดังผลที่แสดงไว้แล้วในกรณีที่ 1 ดังนั้นปัญหาในกรณีนี้คือการหาทั้งค่าความถี่ตัดและตัวปรับขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมพร้อมกัน จากการหาคำตอบด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาค พบว่าค่าใช้จ่ายรวมของระบบกักเก็บพลังงานที่ต่ำที่สุดคือ 4,089,084 บาท แสดงด้วยกราฟการลู่เข้าหาคำตอบของวิธีแบบฝูงอนุภาคในรอบที่ 149 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.19

จากการหาคำตอบด้วยวิธีแบบฝูงอนุภาคทำให้ได้ค่าความถี่ตัดและตัวปรับขนาดที่เหมาะสมคือ 0.0879 mHz และ 2.4968 ตามลำดับ ดังนั้นขนาดแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่เหมาะสมคือ 15.25 kW/83.44 kWh และ 6.64 kW/3.52 kWh ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าความเหมาะสมที่ได้ จากกรณีศึกษาสามารถแสดงการวิเคราะห์ผลของค่าความถี่ตัดและตัวปรับขนาดแบตเตอรี่ที่ค่าต่าง ๆ ต่ออายุการใช้งานและค่าใช้จ่ายรวมของระบบเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เหมาะสม แสดงผลได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.19 การลู่เข้าหาค่าตอบของกรณีที่ 3 ด้วยวิธีแบบฟูงอนูภาค

4.4.1 ผลของค่าความถี่ตัดและตัวปรับขนาดต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่

ในการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม ขนาดของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้นอยู่กับค่าความถี่ตัดมีค่าเท่ากับกรณีที่ 2 ในตารางที่ 4.2 เพียงแต่ในกรณีนี้มีการปรับขนาดพิกัดแบตเตอรี่ด้วยตัวปรับขนาดแบบกรณีที่ 1 (ไม่ได้กำหนดเป็นค่าคงที่เหมือนกรณีที่ 2) จึงมีเพียงค่าพิกัดพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ต่างจากกรณีที่ 2 คือ ค่าพิกัดพลังงานไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่ถูกปรับขนาด ($E_{B,Orated}$)

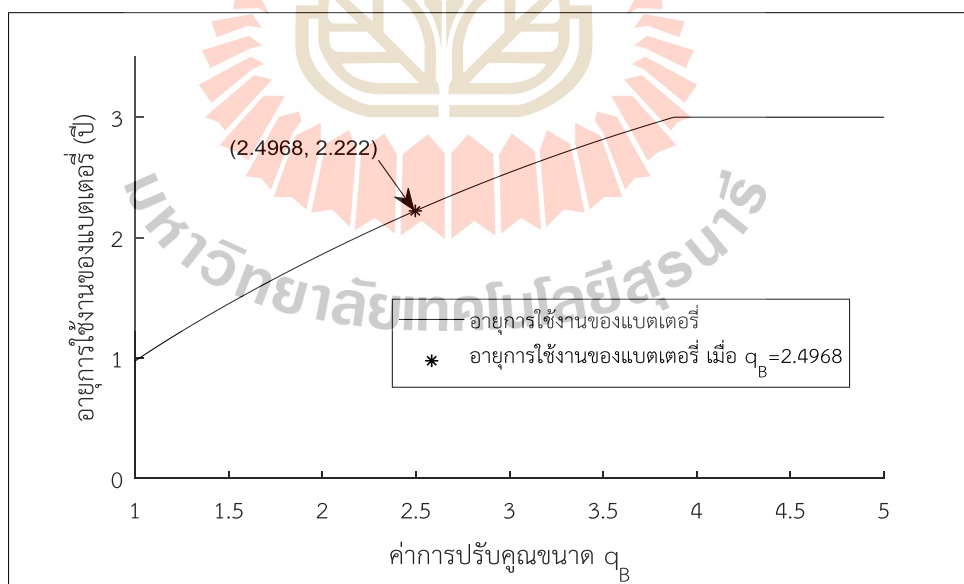
เนื่องจากมี 2 ตัวแปรที่พิจารณา ซึ่งผลของแต่ละตัวแปรได้แยกวิเคราะห์และแสดงผลไว้แล้วในกรณีที่ 1 และ 2 กล่าวคือเมื่อประเมินอายุการใช้งานด้วยวิธีแบบฝนตก พบว่าผลของตัวปรับขนาดทำให้จำนวนรอบการใช้งานที่ระดับความลึกของการปล่อยประจุค่าสูง ๆ ของแบตเตอรี่มีค่าน้อยลงเมื่อแบตเตอรี่มีขนาดใหญ่ขึ้นดังวิเคราะห์ไว้ในกรณีที่ 1 และในการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม การใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำให้จำนวนรอบการใช้งานที่ระดับความลึกการปล่อยประจุค่าต่ำ ๆ ของแบตเตอรี่มีค่าน้อยลงเมื่อความถี่ตัดของวงจรรองความถี่มีค่าน้อยลงตามที่วิเคราะห์ไว้ในกรณีที่ 2 ซึ่งทั้งสองพารามิเตอร์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ ในกรณีนี้จึงแสดงเฉพาะผลที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากวิธีแบบฟูงอนูภาคเท่านั้น

โดยผลของตัวปรับขนาดต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่และจำนวนการติดตั้งใหม่เมื่อให้ค่าความถี่ตัดเท่ากับค่าเหมาะสม (0.0879 mHz) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 ตามลำดับ พบว่าเมื่อปรับตัวปรับขนาดตั้งแต่ 1.0 ถึง 5.0 แบตเตอรี่มีอายุการใช้งาน 0.9757 ปี ถึง 3.0 ปี

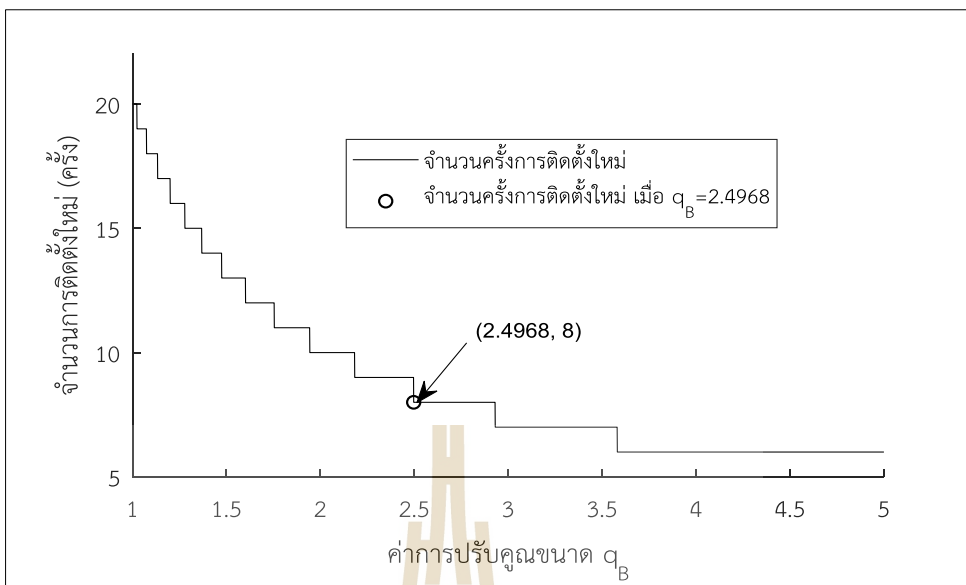
และติดตั้งใหม่ 20 ถึง 6 ครั้ง สังกะตุที่ค่าตัวปรับขนาดมากกว่า 3.8 ขึ้นไปได้อายุแบตเตอรี่มีค่าคงที่คือ 3.0 ปี และติดตั้งใหม่ 6 ครั้ง เพราะอายุที่ได้จากการประเมินมีค่ามากกว่าอายุแบบปีปฏิทิน ดังนั้น อายุสูงสุดที่ได้คือ 3.0 ปีเท่านั้น หมายความว่า การปรับขนาดให้ใหญ่จนเกินไปไม่ได้เพิ่มอายุแบตเตอรี่ และยังเพิ่มค่าใช้จ่ายมากขึ้นอีกด้วย กรณีนี้แสดงให้เห็นผลของตัวปรับขนาดที่สามารถยืดอายุแบตเตอรี่ได้ดีกว่ากรณีที่ 1 เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.5 เนื่องจากมีการปรับความราบเรียบด้วยวงจรกรองความถี่ร่วมด้วย

ต่อมาเป็นผลของความถี่ตัดต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่เมื่อให้ตัวปรับขนาดมีค่าเท่ากับค่าเหมาะสม (2.4968) ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ตามลำดับ พบว่าเมื่อปรับความถี่ตัดตั้งแต่ 4.16 mHz ลดลงถึง 0.001 mHz แบตเตอรี่มีอายุเพิ่มขึ้นจาก 1.2528 ถึง 2.2832 ปี และติดตั้งใหม่ 16 ถึง 8 ครั้ง กราฟจะมีแนวโน้มเดียวกันกับกรณีที่ 2 ในรูปที่ 4.16 แต่กรณีนี้มีประสิทธิภาพในการยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่ดีกว่าและสามารถลดจำนวนครั้งการติดตั้งใหม่ได้มากกว่า เนื่องจากมีการคิดผลของค่าตัวปรับขนาดร่วมด้วย

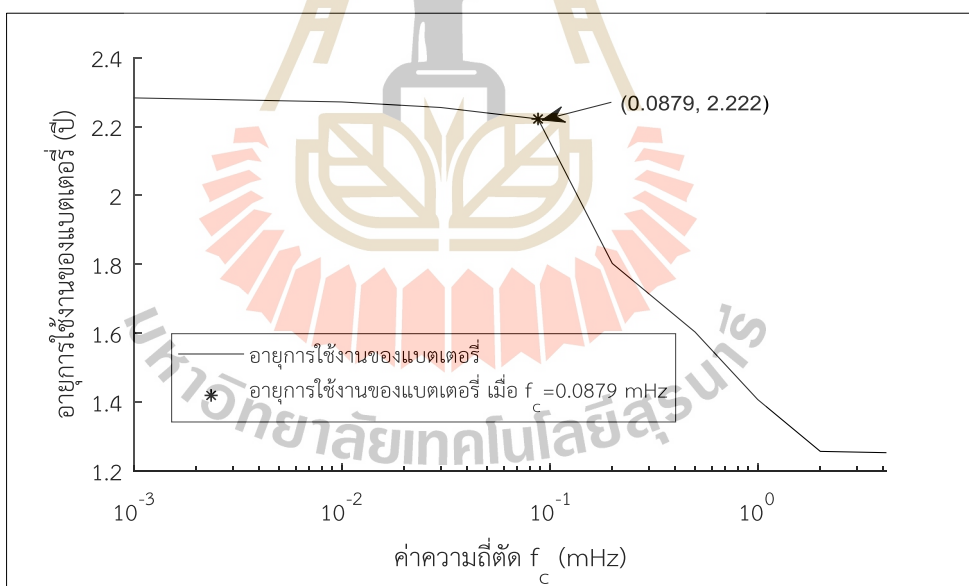
จากผลการจำลองพบว่าที่ค่าตัวปรับขนาดเท่ากับ 2.4968 และความถี่ตัดเท่ากับ 0.0879 mHz ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานเท่ากับ 2.222 ปี และติดตั้งใหม่ 8 ครั้ง ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าการคำนวณมีความถูกต้อง



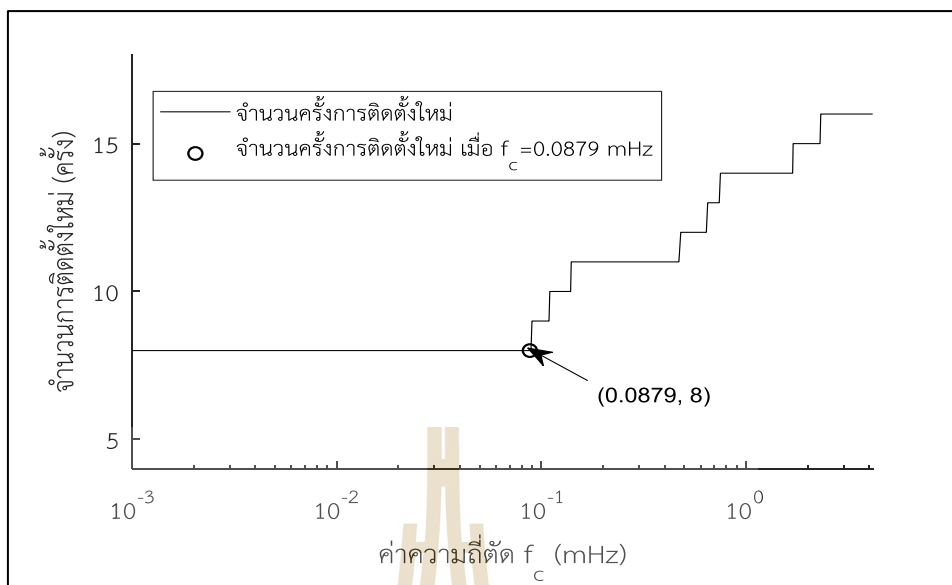
รูปที่ 4.20 ตัวปรับขนาดกับอายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่ค่าความถี่ตัดเหมาะสม



รูปที่ 4.21 ตัวปรับขนาดกับจำนวนการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่ที่ค่าความถี่ที่เหมาะสม



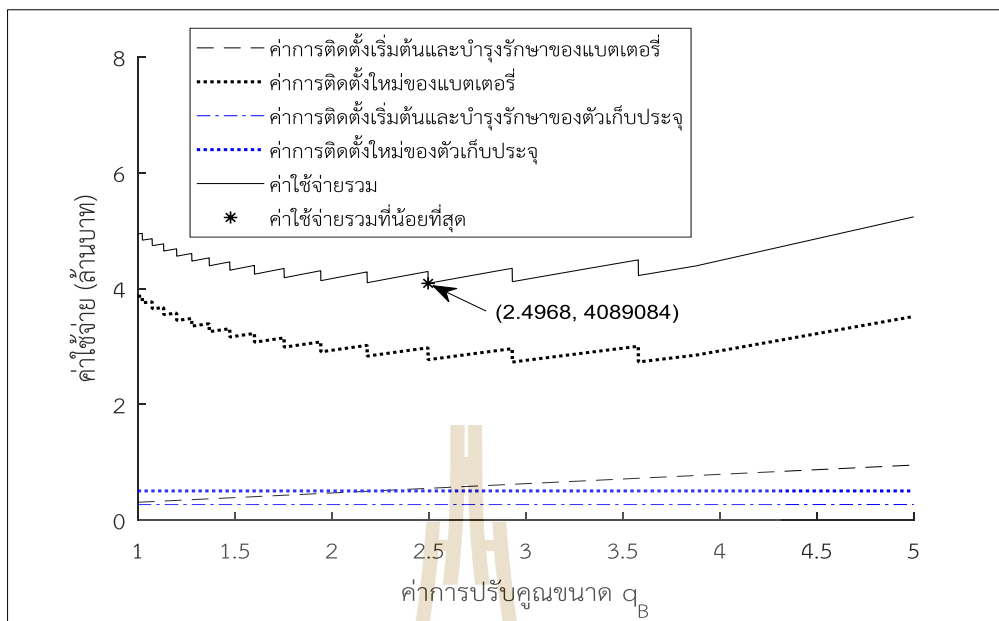
รูปที่ 4.22 ความถี่ตัดกับอายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่ตัวปรับขนาดเหมาะสม



รูปที่ 4.23 ความถี่ตัดกับจำนวนการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่ที่ตัวปรับคุณสมบัติเหมาะสม

4.4.2 ผลของค่าความถี่ตัดและตัวปรับคุณสมบัติต่อค่าใช้จ่ายรวมของระบบ

เมื่อทราบขนาดติดตั้งและอายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่พารามิเตอร์ใด ๆ แล้ว ต่อมา คำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบก็เก็บพลังงานแบบผสม เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากวิธีแบบผู่อนุภาค โดยแสดงผลของตัวปรับคุณสมบัติต่อค่าใช้จ่ายรวมเมื่อให้ค่าความถี่ตัดเท่ากับค่าเหมาะสม (0.0879 mHz) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อปรับค่าตัวปรับคุณสมบัติตั้งแต่ 1.0 ถึง 5.0 ทำให้แบตเตอรี่มีค่าติดตั้งเริ่มต้นและทำงานประมาณ 307,230 ถึง 950,245 บาท เพิ่มขึ้นตามขนาดติดตั้งที่ใหญ่ขึ้น ส่วนค่าติดตั้งใหม่มีค่าประมาณ 3,865,254 ถึง 3,517,367 บาท มีค่าลดลงเมื่อปรับขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 จะเห็นว่าในกรณีนี้สามารถลดค่าติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่ลงได้มากเนื่องจากอายุแบตเตอรี่ที่ยาวนานกว่า โดยมีค่าใช้จ่ายของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพิ่มเข้ามาคือ ค่าติดตั้งเริ่มต้นและทำงาน 267,876 บาท และค่าติดตั้งใหม่ 503,161 บาทซึ่งเป็นค่าคงที่เนื่องจากการกำหนดให้ค่าความถี่ตัดคงที่ในกรณีนี้

