กรณีศึกษาการใช้ระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังเพื่อรักษาความถี่ของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแยกโดดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

น.ส.มัชฌิมาศ เขียวคำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Case Study on the Application of Flywheel Energy Storage System for Frequency Regulation of Islanded Amphoe-Mueang Mae Hong Son Microgrid

Miss Mutchimas Kheawcum

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กรณีศึกษาการใช้ระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังเพื่อรักษาความถี่ของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแยกโดดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน
โดย	น.ส.มัชฌิมาศ เขียวคำ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

-- คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

-- ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

-- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์)

-- กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)

-- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.นิสัย เฟื่องเวโรจน์สกุล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

มัชฌิมาศ เขียวคำ : กรณีศึกษาการใช้ระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังเพื่อรักษาความถี่ของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแยกโดดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน. (A Case Study on the Application of Flywheel Energy Storage System for Frequency Regulation of Islanded Amphoe-Mueang Mae Hong Son Microgrid) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์

ด้วยข้อจำกัดเชิงพื้นที่ของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน หากเกิดเหตุขัดข้องในระบบสายส่งที่จ่ายไฟฟ้าให้กับอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนจะเข้าสู่การทำงานในสภาวะแยกโดด และพึ่งพาการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายในพื้นที่เพื่อจ่ายไฟให้เพียงพอตามความต้องการของโหลด ในสถานการณ์ดังกล่าวระบบไฟฟ้าจะมีความอ่อนไหวต่อความผันผวนของโหลดและแหล่งจ่ายในพื้นที่เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะความถี่ของระบบไฟฟ้าเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งที่ควรคำนึงถึง เพราะมีระบบไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนเร็วและสูงอย่างพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ รวมถึงความผันผวนของโหลดผู้ใช้ไฟร่วมด้วย ระบบแบตเตอรี่มักเป็นตัวเลือกที่นำมาใช้จัดการความผันผวนที่เกิดขึ้น แต่หากแบตเตอรี่ต้องรองรับภาระความผันผวนเร็วและสูง จะส่งผลให้ขนาดแบตเตอรี่ที่ติดตั้งมีขนาดใหญ่รวมทั้งความถี่การใช้งานที่สูงก็จะทำให้อายุแบตเตอรี่สั้นลง งานวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ระบบล้อตุนกำลังร่วมกับระบบแบตเตอรี่ เพื่อรักษาความถี่ของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในสภาวะแยกโดด โดยกำหนดให้รับภาระในส่วนที่มีความผันผวนเร็ว ระบบล้อตุนกำลังเป็นระบบกักเก็บพลังงานทางกลที่มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องกำลังไฟฟ้าสูง การตอบสนองรวดเร็ว และอายุการใช้งานยาวนาน จึงเหมาะสำหรับการใช้งานเชิงกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้น ๆ อย่างปัญหาความผันผวนของความถี่ของระบบไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาความเบี่ยงเบนความถี่ในระบบไฟฟ้า 2 แนวทาง คือ 1) การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบล้อตุนกำลังร่วมกับระบบแบตเตอรี่และโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก สำหรับความผันผวนเร็ว ปานกลาง และช้า ตามลำดับ และ 2) การปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบล้อตุนกำลังและระบบแบตเตอรี่ เพื่อลดความผันผวนของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาจะอาศัยข้อมูลจริงของแหล่งผลิตไฟฟ้าและโหลดในพื้นที่ เพื่อออกแบบแนวทางที่เหมาะสมในการประสานการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน ผลการจำลองด้วยโปรแกรม DIgSILENT แสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบล้อตุนกำลังร่วมกับแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่มีอยู่ในพื้นที่สามารถช่วยรักษาความถี่ของระบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน และการใช้ระบบล้อตุนกำลังเพื่อรองรับความผันผวนเร็วทดแทนภาระงานเดิมของแบตเตอรี่ ทำให้ระบบล้อตุนกำลังที่ใช้มีขนาดเล็กและสามารถช่วยลดขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่ รวมถึงลดรอบการทำงานและความเสื่อมจากการใช้งานที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ได้ ส่งผลให้อายุการทำงานของแบตเตอรี่ยาวนานขึ้น

สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต	
ปีการศึกษา	2563	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6170393921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Flywheel energy storage system, Islanded microgrid, Frequency regulation, Load frequency control

Mutchimas Kheawcum : A Case Study on the Application of Flywheel Energy Storage System for Frequency Regulation of Islanded Amphoe-Mueang Mae Hong Son Microgrid. Advisor: Asst. Prof. SOMBOON SANGWONGWANICH, Ph.D.

Due to the geographical limitations of Amphoe Mueang Mae Hong Son (MHS), its electrical power system is forced to operate as an islanded microgrid when there is a fault in the transmission system that supplies the electricity to MHS area. Under such a situation, the electrical system will rely solely on the existing energy resources in the area to supply the required electricity demanded by the loads, and will be highly sensitive to the fluctuations of the loads and the generations in the area. One of the most important issues for the islanded microgrid of Amphoe Mueang Mae Hong Son is the frequency deviation caused by the fast and highly fluctuating solar power and the variation of load demand. Battery energy storage system (BESS) is the popular solution to handle the above issue. However, when BESS is assigned to be responsible for fast and high fluctuations, it may lead to large sizing, high usage rate, and dramatically shortened lifespan of BESS. This thesis proposes, therefore, to apply a flywheel energy storage system (FESS) to accompany BESS for frequency regulation of the islanded MHS microgrid. FESS is a mechanical energy storage system with remarkable attributes of high energy density, fast response, and long lifetime. So, it is suitable for a short-term power application such as the problem of frequency deviation. In this thesis, two approaches are adopted for applying FESS to alleviate the solar and load variation problem: 1) the load frequency control (LFC) using FESS combined with BESS and a small hydro power plant for fast, medium, and slow variations, respectively, and 2) solar power smoothing using FESS and BESS. The study is carried out based on the actual data of loads and local power plants to design the appropriate coordination of the energy storage systems in the area. The results obtained from the simulation by DIgSILENT software show that using FESS in cooperation with the existing generation resources can suppress the frequency deviation within the standard. Moreover, applying FESS only for the fast fluctuations results in small sizing of FESS, reduction of battery sizing, and prolonging the battery lifetime.

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง เนื่องด้วยความกรุณาช่วยเหลือ และความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา แนวทางต่างๆ รวมถึงตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิทยานิพนธ์และต่อตัวผู้ทำวิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด รวมถึงคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน และศาสตรจารย์ ดร.นิสัย เฟื่องเวโรจน์สกุล ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ได้ส่งเสริมและสนับสนุนโอกาสในการศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พร้อมเงินทุนสนับสนุนการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงเอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อนนิสิตระดับบัณฑิตศึกษาห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ที่ช่วยเหลือสนับสนุนทั้งด้านกำลังใจและกำลังทรัพย์อย่างเต็มกำลังเสมอมา คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิทยานิพนธ์นี้ ผู้ทำวิจัยขอมอบให้บิดามารดา ครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความความรู้ และให้ความเมตตากรุณาแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด และเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

มัชฌิมาศ เขียวคำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ง

กิตติกรรมประกาศ .... จ

สารบัญ .... ฉ

สารบัญตาราง .... ฌ

สารบัญรูปภาพ .... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 4

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ 4

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการงานวิจัย 5

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

2.2 ระเบียบการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 10

2.3 ข้อมูลทั่วไปของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง 10

2.3.1) ส่วนประกอบของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง 12

2.3.2) คุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง 13

2.3.3) ตัวอย่างการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังในระบบไฟฟ้า 13

2.4 แนวทางการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ 14

บทที่ 3 ข้อมูลทั่วไปและระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน 16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1 ข้อมูลทั่วไปของจังหวัดแม่ฮ่องสอน......16
3.2 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน......17
3.2.1) โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา......19
3.2.2) โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง......20
บทที่ 4 แบบจำลองระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนและแนวทางการควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังที่นำเสนอ......21
4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในสภาวะแยกโดด......22
4.2 แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา......23
4.3 แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง......25
4.4 แบบจำลองระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์......26
4.5 แบบจำลองของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์......29
4.6 แบบจำลองระบบควบคุมความถี่โหลดที่ศึกษาในงานวิทยานิพนธ์......33
4.7 แบบจำลองระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ศึกษาในงานวิทยานิพนธ์......36
4.8 การวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานระบบแบตเตอรี่......38
บทที่ 5 ผลการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่ติดตั้ง ระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง......42
5.1 ผลการจำลองแต่ละกรณีศึกษา......46
5.2 ผลต่อการทำงานของระบบแบตเตอรี่เมื่อประยุกต์ใช้ระบบล้อตุนกำลังในการควบคุมความถี่โหลด......51
5.3 ผลจากการปรับค่าคงที่เวลาสำหรับการควบคุมความถี่โหลดของระบบล้อตุนกำลัง......52
5.4 ผลต่อการทำงานของระบบแบตเตอรี่เมื่อใช้ระบบล้อตุนกำลังในการควบคุมความถี่โหลดร่วมกับการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้า......53
5.5 ผลการประยุกต์ใช้ระบบล้อตุนกำลังต่อความเสื่อมสภาพอายุการใช้งานของแบตเตอรี่......56
5.5.1)การประมาณรอบการใช้งานของแบตเตอรี่โดยวิธี Equivalent Full Cycles (EFCs).56

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.5.2) การประมาณรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค Rainflow Cycle Counting .57

5.6 ผลสรุปการจำลองและความเสื่อมสภาพการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ เมื่อใช้ระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลดและการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้า 60

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 64

บรรณานุกรม 66

ประวัติผู้เขียน 69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แหล่งผลิตไฟฟ้าภายในอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน 18

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา 25

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองของระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ 29

ตารางที่ 4.3 คุณลักษณะจำเพาะของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง 33

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง 33

ตารางที่ 5.1 การทำงานของโรงไฟฟ้าพลังน้ำและระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง และแบตเตอรี่ในแต่ละกรณีศึกษา 42

ตารางที่ 5.2 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบ 44

ตารางที่ 5.3 สรุปผลการจำลองแต่ละกรณีศึกษา 50

ตารางที่ 5.4 อายุการใช้งานโดยประมาณจากวิธี EFCs 57

ตารางที่ 5.5 ค่าความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ 60

ตารางที่ 5.6 สรุปขนาดติดตั้งของระบบล้อตุนกำลังและระบบแบตเตอรี่ในแต่ละกรณีศึกษา และความเสื่อมสภาพการใช้งานระบบแบตเตอรี่ 61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แบบจำลองทั่วไปของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง....10

รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง....12

รูปที่ 2.3 การนับรอบแบบ 3 จุด *(3-point cycle counting)* โดยวิธีการ Rainflow cycle counting [13]....15

รูปที่ 3.1 แผนที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน....16

รูปที่ 3.2 พื้นที่การจ่ายไฟของจังหวัดแม่ฮ่องสอนและเส้นทางระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ ของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน....17

รูปที่ 3.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน....18

รูปที่ 3.4 ค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในสภาวะแยกโดด ณ วันที่ 7 กันยายน 2563....19

รูปที่ 3.5 ข้อมูลลักษณะความเข้มแสงอาทิตย์และกำลังผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ผาบ่อง ในกรณีขยายขนาดติดตั้งเป็น 3.5 เมกะวัตต์ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้....20

รูปที่ 4.1 แผนภาพแนวทางการวิจัยที่นำเสนอ....21

รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงการควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละชนิด....22

รูปที่ 4.3 แบบจำลองระบบไฟฟ้าอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนใน โปรแกรม PowerFactory (DIgSILENT)....23

รูปที่ 4.4 แบบจำลองระบบควบคุมโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา....24

รูปที่ 4.5 แบบจำลองระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (AVR)....24

รูปที่ 4.6 แบบจำลองระบบควบคุมกังหันของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ (GOV)....24

รูปที่ 4.7 แบบจำลองระบบควบคุมโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง....25

รูปที่ 4.8 แบบจำลองทั่วไปของระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่....26

รูปที่ 4.9 วงวจรสมมูลแบบ Rint Model ของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน....27

รูปที่ 4.10 แรงดันและกระแสไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ 27

รูปที่ 4.11 แบบจำลองของแบตเตอรี่ 28

รูปที่ 4.12 แบบจำลองของแบตเตอรี่ ที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT 28

รูปที่ 4.13 แบบจำลองภายในของ Simple LIB Model ที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT 29

รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ (Sensorless Vector Control) สำหรับระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง 31

รูปที่ 4.15 แบบจำลองของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง ที่ใช้หลักการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ 31

รูปที่ 4.16 แบบจำลองระบบล้อตุนกำลัง 32

รูปที่ 4.17 แบบจำลองของระบบล้อตุนกำลังที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT 32

รูปที่ 4.18 ระบบควบคุมความถี่โหลดด้วยโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา ระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ และระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง 34

รูปที่ 4.19 การแบ่งย่านการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละชนิด ในการจัดการความผันผวนของความถี่ 35

รูปที่ 4.20 ระบบควบคุมความถี่โหลดที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT 35

รูปที่ 4.21 แผนภาพแสดงการแยกองค์ประกอบความผันผวนเพื่อการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้า ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยระบบแบตเตอรี่และระบบล้อตุนกำลัง 36

รูปที่ 4.22 การแบ่งย่านการทำงานในการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละชนิด 37

รูปที่ 4.23 ระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT 37

รูปที่ 4.24 การประสานการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละชนิด สำหรับการควบคุมความถี่โหลด และการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 38

รูปที่ 4.25 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ 39

รูปที่ 4.26 Rainflow counting algorithm [17] 40

รูปที่ 4.27 แผนภาพวงจรชีวิตของแบตเตอรี่ (Cycle-life curve) ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ 41

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.28 แผนภาพวงจรชีวิตของแบตเตอรี่ (Cycle-life curve) ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้.............41
รูปที่ 5.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในสภาวะแยกโดด 43
รูปที่ 5.2 ตำแหน่งตัวแปรที่ใช้ในระบบควบคุมที่ศึกษา 43
รูปที่ 5.3 ย่านการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงา ระบบแบตเตอรี่ และระบบล้อตุนกำลัง..45
รูปที่ 5.4 ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 1 (ไม่มีระบบล้อตุนกำลังในระบบไฟฟ้า)................................46
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2.1...47
รูปที่ 5.6 ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2.2...48
รูปที่ 5.7 ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 3 (มีระบบล้อตุนกำลังในระบบไฟฟ้า สำหรับควบคุม............49
รูปที่ 5.8 สัญญาณคำสั่งสำหรับควบคุมความถี่โหลดของระบบแบตเตอรี่ (กรณีที่ 1 และ 2) 51
รูปที่ 5.9 กำลังผลิตไฟฟ้าขาออกของระบบแบตเตอรี่ (กรณีที่ 1 และ 2)..52
รูปที่ 5.10 สัญญาณคำสั่งสำหรับควบคุมความถี่โหลดของระบบล้อตุนกำลัง (กรณีที่ 2)..................52
รูปที่ 5.11 กำลังไฟฟ้าขาออกของระบบล้อตุนกำลัง (กรณีที่ 2)..53
รูปที่ 5.12 กำลังไฟฟ้าขาออกของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้า โดยระบบกักเก็บพลังงาน (กรณีที่ 2.2 และ 3)..54
รูปที่ 5.13 สัญญาณคำสั่งการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่ (กรณีที่ 2.2 และ 3)....54
รูปที่ 5.14 กำลังไฟฟ้าขาออกของระบบแบตเตอรี่ (กรณีที่ 2.2 และ 3) 54
รูปที่ 5.15 สัญญาณคำสั่งการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของระบบล้อตุนกำลัง (กรณีที่ 3) 55
รูปที่ 5.16 กำลังไฟฟ้าขาออกของระบบล้อตุนกำลัง (กรณีที่ 2.2 และ 3)...55
รูปที่ 5.17 จำนวนรอบการทำงานของแบตเตอรี่โดยวิธี EFCs...56
รูปที่ 5.18 สถานะการประจุของแบตเตอรี่ในกรณีต่างๆ 57
รูปที่ 5.19 การกระจายตัวของจำนวนรอบการทำงานในแต่ละช่วงความลึก ∆DOD (%) 58
รูปที่ 5.20 แนวโน้มรอบการทำงานของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงความลึก ∆DOD (%)........................59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหาในระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จังหวัดแม่ฮ่องสอนตั้งอยู่ทางภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ภูมิประเทศโดยทั่วไปเป็นภูเขาสลับซับซ้อนและพื้นที่ป่าอนุรักษ์ อีกทั้งยังมีภัยธรรมชาติในแต่ละฤดูกาล ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องบ่อยครั้งและนำไปสู่เหตุการณ์ไฟดับบริเวณกว้างภายในจังหวัดแม่ฮ่องสอน อย่างไรก็ตามสาเหตุความผิดพร่องส่วนใหญ่ มักเกิดจากต้นไม้พาดผ่านสายไฟฟ้า ประกอบกับเส้นทางในพื้นที่มีความลาดชันและค่อนข้างคดเคี้ยวจึงเพิ่มความยากลำบากต่อการเดินทางเข้าแก้ไขจุดผิดพร่อง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้จังหวัดแม่ฮ่องสอนเป็นจังหวัดที่มีดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าต่ำที่สุด สร้างผลกระทบต่อความความมั่นคงของระบบไฟฟ้าและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าภายในพื้นที่จังหวัดแม่ฮ่องสอนเป็นอย่างมาก อีกทั้งมีผลต่อเนื่องในด้านคุณภาพชีวิตของประชากรและเศรษฐกิจภายในจังหวัดอีกด้วย

เพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้น อำเภอเมือง จังหวัดแม่ฮ่องสอนจึงได้รับพิจารณาดำเนินการระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก (Microgrid) ในนาม “โครงการนำร่องระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะจังหวัดแม่ฮ่องสอน (Pilot Smart Grid Project in Amphoe Mueang Mae Hong Son)” [1] เพิ่มความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า อีกทั้งเพื่อเป็นต้นแบบจังหวัดสีเขียวตามนโยบายของกระทรวงพลังงานและของจังหวัดแม่ฮ่องสอน ลดการพึ่งพาพลังงานเชื้อเพลิงจากน้ำมันดีเซล เพิ่มการพึ่งพาตนเองด้วยพลังงานหมุนเวียนภายในพื้นที่ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พร้อมทั้งติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและเสริมความเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามด้วยเส้นทางสายส่ง 115 กิโลโวลต์ที่ต้องพาดผ่านบริเวณป่าไม้ ก็ยังคงเป็นสาเหตุให้เกิดความขัดข้องอยู่บ่อยครั้ง จึงเกิดแนวคิดปรับปรุงให้ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนเป็นระบบไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแยกโดด (Islanded microgrid) เพื่อสามารถบริหาร

จัดการการใช้ไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายในพื้นที่ได้พอเพียงตามความต้องการ ลดการพึ่งพาพลังงานจากภายนอก โดยแหล่งผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ประกอบด้วย โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาขนาด 10 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขนาด 500 กิโลวัตต์ อนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่องขนาด 850 กิโลวัตต์ อนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.85 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอนขนาด 5.4 เมกะวัตต์ แผนงานติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ขนาด 4 เมกะวัตต์ / 1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง และมีโหลดรวมสูงสุดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนประมาณ 11 - 12 เมกะวัตต์ อย่างไรก็ตาม เมื่ออยู่ในสภาวะแยกโดด และมีแหล่งพลังงานหมุนเวียนภายในระบบ สิ่งที่ต้องคำนึงคือเรื่องเสถียรภาพไฟฟ้าโดยเฉพาะปัญหาความถี่ในระบบไฟฟ้า ที่มีสาเหตุมาจากความผันผวนของโหลด รวมถึงแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ภายในพื้นที่ ที่อาจทำให้ความถี่เกินกว่าค่ามาตรฐานได้

จากปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปัญหาความผันผวนของความถี่ระบบไฟฟ้าขณะอยู่ในสภาวะแยกโดดของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กในอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน คือ ความผันผวนของโหลดในระบบและกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผาบ่อง แนวทางการแก้ปัญหาความเบี่ยงเบนของความถี่ในระบบไฟฟ้าขนาดเล็กจึงอาจพิจารณาได้สองวิธี คือ 1) วิธีการตรวจวัดความเบี่ยงเบนของความถี่ที่เกิดขึ้น แล้วนำข้อมูลนั้นมากำหนดหรือปรับแต่งกำลังผลิตของโรงไฟฟ้าในพื้นที่ เพื่อดึงให้ความถี่ของระบบกลับเข้ามาอยู่ในย่านที่ต้องการ วิธีการนี้เรียกโดยทั่วไปว่า วิธีการควบคุมความถี่โหลด (Load frequency control) วิธีนี้เป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการจัดการกับความเบี่ยงเบนของความถี่ที่เนื่องมาจากความผันผวนของโหลดเพราะความผันผวนของโหลดเป็นสิ่งที่ปกติเราไม่สามารถตรวจวัดได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องพิจารณาจากผลหรือความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้ระบบที่ใช้วิธีการนี้จะมีลักษณะแบบป้อนกลับทำให้ต้องพิจารณาเรื่องเสถียรภาพด้วยในการออกแบบตัวควบคุม และ 2) วิธีการแก้ความผันผวนของแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งวิธีนี้จะเป็นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุจึงเหมาะสมและง่ายกว่าวิธีแรก วิธีการนี้เรามักเรียกว่า การปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของพลังงงานแสงอาทิตย์ (Solar smoothing) และมีลักษณะเป็นการชดเชยแบบป้อนไปหน้าไม่มีการย้อนกลับ จึงไม่มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพเหมือนวิธีแรก

โดยทั่วไประบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ (Battery energy storage system; BESS) มักถูกพิจารณาเพื่อติดตั้งในระบบไฟฟ้าสำหรับการแก้ไขปัญหาความเบี่ยงเบนของความถี่นี้ เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในเรื่องอายุการใช้งาน และการตอบสนองได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตามระบบแบตเตอรี่ก็มีข้อเสียเปรียบในเรื่องวัสดุที่ใช้ในการผลิตเป็น

เคมีภัณฑ์ที่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและยากต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) อีกทั้งต้องการการบำรุงรักษาตามระยะ และมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานจำกัด

ในการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา [2] มีการนำเสนอการใช้ระบบกักเก็บพลังงานมารองรับความผันผวนของความถี่ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าขนาดเล็กที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน โดยวิธีการควบคุมความถี่จะอาศัย โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงาสำหรับความผันผวนช้า และใช้ระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่สำหรับความผันผวนเร็ว อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดความผันผวนเร็วบ่อยครั้ง จะทำให้แบตเตอรี่มีการทำงานเพื่ออัดหรือคายประจุบ่อยครั้ง ส่งผลเสียต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่อย่างมาก รวมทั้งความผันผวนเร็วซึ่งอาจจะมีระยะเวลาสั้นแต่มีค่าสูงทำให้ต้องใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่ด้วย นอกจากนั้นเนื่องด้วยกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีความผันผวนสูงเพราะแปรผันตามสภาพท้องฟ้า ซึ่งบางครั้งอาจมีก้อนเมฆบดบังสลับกับฟ้าโปร่งอย่างรวดเร็ว หากใช้แบตเตอรี่รองรับเพียงอย่างเดียว จะส่งผลให้แบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดใหญ่ด้วยเช่นกัน

จากการศึกษาและเปรียบเทียบชนิดของระบบกักเก็บพลังงาน พบว่าระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง (Flywheel energy storage system; FESS) เป็นเทคโนโลยีที่มีความน่าสนใจ คือเป็นระบบกักเก็บพลังงานที่มีอายุการใช้งานยาวนาน (มากกว่า 20 ปี) มีการตอบสนองได้รวดเร็ว ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ มีประสิทธิภาพการทำงานสูง มีช่วงอุณหภูมิการทำงานกว้าง และเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้คุณสมบัติที่สำคัญของระบบล้อตุนกำลังคือ กำลังไฟฟ้าสูง แต่ความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าต่ำ จึงทำให้ระบบล้อตุนกำลังเหมาะสำหรับการใช้งานเชิงกำลังไฟฟ้า (Power applications) เช่น การแก้ไขปัญหาความผันผวนความถี่ในระบบไฟฟ้า การควบคุมแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงมีเป้าหมายที่จะศึกษาและนำเสนอความเป็นไปได้ในการใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยล้อตุนกำลังเพื่อรักษาคุณภาพไฟฟ้าในด้านความถี่ของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กในสภาวะแยกโดดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ให้เป็นไปตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยจะประยุกต์ใช้ระบบล้อตุนกำลังร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานชนิดอื่นที่มีในระบบ ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงาและระบบแบตเตอรี่ งานวิทยานิพนธ์จะอาศัยข้อมูลจริงของแหล่งผลิตไฟฟ้าและโหลดในพื้นที่ในการออกแบบการประสานการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน โดยที่ระบบล้อตุนกำลังจะรับผิดชอบเฉพาะความผันผวนของความถี่ที่รวดเร็วทดแทนการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ในย่านนี้ เพื่อลดภาระของระบบแบตเตอรี่รวมทั้งลดจำนวน

รอบการอัดประจุและคายประจุของระบบแบตเตอรี่ ทำให้แบตเตอรี่ที่จำเป็นมีขนาดเล็กลงและมีอายุการใช้งานที่ยาวขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำระบบล้อตุนกำลัง มาใช้งานในระบบไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแยกโดดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานชนิดอื่นที่มีอยู่ ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงาและระบบแบตเตอรี่ โดยมีเป้าหมายเพื่อรักษาความถี่ของระบบไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐานของ กฟภ. และลดขนาดและยืดอายุการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องติดตั้ง โดยอาศัยข้อมูลจริงของแหล่งผลิตไฟฟ้าและโหลดในพื้นที่ในการศึกษา

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1) ศึกษาแนวทางการประสานการใช้งานระบบล้อตุนกำลังสำหรับระบบไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแยกโดดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงาและระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ เพื่อรักษาความถี่ของระบบไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐานของ กฟภ. โดยอาศัยการแบ่งองค์ประกอบเชิงความถี่ของค่าความเบี่ยงเบนความถี่ในระบบ
2) ศึกษาแนวทางการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยล้อตุนกำลังร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ เพื่อลดขนาดของแบตเตอรี่ที่จำเป็นในฟังก์ชันปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
3) ศึกษาหาขนาดกำลังและพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานด้วยล้อตุนกำลังและระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากผลการจำลอง ที่อ้างอิงข้อมูลระบบไฟฟ้าอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนปี พ.ศ. 2560 ข้อมูลโหลดราย 10 วินาที ปี พ.ศ. 2563 ของสถานีไฟฟ้าแม่ฮ่องสอน และข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์ราย 10 วินาที จากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง ปี พ.ศ. 2559

ทั้งนี้ระบบไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแยกโดดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 1) โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาขนาด 10 เมกะวัตต์ 2) โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขนาด 3.5 เมกะวัตต์ 3) ระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ขนาด 4 เมกะวัตต์ / 1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง 4) โครงข่ายระบบจำหน่ายในเขตพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน และ 5) โหลดที่

กระจายตัวตามสายป้อนต่าง ๆ ของสถานีไฟฟ้าแม่ฮ่องสอน โดยมีโหลดรวมสูงสุดประมาณ 6.5 เมกะวัตต์

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการงานวิจัย

1) ศึกษาข้อมูล คุณลักษณะ หลักการทำงาน และแบบจำลองของระบบล้อตุนกำลัง รวมถึงตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้า
2) รวบรวมข้อมูลระบบล้อตุนกำลัง และศึกษาหาแนวทางการประยุกต์ใช้ระบบล้อตุนกำลังที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าขนาดเล็กอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน
3) ศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความถี่โหลดของระบบไฟฟ้า รวมถึงการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือมีความผันผวนสูง
4) ออกแบบระบบควบคุมความถี่โหลด ให้มีการทำงานร่วมกันของระบบล้อตุนกำลัง ระบบแบตเตอรี่ และโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา
5) ออกแบบระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงงานแสงอาทิตย์ โดยให้ระบบล้อตุนกำลังทำงานร่วมกับระบบแบตเตอรี่
6) ออกแบบแบบจำลองอย่างง่ายของระบบล้อตุนกำลัง และระบบแบตเตอรี่
7) จำลองระบบตามที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม PowerFactory (DIgSILENT)
8) ศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นกับการใช้งานระบบแบตเตอรี่และอายุการใช้งานของระบบแบตเตอรี่
9) ออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ด้วยโปรแกรม MATLAB
10) วิเคราะห์และสรุปผลการจำลอง
11) เขียนวิทยานิพนธ์สรุปผลการศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) แนวทางการควบคุมความถี่โหลด สำหรับระบบไฟฟ้าขนาดเล็กในสภาวะแยกโดด โดยใช้ระบบล้อตุนกำลัง ร่วมกับระบบแบตเตอรี่ และโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก
2) แนวทางการลดความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ระบบล้อตุนกำลัง ร่วมกับระบบแบตเตอรี่

3) ความรู้ในการประสานการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานด้วยล้อตุนกำลังร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ เพื่อลดภาระงานและยืดอายุการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ รวมถึงการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของการใช้งานระบบแบตเตอรี่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รายละเอียดของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง เช่น องค์ประกอบที่สำคัญ หลักการทำงาน และข้อดี–ข้อเสีย เป็นต้น รวมถึงระเบียบการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และแนวทางการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานของระบบแบตเตอรี่

