

วิธีการรีซิงโครไนซ์ของระบบไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Resynchronization Method for Mae-Hong-Son Microgrid Using Battery Energy
Storage System



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิธีการรีซิงโครไนซ์ของระบบไมโครกริดอำเภอเมือง
	แม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่
โดย	นายธนกฤต กิตติวรารัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สมภพ อึ้งอภิมงคล)	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ธนกฤต กิตติวรารัตน์ : วิธีการรีซิงโครไนซ์ของระบบไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่. (A Resynchronization Method for Mae-Hong-Son Microgrid Using Battery Energy Storage System) อ.ที่ปรึกษาหลัก :
 ผศ. ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน

ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันนั้นเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญมากสำหรับโหมดการทำงานของไมโครกริด โดยเฉพาะการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดนั้นเป็นโหมดการทำงานที่ทำหายมาก งานวิทยานิพนธ์นี้จึงมีเป้าหมายที่จะ 1) ศึกษาวิธีการการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อให้การรีซิงโครไนซ์ระยะไกลสำเร็จได้อย่างราบรื่น ด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอโดยหลักการควบคุมถ่วงกำลังจริงซึ่งมีการทำงานเสมือนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ในการปรับความถี่และมุมเฟสของแรงดันไมโครกริดให้ซิงโครไนซ์กับแรงดันโครงข่ายจะอาศัยเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่ม ทั้งนี้สัญญาณขาออกของเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่มจะเป็นการปรับค่าความถี่คำสั่งผ่านวงรอบควบคุมถ่วงกำลังจริงเพื่อให้แรงดันของไมโครกริดสอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE 1547-2018 2) วิเคราะห์ผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารที่มีต่อสมรรถนะของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลเนื่องจากระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ถูกติดตั้งไกลจากจุดเชื่อมต่อถึง 20 กิโลเมตร เวลาประวิงที่เกิดขึ้นนั้นทราบการประทับเวลาของ Phasor Measurement Unit (PMU) ซึ่งแต่ละตัวทำงานบนพื้นฐานเวลาเดียวกัน 3) นำเสนอวิธีการชดเชยมุมเฟสเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบจากเวลาประวิงของระบบสื่อสาร ซึ่งการจำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถชดเชยมุมเฟสสำหรับการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนได้

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070200321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM, REMOTE RESYNCHRONIZATION,
EFFECT OF TIME DELAY FROM COMMUNICATION SYSTEM

Thanakrit Kittiwarat : A Resynchronization Method for Mae-Hong-Son
Microgrid Using Battery Energy Storage System. Advisor: Asst. Prof.
SURAPONG SUWANKAWIN, Ph.D.

Inverter-based Battery Energy Storage System (BESS) is a key component for the operating modes of AC microgrid. The remote resynchronization is a challenge feature among the required AC microgrid operations. Therefore, the objectives of this thesis are : 1) Studying a remote resynchronization method using BESS to achieve the smooth resynchronization. The proposed controller with Frequency-Power (f-P) droop characteristic forms a virtual synchronous generator model. In order to make the microgrid voltage to synchronize with the grid voltage, the vector phase-locked loop (PLL) is deployed. The vector PLL' s output is an adjusted frequency command for the f-P droop, it facilitates the synchronization of microgrid voltage to conform to the IEEE 1547-2018 standard accordingly. 2) The impacts of communication delay time on the performance of remote synchronization are investigated, this is because the location of BESS is 20 km far from the PCC at substation. This latency can be estimated by the time stamp of Phasor Measurement Units (PMU) by which the time bases are synchronize to each other. 3) A methodology to compensate phase angle is proposed to solve the time-delay effect from communication system. The simulation results from DIgSILENT-Powerfactory show that the proposed controller can compensate phase delay for the remote resynchronization of Mae-Hong-Son microgrid.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งสละเวลาอันมีค่าของท่าน กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นทั้งที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์และการใช้ชีวิตตลอดช่วงที่ เข้ารับการศึกษาระดับมหาบัณฑิตที่ตีเสมอมา

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ และ ดร.สมภพ อัญมมงคล ที่ได้เสียสละเวลาในการร่วมพิจารณาการสอบ ตรวจสอบแก้ไข และเอื้อเฟื้อข้อมูลและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทยที่ได้อนุเคราะห์เงินทุนสนับสนุนการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ กองวิศวกรรมระบบควบคุมและป้องกัน (กวป-ส.) ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง (อวส.) และเพื่อนร่วมงาน ภายในหน่วยงานทุกคนที่ทำงานอย่างหนักกันมาตลอด ขอขอบคุณ ดร.เอกอุสาร เทวารุทธ และ นาย ประจักษ์ พรตมะลิ ที่ได้เอื้อเฟื้อให้คำแนะนำและข้อมูลที่จำเป็นต่อการทำวิจัยตลอดมา ขอขอบคุณ นาย ศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข ที่ช่วยจัดสรรข้อมูลการคำนวณเวลาประวิงของเราเตอร์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ ข้อมูลสำคัญสำหรับงานวิจัย ขอขอบคุณ นายกฤตณัฐ พงศ์จิรภัทร และนางสาวรภิชิมา ขณะฤกษ์ที่ช่วย ให้ข้อมูลที่ เป็นประโยชน์และเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย ตลอดจนเพื่อนนิสิตระดับมหาบัณฑิต ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กันมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่เป็นกำลังใจที่สำคัญ และให้การสนับสนุนการศึกษาและการทำวิจัยในทุกด้านมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษาระดับ มหาบัณฑิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ธนกฤต กิตติวรรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการเปลี่ยนผ่านโหมตอย่างราบรื่นของไมโครกริดและการทำงานของระบบควบคุมวงจรแปลงผันกำลังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่.....	4
1.1.1 การทำงานเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Virtual Synchronous Generator). 5	
1.1.2 การทำงานในโหมดการเปลี่ยนผ่านโหมตของไมโครกริดระหว่างโหมตเชื่อมต่อโครงข่ายและโหมตแยกตัวอิสระ.....	6
1.1.3 เวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากระบบสื่อสาร	7
1.1.4 อุปกรณ์วัดแรงดันโครงข่ายที่ทราบได้ถึงเวลาประวิงจากการส่งสัญญาณผ่านระบบสื่อสาร	8
1.2 สรุปปัญหาและข้อจำกัดในงานวิจัยที่ผ่านมา.....	8
1.3 วัตถุประสงค์.....	9
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	10
บทที่ 2 โครงสร้างการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่สำหรับไมโคร กริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน	12

2.1	โครงการไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน [11], [25].....	12
2.2	การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่.....	15
2.2.1	การควบคุมความถี่ (Frequency Control) [5][11].....	16
2.2.1.1	พลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบไอโซโครนัส (Dynamic of Isochronous Generator).....	16
2.2.1.2	ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (f-P Droop Characteristic of Synchronous Generator).....	19
2.2.2	การควบคุมแรงดัน (Voltage Control) [5], [11].....	22
2.2.2.1	แบบจำลองทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในการควบคุมแรงดัน	22
2.2.2.2	การควบคุมแรงดันด้วยตัวควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator; AVR) และ ตัวกระตุ้น (Exciter).....	22
2.3	โหมดการทำงานของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนร่วมกับระบบควบคุมการแปลงกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่นำเสนอ	24
2.3.1	โหมดการทำงานของไมโครกริด.....	24
2.3.1.1	การควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่าย (Grid-Connected Mode).....	27
2.3.1.2	การทำงานของคอนเวอร์เตอร์สำหรับโหมดการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระ (Grid-Connected to Intentional Islanding Transition).....	31
2.3.1.3	การทำงานของคอนเวอร์เตอร์สำหรับโหมดแยกตัวอิสระ (Intentional Islanding Mode).....	35
บทที่ 3	วิธีการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริด	38
3.1	การเปลี่ยนผ่านจากโหมดแยกตัวอิสระกลับไปยังโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย (Resynchronization).....	38
3.3.1	ระบบควบคุมสำหรับการรีซิงโครไนซ์.....	39
3.3.1.1	เวกเตอร์เฟสล็อกลูป (Vector Phase-Locked Loop).....	41

3.1.1.2	เสถียรภาพของระบบควบคุมสำหรับการรีซิงโครไนซ์.....	43
3.1.1.3	กลไกการรีซิงโครไนซ์ (Resynchronization Strategy).....	49
3.3.2	มาตรฐานในการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด	53
3.2	ผลการจำลองการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดเมืองแม่ฮ่องสอน.....	54
3.2.1.	การจำลองการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดเฉพาะบัส INC02 ของไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่.....	54
3.2.2.	การจำลองการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่.....	58
บทที่ 4	ผลกระทบจากเวลาประวิงของระบบสื่อสารในการวัดสัญญาณอ้างอิงต่อการรีซิงโครไนซ์แบบระยะไกลของไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอน.....	62
4.1	ระบบสื่อสารของไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอน	62
4.2	การตรวจวัดแรงดันด้วย Phasor Measurement Unit (PMU)	66
4.3	เวลาประวิงจากระบบสื่อสารที่เกิดขึ้นในการตรวจวัดสัญญาณ.....	68
4.3.1	เวลาประวิงจากแบนด์วิธหรือตัวกลางในการส่งผ่าน (Bandwidth or Transmission Delay, $t_{d,trans}$).....	69
4.3.2	เวลาประวิงการแพร่กระจาย (Propagation Delay, $t_{d,prop}$).....	69
4.3.3	เวลาประวิงจากกระบวนการภายในเราเตอร์.....	70
4.3.3.1	เวลาประวิงกระบวนการที่โหนด (Processing Delay in Node, $t_{d,proc}$)....	70
4.3.3.2	เวลาประวิงจากการรอคิว (Queueing Delay; $t_{d,que}$).....	71
4.4	ผลกระทบของเวลาประวิงต่อการรีซิงโครไนซ์ระยะไกล [16].....	73
4.5	การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงต่อการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอน.....	75
4.5.1	กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสเกิดขึ้นและมีเวลาประวิงจากระบบสื่อสาร.....	77
4.5.2	กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่เกิดขึ้นและมีเวลาประวิงจากระบบสื่อสาร.....	78
4.6	หลักการและแนวทางในการแก้ไขปัญหาผลกระทบจากเวลาประวิงของระบบสื่อสาร	80

4.7 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบจากเวลาประวิงของระบบสื่อสารในซีโมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน	82
4.7.1 การจำลองผลกระทบขณะก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 14 มิลลิวินาทีแบบคงที่.....	83
4.7.2 การจำลองผลกระทบขณะก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.5 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 14 มิลลิวินาทีแบบคงที่.....	84
4.7.3 การจำลองผลกระทบขณะก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 280 มิลลิวินาทีแบบคงที่	85
4.7.4 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเมื่อความถี่เปลี่ยนจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 280 มิลลิวินาทีแบบคงที่	87
4.7.5 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเมื่อความถี่เปลี่ยนจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.5 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 280 มิลลิวินาทีแบบคงที่	89
4.7.6 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเมื่อความถี่เปลี่ยนจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 49.5 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 280 มิลลิวินาทีแบบคงที่	91
4.7.7 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเมื่อความถี่เปลี่ยนจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 500 มิลลิวินาทีแบบคงที่	93
4.7.8 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเมื่อความถี่เปลี่ยนจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 49.9 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 500 มิลลิวินาทีแบบคงที่	94
4.8 สรุปผลการจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันของระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่	95
บทที่ 5 บทสรุป	96
ภาคผนวก ก.....	98
บรรณานุกรม.....	103



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	ตัวแปรตั้งต้นของระบบควบคุมความถี่กำลังจริง.....	45
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรของระบบควบคุมความถี่กำลังจริง.....	46
ตารางที่ 3.3	ข้อกำหนดในการรีซิงโครไนซ์ของไมโครกริดตามมาตรฐาน IEEE 1547-2018 [6].....	53
ตารางที่ 4.1	ตัวอย่างของตัวนำในการส่งผ่าน โดยค่า $c = 299.792$ เมตร/ไมโครวินาที.....	70
ตารางที่ 4.2	ASR1000-ESP20 WAN Aggregation Testing – Tracking Latency Up to NDR with Services (Shaping QoS) [2]	71
ตารางที่ 4.3	การคำนวณเวลาประวิงสำหรับการจำลองในระบบไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน	73



สารบัญญรูปภาพ

รูปที่ 1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของไมโครกริด [4].....	2
รูปที่ 1.2 รูปแบบของการรีซิงโครไนซ์ตามเงื่อนไขที่มาตรฐาน IEEE1547-2018 กำหนดสำหรับกำลังไฟฟ้ามากกว่า 500 กิโลวัตต์ [24]	7
รูปที่ 2.1 แนวคิดไมโครกริดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน.....	13
รูปที่ 2.2 การควบคุมวงจรแปลงผันสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่.....	16
รูปที่ 2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังให้กับโหลด	16
รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติทางพลวัตระหว่างกำลังจริงและความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส. 18	
รูปที่ 2.5 ลักษณะสมบัติทางพลวัตระหว่างกำลังจริงและความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในรูปมาตรฐาน.....	18
รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีชุดควบคุมของตัวขับเร้าและลักษณะรูปความถี่-กำลังจริง.....	19
รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริง	19
รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงในสถานะอยู่ตัว	20
รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติของรูปความถี่-กำลังจริงเมื่อมีสัญญาณโหลดอ้างอิง (Load Reference). 20	
รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบลักษณะของคุณสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงที่มีการป้อนค่าโหลดอ้างอิง.....	21
รูปที่ 2.11 รูปแบบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	21
รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	23
รูปที่ 2.13 แบบจำลองโครงข่ายระบบไฟฟ้าไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory.....	25
รูปที่ 2.14 แบบจำลองโหมดการทำงานของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory.....	26
รูปที่ 2.15 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโครกริดทำงานในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายและระบบกักเก็บพลังงานทำงานในโหมดพร้อมจ่าย	28

รูปที่ 2.16 ผลการจำลองการทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายโดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่
ในโหมดพร้อมจ่ายทำงานร่วมกับการจ่ายกำลังจริงของแหล่งกำเนิดกระจายตัวในไมโครกริดและระบบ
หลัก 29

รูปที่ 2.17 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงในโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย
ของไมโครกริดเทียบกับหลักการที่นำเสนอโดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่อยู่ในโหมดพร้อมจ่าย
..... 29

รูปที่ 2.18 ผลการจำลองการทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายโดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่
ช่วยจ่ายกำลังจริง 1 เมกะวัตต์ ทำงานร่วมกับการจ่ายกำลังจริงของแหล่งกำเนิดกระจายตัวในไมโคร
กริดและระบบหลัก 30

รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงในโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย
ของไมโครกริดเทียบกับหลักการที่นำเสนอโดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จ่ายกำลังให้แก่ระบบ
ไฟฟ้า..... 31

รูปที่ 2.20 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงในการจ่ายโหลดของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโคร
กริดทำงานในโหมดการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระ 32

รูปที่ 2.21 ผลการจำลองการทำงานในการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัว
อิสระด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ทำงานร่วมกับแหล่งกำเนิดกระจายตัวในไมโครกริด..... 33

รูปที่ 2.22 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงในการเปลี่ยนผ่านจาก
โหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระของไมโครกริดเทียบกับหลักการที่นำเสนอ 33

รูปที่ 2.23 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงในการจ่ายโหลดของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโคร
กริดทำงานในโหมดการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระแล้วต้องการ
ปรับความถี่ของไมโครกริด..... 34

รูปที่ 2.24 ผลการจำลองการทำงานในการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัว
อิสระด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงานร่วมกับแหล่งกำเนิดกระจายตัวในไมโครกริด และมี
การปรับให้ระบบไมโครกริดทำงานที่ความถี่ปกติหลังการเปลี่ยนผ่านอย่างราบรื่น 34

รูปที่ 2.25 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงในการจ่ายโหลดของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโคร
กริดทำงานในโหมดแยกตัวอิสระ..... 35

รูปที่ 2.26 ผลการจำลองการทำงานในโหมดแยกตัวอิสระด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงาน
ร่วมกับแหล่งกำเนิดกระจายตัวในไมโครกริด 36

รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงในโหมดแยกตัวอิสระของไมโครกริดเทียบกับหลักการที่นำเสนอ.....	37
รูปที่ 3.1 ระบบควบคุมของการแปลงผันกำลังในการรีซิงโครไนซ์	40
รูปที่ 3.2 รุ่นของรีเลย์ตรวจสอบการซิงโครไนซ์ (Sync-Checked Relay) ที่ใช้งาน ณ จุด PCC ของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน และ การตั้งค่าการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดตามมาตรฐาน	41
รูปที่ 3.3 หลักการทำงานของเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ๊ป	42
รูปที่ 3.4 ภาพเฟสเซอร์แสดงความแตกต่างของมุมเฟสจากเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ๊ป	43
รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมรูปความถี่-กำลังจริงร่วมกับเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ๊ป.....	44
รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมรูปความถี่-กำลังจริงร่วมกับเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ๊ปที่ประมาณเป็นเชิงเส้น.....	44
รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมรูปความถี่-กำลังจริงร่วมกับเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ๊ปที่ประมาณเป็นเชิงเส้นในรูปแบบมาตรฐาน	45
รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางเวลาของระบบควบคุมสำหรับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดเมื่อมุมเฟสของระบบโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อ $\omega_c = 6 \text{ rad} / \text{s}$	47
รูปที่ 3.9 การจำลองแสดงผลตอบสนองทางเวลาของระบบควบคุมสำหรับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดเมื่อมุมเฟสของระบบโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อ $\omega_c = 2 \text{ rad} / \text{s}$	48
รูปที่ 3.10 กลไกการทำงานของส่วนควบคุมรองสำหรับระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดที่นำเสนอ.....	49
รูปที่ 3.11 ลักษณะสมบัติการถ่ายโอนพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโครกริดทำงานในโหมดเปลี่ยนผ่านจากโหมดแยกอิสระไปยังโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่าย	50
รูปที่ 3.12 ลักษณะสมบัติการถ่ายโอนพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโครกริดทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายและระบบกักเก็บพลังงานทำงานในโหมดพร้อมจ่าย	51
รูปที่ 3.13 กลไกการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอสำหรับระบบควบคุมแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรี.....	52
รูปที่ 3.14 จำลองระบบไฟฟ้าไมโครกริดบัส INC02 ของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนก่อนการรีซิงโครไนซ์ด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรี	54

รูปที่ 3.15 ข้อมูลโหลดของระบบจำหน่ายราย 10 วินาทีเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2561 จากทาง กฟจ. ฟีดเตอร์ที่ F6 F7 และ F8 รวมกันซึ่งเป็นโหลดของระบบไมโครกริดที่พิจารณาเฉพาะบัส INC02....	55
รูปที่ 3.16 ผลการลองกลไกการทำงานของกริดซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่.....	56
รูปที่ 3.17 ผลการลองกลไกการทำงานของกริดซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่รวมไปถึงการทำงานในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายของไมโครกริด	57
รูปที่ 3.18 จำลองระบบไฟฟ้าของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในโหมดแยกตัวอิสระก่อนการกริดซิงโครไนซ์ด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่.....	58
รูปที่ 3.19 ข้อมูลโหลดของระบบจำหน่ายระบบไฟฟ้าไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนราย 10 วินาที เมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2561 จากทาง กฟจ.....	59
รูปที่ 3.20 ช่วงการเปลี่ยนแปลงของโหลดในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่พิจารณา	59
รูปที่ 3.21 ผลการลองกลไกการทำงานของกริดซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่รวมไปถึงการทำงานในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายของไมโครกริด	60
รูปที่ 4.1 ภาพรวมของระบบสื่อสารในไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่ออกแบบโดยฝาสื่อสาร กฟผ.	63
รูปที่ 4.2 ระบบไฟฟ้ากำลังและแนวคิดเชิงออกแบบของระบบสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน (กฟจ., กฟผ.) และ โรงไฟฟ้าผาบ่อง (กฟผ.)	65
รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมการตรวจจับแรงดันโครงข่ายด้วย PMU.....	67
รูปที่ 4.4 การส่งสัญญาณจากอุปกรณ์วัดผ่านระบบสื่อสารของผู้ให้บริการสัญญาณ.....	68
รูปที่ 4.5 เวลาประวิงที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ต้นทางไปยังอุปกรณ์ปลายทางผ่านระบบสื่อสาร	72
รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมการตรวจจับและส่งแรงดันโครงข่ายด้วย PMU ผ่านระบบสื่อสารไปยังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่อยู่ไกลออกไปจากจุด PCC	73
รูปที่ 4.7 ผลกระทบจากเวลาประวิงของระบบสื่อสารต่อการกริดซิงโครไนซ์	74
รูปที่ 4.8 แรงดันปรีกวมในการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยเวลาประวิงจากระบบสื่อสาร	75

รูปที่ 4.9	เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันโครงข่ายเทียบกับแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงาน แบบเตอร์เมื่อไม่มีผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารต่อการรีซิงโครไนซ์ของไมโครกริด	76
รูปที่ 4.10	เปรียบเทียบแรงดัน ความถี่ และมุมเฟส ของโครงข่ายขณะไม่มีเวลาประวิงเทียบกับ สัญญาณที่ส่งมายังระบบควบคุมแปลงผันกำลังระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอร์ในช่วงที่มีการ เปลี่ยนแปลงมุมเฟส.....	77
รูปที่ 4.11	เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันโครงข่ายเทียบกับแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงาน แบบเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของแรงดันโครงข่ายขณะที่มีเวลาประวิงจากระบบสื่อสาร เกิดขึ้น.....	77
รูปที่ 4.12	ผลการจำลองเปรียบเทียบ แรงดัน ความถี่ และมุมเฟส ของโครงข่ายขณะไม่มีเวลาประวิง เทียบกับสัญญาณที่ส่งมายังระบบควบคุมแปลงผันกำลังระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอร์ในช่วงที่มีการ ลดลงของความถี่	78
รูปที่ 4.13	ผลการจำลองเปรียบเทียบ แรงดัน ความถี่ และมุมเฟส ของโครงข่ายขณะไม่มีเวลาประวิง เทียบกับสัญญาณที่ส่งมายังระบบควบคุมแปลงผันกำลังระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอร์ในช่วงที่มีการ เพิ่มขึ้นของความถี่.....	79
รูปที่ 4.14	เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันโครงข่ายเทียบกับแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงาน แบบเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันโครงข่ายขณะที่มีเวลาประวิงจากระบบสื่อสาร เกิดขึ้น.....	79
รูปที่ 4.15	บล็อกไดอะแกรมการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันโครงข่ายส่งมาจาก PMU ผ่านระบบสื่อสาร ไปยังระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอร์ที่อยู่ไกลออกไปจากจุด PCC เพื่อใช้เป็นแรงดันอ้างอิงให้กับ เวกเตอร์เฟสบล็อกคู่ในการรีซิงโครไนซ์ระยะไกล	81
รูปที่ 4.16	การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 14 มิลลิวินาที.....	83
รูปที่ 4.17	การจำลองเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลเมื่อมีผลกระทบของเวลาประวิงก่อนใส่ตัว ชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้น อย่างคงที่ 14 มิลลิวินาที	83
รูปที่ 4.18	การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.5 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 14 มิลลิวินาที.....	84

รูปที่ 4.30 การจำลองเงื่อนไของารรชงโครนศระยศโกลเมอมีผลกระทบของเวลาประวงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมอความถอเปลยนเปลงจาก 50 เฮอตศไปยง 50.1 เฮอตศ และเวลาประวงที่เกดชงนอยางคงที่ 500 มลลวนาที่ 93

รูปที่ 4.31 การจำลองผลกระทบของเวลาประวงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมอความถอเปลยนเปลงจาก 50 เฮอตศไปยง 49.9 เฮอตศ และเวลาประวงที่เกดชงนอยางคงที่ 500 มลลวนาที่ 94

รูปที่ 4.32 การจำลองเงื่อนไของารรชงโครนศระยศโกลเมอมีผลกระทบของเวลาประวงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมอความถอเปลยนเปลงจาก 50 เฮอตศไปยง 49.9 เฮอตศ และเวลาประวงที่เกดชงนอยางคงที่ 500 มลลวนาที่ 94



บทที่ 1

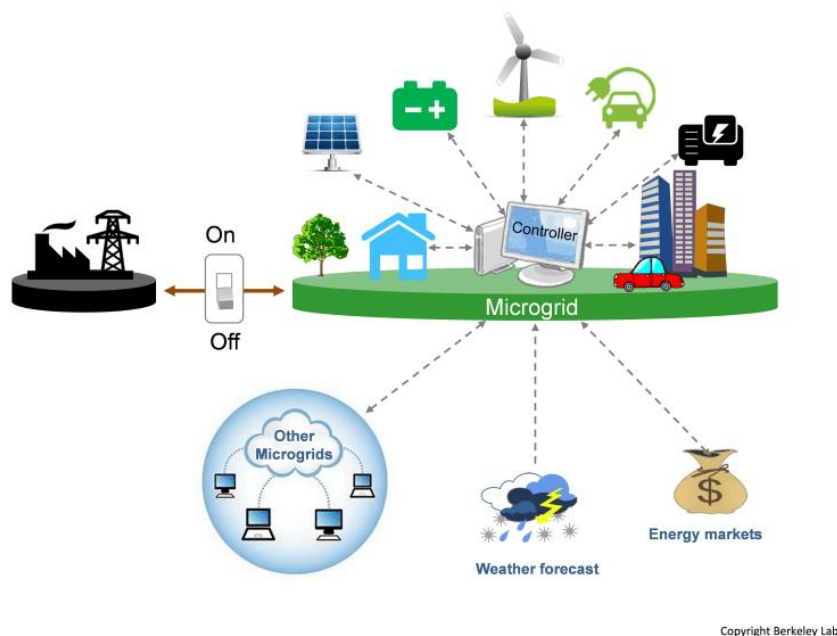
บทนำ

ความรู้ทางด้านโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) เป็นการผนวกรวมองค์ความรู้หลายแขนงเข้าด้วยกัน เช่น ความรู้ทางด้านวิศวกรรม ระบบไฟฟ้ากำลัง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบสื่อสาร การวัดและเครื่องมือวัดไฟฟ้า และความรู้อีกหลายแขนงทางด้านระบบไฟฟ้าอีกมากมาย เพื่อนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีเกี่ยวกับโครงข่ายอัจฉริยะซึ่งได้รับความสนใจมาจากทั้งหน่วยงานรัฐวิสาหกิจและเอกชน หรือ แม้แต่ในภาคอุตสาหกรรม และด้วยความนิยมนี้นำผลให้เทคโนโลยีด้านการกักเก็บพลังงานขนาดใหญ่มีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง พิจารณาควบคู่ไปกับต้นทุนในการก่อสร้างและการลงทุนแล้วทำให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำเทคโนโลยีด้านการกักเก็บพลังงานขนาดใหญ่โดยเฉพาะแบตเตอรี่มาประยุกต์ใช้งานควบคู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว หรือแม้แต่ในระบบส่งไฟฟ้าก็ตาม เพื่อเสริมความมั่นคงและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าทั้งระบบจำหน่ายและระบบส่ง ด้วยเหตุนี้จึงมีการผลักดันแนวคิดในการจัดตั้งไมโครกริดซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในอนาคตอันใกล้ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ

แม้ว่าในปัจจุบันนั้นการผลิตไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่มีการรวมศูนย์สามารถตอบสนองต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในวงกว้างได้เป็นอย่างดี แต่ด้วยข้อจำกัดที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการสร้าง/ขยายโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้จึงเป็นแนวทางในการสนับสนุนให้มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวและพลังงานทดแทนต่างๆ มากขึ้น เช่น การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาของผู้ใช้ไฟฟ้า โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ ที่อาศัยทรัพยากรธรรมชาติในการผลิตไฟฟ้าซึ่งถือว่าเป็นพลังงานสะอาด เพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียน และเพิ่มความเชื่อถือได้แก่ระบบจำหน่ายได้ โดยเฉพาะในบางเขตของการใช้ไฟฟ้าที่เป็นพื้นที่ป่าซึ่งไม่สามารถก่อสร้างเสาส่งไฟฟ้าในพื้นที่นั้นได้ นอกจากนั้นพื้นที่ป่ามักจะได้รับผลกระทบจากภัยพิบัติทางธรรมชาติทำให้เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับหรือขัดข้องอยู่บ่อยครั้ง อย่างไรก็ตามพลังงานหมุนเวียนนั้นก็ยังมีข้อจำกัดนั่นก็คือความผันผวนในการผลิตกำลังไฟฟ้าซึ่งส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าหลักเช่นกัน เพื่อให้ตอบสนองต่อเป้าหมายในหลากหลายมิติทั้งความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่าย การรองรับการเติบโตของการใช้พลังงาน การเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียน และการเชื่อมต่อระบบส่ง ดังนั้นการศึกษาและวิจัยด้านไมโครกริดจึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจและสำคัญ เพื่อให้ทราบถึงวิธีการที่ทำให้อุปกรณ์ทั้งที่มีอยู่ในระบบ

เดิมและที่จะติดตั้งเพิ่มเติม เช่น ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ ในไมโครกริด นั้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี

