

กรณีศึกษาการใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กเพื่อลดผลกระทบ  
จากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน



นายศิริวัฒน์ เตชะพกาพงษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Case Study on Using Battery Energy Storage System with Mini-Hydro Power Plant to  
Minimize the Impacts of Solar PV Generation on Electrical Network of Amphoe Mueang  
Mae Hong Son



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

กรณีศึกษาการใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กเพื่อลดผลกระทบจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อระบบไฟฟ้าของอำเภอแม่ฮ่องสอน

โดย

นายศิริวัฒน์ เตชะพกาพงษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณสิน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. สมภาพ อัมมมงคล)

ศิริวัฒน์ เตชะพกาพงษ์ : กรณีศึกษาการใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กเพื่อลดผลกระทบจากการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน (A Case Study on Using Battery Energy Storage System with Mini-Hydro Power Plant to Minimize the Impacts of Solar PV Generation on Electrical Network of Amphoe Mueang Mae Hong Son) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 90 หน้า.

ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนมีแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในพื้นที่ประกอบด้วย โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมด้วยระบบแบตเตอรี่ หากสามารถจัดการกับข้อจำกัดของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กที่มีเวลาในการตอบสนองช้าและมีความเฉื่อยต่ำได้ ระบบจะมีศักยภาพที่จะทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดได้ในกรณีที่สายส่ง 115 กิโลโวลต์ เกิดขัดข้อง งานวิทยานิพนธ์นี้จึงมีเป้าหมายที่จะประเมินผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหลดที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้า พร้อมนำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาโดยใช้ระบบแบตเตอรี่ทำงานร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก โดยระบบแบตเตอรี่จะทำหน้าที่หลักสองประการคือ 1) ปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดผลกระทบจากความผันผวนของแสงอาทิตย์ และ 2) ใช้ฟังก์ชันการควบคุมความถี่ โหลดลดทอนผลกระทบจากความผันผวนของโหลดซึ่งสะท้อนเป็นความเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้าของระบบ โดยจะเป็นการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้ระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องให้มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงลำพัง นอกจากนั้น งานวิจัยนี้ยังได้ใช้ข้อมูลตรวจวัดย้อนหลัง ราย 10 วินาทีของความเข้มรังสีอาทิตย์ และกำลังผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ ในการประเมินผลกระทบผ่านการวิเคราะห์เชิงสเปกตรัม และใช้ประกอบการออกแบบวงจรกรองที่ใช้ในการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าและการแบ่งย่านการควบคุมความถี่โหลด ผลการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม DigSILENT แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถรักษาคุณภาพแรงดันและความถี่ไฟฟ้าของระบบในสถานะเชื่อมต่อกับกริดและสถานะไมโครกริดแยกโดดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

# # 5970327021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: BATTERY SYSTEM, ISLANDED MICROGRID, MINI-HYDRO POWER PLANT,  
SOLAR PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

SIRIWAT TECHAPAKAPONG: A Case Study on Using Battery Energy Storage System with Mini-Hydro Power Plant to Minimize the Impacts of Solar PV Generation on Electrical Network of Amphoe Mueang Mae Hong Son.  
ADVISOR: ASST. PROF. SOMBOON SANGWONGWANICH, 90 pp.

The electrical system of Amphoe Mueang Mae Hong Son contains several renewable energy sources, such as a mini-hydro power plant and a solar photovoltaic (PV) power plant with a battery system. If the slow-response-time and low-inertia constraints of the mini-hydro power plant can be handled, the system will have the potential to operate as an islanded microgrid during the failure of the 115 kV transmission line. The objectives of this thesis are first to evaluate the voltage and frequency variation problem caused by power fluctuation of the solar PV power plant and the load, and then to propose a solution based on the battery system working cooperatively with the mini-hydro power plant. The battery system has two main functions: 1) smoothing the output power of the solar PV power plant, and 2) using the load frequency control (LFC) function to reduce the impact of load fluctuation on the system frequency. In this thesis, the LFC function is shared between the battery system and the mini-hydro power plant. This method can reduce the battery size significantly compared with the LFC method which uses only the battery system. In addition, this thesis also uses the 10-second historical data on the solar irradiance and output power of the solar PV power plant for the assessment of power quality through spectral analysis method. The design guidelines for the filters used in the PV smoothing and the frequency division of the LFC signals are also given. The simulation results using DigSILENT program show that the proposed method can keep the voltage and frequency of the system within the standards during the grid-connected and islanded microgrid modes.

Department: Electrical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีเสมอมา ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณภิน และ ดร.สมภพ อัจฉริยะกุล ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไข และเอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็น ประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้อนุเคราะห์ เงินทุนสนับสนุนการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนเพื่อนนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ตลอดจนเพื่อน ร่วมงานฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนแก่ผู้ทำวิจัยในทุกด้านมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	5
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์.....	7
2.1.2 ปัญหาและแนวทางการลดผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจาก โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนด้วยระบบกักเก็บพลังงาน.....	8
2.2 ระเบียบและหลักเกณฑ์การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า.....	10
2.2.1 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า.....	10
2.2.2 การควบคุมความถี่ไฟฟ้า.....	10
2.2.3 การควบคุมแรงดันกระแสเพื่อ.....	10

2.3 ระบบไมโครกริด.....	11
2.4 วงจรกรองความถี่.....	12
2.5 สรุปแนวทางการทำวิจัยที่นำเสนอ .....	13
บทที่ 3 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน.....	16
3.1 ข้อมูลทั่วไปของจังหวัดแม่ฮ่องสอน .....	16
3.2 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของจังหวัดแม่ฮ่องสอน .....	17
3.2.1 ข้อมูลด้านการปฏิบัติการส่งจ่ายไฟฟ้า.....	17
3.2.2 ข้อมูลด้านการจัดหาไฟฟ้า .....	18
3.2.3 ข้อมูลด้านการใช้ไฟฟ้า.....	19
3.3 ข้อมูลการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา .....	23
3.4 ข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์ผาบ่อง .....	23
บทที่ 4 การวิเคราะห์แรงดันกระเพื่อมที่เกิดจากความผันผวนของความเข้มรังสีอาทิตย์ และ กำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง .....	27
4.1 การวิเคราะห์เชิงสเปกตรัมของความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง.....	27
4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์ผาบ่องที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในสถานะเชื่อมต่อกับกริด.....	31
บทที่ 5 ระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	33
5.1 หลักการของการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	33
5.2 แนวทางการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่งสำหรับระบบควบคุมการปรับ เรียบกำลังไฟฟ้าด้วยระบบแบตเตอรี่ .....	33
5.2.1 ค่าคงตัวเวลาสูงสุดเมื่อพิจารณาจากย่านความถี่ในการเกิดแรงดันกระเพื่อม .....	34



5.2.2 ค่าคงตัวเวลาที่เพียงพอสำหรับการควบคุมแรงดันกระแสเพื่อให้อยู่ในเกณฑ์ มาตรฐาน .....	36
บทที่ 6 การควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่และโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก .....	39
6.1 หลักการของการควบคุมความถี่ไหล.....	39
6.2 แนวทางการออกแบบการควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่ .....	39
6.2.1 การควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว.....	41
6.2.2 การควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก .....	42
บทที่ 7 แบบจำลองขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน .....	46
7.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน .....	46
7.2 แบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง.....	46
7.3 แบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาและผาบ่อง .....	48
7.4 แบบจำลองระบบควบคุมของระบบแบตเตอรี่ .....	52
บทที่ 8 ผลการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน .....	53
8.1 ผลการจำลองระบบ.....	56
8.1.1 ผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ผาบ่องที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในสถานะเชื่อมต่อกับกริด (กรณีศึกษาที่ 1).....	56
8.1.2 การปรับเรียกกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบแบตเตอรี่ใน สถานะเชื่อมต่อกับกริด (กรณีศึกษาที่ 2) .....	58
8.1.3 ผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และโหลดที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F1 ถึง F8 (กรณีศึกษาที่ 3).....	60
8.1.4 การปรับเรียกกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไมโครกริดที่รองรับ โหลด F1 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่ (กรณีศึกษาที่ 4).....	62
8.1.5 การปรับเรียกกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่ไหลในระบบไมโครกริดที่รองรับ โหลด F1 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว (กรณีศึกษาที่ 5) .....	64

8.1.6 การปรับเรียงกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โหลดในระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F1 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา (กรณีศึกษาที่ 6).....	66
8.1.7 ผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหลดที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8 (กรณีศึกษาที่ 7).....	68
8.1.8 การปรับเรียงกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่ (กรณีศึกษาที่ 8).....	70
8.1.9 การปรับเรียงกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โหลดในระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว (กรณีศึกษาที่ 9).....	72
8.1.10 การปรับเรียงกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โหลดในระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา (กรณีศึกษาที่ 10).....	74
8.1.11 ผลกระทบจากความผันผวนของโหลดที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6 (กรณีศึกษาที่ 11).....	76
8.1.12 การควบคุมความถี่โหลดในระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6 ด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว (กรณีศึกษาที่ 12).....	78
8.1.13 การควบคุมความถี่โหลดในระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6 ด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผาบ่อง (กรณีศึกษาที่ 13).....	80
8.2 ผลสรุปการจำลองระบบ.....	82
8.2.1 สภาวะเชื่อมต่อกับกริด.....	83
8.2.2 ระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่รองรับโหลดในสายป้อน F1-F8.....	83
8.2.3 ระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่รองรับโหลดในสายป้อน F6-F8.....	84
8.2.4 ระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่รองรับโหลดเฉพาะในสายป้อน F6.....	85
บทที่ 9 บทสรุป.....	87
รายการอ้างอิง.....	88

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 90



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลแหล่งผลิตไฟฟ้าในพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน.....	18
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าราย 10 วินาที ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง ในปี พ.ศ. 2559.....	24
ตารางที่ 7.1 ค่าตัวแปรของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาและผาบ่อง .....	50
ตารางที่ 8.1 รูปแบบการทำงานของอุปกรณ์ในแต่ละกรณีศึกษา .....	53
ตารางที่ 8.2 ค่าตัวแปรของระบบควบคุมที่ใช้ในการศึกษาระบบ.....	56
ตารางที่ 8.3 สรุปผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 10 .....	82
ตารางที่ 8.4 สรุปผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 11 ถึง 13 .....	82

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ข้อกำหนดขนาดและอัตราการเกิดแรงดันกระเพื่อม .....	11
รูปที่ 2.2	การเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรรองความถี่สูงผ่านที่อันดับต่างกัน .....	12
รูปที่ 2.3	การเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่อันดับต่างกัน .....	13
รูปที่ 3.1	พื้นที่การปกครองของจังหวัดแม่ฮ่องสอน .....	16
รูปที่ 3.2	เขตพื้นที่การจ่ายไฟฟ้าในจังหวัดแม่ฮ่องสอน [12].....	17
รูปที่ 3.3	ระบบไฟฟ้าจำหน่ายของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน .....	19
รูปที่ 3.4	ค่าประมาณโหลดรวมราย 30 นาที ของพื้นที่การจ่ายไฟที่ 2 ในปัจจุบัน .....	20
รูปที่ 3.5	ค่าประมาณโหลดรายสายป้อน F1 ถึง F8 ราย 30 นาที ของพื้นที่การจ่ายไฟที่ 2 ในปัจจุบัน .....	21
รูปที่ 3.6	ค่าประมาณโหลดของระบบไมโครกริดในอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน (สายป้อน F1 ถึง F8) ..	22
รูปที่ 3.7	ค่าประมาณโหลดของระบบไมโครกริดเฉพาะในตัวเมือง (สายป้อน F6 ถึง F8) .....	22
รูปที่ 3.8	ค่าประมาณโหลดของระบบไมโครกริดเฉพาะในสายป้อน F6 .....	22
รูปที่ 3.9	ค่าการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา.....	23
รูปที่ 3.10	ความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องในวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2559 .....	26
รูปที่ 4.1	ความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจำนวน 42 วัน .....	27
รูปที่ 4.2	สเปกตรัมของความเข้มรังสีอาทิตย์.....	29
รูปที่ 4.3	การเปรียบเทียบสเปกตรัมของค่ากำลังผลิตไฟฟ้าและความเข้มรังสีอาทิตย์.....	29
รูปที่ 4.4	ฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับการจำลองค่ากำลังผลิตไฟฟ้าเมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ ด้วยการป้อนค่ารังสีอาทิตย์ .....	30

รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบสเปกตรัมของค่ากำลังผลิตไฟฟ้า เมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ผาบ่องขยายขนาดจาก 500 กิโลวัตต์ ไปเป็น 3.5 เมกะวัตต์.....	31
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของค่ากำลังผลิตไฟฟ้า .....	32
รูปที่ 5.1 ระบบควบคุมการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วยระบบแบตเตอรี่.....	33
รูปที่ 5.2 ผลการจำลองการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 1,450 วินาที อ้างอิงความเข้ม รังสีอาทิตย์ในวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2559 .....	35
รูปที่ 5.3 ผลการจำลองการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 1,450 วินาที อ้างอิงความเข้ม รังสีอาทิตย์ในวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2559 .....	36
รูปที่ 5.4 สเปกตรัมของค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม .....	38
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 145 วินาที อ้างอิงความเข้ม รังสีอาทิตย์ ในวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2559 .....	38
รูปที่ 6.1 ระบบควบคุมการควบคุมความถี่โหลดด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัล แบบขนาน.....	40
รูปที่ 6.2 ผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลแบบขนาน.....	40
รูปที่ 6.3 ระบบควบคุมการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบ แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว .....	42
รูปที่ 6.4 ระบบควบคุมการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบ แบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก .....	43
รูปที่ 6.5 ภาพรวมจุดทำงานของระบบควบคุมการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุม ความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก .....	44
รูปที่ 7.1 ระบบไฟฟ้าจำลองของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน .....	46
รูปที่ 7.2 แบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง .....	47
รูปที่ 7.3 ผลจำลองการผลิตกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องด้วยการป้อนค่า ความเข้มรังสีอาทิตย์ราย 10 วินาที .....	47
รูปที่ 7.4 แบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาและผาบ่อง .....	48
รูปที่ 7.5 แบบจำลองระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ .....	48

รูปที่ 7.6 แบบจำลองชุดควบคุมกักกันโรงไฟฟ้า.....	49
รูปที่ 7.7 แบบจำลองระบบควบคุมการควบคุมความถี่ไหลของโรงไฟฟ้า .....	49
รูปที่ 7.8 แบบจำลองระบบควบคุมของระบบแบตเตอรี่ .....	52
รูปที่ 7.9 แบบจำลองระบบควบคุมการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับระบบควบคุมการควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่ .....	52
รูปที่ 8.1 แบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 .....	54
รูปที่ 8.2 แบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 ถึง 6 .....	54
รูปที่ 8.3 แบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 7 ถึง 10.....	55
รูปที่ 8.4 แบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 11 ถึง 13 .....	55
รูปที่ 8.5 ผลการจำลองระบบในสถานะเชื่อมต่อกับกริด .....	57
รูปที่ 8.6 สเปกตรัมของค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อรวมในกรณีศึกษาที่ 1 .....	58
รูปที่ 8.7 ผลการจำลองระบบในสถานะเชื่อมต่อกับกริด กรณีใช้การปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วย ค่าคงตัวเวลา 145 วินาที.....	59
รูปที่ 8.8 การเปรียบเทียบสเปกตรัมของค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 .....	60
รูปที่ 8.9 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F1 ถึง F8.....	61
รูปที่ 8.10 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F1 ถึง F8 กรณีใช้การปรับเรียง กำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 1,450 วินาที.....	63
รูปที่ 8.11 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F1 ถึง F8 กรณีใช้การควบคุม ความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว.....	65
รูปที่ 8.12 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F1 ถึง F8 กรณีใช้การควบคุม ความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา .....	67
รูปที่ 8.13 สเปกตรัมของค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อรวมในกรณีศึกษาที่ 6 .....	68
รูปที่ 8.14 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8.....	69
รูปที่ 8.15 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8 กรณีใช้การปรับเรียง กำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 1,450 วินาที.....	71

รูปที่ 8.16 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8 กรณีใช้การควบคุม  
ความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว..... 73

รูปที่ 8.17 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8 กรณีใช้การควบคุม  
ความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา ..... 75

รูปที่ 8.18 สเปกตรัมของค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในกรณีศึกษาที่ 10 ..... 76

รูปที่ 8.19 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6 ..... 77

รูปที่ 8.20 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6 กรณีใช้การควบคุม  
ความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว..... 79

รูปที่ 8.21 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6 กรณีใช้การควบคุม  
ความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่อง ..... 81





# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยสภาพภูมิประเทศของจังหวัดแม่ฮ่องสอนที่มีลักษณะเป็นป่าเขา และมีการสงวนพื้นที่ส่วนใหญ่ไว้เป็นพื้นที่ป่าอนุรักษ์ จังหวัดแม่ฮ่องสอนจึงเป็นจังหวัดเดียวในประเทศไทยที่ระบบส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ยังเข้าไม่ถึง ประกอบกับสภาพภูมิอากาศมีพายุฝนฟ้าคะนอง มีดินโคลนถล่มในช่วงฤดูฝน และมีปัญหาไฟป่าในช่วงฤดูแล้ง จึงเป็นเหตุให้เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องบ่อยครั้ง ปัญหาความเชื่อถือได้และคุณภาพของไฟฟ้าจึงเป็นปัญหาหลักที่ส่งผลในเชิงลบต่อการพัฒนาเศรษฐกิจในจังหวัดแม่ฮ่องสอน

ปัจจุบันหน่วยงานที่รับผิดชอบทางด้านพลังงานทุกภาคส่วน อาทิ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กฟผ. และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ร่วมกันพิจารณาหาแนวทางการพัฒนาโครงการเพื่อเสริมสร้างความมั่นคงให้ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน เพื่อให้เป็นไปตามแนวความคิดที่ต้องการพัฒนาจังหวัดแม่ฮ่องสอนเป็นต้นแบบของจังหวัดสีเขียว สอดรับกับแนวทางการท่องเที่ยวของจังหวัด ดังนั้น โครงการพัฒนาระบบไฟฟ้าในจังหวัดแม่ฮ่องสอนจึงมีทิศทางไปในลักษณะการพึ่งพาแหล่งพลังงานสีเขียวในพื้นที่เป็นหลัก ปัจจุบันมีโครงการก่อสร้างสายส่ง 115 กิโลโวลต์ ซึ่งดำเนินการโดย กฟภ. รับไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าแม่แตงของ กฟผ. ที่จังหวัดเชียงใหม่ผ่านอำเภอปายเพื่อจ่ายไฟฟ้าไปให้จังหวัดแม่ฮ่องสอน โดยมีระยะทางประมาณ 192 กิโลเมตร แม้ว่าโครงการดังกล่าวจะช่วยแก้ปัญหาเสถียรภาพทางด้านแรงดันไฟฟ้าและสามารถเพิ่มความสามารถในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่จังหวัดแม่ฮ่องสอนได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ปัญหาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนก็ยังคงเป็นปัญหาสำคัญที่ยังไม่สามารถแก้ไขให้หมดไปได้ เนื่องจากการก่อสร้างสายส่ง 115 กิโลโวลต์ ใช้แนวสายเดิมของสาย 22 กิโลโวลต์ ซึ่งเดินไปตามแนวถนนที่มีลักษณะลาดชันและมีต้นไม้หนาแน่น

อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน มีแหล่งผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ประกอบด้วย โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาขนาด 10 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่องขนาด 850 กิโลวัตต์ ในอนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.85 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขนาด 500 กิโลวัตต์ ในอนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ พร้อมกับระบบแบตเตอรี่ขนาด 4 เมกะวัตต์/1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง และโรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอนขนาด 5.4 เมกะวัตต์ มีค่าโหลดรวมสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 11 เมกะวัตต์ หากสามารถจัดการให้แหล่งผลิตไฟฟ้าในระบบทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในภาวะปกติจะช่วยลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย และลดปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้า ทั้งยังเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า โดยสามารถควบคุมระบบไฟฟ้าให้ทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด ในกรณีที่สายส่ง 115 กิโลโวลต์ เกิดขัดข้องได้ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ จะทำให้ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนมีส่วนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าที่มีความผันผวนสูงเพิ่มมากขึ้นด้วย วิทยานิพนธ์นี้จึงมีเป้าหมายในการศึกษาผลกระทบจากการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน พร้อมนำเสนอแนวทางการใช้งานระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กเพื่อควบคุมคุณภาพไฟฟ้าของระบบ ทั้งในสถานะเชื่อมต่อกับกริดและกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ กฟผ.

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนทั้งในกรณีเชื่อมต่อกับกริดและกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด
- 2) ศึกษาผลกระทบจากความผันผวนของโหลด และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ที่มีต่อความถี่ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ในกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด
- 3) ศึกษาแนวทางการใช้งานระบบแบตเตอรี่ เพื่อลดผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ กฟผ.

- 4) ศึกษาแนวทางการใช้งานระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก เพื่อลดผลกระทบจากความผันผวนของโหลด และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ที่มีต่อความถี่ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ในกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด เพื่อควบคุมความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ กฟภ.

### 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ที่มีต่อระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ผ่านแบบจำลองระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ทั้งในกรณีเชื่อมต่อกับกริดและกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดเป็นเวลาต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง
- 2) พิจารณาผลกระทบจากความผันผวนของโหลดและกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ที่มีต่อความถี่ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ผ่านแบบจำลองระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ในกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดเป็นเวลาต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง
- 3) พิจารณาแนวทางการลดผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนเป็นเวลาต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ กฟภ. ด้วยการใช้งานระบบแบตเตอรี่ขนาด 4 เมกะวัตต์/1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ผ่านระบบควบคุมการทำงานของระบบแบตเตอรี่ด้วยวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง (First-order high-pass filter)
- 4) พิจารณาแนวทางการลดผลกระทบจากความผันผวนของโหลดและกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ที่มีต่อความถี่ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ในกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดเป็นเวลาต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เพื่อควบคุมความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ กฟภ. ด้วยการใช้งานระบบแบตเตอรี่ขนาด 4 เมกะวัตต์/1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ร่วมกับโรงไฟฟ้า

พลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาขนาด 10 เมกะวัตต์ และโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่อง  
ขนาด 3.85 เมกะวัตต์

- 5) อ้างอิงข้อมูลพื้นฐานของระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในปี พ.ศ. 2560
- 6) อ้างอิงข้อมูลตรวจวัดค่าโหลทราย 30 นาที ของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ย้อนหลังในปี พ.ศ. 2557
- 7) อ้างอิงข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ และกำลังผลิตไฟฟ้าราย 10 วินาที จากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง ย้อนหลังในปี พ.ศ. 2559

#### 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาบทความทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ดังนี้
  - 1.1) ปัญหาและแนวทางการลดผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหลดด้วยระบบกักเก็บพลังงาน
  - 1.2) การวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
- 2) รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน
- 3) สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน
- 4) ศึกษาผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนทั้งในกรณีเชื่อมต่อกับกริดและกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด
- 5) ศึกษาผลกระทบจากความผันผวนของโหลด และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ที่มีต่อความถี่ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ในกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด
- 6) ศึกษาแนวทางการใช้งานระบบแบตเตอรี่เพื่อลดผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

- 7) ศึกษาแนวทางการใช้งานระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก เพื่อควบคุมความถี่ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอำเภอแม่ฮ่องสอน ในกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 8) สรุปและวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) แนวทางการวิเคราะห์ผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า
- 2) แนวทางการใช้งานระบบแบตเตอรี่เพื่อลดผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า
- 3) แนวทางการใช้งานระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กเพื่อควบคุมความถี่ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าที่มีกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในสัดส่วนสูง ในกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

### 1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งออกเป็น 9 บท โดยแบ่งเป็นเนื้อหา ดังนี้

- บทที่ 1 บทนำ แบ่งเป็น 6 หัวข้อ ได้แก่ 1) ที่มาและความสำคัญของปัญหา 2) วัตถุประสงค์ 3) ขอบเขตวิทยานิพนธ์ 4) ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน 5) ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และ 6) เนื้อหาของวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แบ่งเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ 1) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2) ระเบียบและหลักเกณฑ์การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า 3) ระบบไมโครกริด 4) วงจรกรองความถี่ และ 5) สรุปแนวทางการทำวิจัยที่นำเสนอ
- บทที่ 3 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของอำเภอแม่ฮ่องสอน แบ่งเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ 1) ข้อมูลทั่วไปของจังหวัดแม่ฮ่องสอน 2) ข้อมูลระบบไฟฟ้าของจังหวัดแม่ฮ่องสอน 3) ข้อมูลการเดินทางเครื่องของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา และ 4) ข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง

- บทที่ 4 การวิเคราะห์แรงดันกระเพื่อมที่เกิดจากความผันผวนของค่ารังสีแสงอาทิตย์และกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง แบ่งเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ 1) การวิเคราะห์เชิงสเปกตรัมของค่ารังสีแสงอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง และ 2) การวิเคราะห์ผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในสถานะเชื่อมต่อกับกริด
- บทที่ 5 ระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบ่งเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ 1) หลักการของการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และ 2) แนวทางการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่งสำหรับระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยระบบแบตเตอรี่
- บทที่ 6 การควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่และโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก แบ่งเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ 1) หลักการของการควบคุมความถี่ไหล และ 2) แนวทางการออกแบบการควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่
- บทที่ 7 แบบจำลองขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน แบ่งเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ 1) แบบจำลองระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน 2) แบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง 3) แบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาและผาบ่อง และ 4) แบบจำลองระบบควบคุมของระบบแบตเตอรี่
- บทที่ 8 ผลการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน แบ่งเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ 1) ผลการจำลองระบบ และ 2) ผลสรุปการจำลองระบบ
- บทที่ 9 บทสรุป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 หัวข้อ คือ 1) การวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และ 2) ปัญหาและแนวทางการลดผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหลดด้วยระบบกักเก็บพลังงาน

##### 2.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

บทความ [1] ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลตรวจวัดราย 1 วินาที ของความเข้มรังสีอาทิตย์ และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศสเปนที่ขนาดกำลังผลิตติดตั้งแตกต่างกัน รวมทั้งหมด 6 โรงไฟฟ้า ตั้งแต่ 1 เมกะวัตต์ ไปจนถึง 9.5 เมกะวัตต์ จากการเปรียบเทียบข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เบื้องต้นพบว่า ค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจะมีความผันผวนน้อยกว่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ฟูเรียร์ (Fourier analysis) ของข้อมูลทั้งสองค่านี้ แสดงให้เห็นว่าค่าสเปกตรัม (Spectrum) ของกำลังผลิตไฟฟ้าที่ช่วงความถี่สูงจะมีค่าขนาดน้อยกว่าค่าสเปกตรัมของรังสีแสงอาทิตย์ที่ช่วงความถี่เดียวกันเสมือนมีผลของการปรับเรียบด้วยวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน (Smoothing Effect) และเมื่อนำค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ขนาดกำลังผลิตติดตั้งแตกต่างกันมาวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกัน จะพบว่าเมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีขนาดกำลังผลิตติดตั้งเพิ่มขึ้น ค่าความถี่ตัด (Cut-off frequency) ที่ค่าสเปกตรัมของกำลังผลิตไฟฟ้าเริ่มมีค่าขนาดน้อยกว่าค่าสเปกตรัมของรังสีแสงอาทิตย์จะมีค่าลดลง จากความสัมพันธ์ของพื้นที่รับแสงของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และค่าความถี่ตัดที่ขนาดกำลังผลิตติดตั้งแตกต่างกัน ทำให้สามารถสร้างเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) สำหรับการจำลองค่ากำลังผลิตไฟฟ้าด้วยการป้อนค่ารังสีอาทิตย์และพื้นที่รับแสงของโรงไฟฟ้า

## 2.1.2 ปัญหาและแนวทางการลดผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนด้วยระบบกักเก็บพลังงาน

บทความ [2] ได้นำเสนอแนวทางการลดความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar-PV power smoothing) ด้วยระบบแบตเตอรี่ ใช้การตรวจจับสัญญาณกำลังไฟฟ้าขาออกของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นสัญญาณป้อนเข้าผ่านวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง เพื่อใช้เป็นสัญญาณสั่งการทำงานให้กับระบบแบตเตอรี่ชดเชยกำลังผลิตไฟฟ้าที่มีความผันผวนสูงจากโรงไฟฟ้าที่จุดต่อรวม โดยผลของการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจะแปรผันตามค่าคงตัวเวลาของวงจรกรองที่กำหนด และแปรผันตามการทำงานของระบบแบตเตอรี่ด้วยเช่นกัน

บทความ [3] ได้นำเสนอแนวทางการออกแบบการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานลมและแสงอาทิตย์ด้วยระบบแบตเตอรี่ เพื่อควบคุมอัตราการจ่ายกำลังผลิตไฟฟ้า (Ramp rate) จากโรงไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่า นอกจากจะช่วยให้สามารถควบคุมอัตราการจ่ายกำลังผลิตไฟฟ้าให้คงที่ได้แล้ว ยังสามารถควบคุมสถานะการประจุ (State of charge) ของแบตเตอรี่ให้มีค่าที่เหมาะสมตลอดช่วงเวลาได้อีกด้วย

บทความ [4] ได้นำเสนอแนวทางการควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าบนเกาะโอกินาวา ประเทศญี่ปุ่น ในกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด ซึ่งมีโรงไฟฟ้าในพื้นที่ ได้แก่ โรงไฟฟ้าดีเซล และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากโหลดในพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม จึงเป็นเหตุให้เกิดปัญหาในการควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบเนื่องจากผลของความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหลดขนาดใหญ่ บทความนี้ได้นำเสนอแนวทางการควบคุมความถี่โหลด (Load frequency control) โดยการตรวจจับความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบและค่ากำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มาแปลงเป็นสัญญาณควบคุมระบบกักเก็บพลังงานด้วยตัวเก็บประจุลิเทียมไอออนในการชดเชยกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบเพื่อควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบ

บทความ [5] ได้นำเสนอแนวทางการควบคุมความถี่ไฟฟ้าบนเกาะบอร์นโฮล์ม ประเทศเดนมาร์ก ในกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด โดยใช้การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าความร้อนแบบกระจายตัว เพื่อรองรับกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสูง โดยเมื่อระบบไฟฟ้าหลักเกิดขัดข้อง ในขณะที่ระบบไฟฟ้าบนเกาะต้อง



เปลี่ยนการทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด ระบบแบตเตอรี่จะทำหน้าที่เป็นผู้ควบคุมความถี่หลัก (Primary frequency regulation control) ชดเชยกำลังไฟฟ้าเข้าระบบโดยทันที เพื่อควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบในสถานะเริ่มต้นที่ต้องการเวลาการตอบสนองที่รวดเร็ว เพื่อรอเวลาให้โรงไฟฟ้าความร้อนแบบกระจายตัวในพื้นที่ที่มีเวลาการตอบสนองที่ช้ากว่าเป็นผู้ควบคุมความถี่รอง (Secondary frequency regulation control) ช่วยจ่ายโหลดเพื่อลดการทำงานของระบบแบตเตอรี่

บทความ [6] ได้นำเสนอแนวทางการควบคุมความถี่ไฟฟ้าโดยการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าในระบบ เพื่อรองรับกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสูง บทความนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบผลการจำลองระบบควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ใน 2 รูปแบบ คือ 1) การกำหนดอัตราขยายเพื่อให้ระบบแบตเตอรี่และโรงไฟฟ้าควบคุมความถี่โหลดในสัดส่วนที่ไม่เท่ากัน และ 2) การใช้วงจรกรองในการแบ่งย่านการควบคุมความถี่โหลดเพื่อให้ระบบแบตเตอรี่รองรับความผันผวนความถี่สูง ส่วนโรงไฟฟ้าจะรองรับความผันผวนที่ช้ากว่าค่าเวลาตอบสนองของโรงไฟฟ้า ผลการจำลองระบบชี้ให้เห็นว่า การใช้วงจรกรองในการแบ่งย่านการควบคุมความถี่โหลดจะช่วยให้ระบบแบตเตอรี่ทำงานลดลงเมื่อเทียบกับวิธีการกำหนดอัตราขยาย ในขณะที่ยังคงสามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