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย [2] นำเสนอการใช้ระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่สำหรับระบบไฟฟ้าขนาดเล็กในสภาวะแยกโดดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน เพื่อลดผลความผันผวนที่เกิดจากพลังงานแสงอาทิตย์และโหลดภายในระบบ มีการใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อควบคุมความถี่ด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงาสำหรับความถี่ที่มีความผันผวนเร็วและความผันผวนช้าตามลำดับ เพื่อให้โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำสามารถรองรับความผันผวนช้า จึงกำหนดค่าคงที่เวลาให้ช้ากว่าค่าการตอบสนองโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา นอกจากนี้มีการใช้ระบบแบตเตอรี่ในการปรับเรียบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านเพื่อให้แบตเตอรี่รองรับกำลังผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความผันผวนสูง ทำให้การจำลองระบบไฟฟ้าอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย การควบคุมความถี่ด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา และการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบแบตเตอรี่ ผลการวิจัยพบว่าวิธีการควบคุมความถี่และการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ข้างต้น ส่งผลให้ความถี่และแรงดันของระบบไฟฟ้าในสภาวะแยกโดดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ กฟภ.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

งานวิจัย [3] และ [4] นำเสนอการประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังในระบบไฟฟ้า พร้อมยกตัวอย่างการใช้งานจริง รวมถึงส่วนประกอบที่สำคัญ คุณสมบัติ หลักการทำงาน ของระบบล้อตุนกำลัง เนื่องด้วยระบบกักเก็บพลังงานชนิดดังกล่าวมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ความหนาแน่นกำลังงาน (Power density) สูง ความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) ต่ำ ทำให้ระบบล้อตุนกำลังเหมาะสำหรับการใช้งานในเชิงกำลังไฟฟ้าสำหรับช่วงเวลาสั้นๆ (Short-term power application) เช่น การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า การรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า การควบคุมแรงดันและความถี่ การสำรองไฟฟ้า (UPS) การใช้งานร่วมกับพลังงานหมุนเวียน อาทิ การปรับเรียบกำลังไฟฟ้า และการ

ลดความผันผวนของพลังงานหมุนเวียน เป็นต้น นอกจากนี้งานวิจัย [5] และ [6] ได้นำเสนอจุดเด่น - จุดด้อยของระบบกักเก็บพลังงานชนิดต่าง ๆ และเมื่อเปรียบเทียบระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังกับระบบกักเก็บพลังงานชนิดอื่น พบว่าระบบล้อตุนกำลังมีจุดเด่นที่น่าสนใจ ได้แก่ อายุการใช้งานยาวนาน การตอบสนองรวดเร็ว (ระดับมิลลิวินาที) การบำรุงรักษาต่ำ ช่วงอุณหภูมิการใช้งานกว้าง และวัสดุใช้งานเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น และมีข้อควรระวังในเรื่องความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าต่ำและราคาต้นทุนสูง

งานวิจัย [7] นำเสนอแนวทางการควบคุมความถี่ไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าภายในพื้นที่ ของระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด ณ เกาะมิยาโกะ ประเทศญี่ปุ่น ภายในพื้นที่ประกอบด้วยแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ได้แก่ น้ำมันดีเซล กังหันแก๊ส และพลังงานลม พร้อมมีการจำลองการติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์และระบบแบตเตอรี่เพิ่มเติม ผลการทดสอบพบว่า ปัญหาความผันผวนของความถี่ที่เกิดจากพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ การใช้ระบบแบตเตอรี่ร่วมกับแหล่งผลิตไฟฟ้าในพื้นที่สำหรับควบคุมความถี่ ช่วยลดค่าเบี่ยงเบนทางความถี่ไฟฟ้าได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีควบคุมความถี่โดยใช้แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวหรือระบบแบตเตอรี่อย่างใดอย่างหนึ่ง สำหรับวิธีการควบคุมความถี่ คือ การรับค่าเบี่ยงเบนทางความถี่ไฟฟ้าของระบบเป็นสัญญานนำเข้า พร้อมใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในการแบ่งย่านความถี่การทำงาน และสร้างเป็นสัญญาณคำสั่งเพื่อให้แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวรับผิดชอบย่านความผันผวนช้า เนื่องจากมีการตอบสนองช้า และให้ระบบแบตเตอรี่รับผิดชอบในย่านความผันผวนเร็ว ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวช่วยลดขนาดการใช้งานของระบบแบตเตอรี่อีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

งานวิจัย [8] นำเสนอแนวทางการควบคุมความถี่ไฟฟ้าด้วยโรงไฟฟ้าภายในพื้นที่ร่วมกับระบบแบตเตอรี่ เพื่อรองรับความผันผวนของพลังงานหมุนเวียนในระบบ โดยเปรียบเทียบวิธีการควบคุมความถี่ 2 รูปแบบ ได้แก่ การใช้อัตราขยายเพื่อกำหนดสัดส่วนการควบคุมความถี่ของระบบแบตเตอรี่และโรงไฟฟ้าในพื้นที่ และการใช้วงจรกรองความถี่สำหรับการแบ่งย่านการควบคุมความถี่เพื่อให้ระบบแบตเตอรี่รับผิดชอบความผันผวนเร็ว และโรงไฟฟ้าในพื้นที่รับผิดชอบความผันผวนช้า พร้อมทั้งกำหนดค่าคงที่เวลา (Time constant) ของโรงไฟฟ้าให้ช้ากว่าเวลาตอบสนองของโรงไฟฟ้านั้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ทั้งสองวิธีสามารถควบคุมความถี่ให้อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนด อย่างไรก็ตามวิธีควบคุมความถี่ด้วยวงจรกรองความถี่ช่วยลดการทำงานของระบบแบตเตอรี่ได้มากกว่าวิธีการควบคุมความถี่ด้วยอัตราขยาย

งานวิจัย [9] นำเสนอการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบแบตเตอรี่ เพื่อลดความผันผวนที่เกิดจากพลังงานดังกล่าว โดยรับค่าผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นสัญญาณนำเข้าผ่านวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง เพื่อสร้างสัญญาณคำสั่งให้ระบบแบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้าในการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าของพลังงานแสงอาทิตย์ ณ จุดต่อร่วมเพื่อส่งกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากผลรวมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และระบบแบตเตอรี่ไปยังระบบไฟฟ้าหลัก ทั้งนี้ค่าคงที่เวลาของวงจรกรองความถี่ที่กำหนดส่งผลต่อการทำงานของระบบแบตเตอรี่ในการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วย

งานวิจัย [10] นำเสนอการประเมินความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ที่เกิดจากความผันผวนของพลังงานแสงอาทิตย์จากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่รัฐควีนส์แลนด์ประเทศออสเตรเลีย การวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพอายุของแบตเตอรี่ใช้เทคนิค Rainflow Cycle Counting โดยนำข้อมูลความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge; DOD) ที่เกิดจากการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ มาพิจารณาจำนวนรอบที่เกิดขึ้น (Cycle) ในแต่ละค่าการเปลี่ยนแปลงของความลึกการคายประจุนั้นๆ (DOD Range หรือ ∆DOD) และนำไปคำนวณหาค่าความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่จากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ได้หารด้วยจำนวนรอบสูงสุดของแบตเตอรี่ในแต่ละ ∆DOD (ข้อมูลจำนวนรอบสูงสุดของแบตเตอรี่ในแต่ละ ∆DOD จะมาจากบริษัทผู้ผลิต) งานวิจัยนี้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 รูปแบบ ตามการผันผวนของพลังงานแสงอาทิตย์จากความผันผวนต่ำไปสูงตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าในวันที่พลังงานแสงอาทิตย์มีความผันผวนสูงที่สุด นอกจากจะส่งผลให้ ∆DOD ที่เกิดขึ้นมีการกระจายตัวที่ค่าสูงแล้ว ยังทำให้ค่าความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่สูงที่สุด และเกี่ยวเนื่องไปถึงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ลดน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ หรือวันที่พลังงานแสงอาทิตย์มีความผันผวนต่ำจะมีการเกาะกลุ่มของ ∆DOD ที่ค่าน้อยๆ มากขึ้น รวมถึงมีค่าความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ที่น้อยกว่าส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น

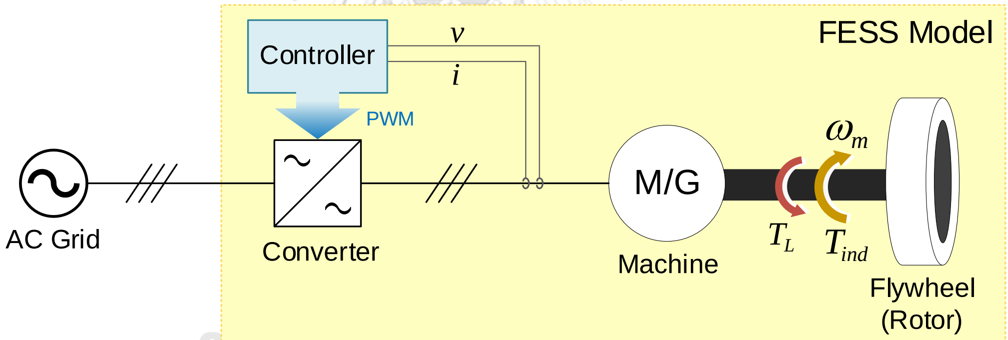
อย่างไรก็ตาม งานวิจัยข้างต้นที่ได้กล่าวมานี้ ไม่มีการกล่าวถึงการใช้งานระบบล้อตุนกำลังร่วมกับระบบแบตเตอรี่ และโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ รวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบแบตเตอรี่เมื่อมีการใช้งานเพื่อรองรับความผันผวนที่สูงและเร็ว และการใช้ระบบล้อตุนกำลังเพื่อลดความเสื่อมสภาพการใช้งานแบตเตอรี่

2.2 ระเบียบการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

กฟภ. ได้กำหนด ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 [11] ข้อที่ 8 กล่าวถึงหลักเกณฑ์การควบคุมคุณภาพไฟฟ้า กรณีผู้ขอใช้บริการต้องการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ เช่น โรงไฟฟ้าขนาดเล็กหรือขนาดเล็กมาก จะต้องมีการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้า ดังนี้

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นผู้ควบคุมดูแลการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้าให้มีค่ามาตรฐาน 50±0.5 เฮิรตซ์ และผู้ขอใช้บริการจะต้องควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ซิงโครไนซ์กับระบบโครงข่ายหลักตลอดเวลา กรณีเกิดเหตุผิดปกติ หากความถี่ระบบไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วง 47.00 – 52.00 เฮิรตซ์ ต่อเนื่องเกิน 0.1 วินาที ผู้ขอใช้บริการจะต้องออกแบบให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของตนเองสามารถปลดออกจากระบบโครงข่ายหลักด้วยระบบอัตโนมัติทันที

2.3 ข้อมูลทั่วไปของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.1 แบบจำลองทั่วไปของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง

ระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง (Flywheel energy storage system; FESS) เป็นระบบกักเก็บพลังงานทางกล (Mechanical energy storage) ชนิดหนึ่ง ที่กักเก็บพลังงานจลน์ไว้ในส่วนของการหมุนหรือโรเตอร์ (Rotor) เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \tag{2.1}$$

เมื่อ E_k คือ พลังงานจลน์สะสม (J)

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อตุนกำลัง (kg·m^2)

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของล้อตุนกำลัง (rad/s)

แบบจำลองทั่วไปของระบบล้อตุนกำลัง แสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีหลักการทำงาน 2 โหมด ดังนี้ เมื่อต้องรับพลังงานไฟฟ้าหรือทำงานในโหมดอัดประจุไฟฟ้า (Charging mode) โรเตอร์จะหมุนเร็วขึ้นเพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้ามากักเก็บในรูปแบบพลังงานจลน์ภายในโรเตอร์ ในโหมดนี้ระบบล้อตุนกำลังจะประพฤติตัวเป็นมอเตอร์ ในทางกลับกันเมื่อต้องการปล่อยพลังงานหรือทำงานในโหมดคายประจุไฟฟ้า (Discharging mode) โรเตอร์จะหมุนช้าลงเพื่อแปลงพลังงานจลน์ที่กักเก็บไว้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งโหมดนี้ระบบล้อตุนกำลังจะประพฤติตัวเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง อธิบายด้วยสมการทางกลอย่างง่าย ดังนี้

$$J\frac{d\omega_m}{dt} = T_{ind} - T_L \tag{2.2}$$

เมื่อ T_{ind} คือ แรงบิดเหนี่ยวนำ (Nm) ที่เกิดจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าขับเคลื่อนระบบล้อตุนกำลัง

T_L คือ แรงบิดต้านทานการหมุนของเครื่องจักรกลหรือแรงบิดสูญเสียทางกล (Nm) เช่น แรงเสียดทาน (Friction torque) แรงต้านทานทางลม (Windage torque) เป็นต้น

และแรงบิดเหนี่ยวนำมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าของระบบล้อตุนกำลังกับความเร็วเชิงมุมของล้อตุนกำลัง ดังสมการที่ (2.3)

$$T_{ind} = \frac{P^*}{\omega_m} \tag{2.3}$$

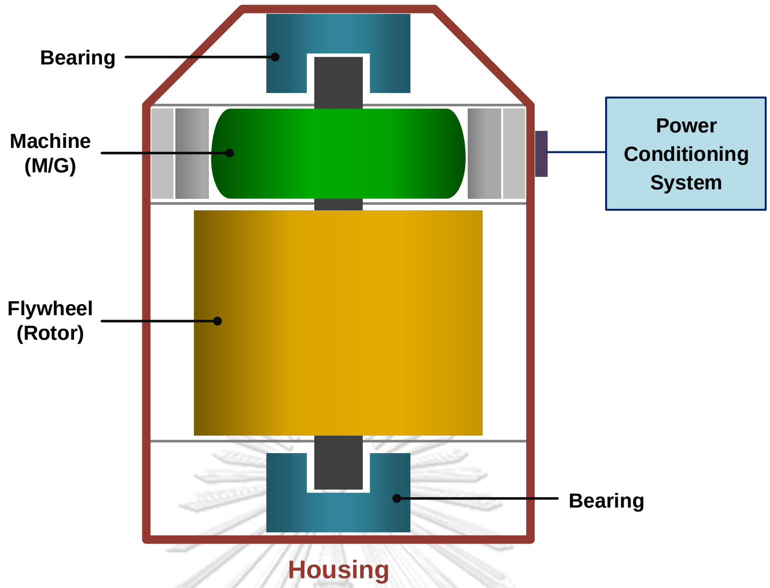
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อ P^* คือ กำลังไฟฟ้าคำสั่งของระบบล้อตุนกำลัง (W)

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของล้อตุนกำลัง (rad/s)

หมายความว่าค่าแรงบิดเหนี่ยวนำในระบบล้อตุนกำลังจะถูกกำหนดจากความต้องการกำลังไฟฟ้าและความเร็วการหมุนของล้อตุนกำลัง และแรงบิดเหนี่ยวนำนี้ก็จะทำให้ความเร็วของล้อตุนกำลังเปลี่ยนแปลงตามสมการที่ (2.2)

2.3.1) ส่วนประกอบของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง

โดยทั่วไประบบล้อตุนกำลัง ประกอบด้วย 5 ส่วนประกอบหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. ล้อตุนกำลัง (Flywheel) เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญที่สุด เนื่องจากทำหน้าที่กักเก็บพลังงานจลน์โดยการหมุน ทั้งนี้ระบบล้อตุนกำลังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ คือ ระบบล้อตุนกำลังชนิดความเร็วต่ำ จำกัดความเร็วไม่เกิน 10,000 รอบต่อนาที (rpm) และระบบล้อตุนกำลังชนิดความเร็วสูง มีความเร็วตั้งแต่ 10,000 รอบต่อนาที แต่ไม่เกิน 100,000 รอบต่อนาที
2. เครื่องจักรกลไฟฟ้า (Machine) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนให้ล้อตุนกำลังหมุน สามารถประพฤติตัวเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Motor/Generator; M/G)
3. อุปกรณ์แปลงผันพลังงาน (Power electronic interface) ควบคุมการทำงานของระบบล้อตุนกำลังให้รับหรือปล่อยพลังงาน
4. รองลื่นหรือตลับลูกปืน (Bearing) สำหรับค้ำจุนและรักษาตำแหน่งของล้อตุนกำลังในขณะหมุน ระบบล้อตุนกำลังมักนิยมรองลื่นชนิดแม่เหล็ก (Magnetic bearing) เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนใด ๆ จึงไม่เกิดการสูญเสียจากแรงเสียดทาน ไม่ต้องการการหล่อลื่น ช่วยลดการสึกหรอ และยืดอายุชิ้นส่วนด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5. โครงครอบ (Housing) สำหรับสร้างสภาวะแวดล้อมที่ช่วยลดการสูญเสีย เช่น ทำให้เกิดสภาวะเป็นหรือใกล้เคียงสุญญากาศ ทำให้ระบบล้อตุนกำลังทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และช่วยรักษาความปลอดภัยในการทำงานของล้อตุนกำลัง

2.3.2) คุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง

ระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง มีลักษณะเด่น ดังนี้

- อายุการใช้งานยาวนาน (มากกว่า 20 ปีขึ้นไป หรือ ประมาณ 10^5- 10^7 รอบการทำงาน)
- การตอบสนองรวดเร็วในระดับมิลลิวินาที
- ประสิทธิภาพการทำงานสูง (ประมาณร้อยละ 90)
- สามารถรับและคายประจุได้เต็มกำลังพิกัด (Full depth of discharge)
- ความเสื่อมสภาพการใช้งานต่ำ
- ไม่ต้องการการบำรุงรักษาหรือการบำรุงรักษาต่ำ
- มีอุณหภูมิช่วงการใช้งานที่กว้าง
- การใช้งานไม่ก่อให้เกิดมลภาวะหรือมลพิษใดๆ
- วัสดุที่ใช้ในการผลิตไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- สามารถนำไปรีไซเคิลได้หลังจากหมดอายุการใช้งาน

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติสำคัญที่สุด คือ ความหนาแน่นกำลังงานสูง และความหนาแน่นพลังงานต่ำ เป็นปัจจัยในการประเมินความเหมาะสมการนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้าต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.3) ตัวอย่างการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังในระบบไฟฟ้า

จากคุณสมบัติหลักของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง คือ ความหนาแน่นกำลังงานสูงและความหนาแน่นพลังงานต่ำ ทำให้ระบบล้อตุนกำลังเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เชิงกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้น ๆ เช่น การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า การควบคุมแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้า แหล่งสำรองไฟฟ้าในกรณีฉุกเฉินหรือกระแสไฟฟ้าขัดข้อง และการใช้งานร่วมกับพลังงานหมุนเวียนเพื่อปรับเรียบกำลังไฟฟ้าขาออกหรือลดความผันผวนพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงามลม เป็นต้น

ตัวอย่างการใช้งานระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวน 2 โครงการใหญ่ ณ รัฐนิวยอร์ก และรัฐเพนซิลเวเนีย แต่ละโครงการมีการติดตั้งระบบล้อตุนกำลังที่ขนาดพิกัด 100 กิโลวัตต์/25 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จำนวน 200 ตัว ขนาดพิกัดรวม 20 เมกะวัตต์/5 เมกะวัตต์-ชั่วโมง นอกจากนี้มีการใช้ระบบล้อตุนกำลังสำหรับการคมนาคม เช่น รถราง รถบัส โดย

พลังงานที่กักเก็บภายในล้อตุนกำลังจะถูกส่งออกมาเพื่อเร่งความเร็วขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ ในทางกลับกันขณะยานพาหนะชะลอตัว พลังงานจะถูกส่งไปเก็บภายในล้อตุนกำลัง

2.4 แนวทางการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่

การใช้งานแบตเตอรี่เพื่อรองรับการทำงานตามความต้องการ ส่งผลให้แบตเตอรี่เกิดความเสื่อมสภาพแตกต่างกันไปตามภาระหน้าที่ที่ต้องรับผิดชอบ ปัจจัยส่วนใหญ่ที่มีอิทธิพลต่อความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ ได้แก่ สถานะการประจุ (SOC) หรือความลึกในการคายประจุ (DOD) รวมถึงอุณหภูมิการใช้งาน ยิ่งมีความลึกของการคายประจุมาก ยิ่งส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง หรือการที่แบตเตอรี่ต้องรองรับความผันผวนสูงที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง ก็ส่งผลต่อการลดลงของอายุแบตเตอรี่เช่นกัน

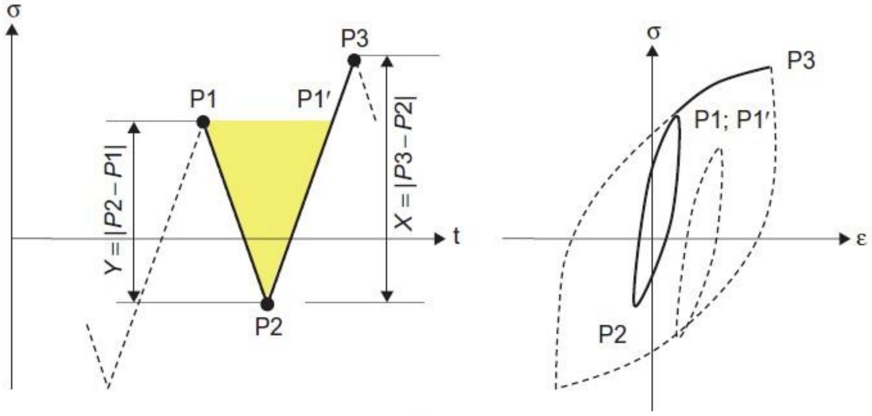
โดยทั่วไปการพิจารณาจำนวนรอบของแบตเตอรี่ (Cycle) ที่เกิดจากการใช้งาน [12] วิธีที่ง่ายที่สุดคือการคำนวณด้วยพลังงานไฟฟ้าขาเข้าหรือขาออกของแบตเตอรี่หารด้วยค่าพิกัดพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Rated Energy of BESS) เรียกว่าเป็นการประมาณรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ (Equivalent Full Cycles; EFCs) แสดงดังสมการที่ (2.4)

$$Equivalent\ Full\ Cycles\,(ECFs) = \frac{E_{in/out,BESS}}{E_{rated,BESS}} \tag{2.4}$$

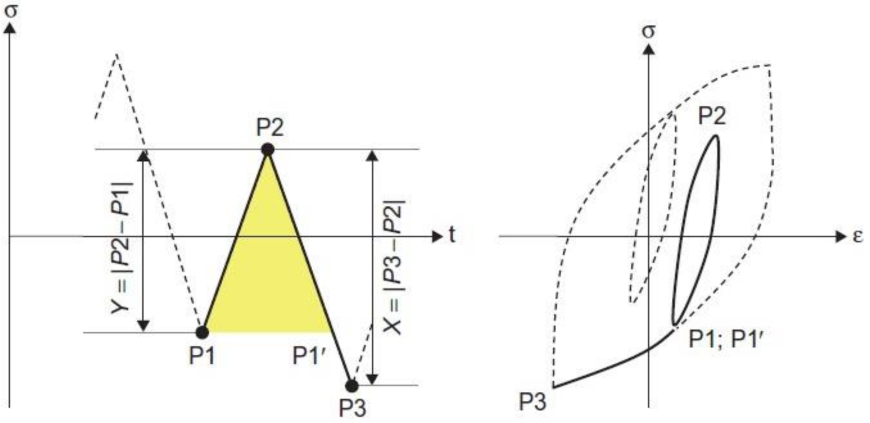
อย่างไรก็ตามวิธีข้างต้นไม่ได้พิจารณา DOD ซึ่งเป็นปัจจัยหลักต่อความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ สำหรับวิธีที่น่าสนใจและเป็นที่นิยมในการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานหรือนับรอบการใช้งานที่เกิดขึ้นของแบตเตอรี่ เรียกว่า Rainflow cycle counting (เปรียบเทียบกับการไหลของฝนบนเจดีย์และตกลงมายังขอบหลังคา) มักใช้สำหรับข้อมูลที่มีความไม่แน่นอน เช่น ข้อมูลความเค้น/ความเครียดจากการใช้งานวัสดุ หรือข้อมูล DOD ของแบตเตอรี่ เป็นต้น วิธีการนี้จะพิจารณาเฉพาะจุดกลับตัวของข้อมูล นำมาวิเคราะห์รอบการใช้งาน ซึ่งมีการนับจำนวนรอบหลากหลายเทคนิค [13] เช่น การนับรอบแบบ 3 จุด (3-point cycle counting) การนับรอบแบบ 4 จุด (4-point cycle counting) เป็นต้น

ในที่นี้จะอธิบายวิธีการนับรอบแบบ 3 จุด (3-point cycle counting) โดยจุดที่นำมาพิจารณาคือจุดกลับตัวของข้อมูล (จุดสูงสุด/ต่ำสุดที่เกิดจากการกลับตัวของข้อมูล) แสดงในรูปที่ 2.3 จะพิจารณาข้อมูลทีละ 3 จุด กำหนดให้เป็น P1, P2 และ P3 หาก $|P2-P1| \le |P3-P2|$ จะถูกนับเป็น

รอบการทำงาน หรือเกิดเป็น hysteresis loop ดังแสดงในรูปด้านขวามือ ในทางกลับกันหาก |P2-P1| > |P3-P2| จะไม่ถูกนับรอบการทำงาน



(ก) กรณีจุดที่ 2 (P2) เป็นจุดต่ำสุด (ลักษณะกรวยแบบคว่ำ)



(ข) กรณีจุดที่ 2 (P2) เป็นจุดสูงสุด (ลักษณะกรวยแบบหงาย)

รูปที่ 2.3 การนับรอบแบบ 3 จุด *(3-point cycle counting)*
โดยวิธีการ Rainflow cycle counting [13]

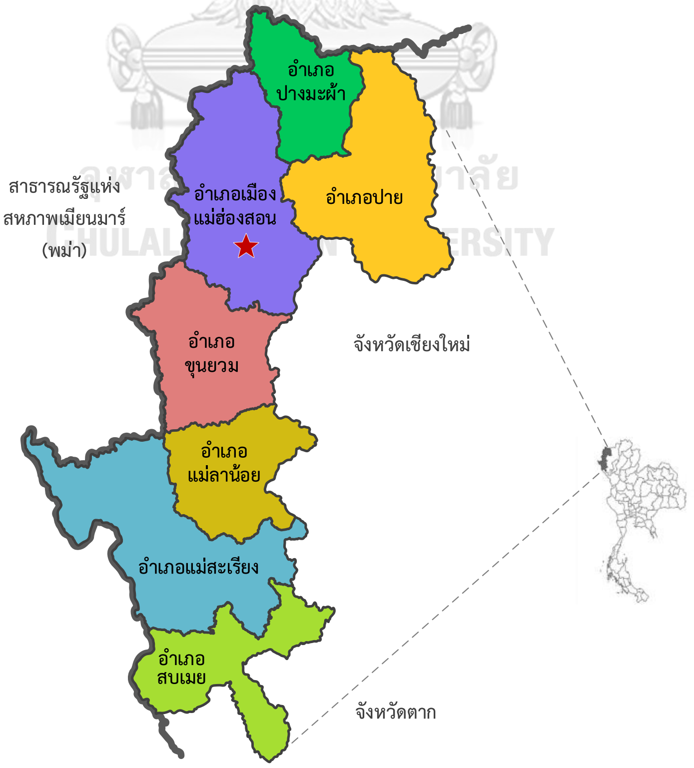
จากหลักการนับรอบแบบ 3 จุด (3-point cycle counting) ที่ได้กล่าวไปข้างต้น จึงเป็นแนวทางในการวิเคราะห์จำนวนรอบการทำงานของแบตเตอรี่จากข้อมูล DOD วิธีการนี้มีการพิจารณา DOD ของแบตเตอรี่ร่วมด้วย ทำให้มีความเชื่อถือได้มากกว่าวิธีการคำนวณ EFCs ยิ่งไปกว่านั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการนับด้วยวิธีนี้ กล่าวคือ จำนวนรอบการทำงานของแบตเตอรี่ในแต่ละ ΔDOD สามารถนำไปพิจารณาความเสื่อมสภาพจากการใช้งานแบตเตอรี่ และการประเมินอายุขัยของแบตเตอรี่อีกด้วย

บทที่ 3
ข้อมูลทั่วไปและระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายข้อมูลทั่วไปของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน และข้อมูลระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน รวมถึงข้อมูลของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงาและโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการปรับปรุงหรือพัฒนาระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนต่อไป