ไมโครกริดนั้นมีนิยามที่แตกต่างกันออกไปทั่วโลก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงขอยกนิยามของทาง CIGRE C6.22 [4] ซึ่งให้นิยามว่า ไมโครกริด คือ ระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยภาระทางไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวรวมถึงพลังงานทดแทนต่างๆ และระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งระบบไฟฟ้างกล่าวสามารถทำงานควบคู่ไปกับระบบไฟฟ้าหลักที่มีขนาดใหญ่กว่ามากได้ หรือเรียกได้ว่าเป็นระบบไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีการจ่ายไฟจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กภายในระบบที่เพียงพอต่อภาระทางไฟฟ้าในระบบขนาดเล็กๆ นั้นได้ โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวและระบบกักเก็บพลังงานสามารถเพิ่มความเชื่อถือได้ให้แก่ระบบไฟฟ้าขนาดเล็กนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นไมโครกริดจึงสามารถทำงานได้แม้จะไม่ได้มีการเชื่อมต่ออยู่กับโครงข่ายหลัก องค์ประกอบและหลักการที่กล่าวมานั้นแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 ด้วยหลักการนี้จึงทำให้การศึกษาเกี่ยวกับการทำงานในโหมดต่างๆ ของไมโครกริดนั้นมีความน่าสนใจรวมถึงการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในไมโครกริดและเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อให้การทำงานของไมโครกริดนั้นสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของไมโครกริด [4]

ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่นั้นถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากสำหรับไมโครกริด เพื่อช่วยให้การทำงานในโหมดต่างๆ ของไมโครกริดสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม ได้แก่ โหมด

เชื่อมต่อกับโครงข่าย (Grid-Connected Mode) โหมดแยกตัวอิสระ (Islanding Mode) การเปลี่ยนสถานะจากโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระ (Grid-Connected Mode to Islanding Mode Transition) และโหมดการทำงานที่ท้าทายมากที่สุดนั่นก็คือการเปลี่ยนสถานะจากโหมดแยกตัวอิสระไปยังโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่าย หรือ การรีซิงโครไนซ์ (Resynchronization) รายละเอียดจะได้มีการกล่าวถึงในบทที่ 3 ซึ่งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ประกอบไปด้วย ระบบการแปลงกำลัง (Power Conversion System, PCS) ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System) และแบตเตอรี่ (Battery) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่โดยที่มีอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter, VSI) เป็นอุปกรณ์แปลงผันกำลัง เนื่องด้วยต้นกำเนิดของแรงดันขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ คือ แรงดันกระแสตรงจากแบตเตอรี่ นอกจากนั้น VSI ยังมีความสามารถที่เหมาะสมต่อการควบคุมแรงดันกระแสสลับขาออกได้เพื่อสามารถทำงานได้ตามโหมดการทำงานของไมโครกริดกระแสสลับได้อย่างเหมาะสม ส่วนที่จะทำให้ระบบกักเก็บพลังงานทำงานได้ตามฟังก์ชันที่ต้องการก็คือระบบควบคุมของระบบการแปลงกำลังซึ่งจะต้องได้รับการออกแบบให้สามารถทำงานที่เหมาะสมตามฟังก์ชันได้ และง่ายต่อการใช้งานของผู้ดูแลระบบไฟฟ้าไมโครกริดนั้นๆ ดังนั้นการทำงานเสมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครไนซ์ (Virtual Synchronous Generator) จึงถูกพิจารณาให้กับการทำงานของระบบการแปลงผันกำลัง ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้เพื่อใช้ในการคำนวณนั้นระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานจะรับค่าจากเครื่องมือวัด ตัวแปรทางไฟฟ้าดังกล่าว ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า มุมเฟสของแรงดัน ความถี่ของระบบไฟฟ้า เป็นต้น เมื่อสัญญาณเหล่านี้ผ่านการคำนวณภายในระบบควบคุมแล้ว ระบบควบคุมการแปลงกำลังจะสั่งการไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อให้การทำงานตามฟังก์ชันที่ต้องการนั้นสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องในแต่ละโหมดการทำงานของไมโครกริด จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงถึงความสำคัญในการศึกษาและค้นคว้าหาความรู้เกี่ยวกับการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ เพื่อให้โหมดการทำงานของไมโครกริดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมและราบรื่น

แต่เนื่องจากไมโครกริดบางแห่งนั้นมีการสั่งการจากระบบกักเก็บพลังงานที่ถูกติดตั้งไกลออกไปจากจุด PCC ดังนั้นในการเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงานของไมโครกริดที่สำคัญอย่างการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดนั้นจะต้องทำการสั่งการแบบระยะไกล หรือเรียกว่า การรีซิงโครไนซ์ระยะไกล (Remote Resynchronization) ผ่านระบบสื่อสาร ดังนั้นการวัดค่าทางไฟฟ้าส่งมายังระบบควบคุมแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานที่ไกลออกไปนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงานรูปแบบดังกล่าว และด้วยในปัจจุบันนั้นมีเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ทันสมัยและมีความ

แม่นยำสูง เช่น Phasor Measurement Unit (PMU) ซึ่งมีราคาที่ไม่สูง และนอกจากจะมีความแม่นยำในการวัดแล้วยังมีการควบคุมการทำงานของ PMU แต่ละตัวให้มีความสอดคล้องทางเวลาให้ตรงกัน (Time synchronized) ผ่านสัญญาณจีพีเอส (Global Positioning System, GPS) เดียวกัน นั่นก็คือ PMU ทุกตัวที่ติดตั้งนั้นทำงานบนพื้นฐานเวลาเดียวกัน และ PMU ยังสามารถประทับเวลาที่ทำการวัด (Time Stamp) ทำให้ทราบได้ถึงเวลาที่แตกต่างกันระหว่าง PMU แต่ละตัวในขณะวัดสัญญาณเวลาการกระทำนี้จะทำให้ทราบได้ถึงเวลาในการส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ควบคุมในระบบไมโครกริดได้นั่นเอง และเพื่อให้การทำงานของระบบควบคุมมีความถูกต้องมากที่สุดจึงมีการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมสำหรับไมโครกริด โดยได้คำนึงถึงเวลาในการส่งสัญญาณทางไฟฟ้าต่างๆ จากอุปกรณ์วัดไปยังอุปกรณ์ทางไฟฟ้าอื่นๆ รวมถึงระบบควบคุม ที่อยู่ไกลออกไปอย่างมีนัยยะผ่านระบบสื่อสารในระบบไมโครกริด ความล่าช้าในการส่งสัญญาณที่เกิดขึ้นนี้หรือเวลาประวิงจากระบบสื่อสารนั้นอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการทำงานเพราะอุปกรณ์ควบคุมได้รับข้อมูลที่ล่าช้าไปจากข้อมูลจริงซึ่งสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ทำให้การทำงานบางฟังก์ชันที่สำคัญเช่น การรีซิงโครไนซ์ระยะทางไกลของไมโครกริดไม่สามารถทำได้ เพราะมีความจำเป็นที่จะต้องใช้สัญญาณ ณ เวลานั้นในการปรับปรุงแรงดันของไมโครกริดให้เป็นไปตามเงื่อนไขมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดกำหนดไว้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเวลาประวิงในระบบสื่อสาร เพื่อให้การรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดสามารถทำได้อย่างราบรื่นคือไม่เกิดไฟดับเพื่อเป็นการเพิ่มความเชื่อถือได้ให้แก่ระบบไฟฟ้าได้

1.1 ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการเปลี่ยนผ่านโหมดอย่างราบรื่นของไมโครกริดและการทำงานของระบบควบคุมวงจรแปลงผันกำลังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

จากที่กล่าวมาข้างต้นเห็นได้ว่าวงจรแปลงผันกำลังทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีความยืดหยุ่นในการควบคุมให้สามารถมีลักษณะสมบัติที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันได้สำหรับการประยุกต์ใช้งานในไมโครกริด นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมให้มีลักษณะสมบัติเสมือนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครไนส์ได้ เพื่อให้การทำงานของไมโครกริดมีความสมบูรณ์แบบยิ่งขึ้นและง่ายต่อความเข้าใจและการดูแลระบบไมโครกริดของผู้ดูแลระบบ ซึ่งก็มีบทความและงานวิจัยมากมายที่ศึกษาในการทำงานของไมโครกริดร่วมกับการทำงานของเครื่องกำเนิดกระจายตัวและ/หรือระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ในการทำงานของไมโครกริด

งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาเพื่อต่อยอดงานวิจัย [11] ซึ่งได้ศึกษาถึงการทำงานต่างๆของไมโครกริดและระบบป้องกันสำหรับไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนโดยมีโครงสร้างและข้อมูลของโครงการไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนจาก [7] และแนวคิดในการควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ [9] ทำงานในรูปแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยทฤษฎีการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [5], [15] แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัย [11] ยังไม่ได้กล่าวถึงมาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนว่าควรจะเป็นอย่างไร รวมถึงไม่ได้ตรวจจับมมเฟสด้วยเวกเตอร์เฟสล็อกกลูป และยังไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบของเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากระบบสื่อสารเพื่อส่งสัญญาณจากอุปกรณ์วัด ความถี่ มุมเฟส และขนาดของแรงดันทางด้านโครงข่ายที่จุด PCC ส่งมายังระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ซึ่งอยู่ห่างจากจุด PCC ไปเป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร งานวิจัยฉบับนี้ได้สังเกตเห็นถึงปัญหาดังกล่าวและได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังต่อไปนี้

1.1.1 การทำงานเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Virtual Synchronous Generator)

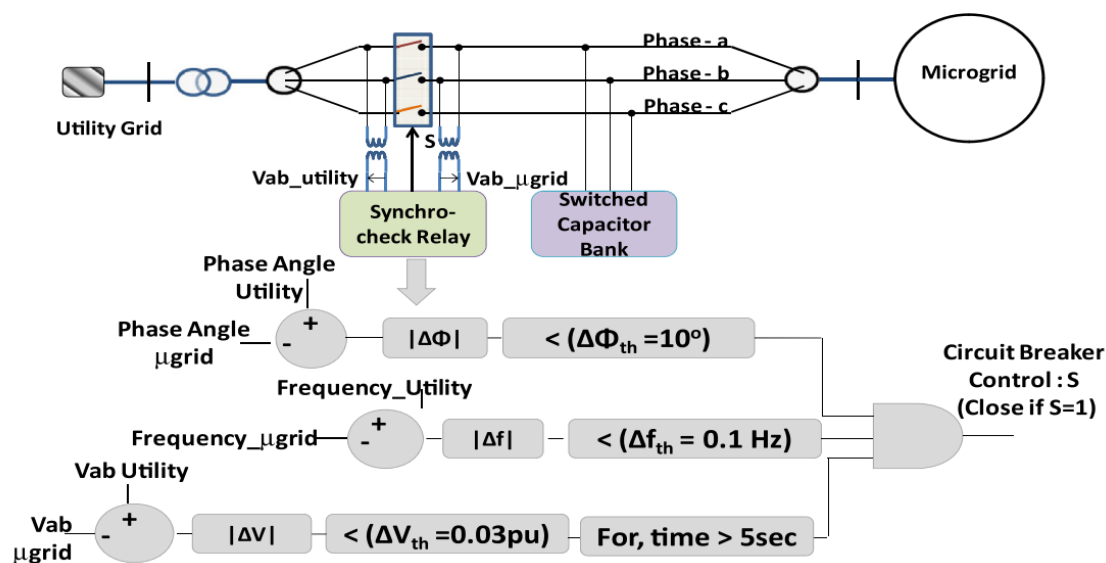
คอนเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่นั้นเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสถิตซึ่งมีการทำงานที่ต่างกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ทำงานอย่างมีพลวัต แต่อย่างไรก็ตามระบบแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่สามารถควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์มีลักษณะการทำงานเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ด้วยหลักการจากงานวิจัย [11] และทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [5] ซึ่งเสนอหลักการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ต่อขนานร่วมกันในระบบด้วยหลักการรูปความถี่-กำลังจริง นอกจากนี้ยังมีการบ่อนค่าความถี่อ้างอิง (Load Reference) ซึ่งสามารถกำหนดความสำคัญในการจ่ายกำลังให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อขนานกันอยู่ในระบบได้โดยไม่ต้องพึ่งระบบสื่อสาร [12] รวมไปถึงการทำงานในโหมดพร้อมจ่าย (Spinning Reserve) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วย งานวิจัย [19], [22] ได้นำเสนอการนำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายสถิตให้สามารถทำงานเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้แต่ก็ไม่ได้มีการนำเสนอการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในโหมดการทำงานของไมโครกริด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้แนวคิดในการควบคุมให้ระบบควบคุมการแปลงผันของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ให้ทำงานเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อความสะดวกในการทำงานของผู้ดูแลระบบไฟฟ้าซึ่งคุ้นเคยกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับการทำงานในโหมดต่างๆ ของไมโครกริด โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของการควบคุมในบทที่ 2

1.1.2 การทำงานในโหมดการเปลี่ยนผ่านโหมดของไมโครกริดระหว่างโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย และโหมดแยกตัวอิสระ

งานวิจัย [20] ได้นำเสนอการทำงานในโหมดต่างๆ ของไมโครกริดทั้งโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย โหมดแยกตัวอิสระ และโหมดการเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงานของไมโครกริด การเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงานของไมโครกริดนั้นได้มีการศึกษาทางวิศวกรรมเพื่อให้ทำได้อย่างราบรื่นคือไฟไม่ดับ รวมไปถึงการเปลี่ยนผ่านพลังงานระหว่างโครงข่ายหลักซึ่งเป็นผู้จัดตั้งโครงข่าย และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระจายตัว หรือระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ซึ่งทำงานเป็นผู้จัดตั้งระบบไมโครกริด มีงานวิจัยหลายฉบับที่นำเสนอระบบควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ได้แก่ งานวิจัย [8] นำเสนอการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดด้วยหลักการสั่นพ้อง (Resonance) ของกระแส งานวิจัย [23] ได้นำเสนอถึงการเปลี่ยนผ่านโหมดของไมโครกริดเฟสเดียว งานวิจัย [9], [21] ได้นำเสนอรูปแบบของระบบควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในการช่วยจ่ายกำลังให้กับไมโครกริดแต่เมื่อมีการเปลี่ยนผ่านโหมดของไมโครกริดระบบควบคุมจะเปลี่ยนไปใช้การควบคุมอีกลักษณะหนึ่งต่างจากขณะทำงานในการสนับสนุนการจ่ายกำลังให้แก่ระบบไฟฟ้า ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนของการทำงานด้วยระบบการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และไม่ราบรื่นในการเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงานของไมโครกริด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาถึงเงื่อนไขตามมาตรฐานที่มีความเป็นสากลสำหรับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด งานวิจัย [24] ซึ่งเป็นบทความที่ได้ทำการรวบรวมถึงวิธีการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดด้วยเทคนิคที่หลากหลายและมาตรฐานในการรีซิงโครไนซ์ งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำมาตรฐาน IEEE1547-2018 [6] มาใช้ในการกำหนดเงื่อนไขในการจำลองการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน โดยมีเงื่อนไขและการตรวจจับสัญญาณเปรียบเทียบได้ดัง รูปที่ 2 ซึ่งการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดนั้นไม่สามารถใช้มาตรฐานเดียวกับการรีซิงโครไนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าหลักได้ [13], [18] นอกจากนี้งานวิจัย [13] ยังได้มีการนำอุปกรณ์ตรวจสอบการรีซิงโครไนซ์ (Synchronization-Check Relay) ซึ่งถูกติดตั้งที่จุด PCC ทำการสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อทำการปิดวงจรเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ ซึ่งมีข้อดีทั้งสามารถทำการรีซิงโครไนซ์ได้อัตโนมัติและรวดเร็ว และยังป้องกันการรีซิงโครไนซ์ที่ผิดพลาดในการปิดวงจรตัดต่อที่จุด PCC ในขณะที่แรงดันทั้งสองที่เปรียบเทียบกันแล้วไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ได้นั้นเอง อย่างไรก็ตามในการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดจะต้องทำการตรวจจับมูมเฟสที่แตกต่างระหว่างระบบไฟฟ้าหลักและไมโครกริด เพื่อให้ระบบควบคุมทางไมโครกริดสามารถปรับแต่งแรงดันให้มีมูมเฟส และ

ความถี่ตรงตามเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ได้ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำหลักการเวกเตอร์เฟสล็อก
 ลูบจากงานวิจัย [15] มาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับมุมเฟสที่ต่างกันของแรงดันโครงข่ายและไมโครกริด
 ให้กับระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ เพื่อส่งต่อไปยังส่วน
 ควบคุมความถี่-กำลังจริงในการปรับแต่งแรงดันของไมโครกริดดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 3
 ต่อไป



รูปที่ 1.2 รูปแบบของการรีซิงโครไนซ์ตามเงื่อนไขที่มาตรฐาน IEEE1547-2018 กำหนดสำหรับ
 กำลังไฟฟ้ามากกว่า 500 กิโลวัตต์ [24]

1.1.3 เวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากระบบสื่อสาร

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดระยะไกล (Remote Resynchronization) จึงมีความจำเป็นในการพิจารณาถึงผลกระทบในการส่งค่าตัวแปรจากเครื่องมือ
 วัดมายังระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ซึ่งไกลจากจุด PCC ซึ่ง
 การส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ตัวหนึ่งไปยังอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งในระบบไมโครกริดจำเป็นจะต้องใช้
 ระบบสื่อสารเป็นสื่อกลางในการกระทำการดังกล่าว การส่งสัญญาณนี้จะเกิดเวลาประวิงจากอุปกรณ์
 ภายในระบบสื่อสารระหว่างการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังอุปกรณ์รับปลายทางขึ้น งานวิจัย [17]
 ได้วิจัยถึงผลกระทบของเวลาประวิงที่เกิดขึ้นภายในระบบสื่อสารที่มีต่อการวัดสัญญาณในการทำงาน
 ฟังก์ชัน 87 ของรีเลย์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ต้องการความเร็วมากในการตรวจจับสัญญาณต้นทางให้ได้ค่าที่
 ตรงกับความเป็นจริง ณ เวลานั้นมากที่สุดซึ่งมีลักษณะการทำงานที่ใกล้เคียงกับการรีซิงโครไนซ์
 งานวิจัย [16] ได้วิจัยถึงผลกระทบของเวลาประวิงที่เกิดจากระบบสื่อสารต่อการซิงโครไนซ์ระยะไกล

ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดีเซลซึ่งห่างไกลจากไมโครกริดด้วยระยะทางถึง 100 กิโลเมตรผ่านระบบสื่อสาร Internet Protocol (IP) และใช้การวัดสัญญาณด้วย PMU ซึ่งงานวิจัยทั้งสองแสดงให้เห็นว่าเวลาประวิงนั้นมีผลกระทบต่อกริดสัญญาณตั้งต้นส่งผลให้การทำงานตามฟังก์ชันที่ต้องการของอุปกรณ์ซึ่งอยู่ไกลออกไปเกิดความผิดพลาด

1.1.4 อุปกรณ์วัดแรงดันโครงข่ายที่ทราบได้ถึงเวลาประวิงจากการส่งสัญญาณผ่านระบบสื่อสาร

งานวิจัยที่ [16] ได้นำเสนอการวัดสัญญาณเพื่อทำการซิงโครไนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งอยู่ห่างจากไมโครกริดด้วย PMU ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดความถี่ มุมเฟส และขนาดของแรงดันได้ นอกจากนี้ยังมีการทำงานของ PMU แต่ละตัวในพื้นที่ด้วยเวลาพื้นฐานเดียวกัน และ PMU ยังมีการประทับเวลาในการวัดค่าสัญญาณแต่ละครั้งทำให้ระบบควบคุมการแปลงผันของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่นำเสนอสามารถทราบได้ถึงค่าความต่างของเวลาที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณมายังระบบควบคุมหรือเวลาประวิงที่เกิดจากระบบสื่อสารนั่นเองซึ่งจะเป็นตัวแปรที่นำไปใช้ในการปรับปรุงหรือชดเชยมุมเฟสให้สัญญาณทางด้านไมโครกริดได้นั่นเอง

1.2 สรุปปัญหาและข้อจำกัดในงานวิจัยที่ผ่านมา

1) งานวิจัย [11], [12], [19] และ [22] ได้นำเสนอรูปแบบในการควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้งานอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ในการแปลงผันกำลังซึ่งรวมถึงการควบคุมแรงดันและความถี่ด้วยรูปความถี่ และรูปแบบการทำงานเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งเป็นแหล่งจ่ายสถิต แต่ไม่ได้มีการแสดงการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเปลี่ยนผ่านโหมดของไมโครกริด

2) งานวิจัย [9], [11], [20] และ [21] นำเสนอแนวคิดและการควบคุมการทำงานของไมโครกริดในโหมดของการเปลี่ยนผ่านโหมดของไมโครกริดทั้งสองโหมดไป-กลับ ด้วยตัวควบคุมที่แยกกันระหว่างการทำงานโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย (Grid-Connected) กับโหมดของการเปลี่ยนผ่านโหมดของไมโครกริด (Transition) ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการทำงานดังกล่าวรวมถึงไม่แสดงให้เห็นถึงการอธิบายการทำงานในช่วงของการเปลี่ยนผ่านโหมดของไมโครกริดอย่างราบรื่น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและจำลองการทำงานดังกล่าวตัวควบคุมตัวเดียวกันและเพื่อให้เห็นว่าระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถทำงานได้ในทุกโหมดของไมโครกริดอย่างราบรื่นและเหมาะสม ได้มีการอธิบายกลไกการเปลี่ยนผ่านโหมดของไมโครกริดที่ค่อนข้างเป็นพลวัต

3) งานวิจัย [11], [20] และ [21] นำเสนอระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่สำหรับการทำงานในโหมดของการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดแต่ไม่มีการกำหนดมาตรฐานหรือเงื่อนไขสำหรับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด ซึ่งแตกต่างจากมาตรฐานในการซิงโครไนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังที่กล่าวไว้ใน [13] และไม่ได้กล่าวถึงการพิจารณาถึงผลกระทบจากเวลาประวิงในการส่งสัญญาณผ่านระบบสื่อสารที่มีผลกระทบต่อกริดรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้อ้างอิงมาตรฐาน IEEE1547-2018 [6], [24] มาเป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน และวิเคราะห์ถึงผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารด้วยข้อมูลภาคพื้นทีของระบบไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

4) งานวิจัย [16] ได้นำเสนอการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบดีเซลและพิจารณาถึงเวลาประวิงจากระบบสื่อสารในการวัดแรงดันของระบบไฟฟ้าหลักมายังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่อยู่ไกลออกไป แต่ก็ไม่ได้มีการกำหนดเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ ซึ่งเงื่อนไขในการรีซิงโครไนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสนั้นมีความแตกต่างไปจากการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จะได้นำหลักการที่งานวิจัย [16] ได้นำเสนอมาประยุกต์ใช้กับการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนให้เป็นไปตามขอบเขตตามมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด

1.3 วัตถุประสงค์

- 1) เสนอแนวคิดในการควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อกระบวนการรีซิงโครไนซ์ระบบไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน
- 2) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด และออกแบบสมรรถนะของระบบควบคุมที่นำเสนอให้มีความไวในการทำงาน
- 3) วิเคราะห์ผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารในการตรวจจับแรงดันสายส่ง
- 4) นำเสนอวิธีการชดเชยมุมเฟสลำหลังของแรงดันอ้างอิงระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์ที่เกิดจากเวลาประวิงของระบบสื่อสาร

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

- 1) นำเสนอตัวควบคุมสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน
- 2) พิจารณาถึงผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารต่อการตรวจวัดแรงดันสายส่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เงื่อนไขอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เท่ากับศูนย์ ($df/dt=0$)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) วิธีการควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สามารถทำการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนได้อย่างราบรื่น
- 2) ระบบควบคุมที่สามารถชดเชยมุมเฟสให้กับแรงดันอ้างอิงของระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน เพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารต่อการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับแบบจำลองทางพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
- 2) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอย่างราบรื่น และลักษณะของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน
- 3) ออกระบบควบคุมสำหรับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด
- 4) จำลองการทำงานของระบบควบคุมที่ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory ด้วยข้อมูลของระบบไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่ได้ศึกษามา
- 5) ศึกษาผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารต่อการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน
- 6) วิเคราะห์ผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารต่อการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน และจำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory

- 7) ศึกษาแนวทางในการลดเซมูมเฟสลับหลังของแรงดันสายส่งที่เกิดจากเวลาประวิงของระบบสื่อสารต่อกระบวนการรีซิงโครไนซ์ระยะไกล
- 8) จำลองการลดเซมูมเฟสลับหลังของแรงดันสายส่งที่เกิดจากเวลาประวิงของระบบสื่อสารต่อกระบวนการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory
- 9) สรุปผลการทดสอบและเขียนวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

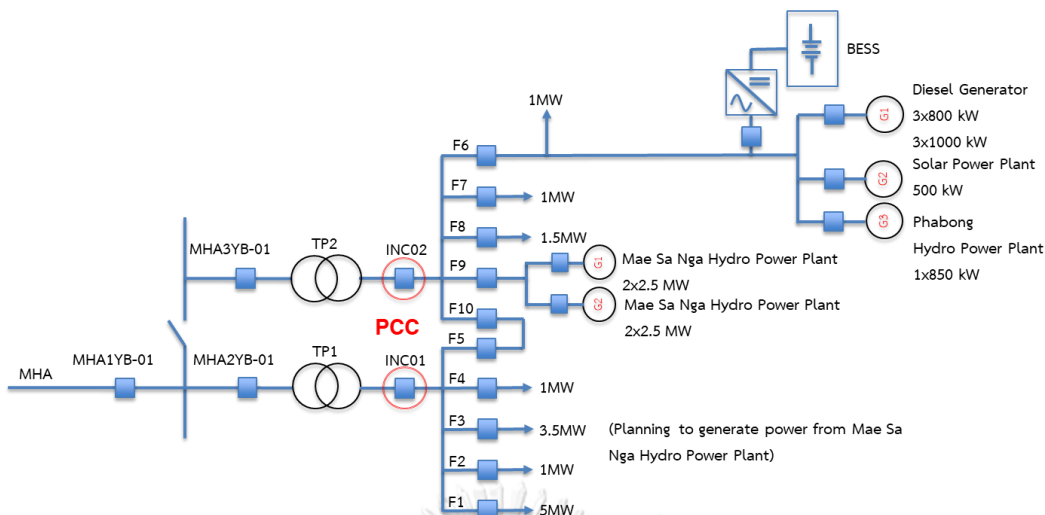
โครงสร้างการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่สำหรับไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนเป็นโครงการนำร่องทางด้านสมาร์ตกริดที่สาธิตการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในระดับโครงข่ายทำงานร่วมกับแหล่งผลิตกระจายตัวภายในพื้นที่ อาทิเช่น พลังน้ำ และ พลังงานแสงอาทิตย์โดยตั้งเป้าหมายไว้ที่การทำงานในโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย (Grid-Connected) และ โหมดแยกตัวอิสระ (Islanding) ทั้งนี้สภาวะการทำงานชั่วคราวในการถ่ายโอนระหว่างโหมดทั้งสองที่กล่าวมาอย่างราบรื่นโดยไม่เกิดไฟดับ ถือเป็นประเด็นที่ท้าทายสำหรับงานวิจัย

ในบทนี้จะนำเสนอถึงภาพรวมของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน พร้อมทั้งฟังก์ชันการทำงานหลัก หลังจากนั้นจะกล่าวถึงโครงสร้างการควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่รองรับฟังก์ชันการทำงานดังกล่าวของไมโครกริด

2.1 โครงสร้างไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน [11], [25]

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยนำเสนอแนวคิดของไมโครกริดสำหรับอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน โครงการดังกล่าวนอกจากจะมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าแล้วยังเป็นโครงการนำร่องของแผนที่น่าสนใจโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะซึ่งจะขยายผลไปยังที่อื่นๆด้วย แนวคิดของไมโครกริดดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นโครงข่ายของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ระบบจำหน่ายภายในไมโครกริดนั้นประกอบไปด้วย 10 ฟีดเดอร์ (Feeder) คือ F1-F10 ซึ่งถูกแยกออกเป็นสองกลุ่ม (2 Bus) ด้วยสายเชื่อมต่อ (Tie-Line) ของฟีดเดอร์ F5 และ F10 ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนมีแหล่งผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ประกอบด้วย โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาขนาด 10 เมกะวัตต์ (ฟีดเดอร์ F9) โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่องขนาด 850 กิโลวัตต์ (ฟีดเดอร์ F6) ในอนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.85 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขนาด 500 กิโลวัตต์ (ฟีดเดอร์ F6) ในอนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ พร้อมกับระบบแบตเตอรี่ขนาด 4 เมกะวัตต์/1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง (ฟีดเดอร์ F6) และโรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอนขนาด 10 เมกะวัตต์ (ฟีดเดอร์ F9) มีค่าโหลตรวมสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 11 เมกะวัตต์



รูปที่ 2.1 แนวคิดไมโครกริดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนมีแหล่งผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ประกอบด้วย โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแม่สะงาขนาด 10 เมกะวัตต์ (พีตเตอร์ F9) โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กผาบ่องขนาด 850 กิโลวัตต์ (พีตเตอร์ F6) ในอนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.85 เมกะวัตต์ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผาบ่องขนาด 500 กิโลวัตต์ (พีตเตอร์ F6) ในอนาคตจะขยายขนาดเป็น 3.5 เมกะวัตต์ พร้อมกับระบบแบตเตอรี่ขนาด 4 เมกะวัตต์/1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง (พีตเตอร์ F6) และโรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอนขนาด 5.4 เมกะวัตต์ (พีตเตอร์ F6) มีค่าโหลดรวมสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 11 เมกะวัตต์