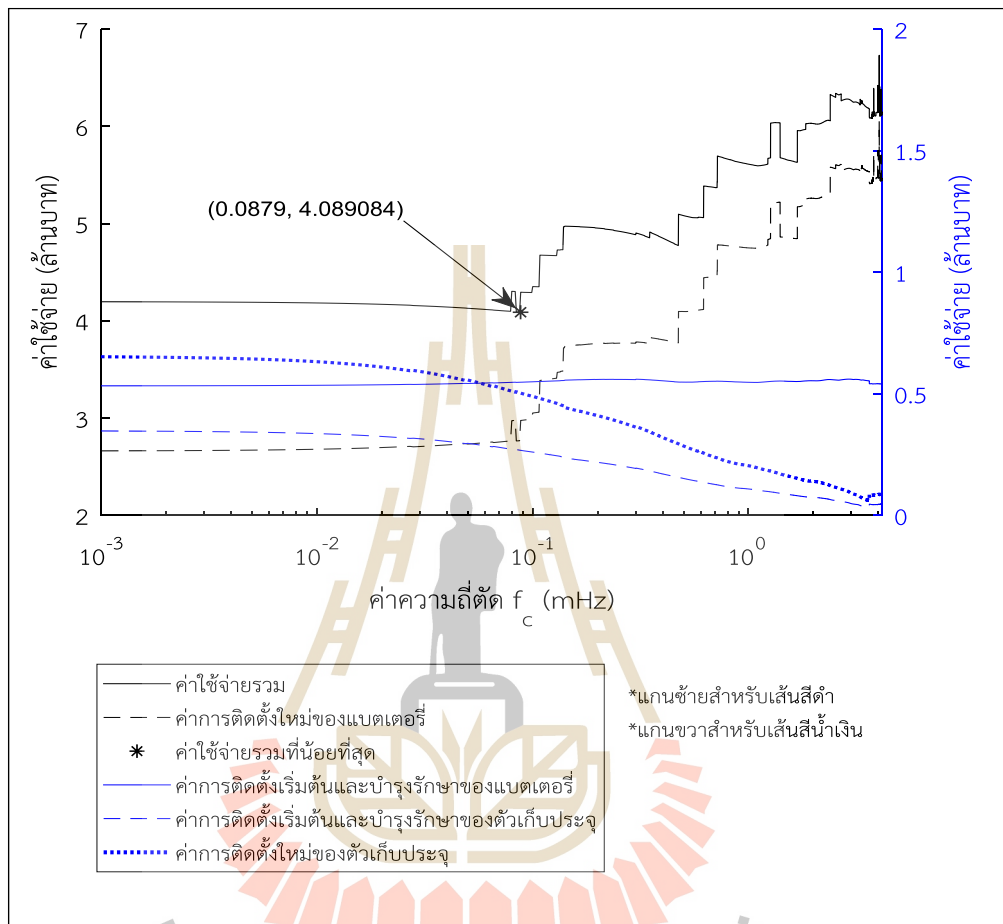


รูปที่ 4.24 ตัวปรับคุณภาพต่อค่าใช้จ่ายรวมเมื่อให้ค่าความถี่ตัดเท่ากับค่าเหมาะสม

ส่วนผลของความถี่ตัดต่อค่าใช้จ่ายรวมเมื่อให้ตัวปรับคุณภาพมีค่าเท่ากับค่าเหมาะสม (2.4968) ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่อปรับความถี่ตัดตั้งแต่ 4.16 mHz ลดลงถึง 0.001 mHz ทำให้แบตเตอรี่มีค่าติดตั้งเริ่มต้นและทำงานประมาณ 541,640 บาท ถึง 533,041 บาท ซึ่งเกือบคงที่เนื่องจากในกรณีนี้ค่าปรับถูกกำหนดให้คงที่ ส่วนค่าติดตั้งใหม่มีค่าประมาณ 5,471,707 บาท ถึง 2,663,893 บาท มีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับกรณีที่ 2 พบว่ากรณีนี้สามารถลดค่าติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่ได้มากกว่าเนื่องจากแบตเตอรี่มีอายุยาวนานกว่าเนื่องจากการปรับคุณภาพด้วยตัวปรับที่เหมาะสมด้วย ถึงแม้จะมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเริ่มต้นมากกว่า โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีค่าติดตั้งเริ่มต้นและทำงานประมาณ 46,714 บาท ถึง 347,480 บาท และค่าติดตั้งใหม่ 87,743 บาท ถึง 652,683 บาท โดยมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าความถี่ตัดน้อยลง สังเกตว่าค่าใช้จ่ายของตัวเก็บประจุมีค่าเกือบเท่ากับกรณีที่ 2 เนื่องจากค่าความถี่ตัดใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 พบว่าที่ค่าตัวปรับเท่ากับ 2.4968 และความถี่ตัดเท่ากับ 0.089 mHz ทำให้มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด 4,089,084 บาท ดังนั้นสามารถสรุปค่าที่ได้จากการจำลองผลและการคำนวณผลของตัวปรับคุณภาพที่ค่าตัวอย่างเมื่อให้ค่าความถี่ตัดเท่ากับค่าเหมาะสมได้ตามตารางที่ 4.4 และผลของความถี่ตัดที่ค่าตัวอย่างเมื่อให้ตัวปรับคุณภาพมีค่าเท่ากับค่าเหมาะสมได้ตารางที่ 4.5 ซึ่งพิสูจน์ว่าค่าตัวปรับคุณภาพและค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมที่สุดคือ 2.4968 และ 0.091 mHz ทำให้ได้ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของแบตเตอรี่คือ 15.25 kW/83.44 kWh

และของตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือ 6.64 kW/3.52 kWh ซึ่งตรงกันกับค่าที่ได้จากวิธีแบบฟูงอนูภาคที่ทำให้ค่าใช้จ่ายของระบบน้อยที่สุดในระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมในกรณีนี้ 3 นี้



รูปที่ 4.25 ความถี่ตัดกับค่าใช้จ่ายรวมเมื่อให้ตัวปรับขนาดมีค่าเท่ากับค่าเหมาะสม

ตารางที่ 4.4 ผลของค่าตัวปรับขนาดแบตเตอรี่เมื่อให้ค่าความถี่ตัดเท่ากับค่าที่เหมาะสม

q_B	$E_{B,Orated}$ (kWh)	อายุ แบตเตอรี่ (ปี)	จำนวนการ เปลี่ยน แบตเตอรี่ (ครั้ง)	ค่าติดตั้ง เริ่มต้น+ค่า บำรุงรักษา (บาท)	ค่าติดตั้งใหม่ (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวม (บาท)
1.0	33.42	0.9757	20	575,106	4,368,416	4,943,522
1.5	50.13	1.4509	13	655,483	3,677,859	4,333,342
2.0	66.84	1.8620	10	735,860	3,436,030	4,171,890
2.2	73.52	2.0126	9	768,011	3,343,248	4,111,259
2.4968	83.44	2.2220	8	815,722	3,273,362	4,089,084
3.0	100.20	2.5414	7	896,614	3,262,110	4,158,724
4.0	133.68	3.0	6	1,057,368	3,425,683	4,483,051
5.0	167.10	3.0	6	1,218,121	4,020,529	5,238,650

หมายเหตุ : ค่าใช้จ่ายทั้งหมดมาจากการใช้ระบบแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดรวมกัน

ตารางที่ 4.5 ผลของค่าความถี่ตัดเมื่อให้ตัวปรับเท่ากับค่าที่เหมาะสม

f_c (mHz)	$E_{B,Orated}$ (kWh)	อายุ แบตเตอรี่ (ปี)	จำนวนการ เปลี่ยน แบตเตอรี่ (ครั้ง)	ค่าติดตั้ง เริ่มต้น+ค่า บำรุงรักษา (บาท)	ค่าติดตั้ง ใหม่ (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวม (บาท)
-	82.59	1.2528	15	554,421	5,271,697	5,826,118
1	83.07	1.4073	14	656,450	4,955,221	5,611,671
0.5	83.43	1.6032	12	700,356	4,382,370	5,082,726
0.2	83.32	1.8024	11	777,814	4,176,494	4,954,308
0.0879	83.44	2.2220	8	815,722	3,273,362	4,089,084
0.03	83.36	2.2553	8	854,459	3,301,109	4,155,568
0.01	83.37	2.2715	8	871,788	3,312,861	4,184,649
0.001	83.40	2.2832	8	880,521	3,316,577	4,197,098

หมายเหตุ : ค่าใช้จ่ายทั้งหมดมาจากการใช้ระบบแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดรวมกัน

4.5 การอภิปรายและเปรียบเทียบผล

จากผลการจำลองที่ได้จากทั้ง 3 กรณี ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมและค่าใช้จ่ายรวมที่ต่ำที่สุดของระบบกักเก็บพลังงานในแต่ละแต่ละกรณี สามารถสรุปผลไว้ในตารางที่ 4.6 พบว่าในกรณีฐานที่ติดตั้งแบตเตอรี่ขนาดอย่างต่ำ 16.37 kW/33.08 kWh มีค่าใช้จ่ายรวม 5,917,008 บาท โดยหากพิจารณาการปรับขนาดพิกัดพลังงานแบตเตอรี่ให้มีขนาดที่เหมาะสมตามผลที่ได้ของกรณีที่ 1 ด้วยขนาด 16.37 kW/50.37 kWh ซึ่งมีค่าใช้จ่าย 5,475,500 บาท สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ 7.46% และหากมีการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมในกรณีที่ 2 และ 3 มีค่าใช้จ่าย 4,348,256 และ 4,089,084 บาท สามารถลดได้ถึง 26.51% และ 30.89% ตามลำดับ

หากเปรียบเทียบในแต่ละกรณี เมื่อพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมในกรณีที่ 2 มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่ากรณีที่ 1 ถึง 20.59% $((5,475,500 - 4,348,284) / 5,475,500 \times 100\%)$ ในกรณีที่ 2 สังเกตว่าขนาดแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและเมื่อรวมกับขนาดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแล้วจะมีขนาดของระบบกักเก็บพลังงานโดยรวมมากกว่ากรณีที่ 1 เนื่องจากมีการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเข้ามาปรับความราบเรียบกำลังไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ ทำให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่ยาวนานขึ้น เมื่อพิจารณากรณีที่ 3 มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่ากรณีที่ 2 ถึง 6% $((4,348,284 - 4,089,084) / 4,348,284 \times 100\%)$ ซึ่งเกิดจากการที่กรณีที่ 2 พิจารณาค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมเพียงตัวแปรเดียว ซึ่งกรณีที่ 3 พิจารณาทั้งค่าความถี่ตัดและตัวปรับคุณขนาดแบตเตอรี่จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดเนื่องจากยืดอายุแบตเตอรี่ได้ดีที่สุด แสดงให้เห็นถึงวิธีการจัดการพลังงานของกรณีที่ 3 มีประสิทธิภาพมากที่สุด

หากเปรียบเทียบเป็นระบบ ระหว่างค่าใช้จ่ายรวมของระบบที่ใช้เฉพาะแบตเตอรี่และระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม จะเห็นว่าระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ติดตั้งขนาดแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่เหมาะสมที่สุด (กรณีที่ 3) เมื่อเทียบกับระบบกักเก็บพลังงานที่ใช้เฉพาะแบตเตอรี่ที่ติดตั้งขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุดแล้วเหมือนกัน (กรณีที่ 1) ถึงแม้ว่าขนาดติดตั้งโดยรวมของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมมีขนาดใหญ่กว่า แต่ระบบแบบผสมมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าถึง 25.32% $((5,475,500 - 4,089,084) / 5,475,500 \times 100\%)$

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบพารามิเตอร์และค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานของทั้ง 3 กรณี

พารามิเตอร์ \ กรณี	กรณีฐาน (ระบบแบตเตอรี่ ขนาดอย่างต่ำ)	กรณี 1 แบตเตอรี่	กรณี 2 แบบผสม	กรณี 3 แบบผสม
q_B	1	1.5228	1.5228	2.4968
f_c (mHz)	-	-	0.0910	0.0879
ขนาดแบตเตอรี่ (kW/kWh)	16.37/33.08	16.37/50.37	15.30/50.89	15.25/83.44
ขนาดตัวเก็บประจุ (kW/kWh)	-	-	6.60/3.49	6.64/3.52
NPV ค่าใช้จ่ายรวม (บาท)	5,917,008	5,475,500	4,348,284	4,089,084
การเปลี่ยนแปลง (%)	-	-7.46%	-26.51%	-30.89%

หมายเหตุ : ค่าการเปลี่ยนแปลง (%) คือค่าใช้จ่ายรวมเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายของกรณีฐาน

4.6 สรุป

จากผลการจำลองวิธีการวิจัยและการวิเคราะห์ผลด้วยไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวตัวอย่างในบทนี้ แสดงให้เห็นถึงผลของพารามิเตอร์ที่พิจารณาในงานวิจัยคือ ค่าตัวปรับขนาดแบตเตอรี่และค่าความถี่ตัดของวงจรรองความถี่ต่ำ ซึ่งใช้ในการจัดการพลังงานของระบบกักเก็บพลังงาน และมีผลต่อขนาดติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงาน อายุการใช้งานและส่งผลต่อค่าใช้จ่ายรวมของระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งสามารถนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบวิธีฝูงอนุภาคมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว เพื่อตรวจสอบความถูกต้องได้แสดงผลการคำนวณและวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบเทียบทั้งระบบที่ติดตั้งเฉพาะแบตเตอรี่ในกรณีที่ 1 และระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมในกรณีที่ 2 และ 3 ซึ่งขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานที่มาจากค่าตัวปรับขนาดและค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมจะทำให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดในแต่ละกรณี โดยพบว่าขนาดแบตเตอรี่ที่ใหญ่ขึ้นมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น และการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดในการปรับความราบเรียบของกำลังไฟฟ้าให้แบตเตอรี่สามารถยืดอายุแบตเตอรี่ได้ เมื่อเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างระบบที่ใช้เฉพาะแบตเตอรี่กับแบบผสม พบว่าระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมทำให้ระบบประหยัดค่าใช้จ่ายโดยรวมของระบบกักเก็บพลังงานถึง 25.32% ดังนั้นจึงสรุป

ได้ว่าระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมเป็นทางเลือกที่ดีในการจัดการและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายของระบบได้ อย่างไรก็ตาม ในการจัดการพลังงานของระบบต้องมีการพิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและขนาดติดตั้งให้เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพในการลดค่าใช้จ่ายให้มากที่สุด



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอกลยุทธ์การจัดการพลังงานและแสดงรายละเอียดการจำลองในการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยมีค่าใช้จ่ายในการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งประกอบไปด้วยค่าติดตั้งเริ่มต้น ค่าการทำงานบำรุงรักษาและค่าติดตั้งใหม่ตลอดอายุโครงการ การหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานที่มีค่าใช้จ่ายในการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานที่น้อยที่สุดในแต่ละกรณีได้ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค PSO เพื่อช่วยในการหาคำตอบอย่างรวดเร็ว โดยมีการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอด้วยการแสดงผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและการหาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดตัวอย่าง กลยุทธ์การจัดการพลังงานของกรณีศึกษาที่นำเสนอแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้ผลการจำลองดังนี้ กรณีที่ 1 เป็นการหาขนาดติดตั้งสำหรับระบบที่ใช้เฉพาะแบตเตอรี่ จากการประเมินอายุด้วยวิธีการนับแบบฝนตก พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดแบตเตอรี่ให้ใหญ่ขึ้นด้วยการปรับคุณสมบัติทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นเนื่องจากสามารถลดจำนวนรอบการใช้งานที่ค่าระดับความลึกการปล่อยประจุสูงได้ โดยขนาดที่เหมาะสมคือ 16.37 kW/50.37 kWh ทำให้กรณีนี้มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดคือ 5,475,500 บาท ส่วนกรณีที่ 2 หาขนาดติดตั้งสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำจัดสรรกำลังไฟฟ้าที่ราบเรียบให้กับแบตเตอรี่และที่มีความถี่สูงให้กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในกรณีนี้ได้ค่าความถี่ตัดเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องพิจารณาเนื่องจากส่งผลต่อขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด พบว่าเมื่อปรับค่าความถี่ตัดลดลงทำให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถลดจำนวนรอบการใช้งานที่ค่าระดับความลึกการปล่อยประจุต่ำได้จากกำลังไฟฟ้าทำงานของแบตเตอรี่ที่ราบเรียบขึ้น แต่ขนาดติดตั้งของตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมทำให้มีค่าใช้จ่ายค่าต่ำที่สุดคือ 4,348,284 บาท ทำให้ได้ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือ 15.3 kW/50.89 kWh และ 6.6 kW/3.49 kWh ตามลำดับ และในกรณีที่ 3 หาขนาดติดตั้งสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำและมีการปรับคุณสมบัติแบตเตอรี่ร่วมกัน ขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่และ

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงขึ้นกับพารามิเตอร์สองตัว ทำให้สามารถยืดอายุแบตเตอรี่ได้ดีกว่าสองกรณีแรก โดยที่ค่าการปรับจูนและความถี่ตัดที่เหมาะสมทำให้ระบบมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดคือ 4,089,084 บาท ทำให้ได้ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือ 15.25 kW/83.44 kWh และ 6.64 kW/3.52 kWh ตามลำดับ