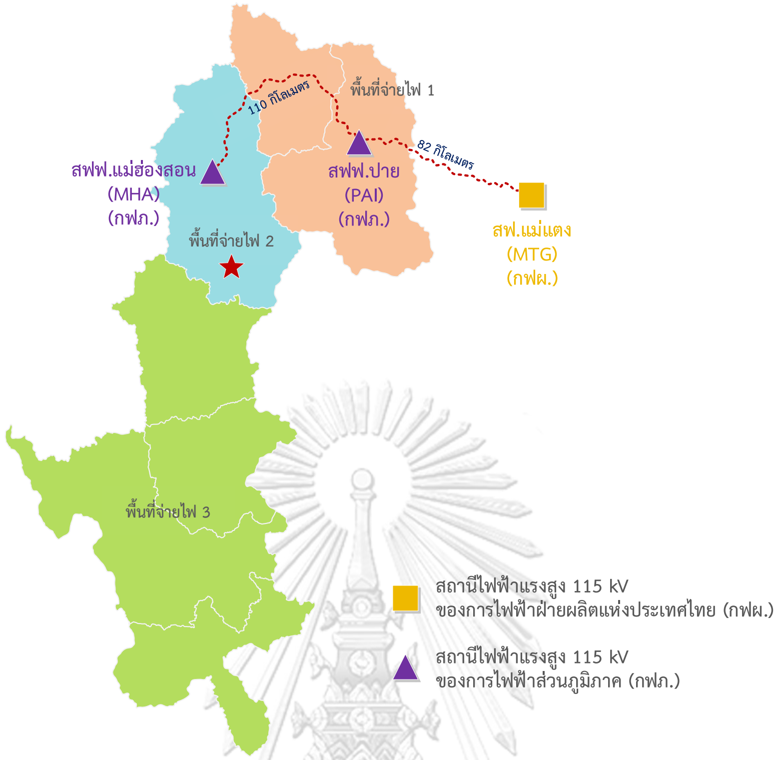
3.1 ข้อมูลทั่วไปของจังหวัดแม่ฮ่องสอน

จังหวัดแม่ฮ่องสอน เป็นจังหวัดหนึ่งทางภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย มีอาณาเขตติดต่อกับประเทศพม่า จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดตาก มีเนื้อที่ประมาณ 12,708 ตารางกิโลเมตร สภาพภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นภูเขาสูงสลับซับซ้อน และเป็นป่าไม้ตามธรรมชาติ โดยมีเนื้อที่ป่าไม้คิดเป็นร้อยละ 86 ของพื้นที่จังหวัด และจัดแบ่งพื้นที่การปกครองออกเป็น 7 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน อำเภอปาย อำเภอปางมะผ้า อำเภอขุนยวม อำเภอแม่สะเรียง อำเภอแม่ลาน้อย และอำเภอสบเมย ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน

3.2 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน



รูปที่ 3.2 พื้นที่การจ่ายไฟของจังหวัดแม่ฮ่องสอนและเส้นทางระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ ของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

จังหวัดแม่ฮ่องสอนแบ่งพื้นที่การจ่ายไฟออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนจัดเป็นพื้นที่การจ่ายไฟที่ 2 ซึ่งครอบคลุมพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนและอำเภอขุนยวมบางส่วน รับกระแสไฟฟ้ามาจากสถานีไฟฟ้าแรงสูง (MTG) 115 กิโลโวลต์ของ กฟผ. อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ผ่านสถานีไฟฟ้าปาย (PAI) ตัดผ่านอำเภอปางมะผ้า และเข้าสู่สถานีไฟฟ้าแม่ฮ่องสอน (MHA) รวมระยะทางประมาณ 192 กิโลเมตร เส้นทางระบบส่งจ่ายไฟฟ้าต้องผ่านภูเขาสูงและป่าอนุรักษ์ หากระบบสายส่ง 115 กิโลโวลต์เกิดเหตุขัดข้อง ส่งผลให้จังหวัดแม่ฮ่องสอนขาดแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักโดยทันที เนื่องจากเส้นทางส่งจ่ายไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ ดังกล่าวเป็นระบบส่งจ่ายไฟฟ้าหลักของจังหวัด

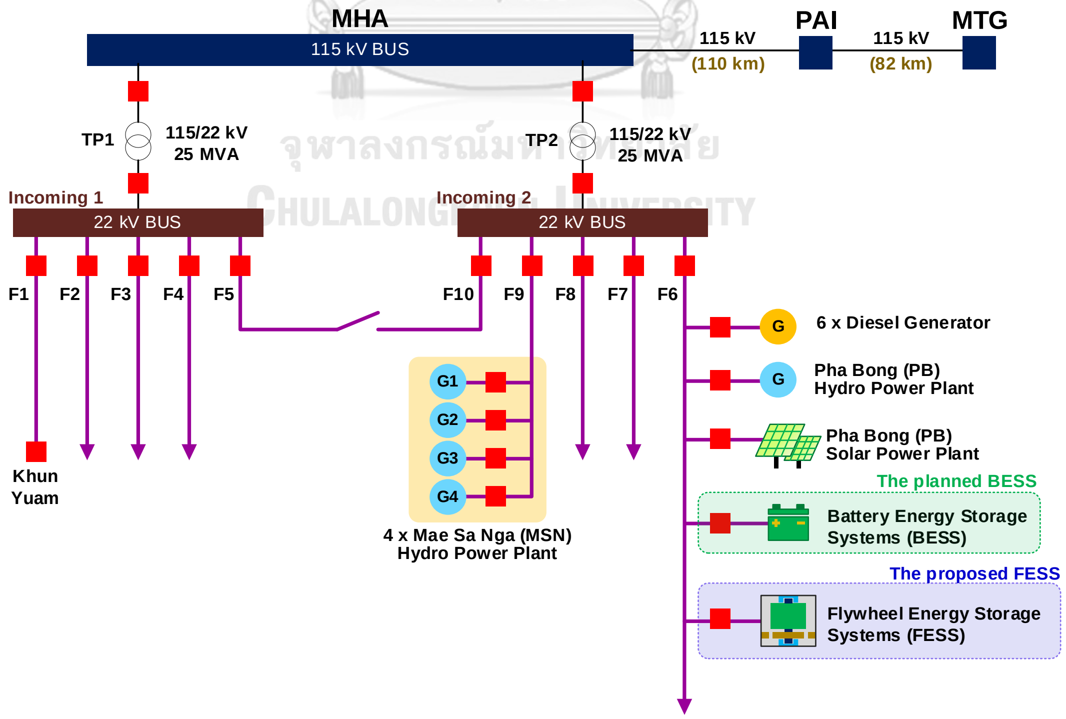
ในกรณีเกิดเหตุขัดข้องของระบบสายส่ง 115 กิโลโวลต์ระหว่างสถานีฯ แม่แตง มายังสถานีฯ แม่ฮ่องสอน จะมีการประเมินกำลังผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าภายในพื้นที่ว่ามีความเพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าหรือไม่ หากไม่เพียงพอต่อความต้องการ จะทำการเชื่อมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง 22 กิโลโวลต์ จากอำเภอแม่แจ่ม ผ่านวงจรสายป้อนอำเภอขุนยวม เพื่อรับกระแสไฟฟ้า

มายังอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ทั้งนี้ในพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนมีแหล่งผลิตไฟฟ้า ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และโรงจักรดีเซล (สำหรับกรณีฉุกเฉิน) รายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แหล่งผลิตไฟฟ้าภายในอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

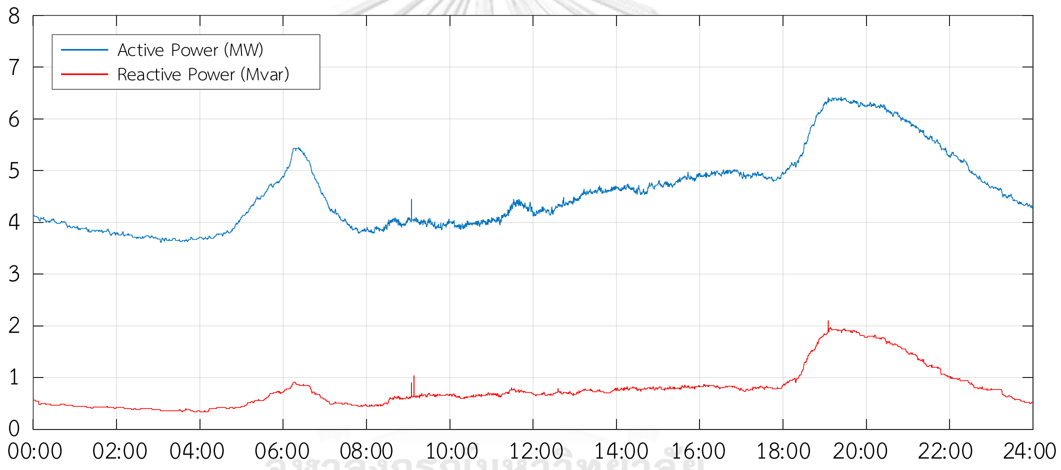
แหล่งผลิตไฟฟ้า	กำลังผลิตติดตั้ง (เมกะวัตต์)		ผู้รับผิดชอบ
	ปัจจุบัน	อนาคต	
โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา (Mae Sa Nga Hydro Power Plant)	2 x 2.52 2 x 2.65	2 x 2.52 2 x 2.65	พพ.*
โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผาบ่อง (Pha Bong Hydro Power Plant)	0.85	3.85	พพ.
โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง (Pha Bong Solar Power Plant)	0.50	3.50	กฟผ.
โรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอน (MHS Diesel Generator)	3 x 1.00 3 x 0.80	-	กฟผ.

* กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน



รูปที่ 3.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

จากรูปที่ 3.3 แสดงสภาพการจ่ายไฟของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน จากระบบส่ง 115 กิโลโวลต์ สู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ แบ่งวงจรออกเป็น 10 สายป้อน ประกอบด้วยแหล่งผลิตไฟฟ้าภายในพื้นที่ โหลดผู้ใช้ไฟหลากหลายประเภท ทั้งในส่วนราชการ สถานศึกษา โรงพยาบาล สถานที่ท่องเที่ยว สนามบิน ผู้ประกอบการธุรกิจโรงแรม และบ้านพักอาศัย ทำให้อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงที่สุดในจังหวัด และมีโหลดที่มีความสำคัญหรือหากเกิดเหตุขัดข้องต้องพิจารณาการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นอันดับแรกเสมอ ได้แก่ โรงพยาบาล ศาลากลางจังหวัด ที่ว่าการอำเภอ เทศบาล สนามบิน และเมื่ออ้างอิงข้อมูลระบบไฟฟ้าที่ตรวจวัดในเดือนตุลาคม 2563 พบว่าค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน สามารถจำแนกได้เป็น 2 ช่วงเวลา คือ 05.00 – 07.00 น. และ 18.00 – 20.00 น. มีลักษณะโหลดหรือความต้องการใช้ไฟฟ้าในสภาวะแยกโดด แสดงในรูปที่ 3.4



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

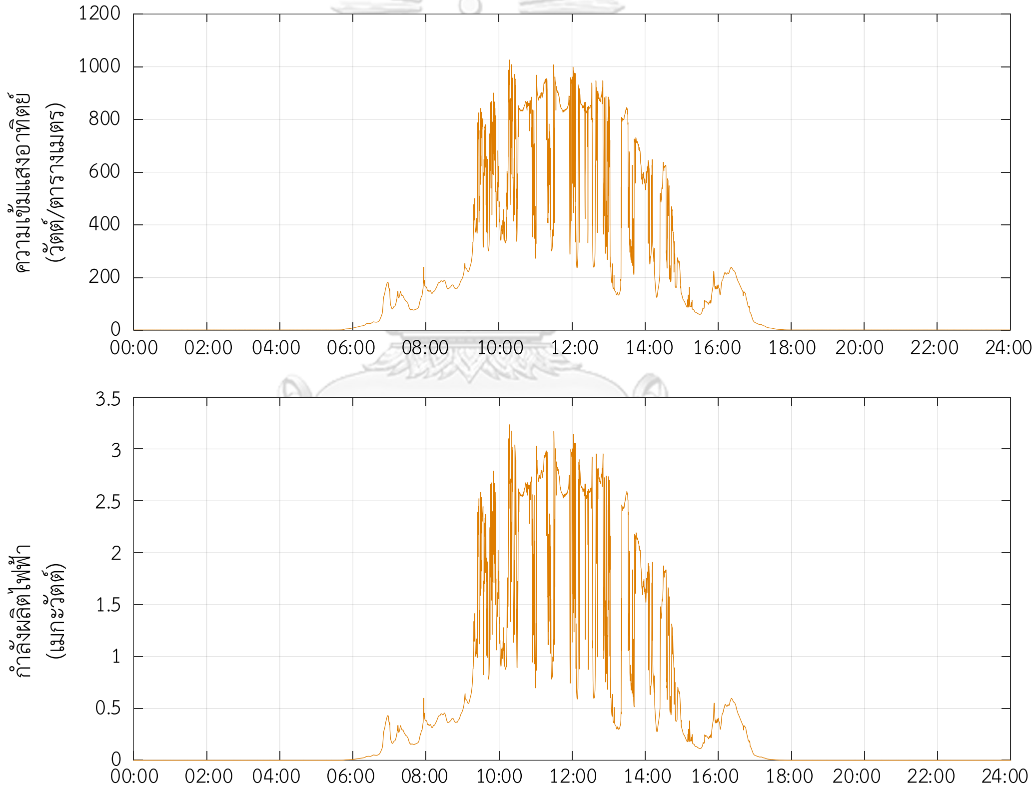
รูปที่ 3.4 ค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในสภาวะแยกโดด
ณ วันที่ 7 กันยายน 2563

3.2.1) โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา

โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงามีกำลังการผลิตขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำตามฤดูกาลที่กักเก็บไว้ในอ่างเก็บน้ำแม่สะงา โรงไฟฟ้านี้เชื่อมต่อกับวงจรสายป้อนที่ 9 (ตามรูปที่ 3.3) ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 4 เครื่อง โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2 มีกำลังผลิตติดตั้ง 2.52 เมกะวัตต์ต่อเครื่อง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 3 และ 4 มีกำลังผลิตติดตั้ง 2.65 เมกะวัตต์ต่อเครื่อง ปัจจุบันมีการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารอบละ 3 เครื่อง โดยหยุดพักทีละหนึ่งเครื่อง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะทำการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 4 เครื่อง กำลังการผลิตรวมสูงสุด ประมาณ 10 เมกะวัตต์

3.2.2) โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง

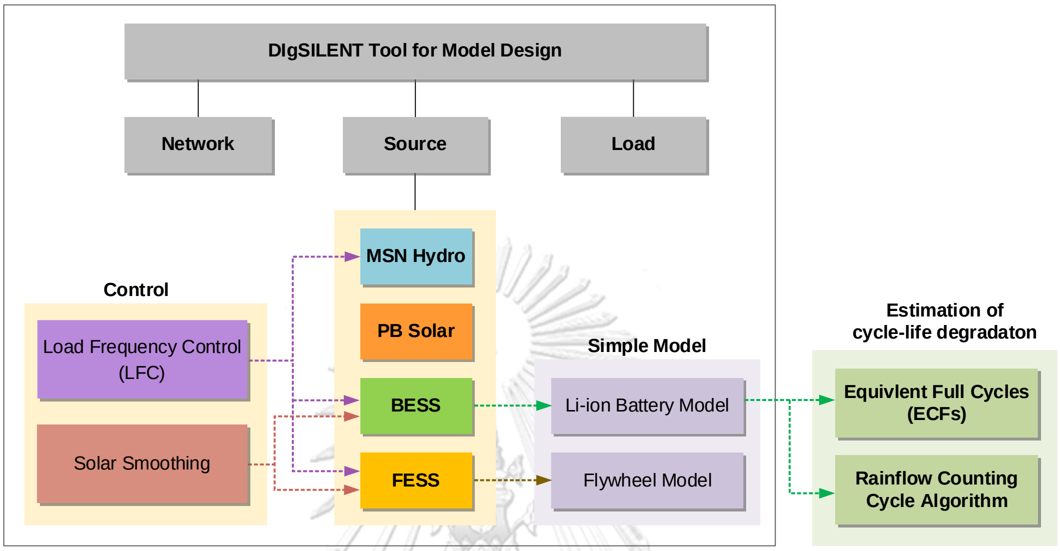
โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จัดเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีความผันผวนสูง เนื่องด้วยกำลังผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์ (Solar irradiance) สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องเชื่อมต่อกับวงจรสายป้อนที่ 6 (ตามรูปที่ 3.3) มีกำลังผลิตติดตั้ง 0.5 เมกะวัตต์ หรือ 500 กิโลวัตต์ และในอนาคตจะเพิ่มกำลังผลิตติดตั้งเป็น 3.5 เมกะวัตต์ จากข้อมูลตรวจวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องราย 10 วินาที จำนวน 93 วัน ในปี 2559 พบว่าค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในวันที่ 5 ตุลาคม 2559 มีความผันผวนราย 10 วินาทีเกิดขึ้นบ่อยครั้งและมีค่าสูง สามารถประมาณการลักษณะความเข้มแสงและกำลังผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องในกรณีขยายขนาดติดตั้งเป็น 3.5 เมกะวัตต์ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ข้อมูลลักษณะความเข้มแสงอาทิตย์และกำลังผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องในกรณีขยายขนาดติดตั้งเป็น 3.5 เมกะวัตต์ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 4

แบบจำลองระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนและแนวทางการควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังที่นำเสนอ



รูปที่ 4.1 แผนภาพแนวทางการวิจัยที่นำเสนอ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีแนวทางการศึกษาวิจัยดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 4.1 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ การจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม DIgSILENT และการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการใช้งานระบบล้อตุนกำลังเข้ามาในระบบไฟฟ้า

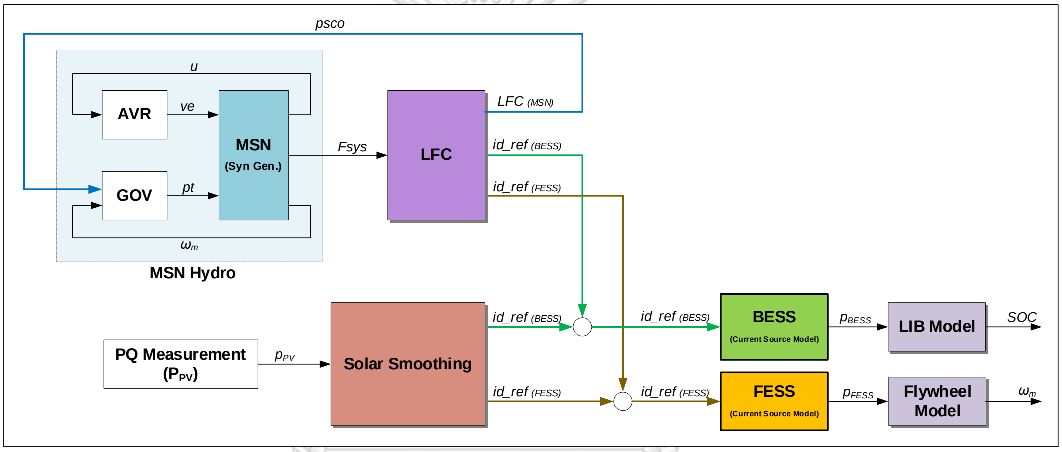
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำหรับระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จำลองด้วยโปรแกรม PowerFactory (DIgSILENT) แบ่งเป็น 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ รูปแบบการจ่ายไฟ แหล่งผลิตไฟฟ้า และโหลดผู้ใช้ไฟ โดยแหล่งผลิตไฟฟ้าที่จะใช้ในการจำลอง ประกอบด้วย โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา (MSN Hydro) โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง (PB Solar) ระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ (BESS) และระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง (FESS)

ในส่วนของการควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง นำเสนอการควบคุม 2 แนวทาง แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.2 ได้แก่ 1) การควบคุมความถี่โหลด (Load Frequency Control; LFC) ของระบบล้อตุนกำลัง ประสานงานร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

แม่สะงาและระบบแบตเตอรี่ และ 2) การปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Smoothing) ของระบบล้อตุนกำลัง ร่วมกับระบบแบตเตอรี่

อีกทั้งมีการนำเสนอแบบจำลองอย่างง่าย (Simple Model) ของระบบแบตเตอรี่ และระบบล้อตุนกำลัง เพื่อสังเกตสถานะการประจุ (State of Charge; SOC) ของระบบแบตเตอรี่ และความเร็วเชิงมุม (ω_m) ในการหมุนของระบบล้อตุนกำลัง นำไปพิจารณาขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานทั้งสองชนิด อีกทั้งข้อมูลสถานะการประจุของแบตเตอรี่ที่ได้จากการจำลองสามารถนำไปวิเคราะห์ค่าความเสื่อมสภาพในการใช้งานแบตเตอรี่ต่อไป เพื่อประเมินอายุการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการใช้งานระบบล้อตุนกำลังเพิ่มเข้ามาในระบบไฟฟ้า



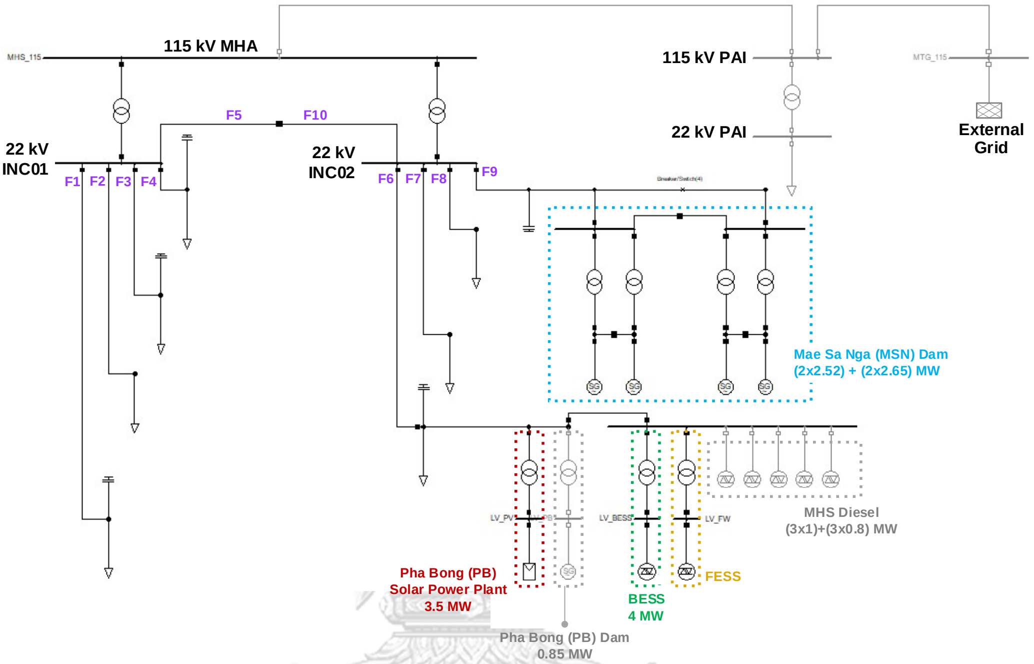
รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงการควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละชนิด

4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในสภาวะแยกโดด

ระบบไฟฟ้าในสภาวะแยกโดด ต้องการให้มีการบริหารจัดการแหล่งพลังงานไฟฟ้าภายในพื้นที่ สำหรับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟในพื้นที่ โดยจะพิจารณาเฉพาะระบบจำหน่ายไฟฟ้าในระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ความถี่ 50±0.5 เฮิรตซ์ เพื่อให้สอดคล้องกับระเบียบการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของ กฟภ.

การจำลองระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในสภาวะแยกโดด มีรูปแบบการจ่ายไฟและแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าดังรูปที่ 4.3 (ในรูปส่วนที่เป็นสีเทาจะไม่นำมาพิจารณาในการจำลอง) ซึ่งพิจารณาแหล่งผลิตไฟฟ้าภายในพื้นที่ ประกอบด้วย โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา (MSN Hydro Power Plant) โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง (PB Solar Power Plant) รวมถึงระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ (BESS) ที่มีแผนงานติดตั้งในอนาคต และระบบกักเก็บพลังงานชนิด

ล้อตุนกำลัง (FESS) ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ในที่นี้จะไม่พิจารณาแหล่งผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผาบ่อง (PB Hydro Power Plant) และโรงจักรดีเซลแม่ฮ่องสอน (MHS Diesel Generator) เนื่องจากโรงโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผาบ่องมีกำลังผลิตน้อย และในสภาวะปกติโรงจักรดีเซลจะไม่มีการใช้งาน รวมถึงเป็นการสนับสนุนแนวคิดการลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงอีกด้วย

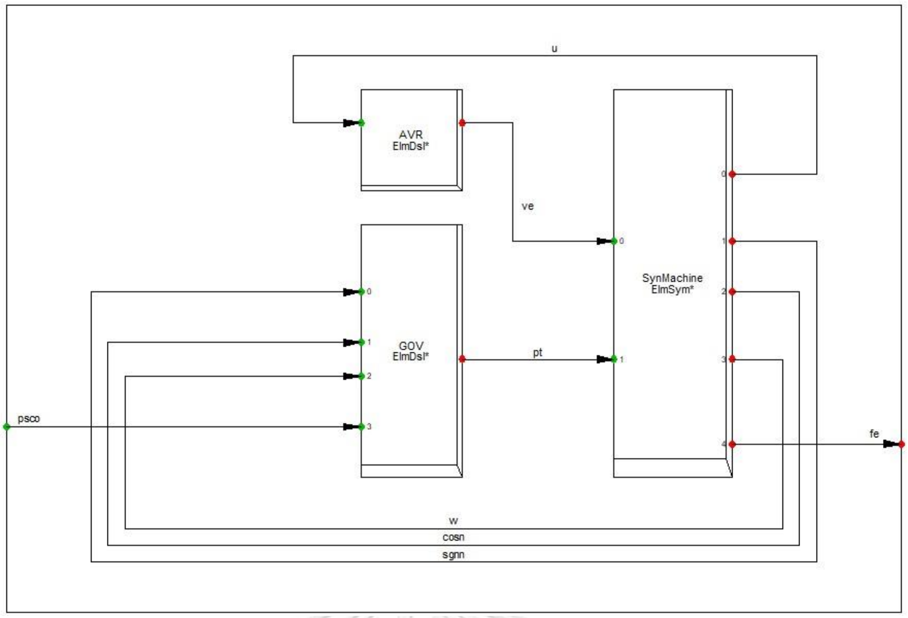


รูปที่ 4.3 แบบจำลองระบบไฟฟ้าอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในโปรแกรม PowerFactory (DIgSILENT)

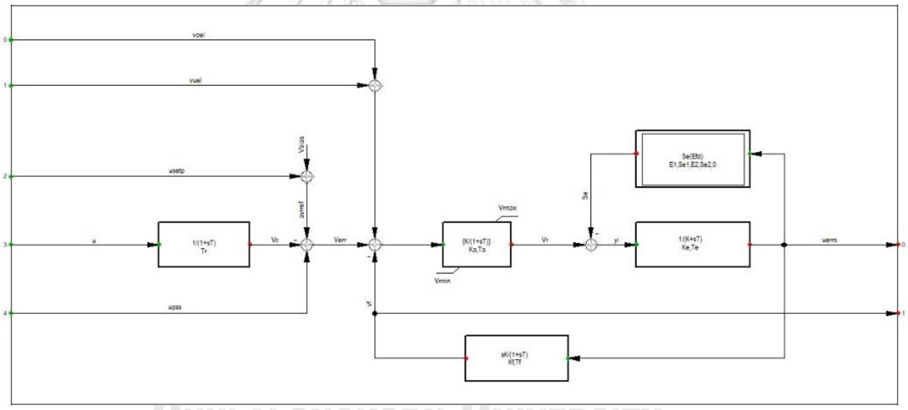
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา

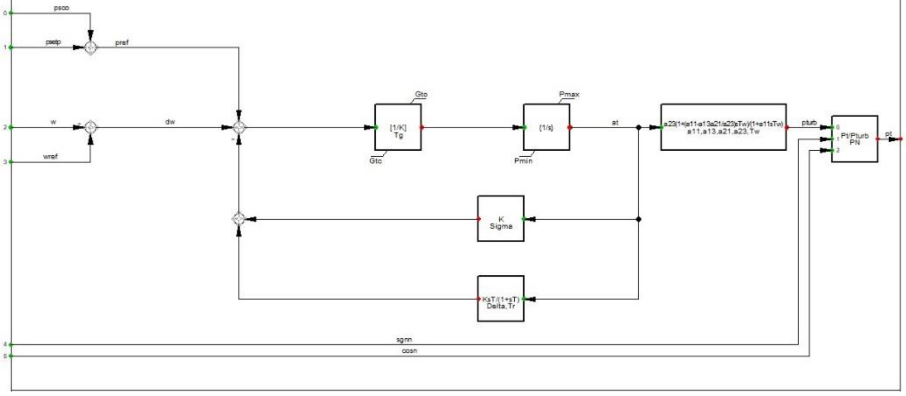
แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงาใช้ระบบควบคุมอ้างอิงตาม [2] ซึ่งมีแผนผังตามรูปที่ 4.4 จากภาพในส่วน “SynMachine” ถูกจำลองด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และส่วนอื่นคือการควบคุม ซึ่งประกอบด้วยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic voltage regulator; AVR) ตามมาตรฐาน 1968 IEEE Type 1 excitation system (IEEET1) มีรายละเอียดดังรูปที่ 4.5 และการควบคุมกังหันของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ (Governor; GOV) ตามมาตรฐาน 1981 IEEE type 3 turbine-governor model (IEEEG3) มีรายละเอียดดังรูปที่ 4.6 นอกเหนือจากนี้มีการควบคุมความถี่โหลดด้วยโรงไฟฟ้าพลังงานขนาดเล็กแม่สะงา รายละเอียดในหัวข้อที่ 4.6



รูปที่ 4.4 แบบจำลองระบบควบคุมโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา



รูปที่ 4.5 แบบจำลองระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (AVR)