จากข้อมูลงานวิจัย [11], [25] ซึ่งได้กล่าวถึงระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้ออกแบบไว้ให้มีขนาด 4 เมกะวัตต์/1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ถึงแม้ว่าจะไม่ได้สามารถรองรับโหลดสูงสุดของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนไว้ได้ทั้งหมด แต่ก็สามารถลดปัญหาไฟดับได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากช่วงฤดูที่เกิดโหลดสูงสุด (ประมาณ 14 เมกะวัตต์) จะอยู่ในช่วงฤดูร้อนซึ่งโหลดส่วนใหญ่เป็นเครื่องปรับอากาศ ในขณะที่ในช่วงฤดูฝนและฤดูหนาวจะมีโหลดไม่มากเท่าใด (น้อยกว่า 6 เมกะวัตต์) นอกจากนี้ในช่วงฤดูฝนน้ำในอ่างเก็บน้ำจะมีปริมาณมากทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังน้ำได้เต็มที่ตามพิกัดสายส่ง 8 เมกะวัตต์ ประกอบกับจากข้อมูลพบว่าปัญหาไฟดับเนื่องจากเกิดความเสียหายของสายส่งจะมีสถิติเกิดขึ้นในช่วงฤดูฝน อาจจะถูกกล่าวโดยสรุปได้ว่าฤดูฝนเป็นช่วงเวลาที่เกิดปัญหาไฟดับเกิดบ่อยครั้ง แต่ว่าโดยสภาพอากาศเย็นในฤดูดังกล่าวทำให้มีความต้องการใช้ไฟฟ้าไม่สูงมากนัก และการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำสามารถมีกำลังการผลิตได้เต็มพิกัด ดังนั้นระบบกักเก็บพลังงานของอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนจึงถูกออกแบบให้มีการติดตั้งเป็นระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System: BESS) ชนิดลิเทียมไอออน (Li-Ion) ที่มี

ประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 85-90 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของแบตเตอรี่ที่ 4 เมกะวัตต์/ 1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง จึงเพียงพอที่จะช่วยบรรเทาปัญหาไฟดับได้อย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งในบทนี้จะได้กล่าวถึงการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ดังกล่าวต่อไป

เพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า (ลดค่า SAIFI) อินเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะต้องมีฟังก์ชันการทำงานและลักษณะสมบัติดังนี้

ก) วงจรแปลงผันทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ในโหมดควบคุมแรงดันนั้นต้องมีลักษณะสมบัติเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและทำงานได้ตามการควบคุมดรู๊ปและชดเชยควบคุมแรงดันอัตโนมัติ

ข) ในขณะการทำงานโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่อยู่ในสภาพพร้อมจ่ายอยู่เสมอ

ค) ช่วงของการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่สามารถเปลี่ยนผ่านระบบได้อย่างราบรื่นและรวดเร็วและสามารถแบ่งจ่ายกำลังไฟฟ้ร่วมกับแหล่งผลิตไฟฟ้ากระจายตัวในไมโครกริดได้ตามการควบคุมดรู๊ปความถี่กำลังจริง

ง) โหมดแยกตัวอิสระนั้นระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงานได้ตามการตั้งค่าของคุณสมบัติดรู๊ปความถี่กำลังจริงและโหลดอ้างอิง

จ) การรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดโดยเวกเตอร์เฟสล็อกกลู๊ปจะทำงานชั่วคราวในโหมดนี้ร่วมกับชดเชยควบคุมดรู๊ปควบคุมให้ความถี่ มุมเฟส และขนาดของแรงดันของไมโครกริดเป็นไปตามมาตรฐาน เพื่อให้ไมโครกริดสามารถเชื่อมต่อกับโครงข่ายได้ในขณะที่บัสมีไฟและสายส่งมีไฟ (Live Bus / Live Line) และกลับคืนสู่โหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายแบบพร้อมจ่ายได้ โดยมีผลตอบสนองสถานะชั่วคราวที่ราบเรียบในระหว่างช่วงเวลาของการเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงาน

เพื่อต่อยอดจากการออกแบบเชิงแนวคิดที่มีการนำเสนอไว้จากการศึกษา [11] งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงประเด็นในการเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงานของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนโดยเฉพาะการรีซิงโครไนซ์ ด้วยวิธีการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักสำหรับไมโครกริดทั้งในเรื่องของการทำงานอย่างราบรื่นของระบบควบคุมภายในคอนเวอร์เตอร์ และด้วยระยะทางจากจุด PCC ไปยังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่นั้นมีระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร ดังนั้นจึงควรที่จะทำการพิจารณาเรื่องของระบบสื่อสารในการส่งสัญญาณที่วัด

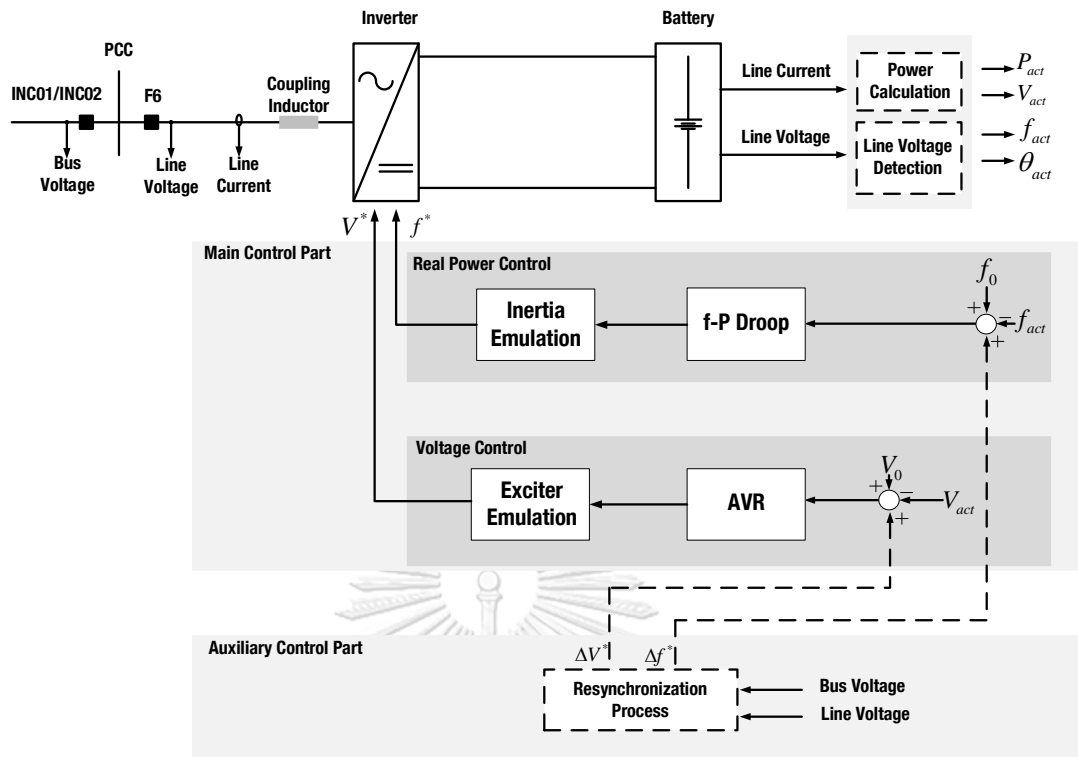
จากจุด PCC มายังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ว่ามีผลกระทบต่อการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่หรือไม่โดยเฉพาะในขณะทำการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด เพราะการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ไม่ตรงกับความเป็นจริงส่งผลให้ระบบควบคุมทำงานที่ผิดพลาดได้จากแรงดัน ความถี่ และมุมเฟสของระบบไฟฟ้าหลักที่รับมาใช้ในการควบคุมแรงดัน ความถี่ และมุมเฟสของไมโครกริดให้มีความแตกต่างของค่าเหล่านี้ให้เป็นที่ไปตามเงื่อนไขที่มาตรฐานกำหนด เพื่อให้การรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนสามารถทำงานได้อย่างราบรื่น

2.2 การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

วิธีการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานและลักษณะสมบัติดังที่ในหัวข้อก่อนหน้า โดยโครงสร้างของการควบคุมจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1) ส่วนควบคุมหลัก (Main Control) ประกอบด้วยส่วนควบคุมที่ทำให้มีลักษณะสมบัติเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครไนซ์ (Virtual Synchronous Generator, VSG) วงรอบควบคุมแรงดัน และวงรอบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานโดยอาศัยสมบัติของรูปความถี่-กำลัง (f-P Droop) ในการควบคุม ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมความถี่และการจ่ายกำลังขาออกตามลักษณะการทำงานของรูปความถี่-กำลังร่วมกับการป้อนค่าโหลดอ้างอิง (Load Reference) โดยมีรายละเอียดดังจะได้อธิบายต่อไป

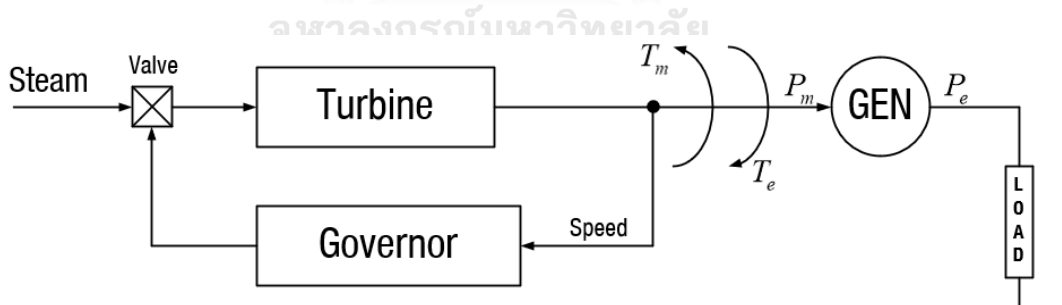
2) ส่วนควบคุมเสริม (Auxiliary Control) เป็นส่วนควบคุมวงรอบด้านนอกที่ทำงานก่อนที่จะส่งสัญญาณให้กับส่วนควบคุมหลักซึ่งเป็นส่วนควบคุมที่ต่อกัน ได้แก่ ส่วนควบคุมการรีซิงโครไนซ์ ซึ่งจะทำงานเฉพาะเมื่อมีการรีซิงโครไนซ์โดยมีเวกเตอร์เฟสล็อกkupทำหน้าที่ในการตรวจจับความต่างเฟสของไมโครกริดกับโครงข่ายไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ เพื่อกำหนดความถี่ Δf^* สำหรับการควบคุมความถี่ของไมโครกริดเทียบกับแรงดันของโครงข่ายไฟฟ้าให้เป็นที่ไปตามเงื่อนไขที่มาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดกำหนด รายละเอียดของส่วนควบคุมรองจะได้อธิบายถึงในบทที่ 3



รูปที่ 2.2 การควบคุมวงจรแปลงผันสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

2.2.1 การควบคุมความถี่ (Frequency Control) [5][11]

2.2.1.1 พลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบไอโซโครนัส (Dynamic of Isochronous Generator)



รูปที่ 2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังให้กับโหลด

การควบคุมความถี่ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วยการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสนั้นสามารถทำได้โดยการทำงานจากระบบควบคุมที่ถูกออกแบบให้ทำงานตามหลักการพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [5] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นรูปแบบอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบไอโซโครนัส

(Isochronous) ซึ่งกำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดโดยมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อมีโหลดค่าหนึ่งซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงได้ การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้ค่า T_e ซึ่งเป็นค่าแรงบิดทางไฟฟ้านี้มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นแรงบิดทางกล T_m ซึ่งมีค่าไม่เท่ากันจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วขึ้น กำลังงานทางกลของกังหัน P_m จะถูกควบคุมผ่านวงรอบควบคุมความเร็ว (ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) ที่จะปรับให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้า P_e ให้มากขึ้นหรือน้อยลง เมื่อโหลดในระบบ P_L เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างแปรผันตามกัน สมการทางกลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

$$T_m - T_e = M \frac{d\omega}{dt} \quad (2.1)$$

โดยที่ M คือลักษณะสมบัติความเฉื่อยทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เนื่องจากการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าจะถูกพิจารณาเทียบกับความถี่ ซึ่งจะอธิบายให้เข้าใจได้ง่ายกว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วโดยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความถี่สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง แรงบิด ความเร็ว

$$P = \omega_r t \quad (2.2)$$

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในช่วงเล็กๆรอบจุดทำงานสงบ (P_0, ω_0, T_0) จะได้ว่า

$$P = P_0 + \Delta P$$

$$\omega_r = \omega_0 + \Delta\omega_r \quad (2.3)$$

$$T = T_0 + \Delta T$$

จากสมการที่ (2.2) และ (2.3)

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta\omega_r)(T_0 + \Delta T) \quad (2.4)$$

ละเลยพจน์อันดับสูง จะได้ว่า

$$\Delta P = \omega_0 \Delta T + T_0 \Delta\omega_r \quad (2.5)$$

ดังนั้น

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 (\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} - T_{e0}) \Delta\omega_r \quad (2.6)$$

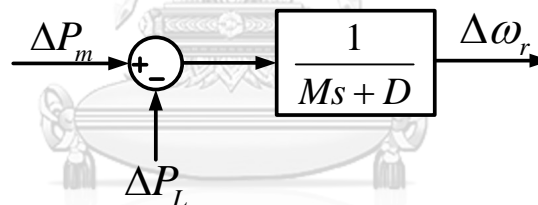
เนื่องจากที่สถานะอยู่ตัวแรงบิดทางกล T_{m0} และแรงบิดทางไฟฟ้า T_{e0} มีค่าเท่ากัน และพิจารณา ω_0 แบบต่อหน่วย (per unit) จะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้่าดังแสดงในสมการที่ (2.7)

$$\Delta P_m - \Delta P_e = (\Delta T_m - \Delta T_e) \quad (2.7)$$

กำลังไฟฟ้า ΔP_e ที่แยกระหว่างโหลดที่ไม่ขึ้นกับความถี่ ΔP_L และโหลดที่ขึ้นกับความถี่ $D\Delta\omega_r$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.8) โดยที่ D คือค่าคงที่ของโหลดที่ขึ้นกับความถี่ (Load Damping)

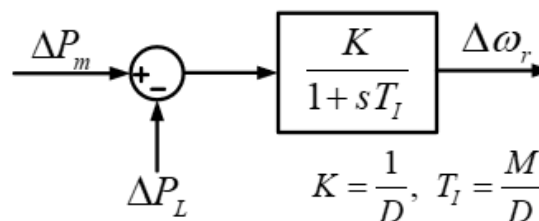
$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega_r \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.1) (2.7) และ (2.8) สามารถเขียนในรูปแบบบล็อกไดอะแกรมแสดงลักษณะสมบัติทางพลวัตระหว่างกำลังและความถี่ (ความถี่) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในส่วนควบคุมให้กับคอนเวอร์เตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรีได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนลำดับที่ 1 โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า $M = 1.5$ s และ $D = 8.5$ s



รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติทางพลวัตระหว่างกำลังจริงและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การทำงานของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.4 สามารถเขียนอธิบายในรูปแบบมาตรฐานได้ในพจน์ของอัตราขยาย (Gain) และค่าคงที่ทางเวลาได้ดังรูปที่ 2.5

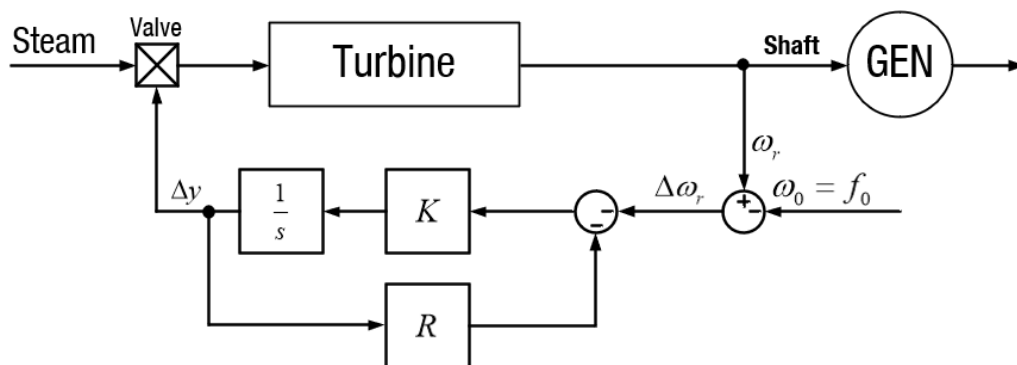


รูปที่ 2.5 ลักษณะสมบัติทางพลวัตระหว่างกำลังจริงและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในรูปมาตรฐาน

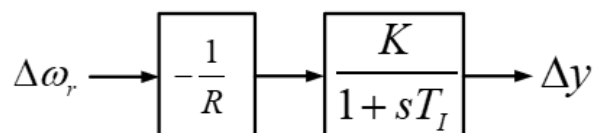
เมื่อพิจารณาถึงการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด ซึ่งการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไอโซโครนัสไม่สามารถใช้ได้ ในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตั้งแต่ 2 เครื่องเชื่อมต่ออยู่ในระบบเดียวกัน เพื่อลดปัญหาการแข่งขันในการแบ่งจ่ายโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นจึงมีการใช้หลักการควบคุมแบบปรับกำลังตามความถี่หรือที่เรียกกันว่าลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังไฟฟ้าซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1.2 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (f-P Droop Characteristic of Synchronous Generator)

การปรับลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และกำลังจริง โดยหลักการคือยอมให้มีความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตกลงตามเรกูลेशनของความถี่ (Speed Regulation) เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานร่วมกันได้โดยไม่เกิดการแข่งขันกันในการควบคุมความถี่



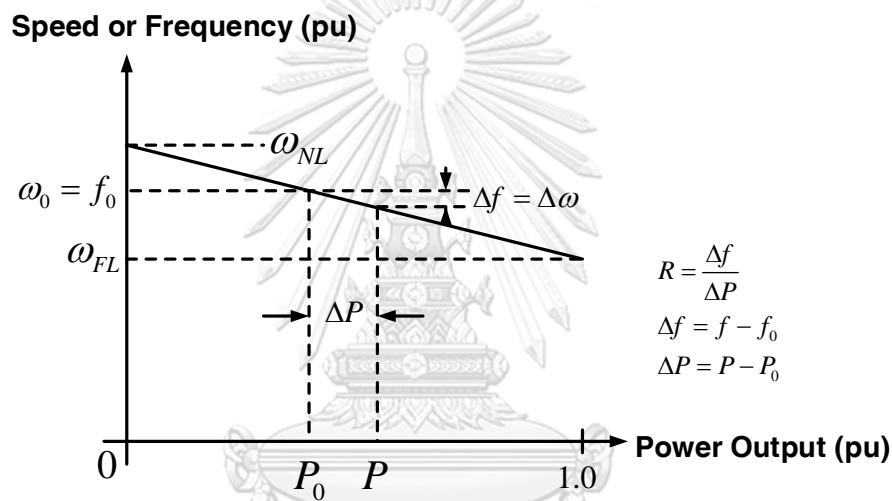
รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีชุดควบคุมของตัวขับเคลื่อนและลักษณะรูปความถี่-กำลังจริง



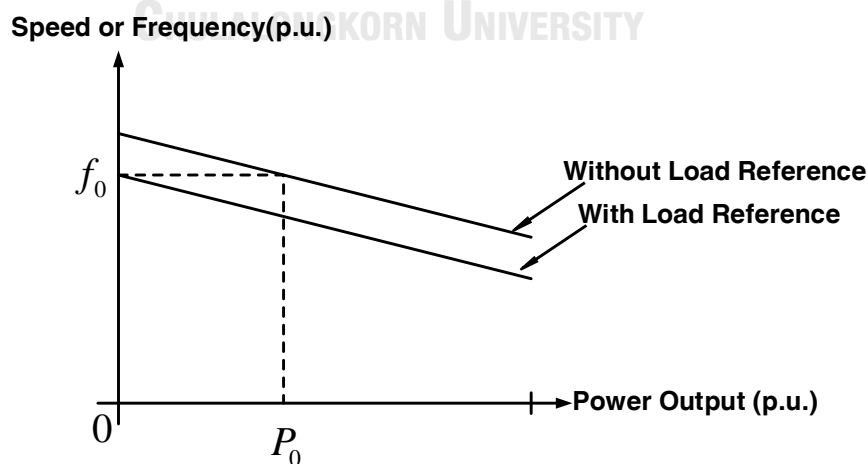
รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริง

รูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมกำลังจริงที่มีลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริง ลักษณะของกังหัน และพลวัตความเฉื่อยทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

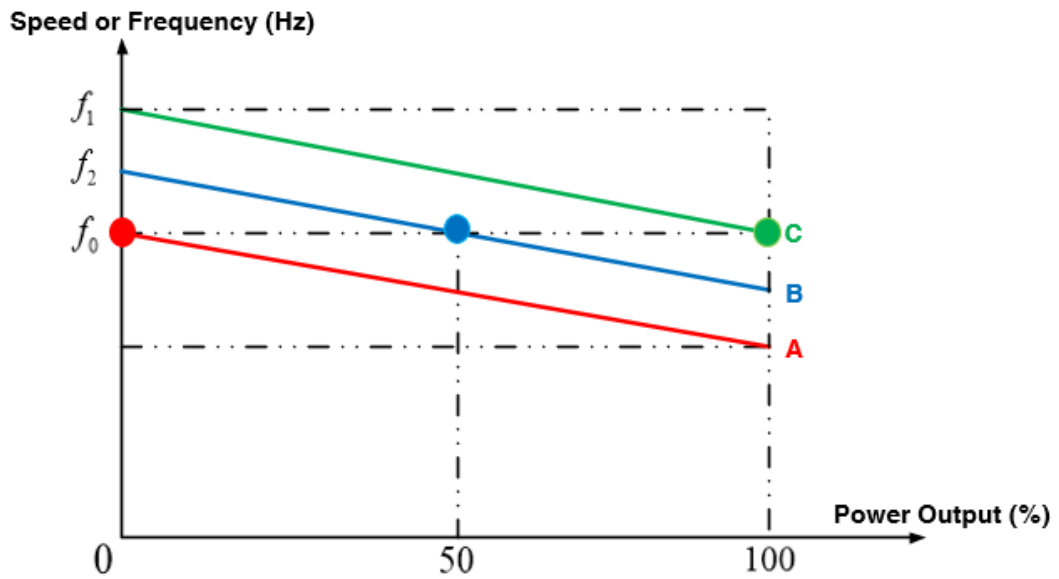
ซิงโครนัส การทำงานของชุดควบคุมกำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เพิ่มลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงเข้าไปที่ชุดควบคุมของตัวบังคับความเร็ว (Speed Governor Controller) การควบคุมค่าความเร็ว (Speed Regulation) จะถูกกำหนดโดยอัตราขยาย R ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือความถี่ กับกำลังจริง นอกจากนี้การทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงยังเพิ่มสมรรถนะในการปรับลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงด้วยการป้อนค่า โหลดอ้างอิง (Load Reference) ซึ่งเป็นตัวปรับค่าการทำงานในการจ่ายกำลังจริงสามารถกำหนดความสำคัญในการจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขนานกัน หรือกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในรูปแบบพร้อมจ่าย (Spinning Reserve) ได้



รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงในสถานะอยู่ตัว

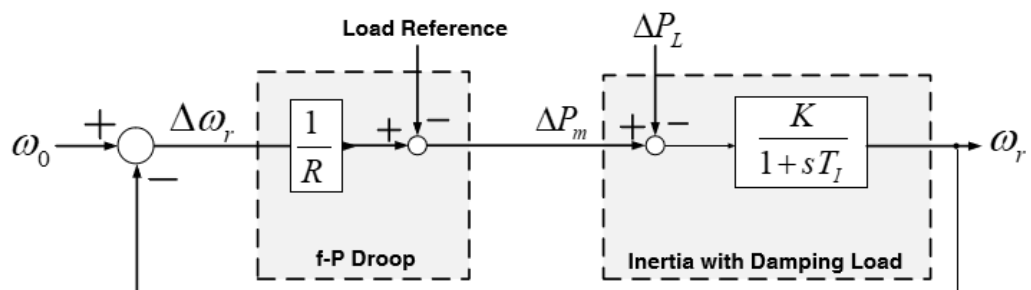


รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติของรูปความถี่-กำลังจริงเมื่อมีสัญญาณโหลดอ้างอิง (Load Reference)



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบลักษณะของคุณสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงที่มีการบ่อนค่าโหลดอ้างอิง

รูปที่ 2.9 และ 2.10 แสดงตัวอย่างการตั้งค่าโหลดอ้างอิง จะเห็นว่าลักษณะการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงกราฟ A B และ C มีอัตราการจ่ายกำลังจริงที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาที่จุดทำงานของระบบที่ความถี่ปกติ f_0 โดยการจ่ายกำลังของกราฟ C จะจ่ายเต็มพิกัดกำลังจริง 100% ในขณะที่กราฟ B จ่ายกำลังจริงที่ 50% ของพิกัด และกราฟ A ไม่จ่ายกำลังจริง กล่าวได้ว่ากราฟ C ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดไวที่สุด ในขณะที่กราฟ A จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดช้าที่สุด การกำหนดโหลดอ้างอิงจึงเป็นการให้ลำดับความสำคัญในการจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีลักษณะรูปความถี่-กำลังจริง และสามารถปรับตั้งให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทำงานแบบพร้อมจ่าย (Spinning Reserve) ได้อีกด้วย ชุดควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถเขียนในรูปแบบบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 รูปแบบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้นำมาเป็นหลักการของรูปความถี่-กำลังจริงในการควบคุมกำลังที่ระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรีง่ายและมีลักษณะเสมือนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Virtual Synchronous Generator) งานวิจัยนี้ได้ออกแบบค่า R ให้เหมาะสมกับระบบของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน โดยออกแบบตามข้อกำหนดเกี่ยวกับการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Operation Code) ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [26] และกำหนดให้มีค่า $R = 0.5$ เฮิร์ตซ์/เมกะวัตต์ หรือ 0.004 ต่อหน่วย

2.2.2 การควบคุมแรงดัน (Voltage Control) [5], [11]

2.2.2.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในการควบคุมแรงดัน

การควบคุมแรงดันอ้างอิงจากการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะพิจารณาจากการเหนี่ยวนำของแรงดันที่เกิดขึ้นกับขดลวดอาร์เมเจอร์สามเฟสจากลักษณะทางพลวัตของขดลวดสนามที่ถูกกระตุ้นดังสมการที่ (2.9)

$$\frac{V_f}{e_f} = \frac{K_D}{\tau_D s + 1} \quad (2.9)$$

โดยที่ค่าคงตัวเวลา τ_D จะขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าความต้านทานของขดลวดสนาม ทั้งนี้ค่าความเหนี่ยวนำในกรณีนี้คือผลรวมของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสนามและค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสนาม และ ขดลวดสเตเตอร์ สำหรับค่าอัตราขยาย K_D จะขึ้นกับลักษณะสมบัติการกระตุ้น (Magnetization Characteristic)

2.2.2.2 การควบคุมแรงดันด้วยตัวควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator; AVR) และ ตัวกระตุ้น (Exciter)

โดยทั่วไปการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีองค์ประกอบหลักคือ ตัวกระตุ้น (Exciter) และ ตัวควบคุมอัตโนมัติ (AVR) ซึ่งตัวกระตุ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวขยายกำลังสำหรับขดลวดสนามและมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังในสมการที่ (2.10) แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันกระตุ้นทางด้านโรเตอร์ e_f และแรงดันเฟสที่ปลายขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า V_R

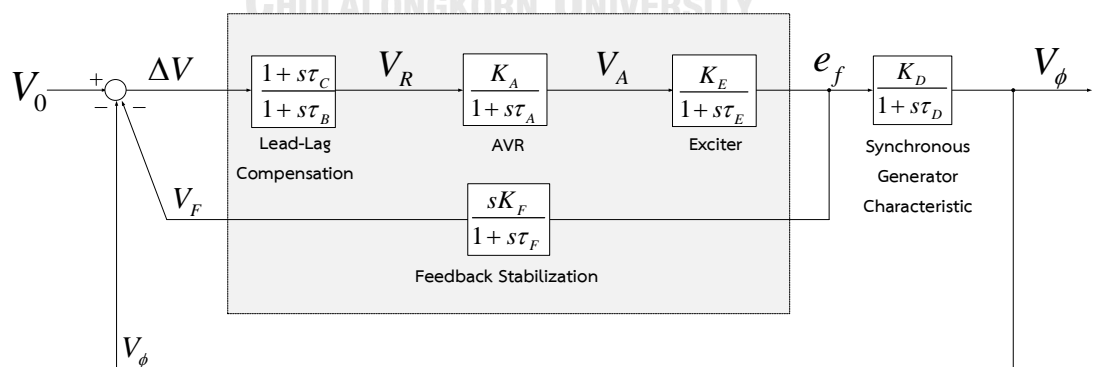
$$\frac{e_f}{V_R} = \frac{K_E}{\tau_E s + 1} \quad (2.10)$$

โดย K_E คืออัตราขยายกำลังซึ่งจะขึ้นกับค่าความต้านทานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้เป็นตัวกระตุ้น และลักษณะสมบัติการกระตุ้น สำหรับค่าคงตัวเวลา τ_E จะขึ้นกับค่าความต้านทานของตัวกระตุ้น ค่าความเหนียวนำของตัวกระตุ้น และ ลักษณะสมบัติการกระตุ้น

ตัวควบคุมอัตโนมัติ (AVR) โดยส่วนใหญ่จะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบอันดับหนึ่ง หรือเป็นแบบล้าหลัง-นำหน้า ดังแสดงใน สมการที่ (2.11)

$$\frac{V_R}{\Delta V} = \left(\frac{\tau_C s + 1}{\tau_B s + 1} \right) \left(\frac{K_A}{\tau_A s + 1} \right) \quad (2.11)$$