จากผลที่ได้พบว่าวิธีการจัดการพลังงานในกรณีที่ 3 มีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการยืดอายุแบตเตอรี่ได้ดีที่สุดและมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่ากรณีที่ 1 และ 2 ถึงแม้ว่าจะมีขนาดติดตั้งโดยรวมใหญ่ที่สุด และพบว่าระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมเมื่อมีการติดตั้งด้วยขนาดที่เหมาะสม (กรณีที่ 3) สามารถลดค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานลงได้ถึง 25.32% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้เฉพาะแบตเตอรี่ (กรณีที่ 1) จึงสรุปได้ว่าการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมเป็นตัวเลือกที่ดีกว่าการใช้ระบบแบตเตอรี่อย่างเดียว โดยในการออกแบบหาขนาดติดตั้งต้องพิจารณาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งตัวปรับจูนขนาดแบตเตอรี่และค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่เนื่องจากค่าที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ระบบมีค่าใช้จ่ายที่มากขึ้นได้

อย่างไรก็ตาม ขนาดติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ได้จากการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ร่วมกับการพิจารณาอายุการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานเท่านั้น ในบางกรณีขนาดติดตั้งอาจจะต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ระยะเวลาที่ต้องการสำรองพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้งานหรือการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้านต่าง ๆ โดยยังสามารถนำวิธีการของงานวิจัยไปประยุกต์ใช้เพื่อช่วยวิเคราะห์ในการประเมินและวางแผนจัดการงบประมาณของโครงการได้เช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการออกแบบระบบไมโครกริดและการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานในงานวิจัยพิจารณาจากค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นตลอดโครงการ ซึ่งในงานต่อไปอาจจะต้องพิจารณาด้านประสิทธิภาพและความเหมาะสมด้านการปรับปรุงความน่าเชื่อถือด้านอื่น ๆ ด้วย ทำให้ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมอาจจะมีค่าเปลี่ยนไป

5.2.2 ในส่วนของวิธีการประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีการนับแบบฝนตกนั้นพิจารณาเฉพาะค่าระดับความลึกการปล่อยประจุที่ส่งผลต่อจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ ดังนั้นควรมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการประเมินอายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่พิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย และควรมีการพัฒนาวิธีการประเมินอายุตัวเก็บประจุยิ่งยวด เพื่อความถูกต้องแม่นยำในการประเมินผลมากยิ่งขึ้น

5.2.3 อาจมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการควบคุมและจัดสรรพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมแบบอื่น ๆ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม



รายการอ้างอิง

- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2017). โครงการ Smart Grid แม่ฮ่องสอน ต้นแบบการบูรณาการพลังงาน Energy 4.0. [ออนไลน์]. ได้จาก: https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=1991:art-20170526&catid=49&Itemid=251
- ชานนท์ ธรรมศร. (2557). การวางแผนการเดินทางเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในไมโครกริดที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน พลังงานความร้อนร่วมและระบบกักเก็บพลังงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชนเดช ไพรรุณ, คมสันต์ หงษ์สมบัติ และศวีร์ วีระกำแหง. (2556). ผลกระทบของอัตราลาดเอียงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนในระบบแบตเตอรี่สำหรับการควบคุมความถี่ในระบบไมโครกริด. วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 86: 79-86.
- ชนัดชัช กุลวรรณิขพงษ์. (2550). เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม. เอกสารประกอบการสอนสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 191-196.
- วรวิศ กอปรสิริพัฒน์. (2014). ตัวเก็บประจุยิ่งยวด. *Temga magazine* 2(21): 75-78.
- Abbassi, A., Dami, M. A., and Jemli, M. (2017). A statistical approach for hybrid energy storage system sizing based on capacity distributions in an autonomous PV/Wind power generation system. *Renewable Energy*. 103: 81-93.
- Akram, U., Khalid, M., and Shafiq, S. (2017). An Innovative Hybrid Wind-Solar and Battery-Supercapacitor Microgrid System—Development and Optimization. *IEEE Access*. 10: 1109.
- Alam, M. J., and Saha, T. K. (2016). Cycle-life degradation assessment of Battery Energy Storage Systems caused by solar PV variability. **2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)**.
- Alam, M. N., (2016). Codes in MATLAB for Particle Swarm Optimization. **ResearchGate**.
- Amzallag, C., Gerey, J.P., Robert, J.L. and Bahuaud, J. (1994). Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis. *International Journal of Fatigue*. 16(4): 287-293.

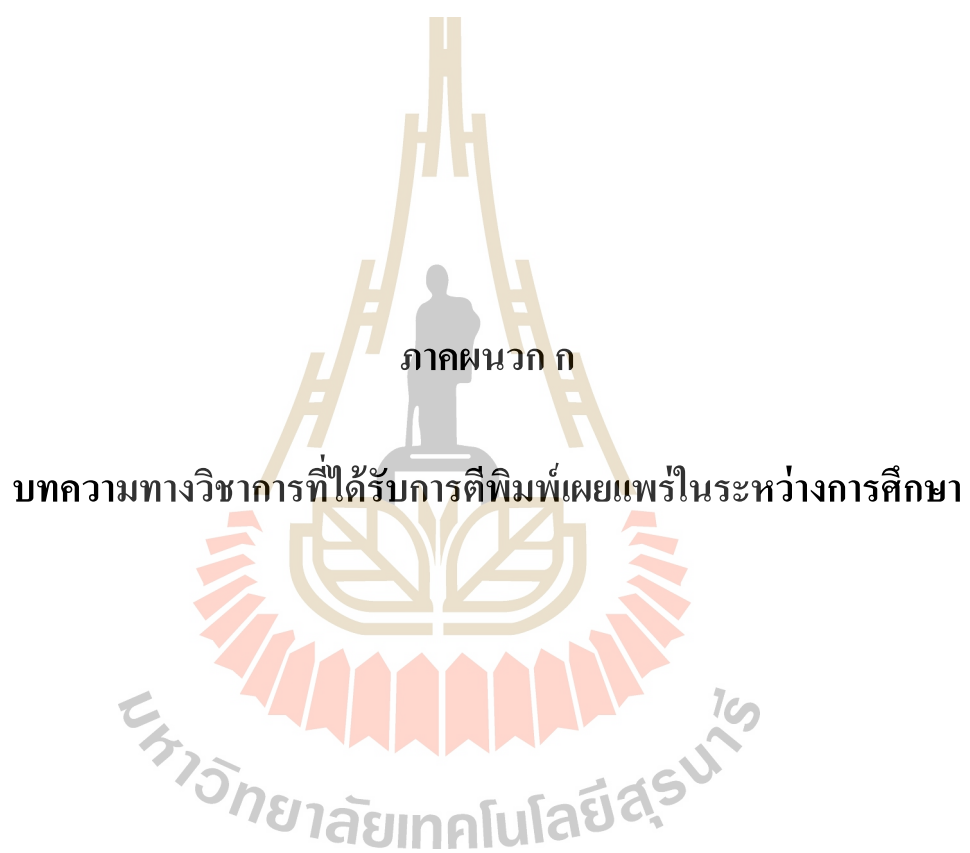
- Bai, L., Li, F., Hu, Q., Cui, H., and Fang, X. (2016). Application of battery-supercapacitor energy storage system for smoothing wind power output: An optimal coordinated control strategy. **2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)**.
- Beltran, H., Barahona, J., Vidal, R., Alfonso, J., Arino, C., and Perez, E. (2016). Ageing of different types of batteries when enabling a PV power plant to enter electricity markets. **IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**.
- Bindner, H., Cronin, T., Lundsager, P., Manwell, J. F., Abdulwahid, U., and Baring-Gould, I. (2005). Lifetime modelling of lead acid batteries. **Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R; No. 1515(EN)**.
- Brane, Z., Ouassaid, M., and Maaroufi, M. (2017). Battery and supercapacitor for photovoltaic energy storage: fuzzy logic management. **IET Renewable Power Generation**. 11(8): 1157-1165.
- Che, L., and Shahidehpour, M. (2014). DC microgrids: Economic operation and enhancement of resilience by hierarchical control. **IEEE Trans. Smart Grid**. 5 (5): 2517–2526.
- Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., and Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. **Progress in Natural Science**. 19(3): 291-312.
- Cordoba-Arenas, A., Onori, S., Guezennec, Y. (2015). Capacity and power fade cycle-life model for plug-in hybrid electric vehicle lithium-ion battery cells containing blended spinel and layered-oxide positive electrodes. **J. Power Sources**. 278: 473-483.
- Dekka, A., Ghaffari, R., Venkatesh, B., and Wu, B. (2015). A survey on energy storage technologies in power systems. **2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)**.
- Dubarry, M., Svoboda, V., Hwu, R. and Liaw, B.Y. (2007). Capacity and power fading mechanism identification from a commercial cell evaluation. **Journal of Power Sources**. 165: 566-572.
- Farhadi, M., Osama, M. (2015). Energy storage systems for high power applications. **IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**.
- Gao, D.W. (2015). **Energy storage for sustainable microgrid**. ELSEVIER book.

- Gee, A. (2012). **Design and Assessment of a Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Remote Area Wind Power Systems**. Ph.D. Dissertation, University of Bath.
- Gevorgian, V., Muljadi, E., Luo, Y., Mohanpurkar, M., Hovsopian, R., and Koritarov, V. (2017). Supercapacitor to provide ancillary services. **2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**.
- Ghiassi-Farrokhfal, Y., Rosenberg, C., Keshav, S., and Adjaho, M.B. (2016). Joint Optimal Design and Operation of Hybrid Energy Storage Systems. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**. 34 (3): 639- 650.
- Gu, Y., Xiang, X., Li, W., and He, X. (2014). Mode-Adaptive Decentralized Control for Renewable DC Microgrid With Enhanced Reliability and Flexibility. **IEEE Trans. Power Electron**. 29 (9): 5072-5080.
- Hatziargyriou, EN. (2013). **Microgrid**. IEEE Wiley book.
- Heeten, T.D., Narayan, N., Diehl, J.C., Verschelling, J., Silvester, S., Popovic-Gerber, J., et al. (2017). Understanding the present and the future electricity needs: consequences for design of future solar home systems for off-grid rural electrification. **2017 International conference on the domestic use of energy (DUE)**. 8-15.
- Hetzer, J., Yu, D.C., and Bhattarai, K. (2008). An economic dispatch model incorporating wind power. **IEEE Trans. Energy Convers**. 23(2): 603-611.
- HOMER Pro 3.11. (2018). **Battery Bank Life**. [On-line]. Available: https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/battery_bank_life.html
- Jing, W., Lai, C.H., Wong, S.H. and Wong, M.L. (2016). Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review. **IET Renewable Power Generation**. 11(4): 461-469.
- Kaiser, C.J. (1995). **The Capacitor Handbook**. Olathe, KS, USA: Commission Junction Pub., 1995. 21–26.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., and Wiese, A. (2007). **Renewable energy technology, Economic and environment**. New york. Springer.
- Kennedy, J., and Eberhart R. (1995). Particle Swarm Optimization. **Proc. IEEE Int. Conf. Neural Network**. 4: 1942-1948.

- Khasawneh, H.J. (2015). **Sizing methodology and life improvement of energy storage system in microgrid**. Ph.D. Dissertation, The Ohio State University. 2015: 30.
- Kim, Y., and Chang, N. (2016). Hybrid Electrical Energy Storage Systems Design. **Design and Management of Energy-Efficient Hybrid Electrical Energy Storage Systems**. 3(1): 12-24.
- Kuperman, A., and Aharon, I. (2011). Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 15 (2): 981–992.
- Layadi, T. M., Champenois, G., Mostefai, M., and Abbas, D. (2015). Lifetime estimation tool of lead–acid batteries for hybrid power sources design. **Simulation Modelling Practice and Theory**. 54: 36-48.
- Li, F., Xie, K., and Yang, J. (2015). Optimization and Analysis of a Hybrid Energy Storage System in a Small-Scale Standalone Microgrid for Remote Area Power Supply (RAPS). **Energies**. 8(6): 4802-4826.
- Li, J., Gee, A. M., Zhang, M., and Yuan, W. (2015). Analysis of battery lifetime extension in a SMES-battery hybrid energy storage system using a novel battery lifetime model. **Energy**. 86: 175-185.
- Liu, C., Wang, X., Wu, X., and Guo, J. (2017). Economic scheduling model of microgrid considering the lifetime of batteries. **IET Generation, Transmission and Distribution**. 11(3): 759-767.
- Liu, H., Ji, Y., Zhuang, H., and Wu, H. (2015). Multi-Objective Dynamic Economic Dispatch of Microgrid Systems Including Vehicle-to-Grid. **Energies**. 8(5): 4476-4495.
- Liu, Y., Du, W., Xiao, L., Wang, H., Bu, S., and Cao, J. (2015). Sizing a Hybrid Energy Storage System for Maintaining Power Balance of an Isolated System with High Penetration of Wind Generation. **IEEE Transactions on Power Systems**. 31(4): 3267-3275.
- Ma, T., Yang, H., and Lu, L. (2015). Development of hybrid battery-supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems. **Applied Energy**. 153: 56-62.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G., Abdulwahid, U., and Wu, K. (2005). Improvements to the Hybrid2 Battery Model. **American Wind Energy Association Windpower 2005 Conference**.

- MathWorks. (2018). **Rainflow counts for fatigue analysis**. [On-line]. Available:
<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/rainflow.html>
- Modern Manufacturing. (2017). **Smart grid** ตอบโจทย์อนาคตการผลิตไฟฟ้าอัจฉริยะ เมื่อผู้ใช้
 พลิกบทบาทเป็นผู้ผลิต. [ออนไลน์]. ได้จาก:
<https://www.mmthailand.com/smart-grid-การผลิตไฟฟ้า/>
- Momoh, J. (2012). **Smart grid: Fundamentals of design and analysis**. Hoboken, NJ: Wiley.
- Mustafa, M. (2017). **Optimal sizing of grid connected microgrid in rural area of Pakisatan
 with wind turbine and energy storage system using particle swarm optimization**.
 M.S. thesis, Southern Illinois University Carbondale.
- Narayan, N., Popovic, J., Diehl, J.C., Silvester, S., Bauer, P., and Zeman, M. (2016). Developing
 for developing nations: exploring an affordable solar home system design. **2016 IEEE
 global humanitarian technology conference (GHTC)**. 474-80.
- Pang, M., Shi, Y., Wang, W., and Yuan, X. (2016). A method for optimal sizing hybrid energy
 storage system for smoothing Fluctuations of Wind Power. **2016 IEEE PES Asia-
 Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)**.
- Pengwei, D., Ning, L. (2015). **Energy storage for smart grid**.
- Sabihuddin, S., Kiprakis, A., and Mueller, M. (2014). A Numerical and Graphical Review of
 Energy Storage Technologies. **Energies**. 8(1): 172-216.
- Santosh, C., Reinaldo T.(2014). Day Ahead Schedule of Remote Microgrids with Renewable
 Energy Sources Considering Battery Lifetime. **2014 11th IEEE/IAS International
 Conference on Industry Applications**. 10: 1109.
- Schaltz, E., Khaligh, A., and Rasmussen, P. (2009). Influence of Battery/Ultracapacitor Energy-
 Storage Sizing on Battery Lifetime in a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle. **IEEE
 Transactions on Vehicular Technology**. 58(8): 3882-3891.
- Schiffer, J., Sauer, D. U., Bindner, H., Cronin, T., Lundsager, P., and Kaiser, R. (2007). Model
 prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable
 energy systems and autonomous power-supply systems. **Journal of Power
 Sources**. 168(1): 66-78.
- Shi, Y., and Eberhart, R. (1998). Parameter Selection in ParticleSwarm Optimization.
Proceedings of the Seventh Annual Conf. on Evolutionary Programming. 591-601.

- Shi, Y., Xu, B., Tan, Y., Kirschen, D., and Zhang, B. (2018). Optimal Battery Control Under Cycle Aging Mechanisms in Pay for Performance Settings. **IEEE Transactions on Automatic Control.**: 1-1.
- Sreenivasan, G. (2011). Solution of Dynamic Economic Load Dispatch (DELD) Problem with Valve Point Loading effects and Ramp rate limits Using PSO. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**. 1(1).
- Verdad, L.S. (2015). **POWERTHRU Lead acid battery workink-lifetime study**. [On-line]. Available: <https://www.scribd.com/document/291108876/The-Truth-About-Batteries-POWERTHRU-White-Paper>
- Victor, M.M., Miguel, A.G., Fermin, B.G. and Maria, M.M. (2017). A Grid Connected Photovoltaic Inverter with Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage. **Sensors** **2017**. 17(1856).
- Wang, H., Wang, T., Xie, X., Ling, Z., Gao, G., and Dong, X. (2018). Optimal Capacity Configuration of a Hybrid Energy Storage System for an Isolated Microgrid Using Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization. **Energies**. 11(2): 454.
- Wee, K.W., Choi, S.S., and Vilathgamuwa, D.M. (2013). Design of a Least-Cost Battery Supercapacitor Energy Storage System for Realizing Dispatchable Wind Power. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**. 4(3): 786-796.
- Xu, L., and Chen, D. (2011). Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage. **IEEE Trans. Power Deliv.** 26 (4):2513–2522.
- Zhang, L., and Zhang, J. (2016). Capacity Optimal Research of Hybrid Energy Storage Systems for Stand-alone Wind/PV Micro-grid. **2016 International Conference on Power Engineering & Energy (PEEE)**.
- Zhao, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, H., and Rasmussen, C. N. (2015). Review of energy storage system for wind power integration support. **Applied Energy**. 137: 545-553.



รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Wongdet, P., Leeton, U., and Marungsri, B. (2018). Line Loss Reduction by Optimal Location of Battery Energy Storage System for the Daily Operation in Microgrid with Distributed Generations. **International Journal on Energy Conversion (IRECON)**. Vol. 6(3): pp. 83-89.