บทความ [7] ได้นำเสนอแนวทางการควบคุมความถี่ไฟฟ้าบนเกาะมียาโกะ ประเทศญี่ปุ่น ในกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด ซึ่งมีการติดตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานลมและแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่เพื่อจ่ายโหลดในพื้นที่ จากผลการทดสอบการตอบสนองของโรงไฟฟ้าแบบกระจายตัวในพื้นที่ซึ่งได้แก่ โรงไฟฟ้าดีเซล และโรงไฟฟ้ากังหันแก๊ส พบว่าโรงไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีเวลาในการตอบสนองช้า ทำให้ไม่สามารถตอบสนองต่อความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสูงได้ทัน จึงเป็นเหตุให้เกิดปัญหาการควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบ บทความนี้จึงเสนอแนวทางการควบคุมความถี่ไฟฟ้าโดยการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าในพื้นที่ โดยการตรวจจับความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบมาแปลงเป็นสัญญาณควบคุมแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และใช้วงจรกรองในการแบ่งย่านการทำงานเพื่อให้ระบบแบตเตอรี่รองรับความผันผวนความถี่สูง ส่วนโรงไฟฟ้าแบบกระจายตัวจะรองรับความผันผวนที่ช้ากว่าค่าเวลาตอบสนองของโรงไฟฟ้า ด้วยวิธีการดังกล่าว นอกจากจะช่วยให้ระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดเล็ก ทั้งยังช่วยลดค่าความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนในสถานะแยกโดดได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับการควบคุมความถี่โหลดด้วยโรงไฟฟ้าแบบกระจายตัว หรือระบบแบตเตอรี่อย่างใดอย่างหนึ่งเพียงลำพัง

## 2.2 ระเบียบและหลักเกณฑ์การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า

ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [8] ได้กำหนดหลักเกณฑ์ในการควบคุมคุณภาพไฟฟ้า สำหรับผู้ขอใช้บริการที่ต้องการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของ กฟภ. โดยมีประเด็นสำคัญ ดังนี้

### 2.2.1 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

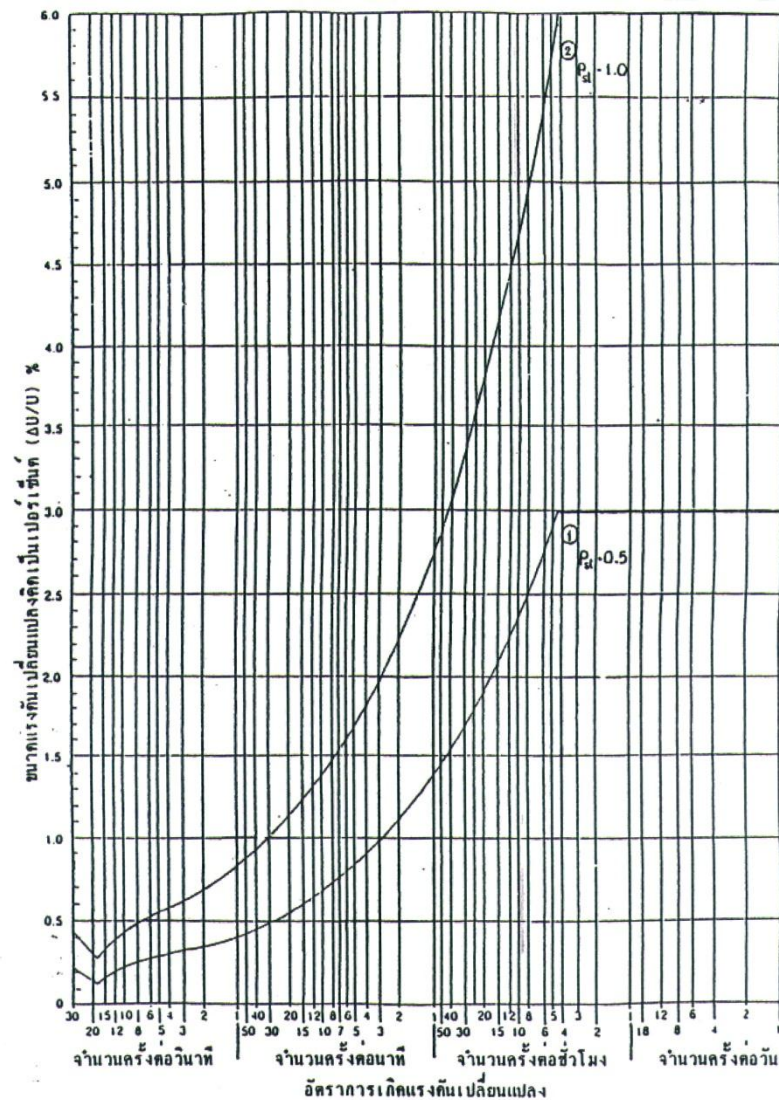
ผู้ขอใช้บริการต้องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อให้เป็นไปตามมาตรฐานแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของ กฟภ. ในสภาวะปกติต้องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วง  $\pm$ ร้อยละ 5 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ และในสภาวะฉุกเฉินจะยอมรับได้ถึงช่วง  $\pm$ ร้อยละ 10 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ

### 2.2.2 การควบคุมความถี่ไฟฟ้า

กฟภ. จะเป็นผู้ควบคุมความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน  $50 \pm 0.5$  เฮิร์ตซ์ และผู้ขอใช้บริการจะต้องควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ซิงโครไนซ์กับระบบโครงข่ายตลอดเวลา เมื่อความถี่ไฟฟ้าของระบบไม่อยู่ในช่วง 47.00-52.00 เฮิร์ตซ์ ต่อเนื่องเกิน 0.1 วินาที ผู้ขอใช้บริการต้องปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าของ กฟภ. ด้วยระบบอัตโนมัติโดยทันที

### 2.2.3 การควบคุมแรงดันกระเพื่อม

ผู้ขอใช้บริการจะต้องไม่ทำให้เกิดแรงดันกระเพื่อม (Voltage fluctuation) ที่จุดต่อร่วมเกินข้อกำหนดเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทรถธุรกิจและอุตสาหกรรมที่ กฟภ. กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งกำหนดขอบเขตพิจารณาช่วงความถี่ในการเกิดแรงดันกระเพื่อมต่ำสุดที่ 4 ครั้งต่อชั่วโมง หรือคิดเป็นความถี่  $1.1 \times 10^{-3}$  เฮิร์ตซ์ ค่าขนาดแรงดันกระเพื่อมต่ำสุดที่ยอมรับมีค่าประมาณร้อยละ 0.15 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ หรือคิดเป็น  $1.5 \times 10^{-3}$  ต่อหน่วย



รูปที่ 2.1 ข้อกำหนดขนาดและอัตราการเกิดแรงดันกระเพื่อม

### 2.3 ระบบไมโครกริด

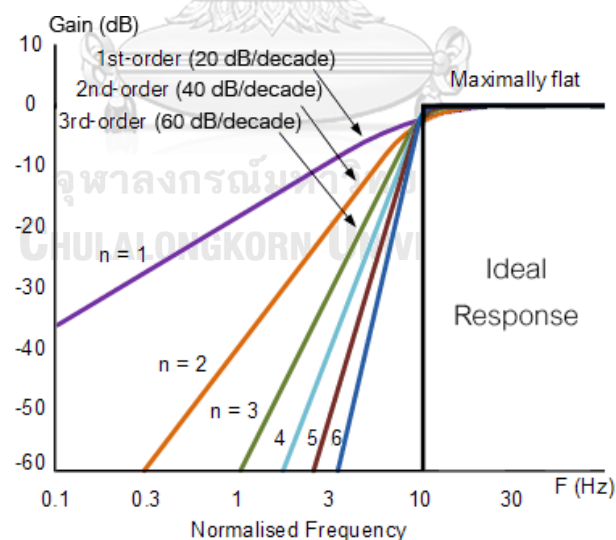
ระบบไมโครกริดเป็นโครงข่ายไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก โดยทั่วไปจะเป็นการรวมแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในพื้นที่ โหลดไฟฟ้า ระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ระบบกักเก็บพลังงาน และระบบควบคุมอัตโนมัติเข้าไว้ด้วยกัน ในสภาวะปกติจะเชื่อมต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าหลัก เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าหลัก ระบบไมโครกริดจะสามารถทำงานในสภาวะแยกโดด และควบคุมคุณภาพไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ ช่วยให้ระบบมีความเชื่อถือได้มากขึ้น [9]

ปัญหาสำคัญสำหรับการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดแบบแยกโดด ได้แก่ การควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบ เนื่องจากโรงไฟฟ้าที่กระจายตัวในพื้นที่ที่มีค่าเวลาตอบสนองช้ากว่า

ความผันผวนของโหลดโดยส่วนใหญ่ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของโหลดจะทำให้ความถี่ไฟฟ้าของระบบ เบี่ยงเบนไปจากค่ามาตรฐาน ซึ่งจำเป็นต้องมีการใช้งานระบบกักเก็บพลังงาน อาทิเช่น ระบบ แบตเตอรี่ หรือ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งมีค่าเวลาตอบสนองที่รวดเร็ว ชดเชยกำลังไฟฟ้าเข้าระบบเพื่อ ลดผลกระทบดังกล่าว [10]

## 2.4 วงจรกรองความถี่

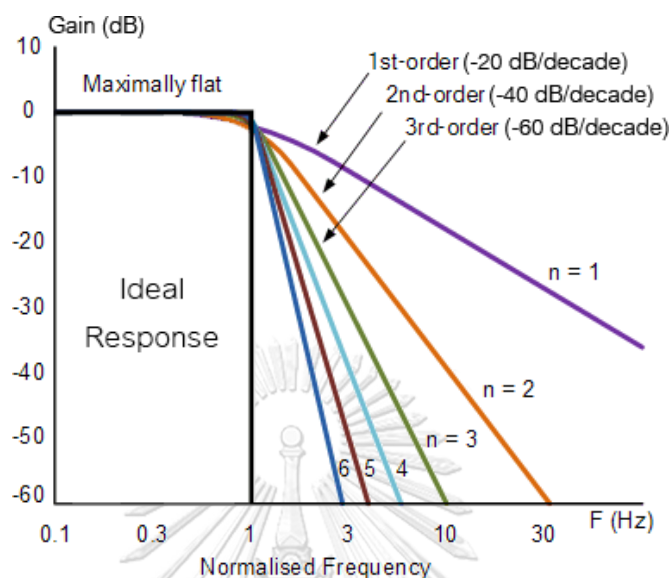
ในทางอุดมคติ วงจรกรองความถี่จะเป็นวงจรที่ใช้ปรับแต่งสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณทาง ไฟฟ้าในบางช่วงความถี่ไม่ให้ปรากฏที่สัญญาณขาออกโดยการกำหนดค่าความถี่ตัดที่ต้องการ แต่ ในทางปฏิบัติวงจรกรองไม่สามารถทำเช่นนั้นได้ แต่จะเป็นการลดการตอบสนองต่อความถี่ในช่วงที่ไม่ ต้องการลง อัตราการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อความถี่จะขึ้นอยู่กับอันดับของวงจรกรองความถี่ที่ ใช้ (Order) โดยมีตั้งแต่อันดับที่ 1 จนถึงอันดับที่  $n$  อัตราการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อความถี่ ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง มีค่าอยู่ที่ 20 เดซิเบลต่อค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นสิบเท่า และจะมี ค่าเป็นจำนวนเท่าตามอันดับของวงจรที่เพิ่มขึ้น [11] รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการ เปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านที่อันดับต่างกัน



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อความถี่ ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านที่อันดับต่างกัน

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าเมื่อใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับสูงมากขึ้น จะให้ผลการ ตอบสนองเข้าใกล้ในทางอุดมคติมากขึ้น แต่ก็จะทำให้การออกแบบวงจรมีความซับซ้อนมากขึ้นด้วย

สำหรับผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับวงจรรองความถี่สูงผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่อันดับต่างกัน

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณานำวงจรรองความถี่สูงผ่านมาใช้ในการควบคุมสัญญาณสั่งการทำงานของระบบแบตเตอรี่ในการชดเชยกำลังไฟฟ้าเข้าระบบเพื่อปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การใช้วงจรรองความถี่สูงผ่านที่อันดับสูงจะช่วยลดความผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าที่เป็นการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงได้มากกว่าการใช้วงจรรองความถี่สูงผ่านที่อันดับต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ระบบแบตเตอรี่ต้องทำงานมากขึ้นตามอันดับของวงจรรองความถี่สูงผ่านที่ใช้ จึงมีแนวโน้มทำให้ระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย จึงควรพิจารณาเลือกใช่วงจรรองความถี่สูงผ่านที่อันดับต่ำ และกำหนดค่าคงตัวเวลาให้น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็นเพื่อให้ระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดเล็ก

## 2.5 สรุปแนวทางการทำวิจัยที่นำเสนอ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตชี้ให้เห็นว่า โรงไฟฟ้าพลังงานลมและแสงอาทิตย์เป็นโรงไฟฟ้าที่มีความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าสูง ซึ่งโรงไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบไม่สามารถตอบสนองต่อความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้างกล่าวได้ทัน หากมีโรงไฟฟ้าเหล่านี้เข้ามาในระบบในสัดส่วนที่สูงขึ้น จะมีแนวโน้มทำให้เกิดผลกระทบในการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น

โดยเฉพาะเมื่อต้องการให้ระบบทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด ซึ่งโดยทั่วไประบบไมโครกริดจะเป็นระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก มีเพียงโรงไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็กทำหน้าที่ควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบทำให้ระบบมีความถี่ต่ำ จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบการใช้งานระบบกักเก็บพลังงาน อาทิเช่น ตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ที่มีความสามารถในการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าโรงไฟฟ้า ช่วยควบคุมแรงดันและความถี่ไฟฟ้าให้อยู่เกณฑ์มาตรฐานโดยการชดเชยกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบ สำหรับระบบไฟฟ้าในอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ซึ่งมีแหล่งผลิตไฟฟ้าหลักในพื้นที่ ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาขนาด 10 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่องขนาด 850 กิโลวัตต์ ในอนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.85 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขนาด 500 กิโลวัตต์ ในอนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ พร้อมกับระบบแบตเตอรี่ขนาด 4 เมกะวัตต์/1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ทำให้ระบบมีศักยภาพเพียงพอที่จะทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด ในกรณีสายส่ง 115 กิโลโวลต์ เกิดขัดข้องได้

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงสเปกตรัม [1] โดยใช้ข้อมูลตรวจวัดย้อนหลังราย 10 วินาที ของความเข้มรังสีอาทิตย์และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ขนาด 500 กิโลวัตต์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีอาทิตย์และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน และใช้ในการประเมินผลกระทบเมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ ซึ่งจะช่วยในการกำหนดแนวทางการลดผลกระทบที่มีต่อระบบไฟฟ้า

จากข้อมูลตรวจวัดย้อนหลังราย 10 วินาที ของค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ได้รวบรวมมานั้น พบว่ามีความผันผวนราย 10 วินาทีค่อนข้างสูง ซึ่งมีเพียงระบบกักเก็บพลังงานที่จะตอบสนองได้ทัน วิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดแนวทางศึกษาการใช้งานระบบแบตเตอรี่ ใน 2 หน้าที่หลัก คือ

- 1) การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อลดผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เป็นการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าของระบบ ด้วยการใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่งในการสร้างสัญญาณควบคุมให้กับระบบแบตเตอรี่ ซึ่งมีข้อดี คือ ระบบแบตเตอรี่จะทำงานสัมพันธ์กับค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบและค่าคงตัวของวงจรกรองที่กำหนด

ต่างจากการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมอัตราการจ่ายกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าให้คงที่ ซึ่งในบางกรณีที่อาจเกิดขึ้นได้เช่น เมื่อค่ากำลังผลิตไฟฟ้าลดลงเนื่องจากแสงอาทิตย์ลดลงอย่างกระทันหันจะส่งผลให้ระบบแบตเตอรี่ต้องชดเชยพลังงานไฟฟ้าเข้าระบบในปริมาณมาก เพื่อควบคุมอัตราการจ่ายกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นการใช้งานระบบแบตเตอรี่มากเกินไปจนขอบเขตการลดความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าที่เป็นการเปลี่ยนแปลงความถี่สูง โดยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวคิดในการนำช่วงความถี่ในการเกิดแรงดันกระแสเพื่อมาใช้เป็นเกณฑ์ในการคำนวณค่าคงตัวของวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่งที่ต้องใช้สำหรับการปรับเรียงกำลังไฟฟ้า เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาแรงดันกระแสเพื่อม

- 2) การควบคุมความถี่โหลด เพื่อลดผลกระทบจากความผันผวนของโหลด และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในกรณีระบบทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด ซึ่งจะเป็นการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าแบบกระจายตัวในพื้นที่ เพื่อให้ระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดเล็ก ซึ่งในที่นี้คือ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก โดยการตรวจจับความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบมาเป็นสัญญาณป้อนเข้าวงจรกรองในการแบ่งย่านการควบคุมความถี่โหลดเพื่อให้ระบบแบตเตอรี่รองรับความผันผวนความถี่สูง ส่วนโรงไฟฟ้าจะรองรับความผันผวนที่ช้ากว่าค่าเวลาตอบสนองของโรงไฟฟ้า และใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลแบบขนาน (Parallel PI-Controller) ในการปรับแต่งสัญญาณควบคุมให้เหมาะสมกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแต่ละชนิด ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถควบคุมผลการตอบสนองของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีต่อสัญญาณป้อนเข้าในย่านความถี่สูงและต่ำได้ง่าย โดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนเป็นตัวควบคุมสัญญาณป้อนเข้าในย่านความถี่สูง และใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลเป็นตัวควบคุมสัญญาณป้อนเข้าในย่านความถี่ต่ำ ซึ่งรูปแบบการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กนั้นยังไม่เคยมีบทความใดเคยนำเสนอมาก่อน

อีกทั้งวิทยานิพนธ์นี้ยังได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ระบบผ่านระบบไฟฟ้าจำลองโดยอ้างอิงข้อมูลสำรวจ และค่าตรวจวัดย้อนหลังที่เกิดขึ้นจริงในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน เพื่อให้ผลการศึกษาระบบที่ได้สะท้อนสภาพความเป็นจริงของระบบมากยิ่งขึ้น

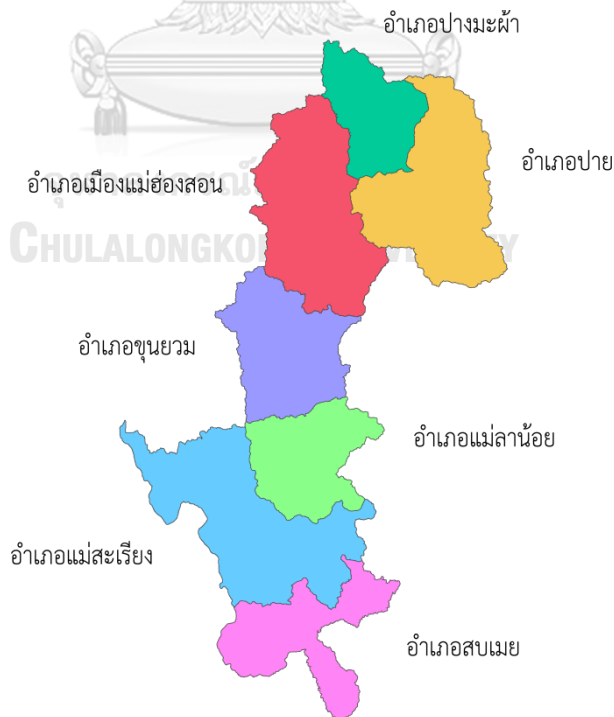
### บทที่ 3

## ข้อมูลระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนได้อย่างเหมาะสม จึงจำเป็นที่จะต้องทราบข้อมูลเบื้องต้นและศักยภาพของระบบไฟฟ้าของจังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั่วไป ข้อมูลระบบไฟฟ้าของจังหวัดแม่ฮ่องสอน [12] ข้อมูลการเดินทาง เครื่องโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา และข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง

### 3.1 ข้อมูลทั่วไปของจังหวัดแม่ฮ่องสอน

จังหวัดแม่ฮ่องสอนเป็นจังหวัดชายแดน อยู่ทางภาคเหนือตอนบน อยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครประมาณ 924 กิโลเมตร มีเนื้อที่ประมาณ 12,681 ตารางกิโลเมตร พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นเนื้อที่ป่าไม้ คิดเป็นร้อยละ 87.75 ของพื้นที่จังหวัด แบ่งการปกครองเป็น 7 อำเภอได้แก่ อำเภอปาย อำเภอปางมะผ้า อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน อำเภอขุนยวม อำเภอแม่ลาน้อย อำเภอแม่สะเรียง และ อำเภอสบเมย แผนที่ตั้งแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 พื้นที่การปกครองของจังหวัดแม่ฮ่องสอน



### 3.2 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของจังหวัดแม่ฮ่องสอน

ข้อมูลระบบไฟฟ้าของจังหวัดแม่ฮ่องสอนที่จะนำเสนอในหัวข้อนี้ แบ่งออกเป็น ข้อมูลด้านการปฏิบัติการส่งจ่ายไฟฟ้า ด้านการจัดการหาไฟฟ้า และด้านการใช้ไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลที่น่าเสนอจะเป็นข้อมูลภาพรวมของทั้งจังหวัด โดยจะเน้นให้ความสำคัญในพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนเป็นหลัก เพื่อแสดงให้เห็นถึงสภาพปัจจุบันของระบบและศักยภาพที่สามารถพัฒนาเป็นระบบไมโครกริดได้

#### 3.2.1 ข้อมูลด้านการปฏิบัติการส่งจ่ายไฟฟ้า

จังหวัดแม่ฮ่องสอนแบ่งพื้นที่การจ่ายไฟฟ้าออกเป็น 3 พื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เขตพื้นที่การจ่ายไฟฟ้าในจังหวัดแม่ฮ่องสอน [12]

- 1) พื้นที่การจ่ายไฟที่ 1 (เขตด้านทิศตะวันออก) ครอบคลุมพื้นที่อำเภอปาย และอำเภอปางมะผ้า พลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ได้รับจากสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่แตง (กฟผ.) ผ่านระบบจำหน่าย (กฟภ.) ด้วยสายส่ง 115 กิโลโวลต์ และสายจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ เดินตามแนวถนนที่เป็นภูเขาและป่าไม้เป็นส่วนใหญ่
- 2) พื้นที่การจ่ายไฟที่ 2 (เขตอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน) ครอบคลุมเขตอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน และอำเภอขุนยวมบางส่วน โดยรับไฟจากสถานีไฟฟ้าปาย ด้วยสายส่ง 115 กิโลโวลต์

จำนวน 1 วงจร จ่ายไฟลงไปตามด้านทิศใต้ถึงอำเภอขุนยวม โดยสามารถเชื่อมโยงกับสายป้อนที่ 6 จากสถานีไฟฟ้าจอมทอง พิกัดแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ผ่านมาทางอำเภอแม่แจ่ม และอำเภอขุนยวม และสามารถเชื่อมโยงได้กับสายป้อนที่ 5 จากสถานีไฟฟ้าแม่สะเรียง มีแหล่งผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ ได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่อง และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง เป็นหลัก

- 3) พื้นที่การจ่ายไฟที่ 3 (เขตด้านทิศใต้) ครอบคลุมเขตอำเภอแม่สะเรียง อำเภอสบเมย อำเภอแม่ลาน้อย และอำเภอขุนยวมบางส่วน ซึ่งรับไฟฟ้าหลักจากวงจรสายป้อน 22 กิโลโวลต์ ที่รับพลังงานไฟฟ้ามาจากสถานีไฟฟ้าจอมทอง การใช้ไฟฟ้าในเขตอำเภอแม่สะเรียงมีปริมาณสูงเป็นอันดับที่สองของจังหวัด รองจากอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

### 3.2.2 ข้อมูลด้านการจัดหาไฟฟ้า

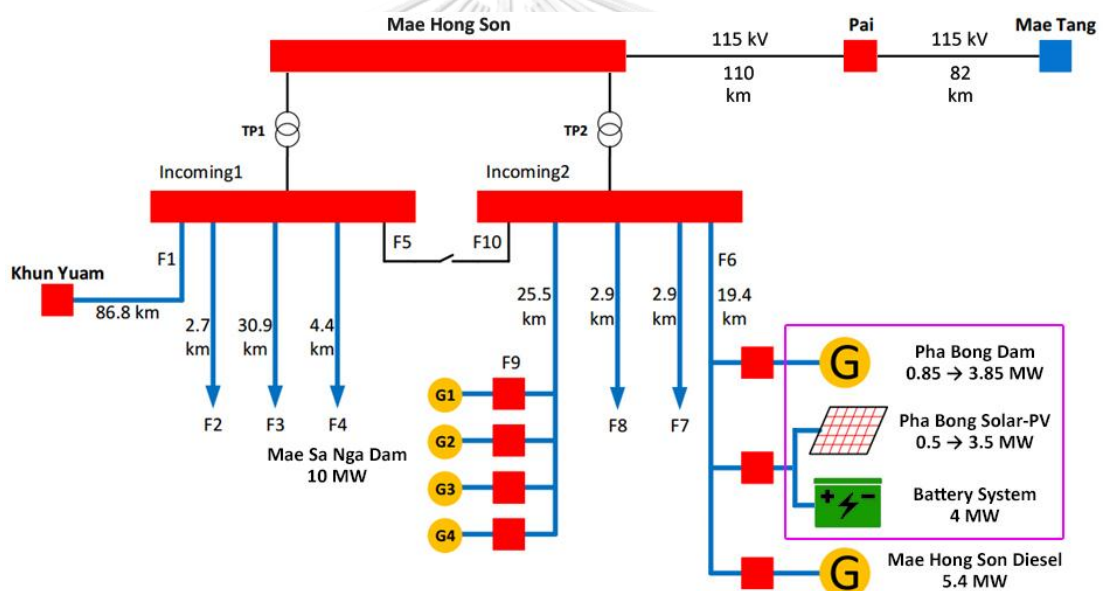
แหล่งผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่ในอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนเป็นพลังงานหมุนเวียน ได้แก่ พลังงานน้ำ และแสงอาทิตย์ ข้อมูลรายละเอียดของกำลังผลิตไฟฟ้าพร้อมทั้งหน่วยงานที่ดูแลรับผิดชอบโรงไฟฟ้าดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลแหล่งผลิตไฟฟ้าในพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

ลำดับที่	แหล่งผลิต	กำลังผลิตติดตั้ง (กิโลวัตต์)	ควบคุมโดย
1	โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา	$2 \times 2,520 + 2 \times 2,650$	พพ.
2	โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่อง	850	พพ.
3	โรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอน	$2 \times 1,000 + 3 \times 800$	กฟผ.
4	โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง	500	กฟผ.

### 3.2.3 ข้อมูลด้านการใช้ไฟฟ้า

พื้นที่การจ่ายไฟที่ 2 มีการใช้ไฟฟ้าปริมาณสูงเป็นอันดับหนึ่งของจังหวัด ปัจจุบันมีความต้องการไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 11 เมกะวัตต์ โดยพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนเป็นที่ตั้งของศาลากลางจังหวัด หน่วยงานราชการต่างๆ ศูนย์กลางธุรกิจ โรงแรม รีสอร์ท โรงเรียน สถานศึกษา และโรงพยาบาลประจำจังหวัด เวลาที่เกิดความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด มี 2 ช่วง คือ ช่วง 13.00-15.00 น. และช่วง 18.00-21.00 น. มีโหลดขนาดใหญ่ ได้แก่ โรงพยาบาลประจำจังหวัด โรงแรมอิมพีเรียล รีสอร์ท โรงน้ำแข็ง 2 แห่ง ส่วนโหลดสำคัญที่ควรได้รับการจ่ายไฟตลอดเวลา คือ ศูนย์ราชการจังหวัด โรงพยาบาล และสนามบิน สภาพปัจจุบันของระบบจำหน่ายและสายป้อนในพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 อธิบายพอสังเขปได้ ดังนี้

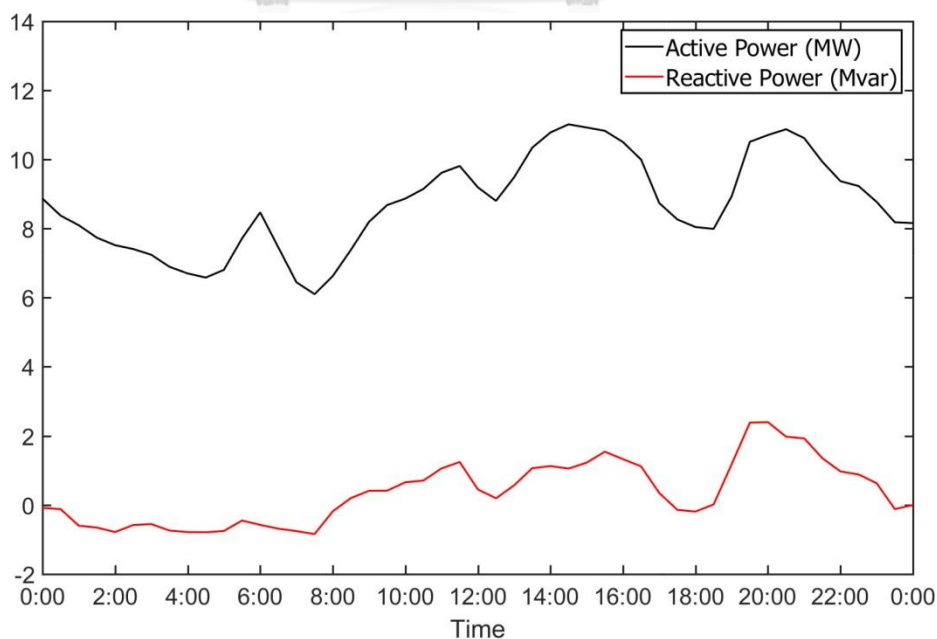


รูปที่ 3.3 ระบบไฟฟ้าจำหน่ายของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

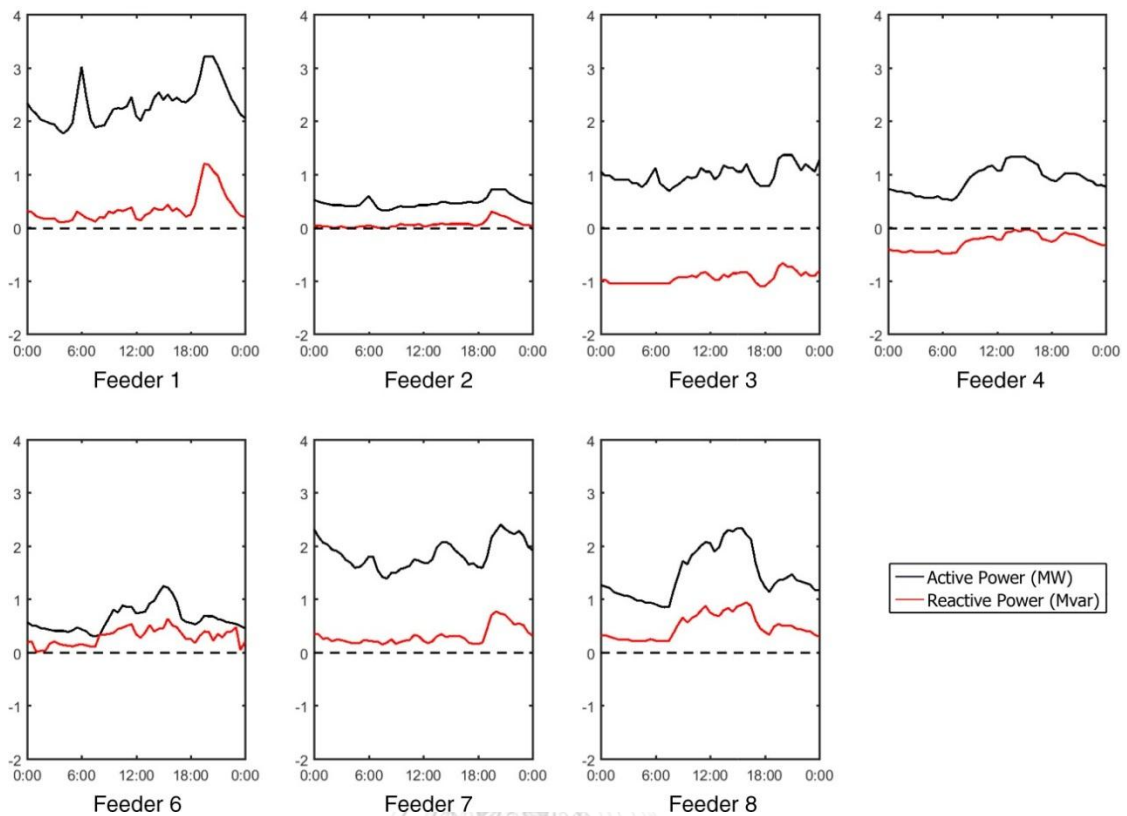
- สายป้อน F1 จ่ายโหลดขนาดเล็กระหว่างเส้นทางจนถึงอำเภอขุนยวมและอาจใช้รับไฟฟ้าจากอำเภอขุนยวมในบางขณะ ซึ่งรับไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าจอมทอง (กฟผ.) ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ มาอีกต่อหนึ่ง
- สายป้อน F2 จ่ายโหลดขนาดเล็กในพื้นที่รอบตัวเมือง เช่น บ้านขุนกลาง วัดก้าก่อ
- สายป้อน F3 จ่ายโหลดขนาดเล็กระหว่างเส้นทางขึ้นไปทางทิศเหนือ สามารถใช้เชื่อมโยงกับอำเภอปางมะผ้า ซึ่งรับไฟ 22 กิโลโวลต์ จากสถานีไฟฟ้าปายมาอีกต่อหนึ่ง