ค่าคงตัวเวลา τ_B จะออกแบบให้อยู่ในช่วง 0.05-0.2 วินาที และอัตราขยาย K_A จะออกแบบให้อยู่ในช่วง 20-400 จากลักษณะของตัวควบคุมทำให้เกิดค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวหรือเรกูลേഷันของแรงดัน โดยค่าผิดพลาดดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับอัตราขยาย K_A ถ้าต้องการให้มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวน้อยก็จะใช้อัตราขยาย K_A ค่าสูงมากซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบต่อเสถียรภาพที่สภาวะชั่วคราว ซึ่งต้องมีการชดเชยด้วยการป้อนกลับเพิ่มเติมดังจะกล่าวต่อไป จะเห็นได้ว่าการกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมอัตโนมัติดังกล่าวมีวัตถุประสงค์คล้ายคลึงกับวิธีรูปความถี่-กำลังจริงที่จะทำให้ไม่เกิดการแข่งกันกันควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อเมื่อโครงข่ายมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งตัว รูปที่ 2.12 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จะเห็นได้ว่ามีส่วนป้อนกลับผ่านตัวอนุพันธ์ที่มีอัตราขยาย K_F และค่าคงตัวเวลา τ_F ที่จะช่วยปรับปรุงเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราวได้



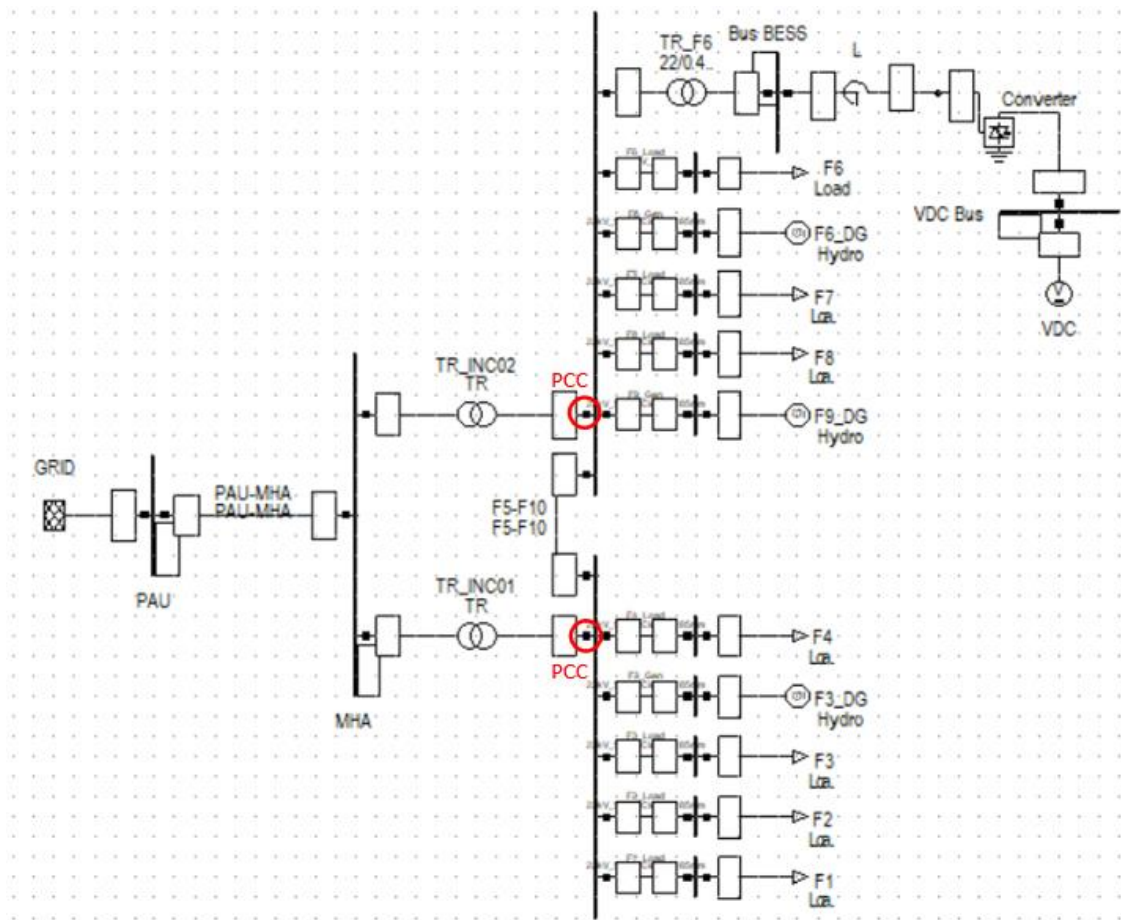
รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

2.3 โหมดการทำงานของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนร่วมกับระบบควบคุมการแปลงกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่นำเสนอ

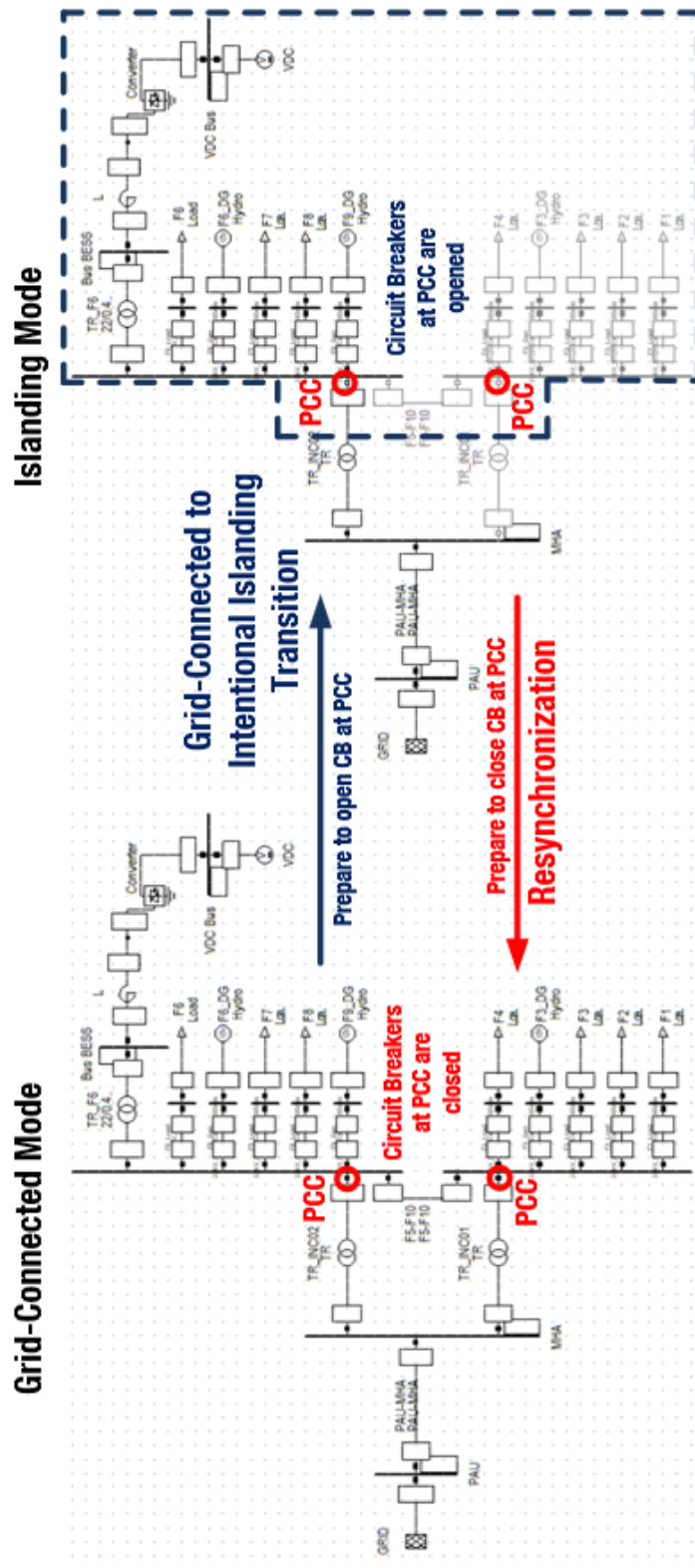
2.3.1 โหมดการทำงานของไมโครกริด

โหมดการทำงานของไมโครกริดนั้น ได้แก่ โหมดการเชื่อมต่อโครงข่าย (Grid-Connected) โหมดการแยกตัวอิสระ (Islanding Mode) และ สภาวะการทำงานชั่วคราวในการถ่ายโอนระหว่างโหมดทั้งสอง ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการทำงานของไมโครกริด 3 โหมด จากทั้งหมด 4 โหมด เนื่องจาก 3 โหมดที่จะกล่าวถึงจะการควบคุมหลักในการทำงานเท่านั้น ส่วนการทำงานของส่วนควบคุมรองซึ่งสามารถทำงานเป็นรอบนอกสำหรับการรีซิงโครไนซ์จะได้อธิบายถึงในบทที่ 4 ต่อไป

โหมดการทำงานของไมโครกริดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากไมโครกริดและระบบไฟฟ้าหลักเชื่อมต่อกันด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อ (Point of Common Coupling) ซึ่งเมื่อเกิดการปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้เปิดออกจากเหตุการณ์ เช่น การเกิดผิดปกติทางด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงที่จุดเชื่อมต่อ การซ่อมบำรุงสายส่งทางด้านแรงดันสูง เป็นต้น รีเลย์จะสั่งปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อไมโครกริดจากเดิมที่เคยอยู่ในโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่าย (Grid-Connected Mode) ก็จะอยู่ในโหมดสภาวะชั่วคราวเพื่อเปลี่ยนไปยังโหมดแยกตัวอิสระ (Grid-Connected to Intentional Islanding Transition) และอยู่ในโหมดแยกตัวอิสระ (Islanding Mode) ได้จากการที่มีแหล่งกำเนิดกระจายตัวภายในไมโครกริดที่สามารถจ่ายกำลังให้กับโหลดภายในไมโครกริดได้ และหากการซ่อมบำรุงกระทำแล้วเสร็จจนพร้อมที่จะทำการเชื่อมต่อไมโครกริดกลับไปยังโหมดการเชื่อมต่อโครงข่าย หรือการรีซิงโครไนซ์ (Resynchronization) ก็จะสามารถทำได้หากมีการควบคุมให้ขนาดของแรงดัน ความถี่ และมุมเฟสของไมโครกริดมีผลต่างเทียบกับระบบไฟฟ้าหลักแล้วเป็นไปตามเงื่อนไขที่มาตรฐานในการซิงโครไนซ์ไมโครกริดกำหนด การจำลองไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แบบจำลองโครงข่ายระบบไฟฟ้าไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory



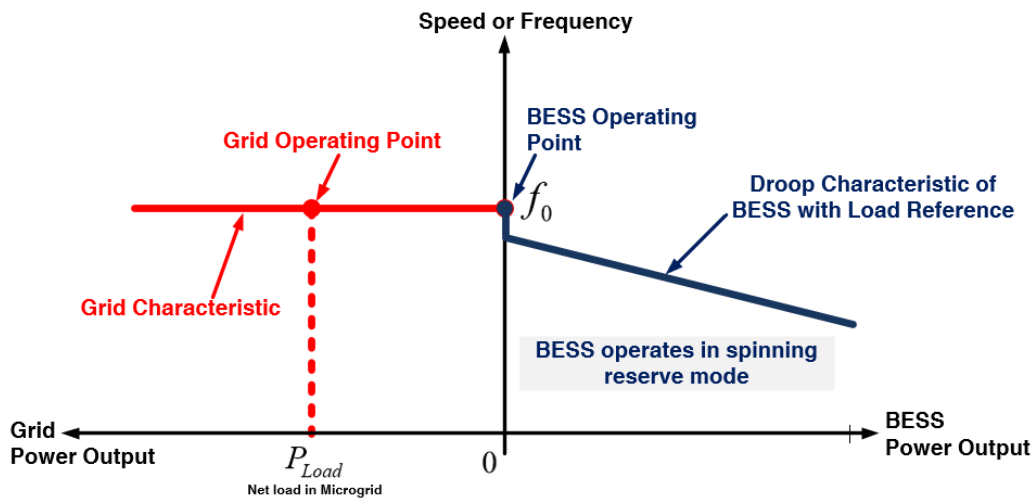
รูปที่ 2.14 แบบจำลองโหมดการทำงานของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนในโปรแกรม

DIGSILENT-Powerfactory

จากรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงถึงองค์ประกอบต่างๆภายในไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน การจำลองนี้ได้นำหลักการและทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.2 ไปประยุกต์ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory ด้วยข้อมูลของระบบไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนโดยมีการสร้างระบบไมโครกริดด้วยข้อมูลจริงจากทางการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค รวมถึงโหลด ซึ่งเป็นข้อมูลของการใช้ไฟฟ้าในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2561 เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่เกิดขึ้น รูปที่ 2.14 แสดงถึงการจำลองโหมดการทำงานของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนโดยมีจุด PCC ได้แก่ INC01 และ INC02 ซึ่งก็คือเซอร์กิตเบรกเกอร์วงจรฝั่งด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าในที่นี่คือฝั่ง 22 กิโลโวลต์ การเปลี่ยนผ่านการทำงานจากโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายไปยังโหมดแยกอิสระนั้นเกิดขึ้นไว้มากเพื่อให้การเปลี่ยนถ่ายโหมดการทำงานเป็นไปได้อย่างรวดเร็วคือไม่เกิดไฟดับจะต้องมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทำหน้าที่จัดตั้งโครงข่าย (Grid Forming) ทั้งนี้ระบบก็เก็บพลังงานแบตเตอรี่ซึ่งมีการตอบสนองที่ไวมากจึงเหมาะที่จะนำมาใช้งานในการเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงานของไมโครกริด ในหัวข้อถัดไปจะอธิบายถึงการทำงานของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน และแสดงผลการจำลองของการทำงานไมโครกริดในโหมดต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับหลักการที่นำเสนอ

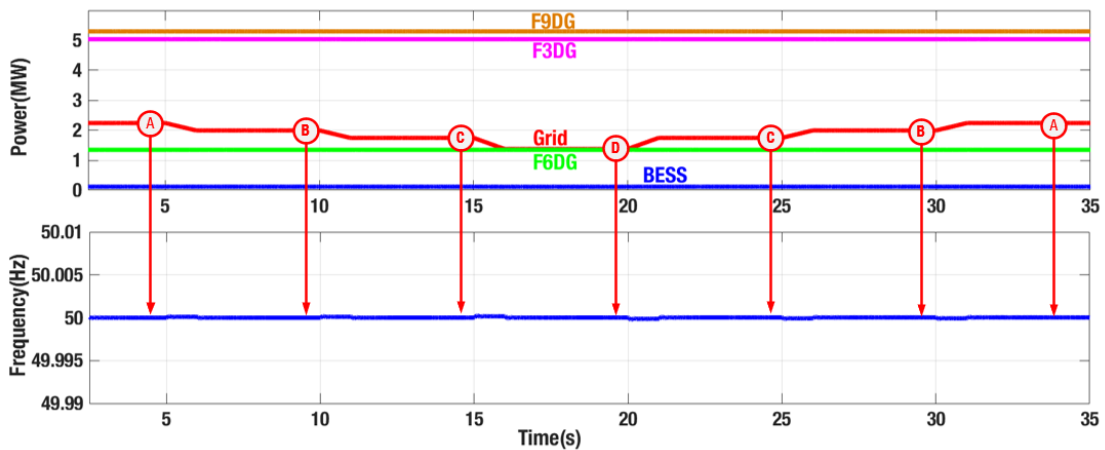
2.3.1.1 การควบคุมคอนเวอร์เตอร์สำหรับโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่าย (Grid-Connected Mode)

การทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่มีระบบควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งทำงานเสมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสส่งผลให้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่สามารถทำงานโหมดพร้อมจ่าย (Spinning Reserve) ในโหมดของการเชื่อมต่อกับโครงข่ายของไมโครกริดได้ เนื่องจากโครงข่ายมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่สามารถจ่ายกำลังให้ระบบไฟฟ้าหลักและรวมถึงไมโครกริดทั้งระบบได้ โดยไม่ต้องพึ่งกำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ดังนั้นระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่อยู่ในโหมดพร้อมจ่ายจะจ่ายกำลังไฟฟ้าในกรณีที่เป็นเท่านั้น ตัวอย่างการทำงานไมโครกริดในโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่าย โดยที่จะเห็นได้ว่าโหลดสุทธิภายในไมโครกริด P_{Load} จะถูกจ่ายโดยโครงข่ายไฟฟ้าที่ความถี่ปกติ f_0 และวงจรแปลงผันจะควบคุมให้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่อยู่ในโหมดทำหน้าที่พร้อมจ่ายโดยไม่จ่ายกำลังใดๆ ตามจุดการทำงานที่แสดงในรูปที่ 2.15

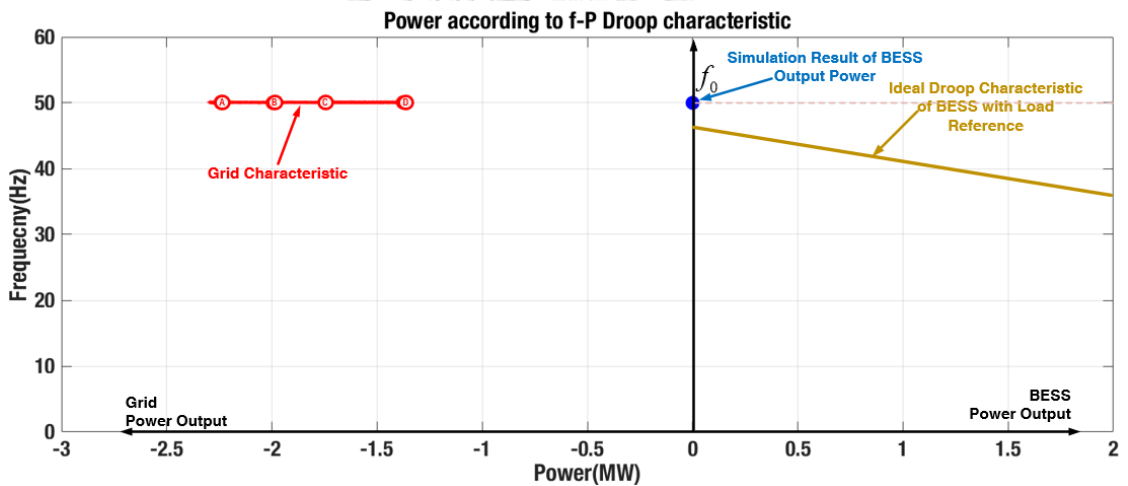


รูปที่ 2.15 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโครกริดทำงานในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายและระบบกักเก็บพลังงานทำงานในโหมดพร้อมจ่าย

จากหลักการดังที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อนำมาใช้งานในไมโครกริดที่จำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory สามารถทำได้ด้วยการตั้งค่าของความถี่เริ่มต้นที่รูปของการควบคุมให้ต่ำกว่าความถี่ปกติของโครงข่ายนั่นคือให้ $f_{ref} = 0.998$ p.u. และ $L_{ref} = 1$ (หากเปรียบเทียบตัวแปรในโปรแกรมกับตัวแปรในหัวข้อที่ 2.2 f_{ref} จะหมายถึง f_0 และ L_{ref} จะหมายถึง Load Reference) หมายความว่าหากระบบของโครงข่ายมีความถี่ตกลงมาไม่ถึงค่าที่ปรับตั้งไว้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่นี้ก็ไม่ต้องจ่ายกำลังให้แก่ระบบนั่นเอง การทำงานที่กล่าวมานี้แสดงได้ด้วยการจำลองของโปรแกรมได้ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งจะเห็นว่าแม้โหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรโครงข่ายจะทำหน้าที่ในการจ่ายกำลังที่เปลี่ยนแปลงไป และระบบกักเก็บพลังงานซึ่งทำงานในโหมดพร้อมจ่ายนี้จะไม่ทำการจ่ายกำลังจริงออกมา



รูปที่ 2.16 ผลการจำลองการทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายโดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในโหมดพร้อมจ่ายทำงานร่วมกับการจ่ายกำลังจริงของแหล่งกำเนิดกระจายตัวในไมโครกริดและระบบหลัก

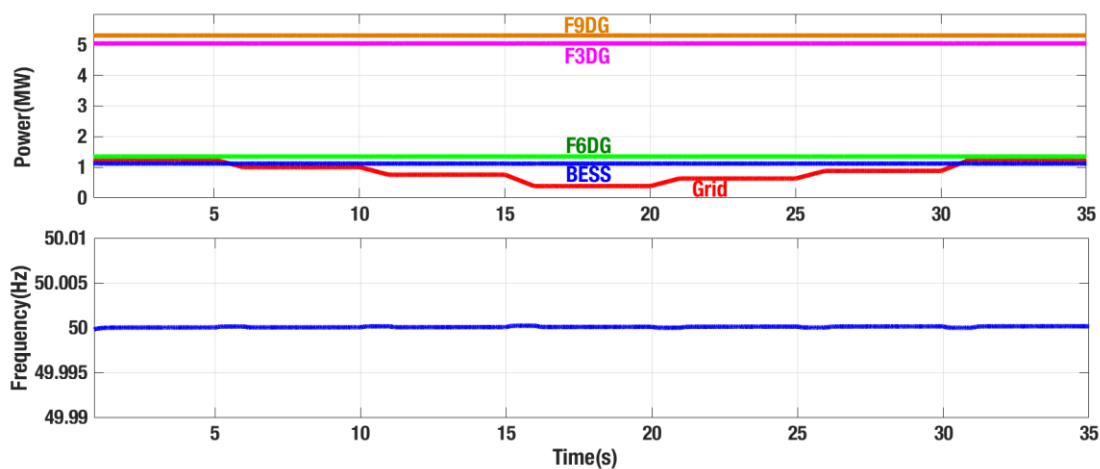


รูปที่ 2.17 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงในโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายของไมโครกริดเทียบกับหลักการที่นำเสนอโดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่อยู่ในโหมดพร้อมจ่าย

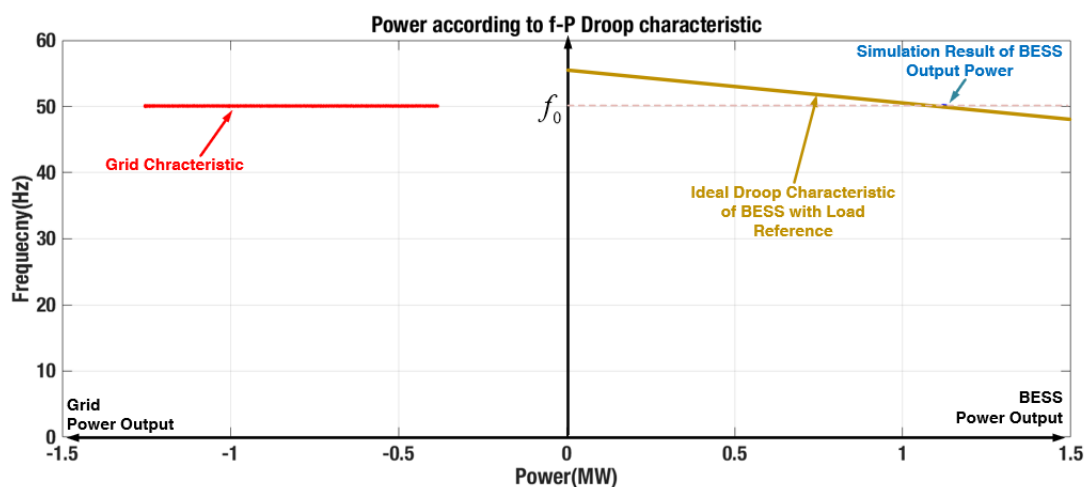
เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนขึ้นรูปที่ 2.17 แสดงการนำผลการจำลองโดยนำพิกัดของจุดการทำงานจากรูปที่ 2.16 ที่เห็นชื่อจุด A B C และ D ซ้ำกันนั้นเพราะทั้งสองจุดจ่ายกำลังเดียวกันและเป็นจุดทำงานเดียวกันเมื่อแสดงด้วยกราฟการทำงานบนระนาบกำลังจริง-ความถี่เพื่อให้เห็นลักษณะการทำงานของระบบไฟฟ้าหลัก รูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบผลจำลองการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายโดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงานในโหมดพร้อมจ่ายเทียบกับหลักการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงที่กล่าวมาข้างต้น และจะเห็นว่า

ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะไม่จ่ายกำลังจริงออกมาหรืออยู่ในสภาวะพร้อมจ่าย (Spinning Reserve) นั้นเอง

อย่างไรก็ดีหากต้องการให้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงานโดยช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ระบบก็สามารถทำได้ด้วยการปรับค่าตั้งต้นของ f_{ref} ให้มีค่าสูงกว่าความถี่ของระบบ ในที่นี้ปรับให้ $f_{ref} = 1.001$ p.u. $L_{ref}=0$ ระบบกักเก็บพลังงานจะช่วยจ่ายกำลังออกมาคงที่ที่ 1 เมกะวัตต์ให้ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.18 ผลการจำลองการทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายโดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ช่วยจ่ายกำลังจริง 1 เมกะวัตต์ ทำงานร่วมกับการจ่ายกำลังจริงของแหล่งกำเนิดกระจายตัวไมโครกริดและระบบหลัก



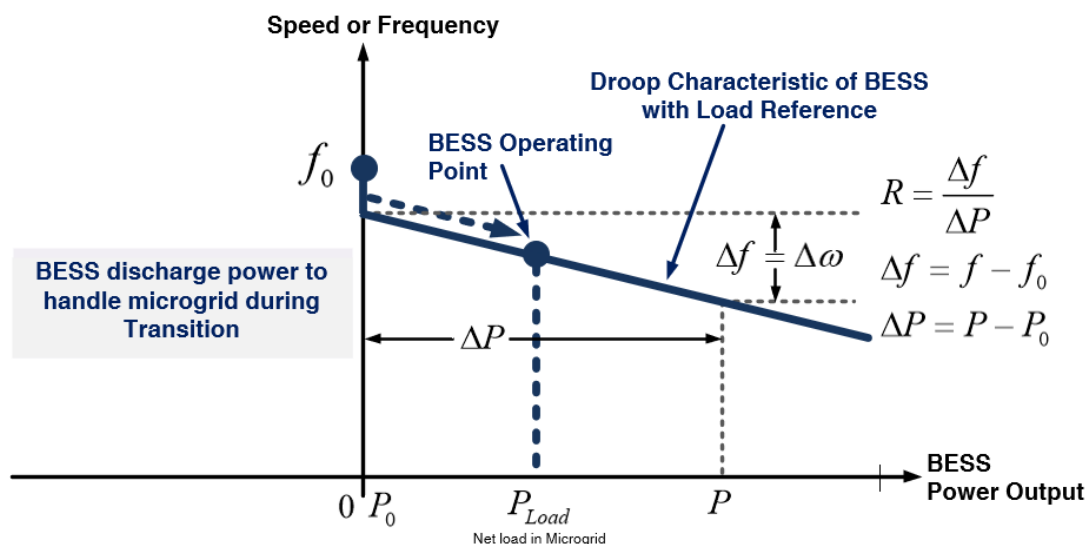
รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายของไมโคร กริดเทียบกับหลักการที่นำเสนอบนโดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จ่ายกำลังให้แก่ระบบไฟฟ้า

รูปที่ 2.19 แสดงถึงการเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายโดยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จ่ายกำลังให้กับระบบไฟฟ้าหลักกับหลักการการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะมีการจ่ายกำลังออกมาช่วยให้ระบบไฟฟ้าหลักจ่ายกำลังน้อยลง

2.3.1.2 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์สำหรับโหมดการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระ (Grid-Connected to Intentional Islanding Transition)

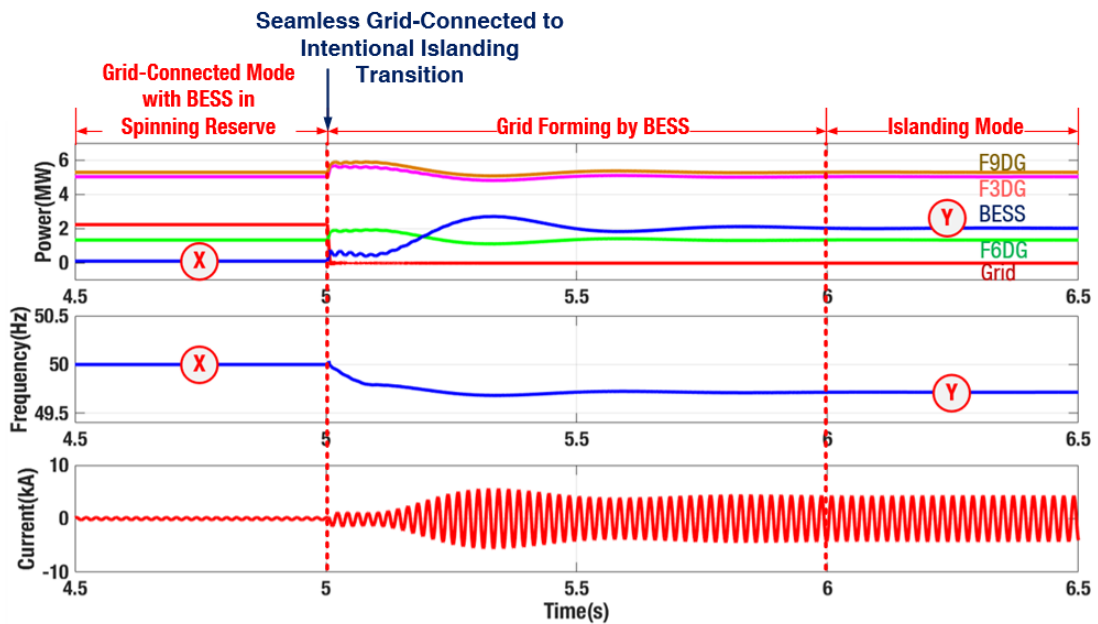
ระบบกักเก็บพลังงานจากที่ทำงานในสภาพพร้อมจ่ายหรือจ่ายกำลังให้ระบบไฟฟ้าก็พร้อมต่อการทำหน้าที่ในการจัดตั้งโครงข่ายของไมโครกริด เมื่อระบบไมโครกริดแยกออกจากโครงข่ายหลัก (Main Grid) จากการปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้เปิดวงจรออกด้วยอุปกรณ์ป้องกันเมื่อมีความผิดพลาดแบบถาวรเกิดขึ้นในสายส่ง 115 กิโลโวลต์ เนื่องจากการตอบสนองที่ไวมากของอินเวอร์เตอร์ ทำให้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถจัดตั้งไมโครกริด (Grid Forming) ได้โดยอาศัยหลักการรูปความถี่-กำลังจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมาใช้ในการควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยยอมให้แรงดันและความถี่ตกลงได้ในระดับหนึ่ง เมื่อมีการเปลี่ยนโหมดการทำงานมาเป็นโหมดแยกตัวอิสระทำให้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เป็นผู้จัดตั้งโครงข่ายจึงจ่ายไฟฟ้าหลักร่วมกับการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระจายตัวให้กับโหลดภายในไมโครกริด โหลดที่เปลี่ยนแปลงในช่วงของการจัดตั้ง