พินิจ วงศ์เดช วีระพงษ์ บุญรักษาและบุญเรือง มะรังศรี (2561). การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่ในไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวที่ติดตั้งพลังงานทดแทนเมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่11 (TREC11). จังหวัดชัยภูมิ.

Wongdet, P., and Marungsri, B. (2018). Study of Hybrid Energy Storage System for High Rate Power Mitigation in Microgrid. **Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automation (ICEEA2018)**. Vol. 139: pp. 36-38.

Wongdet, P., and Marungsri, B. (2018). Hybrid Energy Storage System in Standalone DC Microgrid with Ramp Rate Limitation for Extending the Lifespan of Battery. **The 6th International Electrical Engineering Congress (IEECON2018)**. 627-630.

Line Loss Reduction by Optimal Location of Battery Energy Storage System for the Daily Operation in Microgrid with Distributed Generations

P. Wongdet, U. Leeton, B. Marungsri

Abstract – Distributed generations (DGs) such as solar and wind generations are used as generation source in the microgrid. Due to the fluctuation of renewable energy sources, the battery energy storage system (BESS) is one of the essential components to control and improve the quality of power microgrid. However, a placement for BESS installation with minimizing line loss is one of the most concern problems. This paper aims to determine the optimal location of the BESS by using the analytical method with the line loss sensitivity index. A multi-period optimal power flow (OPF) and line loss analysis with BESS parameters were investigated considering the daily operation of a microgrid in connected mode. The simulation performed on the microgrid that wants to keep total power generation from DGs in BESS and low energy consumption from the utility. Microgrid includes 3 DGs (biomass, solar and wind turbine generators) to assess the robustness of BESS placement. The results confirmed the effectiveness of the presented method. The optimal location of BESS can reduce line power loss and power consumption from the utility. Copyright © 2018 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.

Keywords: Microgrid, Battery Energy Storage System, Line Loss Reduction, Loss Sensitivity, Optimal Location

Nomenclature

α_{jk}	Loss coefficients	$P_{G,j}^t$	Active power generation at node j in hour t
β_{jk}	Loss coefficients	$P_{L,j}^t$	The active power of load at node j in hour t
η_{ch}	Charging efficiency of the BESS	$P_{d,j}^t$	Active discharging power of the BESS at node j in hour t
η_d	Discharging efficiency of the BESS	$P_{ch,j}^t$	Active charging power of the BESS at node j in hour t
δ_j^t	Voltage phase angles at nodes j in hour t	P_j^t	Active power injection at node j in hour t
δ_k^t	Voltage phase angles at nodes k in hour t	P_d^{\max}	The upper limit of active power discharging of the BESS
B_{jk}	Line susceptance of branch $j-k$	P_{ch}^{\max}	The upper limit of active power charging of the BESS
B_j^t	The energy of the BESS at node j in hour t	P_{slack}	Active power from the slack bus
B_j^{t+1}	The energy of the BESS at node j in hour $t+1$	Q_j, Q_k	Reactive power injection at nodes j and k
B^{\min}	The lower limit of the energy of the BESS	$Q_{G,j}^t$	Reactive generation power at node j in hour t
B^{\max}	The upper limit of the energy of the BESS	$Q_{L,j}^t$	Reactive power of load at node j in hour t
G_{jk}	Line conductance of branch $j-k$	$Q_{d,j}^t$	Reactive discharging power of the BESS at node j in hour t
L_1	The active power load at node 3	$Q_{ch,j}^t$	Reactive charging power of the BESS at node j in hour t
L_2	The active power load at node 5	Q_j^t	Reactive power injection at node j in hour t
L_3	The active power load at node 7	r_{jk}	The resistance of the line connected between nodes j and k
L_4	The active power load at node 9	T	The set of time periods of the time horizon
N_b	Total number of node	V_j^{\min}	The lower limit of voltage magnitude of node j
P_j	Active power injection at nodes j		
P_k	Active power injection at nodes k		
P_{Loss}	Active power loss in the system		
P_B	The active power of the BESS		

V_j^{\max} The upper limit of voltage magnitude of node j
 V_j^t, V_k^t Voltage magnitudes at nodes j and k in hour t

I. Introduction

A microgrid is one of the main components of grid's system. Microgrid comprises LV or MV distribution networks of small load clusters with distributed energy resources (DER) such as microturbines (MT), photovoltaic (PV), fuel cells (FC) and wind turbine (WT) [1]. A microgrid can operate in connected mode or islanded mode when the main power grids during emergencies [2], [3]. The advantages of microgrid are the generations near the load that can reduce loss in distribution line [4]. In connected mode as shown in Fig. 1, the utility can support the microgrid when the loads are higher than total power generations in the microgrid. In other hand, the microgrid can inject power to the main grid for support or selling.

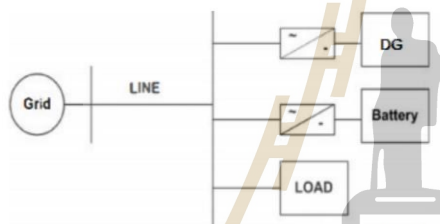


Fig. 1. Connected microgrid

Therefore, the operation of the microgrid is the bidirectional power flow. This way increases the line loss due to the length of distribution line between main grid and microgrid. Also, the microgrid with the intermittent power generation from renewable energy sources can lead the main grid to instability. The power balance between loads and power generations in microgrid is used to solve these problems for low exchanged power with main grid. However, it is difficult to control power from renewable energy sources because it is the unmanageable source. Hence, the power must convert to the manageable source.

BESS is the manageable source that can support the optimization of grid operation and give many benefits [5]. It can charge when the power generations are more than load demands and discharged when load demands are more than power generations (bidirectional power flow source). Using BESS can improve the quality of power grids and mitigate the fluctuation of distributed generations. Researches on the BESS application in microgrid have been presented for many years. As in [6], the author proposed voltage regulation in distribution networks with high PV penetration. BESS is used in order to solve the voltage rise during peak PV and voltage drop during peak load by a combination of local droop and distributed control, [7] proposed frequency

control of islanded microgrid by using BESS with droop control, [8] suggested the economic operation using BESS in real-time markets.

The problem is maximizing the total profit in a day, and [9] presented loss reduction method of the distribution system by install BESS, but these works do not consider the optimal location of BESS. However, the microgrid has many locations for the BESS placement.

Therefore, many researches are proposed to find optimal BESS placement for different optimal system performances. As in [10], the authors proposed a method for voltage regulation in non-radial distribution with high PV penetration to determine the placement of energy storage.

The result shows that the best place is near the end of a feeder, [11] proposed a novel method using radial basis function neural networks (RBFNN) to determine the optimal location of BESS based on minimizing power losses. The results are compared with measured data from simulation and show the optimal location that can save amount of power losses. A drawback of this method is need a lot of information for RBFNN training. This paper focuses on loss reduction by the optimal location of BESS because the loss reduction is the essential factor for improving system performance. The BESS should be placed at a location that provides highest loss reduction. However, the methods in above literature reviews are rather complex computation that not suitable to design the small system.

This paper presented a simple analytical method to determine the optimal location of BESS in microgrid for loss reduction that analyzes with daily operation. An optimal location of BESS is determined using the loss sensitivity index by considering exact loss formula and BESS parameter.

This method simplifies the complex computation to design a small system. A multi-period OPF model with BESS parameters was simulated by using the Newton-Raphson method with daily operation of the microgrid. The simulation was carried out on the adapted 12 node microgrid in MATLAB-R2014 software. The results are analyzed and showed the effectiveness of the proposed method.

This paper is organized as follows: Section II explains the battery energy storage system. In Section III, the proposed method is presented. Section IV illustrates a sample microgrid system to apply the method and the simulation results. In Section V, the conclusion is finally given.

II. Battery Energy Storages

The energy storage system is the system that can convert electrical energy and stored energy in some forms, and the stored energy can turn back to the electrical energy again when need to use it.

There are various types of energy storages, e.g., pumped storage hydropower plant, superconducting magnetic energy storage, flywheel energy storage,

battery energy storage.

Currently, the battery system technology has been developed for use in a smart grid system and an electric car [22]-[29]. The batteries may be the best energy storages due to they can perform many functions in power systems, e.g., profit strategy from electricity prices in different time, demand shift, support the renewable energy integration and voltage support. The batteries have a various type such as a lead acid battery, nickel-electrode battery, lithium-ion battery, sodium-sulfur battery, metal air, flow battery (zinc-bromine, vanadium-redox) [12].

The suitable type of batteries to stored energy must consider the essential factors of works to be applied such as the power to energy ratio, charging and discharging efficiency, capacity limits, calendar life, life cycles, capital cost, maintenance cost and security [13]. For example, the sodium-sulfur battery is optimal for grid supports, and flow batteries have a long time life cycle. In this paper, use overall features of the batteries, not consider only one type of batteries.

III. Methodology

In this section, the analytical method to determine the most suitable location for BESS, battery model and multi-period optimal power flow are explained.

III.1. Identification of the Optimal Location of the BESS

In this paper, loss sensitivity index with respect to BESS parameters has been used to find optimal location of BESS. For calculating the loss sensitivity index concerning BESS parameters, an exact power loss formula has been used. The total exact power loss is given in (1) [14]:

$$P_{Loss} = \sum_{j=1}^{Nb} \sum_{k=1}^{Nb} [\alpha_{jk}(P_j P_k + Q_j Q_k) + \beta_{jk}(Q_j P_k - P_j Q_k)] \quad (1)$$

where:

$$\alpha_{jk} = \frac{r_{jk}}{V_j V_k} \cos(\delta_j - \delta_k)$$

$$\beta_{jk} = \frac{r_{jk}}{V_j V_k} \sin(\delta_j - \delta_k)$$

and:

$$j, k = 1, 2, 3, \dots, N_b$$

The total power loss is considered as the parameter for the performance of microgrid, and the active power operation is the power from BESS. At node j , the active loss sensitivity index respect to active power from the

BESS parameters can be expressed as (2) [15]:

$$\frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_B} = 2\alpha_{jj} P_j + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{Nb} (P_k \alpha_{jk} - Q_k \beta_{jk}) \quad (2)$$

III.2. Multi-Period OPF Formulations with BESS

A multi-period OPF [16] with BESS integration in this work using Newton-Raphson power flow solution [17], can be formulated as follows:

- 1) Objective function: to minimize the line active power loss in microgrid as given in (1). The objective function can be expressed in (3):

$$F = \min \sum_{t=1}^T (P_{Loss}) \quad (3)$$

In this work, $T=24$ hours.

- 2) Battery model: Battery energy balance equations are given in (4)-(5) [18], Δt is the time in each period.

Charging mode:

$$B_j^{t+1} = B_j^t + P_{ch,j}^t \times \eta_{ch} \times \Delta t \quad (4)$$

Discharging mode:

$$B_j^{t+1} = B_j^t - P_{d,j}^t / \eta_d \times \Delta t \quad (5)$$

The output power limits of the battery are given in (6)-(7):

$$P_{ch,j}^t \leq P_{ch}^{\max} \quad (6)$$

$$P_{d,j}^t \leq P_d^{\max} \quad (7)$$

The capacity limit equation of BESS is given in (8).

$$B^{\min} \leq B_j^t \leq B^{\max} \quad (8)$$

- 3) Operation constraints: The following constraints are satisfied within every single period t .

Power flow balance equations: For node j in each period t are given in (9)-(10):

$$\begin{aligned} P_j^t &= P_{G,j}^t - P_{J,L}^t + P_{d,j}^t - P_{ch,j}^t = \\ &= \sum_{k=1}^{Nb} V_j^t V_k^t [G_{jk} \cos(\delta_j^k - \delta_k^t) + B_{jk} \sin(\delta_j^k - \delta_k^t)] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Q_j^t &= Q_{G,i}^t - Q_{L,j}^t + Q_{d,j}^t - Q_{ch,j}^t = \\ &= \sum_{k=1}^{Nb} V_j^t V_k^t [G_{jk} \sin(\delta_j^k - \delta_k^t) - B_{jk} \cos(\delta_j^k - \delta_k^t)] \end{aligned} \quad (10)$$

Bus voltage limits for node j is given in (11):

$$V_j^{\min} \leq V_j^t \leq V_j^{\max} \quad (11)$$

Note that the total active power generations are obtained from solar, wind and biomass generation profiles. The procedures of operation are shown in Fig. 2.

The first step, the base case power flow (without BESS parameter control) is solved and obtained bus voltages and power flows. After that, the loss sensitivity in each node is calculated of all hour t . The BESS should be placed on the bus that is having most negative sensitivity index, and not should be placed at slack or regulator buses even if the sensitivity is high [19], [20].

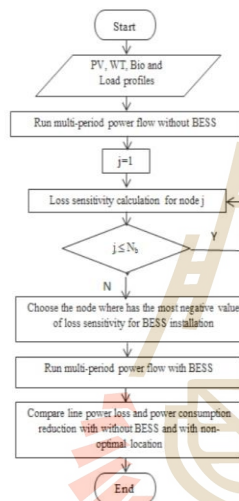


Fig. 2. Flowchart for Identification of the optimal location of the BESS

IV. Simulation Results and Discussions

Fig. 3 shows a single-line diagram of a microgrid simulation model of 12 nodes (connected mode) that includes biomass, solar and wind generators are install at node 6, 10 and 12 respectively.

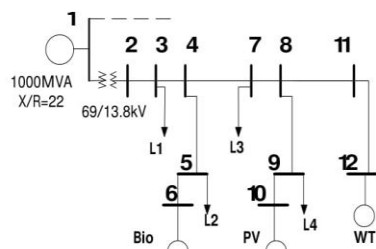


Fig. 3. Sample microgrid system with DGs

The daily produced power from the DGs is shown in Fig. 4. The microgrid is connected to a 13.8 kV feeder. The system parameters are similar in [21]. The detail information of microgrid is shown in Table I and Table II, by using $V(\text{base}) = 13.8 \text{ kV}$ and $S(\text{base}) = 10 \text{ MVA}$.

TABLE I
LINE DATA FOR 12 NODES SYSTEM

No.	bus		Impedance		Tap
	from	to	R (p.u.)	X (p.u.)	
1	1	2	0.00667	0.0533	1
2	2	3	0.03	0.0007	-
3	3	4	0.03	0.0007	-
4	4	5	0.0146	0.01091	-
5	4	7	0.03564	0.02661	-
6	5	6	0.005	0.03	1
7	7	8	0.03564	0.02661	-
8	8	9	0.0146	0.01091	-
9	8	11	0.03564	0.02661	-
10	9	10	0.005	0.03	1
11	11	22	0.005	0.03	1

TABLE II
BUS DATA FOR 12 NODES SYSTEM

Bus	V (per unit)	degree	Bus type
1	1.05	0	Slack
2	1	0	Load
3	1	0	Load
4	1	0	Load
5	1	0	Load
6	1	0	PV
7	1	0	Load
8	1	0	Load
9	1	0	Load
10	1	0	PV
11	1	0	Load
12	1	0	PV

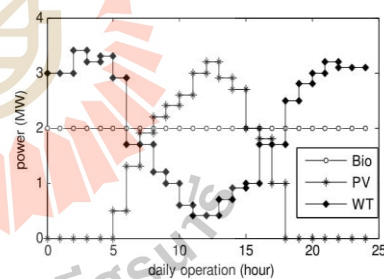


Fig. 4. Power generations during the day

The hourly load demands of the case study for the daily operation are shown in Fig. 5. The details of the BESS are given in Table III.

TABLE III
BESS INFORMATIONS

η_{ch}	η_d	P^{\min}	P^{\max}	B^{\min}	B^{\max}	B_j^0
90%	90%	0	3 MW	0	12 MWh	0

Simulations are done in two-step. Firstly, run power flow analysis (without BESS). Hence, the power flows, bus voltage, and voltage phase angle are obtained. The simulation of base case power flow is shown in Fig. 6.

the negative power of the slack bus denoted as power from microgrid injected to slack bus when total power generated from DGs are more than total load demands, the positive power denoted as power from slack bus injected to the microgrid when total power generations are less than total power load demands. In the base case, the total active energy loss is 13.34 MWh.

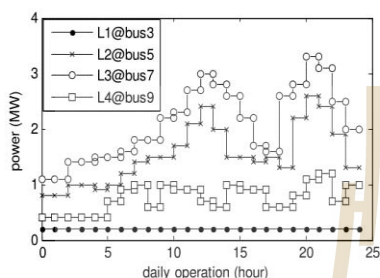


Fig. 5. Hourly load demands during the day

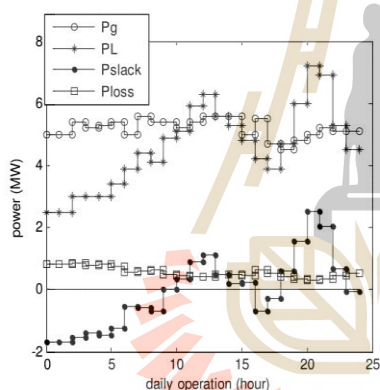


Fig. 6. Power flow without the BESS

The second is the loss sensitivity index calculation using (2) at all of the nodes. The loss sensitivity index of each node is shown in Fig. 7.

As illustrated in Fig. 7, node 7 has highest negative sensitivity index of -7.18, and it is the best location to place the BESS. After that, run the power flow with BESS parameters using Newton-Raphson method for investigating the operation of microgrid when installing the BESS at each node.

The power flow of daily operation in microgrid after placed the BESS at node 7 is shown in Fig. 8. The BESS charged when the power generation are more than loads (positive power) and discharged when loads are more than power generations (negative power).