- สายป้อน F4 จ่ายโหลดในตัวเมือง ดอยกองมู และสถานีขนส่ง
- สายป้อน F6 จ่ายโหลดขนาดเล็กระหว่างเส้นทางจนถึงบ้านผาบ่อง รับไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอน (กฟผ.) โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่อง (พพ.) ในอนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.85 เมกะวัตต์ และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง (กฟผ.) ในอนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ พร้อมกับระบบแบตเตอรี่ขนาด 4 เมกะวัตต์/1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง
- สายป้อน F7 จ่ายโหลดในตัวเมือง และย่านธุรกิจ
- สายป้อน F8 จ่ายโหลดในตัวเมือง โรงพยาบาล และสนามบิน
- สายป้อน F9 รับไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา (พพ.)
- สาย Incoming 1 และ 2 รับไฟฟ้าจากหม้อแปลง 115/22 กิโลโวลต์ ขนาด 25 เมกะโวลต์แอมแปร์

จากข้อมูลตรวจวัดค่าโหลดรวมราย 30 นาที ของพื้นที่การจ่ายไฟที่ 2 ในปี พ.ศ. 2557 มีค่าโหลดรวมสูงสุดประมาณ 8 เมกะวัตต์ และเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลปัจจุบัน จึงใช้การปรับอัตราขยายค่าโหลดสูงสุดให้เป็น 11 เมกะวัตต์ โดยค่าประมาณโหลดรวม และรายสายป้อนในปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

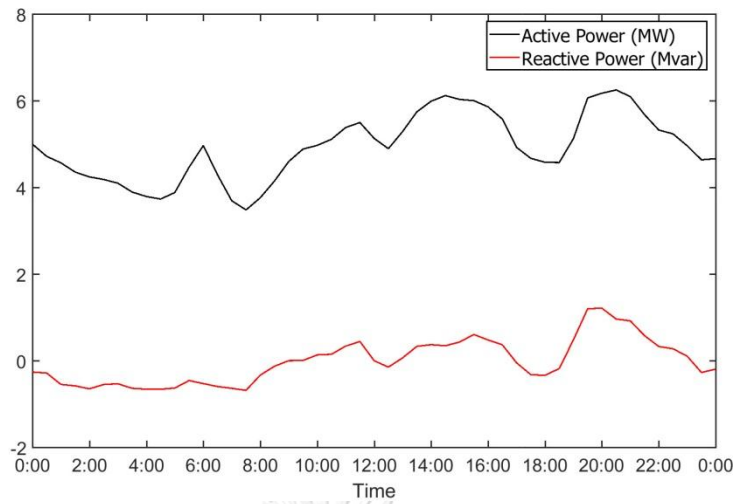


รูปที่ 3.4 ค่าประมาณโหลดรวมราย 30 นาที ของพื้นที่การจ่ายไฟที่ 2 ในปัจจุบัน

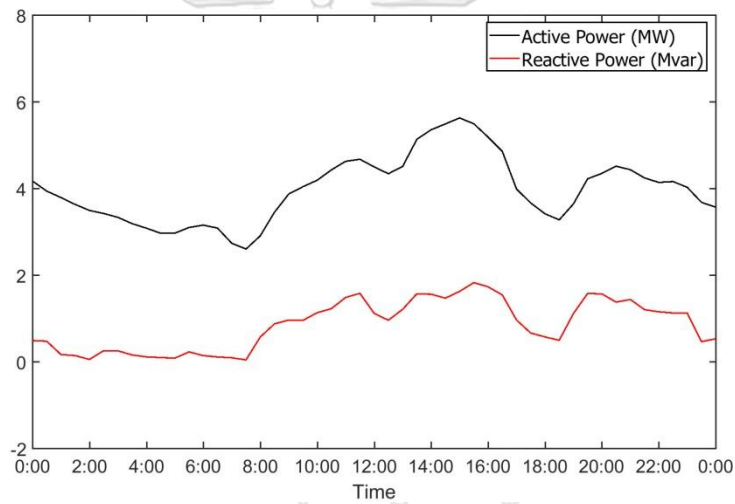


รูปที่ 3.5 ค่าประมาณโหลดรายสายป้อน F1 ถึง F8 ราย 30 นาที ของพื้นที่การจ่ายไฟที่ 2 ในปัจจุบัน

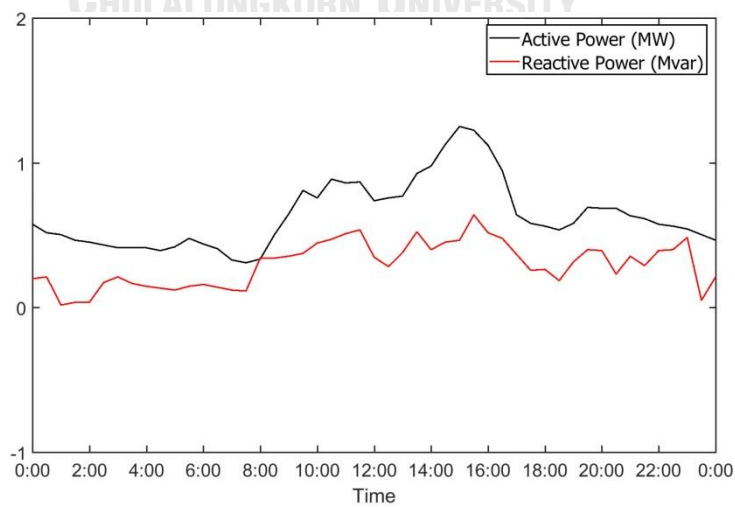
เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการรองรับโหลดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในพื้นที่ วิทยานิพนธ์นี้ จึงกำหนดกรณีศึกษาระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน เมื่อทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดให้จ่ายโหลดใน 3 รูปแบบ คือ 1) โหลดในอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน (สายป้อน F1 ถึง F8) โดยปรับค่าประมาณโหลดรวมสูงสุดลดลงเหลือ 6.26 เมกะวัตต์ 2) เฉพาะโหลดในตัวเมือง (สายป้อน F6 ถึง F8) มีค่าประมาณโหลดรวมสูงสุดอยู่ที่ 5.64 เมกะวัตต์ และ 3) เฉพาะโหลดในสายป้อน F6 มีค่าประมาณโหลดรวมสูงสุดอยู่ที่ 1.25 เมกะวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6, 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ค่าประมาณโหลดของระบบไมโครกริดในอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน (สายป้อน F1 ถึง F8)



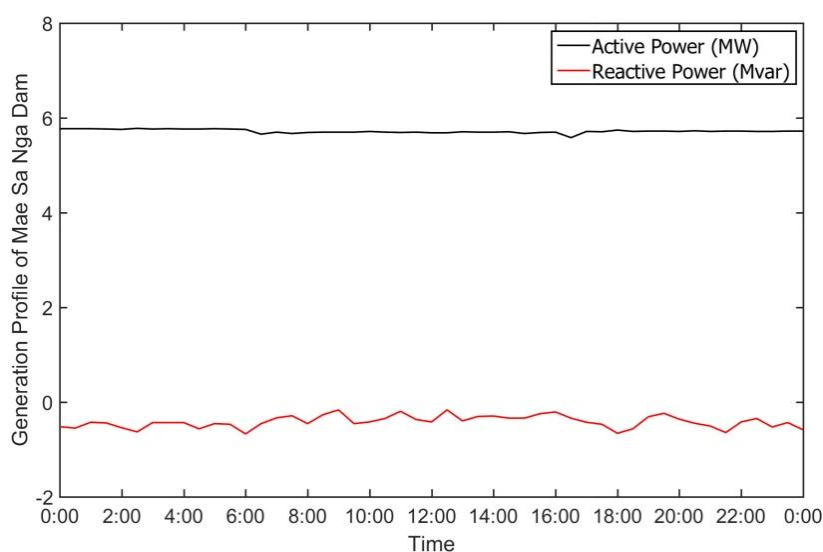
รูปที่ 3.7 ค่าประมาณโหลดของระบบไมโครกริดเฉพาะในตัวเมือง (สายป้อน F6 ถึง F8)



รูปที่ 3.8 ค่าประมาณโหลดของระบบไมโครกริดเฉพาะในสายป้อน F6

### 3.3 ข้อมูลการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา

กำลังการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาขึ้นกับปริมาณน้ำตามฤดูกาล ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 4 ชุด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชุดที่ 1 และ 2 มีกำลังผลิตไฟฟ้าติดตั้งชุดละ 2,550 กิโลวัตต์ ชุดที่ 3 และ 4 มีกำลังผลิตไฟฟ้าติดตั้งชุดละ 2,650 กิโลวัตต์ ในปัจจุบันเดินเครื่องพร้อมกันสามชุด หยุดพักหนึ่งชุด ตลอดทั้งปีจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าระบบในปริมาณที่ไม่แน่นอน ตามข้อมูลตรวจวัดใน ปี พ.ศ. 2559 มีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 5.8 เมกะวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ค่าการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา

### 3.4 ข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าราย 10 วินาที ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขนาด 500 กิโลวัตต์ จำนวน 42 วัน ในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ความเข้มรังสีอาทิตย์ในพื้นที่ที่มีค่าสูงสุดที่ 1,131.4 วัตต์ต่อตารางเมตร มีความผันผวนราย 10 วินาทีสูงสุด 672.6 วัตต์ต่อตารางเมตร และโรงไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 449 กิโลวัตต์ มีความผันผวนราย 10 วินาทีสูงสุด 223.9 กิโลวัตต์ หรือคิดเป็นร้อยละ 44.78 ของกำลังผลิตติดตั้ง รูปที่ 3.10 แสดงข้อมูลในวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2559 ซึ่งเป็นวันที่ความเข้มรังสีอาทิตย์มีความผันผวนราย 10 วินาทีสูงสุด โดยทำให้อยู่ในค่าต่อหน่วยด้วยความเข้มรังสีอาทิตย์ฐาน 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าฐาน 500 กิโลวัตต์

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าราย 10 วินาที  
ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง ในปี พ.ศ. 2559

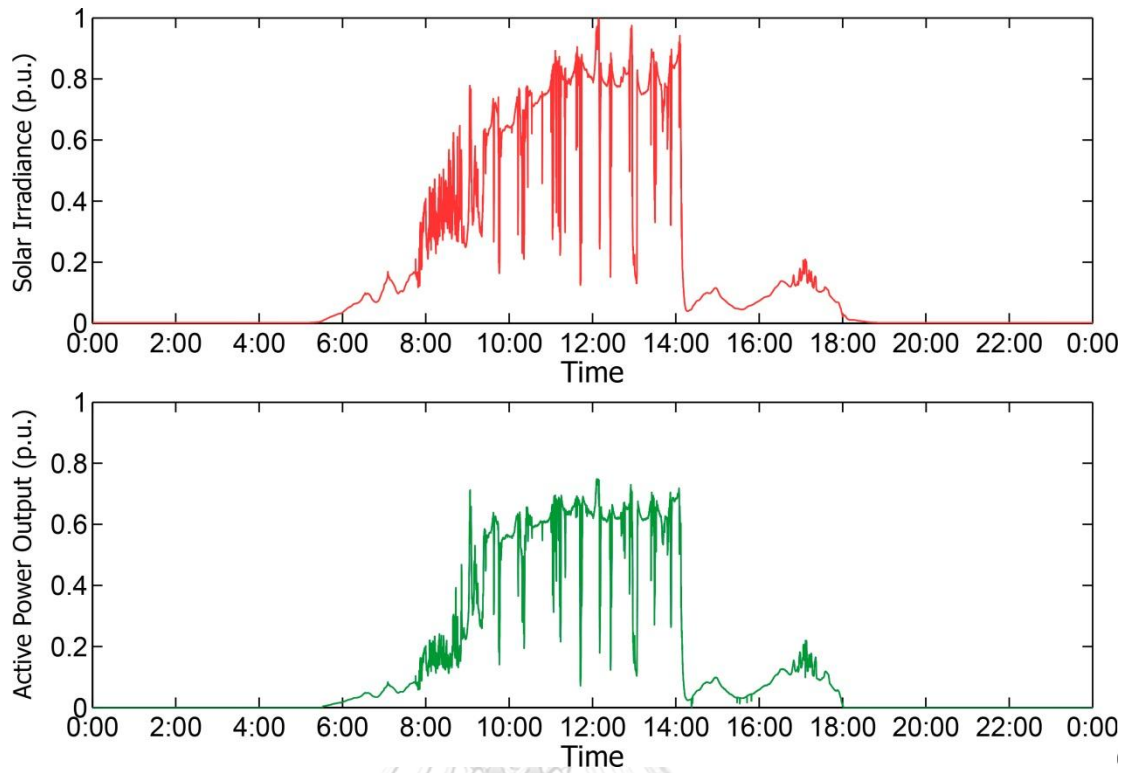
เดือน	วันที่	ความเข้มรังสีอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)		ค่ากำลังผลิตไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	
		ค่าสูงสุด	ค่าผันผวนราย 10 วินาทีสูงสุด	ค่าสูงสุด	ค่าผันผวนราย 10 วินาทีสูงสุด
กุมภาพันธ์	23	634.7	-198.3	272.3	-71.9
	24	653.1	-326.0	280.6	-104.4
	25	653.9	-324.1	281.3	-120.5
มีนาคม	4	772.2	-398.5	325.8	150.4
	5	906.3	540.1	394.2	-208.3
	6	656.3	-91.7	290.5	136.7
	11	623.3	-180.3	265.6	-55.7
	12	737.1	-348.0	316.1	82.9
	13	709.2	-197.5	301.2	-64.5
	15	737.5	373.4	304.8	123.3
	16	717.8	309.4	303.8	-185.7
	19	708.3	-226.7	299.7	-92.5
	20	587.9	-21.7	254.2	-27.4
มิถุนายน	21	648.2	-316.2	276.4	-107.5
	24	1,048.8	-498.4	425.4	-97.8
	26	1,001.9	<b>672.6</b>	374.3	-208.0
	28	1,054.9	521.1	422.6	133.4
กรกฎาคม	29	788.0	249.1	333.1	74.1
	5	1,044.0	151.8	427.1	-80.8
	7	723.6	-48.7	318.5	-16.9
	11	948.9	-334.4	395.7	-99.0
	13	777.1	-156.2	348.7	-45.6
	18	889.2	-198.1	374.1	-58.4
	23	481.7	32.7	215.2	25.5
24	965.4	166.9	387.1	-40.3	



ตารางที่ 3.2 (ต่อ) รายละเอียดข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้า  
ราย 10 วินาที ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป่อง ในปี พ.ศ. 2559

เดือน	วันที่	ความเข้มรังสีอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)		ค่ากำลังผลิตไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	
		ค่าสูงสุด	ค่าผันผวนราย 10 วินาทีสูงสุด	ค่าสูงสุด	ค่าผันผวนราย 10 วินาทีสูงสุด
สิงหาคม	12	<b>1,131.4</b>	297.2	438.8	80.7
	16	1,098.9	-499.0	443.2	131.9
	17	979.7	-470.3	206.2	91.8
	18	1,045.5	494.3	193.4	174.0
	19	957.7	379.3	187.1	51.1
	20	318.1	-3.7	150.0	59.3
	21	1,031.7	-641.3	201.5	-165.0
	23	893.7	225.8	375.7	160.9
	28	1,048.5	-434.2	413.2	-159.8
	29	1,079.0	285.9	416.6	<b>-223.9</b>
กันยายน	1	1,104.8	-562.4	<b>449.0</b>	140.7
	2	1,075.7	-228.8	423.4	124.3
ตุลาคม	1	912.0	-445.1	344.9	129.3
	4	957.8	-523.9	404.2	-177.1
	7	999.8	506.7	409.9	-212.5
	8	1,056.9	-631.5	411.5	-151.3
	9	880.2	-671.3	349.4	-139.8

หมายเหตุ ค่าที่แสดงเป็นค่าติดลบ หมายถึง มีความผันผวนแบบลดลง



รูปที่ 3.10 ความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง  
ในวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2559

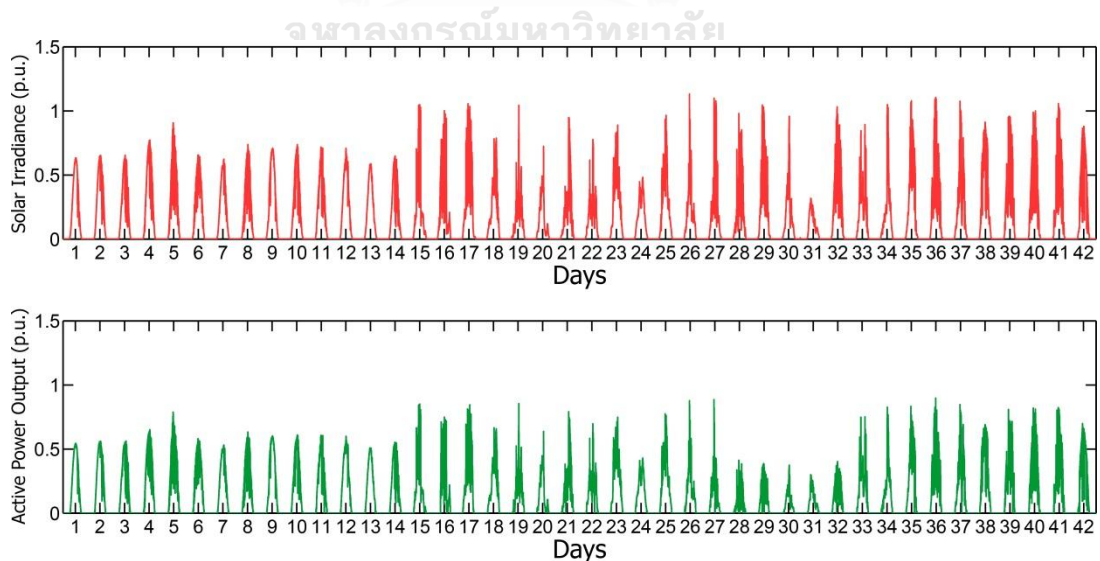
## บทที่ 4

### การวิเคราะห์แรงดันกระเพื่อมที่เกิดจากความผันผวนของความเข้มรังสีอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีอาทิตย์และกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน โดยมีเนื้อหา ดังนี้

#### 4.1 การวิเคราะห์เชิงสเปกตรัมของความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง

จากการที่เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงเพียงหนึ่งเซลล์ที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์มีพื้นที่ในการรับแสงน้อยกว่าพื้นที่การรับแสงทั้งหมดของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ค่ากำลังผลิตไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงอาจมีความผันผวนน้อยกว่าข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์เสมือนมีผลของการปรับเรียบด้วยวงจรความถี่ต่ำ [1] วิทยานิพนธ์นี้จึงได้จัดเรียงข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ขนาด 500 กิโลวัตต์ จำนวนทั้งหมด 42 วัน โดยทำให้อยู่ในค่าต่อหน่วย ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงสเปกตรัม



รูปที่ 4.1 ความเข้มรังสีอาทิตย์และค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจำนวน 42 วัน

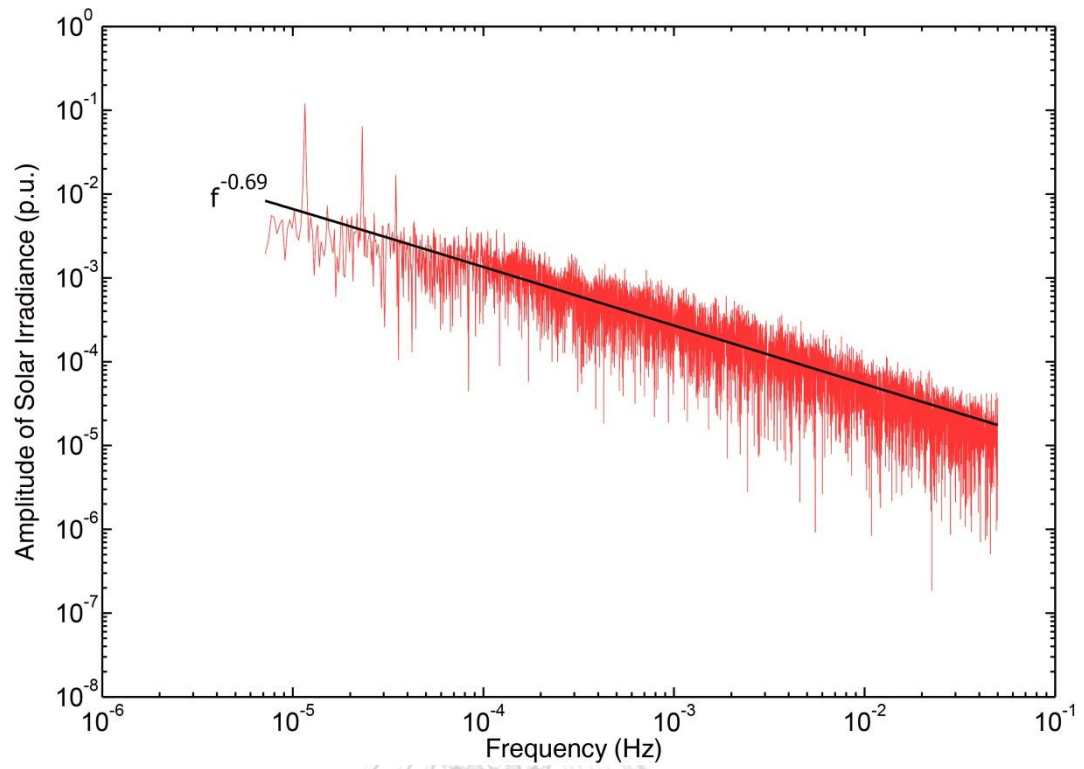
รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของความเข้มรังสีอาทิตย์ ซึ่งเป็นผลจากการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete Fourier transform) ของความเข้มรังสีอาทิตย์ในแต่ละจุดเวลา  $x = x_1 \dots x_N$  ด้วยขั้นตอนวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier transform) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$X_k = \sum_{j=1}^N x_j \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (4.1)$$

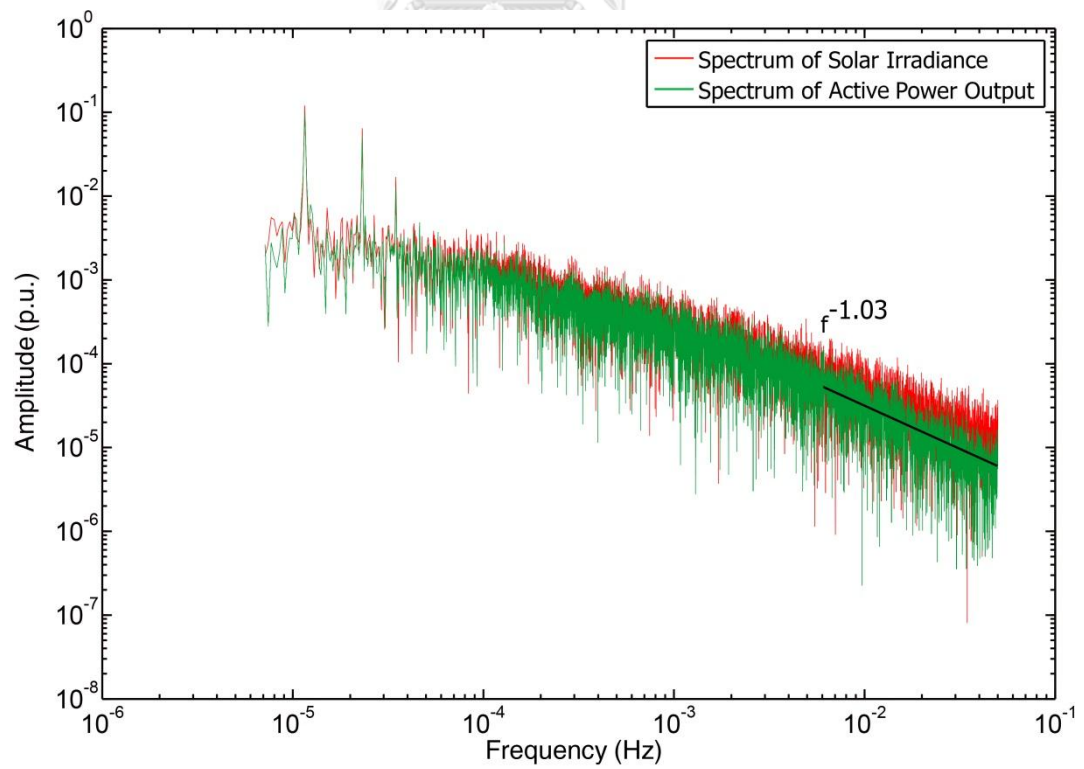
โดยที่  $X_k$  คือ ผลการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาของข้อมูล  $x_j$ ,  $N$  คือ ความยาวของข้อมูล และ  $\omega_N$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\omega_N = e^{(-2\pi i)/N} \quad (4.2)$$

สเปกตรัมของความเข้มรังสีอาทิตย์สามารถประมาณเป็นฟังก์ชันของความถี่  $f$  ได้เป็นฟังก์ชัน  $f^{-0.69}$  รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของกำลังผลิตไฟฟ้าและความเข้มรังสีอาทิตย์ พบว่าค่าความถี่ตัด (Cut-off frequency) ที่ค่าสเปกตรัมของกำลังผลิตไฟฟ้าเริ่มมีค่านาน้อยกว่าค่าสเปกตรัมของรังสีแสงอาทิตย์อยู่ในช่วงตั้งแต่ความถี่ประมาณ  $6 \times 10^{-3}$  เฮิรตซ์ เป็นต้นไป และสามารถประมาณเป็นฟังก์ชันของความถี่ได้เป็นฟังก์ชัน  $f^{-1.03}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังผลิตไฟฟ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ขนาด 500 กิโลวัตต์ มีความผันผวนน้อยกว่าข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์เล็กน้อย แต่ยังไม่เห็นผลของการปรับแก้ด้วยวงจรรวมความถี่ต่ำผ่านอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ จะทำให้โรงไฟฟ้ามีพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้น จึงอาจส่งผลให้ความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าน้อยกว่าที่วิเคราะห์ได้จากรูปที่ 4.3 และผลของการปรับแก้ด้วยวงจรรวมความถี่ต่ำผ่านก็อาจจะปรากฏชัดเจนมากขึ้น



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของความเข้มรังสีอาทิตย์

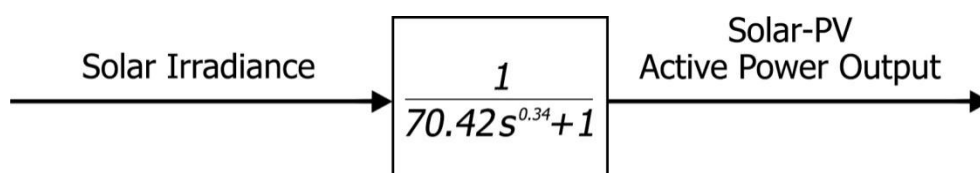


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบสเปกตรัมของค่ากำลังผลิตไฟฟ้าและความเข้มรังสีอาทิตย์

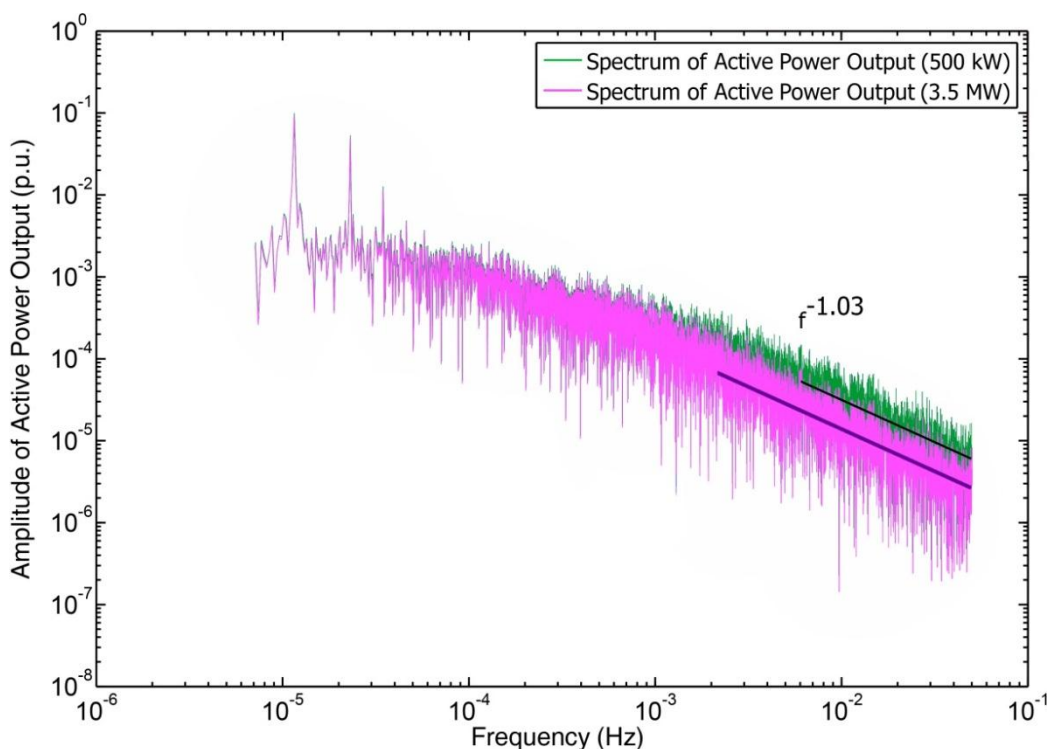
ค่าความแตกต่างระหว่างค่าความชื้นของส่วนที่เป็นเส้นตรงของสเปกตรัมของค่ารังสีอาทิตย์ และกำลังผลิตไฟฟ้าที่เกิดขึ้น นั้นสะท้อนถึงการเคลื่อนตัวและลักษณะของก้อนเมฆในพื้นที่ กล่าวคือ หากไม่มีก้อนเมฆ ค่ารังสีอาทิตย์และกำลังผลิตไฟฟ้าที่วัดได้ในค่าต่อหน่วยจะมีค่าใกล้เคียงกันในทุกช่วงความถี่ ดังนั้น ถึงแม้โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันจะขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าความชื้นของสองค่านี้ก็ยังคงมีค่าใกล้เคียงค่าเดิม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.34

และจากความสัมพันธ์ของค่าความถี่ตัดซึ่งมีค่าแปรผกผันกับค่าราคาที่สองของพื้นที่รับแสงของโรงไฟฟ้า [1] หรือกล่าวได้ว่า ค่าความถี่ตัดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีพื้นที่รับแสงเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาว่าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันจะขยายขนาดจาก 500 กิโลวัตต์ ไปเป็น 3.5 เมกะวัตต์ ซึ่งจะทำให้โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันมีพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นประมาณ 7 เท่า จึงสามารถประมาณการได้ว่าค่าความถี่ตัดจะมีค่าลดลง 2.65 เท่า เมื่อเทียบกับค่าความถี่ตัดของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันที่ขนาด 500 กิโลวัตต์ จะทำให้สามารถคำนวณค่าความถี่ตัดเมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ ได้เท่ากับ  $2.26 \times 10^{-3}$  เฮิรตซ์

เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะสามารถสร้างเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับการจำลองค่ากำลังผลิตไฟฟ้าเมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ ด้วยการป้อนค่ารังสีอาทิตย์ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4 และหากตั้งสมมติฐานว่าค่ารังสีอาทิตย์ในอนาคตยังคงมีค่าประมาณใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้ในปี พ.ศ. 2559 จะทำให้สามารถประมาณการค่าสเปกตรัมของค่ากำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ได้ว่าค่าขนาดในช่วงความถี่ตั้งแต่  $2.26 \times 10^{-3}$  เฮิรตซ์ เป็นต้นไปจะมีแนวโน้มลดลง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับการจำลองค่ากำลังผลิตไฟฟ้าเมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ ด้วยการป้อนค่ารังสีอาทิตย์



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบสเปกตรัมของค่ากำลังผลิตไฟฟ้า