โครงข่ายนี้ระบบกักเก็บพลังงานจะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงนี้ แต่ทั้งนี้หลังจากที่ทำการจัดตั้งโครงข่ายได้สำเร็จแล้วไมโครกริดสามารถกลับไปทำงานที่ความถี่ปกติได้ดังเดิม โดยการปรับ L_{ref} ภายในระบบควบคุมแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรีให้เหมาะสมกับกำลังที่จ่ายออกไปได้ การทำงานในลักษณะนี้จะเหมือนกับวิธีที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังนั่นเอง

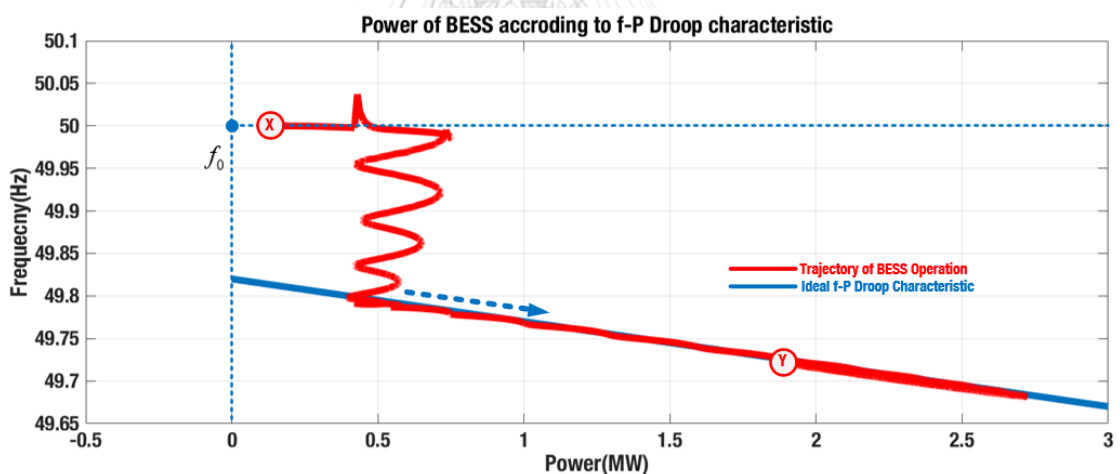


รูปที่ 2.20 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงในการจ่ายโหลดของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโครกริดทำงานในโหมดการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระ

การจำลองการทำงานการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระแสดงได้ดังรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรีรับกำลังที่โครงข่ายจ่ายอยู่จากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายและทำหน้าที่ในการจัดตั้งโครงข่ายแทน ในช่วงแรกของการเปลี่ยนผ่านความถี่ของไมโครกริดจะตกลงมาตามลักษณะการทำงานของทรูภายในระบบควบคุมของระบบการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรี ตามหลักการในรูปที่ 2.20

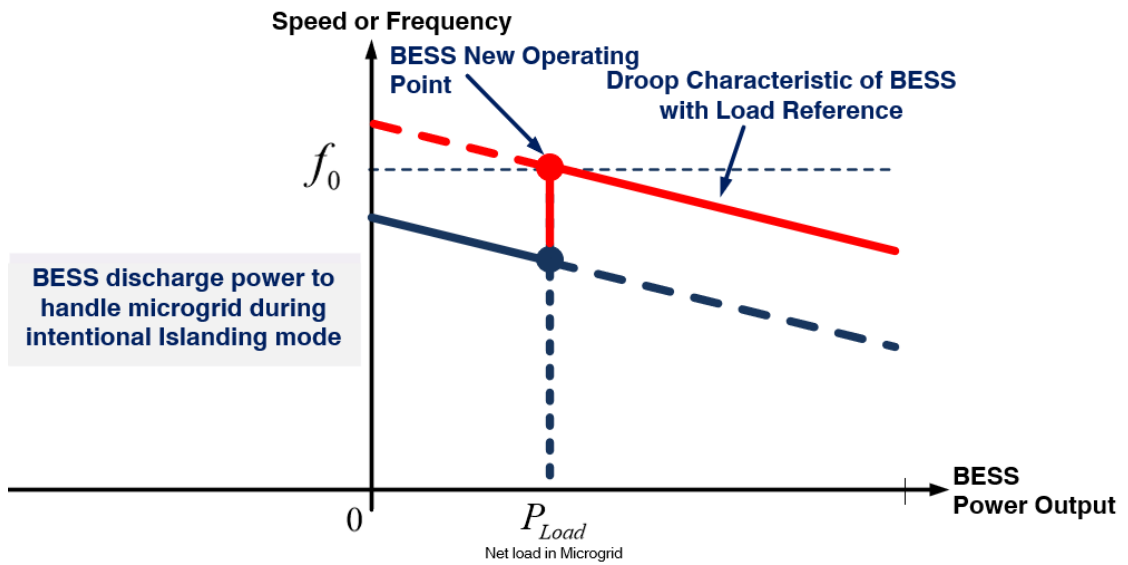


รูปที่ 2.21 ผลการจำลองการทำงานในการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ทำงานร่วมกับแหล่งกำเนิดกระจายตัวในไมโครกริด

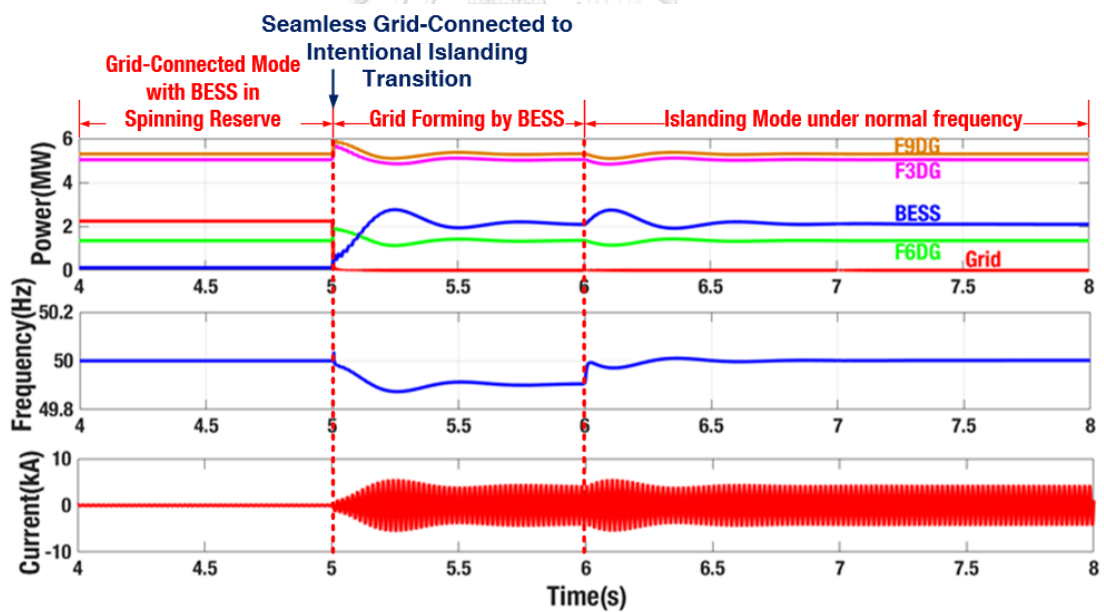


รูปที่ 2.22 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงในการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระของไมโครกริดเทียบกับหลักการที่นำเสนอ

เพื่อให้การทำงานตามหลักการที่นำเสนอรูปที่ 2.22 แสดงถึงการเปรียบเทียบการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในโหมดการเปลี่ยนผ่านนี้โดยแสดงตามเส้นทาง X-Y ว่ามีการทำงานตามลักษณะของหลักการที่กล่าวมาข้างต้น ผลการจำลองนี้ทำให้เห็นว่าระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำให้การเปลี่ยนผ่านของไมโครกริดสามารถทำได้อย่างราบรื่น



รูปที่ 2.23 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงในการจ่ายโหลดของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโครกริดทำงานในโหมดการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระแล้วต้องการปรับความถี่ของไมโครกริด

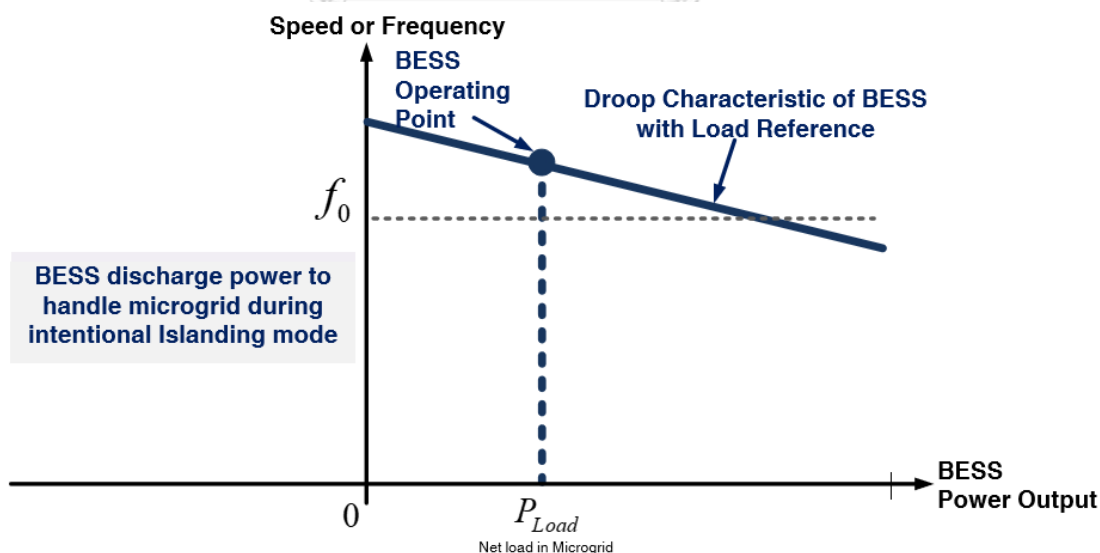


รูปที่ 2.24 ผลการจำลองการทำงานในการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงานร่วมกับแหล่งกำเนิดกระจายตัวในไมโครกริด และมีการปรับให้ระบบไมโครกริดทำงานที่ความถี่ปกติหลังการเปลี่ยนผ่านอย่างราบรื่น

เมื่อสามารถจัดตั้งโครงข่ายได้สำเร็จระบบกักเก็บพลังงานสามารถปรับความถี่ของไมโครกริดให้กลับมาทำงานที่ความถี่ปกติได้หลักการดังแสดงในรูปที่ 2.23 การป้อนค่าโหลดอ้างอิงที่เหมาะสม

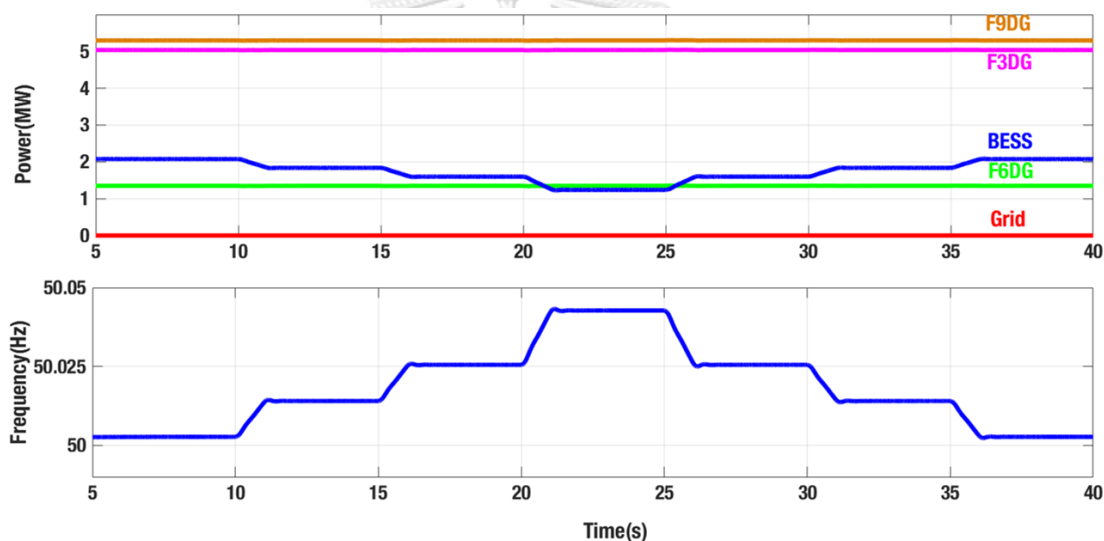
กับกำลังที่ระบบกักเก็บพลังงานจ่ายอยู่ภายในระบบควบคุมตามลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงที่นำเสนอ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะคงกำลังที่จ่ายออกไปเท่าเดิมแต่ปรับการทำงานไปที่จุดการทำงานใหม่ซึ่งมีเป็นจุดการทำงานที่ค่าความถี่ใหม่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระจายตัวในไมโครกริดซึ่งมีมีตรูปอยู่ภายในการควบคุมเช่นกันก็จะปรับการทำงานให้สามารถทำงานที่ความถี่ที่เปลี่ยนไปตามที่ไมโครกริดถูกจัดตั้งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.24 เป็นการจำลองการทำงานตามหลักการที่กล่าวมาข้างต้น หลังจากมีการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกอิสระได้สำเร็จความถี่ของระบบจะลดลงไป จากนั้นได้มีการปรับ L_{ref} 0.5 เนื่องจากระบบกักเก็บพลังงานจ่ายกำลังที่ 2 เมกะวัตต์ต่อเวลาที่ 6 วินาที จากนั้นความถี่ของไมโครกริดจะถูกปรับมาทำงานที่ 50 เฮิร์ตซ์ได้เป็นปกติการปรับให้ไมโครกริดกลับมาทำงานที่ความถี่ปกตินี้สามารถทำเพิ่มเติมได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ ในภายหลังโดยการเพิ่มส่วนควบคุมหุติยภูมิเพื่อเป็นส่วนควบคุมรอบนอกต่อจากการทำงานของส่วนควบคุมหลักได้ แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังไม่ได้ทำการเพิ่มส่วนควบคุมหุติยภูมิดังกล่าว ซึ่งจะเห็นว่าโครงสร้างการควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่นำเสนอ นั้นครอบคลุมฟังก์ชันการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้สามารถพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เสมือนกับเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้

2.3.1.3 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์สำหรับโหมดแยกตัวอิสระ (Intentional Islanding Mode)

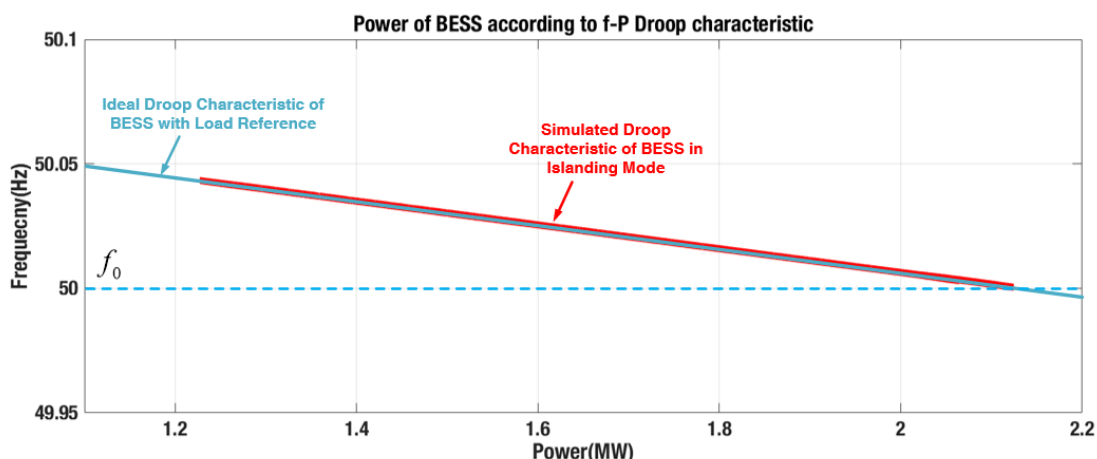


รูปที่ 2.25 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงในการจ่ายโหลดของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโครกริดทำงานในโหมดแยกตัวอิสระ

โหมดแยกตัวอิสระนั้นจะใช้ลักษณะการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงตามรูปที่ 2.25 เช่นเดียวกับการเปลี่ยนผ่านโหมดจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายมายังโหมดแยกตัวอิสระซึ่งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำหน้าที่เป็นผู้จัดตั้งโครงข่ายจึงจ่ายกำลังให้สมดุลกับภาระทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ความถี่ของไมโครกริดมีการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงที่ตั้งค่าไว้ให้กับระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ การจำลองการทำงานโหมดแยกตัวอิสระของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนแสดงได้ดังรูปที่ 2.26 ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ตามลักษณะการทำงานของรูปภายในระบบควบคุมการแปลงผันกำลัง โดยในการจำลองนี้ได้ทำการปรับค่าโวลต์อ้างอิงให้เหมาะสมกับโวลต์ที่ระบบกักเก็บพลังงานจ่ายในตอนเริ่มต้นให้มีความถี่ที่ความถี่ปกติ หรือ 50 เฮิร์ตซ์นั่นเอง



รูปที่ 2.26 ผลการจำลองการทำงานในโหมดแยกตัวอิสระด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงานร่วมกับแหล่งกำเนิดกระจายตัวในไมโครกริด



รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงในโหมดแยกตัวอิสระของไมโครกริดเทียบกับหลักการที่นำเสนอ

เปรียบเทียบผลการจำลองกับหลักการที่นำเสนอด้วยรูปที่ 2.27 แสดงให้เห็นการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำการจ่ายกำลังตามโหลดที่เปลี่ยนแปลงให้กับไมโครกริดในโหมดแยกตัวอิสระซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่มีการจ่ายกำลังตามหลักการรูปความถี่-กำลังจริงที่นำเสนอ

จากที่กล่าวมาข้างต้นในบทนี้จะเห็นได้ว่าการทำงานในโหมดต่างๆ ของไมโครกริดนั้นหากได้รับการสนับสนุนจากระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วยระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอจะทำให้การทำงานของไมโครกริดนั้นมีสมรรถนะที่ดีและราบรื่นโดยเฉพาะการเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงานของไมโครกริด ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ควรจะทำงานเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสได้เพื่อความสะดวกในการใช้งานและเข้าใจได้ง่ายต่อผู้ดูแลระบบไฟฟ้าของไมโครกริด รายละเอียดของระบบควบคุมสำหรับการเปลี่ยนผ่านจากโหมดแยกตัวอิสระไปยังโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย หรือ การรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด ซึ่งเป็นโหมดการทำงานที่ท้าทายมากนั้นจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 3

บทที่ 3

วิธีการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริด

จากที่ได้นำเสนอถึงโหมดการทำงานของไมโครกริดทั้ง โหมดเชื่อมต่อโครงข่าย โหมดแยกตัวอิสระ และโหมดการเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกตัวอิสระด้วยระบบกักเก็บพลังงาน แบตเตอรี่และระบบควบคุมที่ทำงานเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสไปแล้วในบทที่ 2 ในบทที่ 3 จึงจะได้กล่าวถึงโหมดการทำงานอีกโหมดหนึ่งซึ่งมีความท้าทายในการควบคุมให้ไมโครกริดนั้นสามารถเปลี่ยนผ่านจากโหมดแยกตัวอิสระกลับไปยังโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย หรือการรีซิงโครไนซ์ให้ทำงานได้อย่างราบรื่น คือไม่เกิดเหตุการณ์ไฟดับขึ้น เพื่อให้การทำงานสำเร็จได้ตามเป้าหมายนั้น การทำงานในโหมดนี้จะมีการทำงานของส่วนควบคุมรองเป็นส่วนควบคุมรอบนอกของส่วนควบคุมหลักเพื่อควบคุมแรงดันของไมโครกริดให้มีคุณสมบัติตามขอบเขตของมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด เพื่อให้รีเลย์ตรวจจับการรีซิงโครไนซ์ที่ทำการตั้งค่าด้วยเงื่อนไขตามมาตรฐานสามารถทำการรีซิงโครไนซ์ได้ โดยรายละเอียดของหลักการและกลไกการรีซิงโครไนซ์ของไมโครกริดจะได้กล่าวต่อไปในบทนี้ และได้มีการอธิบายด้วยแผนภาพที่ค่อนข้างเป็นพลวัตเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์ พร้อมทั้งออกแบบสมรรถนะให้มีความไวในการทำงานตอบสนองได้ดี และจำลองการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอนด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory

3.1 การเปลี่ยนผ่านจากโหมดแยกตัวอิสระกลับไปยังโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย (Resynchronization)

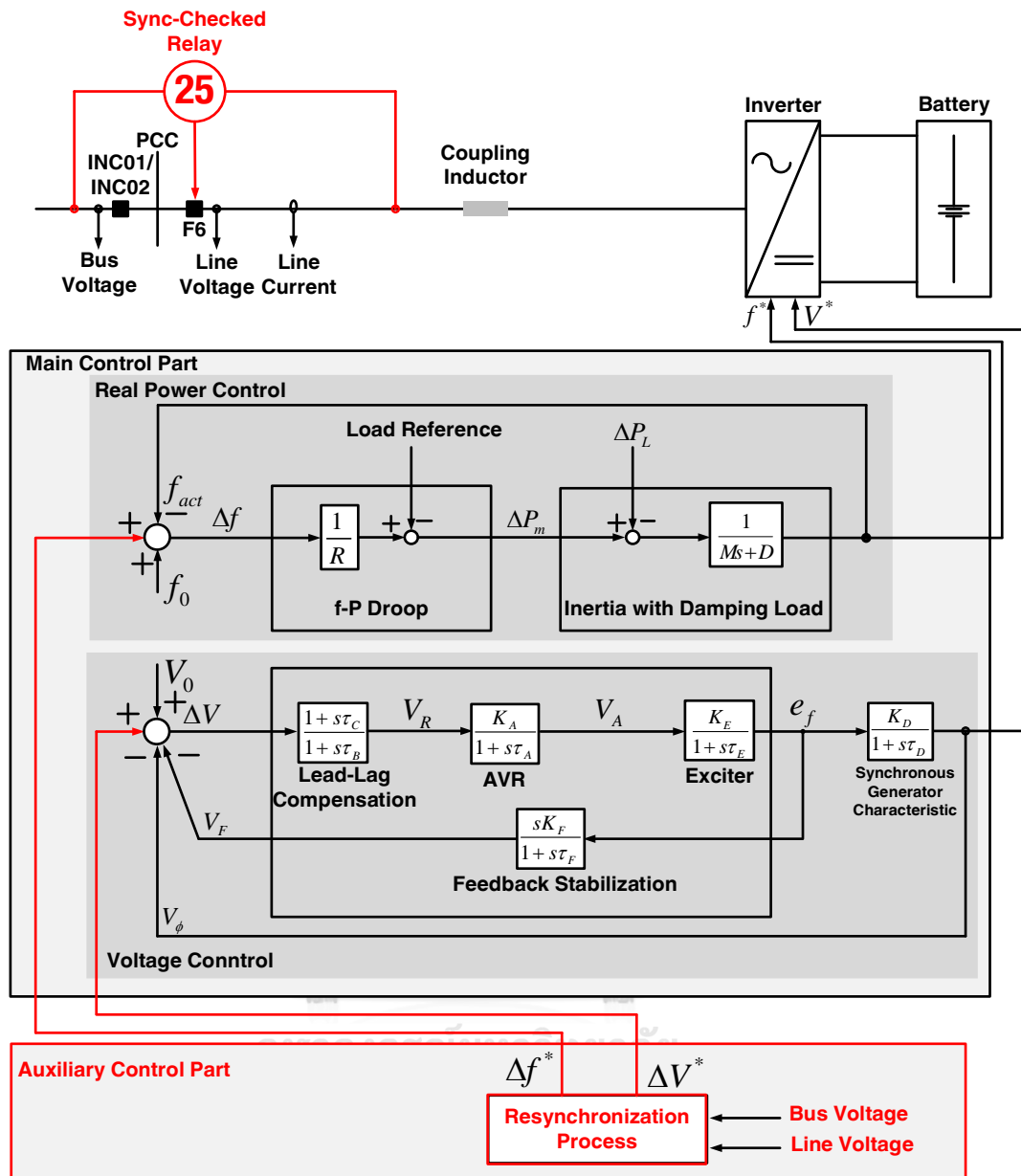
โหมดการเปลี่ยนผ่านจากโหมดแยกตัวอิสระกลับไปยังโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายจะใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เป็นองค์ประกอบหลักทำหน้าที่ปรับความถี่ มุมเฟส และขนาดของแรงดันของไมโครกริดให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดตามมาตรฐาน [16], [17] การตรวจจับความแตกต่างของมุมเฟสนั้นอาศัยส่วนควบคุมรองและส่วนควบคุมหลักที่นำเสนอในบทที่ 2 สำหรับการทำงานดังกล่าว โดยรับค่าตัวแปรทางไฟฟ้าจากแรงดันของฝั่งโครงข่ายมาเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับเฟสล็อกกลูบเพื่อตรวจจับความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างแรงดันของโครงข่ายและแรงดันของไมโครกริด จากนั้นจึงทำการปรับค่าความถี่ มุมเฟส ด้วยส่วนควบคุมหลักให้เป็นไปตามเงื่อนไขมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด [6] ความท้าทายในการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดนั้นคือ ความถี่ มุมเฟส และขนาดของแรงดันของไม

โครกริตนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าทั้งจากโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระจายตัวภายในระบบไมโครกริตซึ่งแตกต่างจากการซิงโครไนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ควบคุมความถี่ มุมเฟสและแรงดันของเครื่องกำเนิดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ จากสิ่งรบกวนนอกทำให้การซิงโครไนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นสามารถทำได้โดยไม่ยาก

3.3.1 ระบบควบคุมสำหรับการรีซิงโครไนซ์

สำหรับการทำงานในโหมดการเปลี่ยนถ่ายจากโหมดแยกอิสระของไมโครกริตไปยังโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่าย หรือ การรีซิงโครไนซ์นั้น ระบบควบคุมจะสั่งการให้ส่วนควบคุมรองเป็นวงรอบควบคุมด้านนอกและส่วนควบคุมหลักเป็นส่วนควบคุมที่ต่อเรียงตามมา แต่การกระทำนี้เกิดขึ้นภายในระบบควบคุมตัวเดียวกันเพื่อให้การทำงานในโหมดนี้ทำงานได้อย่างราบรื่น ระบบควบคุมดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยส่วนควบคุมรองนี้ทำการป้อนกลับค่าความแตกต่างของความถี่ (Δf^*) และแรงดัน (ΔV^*) ของไมโครกริตเทียบกับแรงดันระบบไฟฟ้าหลัก (แรงดันอ้างอิง) เพื่อเปลี่ยนจุดทำงานของส่วนควบคุมหลักซึ่งต่อเรียงอยู่กับส่วนควบคุมรอง เมื่อแรงดันทางด้านไมโครกริตที่ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ได้ปรับแต่งให้ซิงโครไนซ์กับแรงดันโครงข่ายตามเงื่อนไขของมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ได้นั้น รีเลย์ตรวจสอบการรีซิงโครไนซ์ (Synchronization-Check Relay) ที่ติดตั้ง ณ จุด PCC จะทำการสั่งให้เซอร์เบรกเกอร์ปิดวงจรเพื่อเชื่อมต่อกับโครงข่าย จากที่กล่าวมาข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริตจะมีลักษณะการทำงานที่ค่อนข้างเป็นพลวัต (Dynamic) เมื่อเทียบกับการซิงโครไนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบดั้งเดิมแต่ละเครื่องแบบโดดๆ ที่มีลักษณะสมบัติค่อนข้างเป็นแบบสถิต (Quasi-Static Characteristic)

รูปที่ 3.2 แสดงถึงรุ่นของรีเลย์ซึ่งมีฟังก์ชัน 25 แต่ยังไม่ได้มีการตั้งค่าการทำงานของฟังก์ชันการตรวจจับการรีซิงโครไนซ์ซึ่งติดตั้งอยู่ที่จุด PCC (INC01 และ INC02) ของ กฟจ. อ้างอิงข้อมูลนี้จากการบันทึกการตั้งค่ารีเลย์ของทาง กฟจ. นอกจากนี้งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการตั้งค่าตามมาตรฐาน IEEE1547-2018 ให้กับรีเลย์โดยอ้างอิงช่วงของการตั้งค่าจากคู่มือของรีเลย์ P143 [30] ซึ่งจะได้แสดงในรูปที่ 3.2 เช่นกัน ดังนั้นเมื่อต้องการที่จะรีซิงโครไนซ์ไมโครกริตจะมีการสั่งให้รีเลย์ทำงานเพื่อเปรียบเทียบแรงดันทางด้านไมโครกริตกับแรงดันโครงข่ายว่าเป็นไปตามเงื่อนไขที่ตั้งค่าไว้หรือไม่ หากเป็นไปตามเงื่อนไขรีเลย์จะนับเวลาถอยหลังตามที่ถูกตั้งค่าไว้ก่อนสั่งให้เซอร์เบรกเกอร์ที่จุด PCC ทำงาน



รูปที่ 3.1 ระบบควบคุมของการแปลงผันกำลังในการรีซิงโครไนซ์

RELAY SETTING											
Substation	MAE HONG SON	Type	115 kV AIS, 22 kV GIS Skidding		Tel.	28220		Year of Manufacture	2007	Date	27-06-18
Province	MAE HONG SON	Scheme	115 kV H Bus, 22 kV Single Bus Single Breaker		Act. Duty	Unmanned		Vdc	125,48	V	MHA
Protection	Side kV	Relay	Type	Manufacturer	VT & CT		Relay Setting			Remark	
					High Side	Low Side					
Incoming 1-2	22	50/51	P143	Schneider		900:1	Is=0.94xIn, Curve=SI, TMS=0.15, Inst=3.30xIn, t=0.75s				
		50/51N					Is=0.20xIn, Curve=SI, TMS=0.40, Inst=3.34xIn, t=0.75s				
		50BF					I>B/F=0.20/In, t=0.25s				
25	Check synchronizing (2-stage) with advanced system split features and breaker closing compensation time (P143 and P145 models only).										X

IEEE154-2018
Std. [6]

Aggregate rating of DER units (kVA)	Frequency difference (Δf , Hz)	Voltage difference (ΔV , %)	Phase angle difference ($\Delta \Phi$, °)
0-500	0.3	10	20
> 500-1 500	0.2	5	15
> 1 500	0.1	3	10

18.33

Synchrocheck (Check Sync.)