Maximum stored energy of BESS is 11.46 MWh. The slack bus injects 0.614 MW of power to the microgrid when stored power in BESS do not enough to supply the microgrid at about $t = 23$ hours. The total power loss in this case is 12.5 MWh.

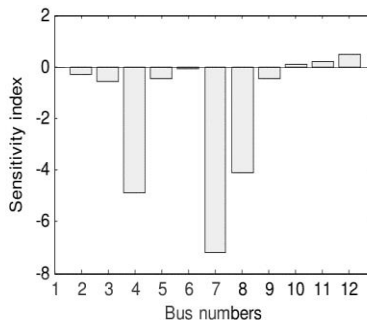


Fig. 7. Loss sensitivity index versus bus numbers

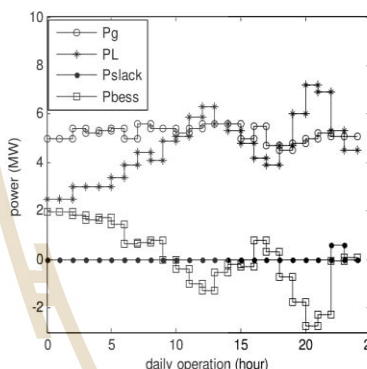


Fig. 8. OPF with BESS parameters at node 7

In Fig. 9, a comparison of the total power loss with each location of BESS in the microgrid is shown. In Fig. 10, a comparison of the power supply from the slack bus when stored power in BESS do not enough to supply with each locations of BESS in the microgrid is shown.

The power loss with BESS integration of a non-optimal placement at node 2 is 13.35 MWh. It is more than the base case and increases to 6.77% from power loss of optimal location (node 7). The lowest value of power supply from slack bus is 0.61 MWh when the location of BESS is node 7.

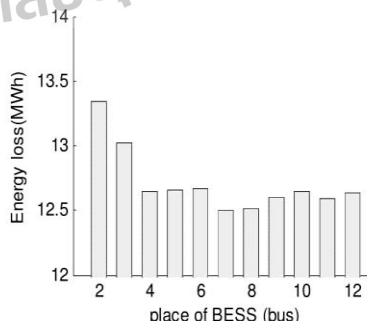


Fig. 9. Total power loss with BESS integration

P. Wongdet, U. Leeton, B. Marungsri

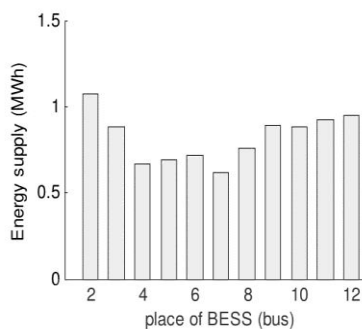


Fig. 10. Total power supply by slack bus

V. Conclusion

The location of BESS is a significant problem in the planning and development of a microgrid. This work presented a simple analytical method using the loss sensitivity index to determine the optimal placement of the BESS in the microgrid. The results showed that the power loss had been reduced with the optimal location of BESS to 6.30% from without BESS case and 6.33% from the worst location. Also, the optimal location of BESS can significantly reduce the power consumption from the utility.

Acknowledgments

This work was supported by the Suranaree University of Technology.

References

- [1] EN. Hatziaziyriou, *Microgrid*, (IEEE WILEY book, 2013).
- [2] E. Sortomme, S. S. Venkata, J. Mitra, Microgrid protection using communication-assisted digital relays, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 4, Oct 2010, pp. 2789–2796. <https://doi.org/10.1109/tpes.2010.5588146>
- [3] M. Khederzadeh, A. Beiranvand, Identification and Prevention of Cascading Failures in Autonomous Microgrid, *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 1, Oct 2015, pp. 308–315. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2015.2482227>
- [4] S. Angalaeswari, K. Jantana, Optimal Placement and Sizing of Real Power Supporting DG in Radial Distribution Networks, *IEEE International WIE conference, Dem 2015*, pp. 19–20. <https://doi.org/10.1109/wiecon-ecce.2015.7443933>
- [5] D. Zarrilli, A. Giannitrapani, Energy Storage Operation for Voltage Control in Distribution Networks: A Receding Horizon Approach, *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 1, (Issue: 99), April 2017, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1109/cdc.2016.7799427>
- [6] M. Zeraati, M. E. H. Golsham, J. M. Guerrero, Distributed Control of Battery Energy Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks with High PV Penetration, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2636217>
- [7] I. Serban, C. Marinescu, Control Strategy of Three-Phase Battery Energy Storage Systems for Frequency Support in Microgrids and with Uninterrupted Supply of Local Loads, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, issue. 9, Sep 2013, pp. 5010–5020. <https://doi.org/10.1109/tpel.2013.2283298>
- [8] Nguyen, M., Yoon, Y., Battery Modeling for Economic Operation of Energy Storage Systems in Electricity Markets, (2013) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 8 (3), pp. 1000–1007.
- [9] X. Zhang, F. Gao, X. J. Lu, H. R. Lu, Q. Tian, J. Ma, W. Yin, J. Dong, Line Loss Reduction with Distributed Energy Storage Systems, *IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia)*, September 2012. <https://doi.org/10.1109/isgt-asia.2012.6303333>
- [10] A. Barnes, J. Balda, A. Escobar-Mejia, S. Geurin, Placement of energy storage coordinated with smart pv inverters, *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2012 IEEE PES, 2012, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/isgt.2012.6175665>
- [11] Kerdphol, T., Qudaih, Y., Hongesombut, K., Watanabe, M., Mitani, Y., Intelligent Determination of a Battery Energy Storage System Size and Location Based on RBF Neural Networks for Microgrids, (2016) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 11 (1), pp. 78–87. doi: <https://doi.org/10.15866/iree.v11i1.7718>
- [12] D. Linden, *Handbook of Batteries*, 2nd ed., McGraw-Hill, (New York, 1995).
- [13] S. Ibarra, A. Milo, H. Gaztanaga, I. Etxeberria-Otadui, P. Rodriguez, S. Bacha and V. Debusschere, Analysis and comparison of battery energy storage technologies for grid applications, *IEEE Grenoble PowerTech*. 16–20 June 2013, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ptc.2013.6652509>
- [14] O. Elgerd, *Electric energy systems theory: an introduction*. TataMcGraw-Hill Education, (2007).
- [15] M. Shaaban, J. O. Petrinin, Sizing and siting of distributed generation in distribution systems for voltage improvement and loss reduction, *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, June 15, 2013. <https://doi.org/10.12720/sgce.2.3.350-356>
- [16] N. Nguyen, D. Le, G. Moshé, C. Bovo, A. Berizzi, Sensitivity Analysis on Locations of Energy Storage in Power Systems With Wind Integration, *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 52, No. 6, December 2016. <https://doi.org/10.1109/ieec.2015.7165323>
- [17] H. Sadaat, *Power System Analysis*, McGraw-Hill. (New York, 1999).
- [18] T. Manmit, P. Damrongkulkamjorn, Optimal Battery Energy Storage System for PV Grid Connector for Customer with Time-Of-Use Tariff, *Journal of Kasetsart University*, 2015.
- [19] S. Bhaskar Karanki, D. Xu, B. Venkatesh, Optimal Location of Battery Energy Storage Systems in Power Distribution Network for Integrating Renewable Energy Sources, *IEEE Energy Conversion Congress, and Exposition (ECCE)*, September 2013. <https://doi.org/10.1109/ecce.2013.6647310>
- [20] K. Rao, B. Kumar, Placement of svc for minimizing losses and maximizing total transfer capability using particle swarm optimization, *Renewable Power Generation (RPG 2011), IET Conference*, 2011, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1049/cp.2011.0161>
- [21] P. Y. Chung, W. X. Liu, D. A. Cartes, K. Schroder, Control parameter optimization for a microgrid system using particle swarm optimization, *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Sustainable Energy Technologies (ICSET 2008)*, November 2008, pp. 837–842. <https://doi.org/10.1109/icset.2008.4747124>
- [22] Kerdphol, T., Qudaih, Y., Mitani, Y., Optimal Battery Energy Storage Size Using Particle Swarm Optimization for Microgrid System, (2015) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 10 (2), pp. 277–285. doi: <https://doi.org/10.15866/iree.v10i2.5350>
- [23] Taficht, T., Agbossou, K., Chérity, A., Adzakpa, K., Optimal Control of Variable Speed Wind Turbines with Battery Energy Storage, (2016) *International Journal on Engineering Applications (IREA)*, 4 (3), pp. 91–98.
- [24] Wannasut, C., Hongesombut, K., Deferral of Power Distribution Reinforcement by Using Battery Energy Storage System, (2017) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 12 (4), pp. 369–377. doi: <https://doi.org/10.15866/iree.v12i4.12506>

P. Wongdet, U. Leeton, B. Marungsri

- [25] Del Pizzo, A., Di Noia, L., Rizzo, R., Energy Storage System Sizing for a Twin Engine Four-Seat Aircraft Electrical Propulsion, (2017) *International Review of Aerospace Engineering (IREASE)*, 10 (6), pp. 315-322.
doi:<https://doi.org/10.15866/irease.v10i6.11841>
- [26] Abdelhedi, R., Lahyani, A., Ammari, A., Sari, A., Venet, P., Frequency Power Sharing for Battery/Supercapacitors Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles, (2017) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 10 (6), pp. 399-409.
doi:<https://doi.org/10.15866/iremos.v10i6.12364>
- [27] Gomez, D., Rios, M., Ramos, G., Palacios, H., Posada, L., Optimal Sizing Method and Control Strategy of Energy Storage Systems for Large-Scale Wind Power Integration, (2016) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 11 (6), pp. 644-653.
doi:<https://doi.org/10.15866/iree.v11i6.10678>
- [28] Khamis, A., Mohd Aras, M., Mohd Zambri, M., Ab. Ghani, M., Abdul Rahim, M., Analysis of Microturbine and Battery Storage System in Grid-Connected and Off-Grid Operations, (2016) *International Review of Automatic Control (IREACO)*, 9 (5), pp. 269-278.
doi:<https://doi.org/10.15866/ireaco.v9i5.9089>
- [29] Gaga, A., Bessassi, H., Errahimi, F., Es-Sbai, N., Battery State of Charge Estimation Using an Adaptive Unscented Kalman Filter for Photovoltaics Applications, (2017) *International Review of Automatic Control (IREACO)*, 10 (4), pp. 349-358.
doi:<https://doi.org/10.15866/ireaco.v10i4.11393>

Authors' information

Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.
E-mail: bmsheve@sut.ac.th



Pinit Wongdet was born in Nakhon Ratchasima Province, Thailand in 1995. He received his B. Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology at Nakhon Ratchasima, Thailand in 2016. Currently, he is a Master's Degree student in the school of Electrical Engineering at Suranaree University of Technology, Thailand.



Uthen Leeton was born in Loei, Thailand, on October 25, in 1985. He received B.Eng. with first-class honor in Electrical Engineering from the Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 2007 and Ph.D. Student of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 2014. His researches fields of interest include a power system analysis, optimization algorithm, artificial intelligence techniques and Multi-agent System. Dr. Leeton is currently a lecturer in School of Electrical Engineering and a member of Power System Research Unit, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.



Boonruang Marungsri (Corresponding Author) was born in Nakhon Ratchasima Province, Thailand, in 1973. He received his B. Eng. and M. Eng. From Chulalongkorn University, Thailand in 1996 and 1999 and D. Eng. from Chubu University, Kasugai, Aichi, Japan in 2006, all in electrical engineering, respectively. Asst. Prof. Dr. Marungsri is currently a lecturer in School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His areas of interest are electrical power system and high voltage insulation technologies.



DE84

**การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่ในไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวที่ติดตั้งพลังงานทดแทน
เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่**
**Cost Analysis of Battery in Standalone Microgrid with Renewable Energy
by Considering Battery Lifetime**

พินิจ วงศ์เดช อีระพงษ์ บุญรักษา และบุญเรือง มะรังศรี*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

ปัญหาที่สำคัญของระบบไมโครกริดที่ใช้พลังงานทดแทนผลิตไฟฟ้าเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic, PV) และกังหันลม (Wind turbine, WT) คือ ความไม่แน่นอนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ แบตเตอรี่ได้ถูกนำมาใช้เพื่อจัดการปัญหานี้ แต่ความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ต้องทำงานเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่สั้นลงได้ งานวิจัยนี้ได้จำลองผลกระทบของขนาดติดตั้งแบตเตอรี่ต่ออายุการใช้งาน เพื่อหาค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่โดยคิดแบบมูลค่าปัจจุบัน ซึ่งประกอบไปด้วยค่าติดตั้งเริ่มต้น ค่าดูแลบำรุงรักษาและค่าติดตั้งใหม่ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ตลอดอายุของโครงการ ผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าอายุการใช้งานของแบตเตอรี่เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายรวมของระบบ โดยขนาดที่เหมาะสมสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่และลดค่าใช้จ่ายให้น้อยของระบบได้

คำสำคัญ: ไมโครกริดแบบแยกเดี่ยว พลังงานทดแทน การประเมินอายุการใช้งานแบตเตอรี่

*Corresponding author. Tel.: 089-7177065. E-mail address: bmsvvee@sut.ac.th

บทนำ

หลายปีที่ผ่านมา พลังงานทดแทนเริ่มได้รับความสนใจศึกษาและใช้งานกันอย่างแพร่หลายเพื่อนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากมีข้อดีหลายอย่างเมื่อเทียบกับระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานฟอสซิล อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของพลังงานทดแทนคือความไม่แน่นอนของการผลิตไฟฟ้า ในการใช้งานพลังงานทดแทนในไมโครกริดแบบแยกเดี่ยว (Standalone microgrid) เช่น ในพื้นที่ห่างไกล หรือระบบที่ไม่ต้องการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย จึงจำเป็นต้องมีระบบกักเก็บพลังงานเพื่อจัดการและควบคุมให้กำลังไฟฟ้าภายในระบบมีความสมดุลระหว่างความต้องการโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดเวลา ระบบกักเก็บพลังงานที่นิยมใช้คือ แบตเตอรี่ [1] เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง ใช้งานง่ายและมีหลากหลายชนิดและราคาให้เลือกใช้มากมายในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยที่สำคัญคือแบตเตอรี่มีกัจะมีอายุสั้น เมื่อเทียบกับส่วนประกอบอื่น ๆ ในไมโครกริดที่มีอายุโครงการ 20 หรือ 25 ปี เช่น เซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลม ที่แทบจะไม่ได้ติดตั้งใหม่ตลอดโครงการหรือไม่ได้เสียค่าติดตั้งใหม่ทั้งหมดเหมือนแบตเตอรี่ เช่นการเปลี่ยนใบพัดของกังหันลมอาจจะใช้เสาคันเดิมได้ ดังนั้นค่าติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่จึงเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ค่าใช้จ่ายของระบบไมโครกริดเพิ่มขึ้นได้ หากไม่มีการพิจารณาผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่และการใช้งานที่เหมาะสม ดังนั้นหากต้องการประเมินค่าใช้จ่ายให้ใกล้เคียงความเป็นจริง จึงต้องมีการประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ เพื่อประเมินค่าใช้จ่ายและจำนวนครั้งในการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่



เนื่องจากขนาดแบตเตอรี่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุการใช้งาน ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงศึกษาผลของขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่ที่มีผลต่ออายุการใช้งาน เพื่อวิเคราะห์ขนาดแบตเตอรี่ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมมีค่าน้อย โดยใช้วิธีการ Rain-flow เพื่อประเมินอายุการใช้งาน โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ขั้นตอนของงานวิจัย ผลการจำลองและการสรุปผลจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ทฤษฎีและวิธีการวิจัย

โมเดลคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่

เพื่อจำลองผลการทำงานของแบตเตอรี่จำเป็นต้องศึกษาโมเดลการทำงานและขอบเขตเงื่อนไขในการทำงานของแบตเตอรี่ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้แบตเตอรี่ทำงานหาได้จากสมการสมดุลกำลังงานภายในไมโครกริด แสดงไว้ในสมการที่ 1

$$P_L - P_{PV} - P_{WT} + (P_c - P_d) = 0 \quad (1)$$

เมื่อ P_L , P_{PV} และ P_{WT} คือกำลังไฟฟ้าที่โหลด เซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลม ค่า P_c และ P_d คือค่าการอัดและปล่อยประจุกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ตามลำดับ จะได้สมการพลังงานของแบตเตอรี่แสดงในสมการที่ 2

$$E(t + \Delta t) = E(t) + (P_c \times \eta_c - P_d \times \eta_d) \Delta t \quad (2)$$