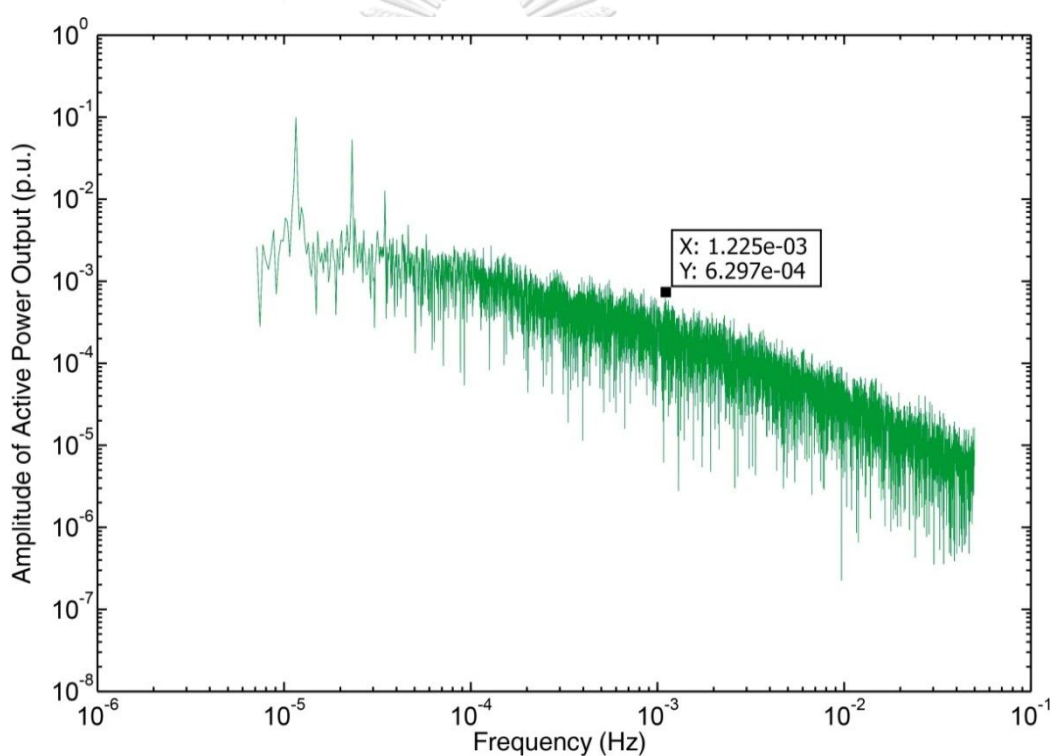
เมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขยายขนาดจาก 500 กิโลวัตต์ ไปเป็น 3.5 เมกะวัตต์

#### 4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในสถานะเชื่อมต่อกับกริด

โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องเชื่อมต่อที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ที่จุดเชื่อมต่อปลายสุดของสายป้อน F6 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีแนวโน้มทำให้เกิดผลกระทบแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมอันเนื่องมาจากความผันผวนของค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้ามากที่สุด การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้มีข้อกำหนดกฎเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม [8] ซึ่งกำหนดขอบเขตพิจารณาช่วงความถี่ในการเกิดแรงดันกระเพื่อมต่ำสุดที่ 4 ครั้งต่อชั่วโมง ( $1.1 \times 10^{-3}$  เฮิร์ตซ์) ค่าขนาดแรงดันเปลี่ยนแปลงต่ำสุดที่ยอมรับมีค่าประมาณ  $1.5 \times 10^{-3}$  ต่อหน่วย ที่จำนวน 20 ครั้งต่อวินาที (20 เฮิร์ตซ์)

จากสเปกตรัมของค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่แสดงในรูปที่ 4.5 จะพบว่าตั้งแต่ช่วงความถี่  $1.1 \times 10^{-3}$  เฮิร์ตซ์ เป็นต้นไป ค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของกำลังผลิตไฟฟ้ามีค่าสูงสุดอยู่ที่  $6.297 \times 10^{-4}$  ต่อหน่วย จากข้อมูลสำรวจสายจำหน่ายในสายป้อน F6 มีระยะทางรวมประมาณ 19.4 กิโลเมตร ใช้สายขนาด 185 ตารางมิลลิเมตร มีค่าอิมพีแดนซ์ประมาณ 0.377

โอห์มต่อกิโลเมตร จากความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้า เมื่อขนาดแรงดันมีค่าการเปลี่ยนแปลงไม่มาก จะทำให้ค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในสายป้อน มีค่าใกล้เคียงค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลในสายป้อนด้วยเช่นกัน และเมื่อกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏฐาน 3.5 เมกะวัตต์ แอมแปร์ และแรงดันไฟฟ้าฐาน 22 กิโลโวลต์ จะทำให้สามารถคำนวณค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูงสุดได้เท่ากับ  $1.923 \times 10^{-5}$  ต่อหน่วย ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าขนาดแรงดันเปลี่ยนแปลงต่ำสุดที่ยอมรับ 0.0015 ต่อหน่วย จึงเป็นการวิเคราะห์ระบบในเบื้องต้นได้ว่า ความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ จะไม่ส่งผลให้เกิดปัญหาแรงดันกระเพื่อมในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของค่ากำลังผลิตไฟฟ้า

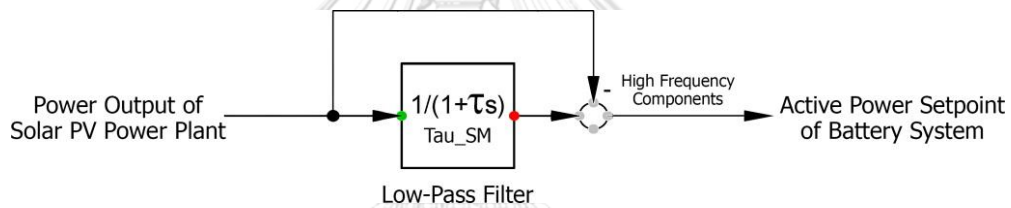


## บทที่ 5

### ระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

#### 5.1 หลักการของการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้หลักการของระบบการควบคุมแบบป้อนผ่าน (Feedforward control) เพื่อลดความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ รูปที่ 5.1 แสดงระบบควบคุมของวงจรการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าโดยใช้การตรวจจับสัญญาณกำลังไฟฟ้าขาออกของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นสัญญาณป้อนเข้าผ่านวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่ง เพื่อใช้เป็นสัญญาณสั่งการทำงานให้กับระบบแบตเตอรี่ชดเชยกำลังผลิตไฟฟ้าที่มีความผันผวนสูงจากโรงไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม โดยค่า  $\tau$  คือ ค่าคงตัวเวลาในหน่วยวินาที ผลของการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจะแปรผันตามค่าคงตัวเวลาที่กำหนด



รูปที่ 5.1 ระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยระบบแบตเตอรี่

#### 5.2 แนวทางการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่งสำหรับระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยระบบแบตเตอรี่

จากการที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มาบ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ที่จุดเชื่อมต่อปลายสุดของสายป้อน F6 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีแนวโน้มทำให้เกิดผลกระทบแรงดันกระเพื่อมอันเนื่องมาจากความผันผวนของค่ากำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้ามากที่สุด วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอแนวทางการกำหนดค่าคงตัวเวลาของวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับหนึ่งที่ใช้สำหรับการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบแบตเตอรี่ ใน 2 รูปแบบ ดังนี้

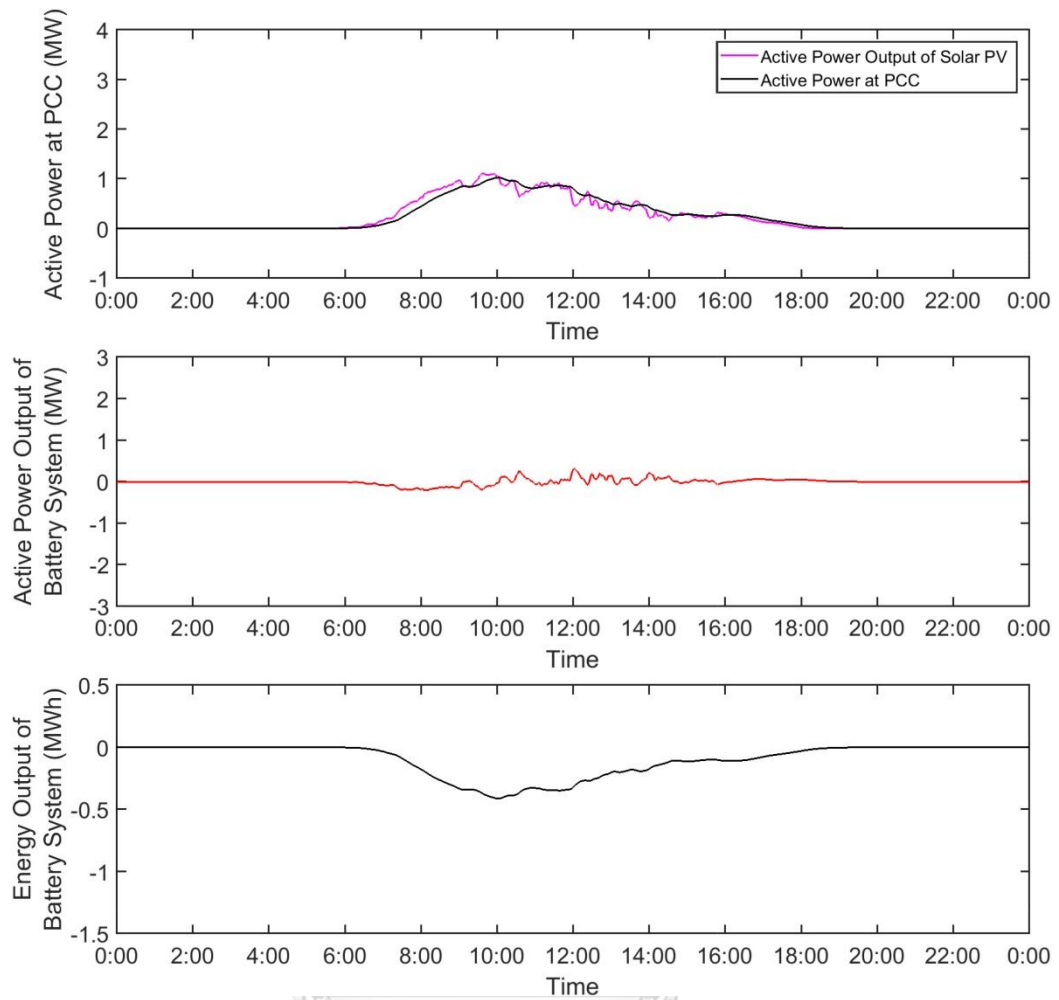
### 5.2.1 ค่าคงตัวเวลาสูงสุดเมื่อพิจารณาจากย่านความถี่ในการเกิดแรงดันกระเพื่อม

เป็นการนำขอบเขตพิจารณาช่วงความถี่ในการเกิดแรงดันกระเพื่อมมาใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดค่าคงตัวเวลาของวงจรกรอง จะสามารถคำนวณค่าคงตัวเวลาได้จากสมการ (5.1)

$$\tau = \frac{1}{\omega_{fl}} \quad (5.1)$$

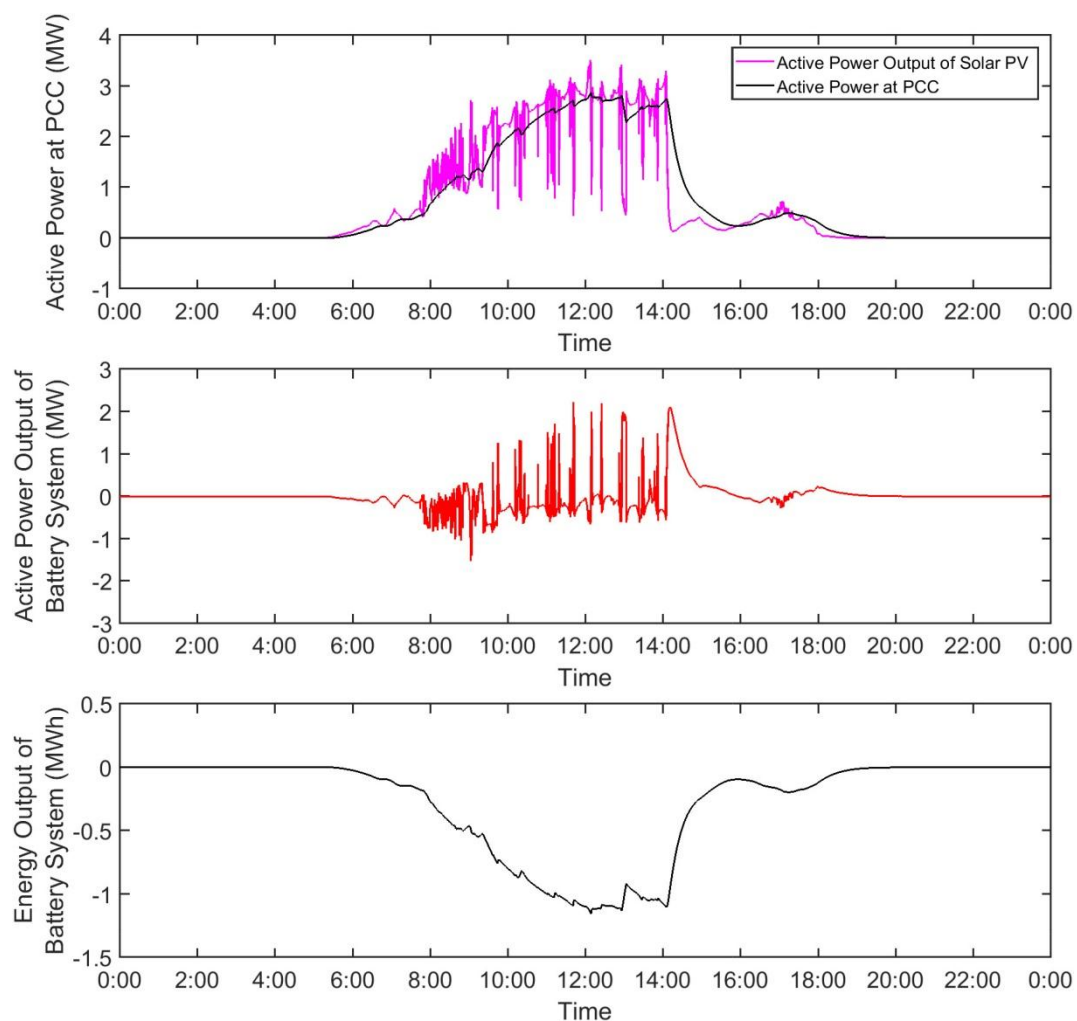
โดยที่  $\omega_{fl}$  คือ ย่านความถี่ของแรงดันกระเพื่อมตามข้อกำหนด เมื่อต้องการให้การปรับเรียบกำลังไฟฟ้ามีผลครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ความถี่เป้าหมายเริ่มต้น  $1.1 \times 10^{-3}$  เฮิร์ตซ์ เป็นต้นไป จะใช้การกำหนดค่าความถี่ตอบสนองของวงจรกรองความถี่สูงที่ต่ำกว่า 10 เท่า คือ  $1.1 \times 10^{-4}$  เฮิร์ตซ์ จะสามารถคำนวณค่าคงตัวเวลาสูงสุดได้เท่ากับ 1,450 วินาที

รูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงผลการจำลองการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ด้วยค่าคงตัวเวลา 1,450 วินาที โดยอ้างอิงข้อมูลตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ในวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2559 ซึ่งเป็นวันที่ความเข้มรังสีอาทิตย์มีความผันผวนราย 10 วินาทีต่ำสุด และวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2559 ซึ่งเป็นวันที่ความเข้มรังสีอาทิตย์มีความผันผวนราย 10 วินาทีสูงสุด ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยระบบแบตเตอรี่ด้วยแนวทางที่นำเสนอ นั้น ช่วยลดความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จุดต่อร่วมได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการจำลองในรูปที่ 5.3 พบว่าระบบแบตเตอรี่ต้องจ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ -1.155 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าค่าขนาดติดตั้ง  $\pm 1$  เมกะวัตต์-ชั่วโมง จึงจำเป็นต้องพิจารณาปรับลดค่าคงตัวเวลาเพื่อลดการใช้งานระบบแบตเตอรี่ให้น้อยลง และเพียงพอที่จะควบคุมแรงดันกระเพื่อมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน จึงจำเป็นต้องมีการประเมินขนาดแรงดันกระเพื่อมในระบบแม่ฮ่องสอน เพื่อที่จะสามารถกำหนดจุดทำงานของการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมได้



รูปที่ 5.2 ผลการจำลองการปรับเรียกกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 1,450 วินาที

อ้างอิงความเข้มรังสีอาทิตย์ในวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2559



รูปที่ 5.3 ผลการจำลองการปรับเรียกกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 1,450 วินาที

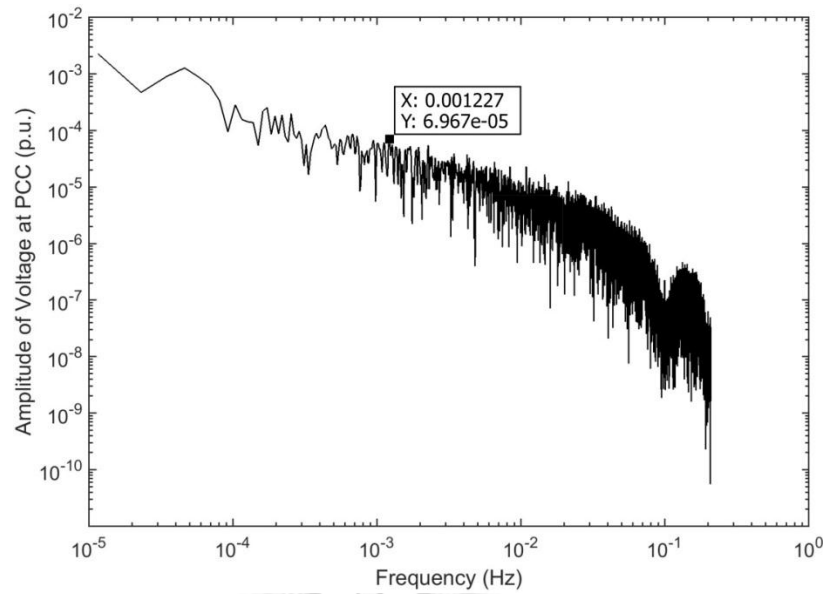
อ้างอิงความเข้มรังสีอาทิตย์ในวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2559

## 5.2.2 ค่าคงตัวเวลาที่เพียงพอสำหรับการควบคุมแรงดันกระแสเพื่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

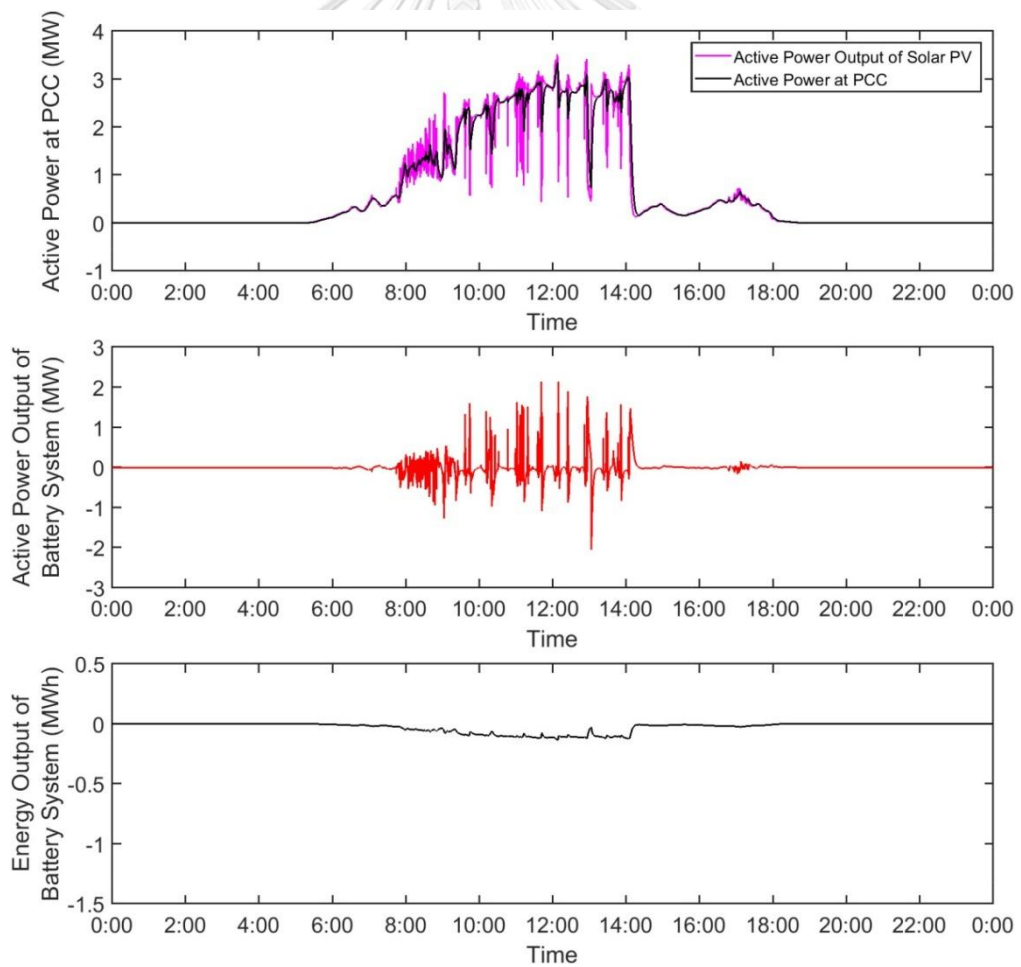
เมื่อทำการจำลองระบบกรณีมีการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันขนาด 3.5 เมกะวัตต์ เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในสถานะเชื่อมต่อกับกริด จากผลการวิเคราะห์เชิงสเปกตรัมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม ดังแสดงในรูปที่ 5.4 พบว่าตั้งแต่ช่วงความถี่  $1.1 \times 10^{-3}$  เฮิรตซ์ เป็นต้นไป ค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันมีค่าสูงสุดที่  $6.967 \times 10^{-5}$  ต่อหน่วย ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าขนาดแรงดันกระแสเพื่อบต่ำสุดตามข้อกำหนดของ กพท. จึงสามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่าความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ในสถานะเชื่อมต่อกับกริดนั้นไม่ส่งผลให้เกิดปัญหาแรงดันกระแสเพื่อบ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.2 ทำให้สามารถลดค่าคงตัวเวลาที่ต้องใช้ลงได้

ถึงแม้ผลการวิเคราะห์และจำลองระบบจะแสดงให้เห็นว่า ในสภาวะเชื่อมต่อกับกริดจะไม่เกิดปัญหาแรงดันกระเพื่อม แต่ก็ยังควรให้มีการใช้งานการปรับเรียบกำลังไฟฟ้า เนื่องจากการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าเป็นการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าที่ต้นเหตุ ซึ่งทำได้ง่ายกว่าการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าด้วยการควบคุมแบบป้อนกลับอย่างเช่นการควบคุมความถี่โหลด และยังเป็นการป้องกันปัญหาแรงดันกระเพื่อมที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต นอกจากนี้การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยระบบแบตเตอรี่นั้นเป็นการชดเชยกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบเพื่อลดความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จุดต่อร่วม ถึงแม้จะมีเป้าหมายหลักในการลดแรงดันกระเพื่อม แต่ในขณะเดียวกันก็ช่วยลดผลกระทบที่ทำให้เกิดความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยระบบแบตเตอรี่จึงยังคงมีส่วนสำคัญในการช่วยควบคุมคุณภาพไฟฟ้าของระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการให้ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดเนื่องจากระบบมีความเฉื่อยต่ำ แต่อย่างไรก็ตามค่าคงตัวเวลาที่เหมาะสมในแต่ละระบบย่อมมีค่าแตกต่างกันไปตามความต้องการของระบบในขณะนั้น

จากผลการจำลองการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 145 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 5.5 จะพบว่าสามารถลดความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จุดต่อร่วมได้ ในขณะที่ระบบแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดแค่เพียง -0.135 เมกะวัตต์-ชั่วโมง เท่านั้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ค่าคงตัวเวลาสำหรับการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าที่ 145 วินาที สำหรับการศึกษาระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ซึ่งเป็นค่าที่เพียงพอสำหรับการควบคุมแรงดันกระเพื่อมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน



รูปที่ 5.4 สเปกตรัมของค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม



รูปที่ 5.5 ผลการจำลองการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 145 วินาที

อ้างอิงความเข้มรังสีอาทิตย์ ในวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2559

## บทที่ 6

### การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่และโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก

#### 6.1 หลักการของการควบคุมความถี่โหลด

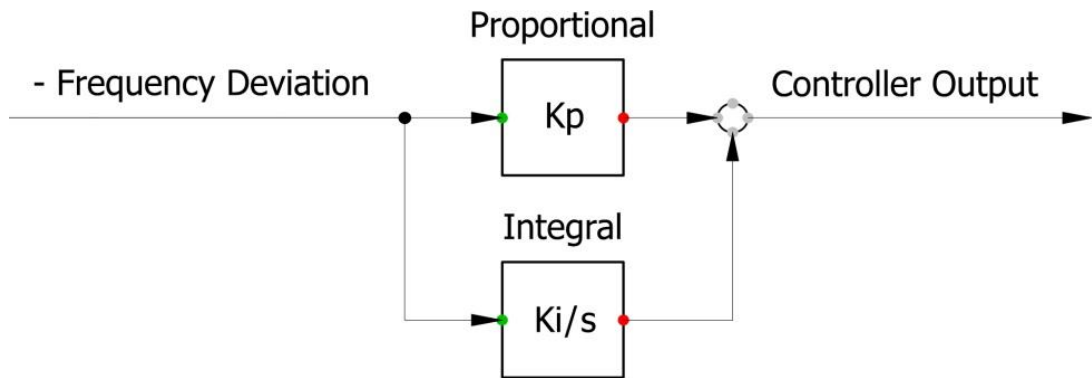
การควบคุมความถี่โหลดมีเป้าหมายในการลดผลกระทบจากความผันผวนของโหลดที่มีต่อความถี่ไฟฟ้าของระบบ เพื่อลดความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบในสถานะอยู่ตัวให้เป็นศูนย์ [13] โดยใช้หลักการของระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) ตรวจสอบความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบมาเป็นสัญญาณป้อนเข้า ปรับแต่งให้เป็นสัญญาณควบคุมทุติยภูมิ (Secondary control) สำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการชดเชยกำลังไฟฟ้าเข้าระบบเพื่อควบคุมความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ในระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปจะใช้การควบคุมความถี่โหลดด้วยโรงไฟฟ้าในการควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบ สำหรับระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่มีความเฉื่อยต่ำ ซึ่งความผันผวนของโหลดมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้าของระบบ อีกทั้งในกรณีที่ระบบไมโครกริดนั้นมีโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสูงจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าระบบในสัดส่วนสูง จะส่งผลให้เกิดความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนที่มีองค์ประกอบความถี่สูง จึงจำเป็นต้องใช้การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมด้วยเนื่องจากระบบแบตเตอรี่มีเวลาตอบสนองที่รวดเร็วกว่าโรงไฟฟ้า ซึ่งจำเป็นต้องมีการออกแบบการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ไม่ให้มากเกินไปเกินความต้องการของระบบ เพื่อให้ระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดเล็ก ซึ่งแนวทางการออกแบบการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

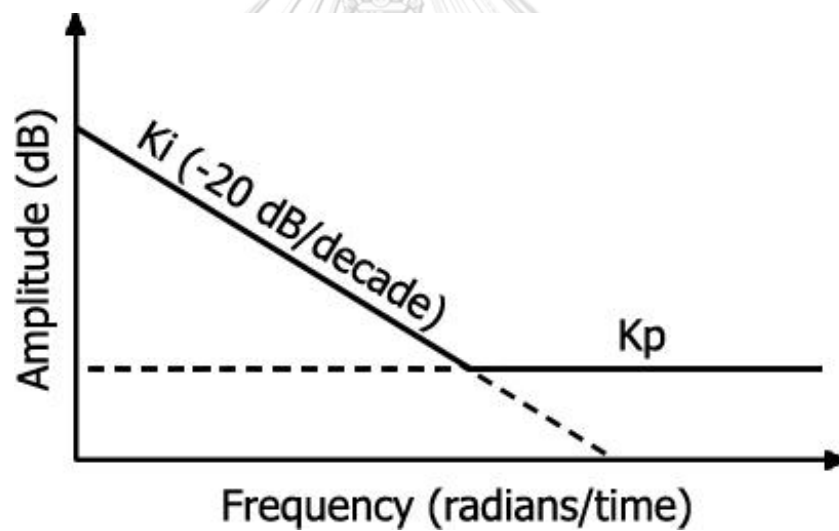
#### 6.2 แนวทางการออกแบบการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวทางการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ โดยการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลแบบขนานในการปรับแต่งสัญญาณความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนป้อนเข้าให้เหมาะสมกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแต่ละชนิด ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถควบคุมผลการตอบสนองของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีต่อสัญญาณป้อนเข้าในย่านความถี่สูงและต่ำได้ง่าย โดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนเป็นตัวควบคุมสัญญาณป้อนเข้าในย่านความถี่สูง และใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลเป็นตัวควบคุมสัญญาณป้อนเข้าในย่านความถี่ต่ำ ระบบควบคุมและผลการตอบสนองทางความถี่ของ

การควบคุมความถี่ไหลด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลแบบขนาน ดังแสดงในรูปที่ 6.1 และ 6.2 ตามลำดับ



รูปที่ 6.1 ระบบควบคุมการควบคุมความถี่ไหลด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลแบบขนาน



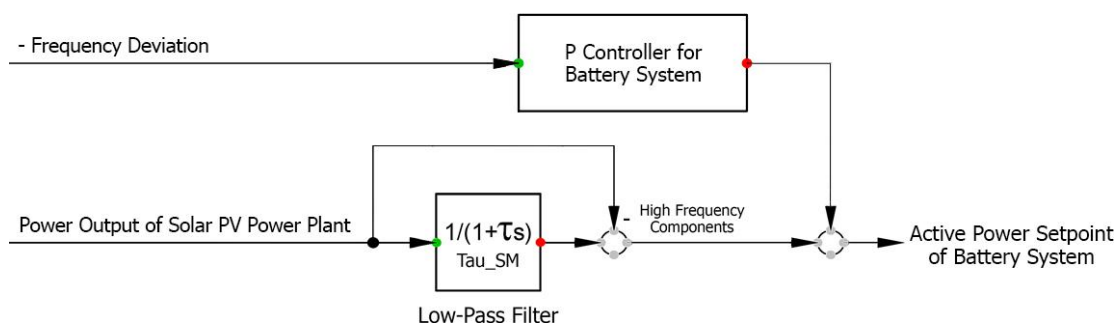
รูปที่ 6.2 ผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลแบบขนาน

ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดเป็นกรณีศึกษาของการควบคุมความถี่ไหลใน 2 รูปแบบ คือ 1) การควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว และ 2) การควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก