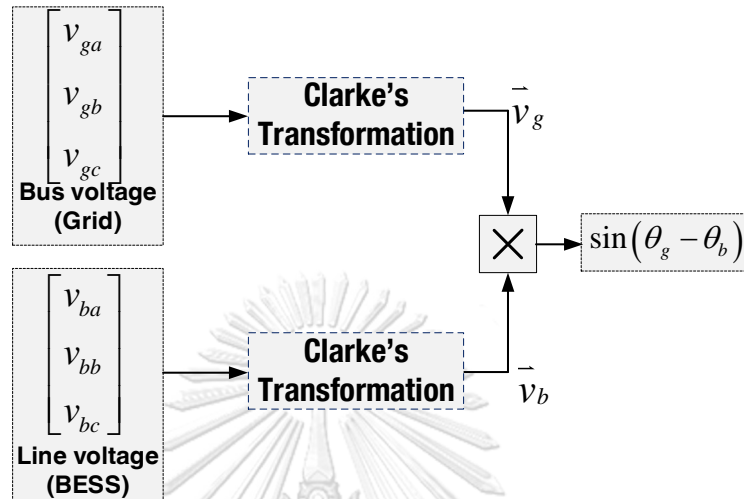
CS1 Status:	Disabled/Enabled
CS1 Phase Angle:	5...90° ← 10°
CS1 Slip Control:	None / Timer / Frequency / Both
CS1 Slip Freq.:	0.01...1.00 Hz ← 0.1Hz
CS1 Slip Timer:	0.0...99.0 s ← Depend on user
CS2 Status (up to):	CS2 Slip Timer
All settings and options chosen from the same ranges as per the first stage CS1 element.	
CS Undervoltage:	10.0...132.0 V (100/110 V) 40...528 V (380/440 V)
CS Overvoltage:	40.0...185.0 V (100/110 V) 160...740 V (380/440 V)
CS Diff Voltage:	1.0...132.0 V (100/110 V) 4...528 V (380/440 V)
CS Voltage Block:	None / Undervoltage / Overvoltage / Differential / UV & OV / UV & DiffV / OV & DiffV / UV, OV & DiffV

รูปที่ 3.2 รุ่นของรีเลย์ตรวจสอบการซิงโครไนซ์ (Sync-Checked Relay) ที่ใช้งาน ณ จุด PCC ของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน และการตั้งค่าการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดตามมาตรฐาน

3.1.1.1 เวกเตอร์เฟสล็อกกูป (Vector Phase-Locked Loop)

จากรูปที่ 3.1 แสดงระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด ซึ่งทำได้โดยการป้อนสัญญาณ Δf^* และ ΔV^* เพื่อปรับแต่งแรงดันระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ให้ซิงโครไนซ์กับแรงดันโครงข่าย โดยส่วนควบคุมหลักซึ่งประกอบด้วย ระบบควบคุมกำลังจริง และระบบควบคุมแรงดัน ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนของการปรับความถี่และมุมเฟสซึ่งเป็นส่วนที่ทำหายสำหรับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด ทั้งนี้ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการปรับขนาดแรงดันได้ต่อไป การออกแบบส่วนควบคุมรองซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับความแตกต่างมุมเฟส Δf^* ของแรงดันระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เทียบกับแรงดันของระบบไฟฟ้าหลักอาศัยหลักการของเวกเตอร์เฟสล็อกกูป ก่อนที่จะส่งไปยังส่วนควบคุมหลักต่อไปเพื่อปรับปรุงแรงดันของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ให้มีความถี่และ มุมเฟส ที่ซิงโครไนซ์กับแรงดันของโครงข่าย การตรวจจับความแตกต่างมุมเฟสของเวกเตอร์เฟสล็อกกูปมีภาพรวมแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยรับแรงดันของโครงข่ายเป็นแรงดันอ้างอิง และแรงดันของไมโครกริดเป็นแรงดันเปรียบเทียบเข้าซึ่งแรงดันทั้งสองนั้นเป็นแรงดัน 3 เฟส ปริมาณต่อหน่วย (per unit, p.u.) จากนั้นนำสัญญาณทั้งสองไปแปลงเป็นเวกเตอร์ปริภูมิ 2 มิติ (Clarke's

Transform) ในกรอบอ้างอิงที่ตั้งฉากกัน (x,y) ตามความสัมพันธ์ (3.1) จากนั้นทำการคูณไขว้ (Cross Product) เวกเตอร์ปริภูมิ 2 มิติทั้งสองเพื่อหาค่าความแตกต่างของมุมเฟสระหว่างเวกเตอร์ทั้งสองได้ ดังการคำนวณที่แสดงใน (3.2)



รูปที่ 3.3 หลักการทำงานของเวกเตอร์เฟสล็อกกลุบ

$$v_{xy} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{x,g} \\ v_{y,g} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{x,b} \\ v_{y,b} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} i & j & k \\ v_{x,g} & v_{y,g} & 0 \\ v_{x,b} & v_{y,b} & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ v_{y,b}v_{x,g} - v_{x,b}v_{y,g} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sin(\theta_g - \theta_b) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.2)$$

เมื่อ $v_{x,g}$ คือ เวกเตอร์ปริภูมิบนแกน x ของแรงดันโครงข่าย

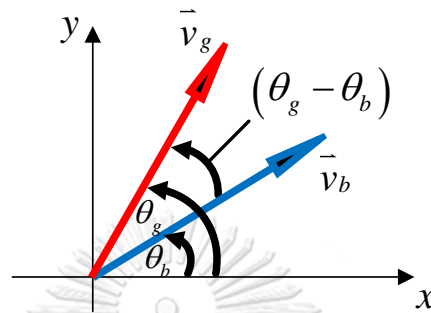
$v_{y,g}$ คือ เวกเตอร์ปริภูมิบนแกน y ของแรงดันโครงข่าย

$v_{x,b}$ คือ เวกเตอร์ปริภูมิบนแกน x ของแรงดัน

ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

$v_{y,b}$ คือ เวกเตอร์ปริภูมิบนแกน y ของแรงดัน

ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

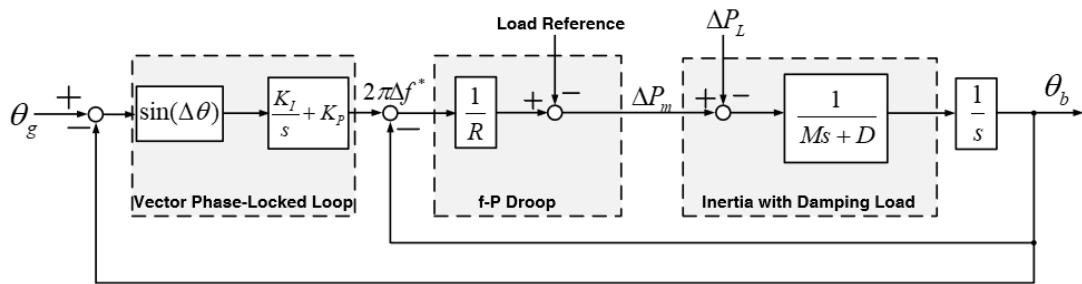


รูปที่ 3.4 ภาพเฟสเซอร์แสดงความแตกต่างของมุมเฟสจากเวกเตอร์เฟสล็อกถูบ

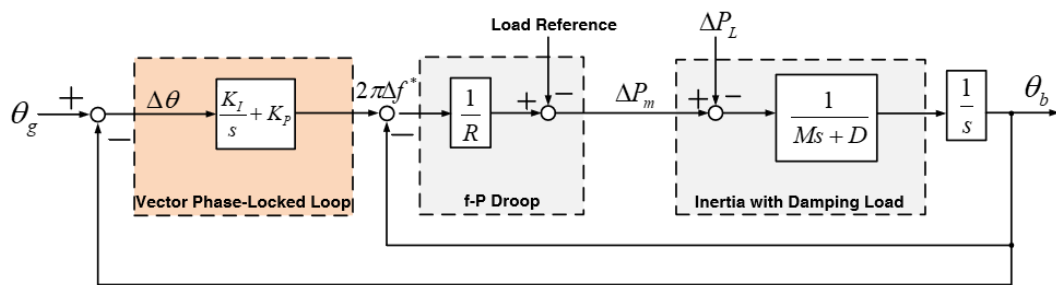
รูปที่ 3.4 แสดงความแตกต่างมุมเฟส $\sin(\theta_g - \theta_b)$ ที่ตรวจจับได้ซึ่งจะถูกส่งไปตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล (PI Controller) เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสำหรับการปรับลดขนาดความแตกต่างของมุมเฟสซึ่งจะอยู่ในรูปของสัญญาณความถี่ก่อนส่งไปยังส่วนควบคุมกำลัง ส่วนควบคุมกำลังที่ต่อเรียงกันอยู่นี้จะทำการปรับค่าของความถี่ของแรงดันระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ให้ซิงโครไนซ์กับแรงดันของระบบหลัก

3.1.1.2 เสถียรภาพของระบบควบคุมสำหรับการรีซิงโครไนซ์

รูปที่ 3.5 นั้นแสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมสำหรับการรีซิงโครไนซ์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในการทำงานของระบบควบคุม ซึ่งมีลักษณะที่เป็นระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้น จึงอาศัยการพิจารณาเสถียรภาพของระบบควบคุมที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นจากการประมาณให้ระบบควบคุมทำงานที่บริเวณรอบจุดศูนย์ หรือประมาณให้ $\sin(\theta_g - \theta_b) \approx \sin \Delta\theta = \Delta\theta$ ทำให้ได้ระบบควบคุมเชิงเส้นตามที่แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมรูปความถี่-กำลังจริงร่วมกับเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่



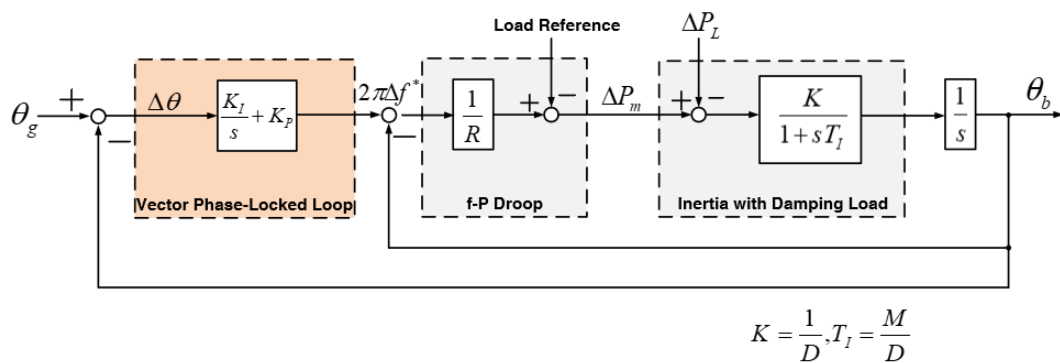
รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมรูปความถี่-กำลังจริงร่วมกับเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่ที่
ประมาณเป็นเชิงเส้น

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมใน รูปที่ 3.6 นั้นทำได้โดยใช้เกณฑ์การทดสอบเสถียรภาพของเรทท์-เฮอรวิตซ์ (Routh Hurwitz's Criteria) ได้เงื่อนไขเสถียรภาพตามสมการที่ (3.3) และ (3.4) รายละเอียดของการคำนวณสามารถดูได้จาก ภาคผนวก ก

$$\frac{K_I}{K_P} < \frac{D R + 1}{M R} \tag{3.3}$$

$$K_I > 0 \tag{3.4}$$

การออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วนกับอินทิกรัล จะใช้เทคนิคการออกแบบสมรรถภาพของวงรอบควบคุมแบบปิดผ่านการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงรอบเปิด โดยเทคนิคนี้จะอาศัยการปรับค่าอัตราของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมอินทิกรัล จนระบบควบคุมมี Gain Margin และ Phase Margin ที่เหมาะสม [29] และเพื่อให้การวิเคราะห์เป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในภาคผนวก ก จึงได้บล็อกไดอะแกรมที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนรูปแบบมาตรฐาน ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมรูปความถี่-กำลังจริงร่วมกับเวกเตอร์เฟสบล็อกคู่ที่ประมาณเป็นเชิงเส้นในรูปแบบมาตรฐาน

จากรูปที่ 3.7 สามารถเขียนรูปแบบของสมการวงรอบเปิดได้ดังสมการที่ (3.5) โดยมีนิยามของตัวแปรดังตารางที่ 3.1

$$L(s) = \frac{K}{R+K} \cdot \frac{1}{s \left(\frac{RT_I}{R+K} s + 1 \right)} \cdot \left(\frac{K_I}{s} + K_P \right) \quad (3.5)$$

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรตั้งต้นของระบบควบคุมความถี่-กำลังจริง

พารามิเตอร์	หน่วย	คำอธิบาย
R	p.u.	อัตราส่วนระหว่างความถี่ต่อกำลังจริงที่เปลี่ยนแปลง
K	-	อัตราขยายจากสัมประสิทธิ์การหน่วงจ่ายของโหลด
T_I	วินาที	ค่าความเฉื่อยของส่วนควบคุมหลัก

การออกแบบในหัวข้อนี้จะกำหนดให้ ระบบควบคุมมี Phase Margin (PM) เท่ากับ 45 องศา ที่ความถี่ตัด ω (rad / s) จึงได้ค่าอัตราขยายตามสมการที่ (3.6) และ (3.7) โดยรายละเอียดที่มาของสมการดังกล่าวจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก

$$K_I = \frac{\omega_c^2 \cdot (R + K) \sqrt{\left(\frac{\omega_c}{\omega_m}\right)^2 + 1}}{K \sqrt{\tan\left(45^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{\omega_c}{\omega_m}\right)\right)^2 + 1}} \quad (3.6)$$

$$K_P = \frac{K_I \tan\left(45^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{\omega_c}{\omega_m}\right)\right)}{\omega_c} \quad (3.7)$$

$$\text{โดยที่ } \omega_m = \frac{R + K}{RT_I}$$

ในการออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมสัดส่วนกับอินทิกรัลด้วยตัวแปรที่แสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งเป็นค่าของตัวแปรที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรของระบบควบคุมความถี่กำลังจริง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
ความถี่อ้างอิง (f_ref)	1 p.u.
โพลอ้างอิง (L_ref)	1 p.u.
ความเฉื่อยทางกล (M)	1.5
ลักษณะสมบัติรูป ความถี่กำลังจริง (R)	0.004 p.u.
ค่าคงที่ของโพลที่ขึ้นกับ ความเร็ว (D)	8.5 s

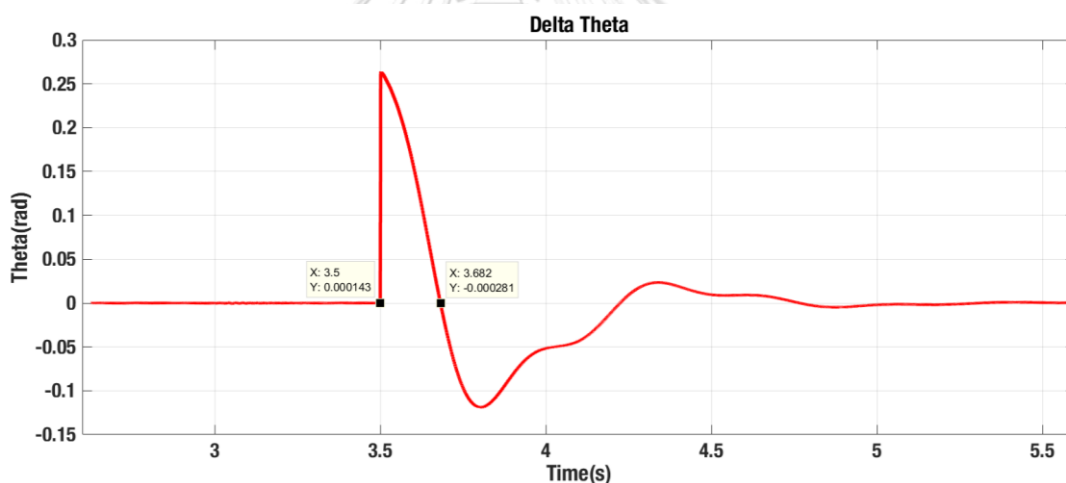
เมื่อกำหนดจากสมการที่ (3.6) และ (3.7) แล้วจะได้ว่า $K_I = 25.4048$ และ $K_P = 4.5398$ โดยคนได้มาจากจากออกแบบโดยใช้ $\omega_c = 6 \text{ rad} / \text{s}$ และทำการพินิจเสถียรภาพด้วยเงื่อนไขสมการที่ (3.3) และ (3.4) ได้ดังนี้

$$\frac{K_I}{K_P} = 5.596$$

$$\frac{D R + 1}{M R} = 172.333$$

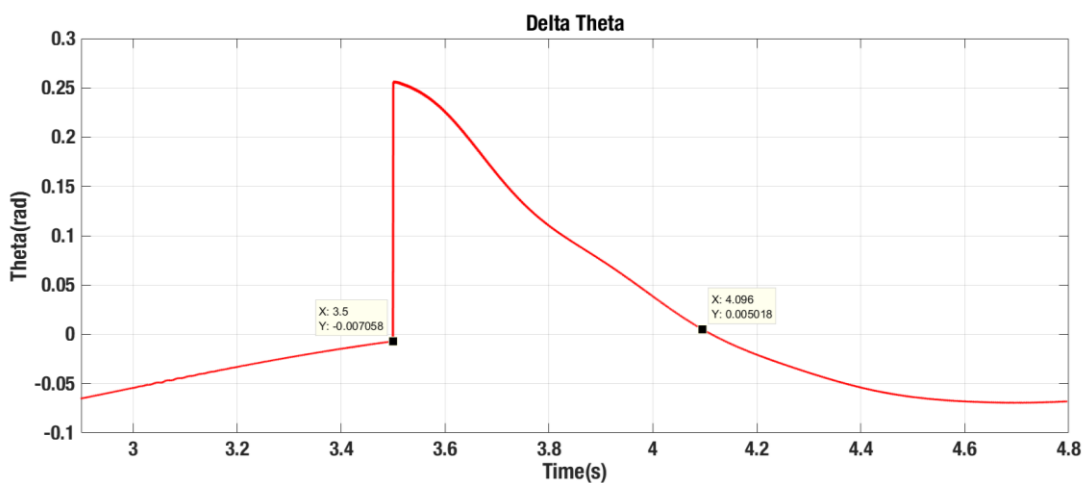
$$\therefore \frac{K_I}{K_p} < \frac{D R + 1}{M R}$$

จากการทดสอบเสถียรภาพของระบบควบคุมสำหรับการรีซิงโครไนซ์ข้างต้นนั้นสามารถนำมาแสดงได้ด้วยการจำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory ให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบควบคุม โดยเหตุการณ์จำลองนี้แรงดันโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสไปจากเดิม 10 องศา ดังนั้นระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์ที่ได้รับการออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมสัดส่วนกับอินทิกรัลจะทำการตรวจจับมุมเฟสและปรับแต่งมุมเฟสแรงดันไมโครกริดให้ซิงโครไนซ์กับมุมเฟสของแรงดันโครงข่ายที่เปลี่ยนไป ซึ่งมีผลตอบสนองตามเวลาที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 การจำลองในรูปที่ 3.8 นั้นออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมสัดส่วนกับอินทิกรัลด้วย $\omega_c = 6 \text{ rad} / \text{s}$ ซึ่งเวลาในการตอบสนองจะดูจากเวลาขาลง (Fall Time) โดยประมาณว่ามีค่าเป็นอัตราส่วนผกผันของ ω_c ซึ่งในที่นี้จะมีค่าประมาณ 0.167 วินาที



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางเวลาของระบบควบคุมสำหรับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดเมื่อมุมเฟสของระบบโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อ $\omega_c = 6 \text{ rad} / \text{s}$

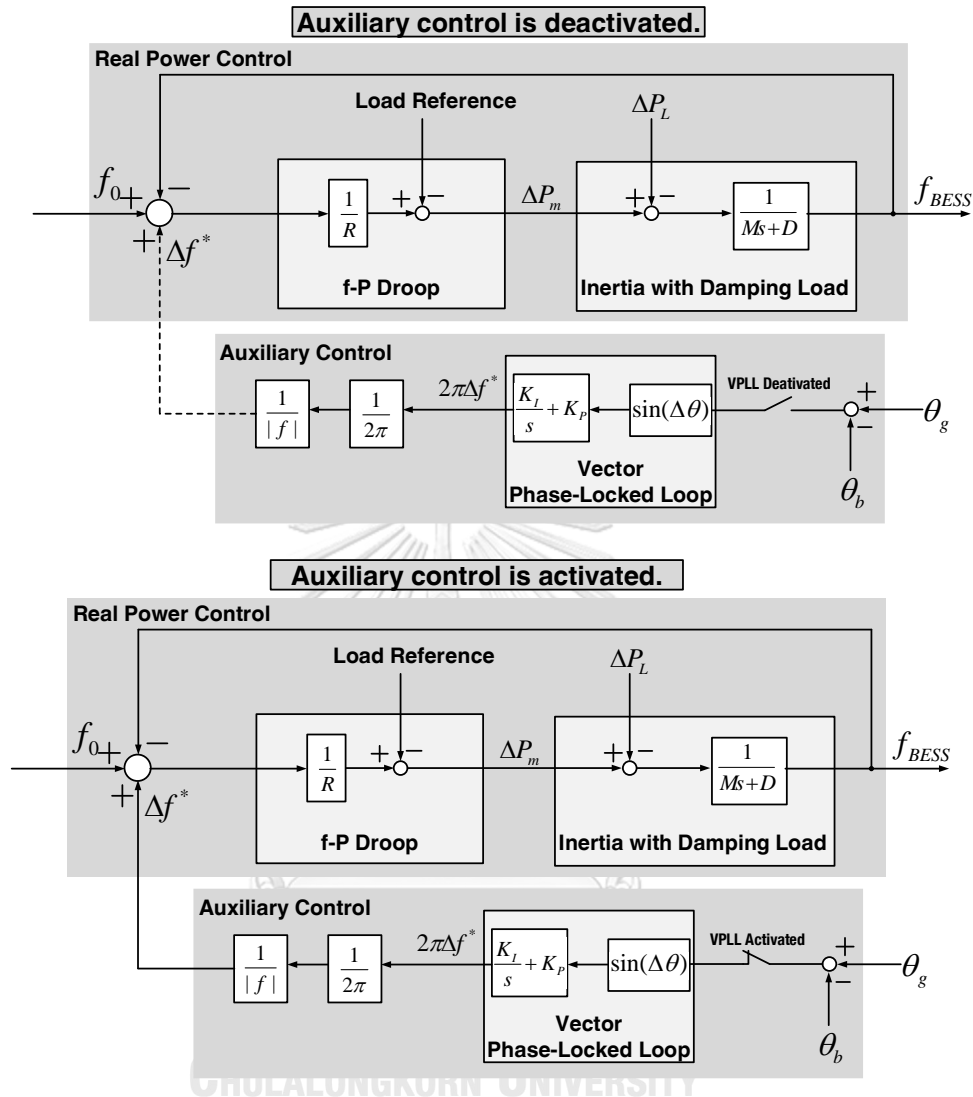
จากนั้นได้ทำการจำลองโดยการออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมสัดส่วนกับอินทิกรัลด้วย $\omega_c = 2 \text{ rad} / \text{s}$ ซึ่งเวลาในการตอบสนองจะดูจากเวลาขาลงประมาณ 0.5 วินาทีจากการคำนวณด้วยสมการ (3.6) และ (3.7) จะได้ว่า $K_I = 2.8907$ และ $K_p = 1.4793$ ซึ่งมีผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การจำลองแสดงผลตอบสนองทางเวลาของระบบควบคุมสำหรับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดเมื่อมุมเฟสของระบบโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อ $\omega_c = 2 \text{ rad / s}$

การจำลองเหตุการณ์ข้างต้นทั้งสองช่วยพิสูจน์ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมสัดส่วนกับอินทิกรัลตามที่นำเสนอ ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเวลาลงเป็นไปตามค่า ω_c เลือกใช้ได้ นั่นคือ 0.5 วินาที ดังนั้นการออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมสัดส่วนกับอินทิกรัลดังกล่าวสามารถนำไปใช้กับระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์ของไมโครกริดที่นำเสนอได้

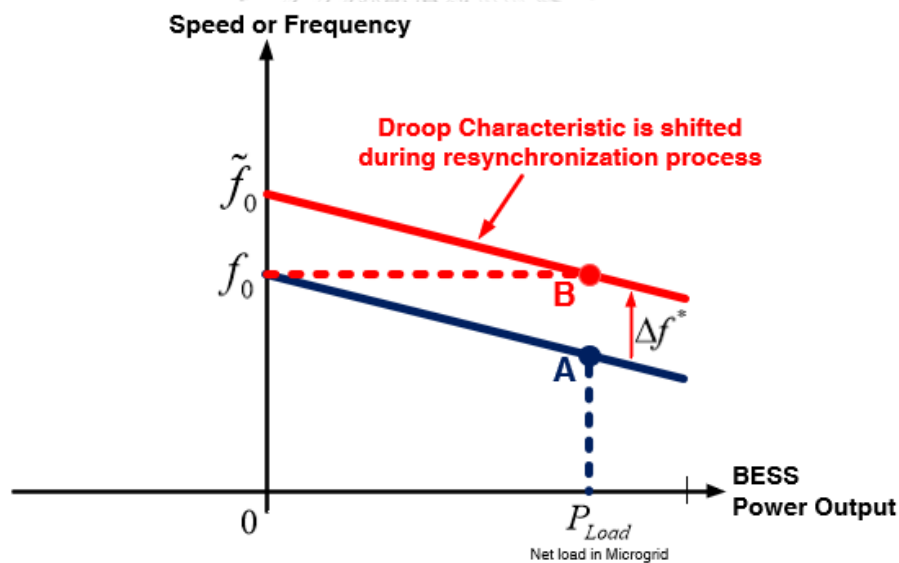
3.1.1.3 กลไกการรีซิงโครไนซ์ (Resynchronization Strategy)



รูปที่ 3.10 กลไกการทำงานของส่วนควบคุมรองสำหรับระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดที่นำเสนอ