เมื่อค่า $E(t)$ คือพลังงานของแบตเตอรี่ที่เวลา t ค่า P_c คือการอัดประจุกำลังไฟฟ้า ค่า P_d คือค่าการปล่อยประจุกำลังไฟฟ้า ค่า η_c และ η_d คือค่าประสิทธิภาพการอัดและปล่อยประจุ ตามลำดับ โดยพลังงานและกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนดตามสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

$$E_{\min} \leq E(t) \leq E_{\max} \quad (3)$$

$$-P_{\max,c} \leq P(t) \leq P_{\max,d} \quad (4)$$

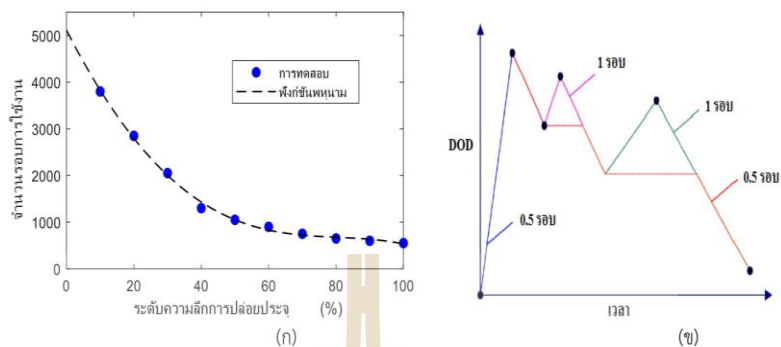
เมื่อค่า E_{\min} และ E_{\max} คือขอบเขตพลังงานของแบตเตอรี่ ค่า $P_{\max,c}$ และ $P_{\max,d}$ คือค่าขอบเขตกำลังไฟฟ้าอัดและปล่อยประจุ ตามลำดับ ดังนั้นค่าสถานะการประจุของแบตเตอรี่ (State of charge, SOC) คำนวณได้จากสมการที่ 5

$$SOC(t) = E(t) / E_{\text{rated}} \quad (5)$$

เมื่อกำหนดให้ E_{rated} คือค่าที่กักความจุของแบตเตอรี่ โดยสามารถหาค่าสถานะระดับความลึกการปล่อยประจุ (Depth of discharge, DOD) ได้จาก 1-SOC

การประเมินอายุการใช้งานแบตเตอรี่

เนื่องจากแบตเตอรี่เป็นส่วนประกอบที่มีราคาแพง การเปลี่ยนแบตเตอรี่บ่อยทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น จึงต้องมีการประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งาน เช่น ค่าความลึกการปล่อยประจุ อุณหภูมิ อัตราการชาร์จ เป็นต้น [2] ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการประเมินที่สมบูรณ์ที่รวมทุกปัจจัยไว้ด้วยกัน เพื่อความง่ายในการวิจัยเบื้องต้นจะพิจารณาเฉพาะปัจจัยหลักเท่านั้น งานวิจัยนี้ใช้วิธีการนับแบบ Rain-flow ซึ่งมีพื้นฐานจากการประเมินค่าความล้าของวัสดุ [3] โดยให้จำนวนรอบการใช้งานกับระดับความลึกการปล่อยประจุเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งได้จากการทดสอบแบตเตอรี่ตัวگردของผู้ผลิต [4] ในภาพที่ 1ก ซึ่งสามารถหาฟังก์ชันต่อเนื่องของความสัมพันธ์นี้แสดงด้วยเส้นประในรูป และตัวอย่างการนับแบบ Rain-flow ในภาพที่ 1ข



ภาพที่ 1 (ก) จำนวนรอบการใช้งานกับระดับความลึกการปล่อยประจุของแบตเตอรี่อ้างอิง (ข) ตัวอย่างการนับ

ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของจำนวนรอบการใช้งานกับระดับความลึกการปล่อยประจุแสดงด้วยสมการฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลตามสมการที่ 6

$$CTF = f(DOD) = a_1 e^{-a_2 \times DOD} + a_3 e^{-a_4 \times DOD} \quad (6)$$

เมื่อ a_1 , a_2 , a_3 และ a_4 คือค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลมีค่าเท่ากับ 1.316×10^4 , 0.135, 4528 และ 0.02312 ตามลำดับ โดยเมื่อผ่านการนับด้วยวิธี Rain-flow แล้ว ค่าเสื่อมอายุหาได้จากสมการที่ 7 [5]

$$D_B = \sum_{i=1}^m \frac{N_{cycle}(DOD_i)}{CTF(DOD_i)} \quad (7)$$

อายุการใช้งานในหน่วยปีหาได้จากสมการที่ 8

$$L_B = \frac{1 \text{ year}}{D_{B,1 \text{ year}}} \quad (8)$$

เมื่อ N_{cycle} คือการรอบการใช้งานจริง เมื่อถูกแบ่งเป็น m ระดับ

ค่าใช้จ่ายของระบบแบตเตอรี่

ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายของระบบแบตเตอรี่ (TC) แสดงไว้ในสมการที่ 9 ซึ่งประกอบไปด้วยค่าติดตั้งเริ่มต้น (IC) ค่าเปลี่ยนใหม่ (RC) และค่าบำรุงรักษาต่อปี (OC) โดยใช้การคิดแบบมูลค่าปัจจุบัน (Net present value, NPV) เพื่อแปลงให้ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ตลอดโครงการให้อยู่ในช่วงเวลาเดียวกันคือปัจจุบัน

$$NPV(TC) = IC + NPV(RC) + NPV(OC) \quad (9)$$

โดย

$$IC = k_E \times E_{rated} + k_P \times P_{rated} \quad (10)$$

$$NPV(RC) = \sum_{n=1}^{NR} \frac{RC}{(1+d)^{n \times L_p}} \quad (11)$$

$$NPV(OC) = k_{oc} \times IC \times \frac{(1+d)^{L_p} - 1}{L_p(1+d)^{L_p}} \quad (12)$$

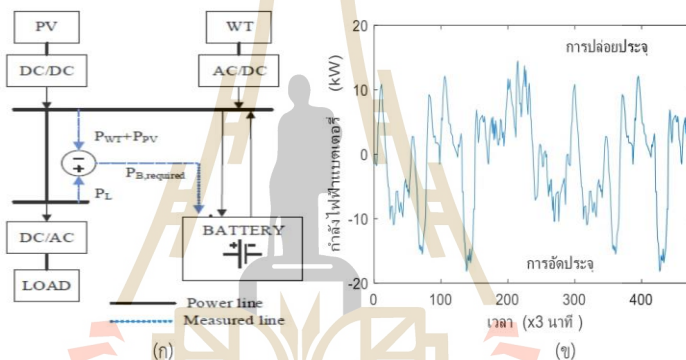
- เมื่อ d คืออัตราค่าเงินเฟ้อ
- NR คือจำนวนการเปลี่ยนแบตเตอรี่
- L_p คือระยะเวลาของโครงการ



k_E k_P คือตัวคูณค่าติดตั้งแบตเตอรี่ต่อ kWh และ kW ตามลำดับ
 k_{OC} คือตัวคูณค่าบำรุงรักษา กำหนดให้เท่ากับ 5% ของค่าติดตั้ง

กรณีศึกษาและผลการวิจัย

ตัวอย่างของไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวที่ใช้เป็นระบบศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงในภาพที่ 2ก เพื่อตรวจสอบวิธีการในงานวิจัย ค่ากำลังไฟฟ้ารายวันของโหลด การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมถูกจำลองผลทุกๆ 3 นาที (480 ช่วง) โดยกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่คือผลต่างของโหลดกับการผลิต แสดงไว้ในภาพที่ 2ข และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในไมโครกริดแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยขนาดแบตเตอรี่อย่างต่ำที่ต้องติดตั้งเพื่อให้แบตเตอรี่สามารถทำงานในเงื่อนไขการทำงานที่กำหนดไว้ได้คือพิกัดกำลัง 18.6 kW และพลังงาน 82 kWh นอกจากนี้ยังพิจารณาขนาดที่ใหญ่ขึ้นในช่วง 1-3 เท่าของขนาดพลังงานเพื่อเปรียบเทียบสถานะการประจุจากผลการทำงาน (98, 106, 115, 123, 140, 164, 246 kWh) ตามลำดับ

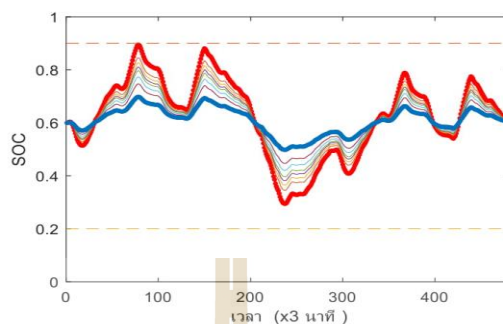


ภาพที่ 2 ก. ไมโครกริดแบบแยกเดี่ยวตัวอย่าง ข. กำลังไฟฟ้ารายวันของแบตเตอรี่

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

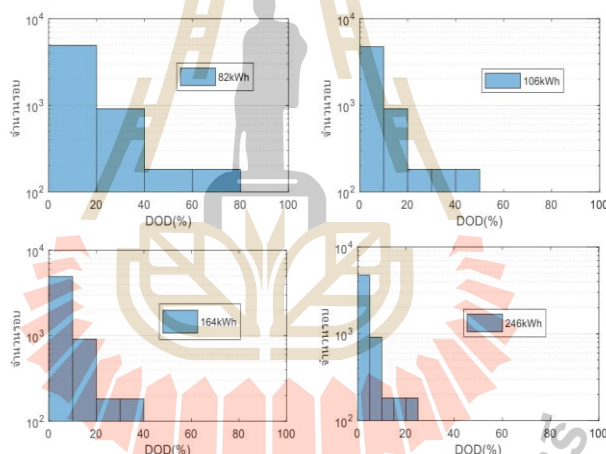
พารามิเตอร์	ค่า	พารามิเตอร์	ค่า
k_E (บาท/kWh)	9600	SOC_{max}/SOC_{min} (%)	90/20
k_P (บาท/kW)	3200	SOC_0 (%)	60
k_{OC} (บาท/kWh/ปี)	320	d (%)	5
η_c / η_d (%)	90/90	ระยะโครงการ (ปี)	20

ขั้นแรกเป็นการจำลองสถานะการปล่อยประจุของแบตเตอรี่ขนาดต่าง ๆ เมื่อทำงานในระบบ โดยแสดงไว้ในภาพที่ 3 แบตเตอรี่ขนาด 82 kWh จะทำงานในช่วง SOC 20-90% ที่กำหนด โดยมีความผันผวนมากที่สุดแสดงด้วยเส้นหนาสีแดง และแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ขึ้นจะมีสถานะการประจุที่ผันผวนน้อยกว่า ลดลงตามขนาดที่ใหญ่ขึ้นตามลำดับ โดยขนาด 246 kWh จะผันผวนน้อยสุดแสดงด้วยเส้นหนาสีน้ำเงิน



ภาพที่ 3 ค่าสถานะการประจุของแบตเตอรี่ขนาดต่าง ๆ

เมื่อทราบค่าสถานะระดับความลึกการปล่อยประจุ (เท่ากับ 1-SOC) ของแบตเตอรี่ขนาดต่าง ๆ แล้ว จะป้อนข้อมูลให้วิธีการนับ Rain-flow ผลการนับแสดงในภาพที่ 4 สิ่งกีดขวางแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ขึ้นสามารถลดจำนวนรอบการใช้งานที่ค่าความลึกสูง ๆ ได้ (แสดงได้เฉพาะบางขนาด) ซึ่งจะเพิ่มอายุการใช้งานแบตเตอรี่ให้มากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 4 กราฟสถิติจำนวนรอบการใช้งานด้วยวิธี Rain-flow ของแบตเตอรี่ขนาด 82 106 164 และ 246 kWh

ชั้นต่อมาวิเคราะห์ผลใช้จ่ายของระบบ พบว่าแบตเตอรี่ขนาด 82 kWh มีอายุใช้งาน 1.026 ปี และติดตั้งใหม่จำนวน 19 ครั้งตลอดโครงการ เมื่อคิดค่าใช้จ่ายโดยรวมแบบมูลค่าปัจจุบันแล้วเท่ากับ 5.6623 ล้านบาท สิ่งกีดขวางแบตเตอรี่ที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้ค่าติดตั้งเริ่มต้นและค่าบำรุงมากขึ้น แต่จะเพิ่มอายุการใช้งาน ลดจำนวนครั้งการติดตั้งใหม่ และลดค่าติดตั้งใหม่ลงด้วย โดยพบว่าขนาดแบตเตอรี่ 106 kWh มีค่าใช้จ่ายโดยรวมน้อยที่สุดเท่ากับ 5.429 ล้านบาท ส่วนขนาดแบตเตอรี่ที่ใหญ่เกินไปเช่น 246 kWh ทำให้ค่าใช้จ่ายมากขึ้น เท่ากับ 6.8662 ล้านบาท เนื่องจากข้อจำกัดของจำนวนหน้ากระดาษ ผลของขนาดติดตั้งต่ออายุการใช้งานและค่าใช้จ่ายของระบบสรุปไว้ในตารางที่ 2



ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ขนาดแบตเตอรี่และค่าใช้จ่ายของระบบ

ขนาด (kWh)	อายุ (ปี)	จำนวนติดตั้งใหม่ (ครั้ง)	ค่าติดตั้งเริ่มต้นและค่าบำรุง (ล้านบาท)	ค่าติดตั้งใหม่ (ล้านบาท)	ค่าใช้จ่ายรวม (ล้านบาท)	เพิ่ม/ลด (%)
82	1.026	19	0.437841	5.2245	5.6623	-
98	1.183	16	0.490485	4.9668	5.4573	-3.62
106	1.252	15	0.516806	4.9122	5.4290	-4.12
115	1.316	15	0.543128	5.0523	5.5954	-1.18
123	1.376	14	0.569450	4.9851	5.5546	-1.90
140	1.485	13	0.622093	5.0389	5.6610	-0.20
164	1.626	12	0.701059	5.2013	5.9023	+4.23
246	2.0	10	0.964276	5.9019	6.8662	+21.0

สรุปผลการวิจัย

จากผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นความสำคัญของการประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ก่อนติดตั้งใช้งาน ซึ่งส่งผลต่อค่าใช้จ่ายของระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เสนอการวิเคราะห์หาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ พบว่าขนาดที่ใหญ่ขึ้นสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ออกไปได้และทำให้ค่าติดตั้งใหม่ลดลงเมื่อคิดตามอายุของโครงการ แต่ขณะเดียวกันก็จะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเริ่มต้นด้วย ขนาดติดตั้งที่เหมาะสมสามารถลดค่าใช้จ่ายโดยรวมของระบบ เมื่อรวมทั้งค่าติดตั้งเริ่มต้น ค่าติดตั้งใหม่และค่าบำรุงรักษาได้ถึง 4.12% (106 kWh) เมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายของขนาดแบตเตอรี่อย่างต่ำ หากนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้ในระบบที่ใหญ่ขึ้นก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับราคาแบตเตอรี่ในแต่ละระบบ ซึ่งมีแนวโน้มที่ลดลงในอนาคต อีกทั้งต้องมีการพัฒนาวิธีการประเมินอายุแบตเตอรี่ให้แม่นยำมากยิ่งขึ้นเพื่อให้การประเมินค่าใช้จ่ายของระบบมีความถูกต้องยิ่งขึ้นไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนการศึกษา และแหล่งข้อมูลต่าง ๆ ที่ผู้เขียนสืบค้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gao, D.W. (2015). *Energy storage for sustainable microgrid*. (Amsterdam, Academic Press).
- [2] Sauer, D.U., Wenzl, H. (2008). Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems—Using lead-acid batteries as example. *J. Power Sources*, vol. 176.
- [3] Amzallage, C., Gerey, J.P., Robert, J. L., Bahaud, J. (1994). Standardization of the rainfall counting method for fatigue analysis. *International Journal of Fatigue*, vol. 16, no. 4, pp. 287-293.
- [4] Beltran, H., et al. (2016). Ageing of Different Types of Batteries When Enabling a PV Power Plant to Enter Electricity Markets. *IECON-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.
- [5] Beltran, H., et al. (2012). Lithium Ion Batteries Ageing Analysis When Used in a PV Power Plant. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2012, doi:10.1109/isie.2012.6237330.

Hybrid Energy Storage System in Standalone DC Microgrid with Ramp Rate Limitation for Extending the Lifespan of Battery

Pinit Wongdet and Boonruang Marungsri
 School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology,
 Nakhonratchasima, Thailand
 Email : pinitwongdet@gmail.com and bmslvtee@sut.ac.th

Abstract—The one problem in a standalone microgrid with photovoltaic (PV) and wind energy systems is the fluctuation of power output. The battery energy storage system (BESS) is used to improve reliable operation of microgrid by managing the power output. However, the intermittent power charge/discharge of BESS is the one factor that harmful effect to its lifespan. In recent years, the hybrid energy storage system (HESS) with BESS and supercapacitor (SC) has been proposed for increase performance of the system and extend BESS's lifespan. The SC has high power density and longtime life cycle but low energy density. Presently, the SC is developing and may fully use in microgrid in the future. This paper studied the HESS topology of BESS and SC by considering the ramp rate power limitation to control the operation of HESS. The results showed the significantly improved for extending the lifespan of BESS by smooth of power exchanged and increased efficiency in the microgrid. The simulation is carried out in MATLAB-Simulink program.

Keywords—hybrid energy storage system, ramp rate power limitation, battery lifespan, standalone microgrid, supercapacitor

I. INTRODUCTION

Microgrids are one of the components of grid's system. Microgrid comprises LV or MV distribution networks of small load clusters with distributed energy resources (DER) such as microturbines (MT), PV, fuel cells (FC) and WT [1]. A microgrid can operate in grid-connected or islanded mode when the main power grids during emergencies. In a standalone microgrid, the total power generation is from the DER. The problem of a microgrid is the intermittent nature of the renewable source. Therefore, microgrid used the energy storage system to balance the power generation and load.

BESS become the popular energy storage to support grid operation and give many benefits. Using BESS can improve the quality of power grids such as [2], [3], [4]. However, the quality of power exchanged at the BESS and grid affects to the BESS operation. The BESS has an inadequate response to rapid change in power.

The SC is developing in the present. The advantages of SC are a fast response to high power changed, long time of

life cycle, more temperature range operation and friendly with the environment. However, the energy density is low.