### 6.2.1 การควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว

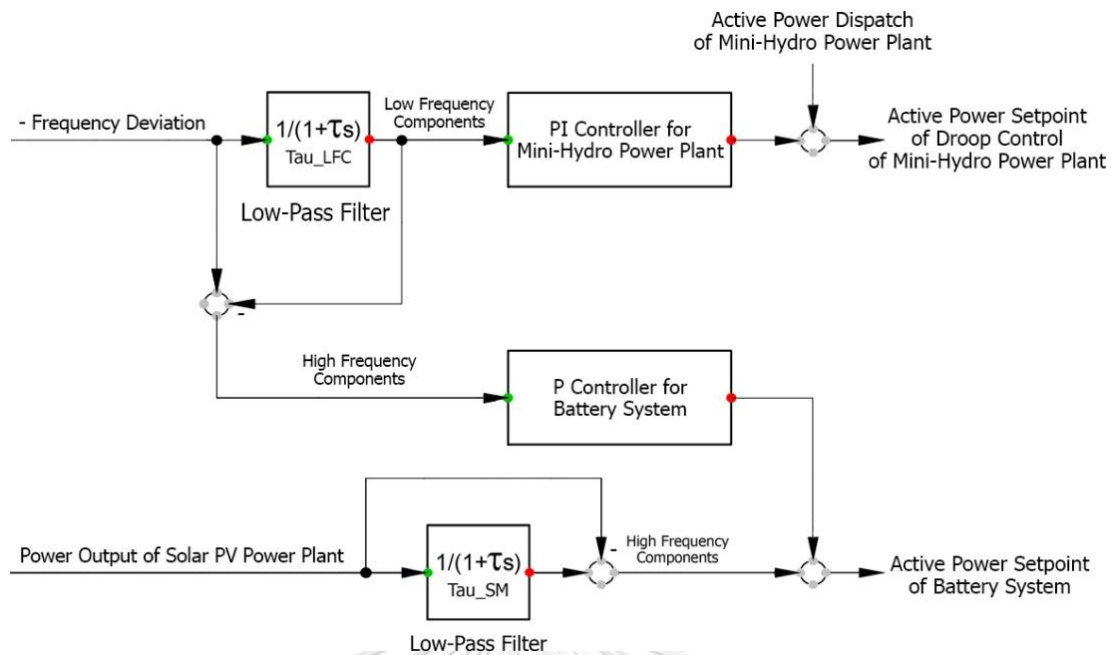
จากผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลแบบขนานในรูปที่ 6.2 แสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน ในที่นี้คือ  $K_p$  จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนป้อนเข้าในทุกย่านความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นด้วยอัตราขยายที่กำหนด ส่วนค่าอัตราขยายแบบอินทิกรัล ในที่นี้คือ  $K_i$  จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนป้อนเข้าในย่านความถี่ต่ำให้มีค่าสูงขึ้นด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราขยาย  $-20$  เดซิเบลต่อค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นสิบเท่า ซึ่งความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบโดยปกติจะมีองค์ประกอบความถี่ต่ำเป็นส่วนมาก ดังนั้น การปรับแต่งสัญญาณป้อนเข้าด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลนั้นจะสามารถลดความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน หรือตัวควบคุมแบบอินทิกรัลเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง สำหรับการควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว นั้น การกำหนดค่าอัตราขยายแบบอินทิกรัลที่มากขึ้นจะทำให้ระบบแบตเตอรี่ต้องจ่ายพลังงานเข้าระบบในปริมาณมากเพื่อลดความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนในย่านความถี่ต่ำ และส่งผลให้ระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้น เพื่อให้ระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดเล็กลง วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้การควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวด้วยการปรับแต่งสัญญาณป้อนเข้าด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนเพียงอย่างเดียว เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมหตุติภูมิสำหรับระบบแบตเตอรี่ที่ตอบสนองต่อความผันผวนของความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนในย่านความถี่ต่ำให้น้อยที่สุดเพื่อลดการทำงานของระบบแบตเตอรี่ และสัญญาณควบคุมหตุติภูมิสำหรับระบบแบตเตอรี่ที่ได้นี้จะถูกนำไปรวมกับสัญญาณสั่งการทำงานจากระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นสัญญาณสั่งการทำงานให้กับระบบแบตเตอรี่ รูปที่ 6.3 แสดงระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าร่วมกับารควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 6.3 ระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่ไหลลด  
ด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว

### 6.2.2 การควบคุมความถี่ไหลลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก

เป็นการออกแบบให้โรงไฟฟ้าในพื้นที่ ซึ่งในที่นี้คือ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ทำหน้าที่ควบคุมความถี่ไหลลดร่วมกับระบบแบตเตอรี่ สำหรับการควบคุมความถี่ไหลลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กนี้จะแตกต่างจากการควบคุมความถี่ไหลลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว โดยจะใช้การแบ่งย่านความถี่ของสัญญาณความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนป้อนเข้าด้วยวงจรกรองความถี่เพื่อให้ระบบแบตเตอรี่รับผิดชอบเฉพาะในส่วนความผันผวนของความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนในย่านความถี่สูง และให้โรงไฟฟ้ารองรับความผันผวนที่ช้ากว่าค่าเวลาตอบสนองของโรงไฟฟ้า สัญญาณควบคุมทุติยภูมิสำหรับโรงไฟฟ้าที่ได้นี้จะถูกนำไปรวมกับสัญญาณสั่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Active power dispatch) ของโรงไฟฟ้าเพื่อใช้ในการกำหนดจุดทำงานของดรู๊ป (Active power setpoint of droop) ให้กับโรงไฟฟ้า ระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่ไหลลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ระบบควบคุมการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่ไหลด  
ด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก

จากรูปที่ 6.4 การกำหนดค่าคงตัวเวลาของวงจรรองความถี่ในการแบ่งย่านความถี่สัญญาณความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนป้อนเข้าซึ่งในที่นี้คือ  $\tau_{LFC}$  นั้นจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่าเวลาตอบสนองของโรงไฟฟ้า เพราะจะทำให้สัญญาณควบคุมทุกสัญญาณสำหรับโรงไฟฟ้าที่ได้นั้นมีองค์ประกอบความถี่สูงมากเกินไปที่โรงไฟฟ้าจะสามารถตอบสนองได้ทัน และในขณะเดียวกันจะทำให้สัญญาณควบคุมทุกสัญญาณสำหรับระบบแบตเตอรี่ที่ได้น้อยเกินไป จนส่งผลให้การควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร และในทางกลับกันการกำหนดค่าคงตัวเวลา  $\tau_{LFC}$  ให้มีค่ามากขึ้นจะช่วยให้ความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบลดลง และส่งผลให้ระบบแบตเตอรี่ที่ต้องใช้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้โรงไฟฟ้าสามารถตอบสนองต่อสัญญาณควบคุมความถี่ไหลดได้ทัน จะสามารถคำนวณค่าคงตัวเวลา  $\tau_{LFC}$  ในหน่วยวินาที ได้จากสมการ (6.1)

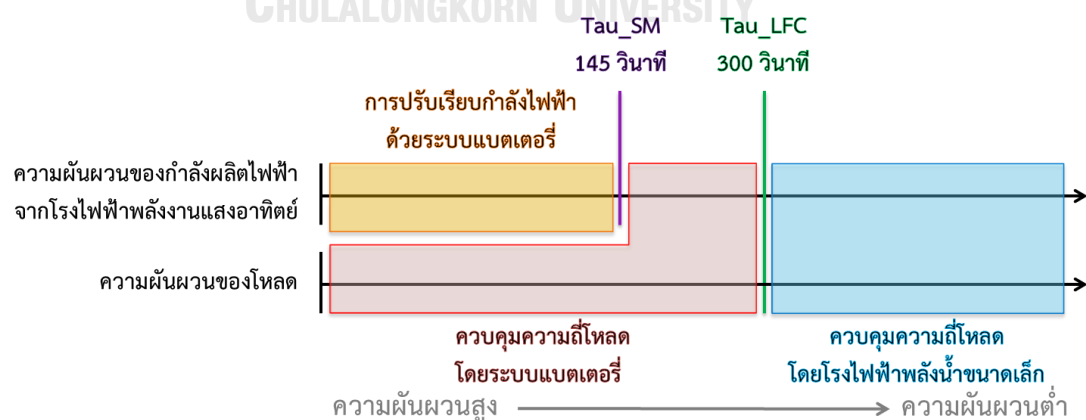
$$\tau_{LFC} = 10 \times \text{ค่าเวลาการตอบสนองของโรงไฟฟ้า} \quad (6.1)$$

ซึ่งค่าเวลาการตอบสนองของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม้จะงานั้นสามารถพิจารณาได้จากค่าเวลารวมที่ต้องใช้สำหรับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้แก่

- เวลาลิ้นไฮดรอลิกที่ใช้ในการเปิดประตูน้ำ 23 วินาที
- เวลาที่น้ำใช้ในการไหลมาถึงกังหันน้ำ 2.2347 วินาที
- เวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้ในการเร่งความเร็วรอบจนถึงความเร็วพิกัด 1.14 วินาที

ซึ่งรายละเอียดการคำนวณได้แสดงไว้ในหัวข้อ 7.3 ซึ่งจะสามารถประมาณค่าเวลาตอบสนองของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาได้เท่ากับ 30 วินาที และสามารถคำนวณ  $Tau\_LFC$  ได้เท่ากับ 300 วินาที ตามลำดับ

เมื่อมีการออกแบบให้มีการใช้งานการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับการควบคุมความถี่โหลต นั้นจำเป็นต้องมีการกำหนดจุดทำงานในแต่ละระบบให้มีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ เมื่อกำหนดค่า  $Tau\_LFC$  ไว้ที่ 300 วินาที นั้นหมายถึง ความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และโหลตที่ช้ากว่า 300 วินาที จะถูกควบคุมด้วยการควบคุมความถี่โหลตโดยโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ส่วนความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหลตที่เร็วกว่า 300 วินาที จะถูกควบคุมด้วยการควบคุมความถี่โหลตโดยระบบแบตเตอรี่ สำหรับความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่สูงนั้นจะสามารถควบคุมได้ก่อนที่กำลังผลิตไฟฟ้านั้นจะถูกจ่ายเข้าสู่ระบบด้วยการปรับเรียบกำลังไฟฟ้า ดังนั้นการกำหนดค่าคงตัวเวลาสำหรับการปรับเรียบกำลังไฟฟ้า ในที่นี้คือ  $Tau\_SM$  จึงไม่ควรมีความมากกว่าค่า  $Tau\_LFC$  ที่เลือกใช้ เพราะจะทำให้ระบบแบตเตอรี่เข้าไปทำงานในส่วนที่เป็นความรับผิดชอบของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการใช้งานระบบแบตเตอรี่ที่มากเกินไปจนความจำเป็น



รูปที่ 6.5 ภาพรวมจุดทำงานของระบบควบคุมการปรับเรียบกำลังไฟฟ้า ร่วมกับการควบคุมความถี่โหลตด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก

นอกจากการกำหนดค่าคงตัวเวลาของวงจรองความถี่ในการแบ่งย่านความถี่สัญญาณความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนป้อนเข้าให้มีความเหมาะสมแล้ว นั้นยังคงมีอีกหนึ่งประเด็นสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบแบริเตอริ์ คือ การเลือกใช้ตัวควบคุมในการปรับแต่งสัญญาณควบคุมความถี่โหลดให้กับระบบแบริเตอริ์ กล่าวคือ การใช้วงจรองความถี่ในการแบ่งย่านความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าเบี่ยงเบนป้อนเข้านั้น มีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณที่กรองได้จะยังคงมีองค์ประกอบในย่านความถี่ที่ไม่ต้องการหลงเหลืออยู่

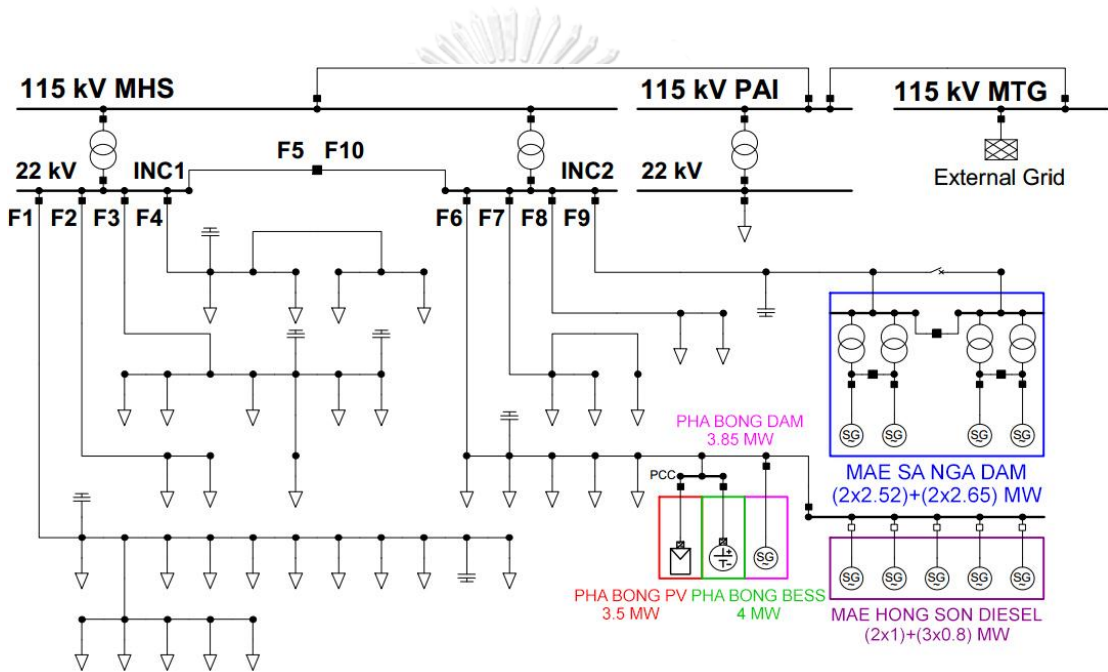
สำหรับสัญญาณความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนในย่านความถี่สูงที่จะใช้เป็นสัญญาณควบคุมความถี่โหลดให้กับระบบแบริเตอริ์ นั้นอาจมีส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำในปริมาณเล็กน้อยหลงเหลืออยู่ด้วย ดังนั้น หากเลือกใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลแบบขนานในการปรับแต่งสัญญาณควบคุมความถี่โหลดให้กับระบบแบริเตอริ์ จะส่งผลให้ระบบแบริเตอริ์ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนในย่านความถี่ต่ำเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราขยายแบบอินทิกรัลที่กำหนด ซึ่งหมายถึงระบบแบริเตอริ์จะเข้าไปทำงานในส่วนที่เป็นความรบัผิดชอบของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก เนื่องจากระบบแบริเตอริ์มีค่าเวลาการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าโรงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการใช้งานระบบแบริเตอริ์ที่มากเกินไปจนจำเป็นอีกเช่นกัน ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอให้ใช้การปรับแต่งสัญญาณควบคุมความถี่โหลดให้กับระบบแบริเตอริ์ด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนเพียงเดียว เพื่อให้ระบบแบริเตอริ์ตอบสนองต่อความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนในย่านความถี่ต่ำให้น้อยที่สุด ถึงแม้จะมีการใช้งานวงจรองความถี่ในการแบ่งย่านความถี่การทำงานระหว่างระบบแบริเตอริ์และโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแล้วก็ตาม

## บทที่ 7

### แบบจำลองขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

#### 7.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

วิทยานิพนธ์นี้ได้รวบรวมข้อมูลระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน เพื่อจัดทำเป็นระบบไฟฟ้าจำลองแยกตามสายป้อนที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ด้วยโปรแกรม DIGSILENT ดังแสดงในรูปที่ 7.1 โดยไม่พิจารณาการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอน เนื่องจากในสภาวะปกติ จะไม่มีการใช้งานโรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอน

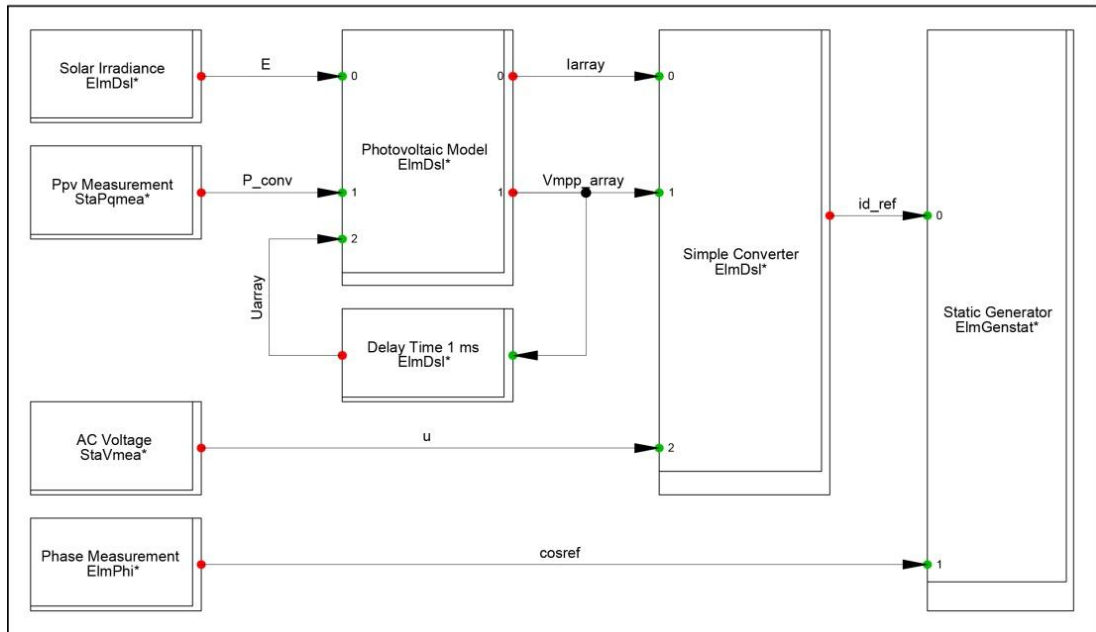


รูปที่ 7.1 ระบบไฟฟ้าจำลองของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

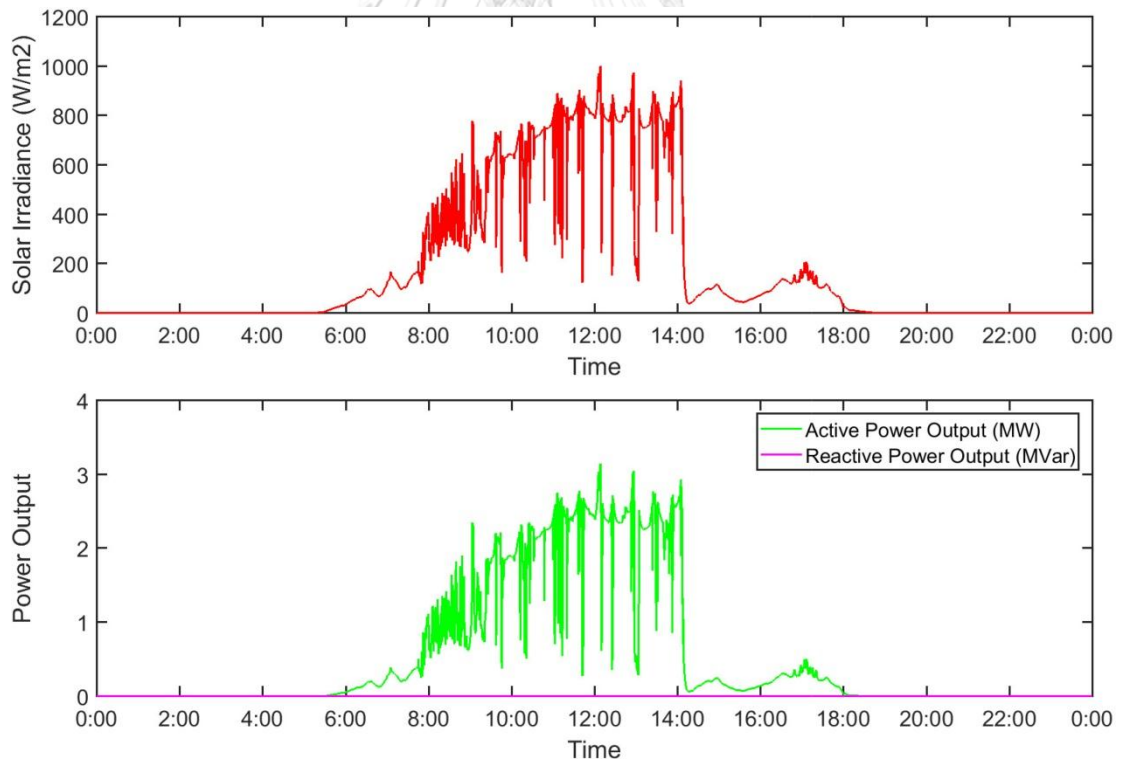
#### 7.2 แบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง

รูปที่ 7.2 และ 7.3 แสดงแบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ใช้ในการศึกษาระบบ และผลจำลองการผลิตกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องด้วยการป้อนค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ราย 10 วินาที อ้างอิงความเข้มรังสีอาทิตย์ ในวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2559 ตามลำดับ

Frame\_PV\_System:



รูปที่ 7.2 แบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง



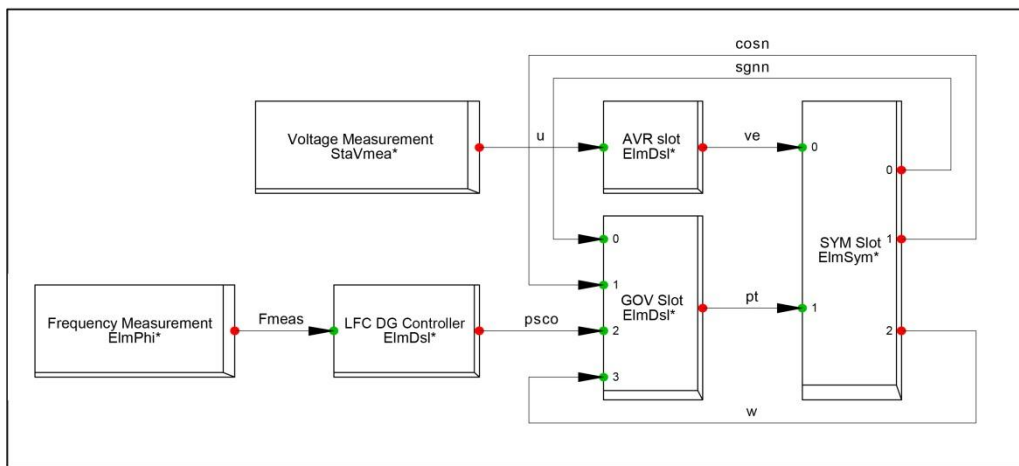
รูปที่ 7.3 ผลจำลองการผลิตกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง

ด้วยการป้อนค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ราย 10 วินาที

### 7.3 แบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาและผาบ่อง

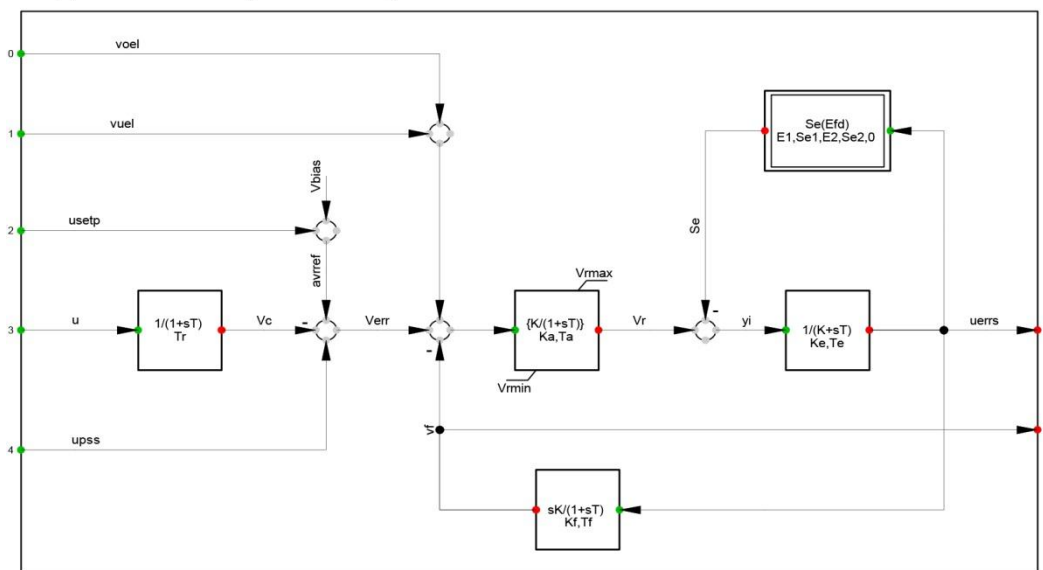
รูปที่ 7.4 แสดงแบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาและผาบ่องที่ใช้ในการศึกษาระบบ โดยใช้แบบจำลองระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic voltage regulator, AVR) ตามมาตรฐาน 1968 IEEE Type 1 Excitation System (IEEET1) ชุดควบคุมกังหันโรงไฟฟ้า (Governor, GOV) ตามมาตรฐาน 1981 IEEE type 3 turbine-governor model (IEEEG3) และแบบจำลองระบบควบคุมการควบคุมความถี่โหลดของโรงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 7.5, 7.6 และ 7.7 ตามลำดับ

SYM Frame :



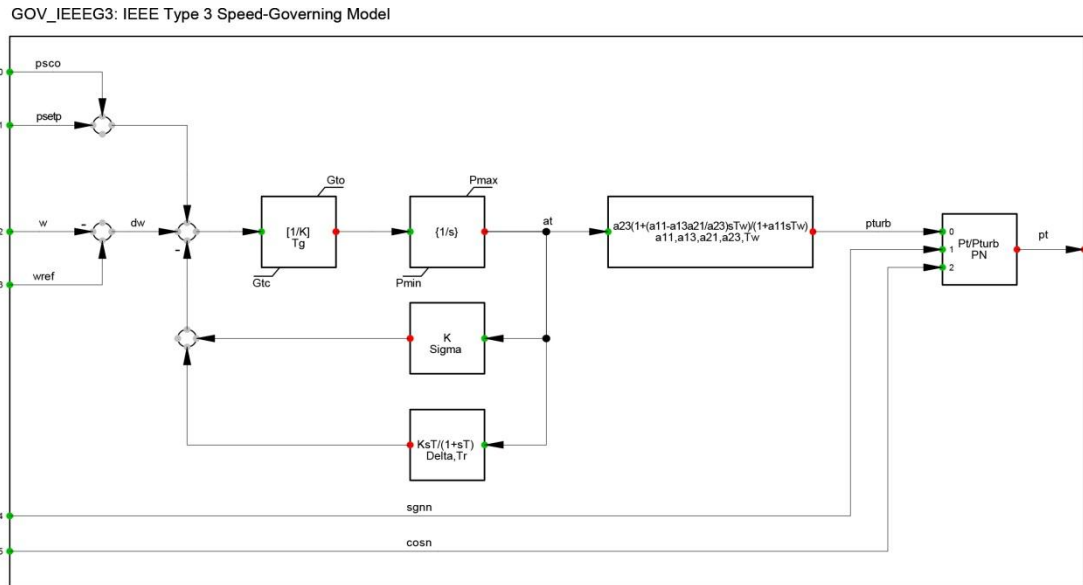
รูปที่ 7.4 แบบจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาและผาบ่อง

AVR\_IEEET1: 1968 IEEE Type 1 Excitation System



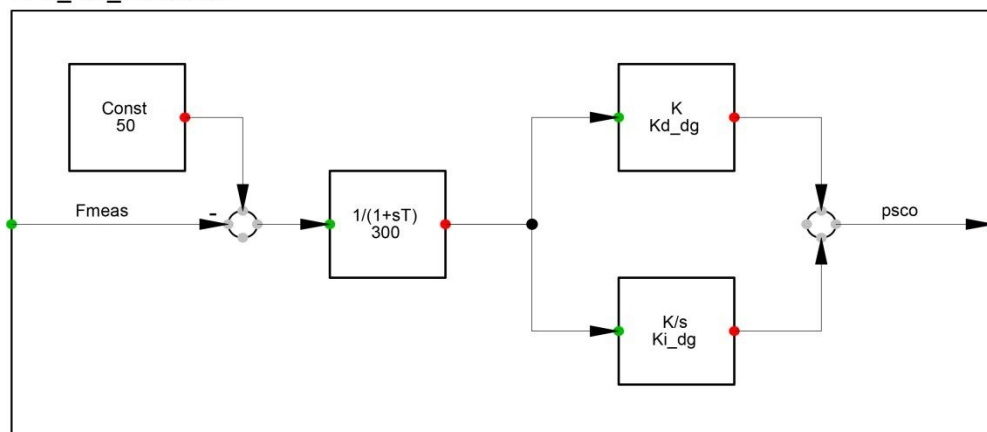
รูปที่ 7.5 แบบจำลองระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ





รูปที่ 7.6 แบบจำลองชุดควบคุมกังหันโรงไฟฟ้า

LFC\_DG\_Controller:



รูปที่ 7.7 แบบจำลองระบบควบคุมการควบคุมความถี่ไหลของโรงไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้ได้รวบรวมค่าที่ได้จากการทดสอบโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา [14] เพื่อใช้อ้างอิงในการจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา เพื่อให้ผลการจำลองระบบสะท้อนสภาพที่แท้จริงของระบบให้มากที่สุด และสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผาบ่อง เนื่องจากการขยายขนาดเป็น 3.85 เมกะวัตต์ นั้นเป็นแผนการในอนาคต ปัจจุบันจึงยังไม่มีค่าจากการทดสอบโรงไฟฟ้า จึงใช้ค่าจากการทดสอบโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงาอ้างอิงการจำลองระบบควบคุมของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผาบ่องเนื่องจากมีขนาดพิกัดใกล้เคียงกัน ค่าตัวแปรของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงาและผาบ่องที่ใช้ในการจำลองระบบดังแสดงในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ค่าตัวแปรของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงาและผาบ่อง

รายการ	ตัวแปรใน DigSILENT	เขื่อนแม่สะงา		เขื่อนผาบ่อง
		จุดที่ 1,2	จุดที่ 3,4	
<b>ค่าที่ได้จากการทดสอบโรงไฟฟ้า [14]</b>				
Rated apparent power of generator (MVA)	sgn	3.375	3.3125	4.53
Power factor	cosn	0.85 Lag	0.80 Lag	0.85 Lag
Rated voltage (kV)	ugn	3.3		
Rated active power of turbine (MW)	PN	2.55	2.65	0
Governor hydraulic theoretical opening time (s)	1/Gto	23	ใช้ค่าตามเขื่อนแม่สะงา	
Governor hydraulic theoretical closing time (s)	-1/Gtc	5	จุดที่ 1,2	
Reactance in p.u. (referred to rated generator kVA Base)				
- Direct axis Xd (p.u.)	xd		1.25	
- Quadrature axis Xq (p.u.)	xq		1.156	
Transient reactance				
- Direct axis Unsaturated X'd (p.u.)	xds		0.37	
- Quadrature axis reactance X'q (p.u.)	xqs		1.16	
Sub-transient reactance				
- Direct axis X''d (p.u.)	xdss	ใช้ค่าตาม เขื่อนแม่สะงา จุดที่ 3,4	0.25	ใช้ค่าตาม เขื่อนแม่สะงา จุดที่ 3,4
- Quadrature axis X''q (p.u.)	xqss		0.42	
Negative sequence reactance X2 (p.u.)	x2sy		0.34	
Zero sequence reactance X0 (p.u.)	x0sy		0.19	
Armature leakage reactance Xl (p.u.)	xl		0.18	
Generator time constants				
- Direct axis transient short circuit T'd (s)	tds		0.42	
- Direct axis transient short circuit time constant Td'' (s)	tdss		0.04	
Inertia constant of the generator based on the generator KVA (s)	h		0.57	
<b>ค่าที่เลือกใช้ในการจำลองระบบ</b>				
Controller gain	Tg		8	
Permanent droop (p.u.)	Sigma		0.05	
Temporary droop (p.u.)	Delta		1.4	
Governor time constant (s)	Tr		15	
<b>ค่าที่ได้จากการคำนวณ</b>				
Water starting time (s)	Tw		2.2347	0.9133
Mechanical damping (p.u.)	dpu	0.114	ใช้ค่าตามเขื่อนแม่สะงา จุดที่ 1,2	

หมายเหตุ การกำหนดตัวแปร PN เท่ากับ 0 นั้นหมายถึง การกำหนดให้ Rated active power of turbine มีค่าเท่ากับ Rated active power of generator

Mechanical damping ในค่าต่อหน่วย มีค่าประมาณ 10% ของเวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้ในการเร่งความเร็วรอบจนถึงความเร็วพิกัด,  $T_M$  ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาที และเวลาที่น้ำใช้ในการไหลมาถึงกังหันน้ำ,  $T_W$  ในหน่วยวินาที สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7.1) และ (7.2) ตามลำดับ

$$T_M = 2 \cdot H \quad (7.1)$$

$$T_W = \frac{L \cdot Q}{g \cdot A \cdot H_W} \quad (7.2)$$

โดยที่

- $H$  คือ ค่าคงตัวความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (วินาที)
- $L$  คือ ความยาวของท่อส่งน้ำ (เมตร)
- $Q$  คือ อัตราการไหลของน้ำที่กังหันน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
- $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (มีค่าประมาณ 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)
- $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งฉากของท่อส่งน้ำ (ตารางเมตร)
- $H_W$  คือ ความสูงของหัวน้ำ (เมตร)

สำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา มีรายละเอียด ดังนี้

- ความยาวของท่อส่งน้ำ 1,346.5 เมตร
- อัตราการไหลของน้ำที่กังหันน้ำ 3.11 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
- พื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งฉากของท่อส่งน้ำ 0.95 ตารางเมตร
- ความสูงของหัวน้ำ 201 เมตร

จากสมการ (7.1) และ (7.2) จะสามารถคำนวณค่า  $T_M$  ได้เท่ากับ 1.14 วินาที และ  $T_W$  เท่ากับ 2.2347 วินาที ตามลำดับ