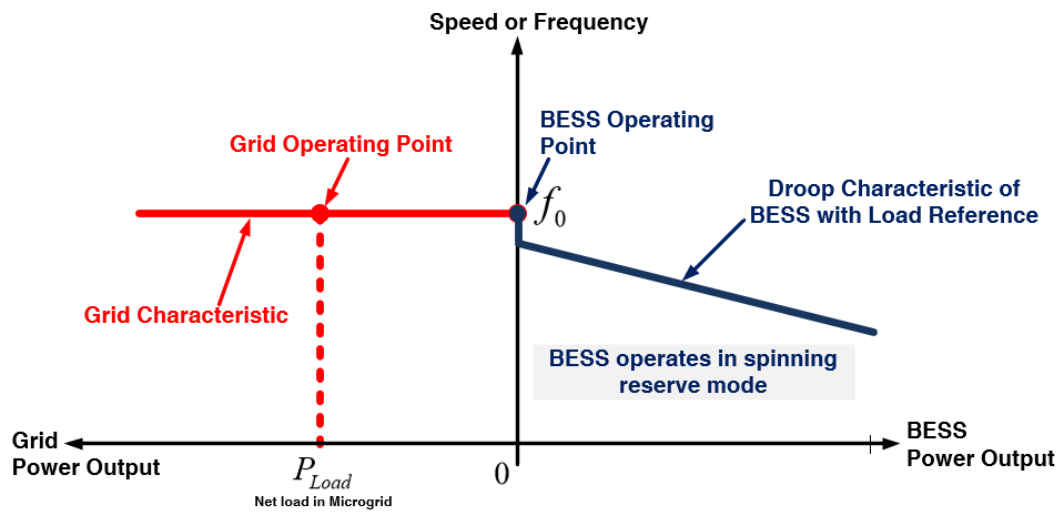
การรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วยระบบควบคุมของระบบแปลงผันกำลังที่นำเสนอเริ่มจากการที่ส่วนควบคุมรองถูกสั่งให้ทำงานโดยมีกลไกการสั่งให้ส่วนควบคุมรองดังแสดงในรูปที่ 3.10 เฟสล็อกกลุ๊ปในส่วนควบคุมรองจะตรวจจับความแตกต่างมุมเฟสของแรงดันระหว่างระบบไฟฟ้าหลักกับไมโครกริดว่าซิงโครไนซ์กันหรือไม่ จากนั้นเฟสล็อกกลุ๊ปจะสร้างสัญญาณ $2\pi\Delta f^*$ จากความต่างเฟสที่ตรวจจับได้ส่งต่อให้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล ก่อนที่จะส่งให้ส่วนควบคุมกำลังจริงที่ต่อเรียงกันอยู่เพื่อให้ส่วนควบคุมกำลังจริงปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งต้น เปลี่ยนจุดการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่าเดิมที่ความถี่ที่สูงขึ้น และ

เมื่อมุมเฟสแรงดันไฟฟ้าทั้งสองซิงโครไนซ์กันแล้วทำให้สัญญาณ $2\pi\Delta f^*$ มีค่าเป็นศูนย์ ส่วนควบคุมรองจะถูกสั่งให้หยุดทำงาน แต่แม้จะมีการหยุดการทำงานของส่วนควบคุมรองแล้ว ระบบควบคุมนี้ก็ยังคงค่า $2\pi\Delta f^*$ เอาไว้เพื่อรักษาจุดการทำงานหลังการปรับความถี่และมุมเฟสแล้ว เหตุผลที่ต้องปลดการทำงานของส่วนควบคุมรองเนื่องจากเมื่อทำการเชื่อมต่อกับโครงข่ายแล้วแรงดันโครงข่ายจะมีมุมเฟสที่นำมุมเฟสแรงดันของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เล็กน้อย หากยังมีการทำงานของเฟสล็อก ลูบต่อไปเรื่อยๆ ระบบควบคุมจะพยายามปรับความต่างเฟสให้เท่ากับศูนย์ซึ่งไม่สามารถทำได้ เมื่อทำการหยุดการทำงานของส่วนควบคุมรองแล้วและการควบคุมการรีซิงโครไนซ์ทำให้ความแตกต่างความถี่และมุมเฟสของไมโครกริดเทียบกับระบบไฟฟ้าหลักแล้วไม่เกินเงื่อนไขที่มาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดกำหนด ไมโครกริดสามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักได้ด้วยการปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุด PCC เมื่อการรีซิงโครไนซ์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และราบรื่นแล้วระบบไฟฟ้าหลักจะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ไมโครกริดแทนระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพการทำงานของรูปความถี่-กำลังจริงในรูปที่ 3.11



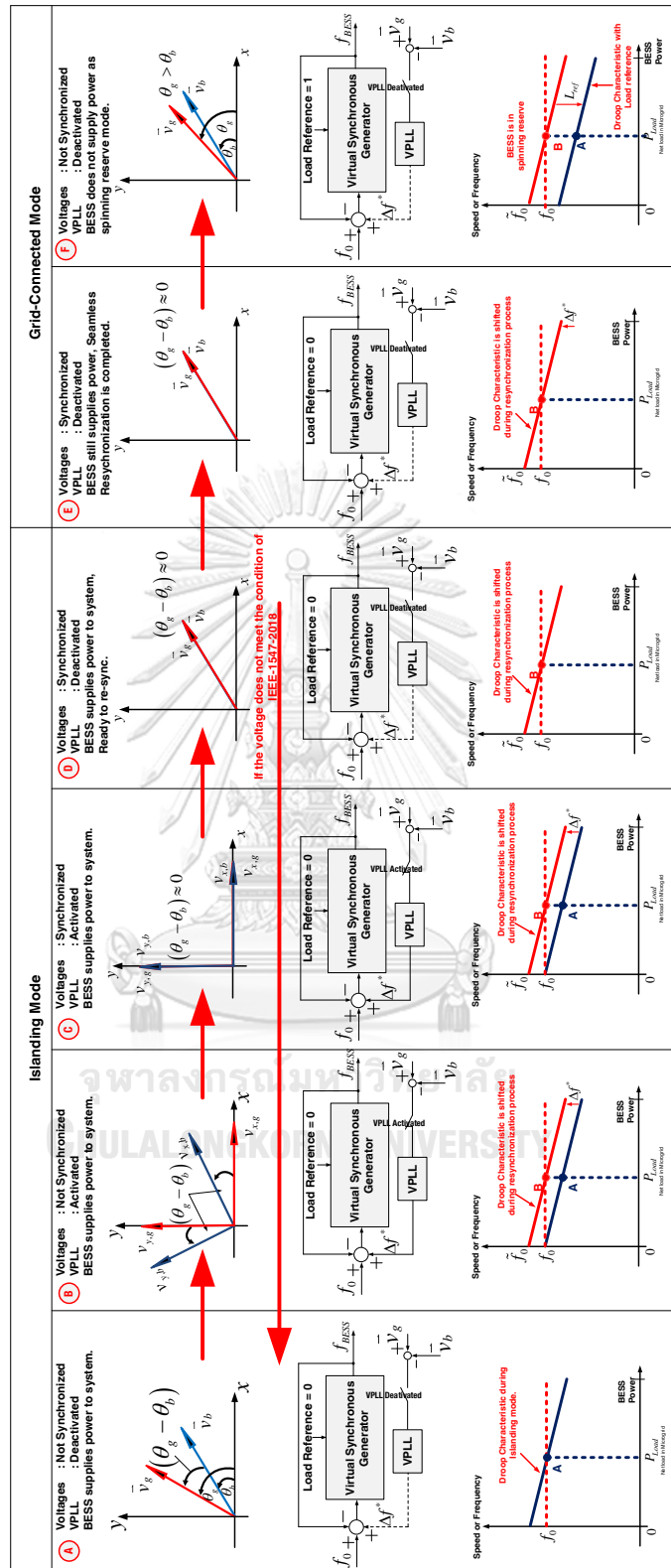
รูปที่ 3.11 ลักษณะสมบัติการจ่ายโหลดของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโครกริดทำงานในโหมดเปลี่ยนผ่านจากโหมดแยกอิสระไปยังโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่าย

หลังจากนั้นสามารถทำการปรับค่าโหลดอ้างอิงของระบบควบคุมรูปความถี่-กำลังจริงเพื่อให้ความถี่เริ่มต้นของลักษณะสมบัติรูปอยู่ต่ำกว่าความถี่ปกติของระบบไฟฟ้ากำลัง การกระทำดังกล่าวส่งผลให้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงานในโหมดพร้อมจ่ายสำหรับโหมดการเชื่อมต่อโครงข่ายของไมโครกริดแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะสมบัติรูปความถี่-กำลังจริงของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อไมโครกริดทำงานในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายและระบบกักเก็บพลังงานทำงานในโหมดพร้อมจ่าย

เพื่อให้เห็นถึงพลวัตของกลไกการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอสำหรับระบบควบคุมของระบบแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดในข้างต้น ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งได้สรุปอย่างค่อนข้างเป็นพลวัตของการทำงานทั้งหมดตั้งแต่โหมดการทำงานในโหมดแยกตัวอิสระจนไปถึงการเชื่อมต่อกับโครงข่ายที่สมบูรณ์อย่างราบรื่น และระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงานในสภาวะพร้อมจ่าย (Spinning Reserve) ตามหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้



รูปที่ 3.13 กลไกการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอสําหรับระบบควบคุมแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

3.3.2 มาตรฐานในการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด

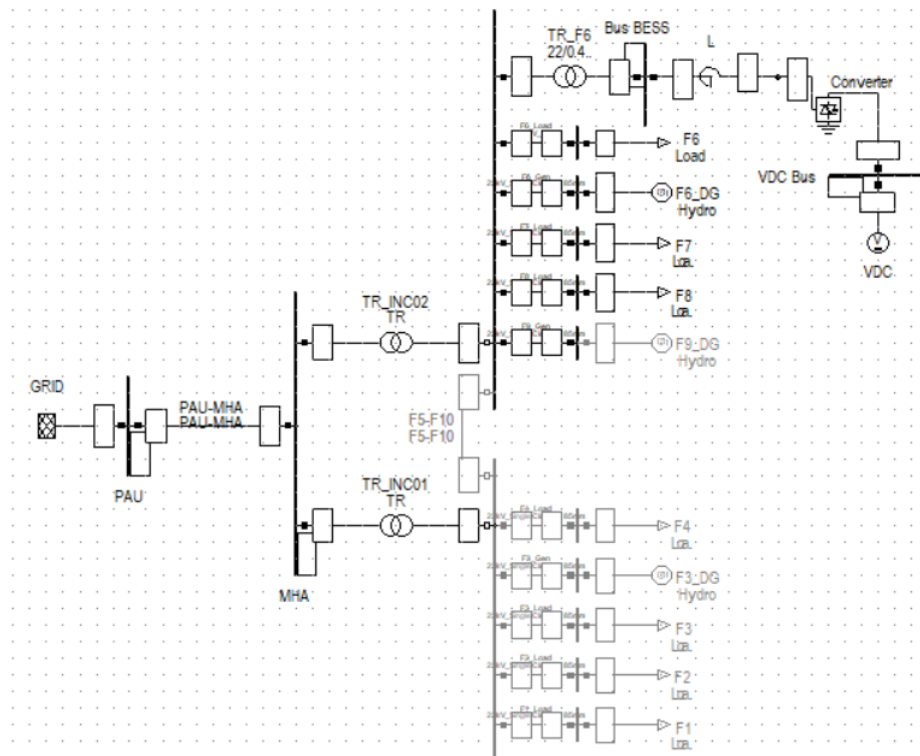
วิธีในการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดนั้นมีการนำเสนอทางวิชาการอย่างหลากหลายรวมถึงมาตรฐานของการรีซิงโครไนซ์ที่ยังอยู่ระหว่างการพิจารณาหาข้อสรุป [17] งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาและพิจารณามาตรฐานที่เหมาะสมและมีความเป็นสากลสำหรับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด คือ IEEE 1547-2018 ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ออกแบบเพื่อติดตั้งมีพิกัดของการจ่ายกำลังอยู่ที่ 4 เมกะวัตต์ ดังนั้น ความต่างของความถี่ต้องไม่เกิน 0.1 เฮิร์ตซ์ ($\Delta f \leq 0.1 \text{ Hz}$) ความต่างของแรงดันต้องไม่เกิน 0.03 p.u. ($\Delta V \leq 0.03 \text{ p.u.}$) ความต่างของมุมเฟสต้องไม่เกิน 10° ($\Delta \phi \leq 10^\circ$)

ตารางที่ 3.3 ข้อกำหนดในการรีซิงโครไนซ์ของไมโครกริดตามมาตรฐาน IEEE 1547-2018 [6]

พิกัดการจ่ายกำลังของแหล่งจ่าย (kVA)	ความต่างของความถี่ ($\Delta f, \text{ Hz}$)	ความต่างของขนาดแรงดัน ($\Delta V, \%$)	ความต่างของมุมเฟส ($\Delta \phi, ^\circ$)
0-500	0.3	10	20
>500-1500	0.2	5	15
>1500	0.1	3	10

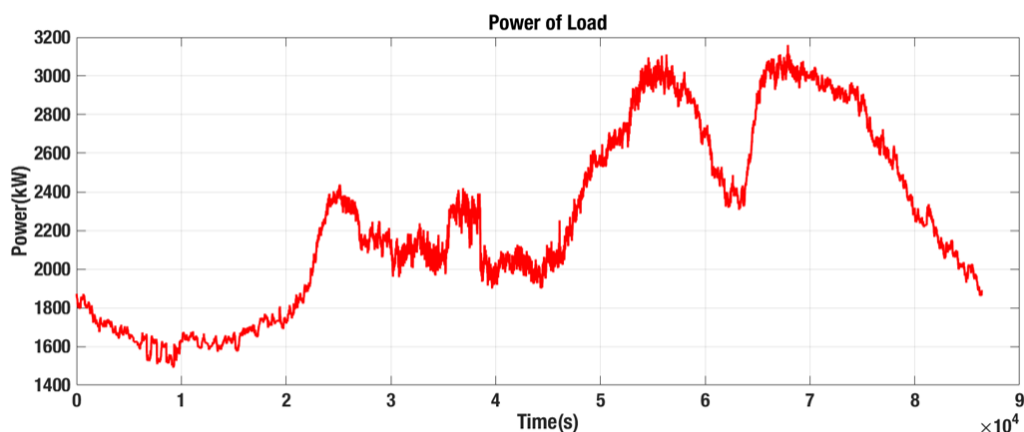
3.2 ผลการจำลองการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดเมืองแม่ฮ่องสอน

3.2.1. การจำลองการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดเฉพาะบัส INC02 ของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่



รูปที่ 3.14 จำลองระบบไฟฟ้าไมโครกริดบัส INC02 ของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนก่อนการรีซิงโครไนซ์ด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

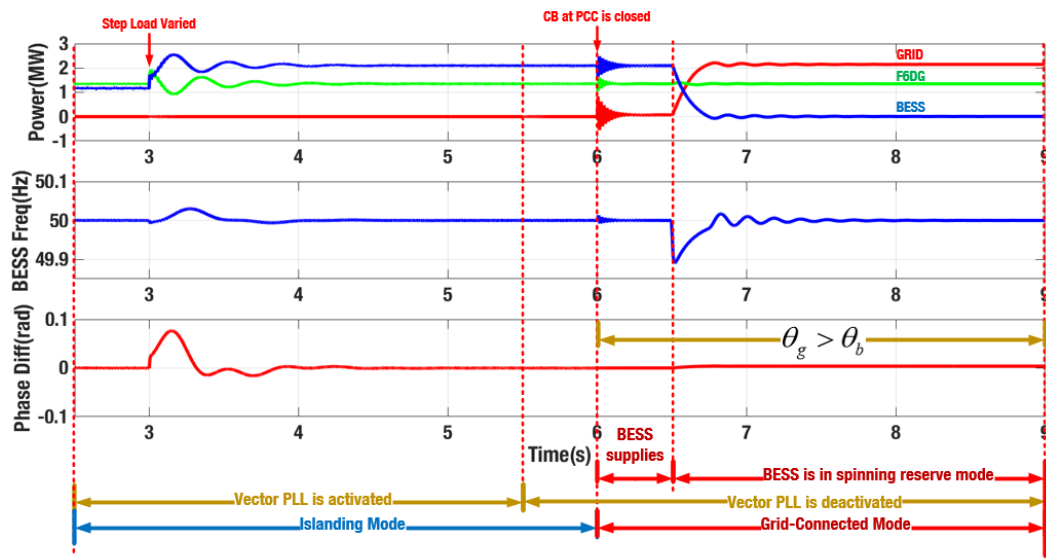
การจำลองการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดโดยเริ่มจากการจำลองในส่วนเฉพาะการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดบัส INC02 ก่อนเพื่อทดสอบถึงการรีซิงโครไนซ์ด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ว่าสามารถทำได้อย่างราบรื่นโดยในระบบไฟฟ้าของไมโครกริดดังกล่าวมีโหลดจำนวนหนึ่งและมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระจายตัวร่วมทำงานกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วย รูปที่ 3.14 แสดงถึงระบบไฟฟ้าไมโครกริดบัส INC02 ของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน



รูปที่ 3.15 ข้อมูลโหลดของระบบจำหน่ายราย 10 วินาทีเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2561 จากทาง กฟจ. ฟีดเดอร์ที่ F6 F7 และ F8 รวมกันซึ่งเป็นโหลดของระบบไมโครกริดที่พิจารณาเฉพาะบัส INC02

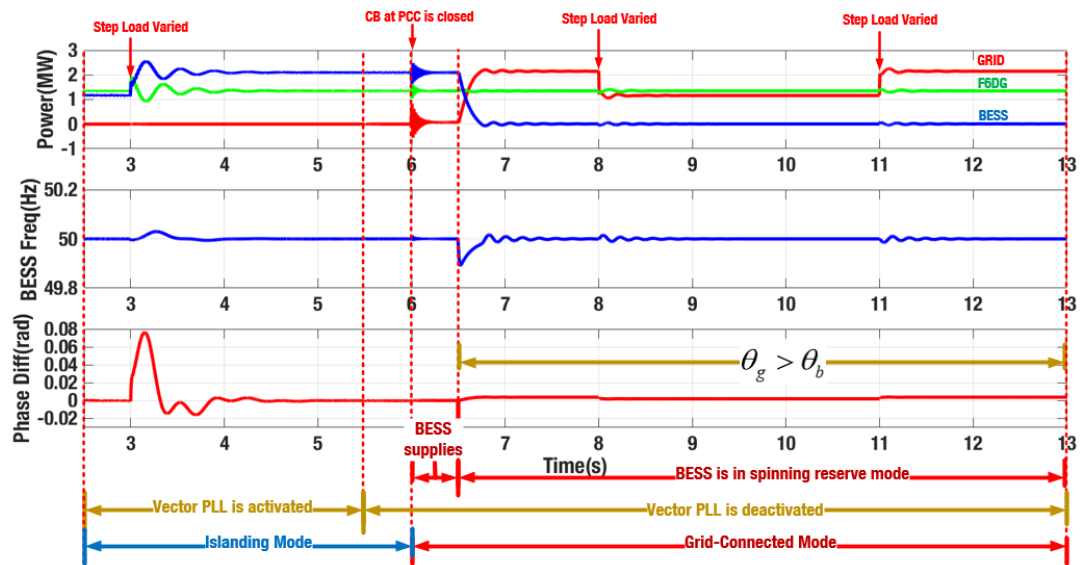
การจำลองเหตุการณ์การรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory แสดงได้ดังรูปที่ 3.16 และสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้ เริ่มจากการที่ไมโครกริดทำงานอยู่ในโหมดแยกตัวอิสระจากนั้นทำการสั่งการให้ส่วนควบคุมรองทำงานเพื่อตรวจจับความต่างของมุมเฟสระหว่างแรงดันของไมโครกริดเทียบกับแรงดันของระบบไฟฟ้าหลัก ในการจำลองได้ทำการทดสอบให้เห็นว่าเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่มนั้นสามารถทำงานในการตรวจจับมุมเฟสเมื่อความถี่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดภายในไมโครกริดได้ โดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดภายในไมโครกริดแบบขั้นบันได (Step Load Variable) ขนาด 1 เมกะวัตต์ ในวินาทีที่ 3 ของการจำลอง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่รุนแรงกว่าโหลดที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับข้อมูลของโหลดจากระบบจำหน่ายดังแสดงในรูปที่ 3.15 พบว่าเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่มนั้นสามารถตรวจจับความต่างเฟสนี้และระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบก็เก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่นำเสนอสมาสามารถปรับมุมเฟสกลับมาให้ซิงโครไนซ์กับระบบไฟฟ้าหลักได้ภายใน 1.5 วินาที จากนั้นเฟสล็อกกลุ่ปจึงหยุดทำงานเนื่องจากความถี่ และ มุมเฟสของไมโครกริดนั้นตรงตามกับสัญญาณอ้างอิงแล้วซึ่งส่วนควบคุมรองได้ถูกสั่งให้หยุดทำงานในวินาทีที่ 5.5 ของการจำลอง ระหว่างนี้ไมโครกริดอาจมีเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบหรือการกระทำใดๆ ที่ส่งผลต่อความถี่ของระบบแต่ถ้าค่ามุมเฟส และความถี่ของไมโครกริดที่เปลี่ยนไปนั้นไม่เกินขอบเขตเงื่อนไขที่มาตรฐานกำหนดจากตารางที่ 3.1 ไมโครกริดก็พร้อมที่จะทำการรีซิงโครไนซ์ได้ ดังนั้นจึงมีการสั่งให้ปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อเปลี่ยนผ่านไปยังโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย หลังจากการปิดวงจรโครงข่ายจะทำหน้าที่เป็นผู้จัดตั้งระบบไฟฟ้าจากนั้นวินาที 6.5 ของการจำลองได้มีการปรับโหลดอ้างอิงภายในชุดควบคุมรูปของระบบก็เก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อให้ระบบก็เก็บพลังงานอยู่ในสภาพพร้อมจ่ายซึ่งระบบไฟฟ้าหลักจะจ่ายกำลังจริงให้กับภาระทางไฟฟ้าในระบบจากที่ระบบก็เก็บพลังงานเคยจ่ายอยู่ก่อนหน้านั้นแสดงให้เห็นถึงการทำงานของผูู้จัดตั้ง

โครงข่าย อย่างไรก็ตามหากมีการเปลี่ยนแปลงทางความถี่ในช่วงวินาทีที่ 5.5-6 แล้วเกินจากขอบเขตที่มาตรฐานกำหนด ส่วนควบคุมรองสามารถกลับมาทำงานเพื่อตรวจจับความต่างของมุมเฟส ให้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ปรับความถี่ของไมโครกริดให้ตรงตามเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ได้



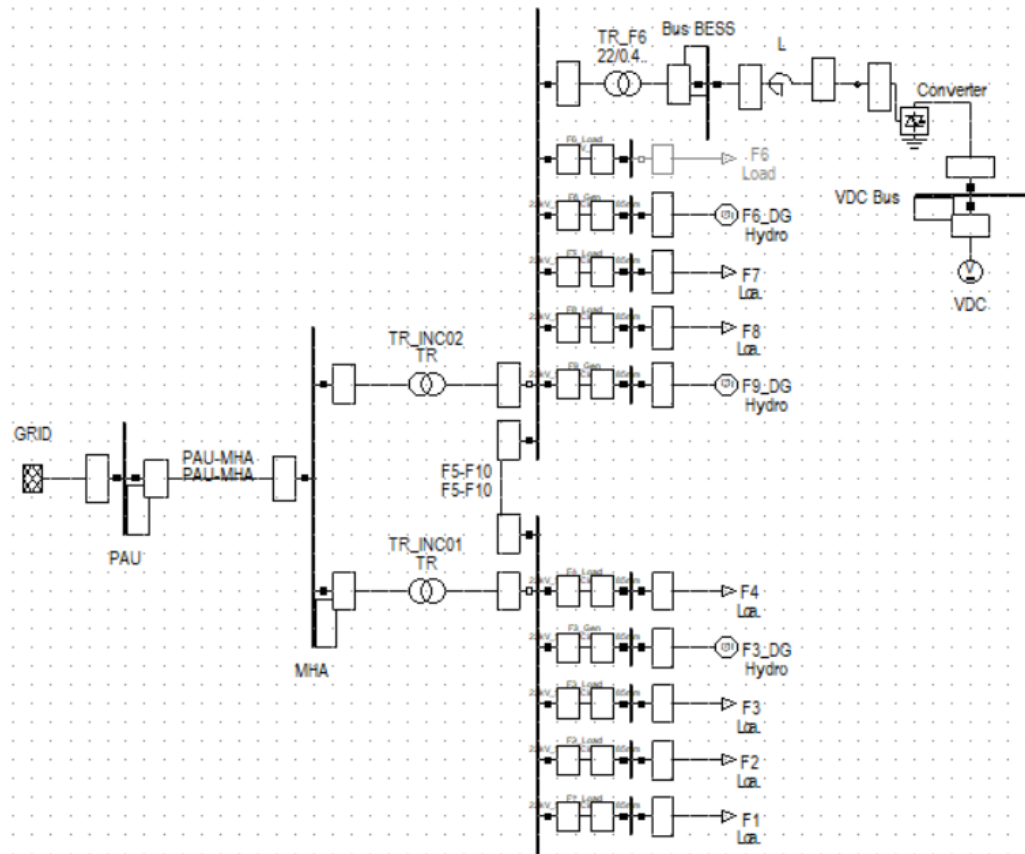
รูปที่ 3.16 ผลการลองกลไกการทำงานของกริดรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

และเพื่อให้เห็นถึงการทำงานตั้งแต่โหมดแยกตัวอิสระไปจนถึงโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายอย่างสมบูรณ์และราบรื่นด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ จึงได้จำลองเหตุการณ์การทำงานดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งมีลักษณะกลไกการทำงานเช่นเดียวกับรูปที่ 3.16 แต่เพิ่มเติมให้เห็นถึงโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลังการรีซิงโครไนซ์อย่างราบรื่นว่า โครงข่ายเป็นผู้จัดตั้งระบบไฟฟ้าทั้งหมด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดเกิดขึ้นโครงข่ายจะเป็นผู้จ่ายกำลังให้แก่โหลดที่เปลี่ยนแปลงนั้นและระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงานในสภาพพร้อมจ่าย กล่าวคือระบบกักเก็บพลังงานจะไม่จ่ายกำลังให้กับระบบจนกว่าความถี่ของระบบจะตกลงต่ำกว่าค่าความถี่เริ่มต้นที่ถูกตั้งค่าไว้ ในสภาพพร้อมจ่ายนี้ซึ่งก็คือจะกลับไปทำงานในโหมดและมีลักษณะการทำงานตามรูปความถี่-กำลังจริงของโหมดเชื่อมต่อกับโครงข่ายของไมโครกริดนั่นเอง



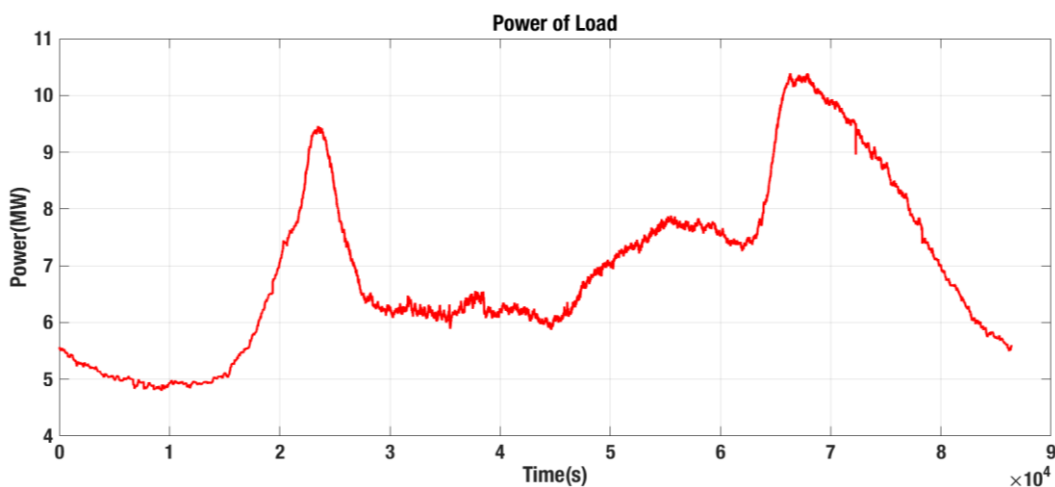
รูปที่ 3.17 ผลการลองกลไกการทำงานของกริดซึ่งโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่รวมไปถึงการทำงานในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายของไมโครกริด

3.2.2. การจำลองการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

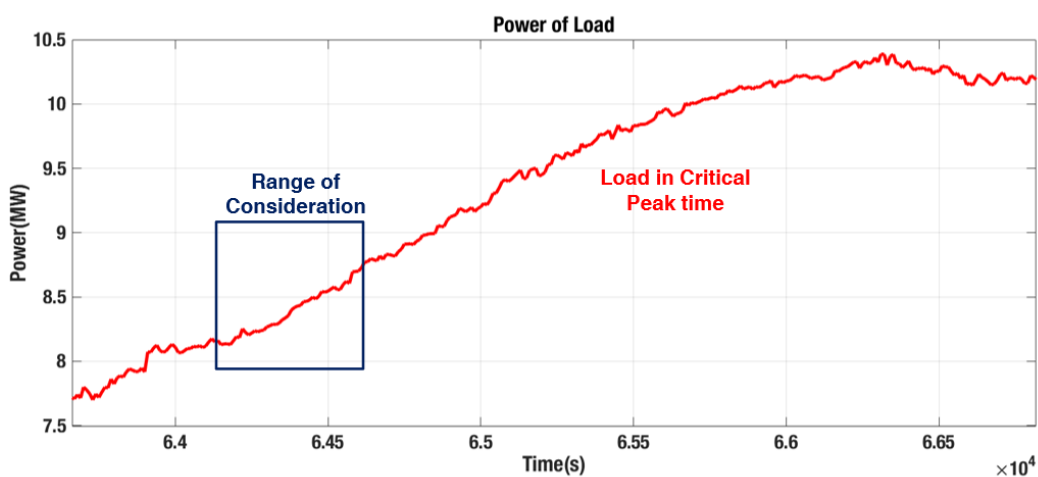


รูปที่ 3.18 จำลองระบบไฟฟ้าของไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอนในโหมดแยกตัวอิสระ ก่อนการรีซิงโครไนซ์ด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

การจำลองนี้เพื่อให้เห็นถึงการทำงานเมื่อต้องการที่จะให้ระบบไฟฟ้าของไมโครกริดทั้งบัส INC01 และบัส INC02 :ซึ่งมีโหลดที่มากขึ้นและมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระจายตัวที่มากขึ้นและมีขนาดใหญ่เทียบกับการจำลองในหัวข้อ 3.2.1 สามารถทำการรีซิงโครไนซ์ด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ได้อย่างราบรื่น รูปที่ 3.18 แสดงถึงการจำลองระบบไฟฟ้าของไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอนในโหมดแยกตัวอิสระก่อนที่จะทำการรีซิงโครไนซ์โดยบัส INC01 และ บัส INC02 เชื่อมต่อกันด้วยฟีดเดอร์ F5 และ ฟีดเดอร์ F10 (Tie Line)



รูปที่ 3.19 ข้อมูลโหลดของระบบจำหน่ายระบบไฟฟ้าไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนราย 10 วินาที เมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2561 จากทาง กฟจ.