The HESS with BESS and SC has been proposed. HESS aims to use advantages of BESS and SC to bring the stability and reliability of microgrid. Using BESS to charge/discharge for main power exchanged and using SC in rapid power changed to ensure all devices operate in safe conditions. The HESS requires advance strategy to control for maximum efficiency. Thus, the HESS topology and control has been proposed in many paper [5], [6], [7].

For HESS, this paper presents the ramp rate limitation control. The ramp rate power exchanged at BESS terminal is limited to considering the lifespan of BESS.

The HESS topology presented in Section II. In Section III, illustrates the structure of standalone DC microgrid system and management strategy. The simulation and results presented in Section IV and conclusion is given in Section V

II. HESS TOPOLOGY

The HESS topology is the strategy to connect the BESS and SC with microgrid. For better efficiency and protection, should connect with DC microgrid. As in Fig. 1 (a), HESS passive topology is the elementary topology by directly combining BESS and SC with DC link. The fluctuation of voltage in the grid affects to the BESS by the depth of discharge/charge. The SC can not fully operate with its high power because of the same voltage on the terminal. In BESS semi-active as in Fig. 1 (c), the battery connects to a bidirectional converter for control the current exchanged and the voltage at its terminal. However, the grid is low power quality by the fluctuation of charge/discharge in SC. In SC semi-active as in Fig. 1 (d), the SC can mitigate the swing of power in the grid by its high power exchange. But in this topology, affects the health of BESS by the intermittent current. For the active topology as in Fig. 1 (b), The BESS and SC are connecting with the isolated bidirectional converter. This topology gives the smooth power to the grid. The lifespan of BESS is extended by low current exchanged, and SC can fully operate at high fluctuation as summarized in [8], [9]. The active topology needs the excellent strategy control for giving the more effective in the system. However, the active topology uses many converters that increase the cost investment, but in this paper is neglected.

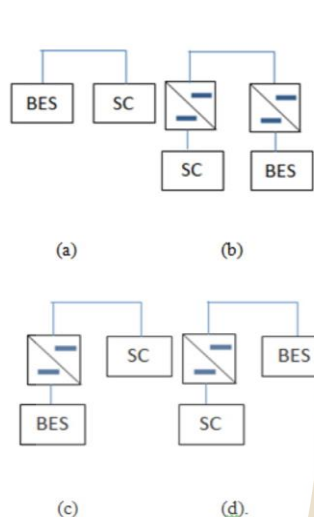


Fig. 1 HESS topologies (a) passive (b) active (c) BESS semi-active (d) SC semi-active

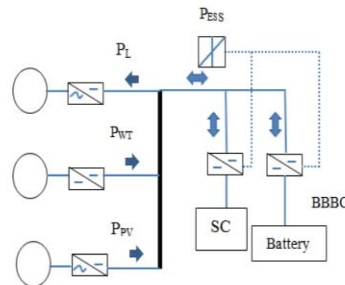


Fig. 2 Schematic diagram of the DC microgrid topology with active HESS management

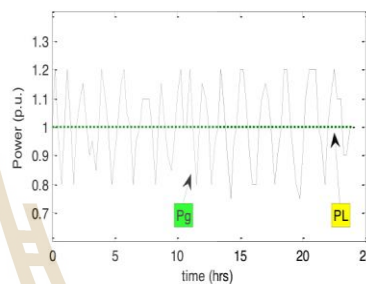


Fig. 3 Daily load and power grid requires microgrid

III. STANDALONE DC MICROGRID STRUCTURE AND MANAGEMENT

A. Standalone DC microgrid

The DC standalone microgrid consists the PV and wind turbine as shown in Fig. 2. The total power generation expressed in (1).

$$P_g = P_{WT} + P_{PV} \tag{1}$$

where P_{WT} is the wind power generation, and P_{PV} is the PV power generation.

Figure 3 shows the daily power generation and a load of the microgrid. The P_L is the power load or power grid requirement level. The power load requires a constant value for frequency or voltage regulation, and this is the important indicator in standalone microgrid [10]. In this study, assume the P_L is 10 kW, and the interval changing power is 15 minutes. Connecting the BESS and SC with the bidirectional converter was used as active topology in this paper.

B. Bidirectional buck-boost converter (BBBC)

The ESS requires the bidirectional DC-DC converter, as shown in Fig. 4, for charging and discharging operations. The power exchanges between microgrid and ESS by this converter. Due to the voltage at ESS side lower than microgrid, this converter can consider as buck and boost converter. In discharging (boost mode), the S2 is off and current flow from ESS to grid by controlling S1. On the other hand, in charging mode (buck mode), the S1 is off and current flow from the grid to ESS [10]. The microgrid needs some strategy to control the converter. In this work, limitation of the ramp rate power to control the system was studied.

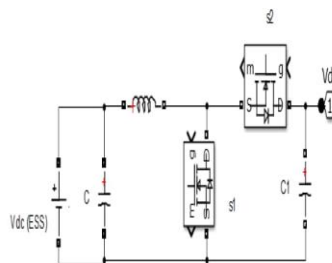


Fig. 4 Bidirectional buck-boost converter

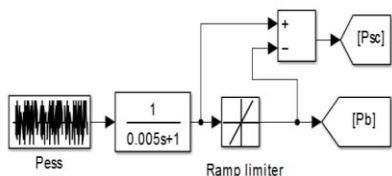


Fig. 5 Diagram of ramp rate limitation

C. Ramp rate limitation

The ramp rate limitation is the simple strategy to limit ramp rate of the signal. The rate of the signal is the slope of the signal expressed in (2).

$$rr = \frac{y(t+1) - y(t)}{\Delta t} \tag{2}$$

where $y(t+1)$ and $y(t)$ are the current and previous points, respectively. The upper rise (R) and down (D) rated limit fixed in the ramp limiter. If the rate of signal does not exceed the limits, then the signal can pass through the limiter. However, when the rate of the signal exceeds the limited constraints (R or D), the new signal point can determine by (3) and (4), respectively.

$$y(t+1) = R\Delta t + y(t) \tag{3}$$

$$y(t+1) = D\Delta t + y(t) \tag{4}$$

The application of ramp rate limitation in HESS management system as shown in Fig. 5. The input signal is the total required power of the ESS. The rapid change of power exchanged on the battery is limited by limiter to smooth power.

IV. SIMULATION AND RESULTS

A. Case 1: BESS

In this case, BESS only uses for charge/discharge power with the microgrid. The rated terminal voltage of BESS at low voltage side of the converter is 30 V. The required power of energy storage P_{ESS} operates by using BESS for giving the smooth power with the microgrid.

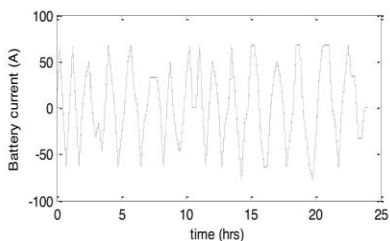


Fig. 6 Daily battery current

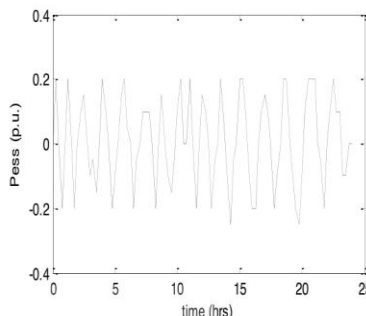


Fig. 7 Daily total power required of ESS

The simulation result for BESS with power generation and load profile from Fig. 2 is shown in Fig. 7. The power exchanged on BESS is high swing as same as the current of BESS in Fig. 6. The maximum current discharge is 78 A. In this case, rapid changing current and short lifespan of BESS leads the microgrid to unreliability [11].

B. Case 2: HESS

In this case, the power signals of ESS from measurement device pass through the limiter to limit the P_b signal. After that, the limiter sent a signal to control the bidirectional buck-boost converter of BESS. The remaining power sent the signal to control the bidirectional buck-boost converter of SC. In this work, the ramp rate powers set at 27 and -27 kW/s for upper R and D, respectively. The daily power exchanged of the BESS and SC are shown in Fig. 8 and two hours operation for clearly observe is shown in Fig. 9. Comparison with the case of BESS only, the SC has a quick response to the rapid power required. The BESS has low rate changed power. The daily profile current of HESS system as shown in Fig. 10, the maximum current of BESS and SC are 38 A and 140 A, respectively.

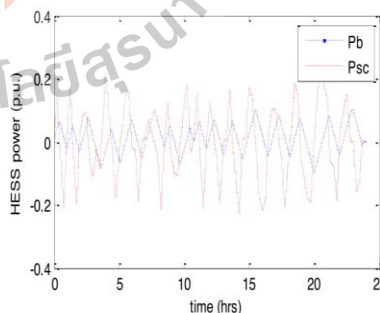


Fig.8 Daily HESS power

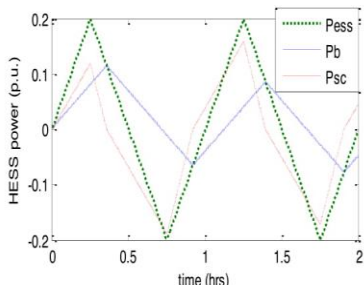


Fig. 9 HESS power in two hours of operation

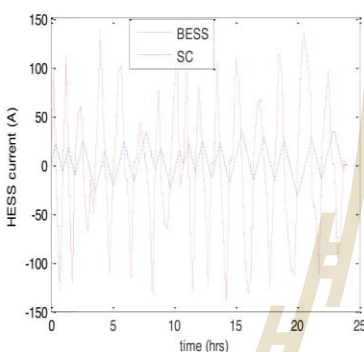


Fig. 10 Daily HESS current

V. CONCLUSION

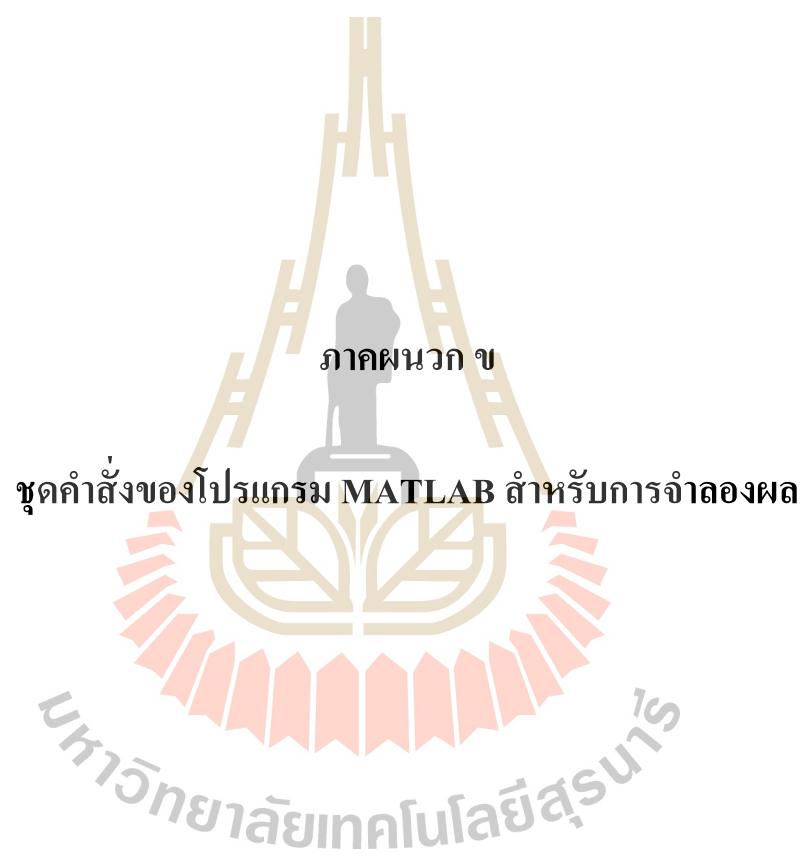
The battery-supercapacitor HESS is used to mitigate the intermittent of renewable generation in the microgrid. The HESS topology and its advantages are mentioned in this paper. From the property of ESS types, SC has a fast response with high power more than BESS but low energy density, this motivates to use HESS. The ramp rate limitation is the simple strategy to control HESS operation by limiting the rapid change of the power exchanged on BESS. The results showed the capability of SC that can charge/discharge at rapid change of current and high power, and the main power was support by BESS to ensure the reliability of microgrid for long time operation. This strategy can also extend the lifespan of BESS.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Suranaree University of Technology.

REFERENCES

- [1] EN. Hatziaargyriou, *Microgrid*, IEEE WILEY book, 2013.
- [2] D. Zarrilli and A. Giannitrapani, "Energy storage operation for voltage control in distribution networks: A receding horizon approach," *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 1, (Issue: 99), pp. 1–11, April 2017.
- [3] T. Kerdphol, Y. Qudaih, K. Hongesombut, and M. Watanabe, "Intelligent determination of a battery energy storage system size and location based on RBF neural networks for microgrids," *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 11 n. 1, 2016.
- [4] K. K. Mehmood, S. U. Khan, S. Lee, Z. M. Haider, M. K. Rafique, and C. Kim, "Optimal sizing and allocation of battery energy storage systems with wind and solar power DGs in a distribution network for voltage regulation considering the lifespan of batteries," *IET Renewable Power Generation*, 2016.
- [5] Z. brane, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, "Battery and supercapacitor for photovoltaic energy storage: fuzzy logic management," *IET Renewable Power Generation*, vol 11, issue 8, pp 1157-1165, July 2017.
- [6] U. Akram, M. Khalid, and S. Shafiq, "An Innovative Hybrid Wind-Solar and Battery-Supercapacitor Microgrid System—Development and Optimization," *IEEE Access*, doi 10.1109/access.2017.2767618, October 2017.
- [7] Y. Kim and N. Chang, "Hybrid Electrical Energy Storage Systems Design. Design and Management of Energy-Efficient Hybrid Electrical Energy Storage Systems," vol. 3, issue. 1, pp. 12-24, November 2016.
- [8] W. Jing, C. H. Lai, S. H. Wong, and M. L. Wong, "Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review," *IET Renewable Power Generation*, 11(4), 461-469, 2016.
- [9] W. Jing, C. Lai, W. Wong and Wong M, "Cost analysis of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for stand-alone PV systems," 4th IET Clean Energy and Technology Conference, 2016.
- [10] D. W. Gao, *Energy storage for the sustainable microgrid*. Amsterdam: Academic Press, 2015.
- [11] X. Wang, M. Yue, E. Muljadi and W. Gao, "Probabilistic Approach for Power Capacity Specification of Wind Energy Storage Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, NO. 2, April 2014.



ภาคผนวก ข

ชุดคำสั่งของโปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองผล

ชุดคำสั่งของโปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองผลที่ใช้ในงานวิจัย

โดย นายพินิจ วงศ์เดช สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2561

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

```
function f=ObjThesis(x) %ประกาศชื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์
%กำลังไฟฟ้าอินพุต (ข้อมูลนี้ได้ถูกเก็บไว้ในไฟล์งานชื่อ POWERinput.m)
Ppv=[]; %กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
Pwt=[]; %กำลังไฟฟ้าของกังหันลม
PL=[]; %กำลังไฟฟ้าของโหลด
Ph=PL-Ppv-Pwt; %ค่าส่วนต่างของกำลังไฟฟ้า
%การจัดสรรกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงาน
ts=120; %เวลาในการชักตัวอย่างของข้อมูล (2 นาที)
t1=(3600/ts)*24; %จำนวนครั้งของเวลาในการชักตัวอย่าง
%กรณีที่ 1-----
PB_ref=Ph; %กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของแบตเตอรี่
PSC_ref= Ph-PB_ref; %กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของตัวเก็บประจุ (SC)
%กรณีที่ 2-----
%fs= 1/ts; %ความถี่ในการชักตัวอย่าง
%fc= x(1); %ค่าความถี่ตัดคือตัวแปรที่ 1 ของวิธี PSO
%PB_ref=lowpass(Ph,fc,fs); %กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของแบตเตอรี่
%PSC_ref=Ph-PB_ref; %กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของตัวเก็บประจุ (SC)
%กรณีที่ 3-----
%fs= 1/ts; %ความถี่ในการชักตัวอย่าง
%fc= x(2); %ค่าความถี่ตัดคือตัวแปรที่ 2 ของวิธี PSO
%PB_ref=lowpass(Ph,fc,fs); %กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของแบตเตอรี่
%PSC_ref=Ph-PB_ref; %กำลังไฟฟ้าอ้างอิงของตัวเก็บประจุ (SC)
%-----
% figure(); %เพิ่มหน้าต่างเพื่อพล็อตกราฟ
% plot((1:1:t1)/30,[Ph;PB_ref;PSC_ref]/1000); %พล็อตกราฟของกำลังไฟฟ้าที่ถูกจัดสรร
% xlabel('time step')
% ylabel('Power')
%พารามิเตอร์ของระบบกักเก็บพลังงาน
nbc= 0.9; %ประสิทธิภาพการอัดประจุของแบตเตอรี่
```

```

nbd= 0.9; %ประสิทธิภาพการปล่อยประจุของแบตเตอรี่
nsc= 0.95; %ประสิทธิภาพการอัดประจุของตัวเก็บประจุ
nscd= 0.95; %ประสิทธิภาพการอัดประจุของตัวเก็บประจุ
DODb_max= 0.8; %ค่า DOD สูงสุดของแบตเตอรี่
DODb_min= 0.2; %ค่า DOD ต่ำสุดของแบตเตอรี่
DODsc_max= 0.9; %DOD of SC %ค่า DOD สูงสุดของตัวเก็บประจุ
DODsc_min= 0.1; %ค่า DOD ต่ำสุดของตัวเก็บประจุ
%การหาค่าลิ้งไฟฟ้าในการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน
EB1=0; %พลังงานไฟฟ้าเริ่มต้นของแบตเตอรี่
ESC1=0; %พลังงานไฟฟ้าเริ่มต้นของตัวเก็บประจุ
for i=1:1:t1
    if PB_ref(i)<0 %ตรวจสอบค่าลิ้งไฟฟ้าแบตเตอรี่ว่าน้อยกว่า 0
        PB(i)=PB_ref(i)*nbc; %ค่าลิ้งไฟฟ้าอัดประจุของแบตเตอรี่
        EB11(i)=EB1-PB_ref(i)*nbc*(ts/3600); %พลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่
    else
        PB(i)=PB_ref(i)/nbd; %ค่าลิ้งไฟฟ้าปล่อยประจุของแบตเตอรี่
        EB11(i)=EB1-PB_ref(i)/nbd*(ts/3600); %พลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่
    end
    EB1=EB11(i);
    if PSC_ref(i)<0 %ตรวจสอบค่าลิ้งไฟฟ้าแบตเตอรี่ว่าน้อยกว่า 0
        PSC(i)=PSC_ref(i)*nsc; %ค่าลิ้งไฟฟ้าอัดประจุของตัวเก็บประจุ
        ESC11(i)=ESC1-PSC_ref(i)*nsc*(ts/3600); %พลังงานไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
    else
        PSC(i)=PSC_ref(i)/nscd; %ค่าลิ้งไฟฟ้าปล่อยประจุของตัวเก็บประจุ
        ESC11(i)=ESC1-PSC_ref(i)/nscd*(ts/3600); %พลังงานไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
    end
    end
    ESC1=ESC11(i);
end
%การหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงาน
PB_rated=max(abs(PB)); %ค่าลิ้งไฟฟ้าพิกัดของแบตเตอรี่
PSC_rated=max(abs(PSC)); %ค่าลิ้งไฟฟ้าพิกัดของตัวเก็บประจุ
EB_based=max(EB11)-(min(EB11)); %พลังงานไฟฟ้าฐานของแบตเตอรี่
ESC_based=max(ESC11)-(min(ESC11)); %พลังงานไฟฟ้าฐานของตัวเก็บประจุ
EB_rated=EB_based/(DODb_max-DODb_min); %พลังงานไฟฟ้าพิกัดอย่างต่ำของแบตเตอรี่