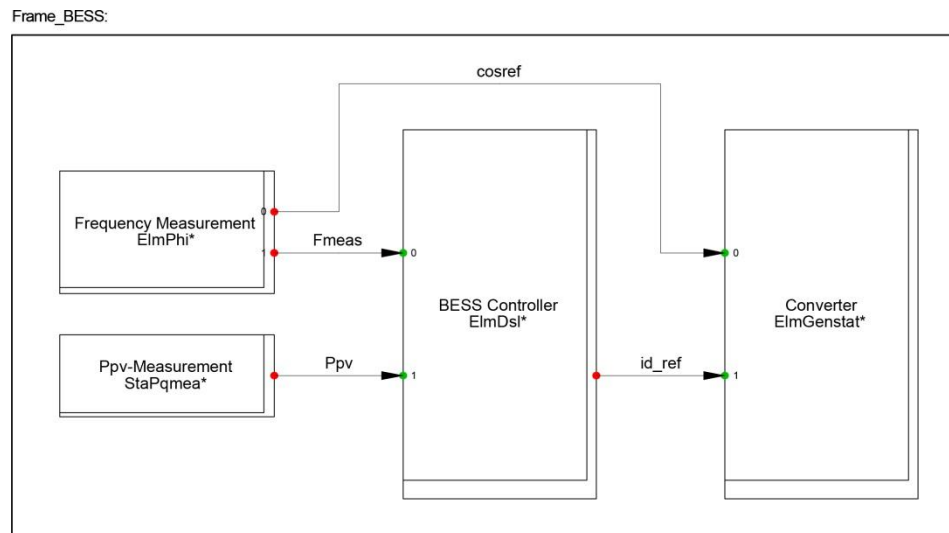
และสำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่อง มีรายละเอียด ดังนี้

- ความยาวของท่อส่งน้ำ 76 เมตร
- อัตราการไหลของน้ำที่กังหันน้ำ 3.8 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
- พื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งฉากของท่อส่งน้ำ 1.131 ตารางเมตร
- ความสูงของหัวน้ำ 28.5 เมตร

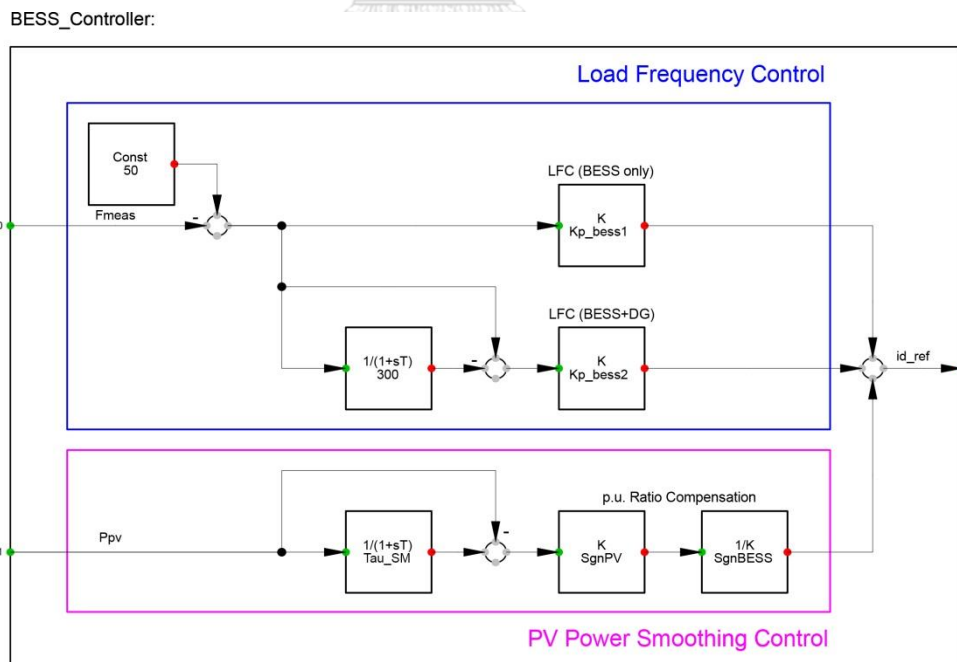
จากสมการ (7.1) และ (7.2) จะสามารถคำนวณค่า  $T_M$  ได้เท่ากับ 1.14 วินาที และ  $T_W$  เท่ากับ 0.9133 วินาที ตามลำดับ

#### 7.4 แบบจำลองระบบควบคุมของระบบแบตเตอรี่

รูปที่ 7.8 และ 7.9 แสดงแบบจำลองระบบควบคุมของระบบแบตเตอรี่ที่ใช้ในการศึกษาระบบ และแบบจำลองระบบควบคุมการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบควบคุมการควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่ ตามลำดับ



รูปที่ 7.8 แบบจำลองระบบควบคุมของระบบแบตเตอรี่



รูปที่ 7.9 แบบจำลองระบบควบคุมการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบควบคุมการควบคุมความถี่ไหลด้วยระบบแบตเตอรี่

## บทที่ 8

### ผลการจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

วิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดแนวทางในการศึกษาผลกระทบจากความผันผวนของโหลดและกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ ที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าผ่านแบบจำลองระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน โดยอ้างอิงข้อมูลตรวจวัดที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่เป็นช่วงเวลาต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง ทั้งในกรณีเชื่อมต่อกับกริด และกรณีทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด โดยกำหนดกรณีศึกษาทั้งหมด 13 กรณีศึกษา รูปแบบการทำงานของอุปกรณ์ในแต่ละกรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 รูปแบบการทำงานของอุปกรณ์ในแต่ละกรณีศึกษา

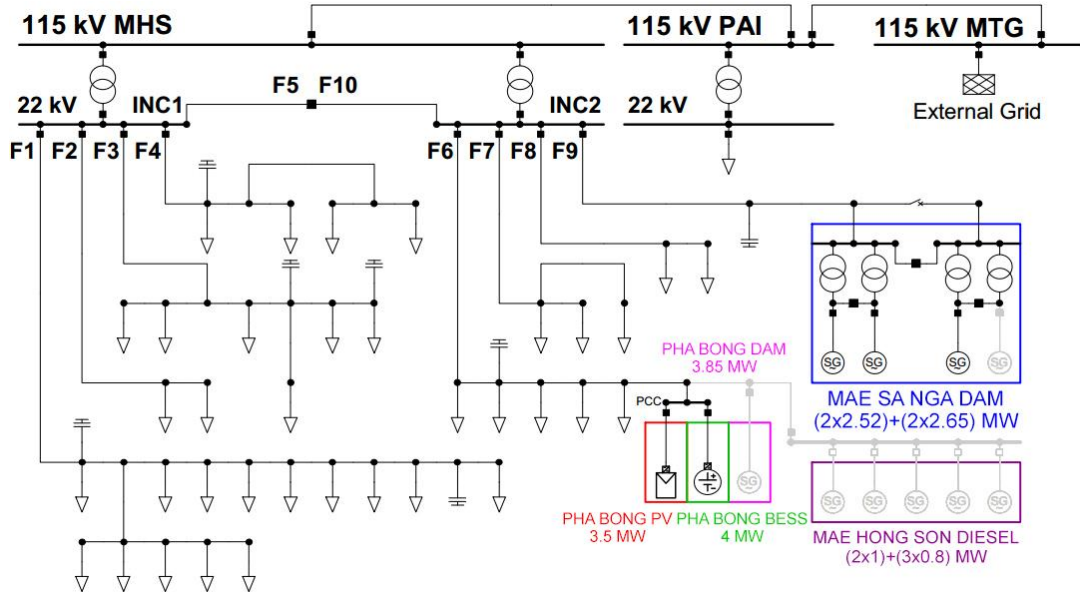
กรณีศึกษาที่	เชื่อมต่อระบบ 115 กิโลโวลต์	รองรับโหลด	โรงไฟฟ้าแสงอาทิตย์ผาบ่อง		โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก			ระบบแบตเตอรี่	
			ควบคุมแรงดันไฟฟ้า	MPPT	ควบคุมแรงดันไฟฟ้า	ควบคุมความเร็วรูป	ควบคุมความถี่โหลด	การปรับเรียบกำลังไฟฟ้า	ควบคุมความถี่โหลด
1	○	F1 - F8	×	○	MSN	MSN	×	×	×
2	○	F1 - F8	×	○	MSN	MSN	×	○	×
3	×	F1 - F8	×	○	MSN	MSN	×	×	×
4	×	F1 - F8	×	○	MSN	MSN	×	○	×
5	×	F1 - F8	×	○	MSN	MSN	×	○	○
6	×	F1 - F8	×	○	MSN	MSN	MSN	○	○
7	×	F6 - F8	×	○	MSN	MSN	×	×	×
8	×	F6 - F8	×	○	MSN	MSN	×	○	×
9	×	F6 - F8	×	○	MSN	MSN	×	○	○
10	×	F6 - F8	×	○	MSN	MSN	MSN	○	○
11	×	F6	×	×	PB	PB	×	×	×
12	×	F6	×	×	PB	PB	×	×	○
13	×	F6	×	×	PB	PB	PB	×	○

หมายเหตุ MPPT ย่อมาจาก Maximum power point tracking

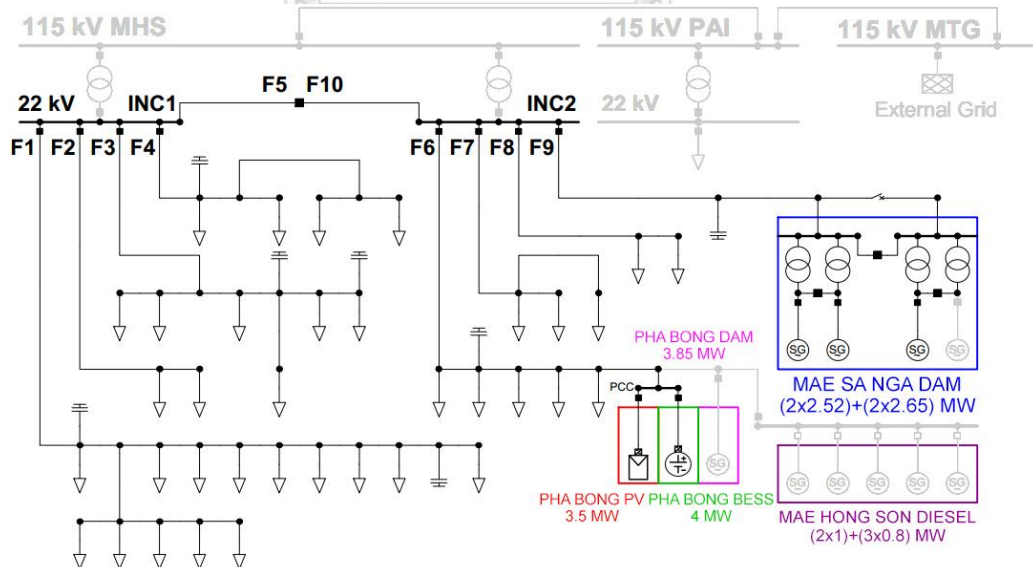
MSN หมายถึง โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา

PB หมายถึง โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่อง

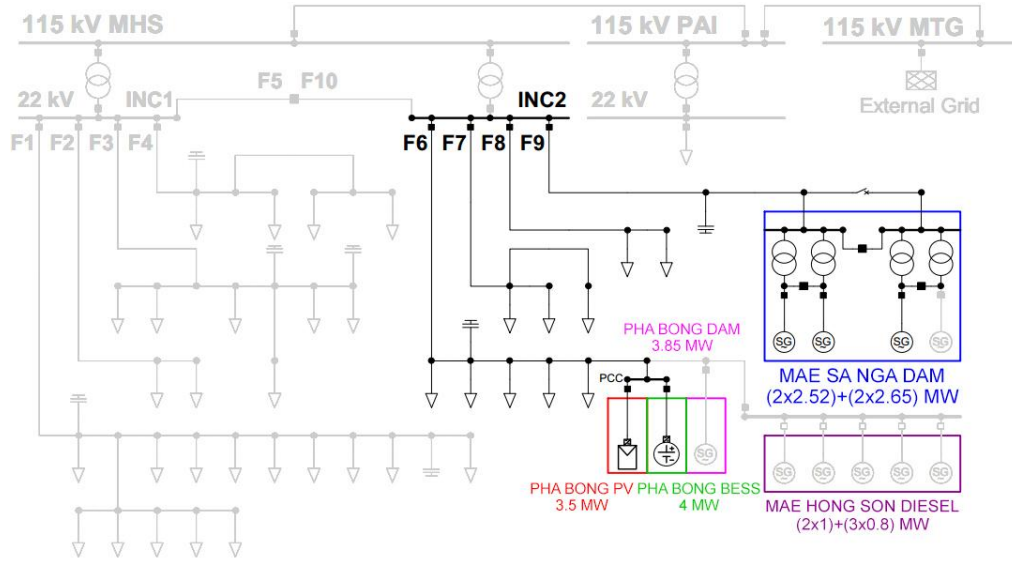
รูปที่ 8.1 แสดงแบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 รูปที่ 8.2 แสดงแบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 ถึง 6 รูปที่ 8.3 แสดงแบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 7 ถึง 10 รูปที่ 8.4 แสดงแบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 11 ถึง 13 และค่าตัวแปรของระบบควบคุมที่ใช้ในการศึกษาระบบ ดังแสดงในตารางที่ 8.2 ตามลำดับ



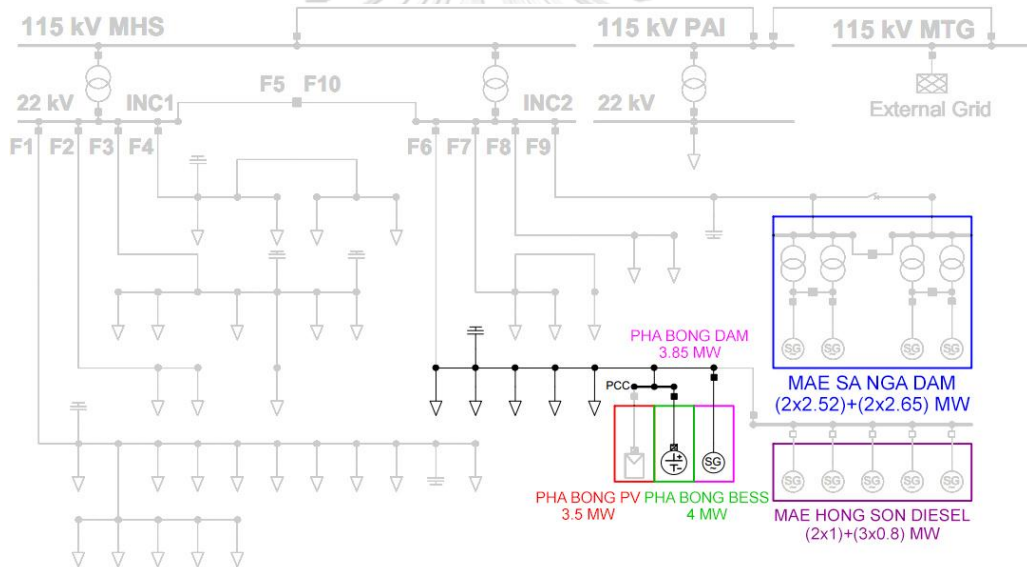
รูปที่ 8.1 แบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และ 2



รูปที่ 8.2 แบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 ถึง 6



รูปที่ 8.3 แบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 7 ถึง 10



รูปที่ 8.4 แบบจำลองระบบสำหรับกรณีศึกษาที่ 11 ถึง 13

ตารางที่ 8.2 ค่าตัวแปรของระบบควบคุมที่ใช้ในการศึกษาระบบ

กรณีศึกษาที่	การปรับเรียงกำลังไฟฟ้า	การควบคุมความถี่โหลด				
	Tau_SM	Tau_LFC	Kd_bess1	Kd_bess2	Kd_dg	Ki_dg
1	-	-	-	-	-	-
2	145	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	1,450	-	-	-	-	-
5	145	-	0.8	0	-	-
6	145	300	0	4	6	0.02
7	-	-	-	-	-	-
8	1,450	-	-	-	-	-
9	145	-	0.52	0	-	-
10	145	300	0	4	6	0.02
11	-	-	-	-	-	-
12	145	-	0.1	0	-	-
13	145	300	0	4	6	0.02

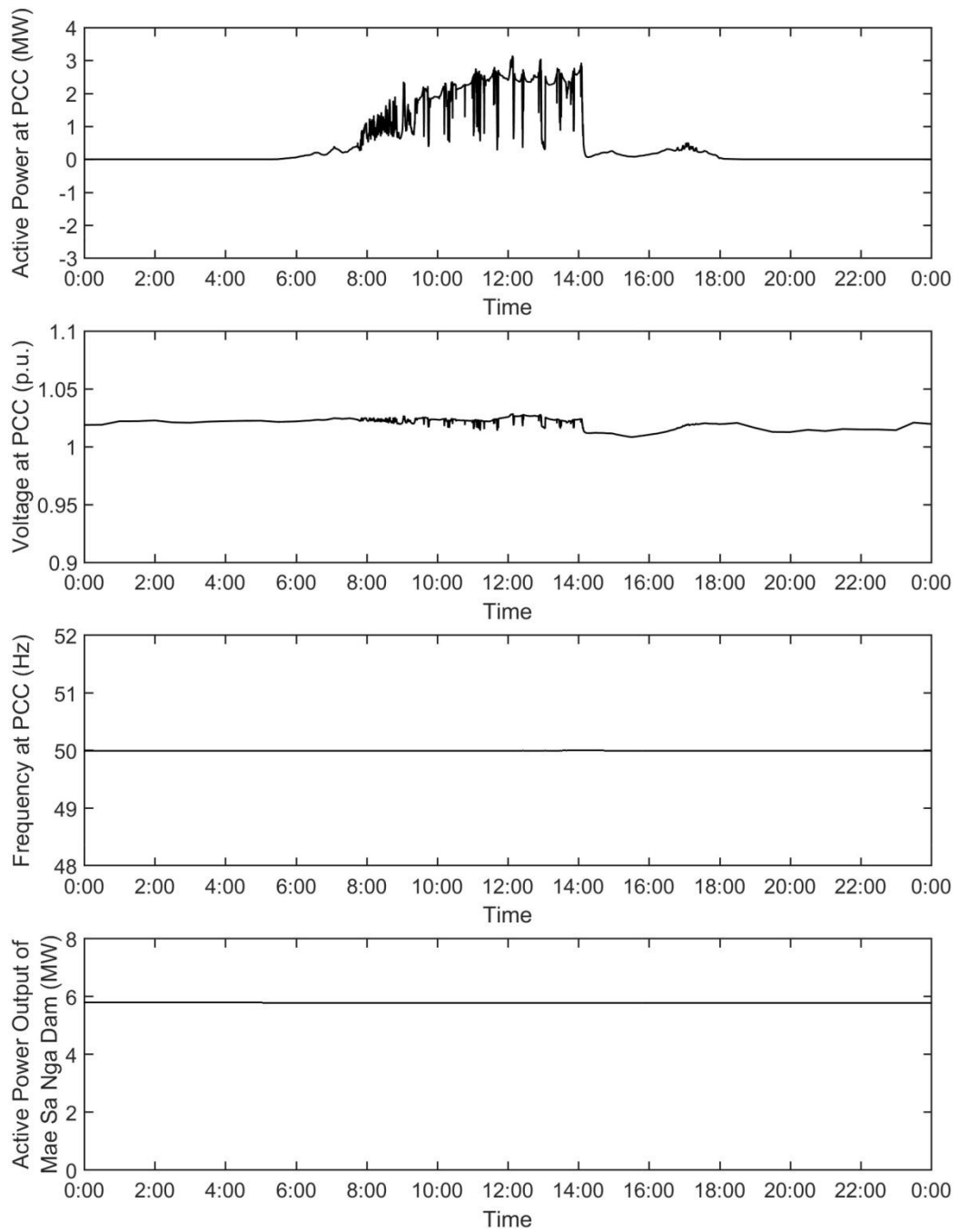
## 8.1 ผลการจำลองระบบ

### 8.1.1 ผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าในสถานะเชื่อมต่อกับกริด (กรณีศึกษาที่ 1)

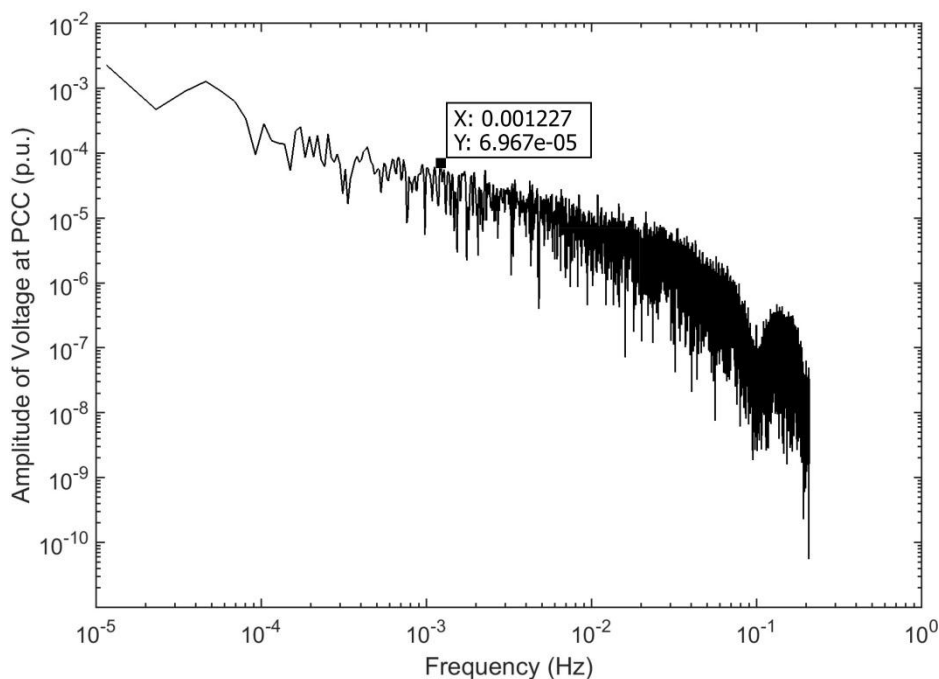
รูปที่ 8.5 แสดงผลการจำลองระบบเมื่อมีการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ เข้าสู่ระบบในสถานะเชื่อมต่อกับกริด พบว่าค่าแรงดันและความถี่ไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (Point of common coupling, PCC) มีองค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้น และมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ 0.002 เฮิรตซ์

รูปที่ 8.6 แสดงสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม พบว่าตั้งแต่ช่วงความถี่  $1.1 \times 10^{-3}$  เฮิรตซ์ เป็นต้นไป ค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันมีค่าสูงสุดที่  $6.967 \times 10^{-5}$  ต่อหน่วย ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าขนาดแรงดันกระเพื่อมต่ำสุดตามข้อกำหนดของ กฟภ. จึงสรุปได้ว่าความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องที่ขนาด 3.5 เมกะวัตต์ นั้นไม่ส่งผลให้เกิดปัญหาแรงดันกระเพื่อม





รูปที่ 8.5 ผลการจำลองระบบในสถานะเชื่อมต่อกับกริด



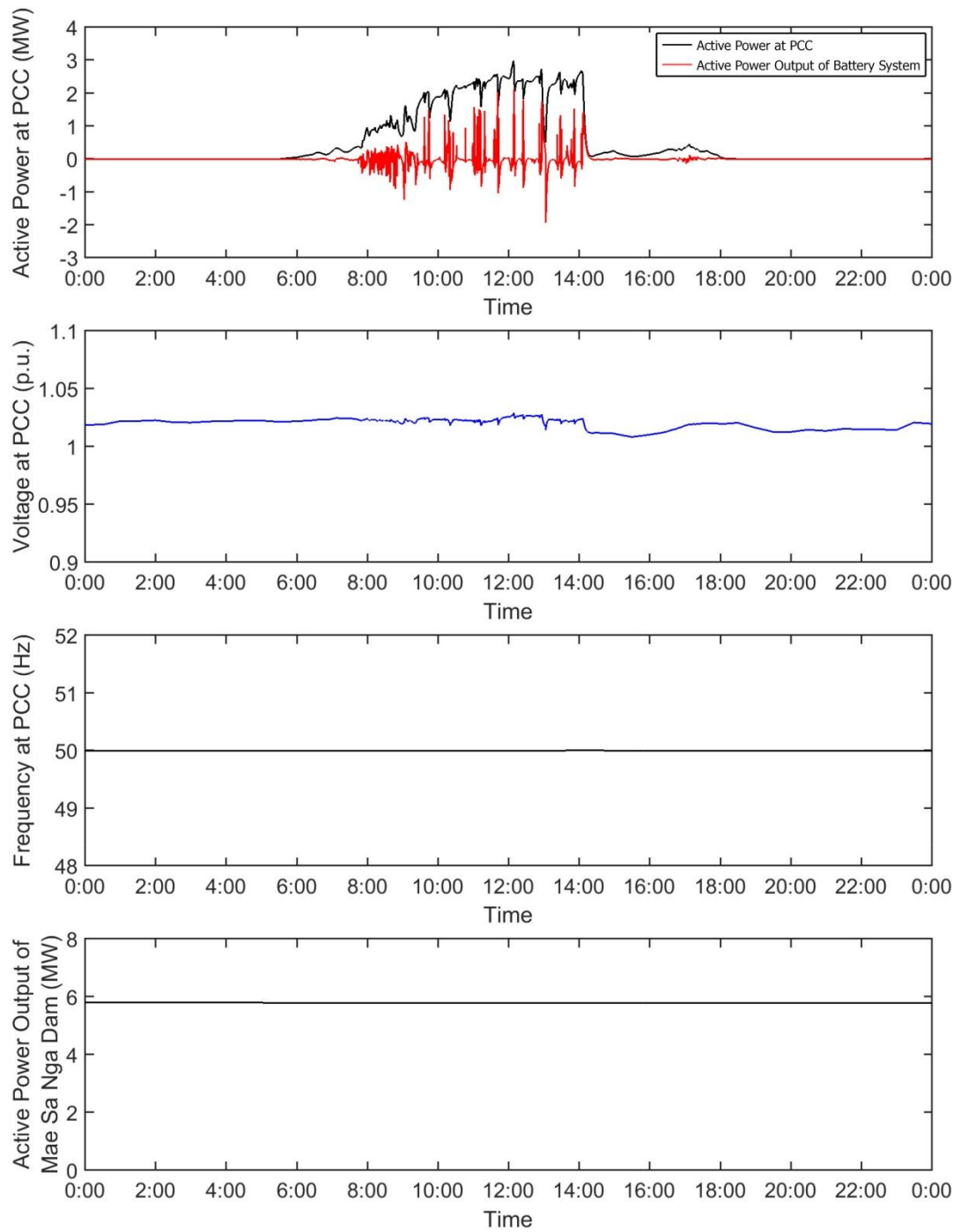
รูปที่ 8.6 สเปกตรัมของค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในกรณีศึกษาที่ 1

### 8.1.2 การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบแบตเตอรี่ในสถานะเชื่อมต่อกับกริด (กรณีศึกษาที่ 2)

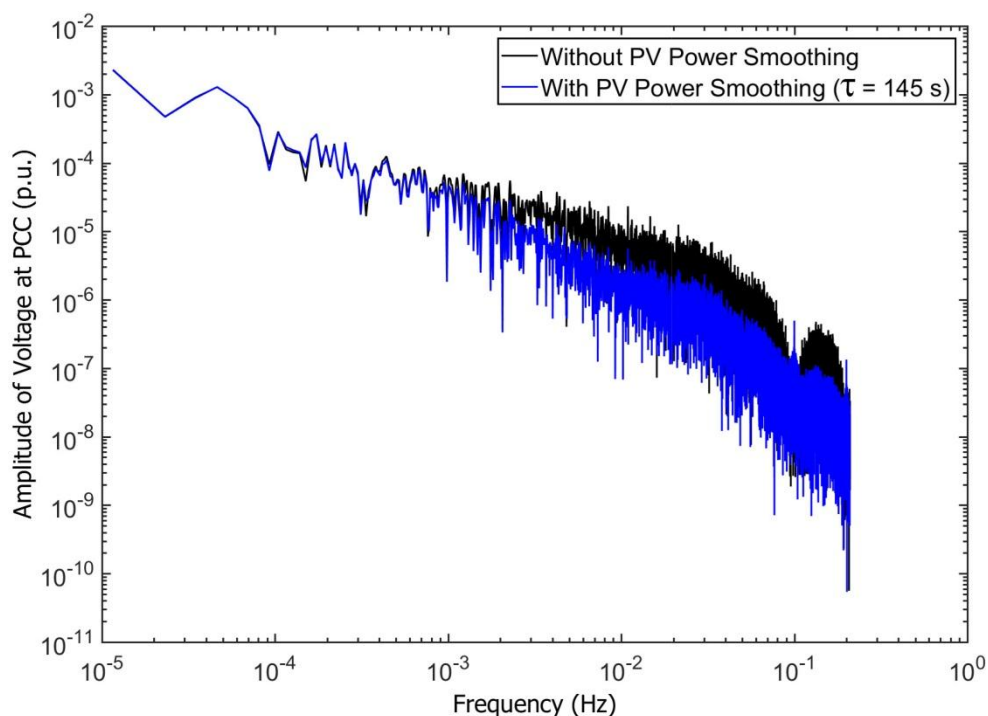
จากการที่กำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ้องมีความผันผวนสูง ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อกริดควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบ วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวทางการลดผลกระทบดังกล่าวด้วยการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบแบตเตอรี่

รูปที่ 8.7 แสดงผลการจำลองระบบกรณีใช้การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 145 วินาที

รูปที่ 8.8 แสดงสเปกตรัมของค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมเมื่อเทียบกับกรณีไม่ใช้การปรับเรียบกำลังไฟฟ้า (กรณีศึกษาที่ 1) ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่า การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 145 วินาที นั้นเพียงพอที่จะสามารถลดความผันผวนความถี่สูงของกำลังไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม ส่งผลให้ความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าลดลง และช่วยลดองค์ประกอบความถี่สูงของแรงดันไฟฟ้าในย่านความถี่แรงดันกระแสเพื่อตั้งแต่  $1.1 \times 10^{-3}$  เฮิรตซ์ เป็นต้นไปได้



รูปที่ 8.7 ผลการจำลองระบบในสภาวะเชื่อมต่อกับกริด  
กรณีใช้การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 145 วินาที

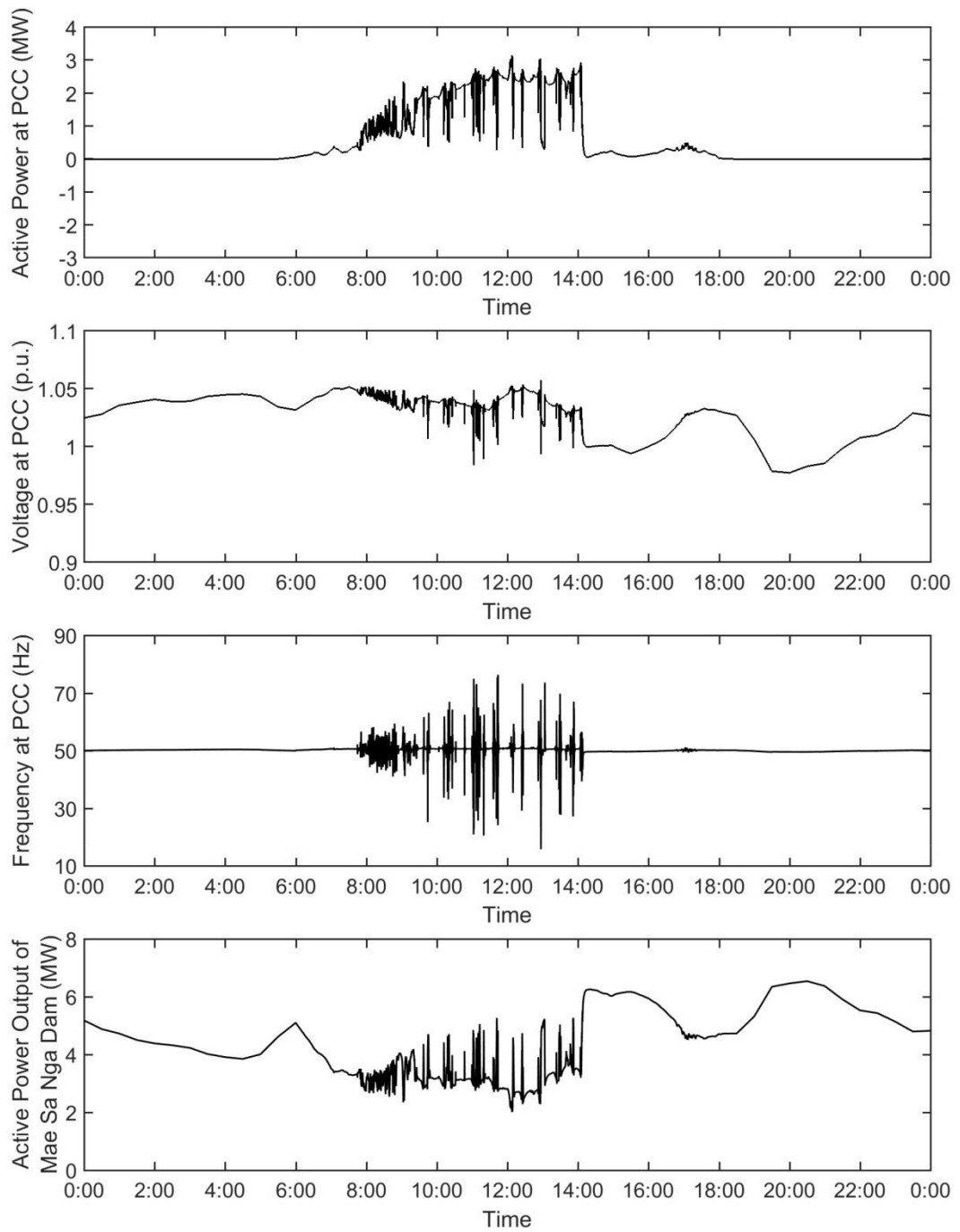


รูปที่ 8.8 การเปรียบเทียบสเปกตรัมของค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างกรณีศึกษาที่ 1 และ 2