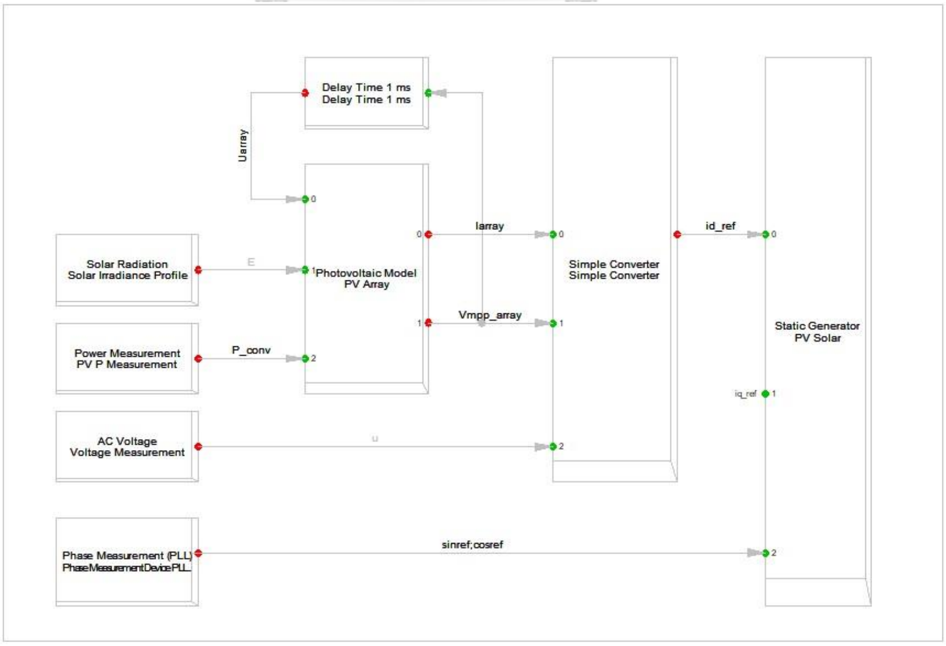
รูปที่ 4.6 แบบจำลองระบบควบคุมกังหันของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ (GOV)

สำหรับค่าพารามิเตอร์ของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงาที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ อ้างอิงจาก [2] แสดงในตารางที่ 4.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา

พารามิเตอร์	**ตัวแปรใน DIgSILENT**	**โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา**	
		โรงที่ 1 และ 2	**โรงที่ 3 และ 4**
Rated apparent power of generator [MVA]	sgn	3.375	3.3125
Rated active power of turbine [MW]	PN	2.55	2.65
Power factor	cosn	0.85 lag	0.80 lag
Rated voltage [kV]	ugn	3.3	
Inertia time constant [s]	H	0.57	
Permanent droop [p.u.]	Sigma	0.05	
Temporary droop [p.u.]	Delta	1.4	
Gate servomotor time constant [s]	Tg	8	
Governor time constant [s]	Tr	15	
Water starting time [s]	Tw	2.2347	
Mechanical Damping [p.u]	dpu	0.114	

4.3 แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง

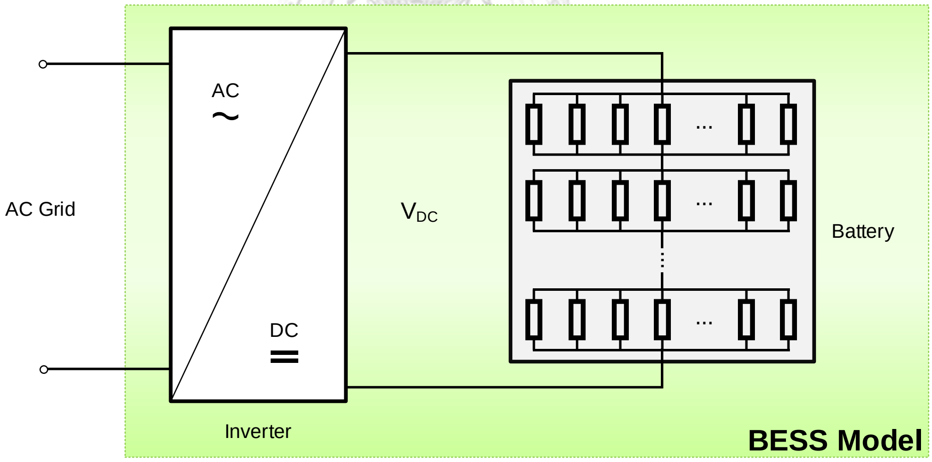


รูปที่ 4.7 แบบจำลองระบบควบคุมโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง

แบบจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องจำลองใช้ Static Generator ประเภทพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic) มีขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 3.5 เมกะวัตต์ (7x0.5 เมกะวัตต์) ระบบควบคุมโรงไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.7 เพื่อจำลองกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์ราย 10 วินาที ของวันที่ 5 ตุลาคม 2559

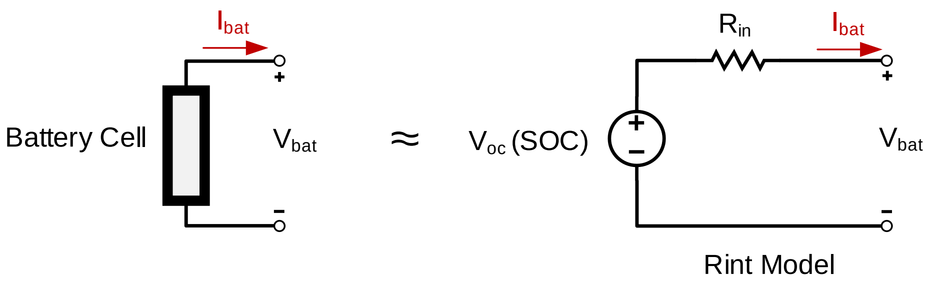
4.4 แบบจำลองระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์

ในงานวิจัยนี้จำลองระบบแบตเตอรี่เป็น Static Generator อนุมานว่าส่วนของแบตเตอรี่และอุปกรณ์แปลงผันพลังงาน (AC-DC Inverter) อยู่ภายใน Static Generator นี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และใช้การควบคุมแบบแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (current source model) สั่งการให้ระบบแบตเตอรี่จ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าตามโหมดการทำงานที่ต้องการ อย่างไรก็ตามหากต้องการศึกษาสภาวะการทำงานของแบตเตอรี่ (รับประจุ/คายประจุ) สถานะการประจุ (SOC) เป็นค่าที่แสดงถึงการทำงานเพื่อรับหรือคายประจุได้ ดังนั้นจึงต้องสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่เพื่อให้ได้ค่าดังกล่าวมาศึกษาวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.8 แบบจำลองทั่วไปของระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่

สำหรับแบบจำลองของแบตเตอรี่ (ส่วนหนึ่งในระบบแบตเตอรี่) ภายในประกอบด้วยเซลล์แบตเตอรี่จำนวนมากต่อขนานและอนุกรมกันตามความจุและแรงดันไฟฟ้าตามต้องการ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน (Lithium-ion Battey; LIB) สมมติให้เซลล์ของแบตเตอรี่มีวงจรสมมูลแบบ Rint Model [14], [15] ซึ่งในที่นี้กำหนดให้แรงดัน V_{OC} (Open-circuit voltage) แปรผันตาม SOC และในส่วนความต้านทานภายใน (R_{in}) กำหนดให้เป็นค่าคงที่ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิหรือตามค่า SOC) ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วงวจรสมมูลแบบ Rint Model ของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน

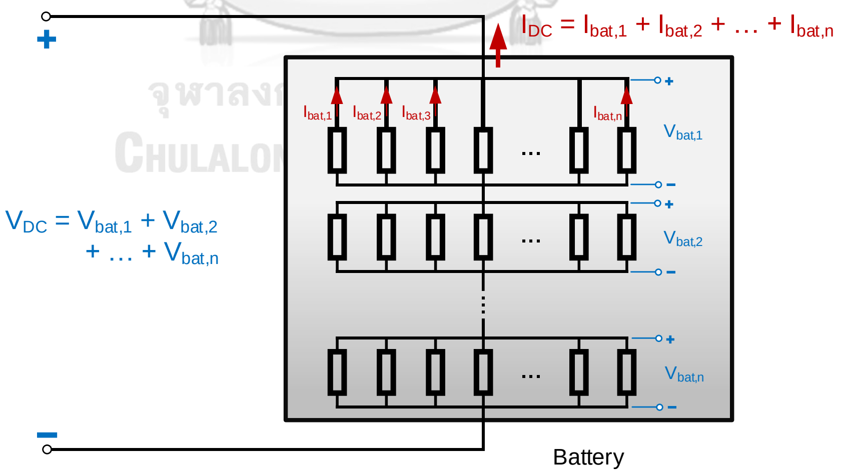
จากรูปข้างต้น แรงดันขาออกของแบตเตอรี่ (V_{bat}) คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_{bat} = V_{OC} - V_{Rin} \tag{4.1}$$

โดย $V_{Rin} = R_{in} \cdot I_{bat}$ และค่ากระแสของแบตเตอรี่ (I_{bat}) สัมพันธ์กับค่าความจุของแบตเตอรี่ (Q) และ SOC ดังแสดงในสมการที่ 4.2

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{Q_{rated}} \int \frac{I_{bat}}{3600} dt \tag{4.2}$$

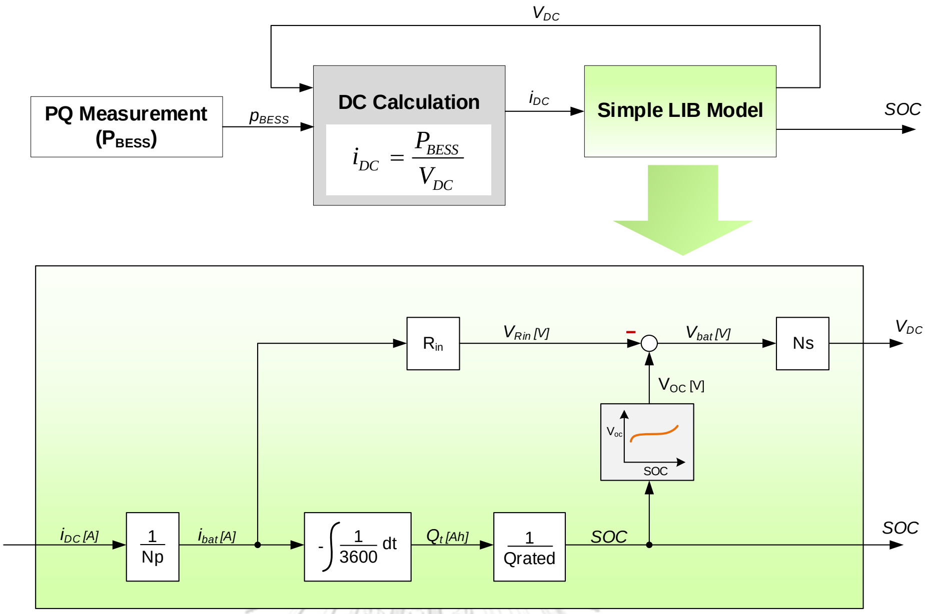
ทั้งนี้ลักษณะของแรงดันและกระแสแต่ละเซลล์แบตเตอรี่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และกระแสไฟฟ้า (i_{DC}) ของแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แรงดันและกระแสไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่

ดังนั้นจะได้แบบจำลองของแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงในรูปที่ 4.11 กำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่เป็นสัญญาณขาเข้าเพื่อคำนวณหากระแสด้านไฟฟ้ากระแสตรง (i_{DC})

ของแบตเตอรี่ และมีแบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนเพื่อสร้างสัญญาณขาออกแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) และค่า SOC ของแบตเตอรี่

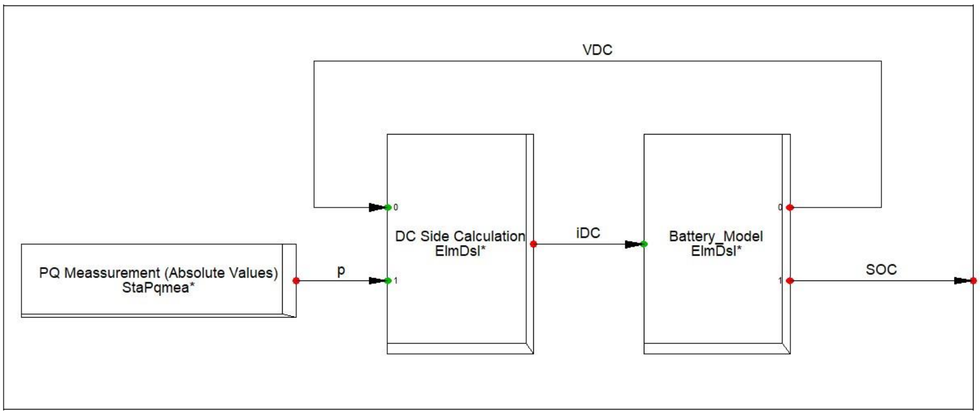


รูปที่ 4.11 แบบจำลองของแบตเตอรี่

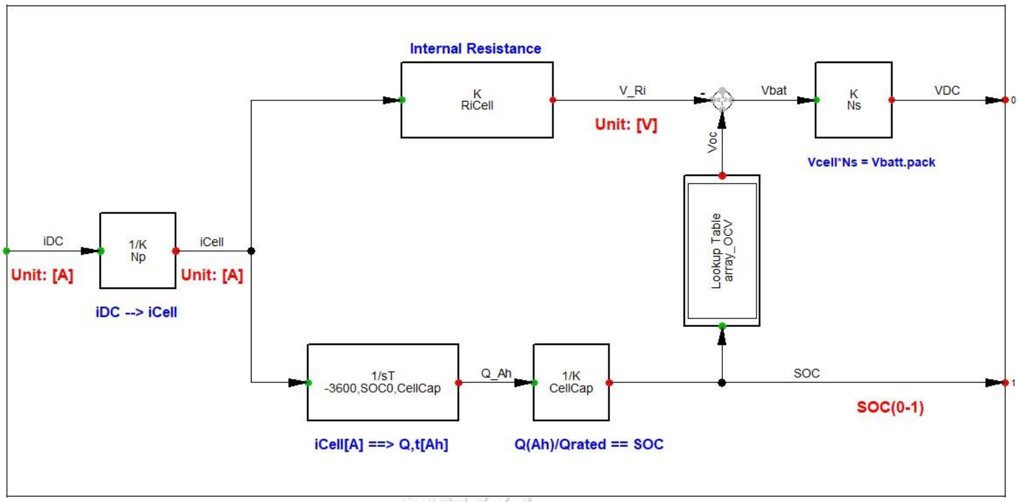
โดยตัวแปรในแบบจำลองมีคำนิยาม ดังนี้

ตัวแปร	หน่วย	คำนิยาม
Np	Unit	Amount of parallel connected cells (increase the total capacity)
Ns	Unit	Amount of serial connected cells (increase the output voltage)
Rin	ohm	Internal resistance per cell
Qrated	Ah	Rated capacity per cell

และแบบจำลองแบตเตอรี่ที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT แสดงในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 แบบจำลองของแบตเตอรี่ ที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT



รูปที่ 4.13 แบบจำลองภายในของ Simple LIB Model ที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT

สำหรับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลอง รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการประจุ (SOC) กับแรงดัน (V_{OC}) อ้างอิงจาก [16] แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนประเภท Lithium-iron phosphate ($LiFePO_4$ หรือ LFP) ในชื่อ A123 Li-iron-phosphate ANR26650M1 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 (ในส่วนพารามิเตอร์ Np และ Ns ขึ้นอยู่กับความจุและแรงดันที่ต้องการ ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว)

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองของระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
Nominal capacity	2.3 Ah
Nominal voltage	3.3 V
Internal resistance	10 mΩ
Nominal discharge current	2.3 A
Nominal ambient temperature	25°C
Cycle life at 10C discharge, 100% DOD	Over 1,000 cycles

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5 แบบจำลองของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์

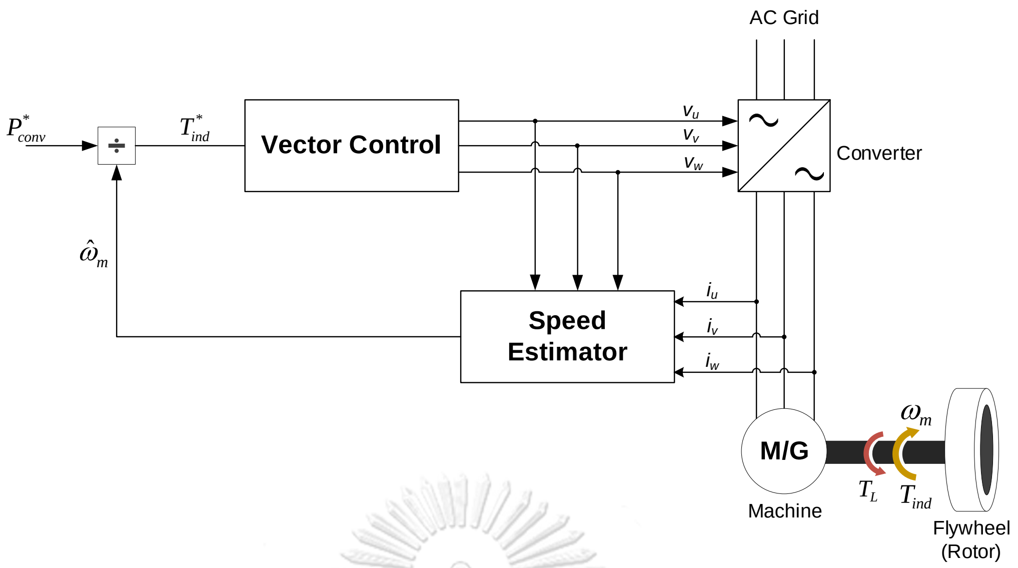
ในงานวิจัยนี้จำลองระบบล้อตุนกำลังเป็น Static Generator เช่นเดียวกับระบบแบตเตอรี่ โดยสมมติว่าส่วนประกอบต่างๆ ของล้อตุนกำลังดังรูปที่ 2.1 เช่น โรเตอร์, มอเตอร์ และอุปกรณ์แปลงผันพลังงาน (AC-AC Converter) อยู่ภายใน Static Generator ที่ใช้ และกำหนดให้ระบบล้อตุนกำลังถูกควบคุมในโหมดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Current source model) สั่งการให้รับหรือ

จ่ายกำลังไฟฟ้าตามการทำงานที่ต้องการเท่านั้น หากต้องการสิ่งที่แสดงถึงการทำงานของระบบล้อตุนกำลังหรือความเร็วเชิงมุม (ω_m) ของโรเตอร์ที่เกิดขึ้นจากการขับเคลื่อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่อยู่ภายในระบบล้อตุนกำลัง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองของระบบล้อตุนกำลังเพื่อค่าความเร็วเชิงมุมดังกล่าว

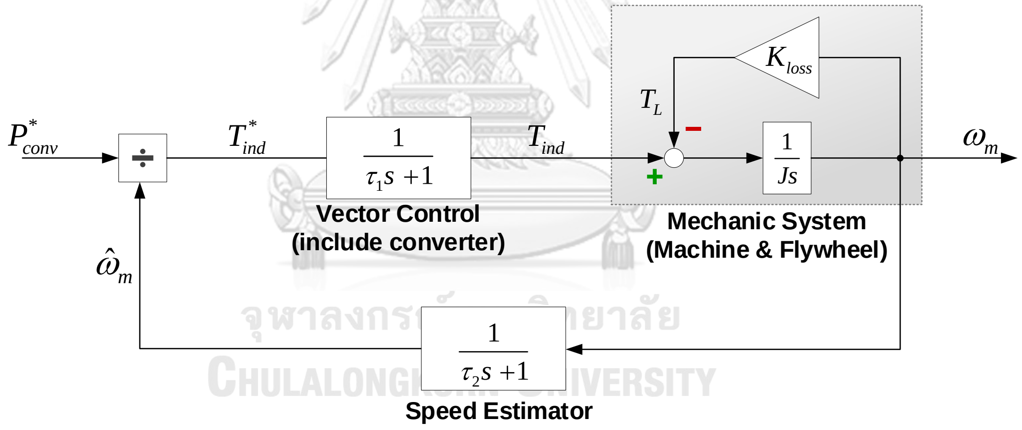
เพื่อให้เกิดการหมุนของโรเตอร์ภายในระบบล้อตุนกำลังจะต้องทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ของระบบล้อตุนกำลัง ซึ่งการขับเคลื่อนมอเตอร์เทียบเท่ากับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยทั่วไปมักต้องติดตั้งเซนเซอร์เพื่อวัดตำแหน่งและความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์ เรียกว่าการควบคุมแบบเวคเตอร์ (Vector control) ที่สามารถควบคุมแรงบิดได้โดยตรง และมีความแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามการติดตั้งเซนเซอร์ทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายการติดตั้งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวไม่ได้ถูกติดตั้งมากับมอเตอร์โดยตรง นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงตำแหน่งและสภาพแวดล้อมในการติดตั้งเพื่อให้เกิดความแม่นยำสูงสุดในการใช้งาน และการติดตั้งเซนเซอร์อาจก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนส่งผลให้การควบคุมยากขึ้น รวมถึงเกิดความยุ่งยากเชิงกลที่เกิดจากการติดตั้งอีกด้วย จากข้อเสียของวิธีการควบคุมแบบเวคเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีการพัฒนาการควบคุมเวกเตอรแบบไรเซ็นเซอร์ (Sensorless vector control) เพื่อหลีกเลี่ยงการติดตั้งเซนเซอร์ โดยใช้การประมาณตำแหน่งและความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์จากการวัดแรงดันและกระแส ดังแสดงในรูปที่ 4.14 อีกทั้งวิธีนี้ยังสามารถควบคุมแรงบิดได้โดยตรงเช่นกัน รวมถึงมีความแม่นยำและมีการตอบสนองที่รวดเร็ว

ดังนั้นแบบจำลองของระบบล้อตุนกำลังในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้หลักการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ เพื่อประมาณความเร็วเชิงมุมในการหมุนของโรเตอร์ในระบบล้อตุนกำลัง สร้างแรงบิดเหนี่ยวนำตามต้องการ ให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าขับเคลื่อนการหมุนของล้อตุนกำลังต่อไป

จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) และแผนภาพรูปที่ 4.14 สามารถจำลองระบบล้อตุนกำลังดังแสดงในรูปที่ 4.15 กำหนดให้ส่วนของการควบคุมแรงบิดเหนี่ยวนำ (Vector control) และส่วนของการประมาณความเร็วเชิงมุมของล้อตุนกำลัง (Speed estimator) แทนด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อต้องการค่าความเร็วเชิงมุมในการหมุนของล้อตุนกำลังที่เกิดขึ้นในการจำลองระบบนี้ โดยมีสัญญาณขาเข้าเป็นค่ากำลังไฟฟ้าคำสั่งของระบบล้อตุนกำลังนำมาหารด้วยค่าความเร็วเชิงมุมโดยประมาณ เกิดเป็นค่าแรงบิดเหนี่ยวโดยประมาณผ่านส่วนการควบคุมแบบเวกเตอร์เพื่อสร้างคำสั่งแรงบิดเหนี่ยวนำที่แท้จริงสั่งการให้มอเตอร์ขับเคลื่อนล้อตุนกำลัง



รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ (Sensorless Vector Control) สำหรับระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง



รูปที่ 4.15 แบบจำลองของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง ที่ใช้หลักการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์

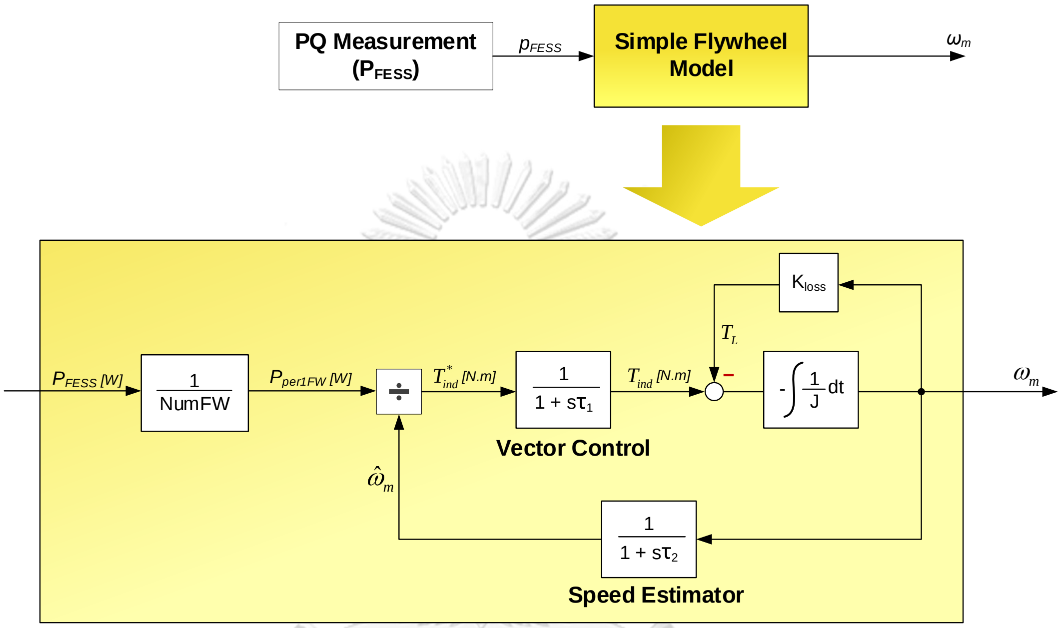
โดย P^*_{conv} คือ กำลังไฟฟ้าคำสั่งของระบบล้อตุนกำลัง (W)

T^*_{ind} คือ แรงบิดเหนี่ยวนำ (Nm) โดยประมาณ ที่เกิดจากมอเตอร์ขับเคลื่อนในระบบล้อตุนกำลัง

K_{loss} คือ สัมประสิทธิ์แรงบิดสูญเสียทางกล ในที่นี้กำหนดให้มีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นกับค่าความเร็วเชิงมุม ดังนี้ $T_{loss} = K_{loss} \cdot \omega_m$

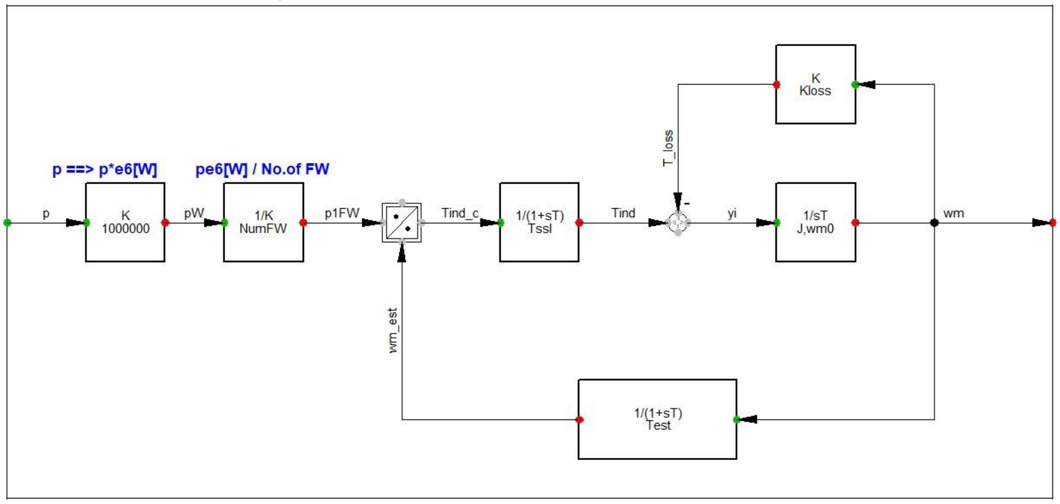
$\hat{\omega}_m$ คือ ความเร็วเชิงมุมโดยประมาณของล้อตุนกำลัง (rad/s)

ดังนั้นจะได้แบบจำลองของระบบล้อตุนกำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงในรูปที่ 4.16 กำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบล้อตุนกำลังเป็นสัญญาณขาเข้า และมีแบบจำลองระบบล้อตุนกำลังซึ่งมีการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ (Sensorless Vector Control) สร้างความเร็วเชิงมุมในการหมุนของโรเตอร์ (ω_m) เป็นสัญญาณขาออก โดยตัวแปร NumFW หมายถึงจำนวนล้อตุนกำลังที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 4.16 แบบจำลองระบบล้อตุนกำลัง

และแบบจำลองระบบล้อตุนกำลังที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT แสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แบบจำลองของระบบล้อตุนกำลังที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT

คุณลักษณะจำเพาะของระบบล้อตุนกำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ อ้างอิงจากเอกสารทางเทคนิคของบริษัท SANKEN ดังแสดงในตารางที่ 4.3 นำไปสู่การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบล้อตุนกำลังที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 คุณลักษณะจำเพาะของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง

พารามิเตอร์	ข้อมูลจำเพาะ
Rated Energy	7.2 MJ หรือ 2 kWh
Rated speed	7,500 rpm
Motor	Induction motor/generator, (output power 15kW/30kW/90kW)
Flywheel dimension	Ø694 x t156
Weight	386 kg

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการจำลอง
Flywheel inertia (J) [kg.m^2]	23.344
Vector control time constant (τ_1) [s]	0.01
Speed estimator time constant (τ_2) [s]	0.001
Speed estimator time constant (τ_2) [s] *ideal	0
Coefficient of loss torque (K_{loss}) *ideal	0
Number of flywheel (NumFW)	ขึ้นอยู่กับขนาดติดตั้งที่ต้องการ