```

```

ESC_rated=ESC_based/(DODsc_max-DODsc_min);    %พลังงานไฟฟ้าปกติของตัวเก็บประจุ
SOCb0=(DODb_max*max(EB11)-DODb_min...
*min(EB11))/(max(EB11)-min(EB11));          %สถานะการประจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่
%อายุการใช้งานของแบตเตอรี่
%กรณีที่ 1 และ 3-----
qB= x(1);                                     %ค่าการปรับขนาดแบตเตอรี่คือตัวแปรที่ 1
                                                %ของวิธี PSO
%กรณีที่ 2-----
%qB= 1.5228;                                 %ค่าการปรับขนาดแบตเตอรี่มีค่าคงที่
%-----
EB_orated=qB*EB_rated;                       %ขนาดแบตเตอรี่ที่ได้รับการปรับขนาด
EB2= SOCb0*EB_orated ;                       %พลังงานไฟฟ้าเริ่มต้นของแบตเตอรี่
SOCb(1)=EB2/EB_orated;                       %สถานะการประจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่
for i=1:1:t1
    if PB_ref(i)<0                             %ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าแบตเตอรี่ว่าน้อยกว่า 0
        EB21(i)=EB2-PB_ref(i)*nbc*(ts/3600); %พลังงานไฟฟ้าอัดประจุของแบตเตอรี่
    else
        EB21(i)=EB2-PB_ref(i)*nbd*(ts/3600); %เก็บค่าพลังงานไฟฟ้าปล่อยประจุของแบตเตอรี่
    end
        SOCb(i+1)=EB21(i)/EB_orated;          %เก็บค่าสถานะการประจุของแบตเตอรี่
        EB2=EB21(i);
end
% figure()                                    %เพิ่มหน้าต่างเพื่อพล็อตกราฟ
% plot(1:1:t1+1,[100*SOCb]);                  %พล็อตกราฟสถานะการประจุของแบตเตอรี่
% xlabel('time step (2min)')
% ylabel('SOC(%)')
DODb=100*(1-SOCb);                            %ค่าเปอร์เซ็นต์ DOD ของแบตเตอรี่
% figure();                                    %เพิ่มหน้าต่างเพื่อพล็อตกราฟ
% plot(1:1:t1+1,DODb);                        %พล็อตกราฟ DOD ของแบตเตอรี่
% xlabel('time step')
% ylabel('DODb')
%วิธีการนับแบบฝนตก
[C,hist,edges,rmm,idx] = rainflow(DODb);      %เรียกใช้ฟังก์ชันวิธีการนับแบบฝนตก
T = array2table(C,'VariableNames',...

```

```

{'Count','Range','Mean','Start','End'}); %เก็บค่าที่นับได้จากวิธีแบบฝนตก
% figure() %เพิ่มหน้าต่างเพื่อพล็อตกราฟ
% histogram('BinEdges','edges','BinCounts',sum(hist,2)) %พล็อตกราฟสถิติของจำนวนรอบที่นับได้
% xlabel('DOD%')
% ylabel('Number cycle count')
% dod_ref=10:10:100; %DOD ของแบตเตอรี่อ้างอิง
% ctf_ref=[7000,3800,2500,2000,1600,1200,...
800,700,600,500]; %จำนวนรอบของแบตเตอรี่อ้างอิง
% dod_test=0:1:100;
% CTF=1.316*10^4*exp(-0.135*dod)+4528*...
exp(-0.02312*dod); %ฟังก์ชันของจำนวนรอบการใช้งานแบตเตอรี่
% figure() %เพิ่มหน้าต่างเพื่อพล็อตกราฟ
% plot(dod_ref,ctf_ref,'*',dod_test,CTF,'-'); %พล็อตกราฟจำนวนรอบอ้างอิงและ
%ฟังก์ชันของจำนวนรอบการใช้งานแบตเตอรี่
% xlabel('DOD%')
% ylabel('CTF')
for i=1:length(C)
kk(i)=C(i,2);
Nct(i)=1.316*10^4*exp(-0.135*kk(i))+...
4528*exp(-0.02312*kk(i)); %ตรวจสอบค่า DOD ที่นับได้
Db(i)=C(i,1)/Nct(i); %ค่าการเสื่อมอายุของแบตเตอรี่
end
DB=365*sum(Db); %ผลรวมของค่าการเสื่อมอายุของแบตเตอรี่
Lb=1/DB; %อายุการใช้งานของแบตเตอรี่
%ค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงาน
PB_rated=PB_rated/1000; %ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่
EB_orated=EB_orated/1000; %ค่าพิกัดพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่
PSC_rated=PSC_rated/1000; %ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
ESC_rated=ESC_rated/1000; %ค่าพิกัดพลังงานไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
Lp= 20; %ระยะเวลาโครงการ
LSC=5; %กำหนดอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ
NRb=ceil(Lp/Lb-1); %จำนวนครั้งในการติดตั้งใหม่ของแบตเตอรี่
NRsc=ceil(Lp/LSC-1); %จำนวนครั้งในการติดตั้งใหม่ของตัวเก็บประจุ
d= 0.05; %ค่าอัตราการลดมูลค่าในแต่ละปี

```

kbp=300*32 ;	%ราคาเบตเตอร์ต่อขนาดกำลังไฟฟ้า
kbe= 150*32;	%ราคาเบตเตอร์ต่อขนาดพลังงานไฟฟ้า
kscp= 200*32;	%ราคาตัวเก็บประจุต่อขนาดกำลังไฟฟ้า
ksce=2000*32;	%ราคาตัวเก็บประจุขนาดพลังงานไฟฟ้า
kbm= 10*32;	%ราคาการบำรุงรักษาเบตเตอร์ต่อปี
kscm= 5*32;	%ราคาบำรุงรักษาตัวเก็บประจุต่อปี
Cbi=kbp*PB_rated+kbe*EB_orated;	%ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นของเบตเตอร์
Csci=kscp*PSC_rated+ksce*ESC_rated;	%ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นของตัวเก็บประจุ
Cbr0=0;	
if NRb==0	
Cbr=0;	
end	
for n=1:NRb	
Cbr=Cbr0+Cbi/(1+d)^(n*Lb);	%ค่าการติดตั้งใหม่ของเบตเตอร์
Cbr0=Cbr;	
end	
Cscr=Csci/(1+d)^5+Csci/(1+d)^10+Csci/(1+d)^15;	%ค่าการติดตั้งใหม่ของตัวเก็บประจุ
USW=((1+d)^Lp-1)/(Lp*(1+d)^Lp);	%ตัวปรับคูณ USW
Cbm=kbm*EB_orated*USW;	%ค่าบริการบำรุงรักษาเบตเตอร์
Cscm=kscm*ESC_rated*USW;	%ค่าบริการบำรุงรักษาตัวเก็บประจุ
Ct=Cbi+Csci+Cbr+Cscr+Cbm+Cscm;	%มูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายรวม
of= Ct;	%ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์
f=of;	%กำหนดฟังก์ชัน f คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์

คำสั่งของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค ที่มีคำสั่งพื้นฐานมาจาก (Alam, M. N., 2016) ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าการปรับขนาดของเบตเตอร์และค่าความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำ	

tic	%เริ่มจับเวลาในการประมวลผล
clc	%ลบการแสดงผลของจอหรือหน้าต่างคำสั่ง
clear	%ลบตัวแปรหรือฟังก์ชันทั้งหมดจากหน่วยความจำ
close all	%ปิดรูปภาพทั้งหมด
rng default	
LB=[1];	%ค่าขอบเขตล่างของตัวแปร q_b สำหรับกรณีที่ 1
UB=[5];	%ค่าขอบเขตบนของตัวแปร q_b สำหรับกรณีที่ 1

%LB=[10^-10];	%ค่าขอบเขตล่างของตัวแปร f_c สำหรับกรณีที่ 2
%UB=[0.00416];	%ค่าขอบเขตบนของตัวแปร f_c สำหรับกรณีที่ 2
%LB=[1, 10^-10];	%ค่าขอบเขตล่างของ q_b และ f_c สำหรับกรณีที่ 3
%UB=[5, 0.00416];	%ค่าขอบเขตบนของ q_b และ f_c สำหรับกรณีที่ 3
%พารามิเตอร์ของ PSO	
m=1;	%กำหนดจำนวนตัวแปรเท่ากับ 1 สำหรับกรณีที่ 1, 2
%m=2;	%กำหนดจำนวนตัวแปรเท่ากับ 2 สำหรับกรณีที่ 3
n=20;	%กำหนดจำนวนอนุภาคของ PSO
wmax=0.9;	%ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็วสูงสุด
wmin=0.4;	%ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็วต่ำสุด
c1=2;	%ค่าการถ่วงน้ำหนักการเรียนรู้ค่าที่ 1
c2=2;	%ค่าการถ่วงน้ำหนักการเรียนรู้ค่าที่ 2
maxite=200;	%รอบการคำนวณสูงสุดของ PSO
%โปรแกรมหลักของ PSO-----	เริ่มต้น
maxrun=3;	%จำนวนรอบที่ต้องการประมวลผล
for run=1:maxrun	%รอบของการประมวลผล
run	%แสดงรอบของการประมวลผล
%การหาตำแหน่งและความเร็วเริ่มต้นของอนุภาค-----	เริ่มต้น
for i=1:n	%สุ่มประชากรเริ่มต้นของฝูงอนุภาค
for j=1:m	
x0(i,j)=(LB(j)+rand()*(UB(j)-LB(j)));	
end	
end	
x=x0;	%ตำแหน่งของอนุภาคเริ่มต้น
v=0.1*x0;	%ความเร็วของอนุภาคเริ่มต้น
for i=1:n	%ประเมินค่าความฟิตของอนุภาคเริ่มต้นทุกตัว
f0(i,1)=ObjThesis(x0(i,:));	
end	
[fmin0,index0]=min(f0);	%หาค่าความฟิตที่มีค่าน้อยที่สุดในฝูงอนุภาคเริ่มต้น
pbest=x0;	%อนุภาคที่ดีที่สุดของแต่ละตัว (Personal best)
gbest=x0(index0,:);	%อนุภาคที่ดีที่สุด ในฝูง (Global best)
%การหาตำแหน่งและความเร็วเริ่มต้นของอนุภาค-----	สิ้นสุด
%กระบวนการคำนวณของ PSO-----	เริ่มต้น
ite=1;	%กำหนดรอบการคำนวณที่ 1

```

tolerance=1; %กำหนดตัวแปรค่าความผิดพลาด
while ite<=maxite && tolerance>10^-12 %ตรวจสอบรอบการคำนวณและค่าความผิดพลาด
    w=wmax-(wmax-wmin)*ite/maxite; %ปรับปรุงค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็ว
    for i=1:n %ปรับปรุงความเร็วของอนุภาคทุกตัว
        for j=1:m
            v(i,j)=w*v(i,j)+c1*rand()*(pbest(i,j)-x(i,j))...
            +c2*rand()*(gbest(1,j)-x(i,j));
        end
    end
    for i=1:n %ปรับปรุงตำแหน่งของอนุภาคทุกตัว
        for j=1:m
            x(i,j)=x(i,j)+v(i,j);
        end
    end
    for i=1:n %ตรวจสอบและปรับค่าตัวแปรให้อยู่ในขอบเขต
        for j=1:m
            if x(i,j)<LB(j)
                x(i,j)=LB(j);
            elseif x(i,j)>UB(j)
                x(i,j)=UB(j);
            end
        end
    end
    for i=1:n %ประเมินค่าความฟิตของอนุภาคทุกตัว
        f(i,1)=ObjThesis(x(i,:));
    end
    for i=1:n %ปรับปรุงค่าอนุภาคที่ดีที่สุดของแต่ละตัว (Personal best)
        if f(i,1)<f0(i,1) %และประเมินค่าความฟิตของแต่ละอนุภาค
            pbest(i,:)=x(i,:);
            f0(i,1)=f(i,1);
        end
    end
    [fmin,index]=min(f0); %หาค่าความฟิตที่มีค่าน้อยที่สุด
    ffin(ite,run)=fmin; %การเก็บค่าความฟิตที่ดีที่สุด

```

```

ffite(run)=ite; %การเก็บค่ารอบการคำนวณของรอบการประมวลผล
if fmin<fmin0 %เปรียบเทียบค่าความฟิต
gbest=pbest(index,:); %และปรับปรุงอนุภาคที่ดีที่สุดใฝูง
fmin0=fmin; %และปรับปรุงค่าความฟิต
end
%การแสดงผลการคำนวณ ในแต่ละรอบการคำนวณ
if ite==1 %ตรวจสอบว่าเป็นรอบการคำนวณที่ 1
disp(sprintf('Iteration Best particle Objective fun')); %แสดงหัวข้อสำหรับใช้แสดงผลในหน้าต่างคำสั่ง
end
disp(sprintf('%8g %8g %8.4f',ite,index,fmin0)); %แสดงค่ารอบการคำนวณ ตำแหน่งและค่าความฟิต
ite=ite+1; %รอบการคำนวณถัดไป
end
%กระบวนการคำนวณของ PSO-----สิ้นสุด
gbest; %อนุภาคที่ดีที่สุดใฝูง
fvalue=ObjThesis(gbest); %ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอนุภาคที่ดีที่สุดใฝูง
fff(run)=fvalue; %เก็บค่าความฟิตในแต่ละรอบการประมวลผล
rgbest(run,:)=gbest; %เก็บค่าอนุภาคที่ดีที่สุดใแต่ละรอบการประมวลผล
end
%โปรแกรมหลักของ PSO-----สิ้นสุด
%แสดงผลเฉลยที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบใแต่ละรอบการประมวลผล
disp(sprintf('\n'));
disp(sprintf('Final Results-----'));
[bestfun,bestrun]=min(fff) %แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดและ
%แสดงรอบการประมวลผลที่ดีที่สุด
best_variables=rgbest(bestrun,:) %แสดงค่าอนุภาคที่ดีที่สุดใได้จาก
%รอบการประมวลผลที่ดีที่สุด
toc %สิ้นสุดการจับเวลาใการประมวลผล
% แสดงกราฟการลู่เข้าหาคำตอบของ PSO
plot(ffmin(1:ffite(bestrun),bestrun),'-k'); %พล็อตกราฟการลู่เข้าหาคำตอบของ PSO
xlabel('รอบการคำนวณ'); %กำหนดชื่อของแกนแนวนอน
ylabel('ฟังก์ชันวัตถุประสงค์'); %กำหนดชื่อของแกนแนวตั้ง
title('การลู่เข้าหาคำตอบของ PSO'); %กำหนดชื่อกราฟการลู่เข้าหาคำตอบของ PSO

```

ประวัติผู้เขียน

นายพินิจ วงศ์เดช เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2538 จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2560 โดยขณะศึกษาได้จัดทำโครงการเรื่องการควบคุมมือกลไร้สาย ต่อมาในปีเดียวกันนี้ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนกิตติบัณฑิตรศึกษาจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ปฏิบัติงานเป็นผู้ช่วยสอนในวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มีความสนใจศึกษาในด้านการจัดการพลังงานของไมโครกริดที่ใช้ พลังงานหมุนเวียนและระบบกักเก็บพลังงาน โดยมีผลงานตีพิมพ์และเอกสารการประชุมทาง วิชาการดังแสดงไว้ในภาคผนวก