### 8.1.3 ผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหลดที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F1 ถึง F8 (กรณีศึกษาที่ 3)

เมื่อต้องการให้ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดในกรณีสายส่ง 115 กิโลโวลต์ เกิดขัดข้องจะต้องมีการออกแบบให้โรงไฟฟ้าในพื้นที่ ซึ่งได้แก่ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันและความถี่ไฟฟ้าของระบบให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่อย่างไรก็ดี ในสภาวะนี้ความผันผวนของโหลดและกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ย่อมส่งผลกระทบต่อ การควบคุมแรงดันและความถี่ไฟฟ้าอย่างมาก เนื่องจากข้อจำกัดของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาที่มีความเฉื่อยต่ำ และมีเวลาในการตอบสนองช้ากว่าความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหลด

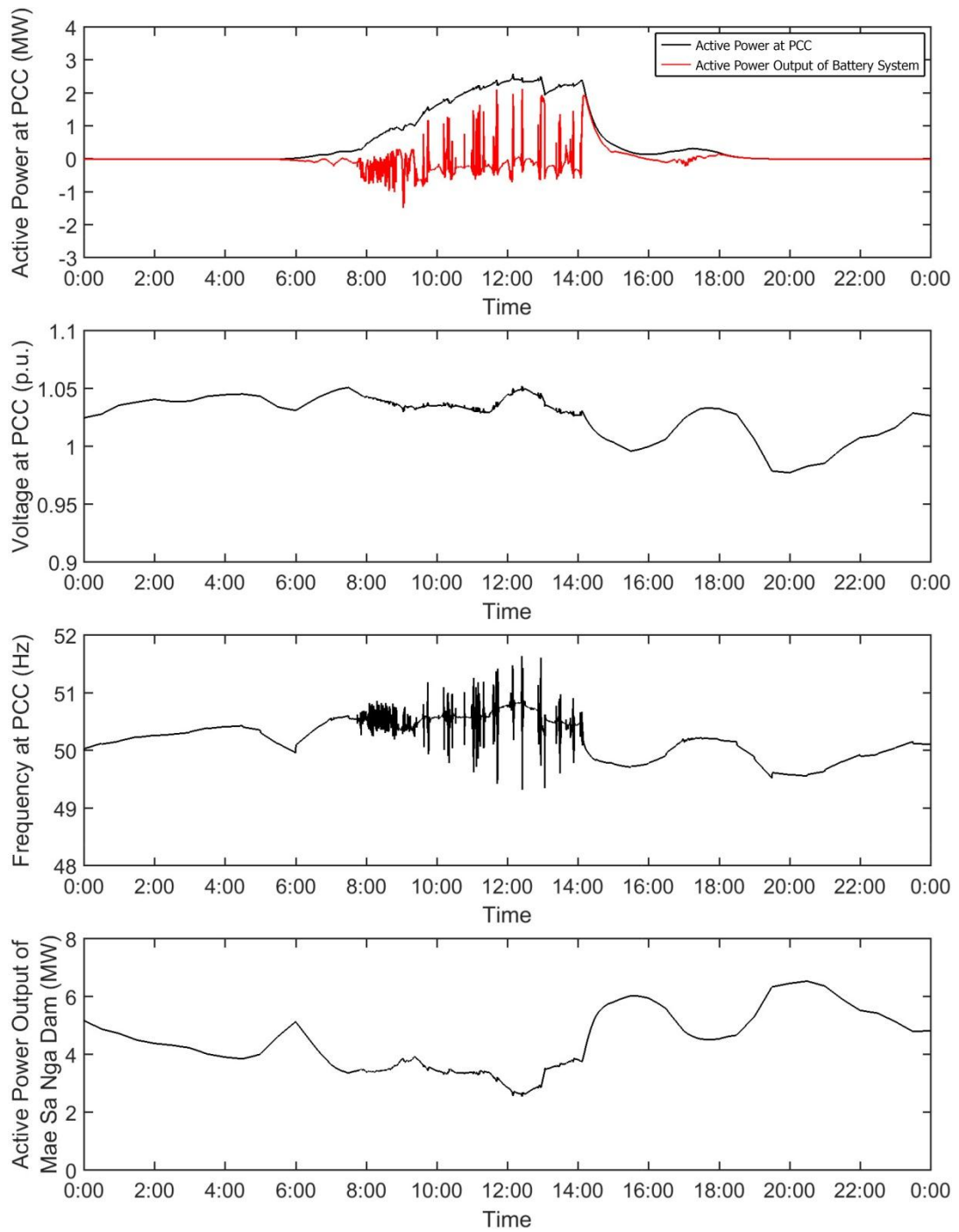
รูปที่ 8.9 แสดงผลการจำลองระบบไมโครกริดแบบแยกโดด พบว่าระบบไม่สามารถตอบสนองต่อความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหลดได้ทัน ทำให้ไม่สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ -34.157 เฮิรตซ์



รูปที่ 8.9 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F1 ถึง F8

#### 8.1.4 การปรับเรียกกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไมโครกริดที่รองรับ โหลด F1 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่ (กรณีศึกษาที่ 4)

จากผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 3 เพื่อช่วยให้ระบบไมโครกริดแบบแยกโดดสามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ ทำให้จำเป็นต้องใช้การปรับเรียกกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยค่าคงตัวเวลาที่มากขึ้น เนื่องจากการปรับเรียกกำลังไฟฟ้าเป็นการชดเชยกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบเพื่อลดความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ถึงแม้จะมีเป้าหมายหลักในการลดผลกระทบของแรงดันกระเพื่อม แต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้ความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบลดลงได้ด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีในบางช่วงเวลาที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาไม่สามารถตอบสนองต่อความผันผวนของโหลดได้ทัน ทำให้ไม่สามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ 1.638 เฮิร์ตซ์ ผลการจำลองระบบไมโครกริดแบบแยกโดดกรณีใช้การปรับเรียกกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลาสูงสุด 1,450 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 8.10



รูปที่ 8.10 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F1 ถึง F8  
กรณีใช้การปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 1,450 วินาที

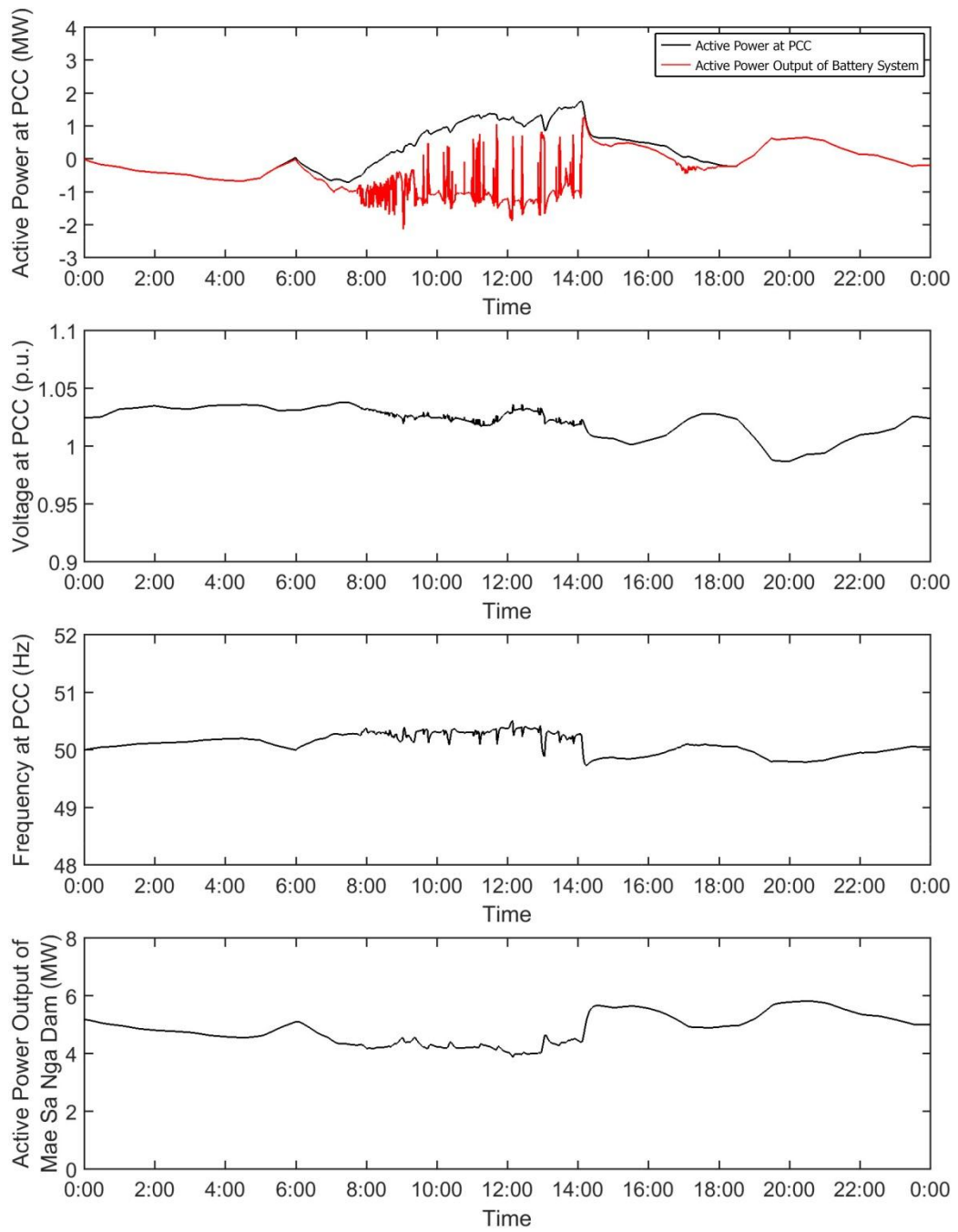
### 8.1.5 การปรับเรียงกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โพลดในระบบไมโครกริดที่รองรับโพลด F1 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว (กรณีศึกษาที่ 5)

จากผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 4 เพื่อลดผลกระทบจากความผันผวนของโพลดที่มีต่อการควบคุมความถี่ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดแบบแยกโหนด วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวทางการใช้การปรับเรียงกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โพลด ซึ่งจะช่วยให้ค่าคงตัวเวลาที่จำเป็นต้องใช้ในการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าลดลงเหลือ 145 วินาที ตามเดิม และสำหรับในกรณีศึกษานี้จะเป็นการจำลองการควบคุมความถี่โพลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว

ผลการจำลองระบบในรูปที่ 8.11 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมคุณภาพไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ 0.498 เฮิรตซ์







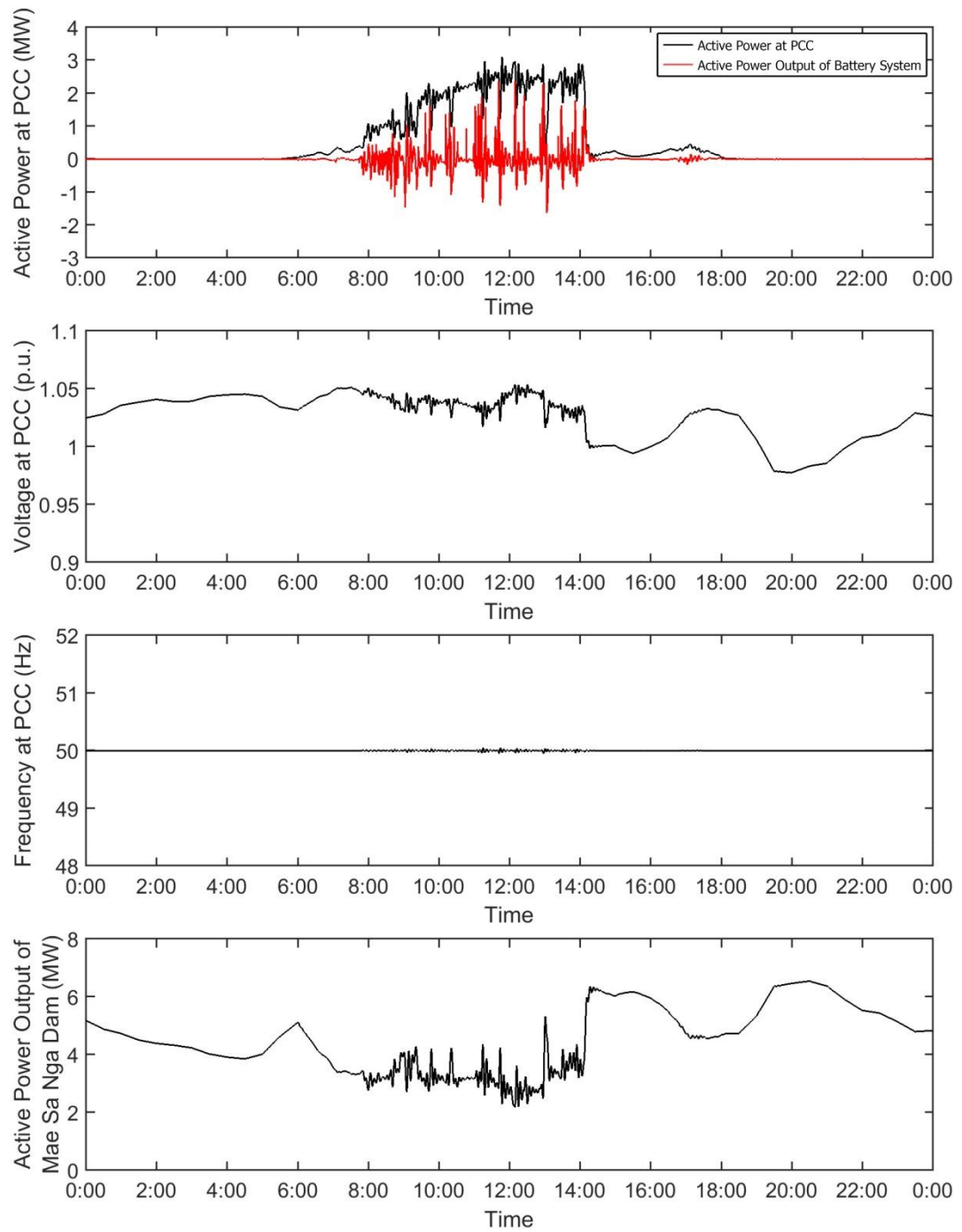
รูปที่ 8.11 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F1 ถึง F8  
กรณีใช้การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว

### 8.1.6 การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โพลต์ในระบบไมโครกริตที่รองรับโพลต์ F1 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา (กรณีศึกษาที่ 6)

จากผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 5 เพื่อให้ขนาดของระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดเล็ก วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการใช้งานการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โพลต์ด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา

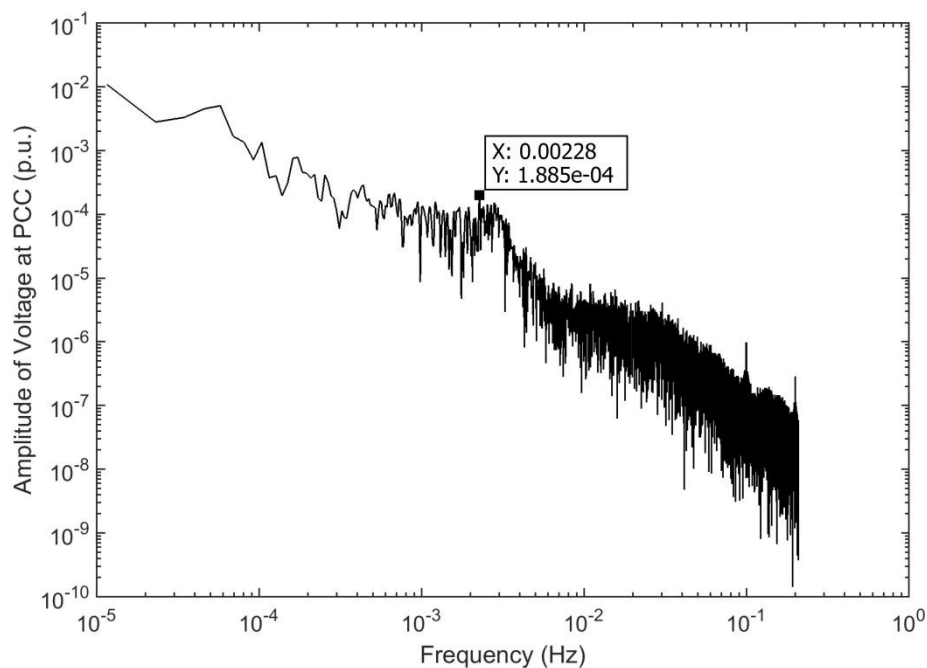
ผลการจำลองระบบในรูปที่ 8.12 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 5 ที่ใช้การควบคุมความถี่โพลต์ด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ 0.051 เฮิร์ตซ์ รูปที่ 8.13 แสดงสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม พบว่าตั้งแต่ช่วงความถี่  $1.1 \times 10^{-3}$  เฮิร์ตซ์ เป็นต้นไป ค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันมีค่าสูงสุดที่  $1.885 \times 10^{-4}$  ต่อหน่วย ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าขนาดแรงดันกระเพื่อมต่ำสุดตามข้อกำหนดของ กฟผ.





รูปที่ 8.12 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F1 ถึง F8

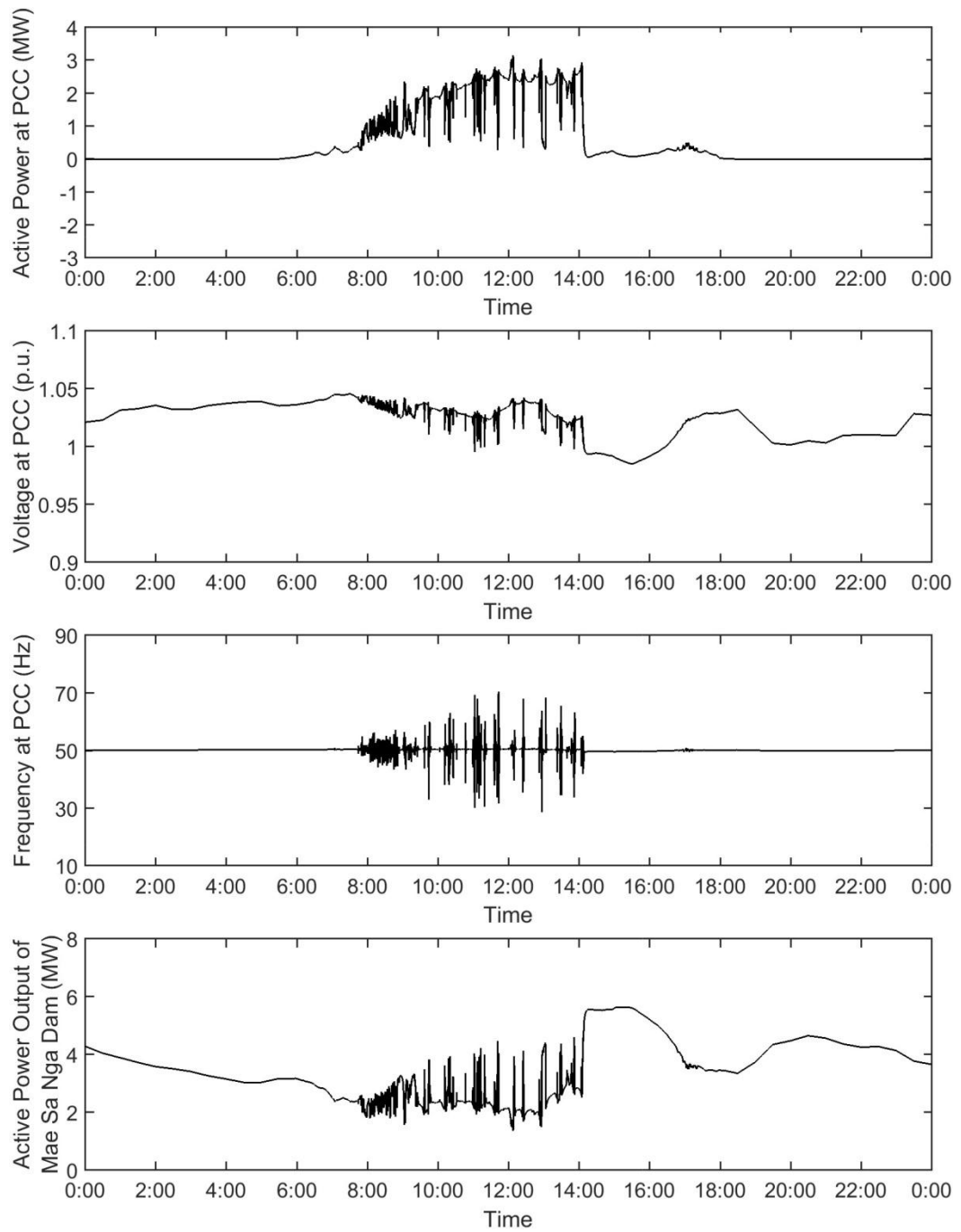
กรณีใช้การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา



รูปที่ 8.13 สเปกตรัมของค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในกรณีศึกษาที่ 6

### 8.1.7 ผลกระทบจากความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหนดที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดที่รองรับโหนด F6 ถึง F8 (กรณีศึกษาที่ 7)

เป็นการจำลองให้ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่รองรับโหนดในสายป้อน F6 ถึง F8 ผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าระบบไม่สามารถตอบสนองต่อความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโหนดได้ทัน ทำให้ไม่สามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่  $-21.241$  เฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 8.14

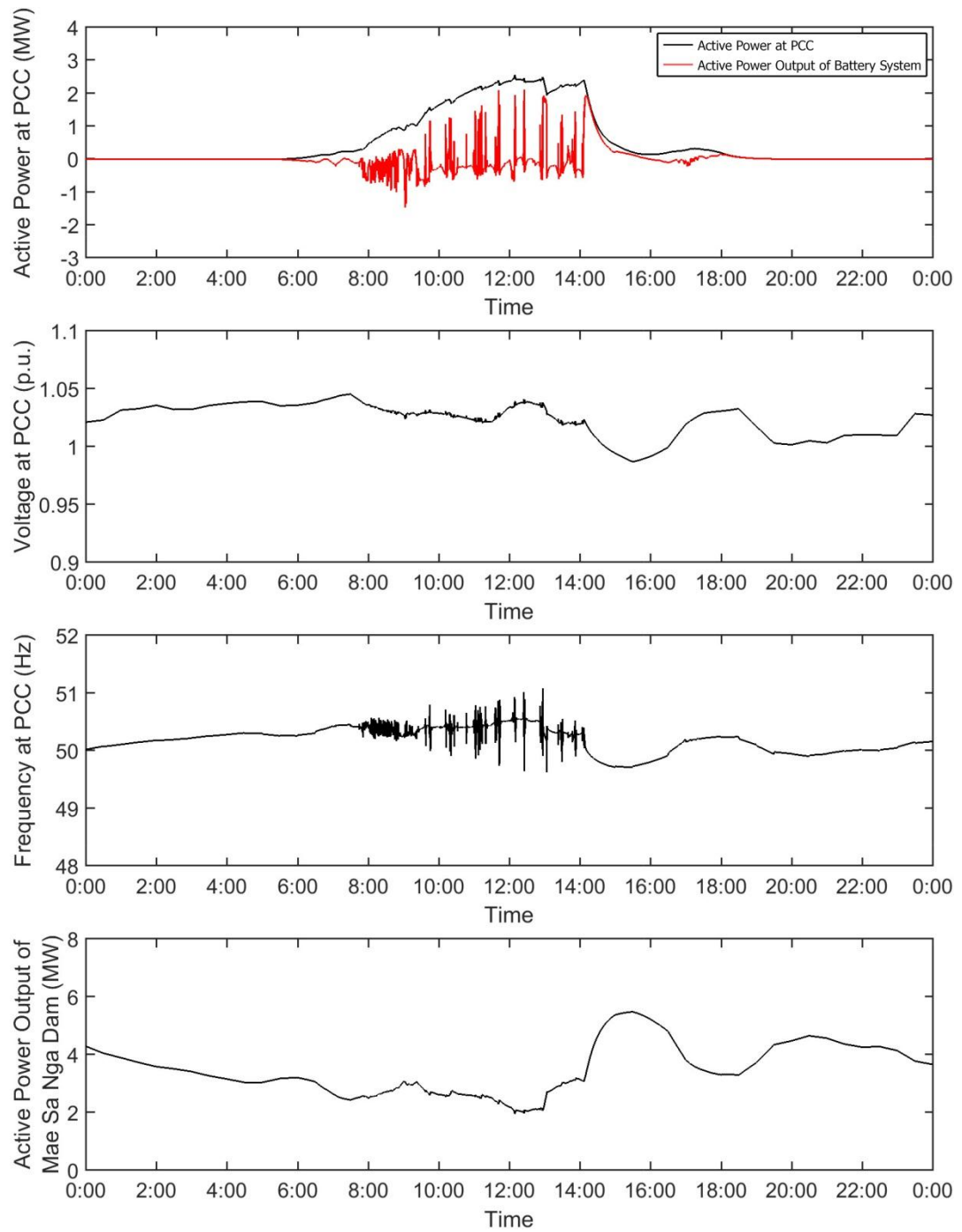


รูปที่ 8.14 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8

### 8.1.8 การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไมโครกริดที่รองรับ โหลด F6 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่ (กรณีศึกษาที่ 8)

จากผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 7 เพื่อช่วยให้ระบบไมโครกริดสามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าในสภาวะแยกโดดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ จึงใช้การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยค่าคงตัวเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 1,450 วินาที ในลักษณะเดียวกันกับกรณีศึกษาที่ 3 ผลการจำลองระบบพบว่า มีในบางช่วงเวลาที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาไม่สามารถตอบสนองต่อความผันผวนของโหลดได้ทัน ทำให้ไม่สามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ 1.056 เฮิรตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 8.15





รูปที่ 8.15 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8  
กรณีใช้การปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 1,450 วินาที

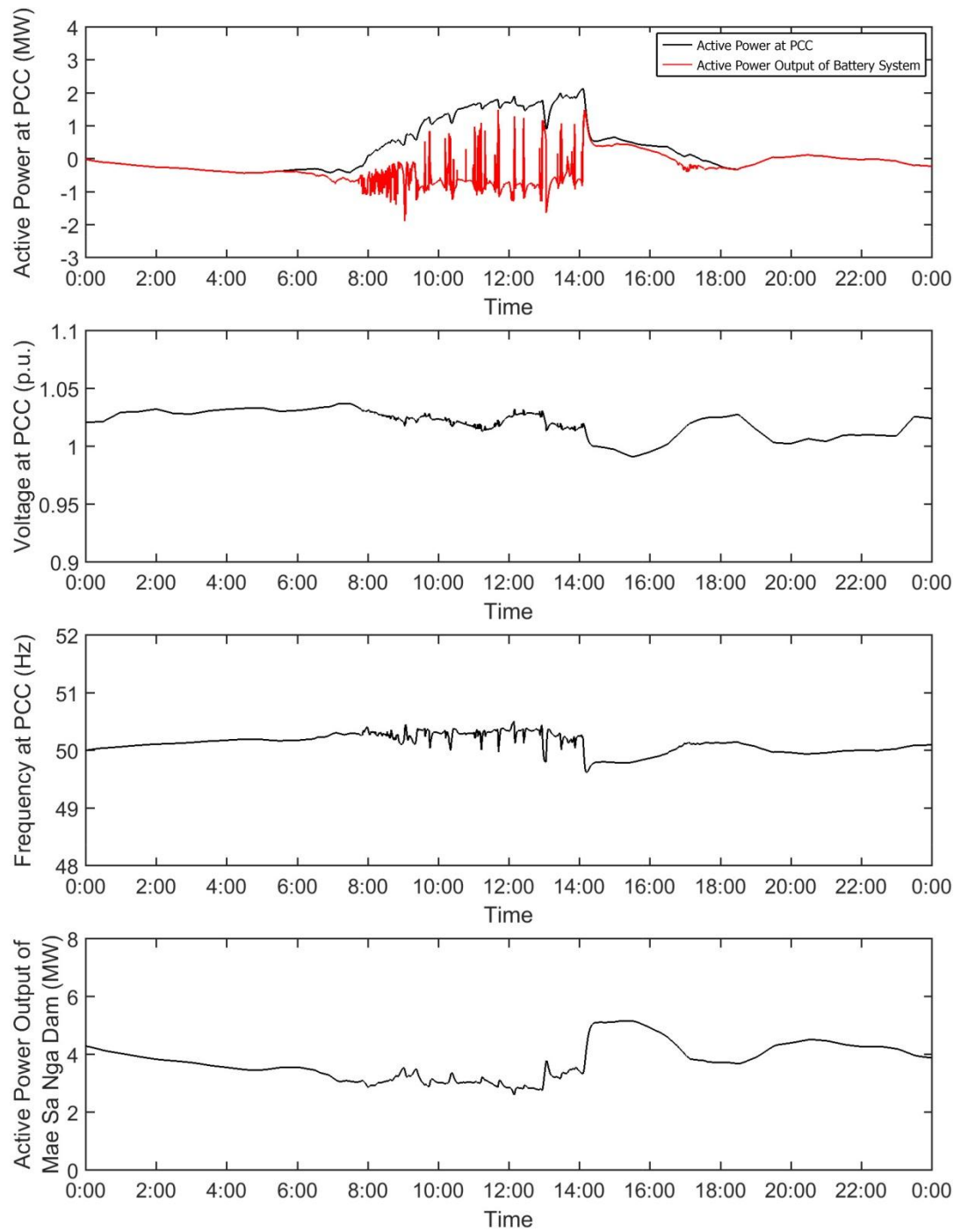
### 8.1.9 การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โหลดในระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว (กรณีศึกษาที่ 9)

จากผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 8 เพื่อลดผลกระทบจากความผันผวนของโหลดที่มีต่อการควบคุมความถี่ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดแบบแยกโดด จึงใช้การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โหลด ซึ่งจะช่วยให้ค่าคงตัวเวลาที่จำเป็นต้องใช้ในการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าลดลงเหลือ 145 วินาที และสำหรับในกรณีศึกษานี้จะเป็นการจำลองการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว

ผลการจำลองระบบในรูปที่ 8.16 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมคุณภาพไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ 0.499 เฮิรตซ์