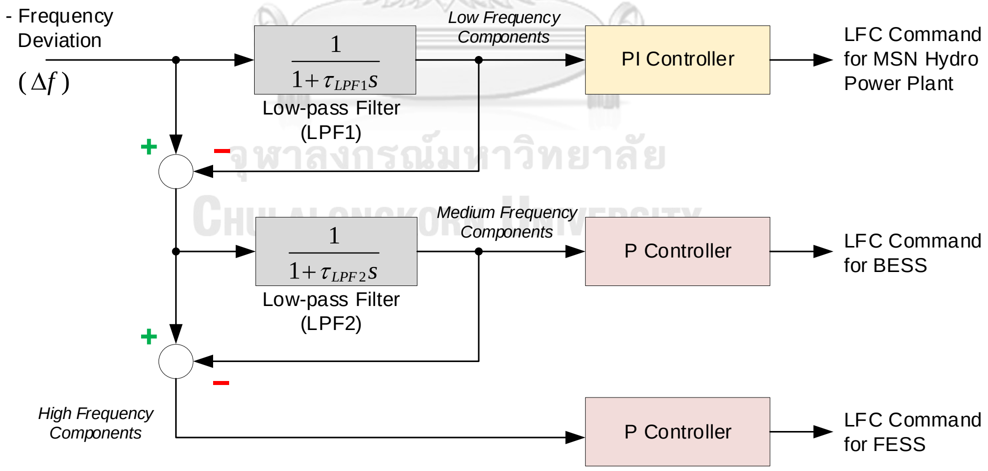
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในที่นี้กำหนดส่วนการประมาณความเร็วเชิงมุม (Speed estimator) และแรงบิดสูญเสียทางกลให้เป็นในทางอุดมคติ* ดังนั้นส่วนการประมาณความเร็วเชิงมุมจึงมีค่าเท่ากับ 1 ทำให้พารามิเตอร์ τ_2 มีค่าเป็น 0 และส่วนสัมประสิทธิ์แรงบิดสูญเสียทางกล (K_{loss}) มีค่าเป็น 0 เช่นกัน นั่นคือไม่เกิดแรงบิดสูญเสียทางกล

4.6 แบบจำลองระบบควบคุมความถี่โหลดที่ศึกษาในงานวิทยานิพนธ์

ความผันผวนของโหลดในระบบไฟฟ้าส่งผลกระทบให้เกิดปัญหาด้านความถี่ของระบบไฟฟ้าที่อาจเกินหรือต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด จึงต้องการการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้า หรือการควบคุมความถี่โหลด (Load frequency control; LFC) เพื่อให้ค่าเบี่ยงเบนความถี่ไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ กฟภ. กำหนด คือ 50±0.5 เฮิรตซ์ สำหรับการควบคุมความถี่โหลดในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้มีการทำงาน

ร่วมกันของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา ระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ และระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง ผังการควบคุมแสดงในรูปที่ 4.18 โดยรับค่าเบี่ยงเบนความถี่ไฟฟ้าเป็นสัญญาณนำเข้า และแบ่งย่านความถี่ออกเป็น 3 ระดับด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง ได้แก่ ความผันผวนเร็ว ปานกลาง และช้า ซึ่งถูกรองรับด้วยระบบล้อตุนกำลัง ระบบแบตเตอรี่ และโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงา ตามลำดับ โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงาจะถูกกำหนดให้รับผิดชอบความผันผวนที่ช้ากว่าค่าเวลาตอบสนองของโรงไฟฟ้า ดังนั้นส่วนความผันผวนที่เร็วกว่าค่าเวลาตอบสนองของโรงไฟฟ้าแม่สะงาจะรับผิดชอบโดยระบบล้อตุนกำลังและระบบแบตเตอรี่ สัญญาณความเบี่ยงเบนความถี่ที่ถูกแบ่งย่านความถี่ดังกล่าว จะถูกส่งผ่านไปยังตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัล เพื่อสร้างสัญญาณคำสั่งการควบคุมความถี่โหลด (LFC command) ให้แต่ละแหล่งผลิตไฟฟ้า ทั้งนี้ระบบล้อตุนกำลังและระบบแบตเตอรี่จะใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนเท่านั้น เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ระบบตอบสนองต่อสัญญาณความผันผวนในย่านความถี่ต่ำ และเพื่อเป็นการลดขนาดที่จำเป็นของระบบกักเก็บพลังงานทั้งสองชนิดอีกด้วย เนื่องจากว่า หากใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล ระบบควบคุมจะมีอัตราขยายสูงมากที่ย่านความถี่ต่ำ ส่งผลให้ระบบล้อตุนกำลังและแบตเตอรี่ต้องจ่ายหรือรับกำลังงานไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่มีปริมาณสูงในสภาวะอยู่ตัวแม้ว่าสัญญาณความเบี่ยงเบนความถี่ในย่านนี้ที่ถูกกรองมาแล้วจะมีค่าน้อยมากก็ตาม ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา

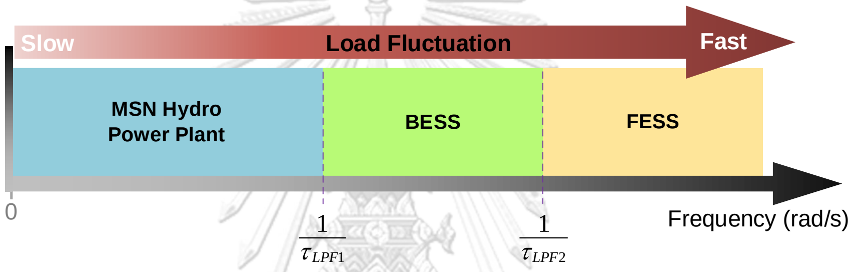


รูปที่ 4.18 ระบบควบคุมความถี่โหลดด้วยโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา ระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ และระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง

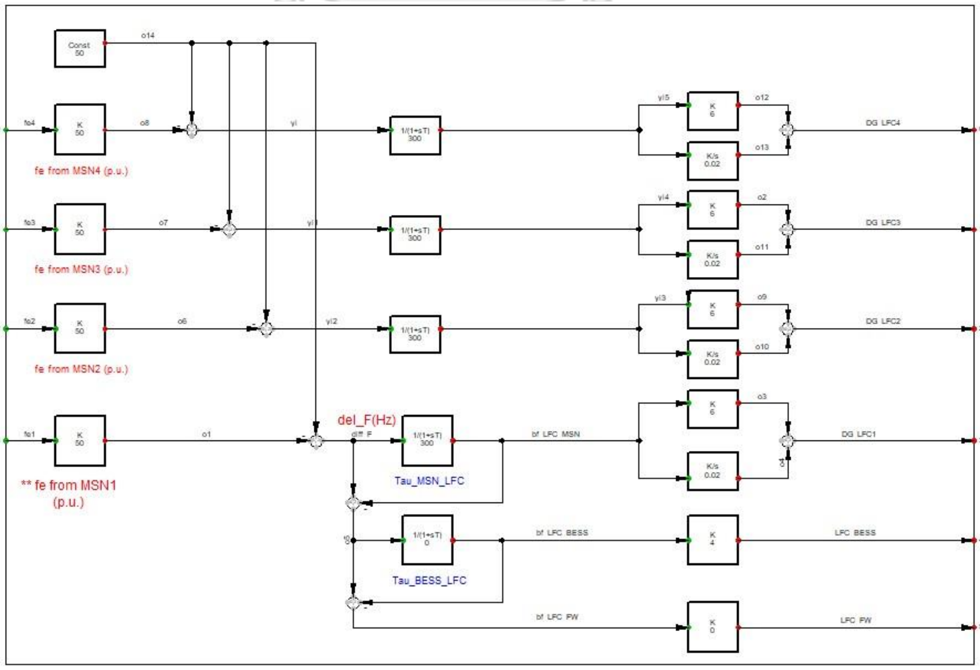
สัญญาณคำสั่งการควบคุมความถี่โหลด (LFC command) ของระบบล้อตุนกำลังและระบบแบตเตอรี่เป็นสัญญาณที่กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบล้อตุนกำลังหรือแบตเตอรี่จะจ่ายเข้าสู่ระบบในกรณีความถี่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน หรือรับจากระบบในกรณีความถี่สูงกว่าค่ามาตรฐานโดยตรง แต่

สัญญาณคำสั่งการควบคุมความถี่โหลดของโรงไฟฟ้าพลังน้ำแม่สะงานั้น จะถูกนำไปรวมกับค่าคำสั่งกำลังไฟฟ้าจากวงรอบควบคุมความถี่ปฐมภูมิ (Primary response control) ซึ่งกำหนดจากสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า ที่เรียกว่าการควบคุมแบบดรูป (Droop control) จึงจะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำแม่สะงาจะต้องจ่ายเข้าสู่ระบบ

ภาพรวมของการแบ่งย่านการทำงานของการควบคุมความถี่โหลดที่อาศัยหลักการแบ่งแยกองค์ประกอบเชิงความถี่ของค่าเบี่ยงเบนของความถี่ระบบ สามารถแสดงได้ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ค่าความถี่หักมุม (Corner frequency) ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าคงที่เวลาของวงจรกรองความถี่จะเป็นจุดแบ่งแยกองค์ประกอบความผันผวนของค่าเบี่ยงเบนความถี่ เป็น 3 ย่านคือ ย่านที่ความเร็วของความผันผวนมีระดับต่ำ ระดับปานกลาง และระดับสูง ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 การแบ่งย่านการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละชนิด
ในการจัดการความผันผวนของความถี่

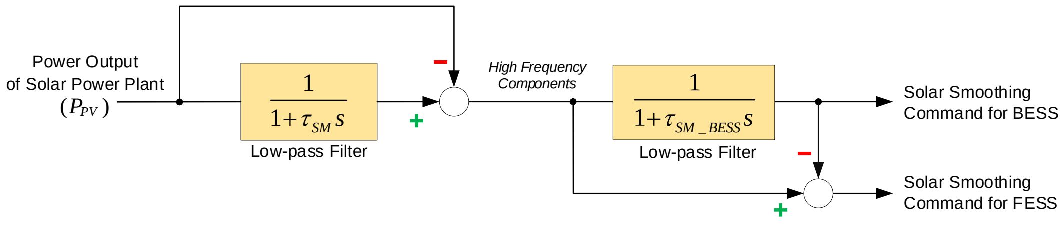


รูปที่ 4.20 ระบบควบคุมความถี่โหลดที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT

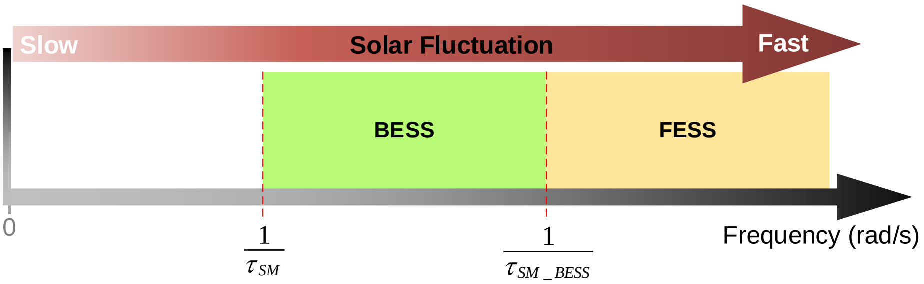
4.7 แบบจำลองระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ศึกษาในงานวิทยานิพนธ์

เนื่องด้วยกำลังผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีความผันผวนสูง ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพทางความถี่ระบบไฟฟ้า เพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบกักเก็บพลังงาน วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประงานการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังและระบบแบตเตอรี่สำหรับเป้าหมายนี้ โดยอาศัยหลักการแยกองค์ประกอบเชิงความถี่คล้ายกับระบบควบคุมความถี่โหลดในหัวข้อที่แล้ว แผนภาพการแยกองค์ประกอบความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.21 กำหนดให้กำลังไฟฟ้าขาออกจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นสัญญานขาเข้า และใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่งเพื่อแยกเอาองค์ประกอบความผันผวนที่เร็วออกจากสัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ผันผวนช้าซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงในแต่ละช่วงเวลาของวัน สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่เป็นส่วนประกอบความผันผวนสูงหรือความถี่สูงนี้จะถูกชดเชยหรือกำจัดโดยระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังและแบตเตอรี่ ในขั้นตอนถัดไป จะเป็นการแยกเอาองค์ประกอบที่ความถี่สูงมากออกมาเป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังต้องชดเชย เพื่อลดภาระและขนาดของแบตเตอรี่ ส่วนองค์ประกอบที่เหลือที่เป็นองค์ประกอบความผันผวนที่ความถี่สูงปานกลางจะถูกชดเชยโดยระบบกักเก็บพลังงานชนิดแบตเตอรี่ การแบ่งย่านความถี่ที่รับผิดชอบที่กล่าวมาทั้งหมดจะกำหนดด้วยค่าคงที่เวลาของวงจรกรองความถี่ดังแสดงในรูปที่ 4.22 อย่างไรก็ตามหากค่าคงที่เวลามากเกินไป จะทำให้ระบบแบตเตอรี่และระบบล้อตุนกำลังมีการทำงานมากขึ้น และยังส่งผลให้ขนาดติดตั้งของแบตเตอรี่และล้อตุนกำลังมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย

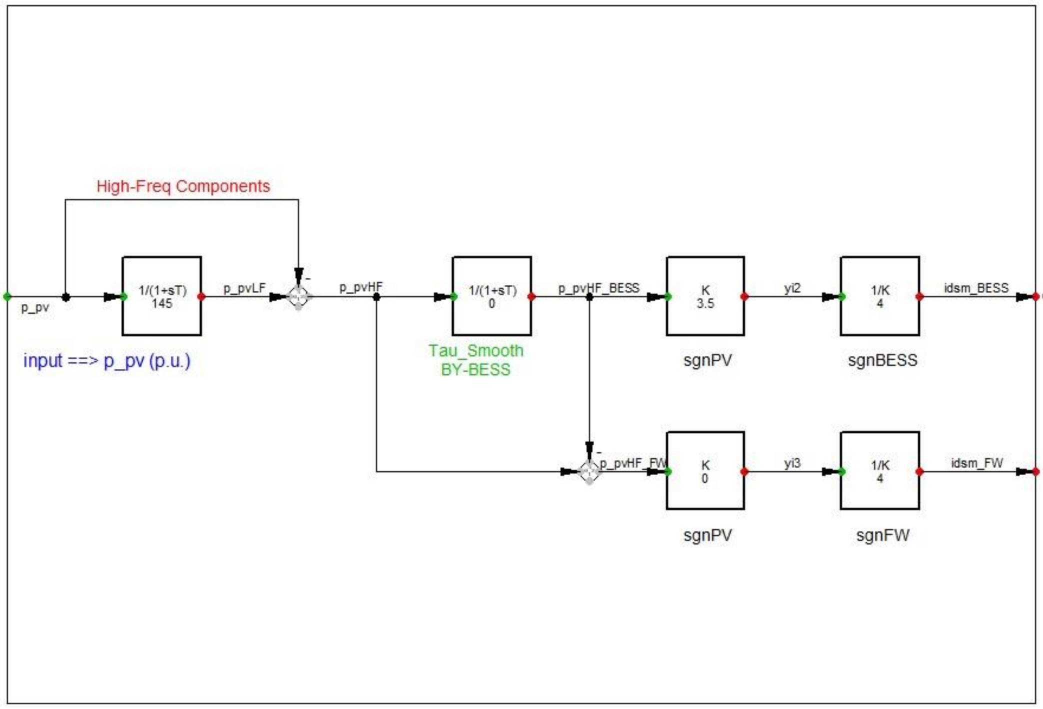
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.21 แผนภาพแสดงการแยกองค์ประกอบความผันผวนเพื่อการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยระบบแบตเตอรี่และระบบล้อตุนกำลัง

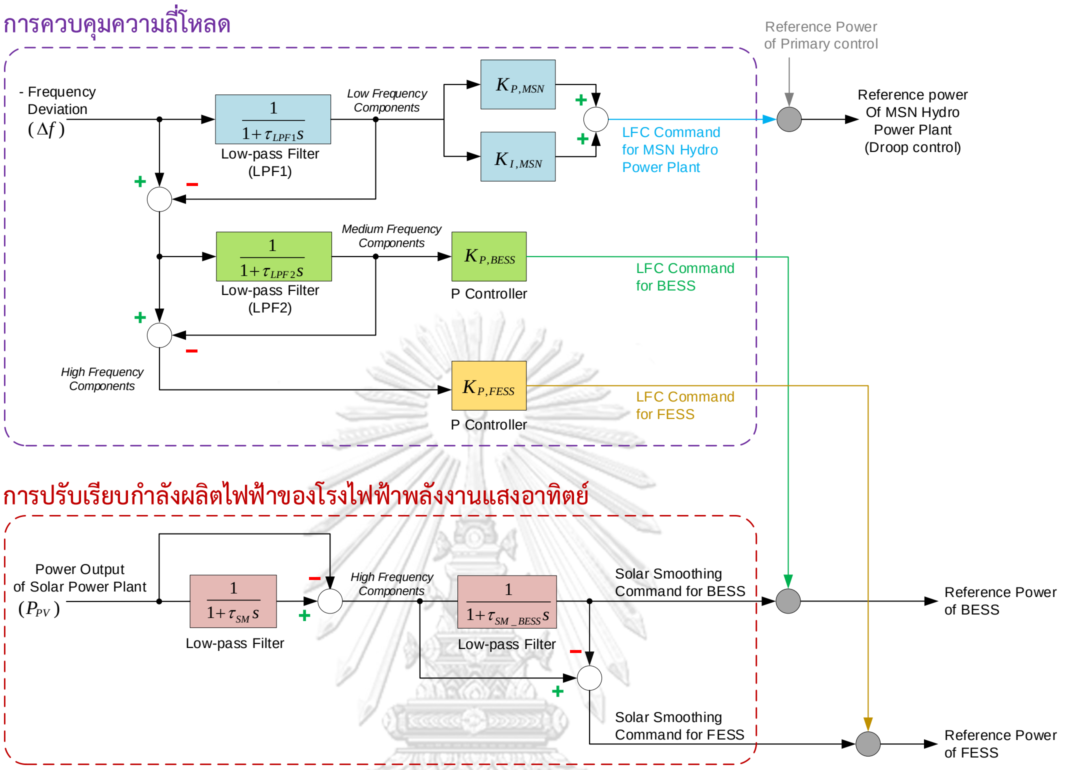


รูปที่ 4.22 การแบ่งย่านการทำงานในการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละชนิด



รูปที่ 4.23 ระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในโปรแกรม DIgSILENT

ดังนั้น เราสามารถสรุปแผนผังรวมของระบบควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละชนิดสำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ ได้ตามแผนภาพด้านล่าง



รูปที่ 4.24 การประสานการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละชนิด
สำหรับการควบคุมความถี่โหลด และการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

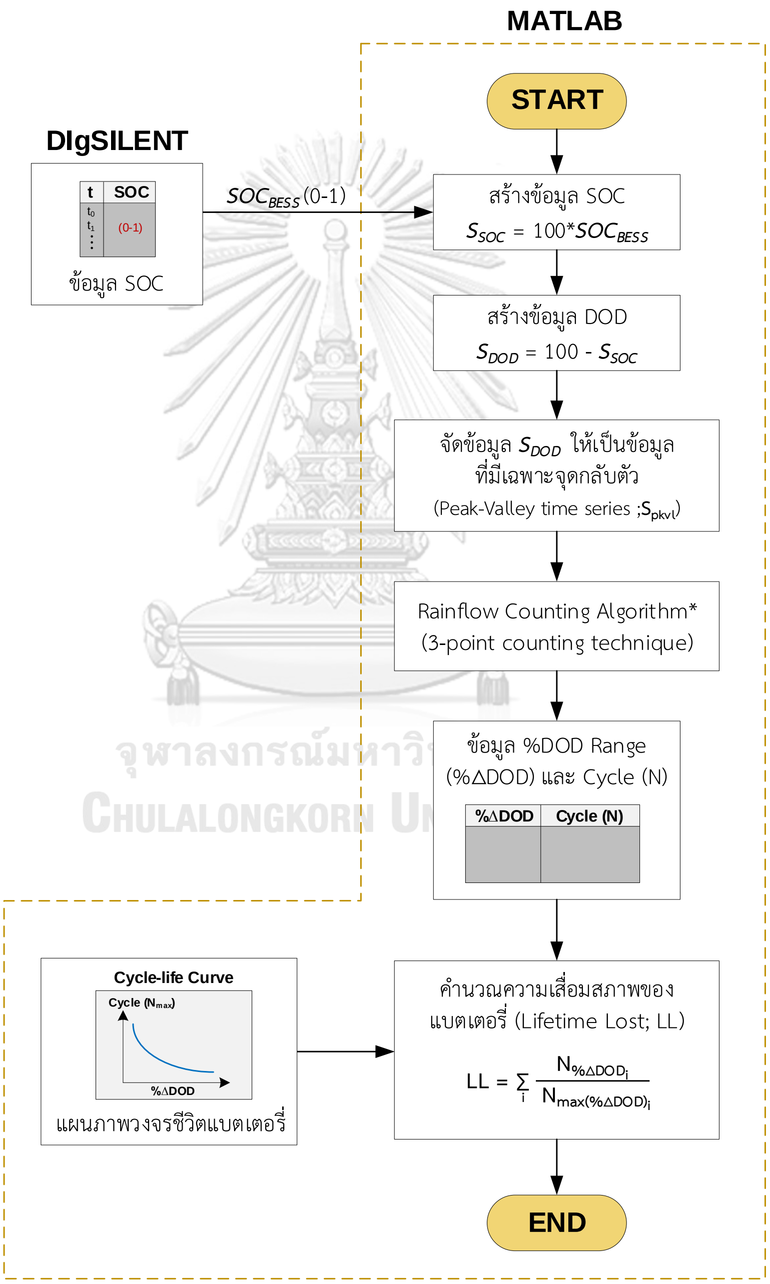
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.8 การวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานระบบแบตเตอรี่

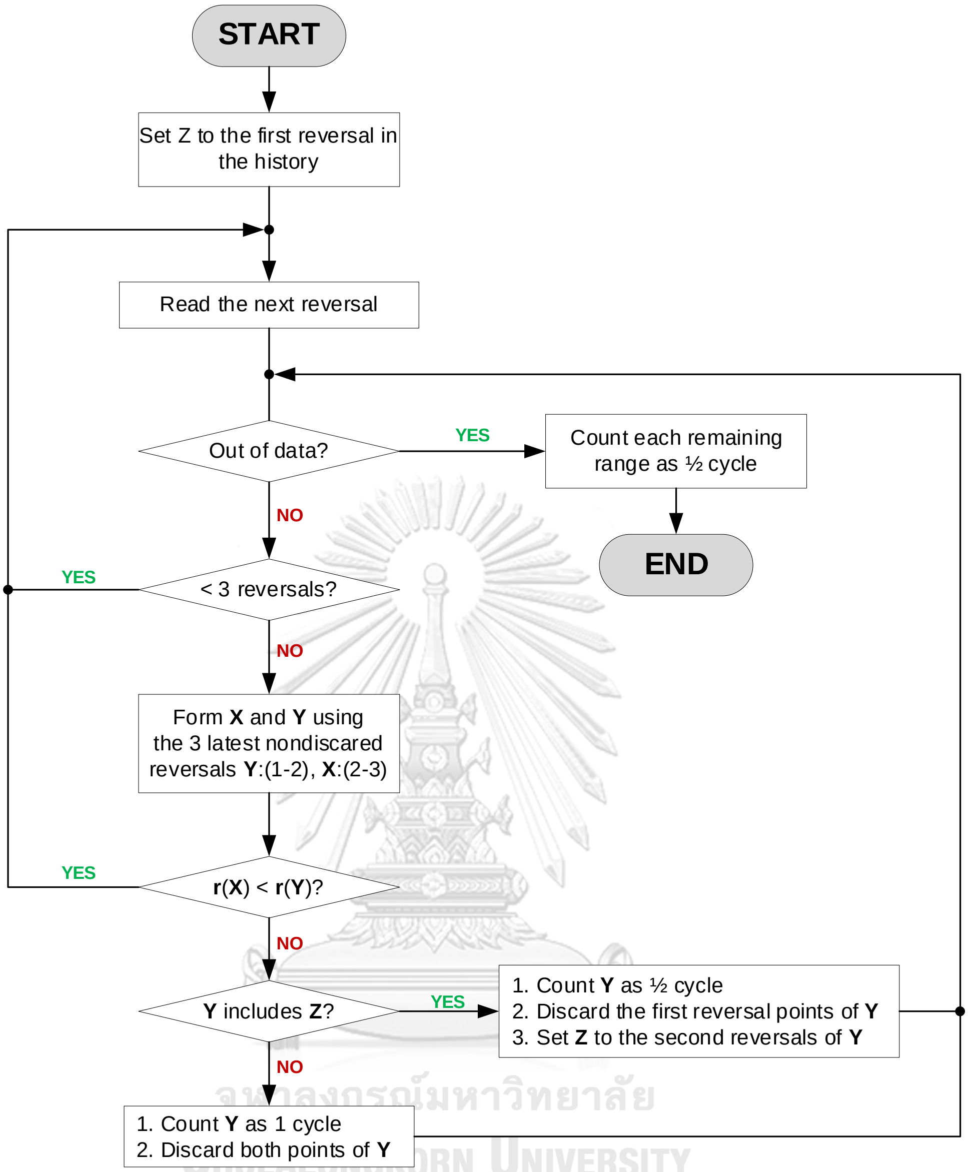
ในงานวิจัยนี้จะมีการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานแบตเตอรี่ 2 วิธี ได้แก่ การประมาณรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Equivalent Full Cycles (EFCs) (อธิบายในหัวข้อที่ 2.4) และการใช้เทคนิค Rainflow cycle counting โดยนำข้อมูลสถานะการประจุ (SOC) ของแบตเตอรี่ที่ได้จากแบบจำลองของแบตเตอรี่ในหัวข้อที่ 4.4 มาเป็นข้อมูลตั้งต้นในการเข้าสู่ขั้นตอนการนับด้วยเทคนิค Rainflow cycle counting ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.25

สำหรับผังการทำงานของ Rainflow counting algorithm ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ จะใช้เทคนิคการนับรอบแบบ 3 จุด (3-point cycle counting) ที่ได้อธิบายในเบื้องต้นในหัวข้อที่ 2.4 แล้ว แต่สำหรับข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนอย่าง

ข้อมูล DOD มีเงื่อนไขเพิ่มเติมในการนับรอบ กล่าวคือมีการพิจารณา ½ รอบการทำงานนอกเหนือจากการนับ 1 รอบการทำงาน ดังแสดงการทำงานของ Rainflow counting algorithm ในรูปที่ 4.26 และจากการที่กำหนดให้การพิจารณารอบการทำงานครั้งละ 3 จุด (P_1, P_2 และ P_3) โดย $X = |P_3 - P_2|$ และ $Y = |P_2 - P_1|$ ค่าสัมบูรณ์ของ X และ Y นี้ จะถูกเรียกเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงความลึกการคายประจุ (DOD range หรือ ΔDOD) เพื่อนับรอบการทำงานที่เกิดขึ้นในแต่ละ ΔDOD



รูปที่ 4.25 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่

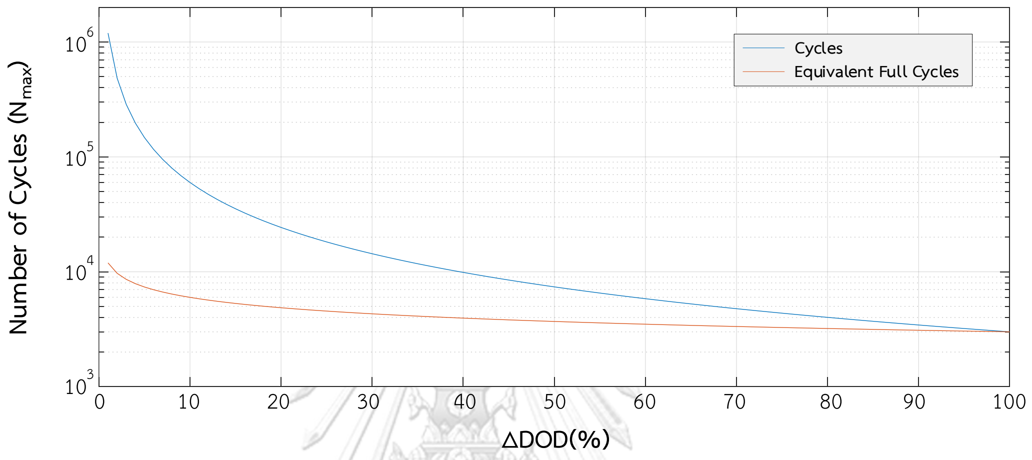


รูปที่ 4.26 Rainflow counting algorithm [17]

สมการสำหรับการคำนวณความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่หรือการสูญเสียอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (Lifetime Lost; LL) แสดงในสมการที่ (4.3) ผลรวมของการนำจำนวนรอบการทำงานที่เกิดขึ้นหารด้วยจำนวนรอบสูงสุดในแต่ละ ∆DOD ซึ่งจำนวนรอบสูงสุดของแบตเตอรี่มาจากแผนภาพวงจรชีวิตของแบตเตอรี่ (Cycle-life curve) มักได้รับมาจากบริษัทผู้ผลิต

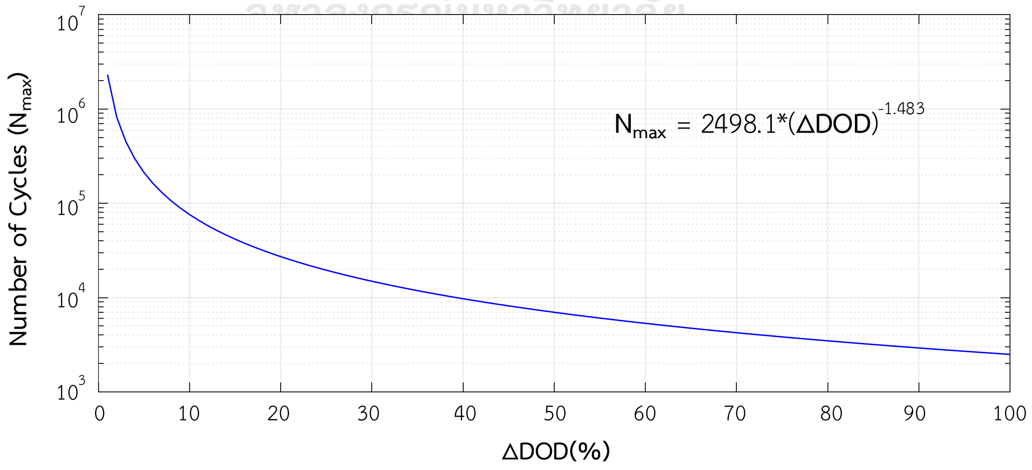
$$Lifetime\ Lost\,(LL) = \sum_i \frac{N_{\%\Delta DOD_i}}{N_{\max_{\%\Delta DOD_i}}} \qquad (4.3)$$

ในส่วนของแผนภาพวงจรชีวิตของแบตเตอรี่ (Cycle-life curve) โดยทั่วไปจะถูกกำหนดโดยใช้แผนภาพ Woehler ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบสูงสุด (N_{max}) ในการทำงานของแบตเตอรี่ไปจนสิ้นอายุขัยตามแต่ละค่าการเปลี่ยนแปลงความลึกของการคายประจุ (ΔDOD) และแสดงจำนวนรอบสูงสุดโดยประมาณของแบตเตอรี่ที่เรียกว่า Equivalent Full Cycles ทั้งนี้เส้นโค้งทั้ง 2 ที่อยู่ภายในแผนภาพ Woehler จะถูกนำไปใช้เพื่อประเมินอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ต่อไป



รูปที่ 4.27 แผนภาพวงจรชีวิตของแบตเตอรี่ (Cycle-life curve) ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้

สำหรับแผนภาพวงจรชีวิตของแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อ้างอิงจาก [18] มีจำนวนรอบสูงสุดประมาณ 3,500 รอบ ที่ร้อยละ 80 ของความลึกการคายประจุ ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 แผนภาพวงจรชีวิตของแบตเตอรี่ (Cycle-life curve) ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้

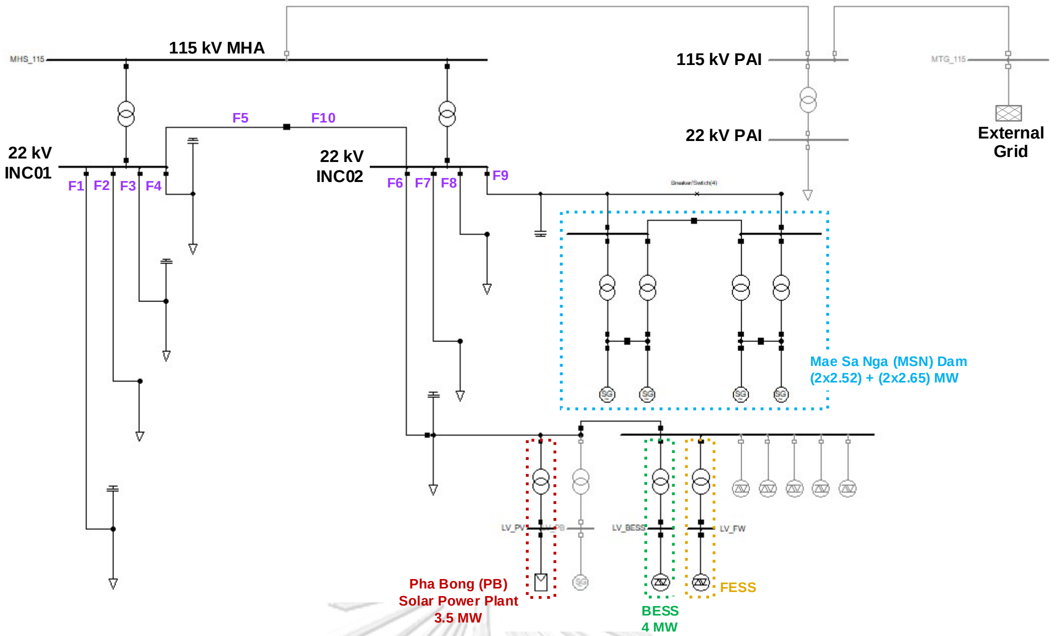
บทที่ 5
ผลการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลัง

บทนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ระบบล้อตุนกำลังร่วมกับแหล่งผลิตไฟฟ้าชนิดอื่นภายในพื้นที่ของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในสภาวะแยกโดด สำหรับการควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐานของ กฟภ. และการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อลดความผันผวนที่เกิดขึ้นจากโหลดและการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากการออกแบบให้เฉพาะระบบแบตเตอรี่รับผิดชอบระบบควบคุมดังกล่าวที่ย่านความถี่สูง ทำให้แบตเตอรี่ต้องรองรับความผันผวนเร็วที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโหลดและกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ส่งผลเสียให้แบตเตอรี่มีการอัดประจุและคายประจุอยู่บ่อยครั้ง และเกี่ยวเนื่องไปถึงการลดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ จึงกำหนดกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณี ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 5.1 เพื่อวิเคราะห์การทำงานของระบบแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการใช้งานระบบล้อตุนกำลังเพิ่มในระบบ รวมถึงวิเคราะห์การทำงานและขนาดติดตั้งของระบบล้อตุนกำลัง

ตารางที่ 5.1 การทำงานของโรงไฟฟ้าพลังน้ำและระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังและแบตเตอรี่ในแต่ละกรณีศึกษา

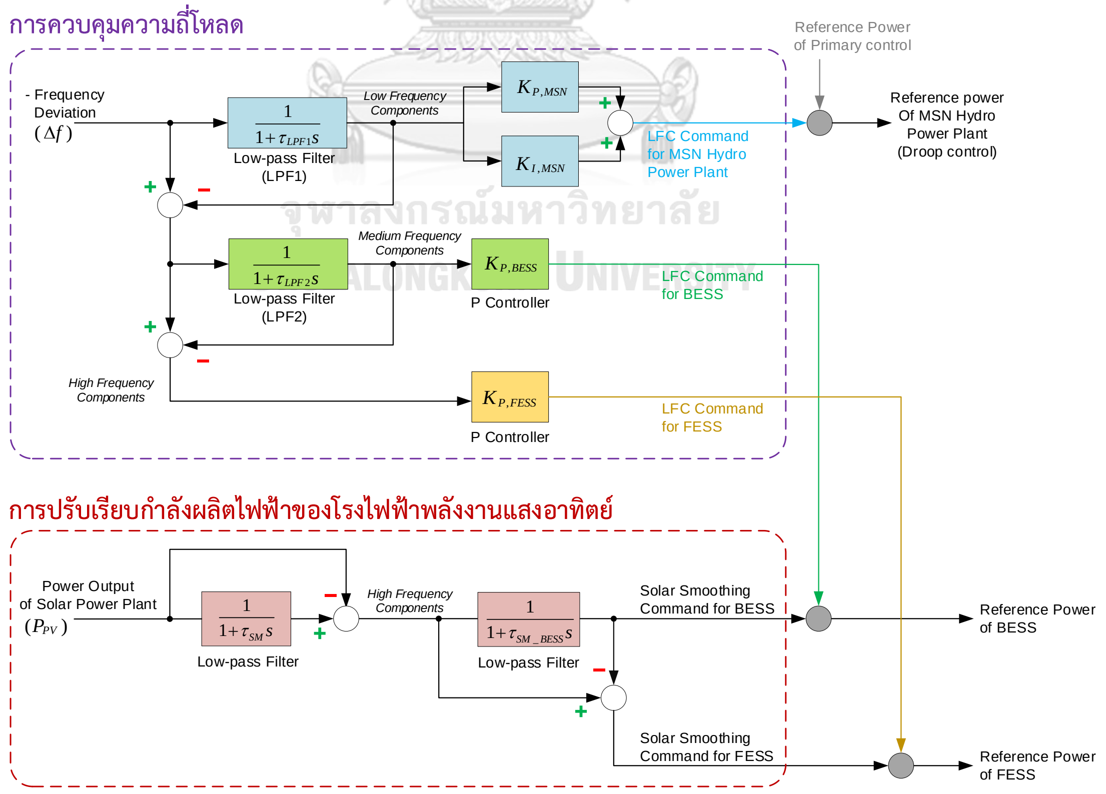
กรณีศึกษา	การควบคุมความถี่โหลด (LFC)			การปรับเรียบกำลังไฟฟ้า (Solar Smoothing)	
	โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงา	แบตเตอรี่	ล้อตุนกำลัง	แบตเตอรี่	ล้อตุนกำลัง
1	●	●	-	●	-
2	●	●	●	●	-
3	●	●	●	●	●

แบบจำลองระบบไฟฟ้าขนาดเล็กอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในสภาวะแยกโดด มีแหล่งผลิตไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ในที่นี้จะจำลองระบบแบตเตอรี่ และระบบล้อตุนกำลังเป็น Static Generator เพื่อศึกษาผลการทำงานในการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานทั้งสองชนิด



รูปที่ 5.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในสภาวะแยกโดด

การตั้งค่าตัวแปรและตำแหน่งของตัวแปรที่ใช้ในระบบควบคุมความถี่โหลดและการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แสดงในรูปที่ 5.2 และตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งตัวแปรที่ใช้ในระบบควบคุมที่ศึกษา

ตารางที่ 5.2 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบ

กรณีศึกษา		การควบคุมความถี่โหลด (LFC)						การปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้า (Solar Smoothing)	
		โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงา			แบตเตอรี่		ล้อตุนกำลัง	τ_{SM} (s)	τ_{SM_BESS} (s)
		τ_{LPF1} (s)	$K_{P,MSN}$	$K_{I,MSN}$	τ_{LPF2} (s)	$K_{P,BESS}$	$K_{P,FESS}$		
1		300	6	0.02	-	4	-	145	-
2	2.1	300	6	0.02	50	4	4	145	-
	2.2	300	6	0.02	200	4	4	145	-
3		300	6	0.02	200	4	4	145	70

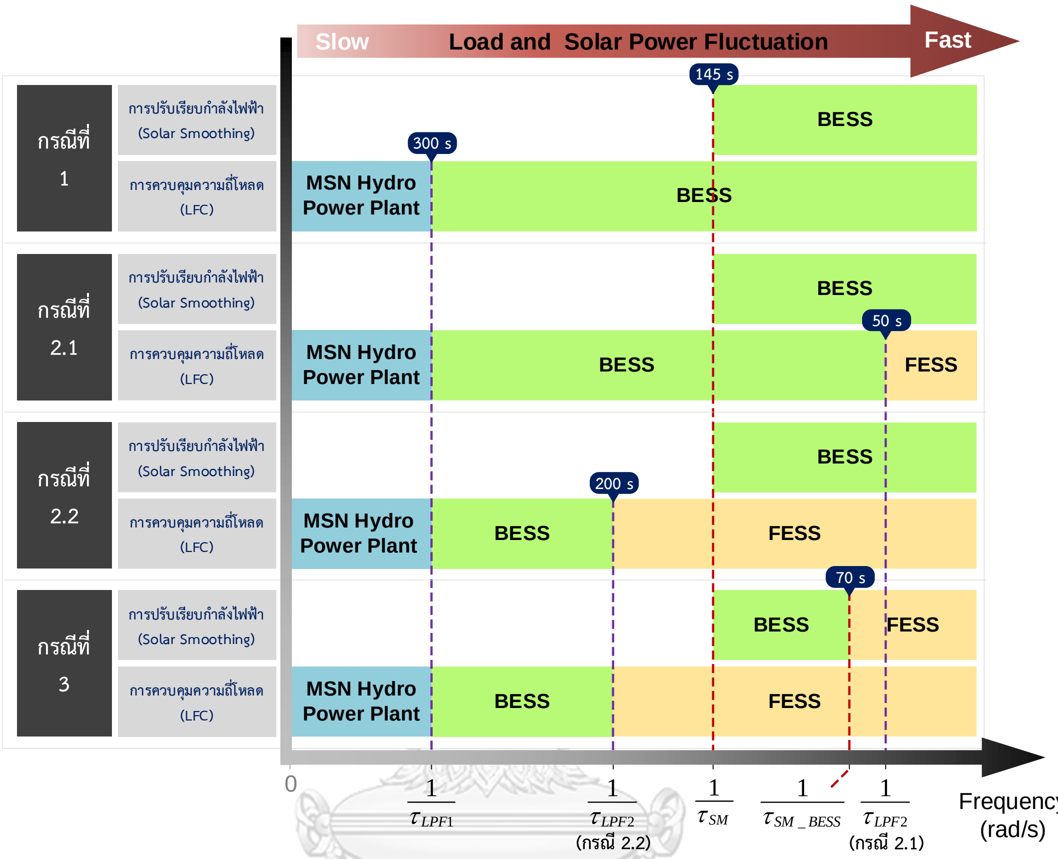
<u>หมายเหตุ</u> ค่าตัวแปรในการควบคุมความถี่โหลดและการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัล ของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงา และระบบแบตเตอรี่ อ้างอิงจาก [2] กำหนดให้ค่าคงที่เวลาการควบคุมความถี่โหลดของโรงไฟฟ้ามีค่า 10 เท่าของค่าตอบสนองโรงไฟฟ้า ซึ่งค่าเวลาตอบสนองของโรงไฟฟ้าพลังน้ำแม่สะงาประมาณ 30 วินาที ดังนั้นค่าคงที่เวลาของโรงไฟฟ้าแม่สะงาจึงเท่ากับ 300 วินาที ในส่วนค่าคงที่เวลาของการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าพิจารณาจากการควบคุมแรงดันกระเพื่อมให้อยู่ในมาตรฐาน กฟภ. และผลต่อขนาดการใช้งานของแบตเตอรี่ร่วมด้วย โดยมีค่าคงที่เวลาในการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 145 วินาที

โรงไฟฟ้าพลังน้ำแม่สะงาถูกกำหนดให้รองรับความผันผวนโหลดที่ช้ากว่า 300 วินาทีเป็นต้นไป ดังนั้นส่วนความผันผวนโหลดที่เร็วกว่า 300 วินาที กำหนดให้รับผิดชอบด้วยระบบแบตเตอรี่และระบบล้อตุนกำลัง โดยให้ระบบล้อตุนกำลังรองรับย่านความผันผวนที่เร็วมาก รองลงมาคือระบบแบตเตอรี่ รูปที่ 5.3 แสดงการทำงานเพื่อรองรับความผันผวนของความถี่ด้วยโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงา ระบบแบตเตอรี่ และระบบล้อตุนกำลัง สำหรับการควบคุมความถี่โหลดและการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ทั้งนี้กรณีศึกษาที่ 2 แบ่งออกเป็น 2 กรณีย่อย ด้วยการกำหนดค่าคงที่เวลา τ_{LPF2} ที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบผลการทำงานของระบบแบตเตอรี่และระบบล้อตุนกำลังในการควบคุมความถี่โหลดในแต่ละกรณีเพราะการปรับค่าคงที่เวลามีผลต่อการประสานการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานทั้งสองชนิด รวมถึงผลต่อขนาดระบบของล้อตุนที่ต้องการในระบบด้วย ดังนั้นกรณีย่อย 2.1 จึงกำหนดให้ค่าคงที่เวลา τ_{LPF2} เท่ากับ 50 วินาที เพื่อแบ่งสัดส่วนให้ระบบล้อตุนกำลังรับผิดชอบหนึ่งในหกส่วนจากย่านการทำงานเดิมของแบตเตอรี่ และไม่ต้องการให้ขนาดติดตั้งของระบบล้อตุนกำลังมีขนาดใหญ่เกินไป (ไม่เกิน 1 MW) สำหรับกรณีที่ 2.2 กำหนดค่าคงที่เวลา τ_{LPF2} เท่ากับ 200 วินาที เพื่อเพิ่มสัดส่วนความรับผิดชอบการควบคุมความถี่โหลดของระบบล้อตุนกำลัง รวมถึงการให้

ระบบล้อตุนกำลังช่วยรองรับความผันผวนที่เหลือจากการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วย

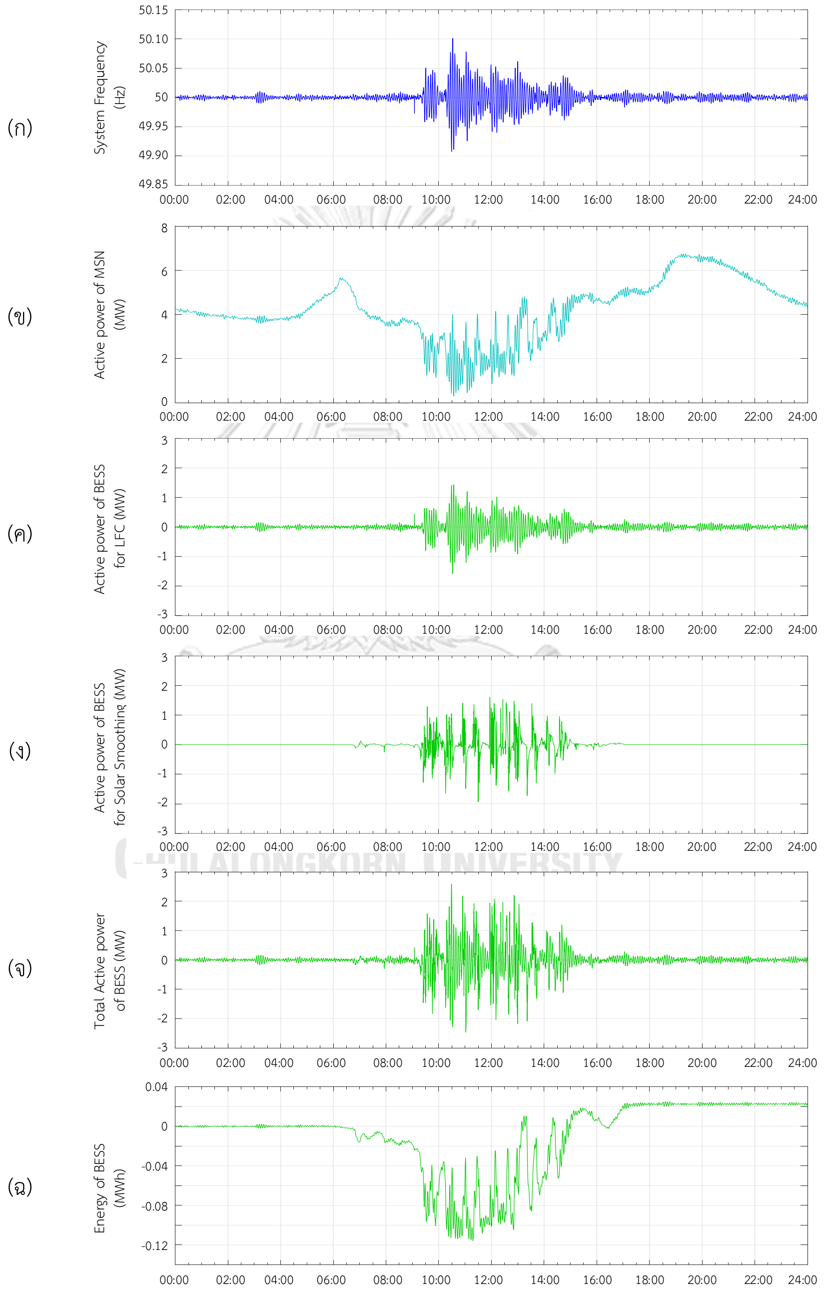


รูปที่ 5.3 ย่านการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงา ระบบแบตเตอรี่ และระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลดและการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

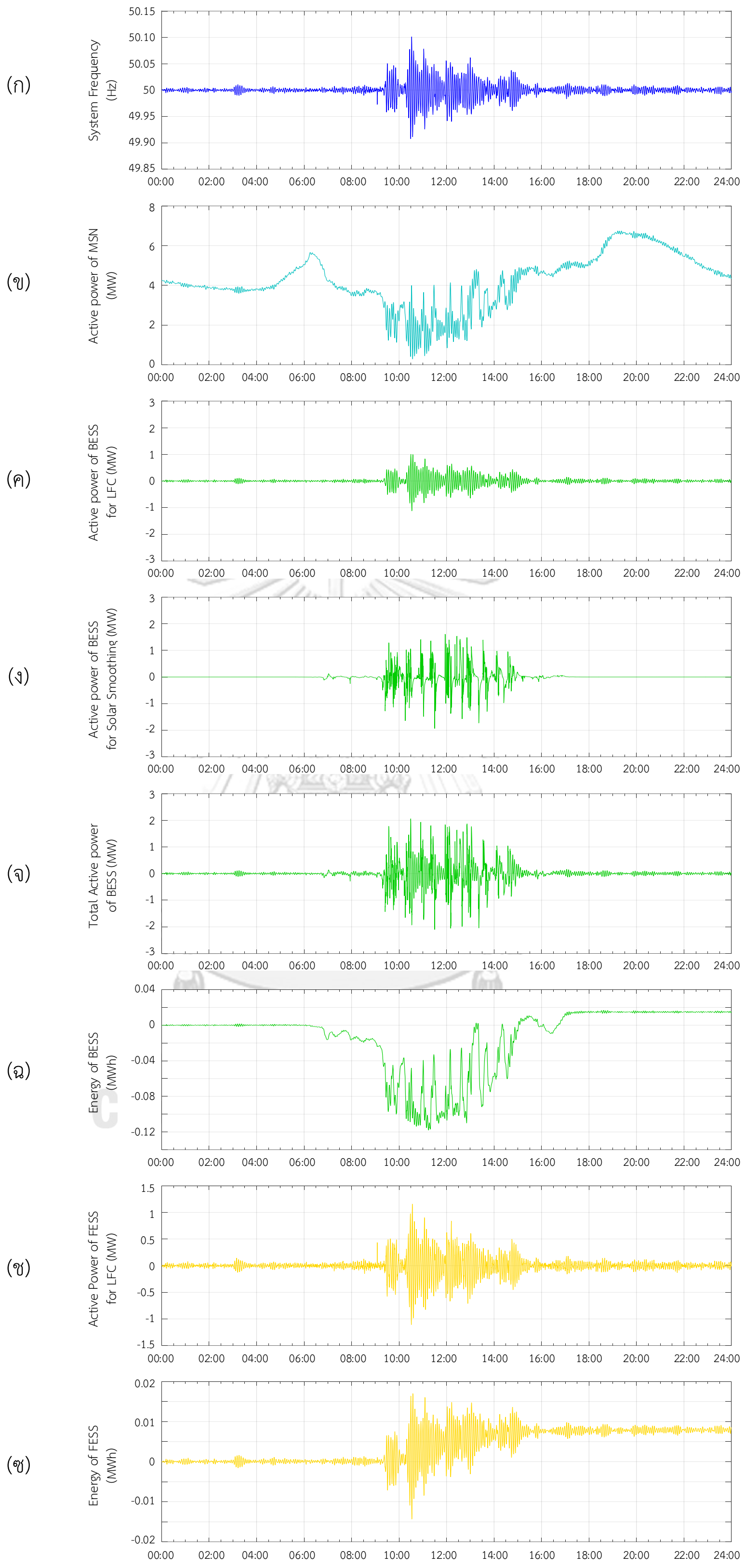
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1 ผลการจำลองแต่ละกรณีศึกษา

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการจำลองแต่ละกรณีศึกษา ทั้งนี้ค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับระบบแบตเตอรี่และระบบล้อตุนกำลังแสดงค่าเป็นบวก เมื่ออยู่ในสถานะจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือคายประจุ ในทางตรงกันข้ามหากแสดงค่าเป็นลบ หมายความว่า อยู่ในสถานะรับกำลังไฟฟ้าหรืออัดประจุ

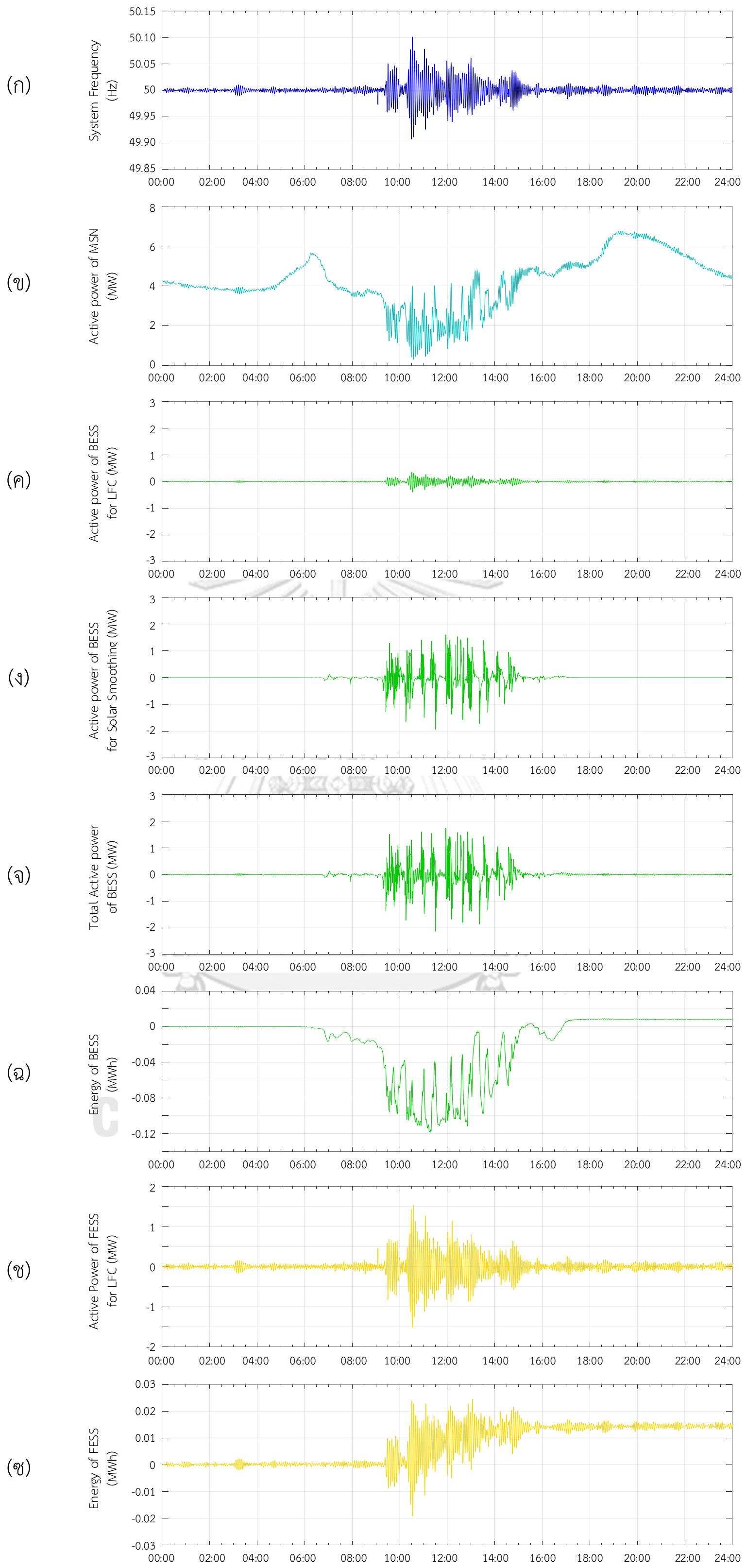


รูปที่ 5.4 ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 1 (ไม่มีระบบล้อตุนกำลังในระบบไฟฟ้า)



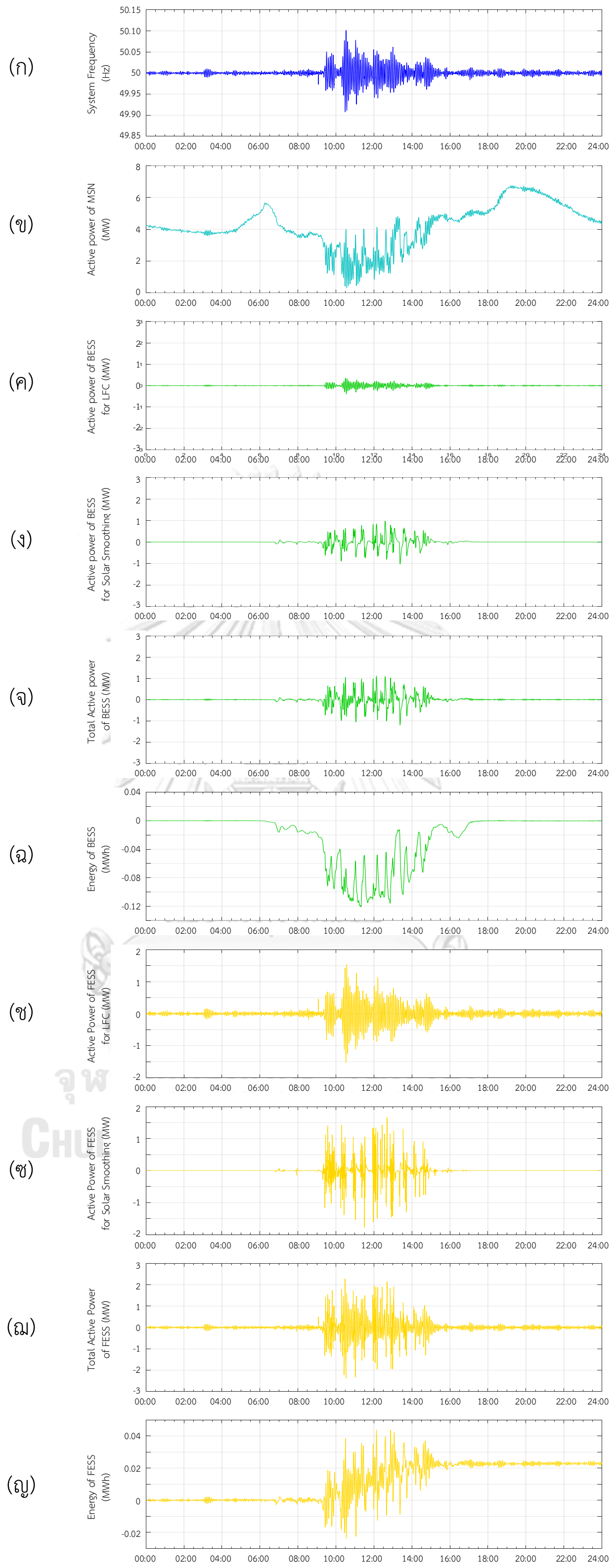
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2.1