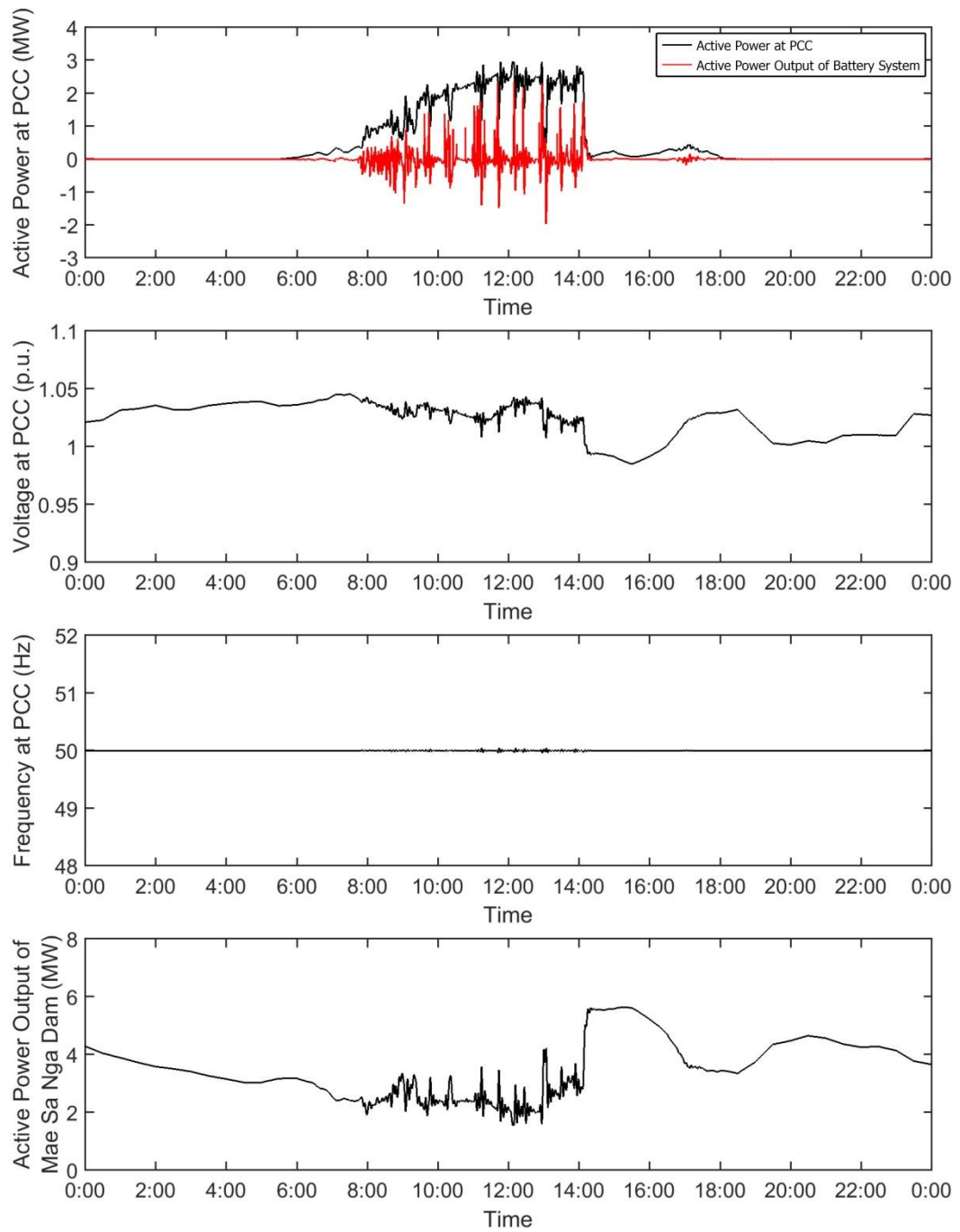
รูปที่ 8.16 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8  
กรณีใช้การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว

### 8.1.10 การปรับเรียงกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โพลดในระบบไมโครกริดที่รองรับโพลด F6 ถึง F8 ด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา (กรณีศึกษาที่ 10)

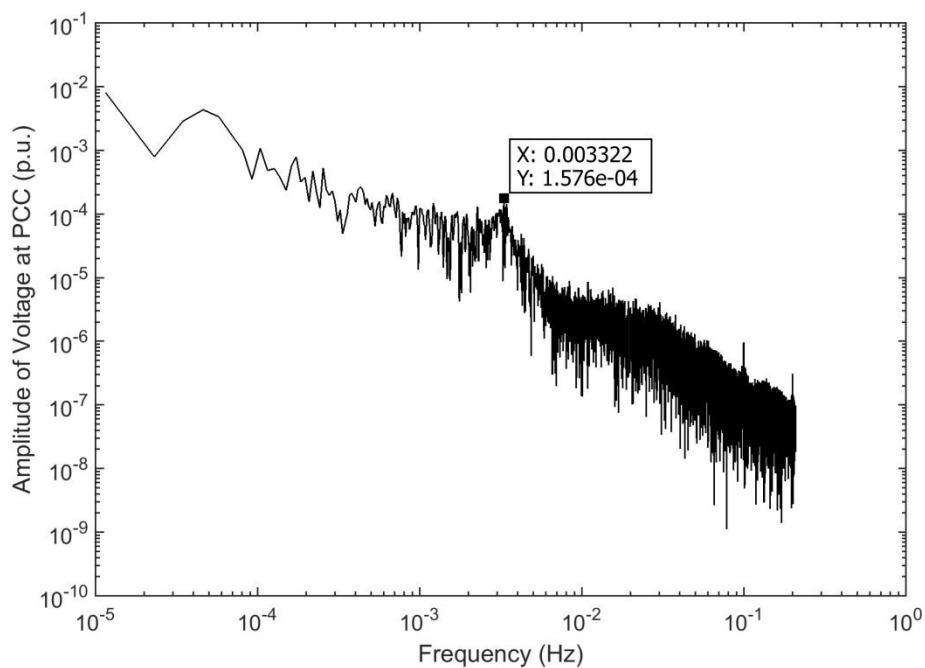
จากผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 9 เพื่อให้ขนาดของระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดเล็ก จึงใช้งานการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่โพลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา

ผลการจำลองระบบในรูปที่ 8.17 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 9 ที่ใช้การควบคุมความถี่โพลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ 0.047 เฮิรตซ์ รูปที่ 8.18 แสดงสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อรวม พบว่าตั้งแต่ช่วงความถี่  $1.1 \times 10^{-3}$  เฮิรตซ์ เป็นต้นไป ค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันมีค่าสูงสุดที่  $1.576 \times 10^{-4}$  ต่อหน่วย ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าขนาดแรงดันกระเพื่อมต่ำสุดตามข้อกำหนดของ กฟผ.





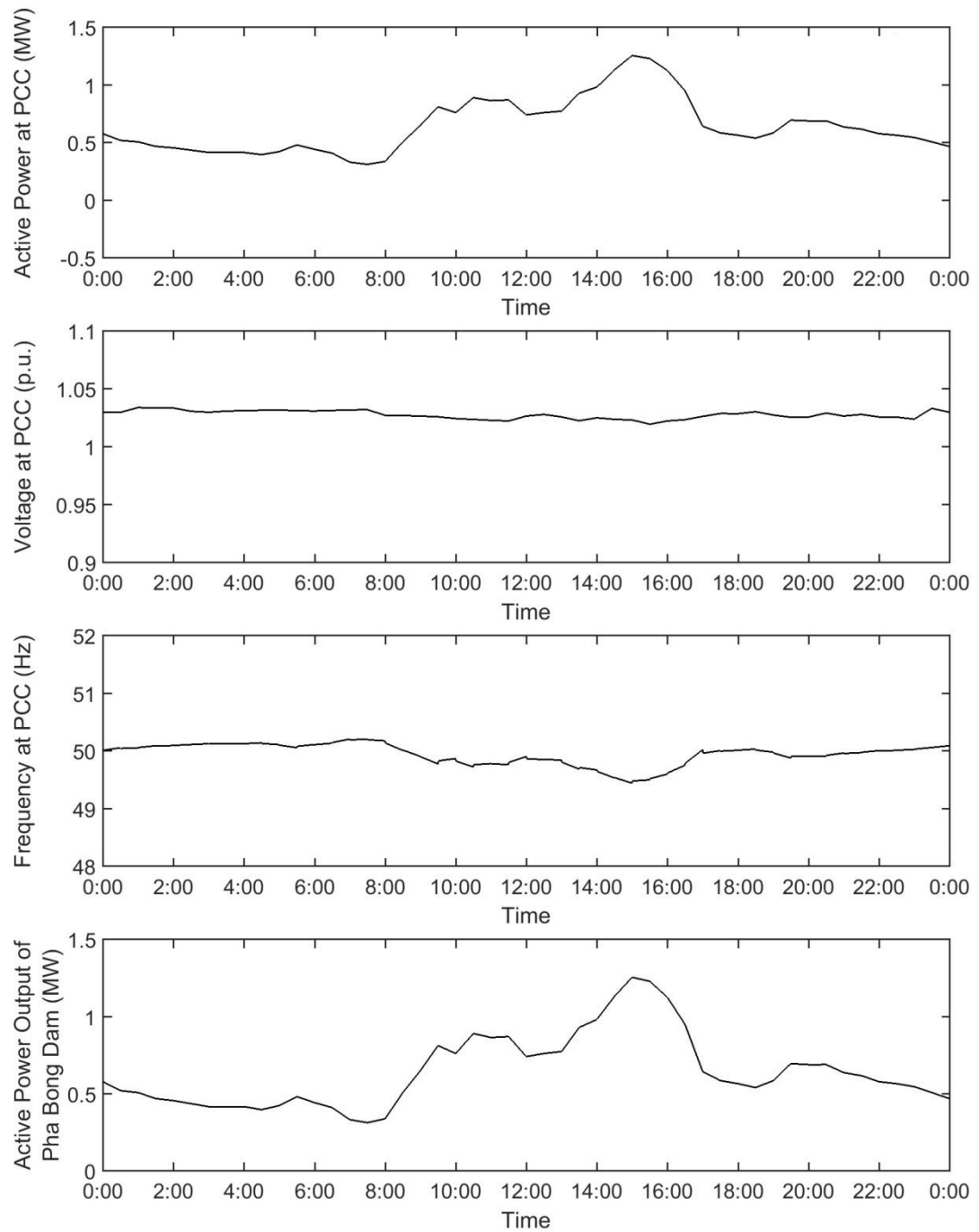
รูปที่ 8.17 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลด F6 ถึง F8  
กรณีใช้การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา



รูปที่ 8.18 สเปกตรัมของค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในกรณีศึกษาที่ 10

#### 8.1.11 ผลกระทบจากความผันผวนของโหลดที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6 (กรณีศึกษาที่ 11)

เป็นการจำลองให้ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่รองรับโหลดเฉพาะในสายป้อน F6 ในกรณีศึกษานี้จึงกำหนดให้โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่องขนาด 3.85 เมกะวัตต์ เป็นผู้ควบคุมแรงดันและความถี่ไฟฟ้าของระบบ และเนื่องจากโหลดในสายป้อน F6 นั้นมีปริมาณน้อยจึงยังไม่พิจารณาในการรับไฟจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง ผลการจำลองระบบในรูปที่ 8.19 แสดงให้เห็นว่า ระบบไม่สามารถตอบสนองต่อความผันผวนของโหลดได้ทัน เนื่องจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่องมีความเฉื่อยต่ำมาก ทำให้ไม่สามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ -0.554 เฮิร์ตซ์



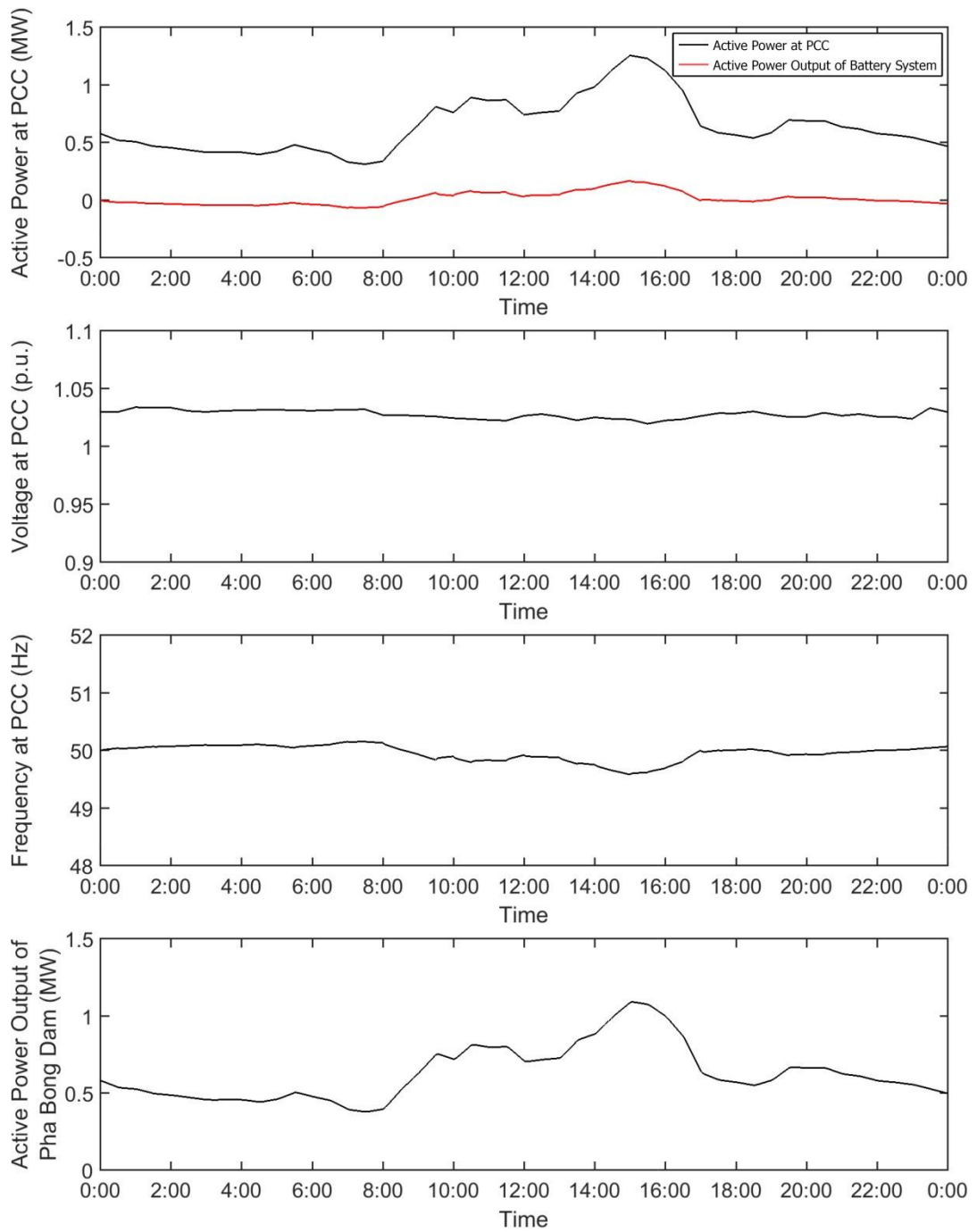
รูปที่ 8.19 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6

### 8.1.12 การควบคุมความถี่โหนดในระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6 ด้วยระบบแบตเตอรี่ เพียงอย่างเดียว (กรณีศึกษาที่ 12)

จากผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 11 เพื่อลดผลกระทบจากความผันผวนของโหลดที่มีต่อการควบคุมความถี่ไฟฟ้าในระบบไมโครกริดแบบแยกโดด จึงจำเป็นต้องใช้การควบคุมความถี่โหนดเพื่อลดความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบ สำหรับในกรณีศึกษานี้จะเป็นการจำลองการควบคุมความถี่โหนดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว

ผลการจำลองระบบในรูปที่ 8.20 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมคุณภาพไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่  $-0.415$  เฮิร์ตซ์





รูปที่ 8.20 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6  
กรณีใช้การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว

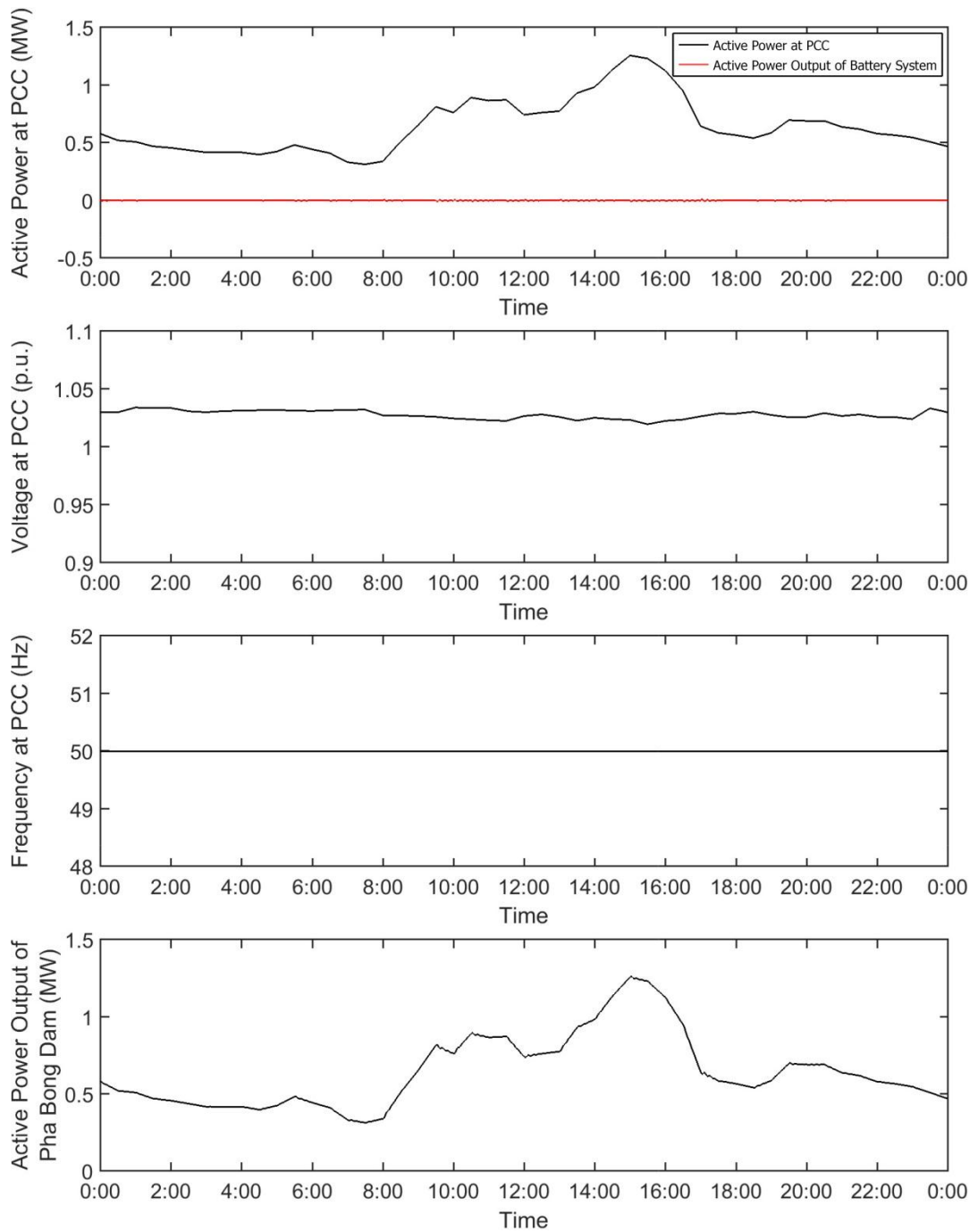
### 8.1.13 การควบคุมความถี่ไหลดในระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6 ด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผาบ่อง (กรณีศึกษาที่ 13)

จากผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 12 เพื่อให้ขนาดของระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดเล็ก จึงใช้งานการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าร่วมกับการควบคุมความถี่ไหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผาบ่อง

ผลการจำลองระบบในรูปที่ 8.21 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 12 ที่ใช้การควบคุมความถี่ไหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่  $-0.001$  เฮิรตซ์







รูปที่ 8.21 ผลการจำลองระบบไมโครกริดที่รองรับโหลดเฉพาะ F6  
กรณีใช้การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่อง

## 8.2 ผลสรุปการจำลองระบบ

ผลสรุปการทำงานของระบบแบตเตอรี่, โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา, โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่อง และค่าความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 8.3 และ 8.4 สำหรับระบบแบตเตอรี่ค่าที่แสดงเป็นค่าลบ หมายถึง ระบบแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะอัดประจุ มีค่าขนาดกำลังไฟฟ้าติดตั้ง  $\pm 4$  เมกะวัตต์ พลังงานไฟฟ้าติดตั้ง  $\pm 1$  เมกะวัตต์-ชั่วโมง และความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 0.5$  เฮิร์ตซ์

ตารางที่ 8.3 สรุปผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 10

กรณีศึกษาที่	กำลังไฟฟ้าสูงสุด		พลังงานไฟฟ้าสูงสุด		ความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุด (เฮิร์ตซ์)
	ระบบแบตเตอรี่	เขื่อนแม่สะงา	ระบบแบตเตอรี่	เขื่อนแม่สะงา	
	(เมกะวัตต์)	(เมกะวัตต์)	(เมกะวัตต์-ชั่วโมง)	(เมกะวัตต์-ชั่วโมง)	
1	-	5.800	-	144.857	0.002
2	2.110	5.800	-0.135	144.857	0.002
3	-	6.545	-	114.311	<b>-34.157</b>
4	2.135	6.545	<b>-1.155</b>	114.281	<b>1.638</b>
5	-2.121	5.831	<b>-9.825</b>	122.316	0.498
6	2.357	6.546	-0.122	114.297	0.051
7	-	5.646	-	88.914	<b>-21.241</b>
8	2.112	5.481	<b>-1.041</b>	88.891	<b>1.077</b>
9	-1.883	5.169	<b>-6.538</b>	95.233	0.499
10	2.338	5.635	-0.121	88.902	0.047

ตารางที่ 8.4 สรุปผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 11 ถึง 13

กรณีศึกษาที่	กำลังไฟฟ้าสูงสุด		พลังงานไฟฟ้าสูงสุด		ความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุด (เฮิร์ตซ์)
	ระบบแบตเตอรี่	เขื่อนผาบ่อง	ระบบแบตเตอรี่	เขื่อนผาบ่อง	
	(เมกะวัตต์)	(เมกะวัตต์)	(เมกะวัตต์-ชั่วโมง)	(เมกะวัตต์-ชั่วโมง)	
11	-	1.257	-	16.092	<b>-0.554</b>
12	0.170	1.091	0.403	15.712	-0.415
13	0.011	1.262	-0.001	16.092	-0.001

### 8.2.1 สถานะเชื่อมต่อกับกริด

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ฅาบองขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ จะทำให้แรงดันในสายป้อน F6 มีองค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้น แต่จากผลการวิเคราะห์เชิงสเปกตรัมของแรงดันที่จุดต่อร่วม แสดงให้เห็นว่าความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ฅาบองนั้นไม่ทำให้เกิดปัญหาแรงดันกระเพื่อม

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 145 วินาที นั้นเพียงพอที่จะสามารถลดความผันผวนความถี่สูงของกำลังไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม ส่งผลให้ความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าลดลง และช่วยลดองค์ประกอบความถี่สูงของแรงดันไฟฟ้าในย่านความถี่แรงดันกระเพื่อมตั้งแต่  $1.1 \times 10^{-3}$  เฮิรตซ์ เป็นต้นไปได้ โดยระบบแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ -0.135 เมกะวัตต์-ชั่วโมง

### 8.2.2 ระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่รองรับโหลดในสายป้อน F1-F8

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบต้องทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่รองรับโหลดในสายป้อน F1-F8 โดยกำหนดให้โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาเป็นผู้ควบคุมแรงดันและความถี่ไฟฟ้าของระบบ นั้นไม่สามารถควบคุมคุณภาพไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ เนื่องจากข้อจำกัดของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาที่มีความเฉื่อยต่ำ และมีเวลาในการตอบสนองช้ากว่าความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และ

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 4 เป็นการใ้การใช้การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไมโครกริดแบบแยกโดด เพื่อช่วยในการลดความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบ ซึ่งถึงแม้จะใช้ค่าคงตัวเวลาในการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าสูงถึง 1,450 วินาที ทำให้ระบบแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ -1.155 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งมีค่ามากเกินกว่าค่าขนาดติดตั้งของระบบแบตเตอรี่ ก็ยังไม่สามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบให้อยู่เกณฑ์มาตรฐานได้

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 5 เป็นการใ้การใช้การปรับเรียบกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 145 วินาที ร่วมกับการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวเพื่อลดความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบ พบว่าระบบแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ -9.825 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งมีค่า

มากกว่าค่าขนาดติดตั้งของระบบแบตเตอรี่ ในขณะที่ความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.498 เฮิร์ตซ์

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 6 เป็นการปรับการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 145 วินาที ร่วมกับการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาเพื่อลดการทำงานของระบบแบตเตอรี่ พบว่าระบบแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ -0.122 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 5 ที่ใช้การควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ทั้งยังสามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าได้ดีกว่า โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ 0.051 เฮิร์ตซ์ แต่จากการที่ระบบแบตเตอรี่ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบความถี่สูงเข้าระบบในตำแหน่งปลายสุดของสายป้อน F6 จึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมมีองค์ประกอบความถี่สูงเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งผลการวิเคราะห์เชิงสเปกตรัมของแรงดันที่จุดต่อร่วมแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบความถี่สูงที่เพิ่มขึ้นมานั้นไม่ทำให้เกิดปัญหาแรงดันกระเพื่อม

### 8.2.3 ระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่รองรับโหลดในสายป้อน F6-F8

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบต้องทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่รองรับโหลดในสายป้อน F6-F8 โดยกำหนดให้โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาเป็นผู้ควบคุมแรงดันและความถี่ไฟฟ้าของระบบ นั้นไม่สามารถควบคุมคุณภาพไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ เช่นเดียวกับกรณีที่รองรับโหลดในสายป้อน F1-F8

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 8 เป็นการปรับการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไมโครกริดแบบแยกโดด เพื่อช่วยในการลดความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบไมโครกริดแบบแยกโดด ซึ่งถึงแม้จะใช้ค่าคงตัวเวลาในการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าสูงถึง 1,450 วินาที ทำให้ระบบแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ -1.041 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งมีความมากกว่าค่าขนาดติดตั้งของระบบแบตเตอรี่ ก็ยังไม่สามารถควบคุมความถี่ไฟฟ้าของระบบให้อยู่เกณฑ์มาตรฐานได้

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 9 เป็นการปรับการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 145 วินาที ร่วมกับการควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวเพื่อลดความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบ พบว่าระบบแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ -6.538 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งมีค่า

มากเกินกว่าค่าขนาดติดตั้งของระบบแบตเตอรี่ ในขณะที่ความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนของระบบมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.499 เฮิรตซ์

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 10 เป็นการปรับการปรับเรียงกำลังไฟฟ้าด้วยค่าคงตัวเวลา 145 วินาที ร่วมกับการควบคุมความถี่โพลต์ด้วยระบบแบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาเพื่อลดการทำงานของระบบแบตเตอรี่ พบว่าระบบแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ -0.121 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 9 ที่ใช้การควบคุมความถี่โพลต์ด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ทั้งยังควบคุมความถี่ไฟฟ้าได้ดีกว่า โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ 0.047 เฮิรตซ์ แต่จากการที่ระบบแบตเตอรี่ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบความถี่สูงเข้าระบบในตำแหน่งปลายสุดของสายป้อน F6 จึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมมีองค์ประกอบความถี่สูงเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งผลการวิเคราะห์เชิงสเปกตรัมของแรงดันที่จุดต่อร่วมแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบความถี่สูงที่เพิ่มขึ้นมานั้นไม่ทำให้เกิดปัญหาแรงดันกระเพื่อม

#### 8.2.4 ระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่รองรับโหลดเฉพาะในสายป้อน F6

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบต้องทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดที่รองรับโหลดเฉพาะในสายป้อน F6 โดยกำหนดให้โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่องเป็นผู้ควบคุมแรงดันและความถี่ไฟฟ้าของระบบ โดยไม่พิจารณาในการรับไฟจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่อง นั้นไม่สามารถควบคุมคุณภาพไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ เช่นเดียวกับกรณีที่รองรับโหลดในสายป้อน F1-F8 และกรณีที่รองรับโหลดในสายป้อน F6-F8 ที่กำหนดให้โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาเป็นผู้ควบคุมแรงดันและความถี่ไฟฟ้าของระบบ เพราะถึงแม้ว่าในสายป้อน F6 จะมีค่าโพลต์สูงสุดและความผันผวนของโพลต์น้อยกว่าสองกรณีดังกล่าว แต่โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่องก็มีความเฉื่อยต่ำกว่ามาก เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงา

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 12 เนื่องจากไม่พิจารณาในการรับไฟจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องจึงใช้การควบคุมความถี่โพลต์ด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการใช้การปรับเรียงกำลังไฟฟ้า พบว่าระบบแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.403 เมกะวัตต์-ชั่วโมง โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ -0.415 เฮิรตซ์

ผลการจำลองระบบในกรณีศึกษาที่ 13 เป็นการใช้อุปกรณ์ควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบ แบตเตอรี่ร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาช่องเพื่อลดการทำงานของระบบแบตเตอรี่ พบว่าระบบ แบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ -0.001 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ กรณีศึกษาที่ 12 ที่ใช้อุปกรณ์ควบคุมความถี่โหลดด้วยระบบแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ทั้งยังควบคุม ความถี่ไฟฟ้าได้ดีกว่า โดยมีความถี่ไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดอยู่ที่ -0.001 เฮิรตซ์ และจากการที่ระบบ แบตเตอรี่ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบความถี่สูงเข้าระบบ จึงไม่ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ จุดต่อร่วมมีองค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้น



## บทที่ 9

### บทสรุป

ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์ในงานวิทยานิพนธ์นี้ชี้ให้เห็นว่า ในสภาวะเชื่อมต่อกับกริด (สายส่ง 115 กิโลโวลต์) เมื่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนยังคงมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม หากเกิดเหตุขัดข้องขึ้นที่สายส่ง 115 กิโลโวลต์ โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแม่สะงาและโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกันซึ่งเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าหลักของระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนจะไม่สามารถรักษาเสถียรภาพในสภาวะคงตัวไว้ได้ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวจำเป็นต้องมีการติดตั้งระบบแบตเตอรี่เพื่อช่วยให้ระบบไฟฟ้าของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนสามารถทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดดได้โดยควบคุมให้แรงดันและความถี่ของระบบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ระบบแบตเตอรี่ที่ติดตั้งมีหน้าที่หลัก คือ

- 1) การปรับเรียบกำลังไฟฟ้า เพื่อลดความผันผวนของกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกัน
- 2) การควบคุมความถี่โหลตในกรณีระบบไฟฟ้าทำงานเป็นระบบไมโครกริดแบบแยกโดด เพื่อลดการเบี่ยงเบนของความถี่ไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความผันผวนของโหลตและกำลังผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาป้องกัน

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า แนวทางการออกแบบวงจรรองของการปรับเรียบกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบแบตเตอรี่ที่นำเสนอสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าไม่ให้เกิดปัญหาแรงดันกระเพื่อมได้ และงานวิทยานิพนธ์นี้เสนอให้มีการปรับการทำงานของโรงไฟฟ้า ซึ่งในที่นี้คือ โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแม่สะงา ให้ทำหน้าที่ควบคุมความถี่โหลตร่วมกับระบบแบตเตอรี่ด้วยโดยอาศัยหลักการแบ่งย่านความถี่การทำงาน ระบบแบตเตอรี่จะรับผิดชอบเฉพาะในส่วนความผันผวนความถี่สูง ส่วนโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กจะจัดการกับความผันผวนที่ช้ากว่าค่าเวลาตอบสนองของโรงไฟฟ้า วิธีการดังกล่าวจะช่วยให้ระบบแบตเตอรี่ที่จำเป็นต้องใช้มีขนาดเล็ก โดยยังสามารถควบคุมความเบี่ยงเบนของความถี่ไฟฟ้าของระบบในสภาวะแยกโดดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้

## รายการอ้างอิง

1. Marcos, J., et al., *From irradiance to output power fluctuations: The PV plant as a low pass filter*. Vol. 19. 2011. 505–510.
2. Liu, H., et al., *Control Strategy of Energy Storage for Smoothing Photovoltaic Power Fluctuations*. IFAC-PapersOnLine, 2015. **48**(28): p. 162-165.
3. Li, X., D. Hui, and X. Lai, *Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013. **4**(2): p. 464-473.
4. Yamashita, K., et al. *A sfrequency-stabilizing scheme for integrating photovoltaics into a small island grid*. in *2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*. 2011.
5. Cha, S.T., et al., *Frequency Control for Island Operation of Bornholm Power System*. Energy Procedia, 2014. **61**: p. 1389-1393.
6. 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.
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. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, *ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559*. 2016.
9. Chowdhury, S. and P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*. 2009: Institution of Engineering and Technology.
10. Lasseter, R.H. *MicroGrids*. in *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*. 2002.
11. Roy, D.C., *Linear Integrated Circuits*. 2003: New Age International (P) Limited.
12. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, *การศึกษาความเป็นไปได้ในการจัดทำโครงการนำร่องการพัฒนาระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ*. 2015.



13. Glover, J.D., T. Overbye, and M.S. Sarma, *Power System Analysis and Design*. 2016: Cengage Learning.
14. National Energy Administration, M.o.S.T.a.E., Government of Thailand, *Nam Mae Sa-Nga Hydro-Electric Project Changwat Mae Hong Son: Electrical and Mechanical Power Plant Equipment*. 1985.



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศิริวัฒน์ เตชะพกาพงษ์ เกิดวันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551 ภายหลังได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2559