(มีระบบล้อตุนกำลังในระบบไฟฟ้า สำหรับควบคุมความถี่ ที่ τ_{LPF2} = 50 วินาที)



รูปที่ 5.6 ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2.2

(มีระบบล้อตุนกำลังในระบบไฟฟ้า สำหรับควบคุมความถี่ ที่ τ_{LPF2} = 200 วินาที)



รูปที่ 5.7 ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 3 (มีระบบล้อตุนกำลังในระบบไฟฟ้า สำหรับควบคุมความถี่ที่ τ_{LPF2} = 200 วินาที และปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้า ที่ τ_{SM_BESS} = 70 วินาที)

จากผลการจำลองแต่ละกรณี ดังแสดงในรูปที่ 5.4 - รูปที่ 5.7 โดยภาพรวมมีจุดที่น่าสังเกตดังนี้

- ลักษณะของความถี่ระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้ง 3 กรณีมีรูปแบบใกล้เคียงกัน ดังแสดงใน รูปที่ 5.4(ก), รูปที่ 5.5(ก), รูปที่ 5.6(ก) และ รูปที่ 5.7(ก) เนื่องจากการประยุกต์ใช้ระบบล้อตุนกำลังไฟฟ้าเข้ามาในระบบไฟฟ้าเป็นการแบ่งสัดส่วนการทำงานเดิมของระบบแบตเตอรี่ให้กับล้อตุนกำลังเท่านั้น จึงทำให้ผลของความถี่ของระบบไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงไปจากกรณีศึกษาที่ 1
- ลักษณะการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงาเหมือนกันทุกกรณี เนื่องจากโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงากำหนดการทำงานและค่าคงที่เวลาสำหรับการควบคุมความถี่โหลดเช่นเดียวกัน

ทั้งนี้สามารถสรุปผลค่าเบี่ยงเบนทางความถี่ไฟฟ้าสูงสุด ขนาดการใช้งานของระบบแบตเตอรี่และระบบล้อตุนกำลัง แสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 สรุปผลการจำลองแต่ละกรณีศึกษา

กรณีศึกษา	**ขนาดความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุด (เฮิรตซ์)**	**ระบบแบตเตอรี่**		**ระบบล้อตุนกำลัง**	
		กำลังไฟฟ้าสูงสุด (เมกะวัตต์)	**พลังงานไฟฟ้าสูงสุด (เมกะวัตต์-ชั่วโมง)**	**กำลังไฟฟ้าสูงสุด (เมกะวัตต์)**	**พลังงานไฟฟ้าสูงสุด (เมกะวัตต์-ชั่วโมง)**
ไม่มีระบบล้อตุนกำลัง					
1	0.10	2.59	- 0.12	-	-
มีระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลด					
2.1	0.10	-2.10	- 0.12	1.16	0.02
2.2	0.10	-2.13	- 0.12	1.54	0.03
มีระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลดและปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้า					
3	0.10	-1.20	-0.12	-2.38	0.04

จากตารางข้างต้น แต่ละกรณีศึกษาสามารถควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ กฟภ. ได้ โดยค่าเบี่ยงเบนสูงสุดต้องไม่เกิน ±0.5 เฮิรตซ์ และเมื่อเพิ่มการใช้งานระบบล้อตุนกำลังเข้ามาในระบบไฟฟ้า ส่งผลให้ลดขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับการทำงานของระบบแบตเตอรี่ได้ แต่สำหรับขนาดพลังงานไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 กรณีมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่มาจากการทำงานเพื่อปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

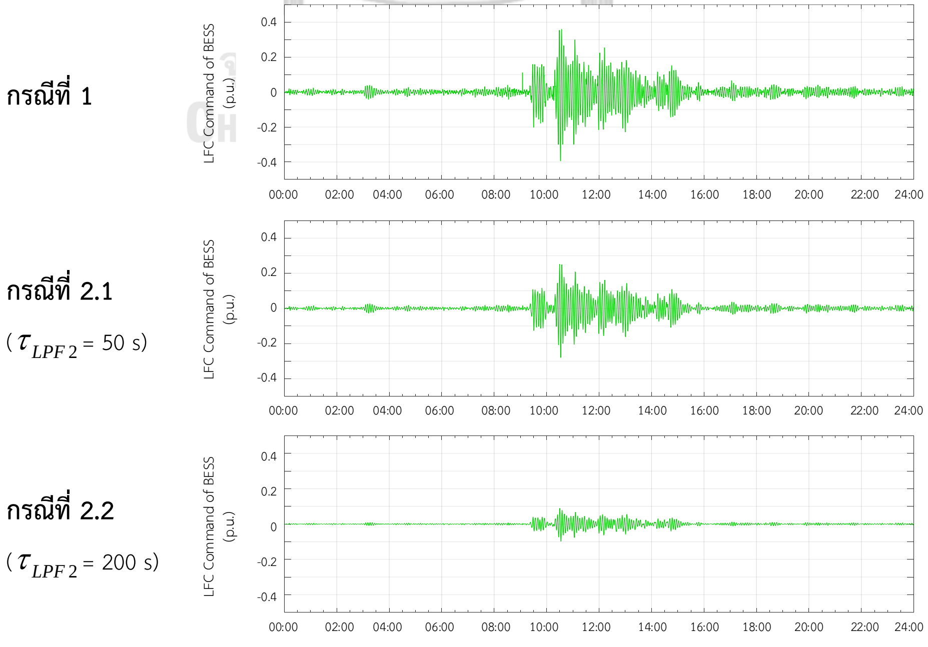
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นอกจากนี้ยังสามารถประมาณการขนาดใช้งานของระบบล้อตุนกำลัง โดยในกรณีที่มีการควบคุมความถี่โหลด ขนาดใช้งานประมาณ 1.5 เมกะวัตต์ / 30 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และหากมีการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการควบคุมความถี่โหลด จะมีขนาดใช้งานประมาณ 2.5 เมกะวัตต์ / 50 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

5.2 ผลต่อการทำงานของระบบแบตเตอรี่เมื่อประยุกต์ใช้ระบบล้อตุนกำลังในการควบคุมความถี่โหลด

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 เมื่อเพิ่มระบบล้อตุนกำลังมาช่วยในการควบคุมความถี่โหลดในระบบไฟฟ้า โดยการจำลองทั้ง 2 กรณีมีการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยแบตเตอรี่เช่นเดียวกัน แต่แตกต่างกันที่การควบคุมความถี่โหลด กรณีที่ 1 มีการควบคุมความถี่โหลดด้วยโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงาร่วมกับระบบแบตเตอรี่ ส่วนในกรณีที่ 2 มีการควบคุมความถี่โหลดด้วยโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงาร่วมกับระบบแบตเตอรี่และระบบล้อตุนกำลัง

จากรูปที่ 5.8 พบว่าเมื่อมีการแบ่งสัดส่วนความรับผิดชอบย่านความผันผวนสูงการควบคุมความถี่โหลดให้กับระบบล้อตุนกำลัง ส่งผลให้คำสั่งในการควบคุมความถี่ของระบบแบตเตอรี่ลดลงเกี่ยวโยงไปถึงการลดขนาดกำลังไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่ และสังเกตได้อีกว่าลักษณะกำลังไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่มีความผันผวนน้อยลงตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.9

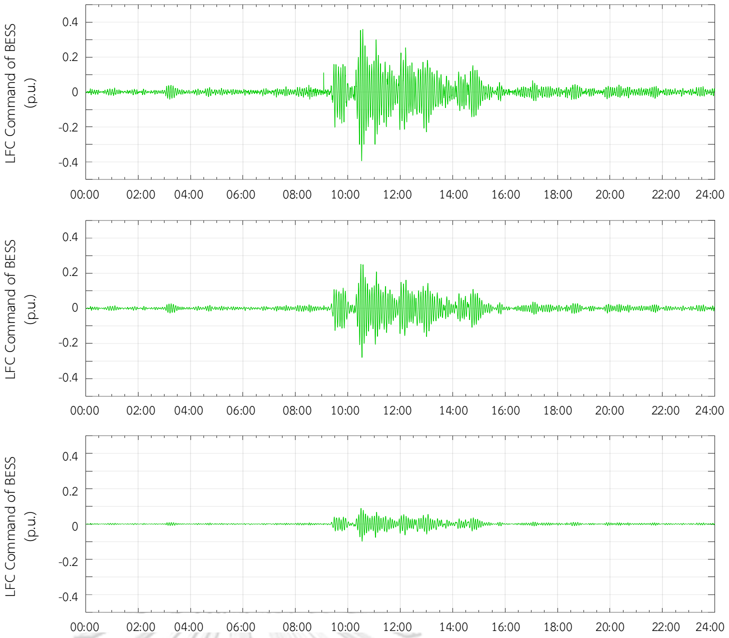


รูปที่ 5.8 สัญญาณคำสั่งสำหรับควบคุมความถี่โหลดของระบบแบตเตอรี่ (กรณีที่ 1 และ 2)

กรณีที่ 1

กรณีที่ 2.1 (τ_{LPF2} = 50 s)

กรณีที่ 2.2 (τ_{LPF2} = 200 s)



รูปที่ 5.9 กำลังผลิตไฟฟ้าขาออกของระบบแบตเตอรี่ (กรณีที่ 1 และ 2)

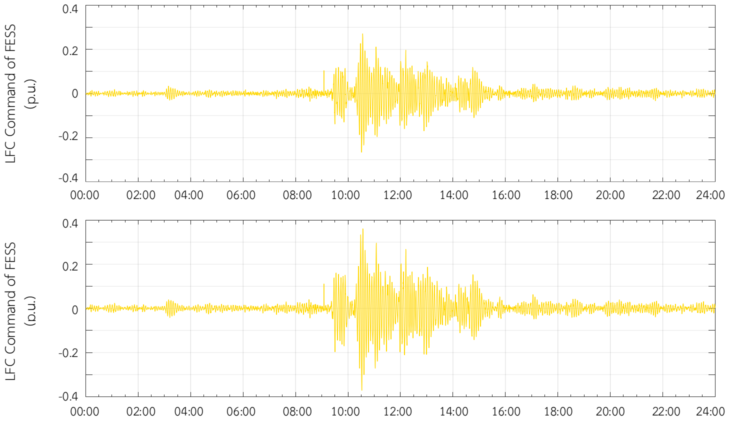
5.3 ผลจากการปรับค่าคงที่เวลาสำหรับการควบคุมความถี่โหลดของระบบล้อตุนกำลัง

ผลจากการกำหนดค่าคงที่เวลา τ_{LPF2} ที่แตกต่างกันสำหรับการควบคุมความถี่โหลดของระบบล้อตุนกำลังในกรณีศึกษาที่ 2.1 และ 2.2 ส่งผลให้การทำงานของระบบล้อตุนกำลังเปลี่ยนแปลงไป เมื่อปรับค่าคงที่เวลา τ_{LPF2} มีค่ามากขึ้น ระบบล้อตุนกำลังต้องรับผิดชอบย่านความผันผวนสูงมากขึ้น ทำให้การทำงานของระบบล้อตุนกำลังและขนาดกำลังไฟฟ้าของระบบล้อตุนกำลังเพิ่มขึ้น รวมถึงลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกของระบบล้อตุนกำลังมีความผันผวนมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กรณีที่ 2.1 (τ_{LPF2} = 50 s)

กรณีที่ 2.2 (τ_{LPF2} = 200 s)



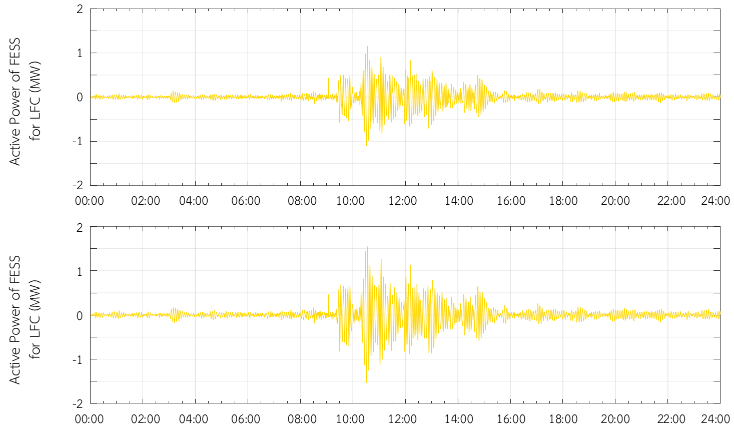
รูปที่ 5.10 สัญญาณคำสั่งสำหรับควบคุมความถี่โหลดของระบบล้อตุนกำลัง (กรณีที่ 2)

กรณีที่ 2.1

($\tau_{LPF\,2}$ = 50 s)

กรณีที่ 2.2

($\tau_{LPF\,2}$ = 200 s)



รูปที่ 5.11 กำลังไฟฟ้าขาออกของระบบล้อตุนกำลัง (กรณีที่ 2)

5.4 ผลต่อการทำงานของระบบแบตเตอรี่เมื่อใช้ระบบล้อตุนกำลังในการควบคุมความถี่โหลดร่วมกับการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้า

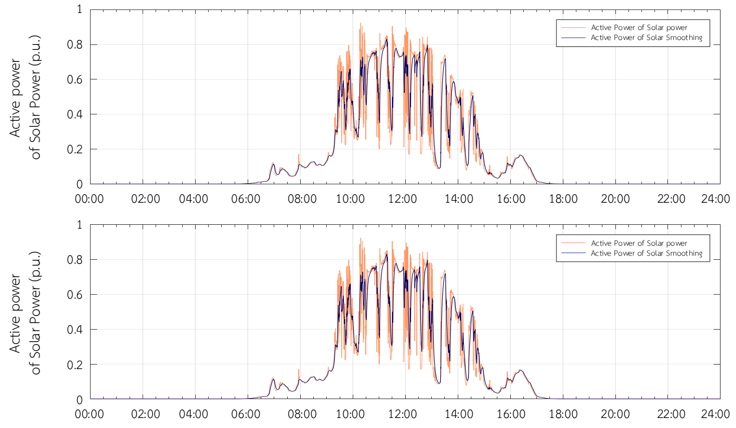
ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกรณี 2.2 และ 3 เนื่องด้วยทั้ง 2 กรณีมีการกำหนดตัวแปรในการควบคุมความถี่โหลดเช่นเดียวกัน แต่มีตัวแปรสำหรับการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน จากเดิมที่มีการทำงานการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เฉพาะระบบแบตเตอรี่ จึงแบ่งส่วนความรับผิดชอบให้ระบบล้อตุนกำลังมาช่วยรองรับการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าในย่านความผันผวนสูงสุด โดยในกรณีที่ 2.2 ค่าคงที่เวลา τ_{SM} เท่ากับ 145 วินาที หมายความว่าระบบแบตเตอรี่รองรับความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความผันผวนเร็วกว่า 145 วินาที ส่วนในกรณีที่ 3 แบ่งสัดส่วนจากการทำงานเดิมของระบบแบตเตอรี่เป็นสองส่วน จึงกำหนดค่าคงที่เวลา τ_{SM_BESS} เท่ากับ 70 วินาที หมายความว่าระบบล้อตุนกำลังต้องรองรับความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เร็วกว่า 70 วินาที และระบบแบตเตอรี่ต้องรับผิดชอบความผันผวนที่เหลืออยู่ ระหว่าง 70 – 145 วินาที

จากผลการจำลองในรูปที่ 5.12 แสดงกำลังไฟฟ้าขาออกของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (ต่อหน่วย) พร้อมการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าด้วยระบบแบตเตอรี่ในกรณีศึกษาที่ 2.2 และการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับระบบล้อตุนกำลังในกรณีศึกษาที่ 3 โดยทั้ง 2 กรณีมีผลการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าไม่แตกต่างกัน เพราะเป็นเพียงการแบ่งส่วนการทำงานการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าให้ระบบล้อตุนกำลังเท่านั้น

กรณีที่ 2.2

($\tau_{LPF\,2}$ = 200 s)

กรณีที่ 3

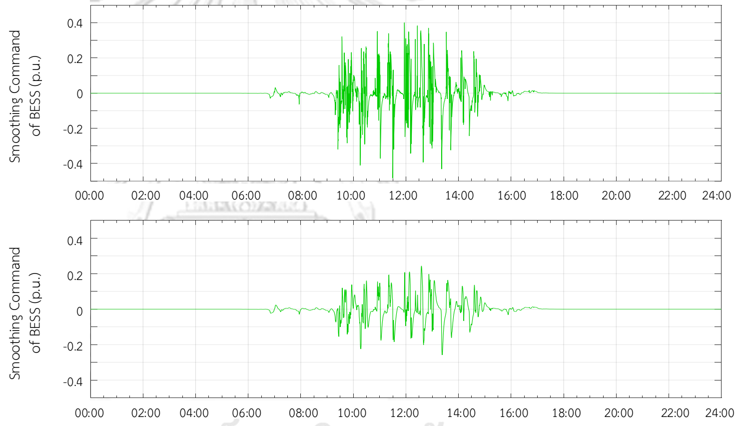


รูปที่ 5.12 กำลังไฟฟ้าขาออกของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าโดยระบบกักเก็บพลังงาน (กรณีที่ 2.2 และ 3)

กรณีที่ 2.2

($\tau_{LPF\,2}$ = 200 s)

กรณีที่ 3



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

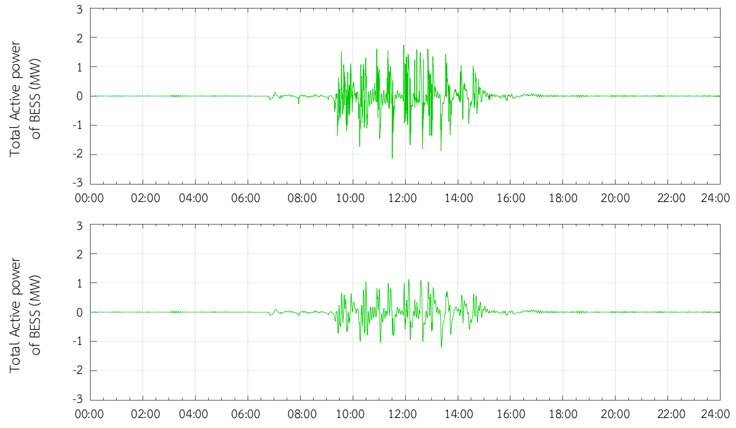
รูปที่ 5.13 สัญญาณคำสั่งการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่ (กรณีที่ 2.2 และ 3)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

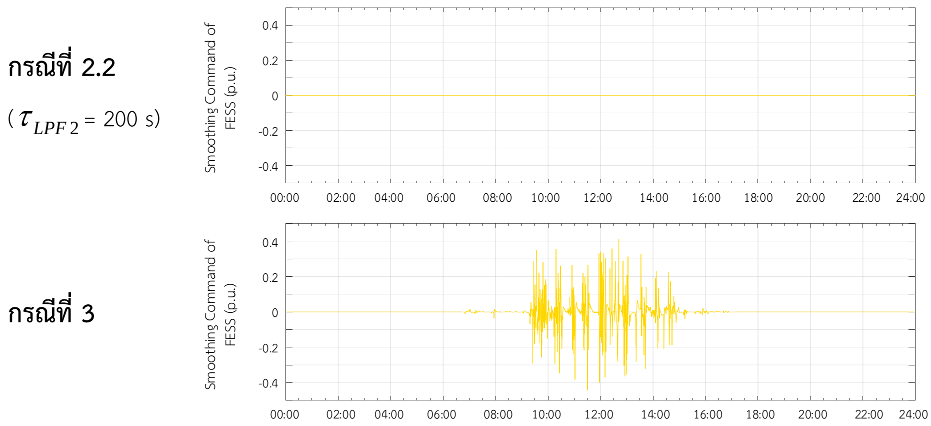
กรณีที่ 2.2

($\tau_{LPF\,2}$ = 200 s)

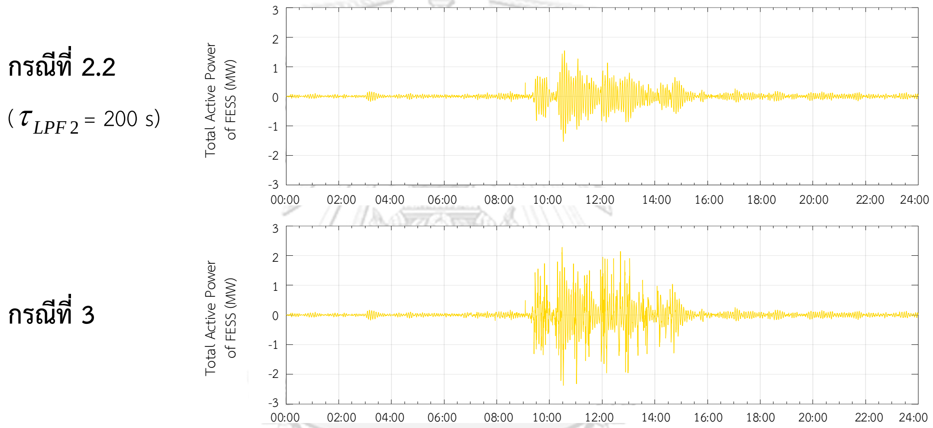
กรณีที่ 3



รูปที่ 5.14 กำลังไฟฟ้าขาออกของระบบแบตเตอรี่ (กรณีที่ 2.2 และ 3)



รูปที่ 5.15 สัญญาณคำสั่งการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของระบบล้อตุนกำลัง (กรณีที่ 3)



รูปที่ 5.16 กำลังไฟฟ้าขาออกของระบบล้อตุนกำลัง (กรณีที่ 2.2 และ 3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากการกำหนดให้ระบบล้อตุนกำลังทำงานเพิ่มเพื่อปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 จะพบว่า การทำงานของระบบแบตเตอรี่ที่ลดน้อยลง และลักษณะการทำงานของแบตเตอรี่ที่มีความผันผวนน้อยลงตามไปด้วย การเพิ่มการทำงานให้ระบบล้อตุนกำลังนอกเหนือจากการควบคุมความถี่โหลด ส่งผลให้การทำงานของล้อตุนกำลังเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยมีขนาดกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 2.2 ประมาณ 0.83 เมกะวัตต์ รวมถึงทำให้ลักษณะการทำงานของล้อตุนกำลังมีความผันผวนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 5.16

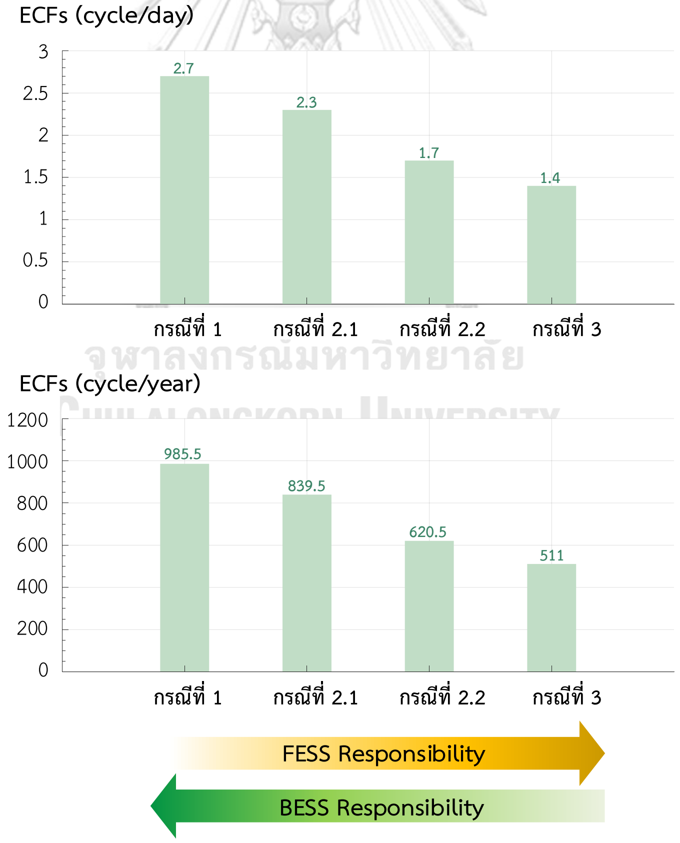
ทั้งนี้ เหตุผลที่ไม่กำหนดให้ระบบล้อตุนกำลังรับผิดชอบการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แทนการทำงานของแบตเตอรี่ทั้งหมด เนื่องจากทำให้ระบบล้อตุนกำลังต้องการปริมาณพลังงานไฟฟ้ามากเกินไป ซึ่งขัดแย้งกับคุณสมบัติของระบบล้อตุนกำลังที่มีกำลังไฟฟ้าสูง แต่พลังงานไฟฟ้าต่ำ อีกทั้งทำให้ต้องติดตั้งระบบล้อตุนกำลังจำนวนมากด้วย

5.5 ผลการประยุกต์ใช้ระบบล้อตุนกำลังต่อความเสื่อมสภาพอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

จากผลการศึกษาตารางที่ 5.3 เนื่องจากการทำงานของระบบแบตเตอรี่ มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าน้อยมาก (0.12 MWh หรือ 120 kWh) จึงทำให้เป็นงานใช้งานในเชิงกำลังไฟฟ้ามากกว่าการใช้งานเชิงพลังงานไฟฟ้า จึงสมมติให้ขนาดแบตเตอรี่สูงสุดที่ต้องการใช้งานในวิจัยนี้อยู่ที่ 3 MW/750 kWh (อัตราการอัดประจุ/คายประจุสูงสุดที่ 4C เป็นค่าวิกฤตที่สุดในการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน) สามารถวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานแบตเตอรี่ ดังนี้

5.5.1) การประมาณรอบการใช้งานของแบตเตอรี่โดยวิธี Equivalent Full Cycles (EFCs)

จากสมการที่ (2.4) EFCs พิจารณาจากค่าพลังงานขาเข้า/ขาออก ของระบบแบตเตอรี่หารด้วยค่าพิกัดพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (750 kWh) คำนวณรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ในแต่ละกรณีดังแสดงในรูปที่ 5.17 จะเห็นได้ว่าหากมีการเพิ่มภาระงานให้ระบบล้อตุนกำลังเพิ่มมากขึ้นและลดภาระงานของระบบแบตเตอรี่ ส่งผลให้จำนวนรอบที่เกิดขึ้นในแต่ละวันหรือในแต่ละปีลดน้อยลง



รูปที่ 5.17 จำนวนรอบการทำงานของแบตเตอรี่โดยวิธี EFCs

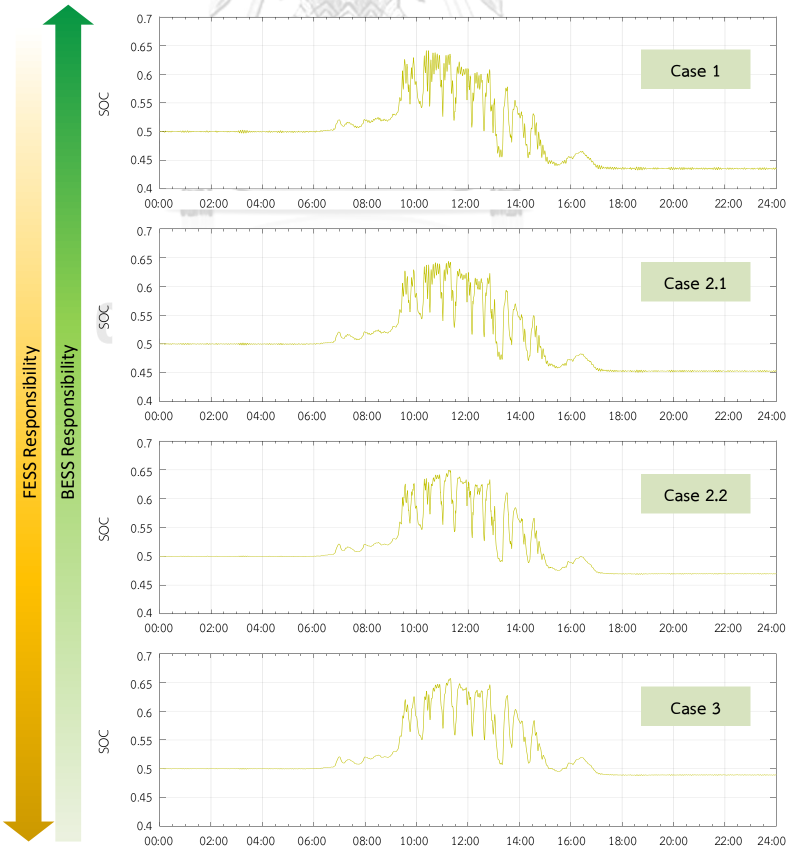
และหากกำหนดให้แบตเตอรี่ที่ใช้มีจำนวนรอบการใช้งานสูงสุด 10,000 รอบ จะได้ว่าแบตเตอรี่มีอายุการใช้งานดังแสดงในตารางที่ 5.4 กล่าวคืออายุการใช้งานของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับจำนวนรอบการใช้งานที่ลดลง

ตารางที่ 5.4 อายุการใช้งานโดยประมาณจากวิธี EFCs

กรณีศึกษา	อายุการใช้งาน (ปี)
กรณีที่ 1	10
กรณีที่ 2.1	12
กรณีที่ 2.2	16
กรณีที่ 3	19.5

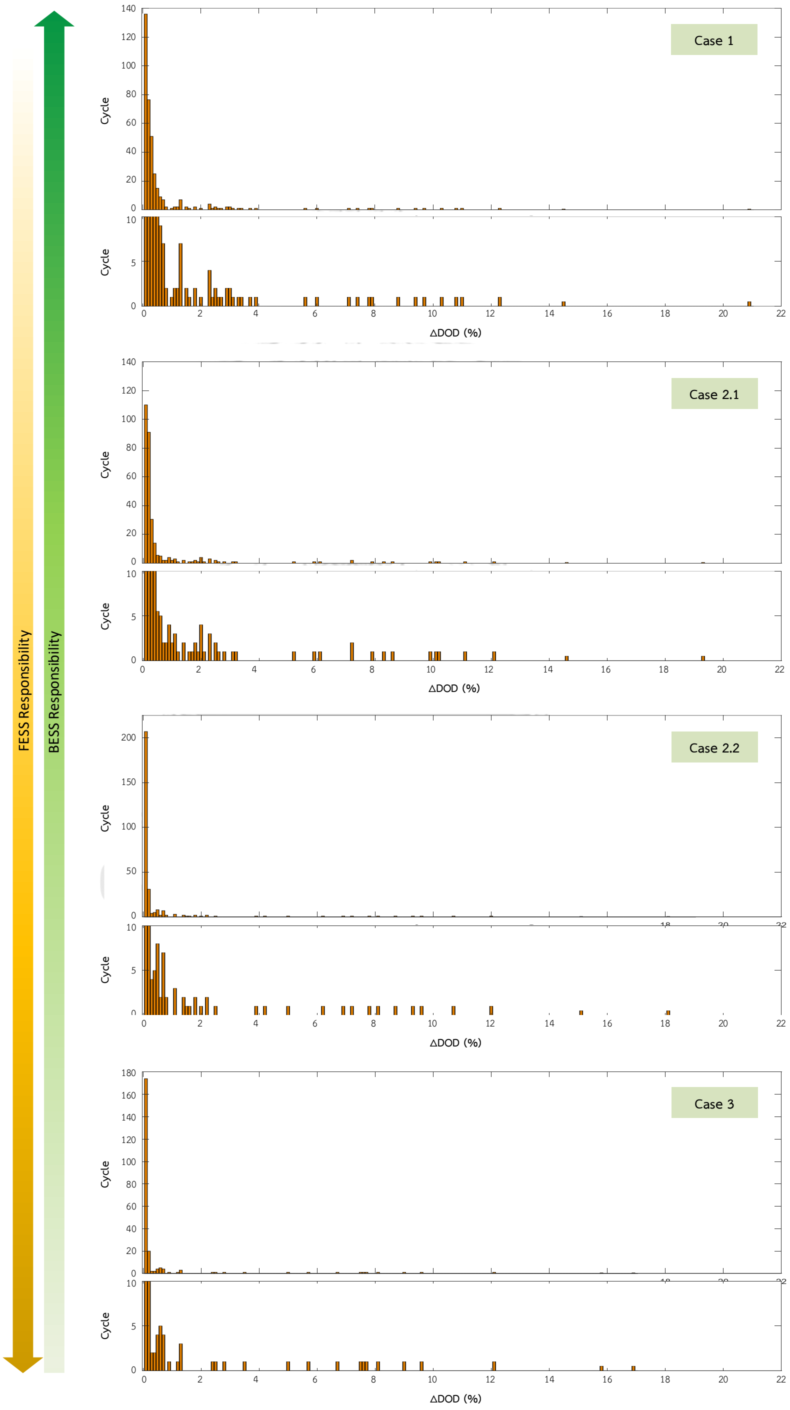
5.5.2) การประมาณรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค Rainflow Cycle Counting

จากขั้นตอนพิจารณาความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ในหัวข้อที่ 4.8 สามารถประเมินรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ได้ โดยมีสถานะการประจุ (SOC) ซึ่งเป็นข้อมูลตั้งต้นดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 สถานะการประจุของแบตเตอรี่ในกรณีต่างๆ

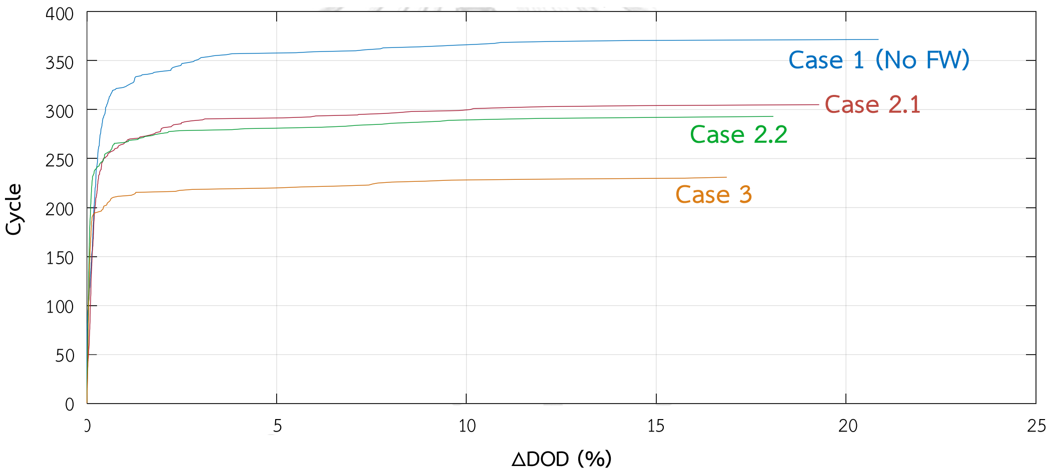
จากขั้นตอนการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่โดยเทคนิค Rainflow Cycle Counting แสดงการกระจายตัวของรอบการทำงานของแบตเตอรี่ในแต่ละค่าการเปลี่ยนแปลงของการคายประจุ (ΔDOD) ในรูปที่ 5.19 จะเห็นได้ว่าหากแบตเตอรี่ต้องรับภาระการทำงานมาก ส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ ΔDOD ในช่วงที่กว้างกว่าภาระการทำงานของแบตเตอรี่ลดลง สังเกตได้จาก



รูปที่ 5.19 การกระจายตัวของจำนวนรอบการทำงานในแต่ละช่วงความลึก ΔDOD (%)

- กรณีที่ 1 ΔDOD สูงสุดที่เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 21 รอบการทำงานเท่ากับ 0.5 รอบ
- กรณีที่ 2.1 ΔDOD สูงสุดที่เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 19 รอบการทำงานเท่ากับ 0.5 รอบ
- กรณีที่ 2.2 ΔDOD สูงสุดที่เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 18 รอบการทำงานเท่ากับ 0.5 รอบ
- กรณีที่ 3 ΔDOD สูงสุดที่เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 17 รอบการทำงานเท่ากับ 0.5 รอบ

และแสดงแนวโน้มของรอบการทำงานที่เกิดขึ้นของแบตเตอรี่ในแต่ละ ΔDOD ดังแสดงในรูปที่ 5.20 จะเห็นได้ว่ากรณีที่ 1 (ไม่มีระบบล้อตุนกำลัง) แบตเตอรี่ต้องรับภาระงานสูงสุดส่งผลให้เกิดรอบการทำงานสูงที่ ΔDOD ค่าน้อยๆ เมื่อเพิ่มภาระงานระบบล้อตุนกำลังเข้ามาในระบบมากขึ้น เรียงลำดับจากกรณีที่ 2.1 กรณีที่ 2.2 และกรณีที่ 3 ตามลำดับ รอบการทำงานของแบตเตอรี่ที่ ΔDOD ค่าน้อยๆ มีค่าลดน้อยลงโดยเฉพาะในกรณีที่ 3 (ระบบล้อตุนกำลังแบ่งภาระการทำงานจากแบตเตอรี่ทั้งการควบคุมความถี่โหลด และการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 5.20 แนวโน้มรอบการทำงานของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงความลึก ΔDOD (%)

สำหรับการพิจารณาค่าความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ สมมติให้มีลักษณะโหลดและพลังงานแสงอาทิตย์เช่นเดียวกันใน 1 ปีจะส่งผลต่อค่าความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ดังแสดงในตารางที่ 5.5 โดยทั่วไปการสิ้นอายุขัยการทำงาน (End-of-life) สามารถพิจารณาได้หลากหลายเงื่อนไข เช่น หากค่าความจุแบตเตอรี่ในการเริ่มต้นใช้งานแต่ละครั้งเท่ากับร้อยละ 70 - 80 จากความจุพิกัดจะถือว่าสิ้นอายุการทำงาน เป็นต้น

ตารางที่ 5.5 ค่าความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่

กรณีศึกษา	ความเสื่อมสภาพการใช้งาน (ร้อยละ/ปี)	อายุการใช้งาน (ปี)
กรณีที่ 1	8.54	11.70
กรณีที่ 2.1	7.46	13.40
กรณีที่ 2.2	5.97	16.75
กรณีที่ 3	4.94	20.26

จากตารางข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระบบล้อตุนกำลังเข้ามาในระบบไฟฟ้า เพื่อช่วยรับภาระงานบางส่วนทดแทนแบตเตอรี่จากน้อยไปมาก กรณีที่ 1 กรณีที่ 2.1 กรณีที่ 2.2 และกรณีที่ 3 ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าความเสื่อมสภาพการใช้งานแบตเตอรี่ลดลง สอดคล้องกับอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้น

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.5.1) และ 5.5.2) ด้วยวิธี EFCs และ Rainflow Cycle Counting พบว่า จำนวนรอบที่เกิดจากการใช้งานของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือเมื่อมีการใช้งานระบบล้อตุนกำลังเพิ่มเข้ามาในระบบไฟฟ้ารองรับส่วนที่ความผันผวนสูงแทนภาระงานเดิมของแบตเตอรี่ นอกจากจะช่วยให้จำนวนรอบการทำงานของแบตเตอรี่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้น และสามารถประมาณอายุการใช้งานสูงสุดได้เทียบเท่าอายุขัย (Calendar life) ของแบตเตอรี่ที่ประมาณ 20 ปีอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.6 ผลสรุปการจำลองและความเสื่อมสภาพการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ เมื่อใช้ระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลดและการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้า

จากผลการจำลองระบบไฟฟ้าขนาดเล็กอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนแบบแยกโดด กรณีที่ 1 กรณีที่ 2.1 กรณีที่ 2.2 และกรณีที่ 3 พบว่าทุกกรณีศึกษาสามารถควบคุมค่าความถี่เบี่ยงเบนของระบบไฟฟ้ามีค่าไม่เกิน ±0.5 เฮิรตซ์ เป็นไปตามมาตรฐานของ กฟภ. และสามารถประมาณการขนาดติดตั้งที่ต้องการของระบบแบตเตอรี่ และระบบล้อตุนกำลัง รวมถึงผลการวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ และอายุการใช้งานโดยประมาณจนสิ้นอายุขัย ดังแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 สรุปขนาดติดตั้งของระบบล้อตุนกำลังและระบบแบตเตอรี่ในแต่ละกรณีศึกษา
และความเสื่อมสภาพการใช้งานระบบแบตเตอรี่

<table>
<tr><th rowspan="3">กรณีศึกษา</th><th colspan="2">ระบบแบตเตอรี่</th><th colspan="2">ระบบล้อตุนกำลัง</th><th colspan="4">ความเสื่อมสภาพการใช้งาน ระบบแบตเตอรี่ (*4C-rate)</th></tr>
<tr><th>กำลังไฟฟ้า</th><th>พลังงานไฟฟ้า</th><th>กำลังไฟฟ้า</th><th>พลังงานไฟฟ้า</th><th colspan="2">Equivalent Full Cycles (EFCs)</th><th colspan="2">Rainflow Cycle Counting</th></tr>
<tr><th>(เมกะวัตต์)</th><th>(เมกะวัตต์-ชั่วโมง)</th><th>(เมกะวัตต์)</th><th>(เมกะวัตต์-ชั่วโมง)</th><th>จำนวนรอบ/ปี</th><th>อายุ (ปี)</th><th>ร้อยละ/ปี</th><th>อายุ (ปี)</th></tr>
<tr><td colspan="9">ไม่มีระบบล้อตุนกำลัง</td></tr>
<tr><td>1</td><td>3</td><td>120</td><td>-</td><td>-</td><td>985.5</td><td>10</td><td>8.54</td><td>11.70</td></tr>
<tr><td colspan="9">มีระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลด</td></tr>
<tr><td>2.1</td><td rowspan="2">2.5</td><td rowspan="2">120</td><td rowspan="2">1.5</td><td rowspan="2">30</td><td>839.5</td><td>12</td><td>7.46</td><td>13.40</td></tr>
<tr><td>2.2</td><td>620.5</td><td>16</td><td>5.97</td><td>16.75</td></tr>
<tr><td colspan="9">ระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลดและปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้า</td></tr>
<tr><td>3</td><td>1.5</td><td>120</td><td>2.5</td><td>50</td><td>511</td><td>19.5</td><td>4.94</td><td>20.26</td></tr>
</table>

หากไม่มีการใช้งานระบบล้อตุนกำลังเข้ามาในระบบไฟฟ้า เพื่อรองรับส่วนความผันผวนสูงแทนภาระงานเดิมของแบตเตอรี่ (กรณีที่ 1) พบว่า ขนาดกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมของระบบแบตเตอรี่อยู่ที่ประมาณ 3 เมกะวัตต์ จากนั้นเมื่อมีการใช้งานระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลด (กรณีที่ 2) ขนาดกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมของระบบแบตเตอรี่อยู่ที่ประมาณ 2.5 เมกะวัตต์ ลดลงได้ 0.5 เมกะวัตต์จากกรณีที่ 1 และเมื่อมีการใช้งานระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลดและปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมของระบบแบตเตอรี่อยู่ที่ประมาณ 1.5 เมกะวัตต์ ลดลงได้ครึ่งหนึ่งจากกรณีที่ 1 หรือเท่ากับ 1.5 เมกะวัตต์ โดยทุกกรณีมีขนาดพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการประมาณ 120 เมกะวัตต์ ในส่วนของความเสื่อมภาพการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ก็เป็นไปในทิศทางที่สอดคล้องกันกับปริมาณการใช้งานระบบแบตเตอรี่ที่ลดลง กล่าวคือจำนวนรอบการใช้งานจากวิธี EFCs และร้อยละความเสื่อมสภาพการใช้งาน/ปี จากเทคนิค Rainflow cycle counting มีค่าลดลง ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานของระบบแบตเตอรี่มีค่าประมาณอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 2 วิธี

สำหรับขนาดติดตั้งที่เหมาะสมของระบบแบตเตอรี่ในงานวิจัยนี้ สมมติให้อัตราการคายประจุของแบตเตอรี่เทียบกับความจุพิกัด หรือค่ากระแสสำหรับการอัดประจุ/คายประจุของระบบแบตเตอรี่

(C-rate) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 2C เนื่องจากเป็นค่าสูงสุดที่ปลอดภัยต่อการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน หากมีค่ามากกว่านี้จะลดทอนอายุการใช้งานให้สั้นลงอย่างรวดเร็ว โดยสามารถประมาณการขนาดติดตั้งกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่และระบบล้อตุนกำลัง ดังนี้

กรณีศึกษา	ขนาดติดตั้งระบบแบตเตอรี่ (*2C)
กรณีที่ 1 (ไม่มีระบบล้อตุนกำลัง)	3 เมกะวัตต์ / 1.5 เมกะวัตต์-ชั่วโมง
กรณีที่ 2 (มีระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลด)	5 เมกะวัตต์ / 1.25 เมกะวัตต์-ชั่วโมง
กรณีที่ 3 (มีระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลดและปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์)	1.5 เมกะวัตต์ / 0.75 เมกะวัตต์-ชั่วโมง

กรณีศึกษา	ขนาดติดตั้งระบบล้อตุนกำลัง
กรณีที่ 1 (ไม่มีระบบล้อตุนกำลัง)	-
กรณีที่ 2 (มีระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลด)	1.5 เมกะวัตต์ / 30 กิโลวัตต์-ชั่วโมง
กรณีที่ 3 (มีระบบล้อตุนกำลังสำหรับการควบคุมความถี่โหลดและปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์)	2.5 เมกะวัตต์ / 50 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ในงานวิจัยนี้ พิจารณาขนาดแบตเตอรี่เท่ากับ 3 เมกะวัตต์ / 0.75 เมกะวัตต์-ชั่วโมง เทียบเท่ากับแบตเตอรี่ทำงานที่อัตราการอัดประจุ/คายประจุสูงสุดที่ 4C ซึ่งเป็นค่าใช้งานวิกฤติที่สุดสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน ดังนั้นหากมีการใช้งานแบตเตอรี่ที่อัตราการอัดประจุ/คายประจุ 2C ความเสื่อมสภาพการใช้งานระบบแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลง และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ทั้งนี้ ในมุมมองของผู้ทำวิจัย หากต้องเลือกขนาดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบแบตเตอรี่ระบบล้อตุนกำลัง รวมถึงการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานทั้งสองชนิด ขอเสนอแนวทางการใช้ระบบล้อตุนกำลังเพื่อทำการควบคุมความถี่โหลดร่วมกับระบบแบตเตอรี่ และโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ ดังการจำลองในกรณีที่ 2 สามารถประมาณขนาดติดตั้งของระบบแบตเตอรี่เท่ากับ 2.5 เมกะวัตต์ / 1.25 เมกะวัตต์-ชั่วโมง และขนาดติดตั้งของระบบล้อตุนกำลัง 1.5 เมกะวัตต์ / 30 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เนื่องจากขนาดติดตั้งของระบบล้อตุนกำลัง มีขนาดไม่ใหญ่เกินไป ทั้งในแง่ของกำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า พื้นที่การติดตั้ง รวมถึงในเรื่องของค่าใช้จ่าย และหากต้องให้ระบบล้อตุนกำลังทำงานเพื่อปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งการทำงานในโหมดนี้ต้องการพลังงานไฟฟ้าสูง ขัดกับจุดอ่อนของระบบล้อตุนกำลัง โดยทั่วไปเมื่อต้องการให้กำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีความราบเรียบมากขึ้น ก็ต้องปรับให้ค่าคงที่เวลาของระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจาก

พลังงานแสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย คุณสมบัติของระบบแบตเตอรี่ต่อการทำงานลักษณะนี้ จึงมีความเหมาะสมมากกว่าการใช้งานระบบล้อตุนกำลัง และหากใช้งานระบบล้อตุนกำลังดังกรณีที่ 2 โดยกำหนดให้แบตเตอรี่มีอัตราการอัดประจุ/คายประจุสูงสุดที่ 2C ในประเด็นค่าความเสื่อมการใช้งานของแบตเตอรี่ก็จะสามารถช่วยยืดอายุการทำงานของระบบแบตเตอรี่ได้มากกว่าค่าที่แสดงในตารางที่ 5.6 (กรณีที่ 2 มีอายุการใช้งานโดยประมาณของแบตเตอรี่เท่ากับ 16 – 17 ปี) ซึ่งส่งผลให้การวิเคราะห์อายุการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ตามวิธีการที่ได้นำเสนอ อาจมีค่าเกินกว่า 20 ปี หรือเกินกว่าอายุขัยสูงสุด (Calendar life) ของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพการใช้งานและอายุของแบตเตอรี่ เป็นเพียงการประเมินเบื้องต้นเท่านั้น ยังไม่มีการพิจารณาปัจจัยอื่นๆ อันส่งผลกระทบต่อความเสื่อมสภาพของระบบแบตเตอรี่เข้ามาเกี่ยวข้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

เมื่อระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนอยู่ในสภาวะแยกโดด จำเป็นต้องมีการบริหารจัดการแหล่งผลิตไฟฟ้าภายในพื้นที่ แต่ด้วยข้อจำกัดของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงาที่มีการตอบสนองช้า จึงทำให้ระบบแบตเตอรี่ต้องรับบทบาทสำคัญในการรักษาเสถียรภาพความถี่ของระบบไฟฟ้าด้วยการควบคุมความถี่โหลดเพื่อรองรับความผันผวนจากโหลดในระบบ รวมทั้งการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ส่งผลให้แบตเตอรี่มีการทำงานเพื่ออัดประจุและคายประจุบ่อยครั้ง และทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลงได้ งานวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอแนวคิดการประยุกต์ใช้ระบบกักเก็บพลังงานชนิดล้อตุนกำลังเพิ่มเข้ามาในระบบไฟฟ้า เพื่อมาช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบแบตเตอรี่ จุดเด่นของระบบล้อตุนกำลังเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง แต่พลังงานไฟฟ้าต่ำ จึงสามารถใช้แบ่งภาระเดิมของระบบแบตเตอรี่ให้แทนที่ด้วยระบบล้อตุนกำลังเพื่อจัดการความผันผวนสูงในช่วงเวลาสั้นที่เกิดจากโหลดและกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในงานวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้ระบบล้อตุนกำลังทำงาน 2 หน้าที่ คือ การควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐานของ กฟภ. และการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า แนวคิดการประยุกต์ใช้ระบบล้อตุนกำลังในระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อทำหน้าที่ควบคุมความถี่โหลดร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงาและระบบแบตเตอรี่สามารถควบคุมความถี่ระบบไฟฟ้าในสภาวะแยกโดดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ และการใช้ระบบล้อตุนกำลังเพื่อปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบแบตเตอรี่สามารถปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ ยิ่งไปกว่านั้นการใช้ระบบล้อตุนกำลังเพิ่มเข้าในระบบไฟฟ้าด้วยการแบ่งสัดส่วนจากการทำงานเดิมของระบบแบตเตอรี่ สามารถลดภาระงานของระบบแบตเตอรี่ ลดความผันผวนที่เกิดขึ้นกับการทำงานของระบบแบตเตอรี่ รวมถึงลดขนาดการใช้งานของแบตเตอรี่ด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว

การประเมินขนาดติดตั้งที่เป็นไปได้ของระบบล้อตุนกำลังที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าขนาดเล็กของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน พบว่าในกรณีใช้ระบบล้อตุนกำลังเพื่อควบคุมความถี่โหลด ต้องการขนาดติดตั้งประมาณ 1.5 เมกะวัตต์ / 30 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และในกรณีมีการปรับเรียบกำลังผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการควบคุมความถี่โหลด จะมีขนาดติดตั้งประมาณ 2.5 เมกะวัตต์ / 50 กิโลวัตต์-ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม มีข้อควรระวังในการกำหนดสัดส่วนการทำงานหรือการกำหนดค่าคงที่เวลาให้ระบบล้อตุนกำลัง เพื่อป้องกันการประเมินขนาดติดตั้งของระบบล้อตุน

กำลังที่มากเกินไป โดยเฉพาะขนาดพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากข้อจำกัดของระบบล้อตุนกำลังที่มีคุณสมบัติด้านพลังงานไฟฟ้าต่ำ รวมถึงราคาของระบบล้อตุนกำลังที่อาจสูงตามมาด้วย

ในแง่ของการประเมินความเสื่อมสภาพจากการใช้งานของแบตเตอรี่ เมื่อกำหนดภาระงานระบบล้อตุนกำลังเพิ่มขึ้น เพื่อทำงานทดแทนการทำงานของระบบแบตเตอรี่ในส่วนที่ความผันผวนสูง เท่ากับเป็นการหลีกเลี่ยงการทำงานของแบตเตอรี่ที่ความลึกการคายประจุสูง หรือการหลีกเลี่ยงรอบการทำงานเล็กๆ ที่เกิดขึ้นจากภาระงานที่ต้องรับผิดชอบในช่วงความผันผวนสูง เช่น การควบคุมความถี่ การปรับเรียบพลังงานหมุนเวียนอย่างพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น การที่แบตเตอรี่ต้องทำงานที่ความลึกการคายประจุสูงหรือมีรอบการทำงานเล็กๆ เกิดขึ้นจากการใช้งาน เป็นปัจจัยที่กระตุ้นความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ให้สูงขึ้น ดังนั้นการประยุกต์ใช้ระบบล้อตุนกำลังทดแทนแบตเตอรี่ในช่วงความผันผวนสูง เห็นได้ชัดว่าสามารถช่วยลดความเสื่อมสภาพการใช้งานของแบตเตอรี่ได้ อีกทั้งเป็นการช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้ยาวนานขึ้นอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น การประเมินความเสื่อมสภาพที่จะเกิดขึ้นจากการใช้งานแบตเตอรี่ ทำให้สามารถวิเคราะห์อายุการใช้งานเบื้องต้นของแบตเตอรี่ได้ นำไปสู่การหาแนวทางป้องกันเพื่อที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้น และเป็นสิ่งที่ช่วยตัดสินใจในการกำหนดภาระความรับผิดชอบของระบบแบตเตอรี่ที่เหมาะสมต่อการทำงานในระบบไฟฟ้า เช่น ผลกระทบโหมดการทำงานนั้นๆ ส่งผลให้เกิดค่าความเสื่อมสภาพต่อการใช้งานแบตเตอรี่มากน้อยเพียงใด รวมถึงการประมาณอายุการใช้งานแบตเตอรี่จะมีอายุการใช้งานสูงสุดกี่ปี จะสามารถใช้งานได้จนสิ้นอายุขัยหรือไม่ ถือเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ช่วยพิจารณาความคุ้มค่าต่อการลงทุนติดตั้งแบตเตอรี่

อย่างไรก็ตาม การประเมินกรณีศึกษาต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการจำลองระบบไฟฟ้าขนาดเล็กอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ซึ่งอ้างอิงข้อมูลโหลด และข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์ จากข้อมูลเพียงวันเดียวเท่านั้น นอกจากนี้การประเมินความเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานของระบบแบตเตอรี่ในวิทยานิพนธ์นี้ก็เป็นเพียงการประเมินเบื้องต้น เนื่องจากความเสื่อมสภาพของการใช้งานแบตเตอรี่ขึ้นกับปัจจัยที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ ความลึกของการคายประจุ ลักษณะการนำไปใช้งาน เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

1. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, โครงการนำร่องระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะจังหวัดแม่ฮ่องสอน. 2013.
2. เตชะพกาพงษ์, ศ., กรณีศึกษาการใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กเพื่อลดผลกระทบจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2017, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. Arani, A.A.K., et al., *Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **69**: p. 9-18.
4. Amiryar, M. and K. Pullen, *A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications.* Applied Sciences, 2017. **7**: p. 286.
5. Nadeem, F., et al., *Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems.* IEEE Access, 2019. **7**: p. 4555-4585.
6. Connolly, D. *A Review of Energy Storage Technologies: For the integration of fluctuating renewable energy*. 2010.
7. Amano, H., et al. *Field verification of control performance of a LFC system to make effective use of existing power generation and battery energy storage system*. in *IEEE PES ISGT Europe 2013*. 2013.
8. Amano, H., et al. *Utilization of battery energy storage system for load frequency control toward large-scale renewable energy penetration*. in *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*. 2012.
9. Liu, H., et al., *Control Strategy of Energy Storage for Smoothing Photovoltaic Power Fluctuations.* IFAC-PapersOnLine, 2015. **48**(28): p. 162-165.
10. Alam, M.J.E. and T.K. Saha. *Cycle-life degradation assessment of Battery Energy Storage Systems caused by solar PV variability*. in *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. 2016.
11. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. *2559*. 2016.
12. Soskin, P. *Every charge cycle counts when it comes to battery degradation.*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

September 2019; Available from: https://www.energy-storage.news/blogs/every-charge-cycle-counts-when-it-comes-to-battery-degradation.

13. Lee, Y.-L. and T. Tjhung, *Chapter 3 - Rainflow Cycle Counting Techniques*, in *Metal Fatigue Analysis Handbook*, Y.-L. Lee, M.E. Barkey, and H.-T. Kang, Editors. 2012, Butterworth-Heinemann: Boston. p. 89-114.
14. Hinz, H., *Comparison of Lithium-Ion Battery Models for Simulating Storage Systems in Distributed Power Generation.* Inventions, 2019. **4**: p. 41.
15. Meng, J., et al., *Overview of Lithium-Ion Battery Modeling Methods for State-of-Charge Estimation in Electrical Vehicles.* Applied Sciences, 2018. **8**: p. 659.
16. Mathworks. *Battery (Generic Battery Model)*. Available from: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html.
17. Mathworks. *Rainflow (Rainflow counts for fatigue analysis)*. [cited 2020 5 September]; Available from: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/rainflow.html.
18. Chawla, M., et al. *Utility energy storage life degradation estimation method.* in *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply*. 2010.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวมัชฌิมาศ เขียวคำ
วัน เดือน ปี เกิด	22 มิถุนายน 2534
สถานที่เกิด	ลำปาง
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2553-2557)
ที่อยู่ปัจจุบัน	96 ม.9 ต.บ้านเสด็จ อ.เมือง จ.ลำปาง 52000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University