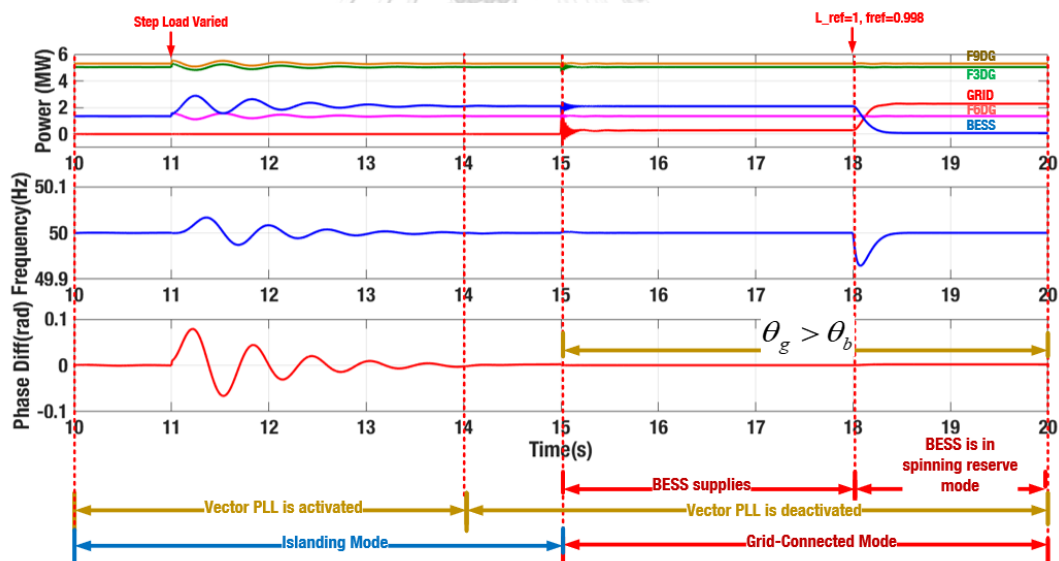


รูปที่ 3.20 ช่วงการเปลี่ยนแปลงของโหลดในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่พิจารณา

จากรูปที่ 3.19 แสดงข้อมูลของโหลดในระบบไฟฟ้าของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนราย 10 วินาที เมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2561 โดยในการจำลองนี้จะให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์ด้วยการแสดงให้เห็นว่าแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดเกิดขึ้น ระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์สามารถที่จะปรับแต่งความถี่และมุมเฟสของแรงดันไมโครกริดให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดได้ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 3.20 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า 1 MW (จาก 8 MW เป็น 9 MW) ซึ่งอยู่ในช่วงชุดข้อมูล 6393-6488 = 950 วินาที เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงนี้มีความรุนแรงที่มากกว่านั้นในการจำลองนี้ทดสอบด้วยการเปลี่ยนแปลงของโหลด 1 เมกะวัตต์ ใน 1 วินาทีแบบขั้นบันได ถือได้ว่าเป็น

การเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วและรุนแรงมากเมื่อเทียบกับข้อมูลโหลดของระบบไฟฟ้าไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

ผลการจำลองเหตุการณ์สำหรับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนแสดงได้ดังรูปที่ 3.21 ซึ่งมีกลไกการทำงานดังนี้ ในวินาที 11 ได้มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดขนาด 1 เมกะวัตต์ในลักษณะขั้นบันได ซึ่งระบบควบคุมการรีซิงโครไนซ์ก็สามารถที่จะทำการปรับมุมเฟสและความถี่ของแรงดันไมโครกริดให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ตามมาตรฐานกำหนดได้จากนั้น ได้มีการหยุดการทำงานของส่วนควบคุมรองในวินาทีที่ 14 และทำการเชื่อมต่อกับโครงข่ายด้วยการปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้ง INCO1 และ INCO2 ซึ่งก็สามารถทำการรีซิงโครไนซ์ได้อย่างราบรื่น แต่ระบบก็เก็บพลังงานแบตเตอรี่ยังคงจ่ายกำลังให้กับระบบโครงข่ายอยู่ตามลักษณะสมบัติรูปความถี่กำลังจริง ดังนั้นจึงทำการปรับโหลดอ้างอิง (L_{ref}) และความถี่ตั้งต้น (f_{ref}) ของระบบควบคุมความถี่กำลังจริงเพื่อให้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงานในสภาพพร้อมจ่าย (Spinning Reserve) ไมโครกริดจึงอยู่ในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายและระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่อยู่ในสภาพพร้อมจ่าย



รูปที่ 3.21 ผลการลองกลไกการทำงานของกรรซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่รวมไปถึงการทำงานในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายของไมโครกริด

การจำลองเหตุการณ์ที่นำเสนอมาทำให้เห็นถึงการเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงานจากโหมดแยกตัวอิสระไปยังโหมดเชื่อมต่อโครงข่าย หรือ การรีซิงโครไนซ์ด้วยระบบควบคุมระบบการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่นำเสนอได้อย่างราบรื่นและเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ

ในหัวข้อที่ 3.1.1.3 และรูปที่ 3.13 ซึ่งการจำลองนี้มีผลการทดลองที่เป็นไปตามหลักการที่ค่อนข้างเป็นพลวัต นอกจากนี้การจำลองยังแสดงให้เห็นถึงการถ่ายโอนการจ่ายกำลังระหว่างระบบกักเก็บพลังงานและระบบไฟฟ้าหลักตามลักษณะสมบัติของรูปความถี่-กำลังจริงที่มีการป้อนค่าความถี่อ้างอิงก็เกิดขึ้นอย่างราบรื่นเช่นกัน



บทที่ 4

ผลกระทบจากเวลาประวิงของระบบสื่อสารในการวัดสัญญาณอ้างอิงต่อการรีซิงโครไนซ์แบบระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

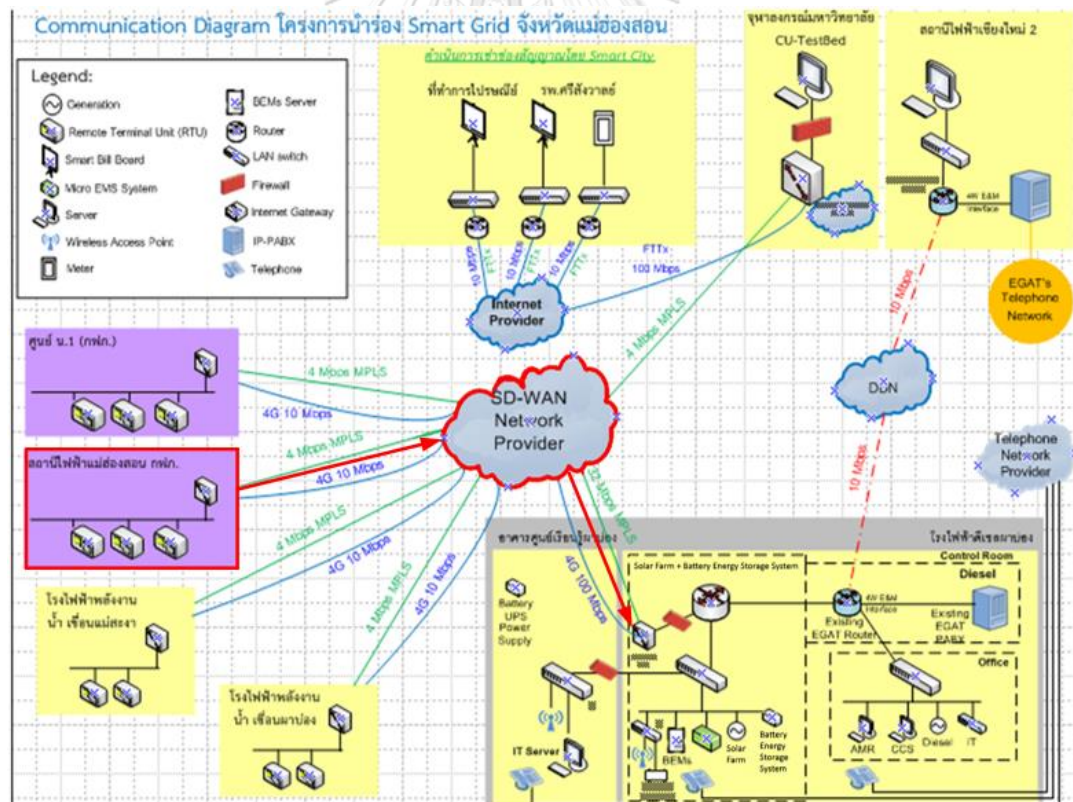
บทที่ 3 ได้กล่าวถึงวิธีการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วยหลักการตรวจจับความต่างมุมเฟสของสัญญาณแรงดันทั้งสองที่ใช้เปรียบเทียบกับเพื่อทำการควบคุมแรงดันทางด้านไมโครกริดให้ใกล้เคียงและเป็นไปตามที่มาตรฐานการรีซิงโครไนซ์กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าการวัดค่าสัญญาณอ้างอิง (แรงดันของโครงข่าย) นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด เนื่องจากหากสัญญาณที่ได้รับมามีความคลาดเคลื่อนไปยิ่งมากเท่าไรก็จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของทางฝั่งไมโครกริดที่ควบคุมและปรับให้สัญญาณเป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงที่รับมามากเท่านั้น งานวิจัยฉบับนี้ได้สังเกตเห็นถึงผลกระทบที่สามารถเกิดขึ้นได้จากการวัดค่าสัญญาณผ่านระบบสื่อสารซึ่งก่อให้เกิดเวลาประวิงขึ้นในการส่งสัญญาณจากจุดเชื่อมต่อมายังระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ การศึกษาถึงผลกระทบนี้จะช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถออกแบบระบบสื่อสารหรือช่องทางการสื่อสารของการรับส่งสัญญาณของอุปกรณ์วัดมายังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม ทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์ และทางด้านวิศวกรรม เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานจริงของการรีซิงโครไนซ์แบบระยะไกลไมโครกริด

ในบทนี้จึงจะได้อธิบายถึงองค์ประกอบของเวลาประวิงที่นำมาพิจารณาในการส่งสัญญาณจากอุปกรณ์วัดมายังระบบควบคุมการแปลงผันของระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งมีการส่งสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.1 นอกจากนี้ยังมีการอธิบายวิธีการคำนวณเวลาประวิงโดยประมาณของการส่งสัญญาณจากจุดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนมายังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่โรงไฟฟ้าอำเภอผาบ่อง พร้อมกับการจำลองให้เห็นถึงผลกระทบที่มีต่อการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน และท้ายที่สุดงานวิจัยฉบับนี้ได้เสนอแนวคิดที่จะใช้ในการชดเชยผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเวลาประวิงดังกล่าวเพื่อให้การเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงานของไมโครกริดจากโหมดแยกอิสระไปยังโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายเป็นไปได้อย่างราบรื่น

4.1 ระบบสื่อสารของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

ระบบสื่อสารและสารสนเทศในไมโครกริดถือเป็นส่วนสำคัญเพราะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ที่อยู่ห่างกันออกไปอยู่คนละสถานีไฟฟ้าต้องอาศัยการเชื่อมต่อเพื่อส่งข้อมูลไปยังศูนย์ควบคุม และ

ระบบควบคุมของอุปกรณ์ต่างๆภายในไมโครกริด ซึ่งต้องเฝ้าระวังและดูแลอย่างใกล้ชิด เนื่องจากหากระบบสื่อสารขัดข้องอาจทำให้อุปกรณ์ภายในไมโครกริดไม่สามารถทำงานได้ รวมไปถึงความมั่นคงปลอดภัยของระบบที่ต้องเฝ้าระวังอย่างมาก ทั้งนี้ระบบสื่อสารของไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอนจะใช้วิธีในการเข้าสัญญาณจากผู้ให้บริการในพื้นที่ เนื่องด้วยปัจจัยที่ไม่สามารถทำการเดินระบบสื่อสารในพื้นที่ขึ้นใหม่เองได้เพราะไม่ใช่พื้นที่ของทางไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย รวมถึงปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์ และความมั่นคงของระบบสื่อสาร อย่างไรก็ตามการเลือกใช้รูปแบบของระบบสื่อสารไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอนยังคงอยู่ในช่วงของการออกแบบเนื่องจากจำเป็นที่จะต้องมีการคำนึงถึงรูปแบบและฟังก์ชันการทำงานรวมถึงความเหมาะสมกับค่าใช้จ่ายในการติดตั้งหรือเช่าบริการจากผู้ว่าจ้างในพื้นที่ของอำเภอแม่ฮ่องสอน ดังนั้นในรายงานฉบับนี้จะได้อ้างอิงข้อมูลของผู้ว่าจ้างรายหนึ่งในพื้นที่เพื่อให้ทราบถึงรูปแบบของระบบสื่อสารที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงของพื้นที่ เพื่อที่จะได้ทราบถึงผลกระทบที่ใกล้เคียงกับที่ใช้จริงจากระบบสื่อสารต่อการวัดสัญญาณเพื่อทำการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด



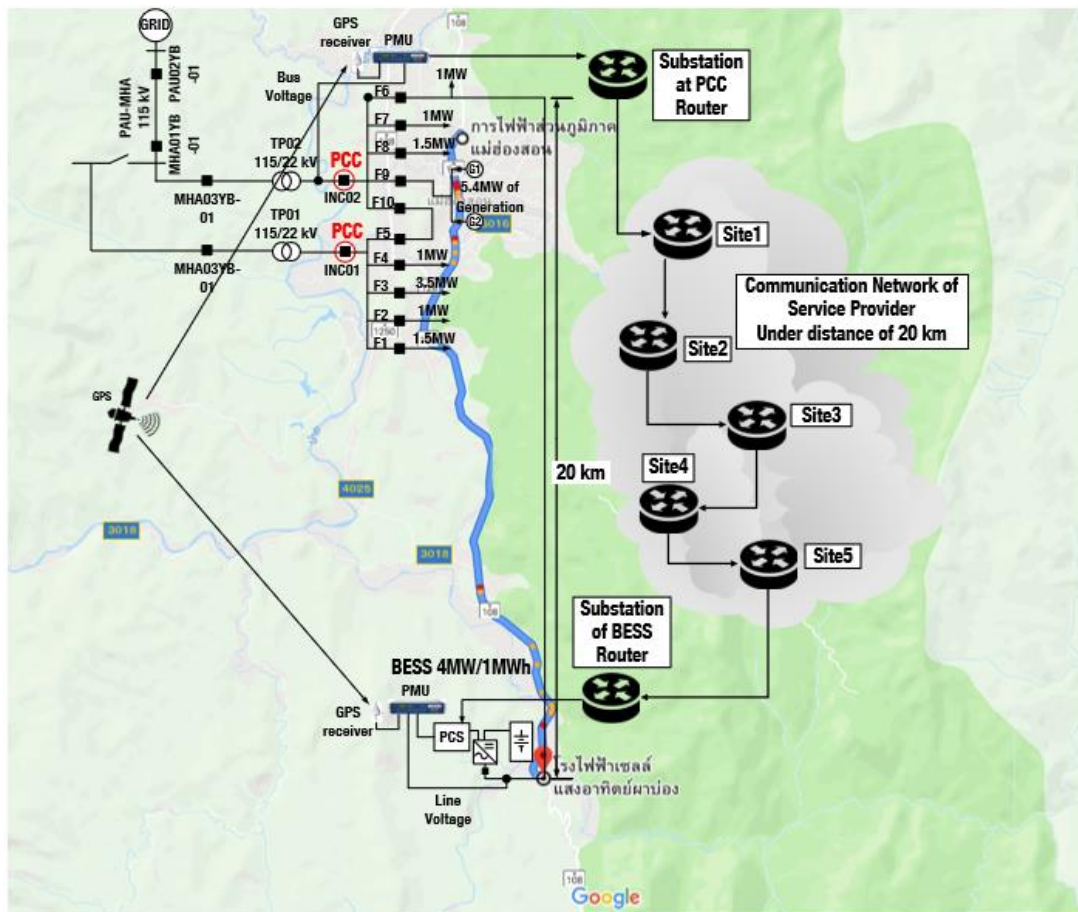
รูปที่ 4.1 ภาพรวมของระบบสื่อสารในไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอนที่ออกแบบโดยฝาสื่อสารกฟผ.

ณ สถานะปัจจุบัน ระบบสื่อสารสำหรับโครงการไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ยังคงอยู่ระหว่างขั้นตอนการออกแบบเชิงแนวคิด (Conceptual Design) โดยฝ่ายระบบสื่อสาร การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) โดยแนวคิดในการออกแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 จากรูปแสดงถึงแผนผังการเชื่อมโยงหลักของระบบสื่อสารในไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่ถูกออกแบบไว้เบื้องต้น ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะให้ความสนใจศึกษาเพียงการทำงานของการทำงานของการเชื่อมโยงของระบบสื่อสารระหว่างจุดเชื่อมต่อ (Point of Common Coupling; PCC) ที่สถานีไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดแม่ฮ่องสอน (ซึ่งเนื้อหาต่อจากนี้ไปจะใช้คำย่อ กฟจ.) ผ่านโครงข่ายสื่อสารแบบ SD-WAN ของผู้ให้บริการภายในพื้นที่ (SD-WAN Network Provider) ไปยังโรงไฟฟ้าผาบ่อง (เนื้อหาต่อจากนี้จะใช้คำย่อ รพฟ. ผาบ่อง) ที่มีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ติดตั้งอยู่ ระบบสื่อสารจะใช้โปรโตคอลชนิด Multiprotocol Label Switching (MPLS) และเลือกตัวนำสำหรับการเชื่อมต่อแต่ละโหนดด้วยใยแก้วนำแสง (Optical Fiber) ซึ่งมีความไวในการส่งผ่านสัญญาณที่ไวมาก

อย่างไรก็ดี ในการระบุแบนด์วิธของการส่งสัญญาณระหว่าง PCC ที่ กฟจ. และ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ที่ รพฟ. ผาบ่อง นั้น ฝ่ายระบบสื่อสาร กฟผ. ได้ให้ความสำคัญกับกระบวนการวิจัยโครโนซอร์ระยะไกล แต่ยังคงขาดข้อมูลสนับสนุนเชิงวิชาการที่สามารถกำหนดค่าแบนด์วิธที่เหมาะสมได้ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ที่จะศึกษาผลกระทบของเวลาประวิงจากการสื่อสารข้อมูลแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ PCC ที่ กฟจ. มายัง ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ที่ รพฟ. ผาบ่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบและประกอบตัดสินใจเลือกใช้รูปแบบของระบบสื่อสารที่เหมาะสมได้

รูปที่ 4.2 แสดงถึงระบบไฟฟ้ากำลังและระบบสื่อสารในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการวิจัยโครโนซอร์ระยะไกล ในเบื้องต้นหากพิจารณาในส่วนระบบไฟฟ้ากำลัง โดยสมมติว่าหากไมโครกริดกำลังทำงานในโหมดแยกตัวอิสระ เซอร์กิตเบรกเกอร์ INC02 จะถูกเปิดออก และมีรีเลย์ 25 (Sync-Checked Relay) ทำหน้าที่ตรวจดู ความต่างของขนาดแรงดัน ความต่างของมุมเฟส และความต่างของความถี่ ระหว่างแรงดันโครงข่าย \bar{v}_g และแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของไมโครกริดที่กำหนดโดยแรงดันระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ \bar{v}_b (แรงดันที่ F6) โดยเมื่อ รีเลย์ 25 ถูกสั่งการจากกระบวนการวิจัยโครโนซอร์ รีเลย์ก็จะสั่งปิดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ INC02 หากว่าความต่างขนาดแรงดัน ความต่างของมุมเฟส และความต่างของความถี่ อยู่ในเกณฑ์ที่ปรับตั้งตามมาตรฐาน IEEE 1547-2018 (ตารางที่ 3.1) เพื่อเชื่อมต่อไมโครกริดกลับไปยังโครงข่าย (Reconnect) จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าในทางกายภาพการเชื่อมต่อกลับไปยังโครงข่ายจะกระทำที่ PCC ของ กฟจ. ในขณะที่การวิจัยโครโนซอร์ระหว่าง

แรงดัน \bar{v}_g และ \bar{v}_b จะเกิดขึ้นที่ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ธิณ รพฟ. ฌาบอง ที่อยู่ห่างไกล ออกไปประมาณ 20 กิโลเมตร ดังนั้นเวลาประวิงจากการสื่อสารข้อมูลของแรงดันโครงข่าย \bar{v}_g จาก กฟจ. ไปยัง รพฟ. ฌาบอง จึงเป็นประเด็นที่ต้องพิจารณา



รูปที่ 4.2 ระบบไฟฟ้ากำลังและแนวคิดเชิงออกแบบของระบบสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน (กฟจ., กฟภ.) และ โรงไฟฟ้าฌาบอง (กฟผ.)

สำหรับในส่วนระบบสื่อสารข้อมูลนั้น จะเริ่มต้นพิจารณาจากอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันโครงข่าย โดยฝ่าย อรค. (ฝ่ายระบบควบคุมและป้องกัน) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้ออกแบบระบบตรวจจับแรงดันด้วยอุปกรณ์ Phasor Measurement Unit (PMU) โดย PMU1 จะส่งผ่านข้อมูลแรงดันโครงข่าย \bar{v}_g ผ่านช่องทางสื่อสารใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) ผ่านเราต์เตอร์ที่ กฟจ. ซึ่งเชื่อมต่อกับโครงข่ายสื่อสารของผู้ให้บริการ (Service Provider) ภายในพื้นที่ ซึ่งจะผ่าน โหนด (Node) หรือ ฮอป (Hop) ของระบบสื่อสารทั้งหมดจำนวน 5 โหนด ทั้งนี้เวลาประวิงจากการประมวลผลของโหนดจะมีนัยยะสำคัญมากของระบบสื่อสารนี้

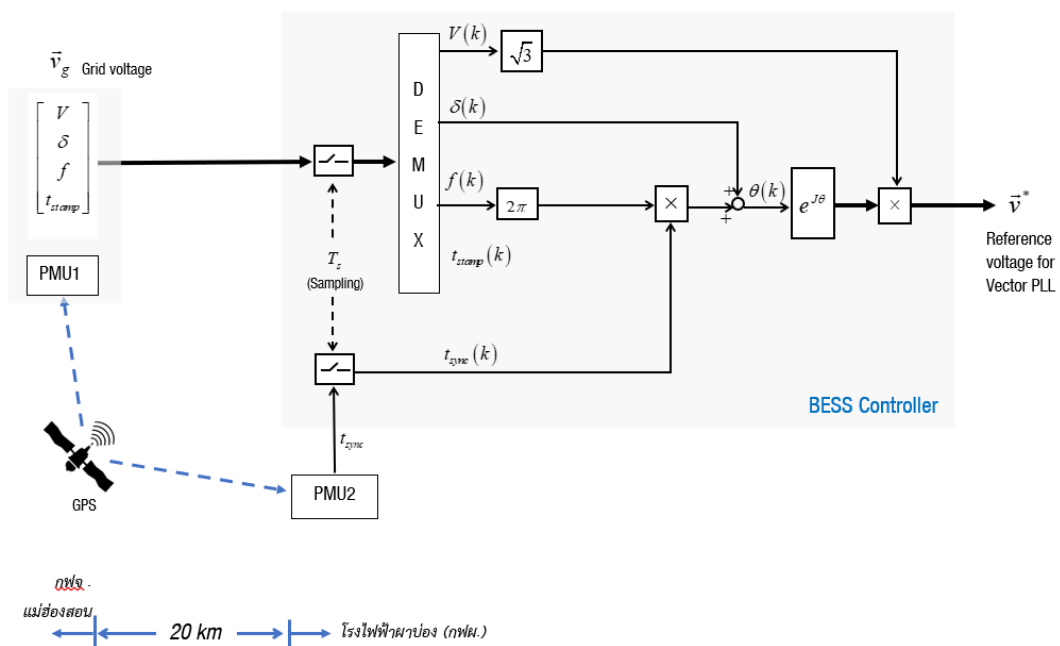
ในส่วนการตรวจจับแรงดันด้านออกของ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ V_b ที่เชื่อมต่อกับสายจำหน่ายไปยังจุดเชื่อมต่อผ่านฟีดเตอร์ F6 นั้น อินเวอร์เตอร์ภายในระบบ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ จะมีการตรวจจับเพื่อการควบคุมภายในอยู่แล้ว จึงสามารถใช้ข้อมูลดังกล่าวได้ เนื่องจากการตรวจจับแรงดัน ณ ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous) ที่ใกล้เคียงกับเวลาจริง (Real Time) ดังนั้นจึงมีผลตอบสนองในการตรวจจับที่เร็วกว่าการตรวจจับด้วย PMU อย่างไรก็ตาม ฝ่าย อรค. ได้ออกแบบให้มีการติดตั้ง PMU2 ณ รฟพ. ผาบ่อง เพื่อใช้ประโยชน์ในการอ้างอิงค่าเวลามาตรฐาน Coordinate Universal Time; initials are ordered based on French Language (UTC) ที่มีระบบ Global Positioning System (GPS) เป็นตัวกลางในการกระจายค่าเวลามาตรฐานนี้ ทั้งนี้ ผู้ผลิตโดยส่วนใหญ่ได้มีการจัดเตรียมช่องทางรับสัญญาณเวลามาตรฐานไว้ให้ PMU ไว้ใช้อ้างอิงได้ และในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่าเวลามาตรฐาน UTC สำหรับการชดเชยผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสาร ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2 การตรวจวัดแรงดันด้วย Phasor Measurement Unit (PMU)

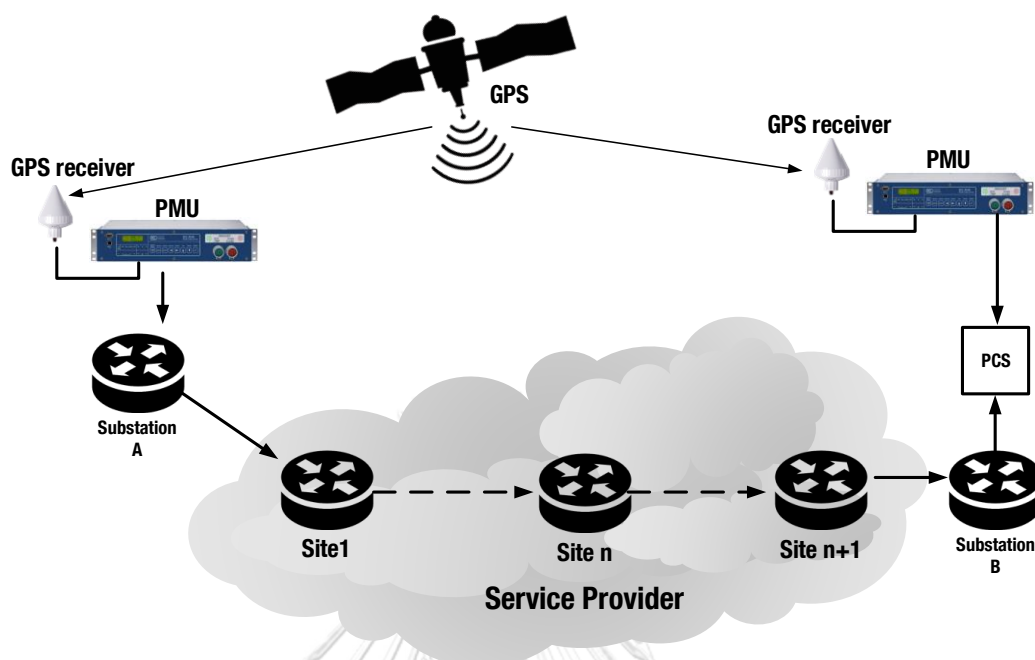
Phasor Measurement Unit (PMU) เป็นอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการใช้งานทางด้านสมาร์ตกริดและไมโครกริดด้วยความสามารถในการวัดค่าที่เร็วแบบตามเวลาจริง (Real-Time) และแม่นยำ โดย PMU สามารถวัดค่า มุมเฟสและการเปลี่ยนแปลงของ ความถี่ได้ตามมาตรฐาน IEEE C37.118-2005 [27] ซึ่งมีข้อกำหนดในความสามารถของการวัดความถี่ที่เปลี่ยนแปลงของระบบได้ด้วยอุปกรณ์ดังกล่าวด้วยตัวอุปกรณ์เองโดยไม่พึ่งพาซอฟต์แวร์ภายนอกใดๆ ในการกระทำดังกล่าว PMU ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นได้ด้วยระบบสื่อสาร เช่น Modbus, DNP3 Level 2, serial and Ethernet IEC61850 ฯลฯ เพื่อส่งสัญญาณที่วัดได้ให้กับระบบควบคุมได้ ทำให้ระบบควบคุมสามารถรับข้อมูลมาบันทึกเพื่อทำการควบคุมระบบตามแต่ละสถานการณ์ได้อย่างเหมาะสม และนอกจากนี้ PMU ยังมีการประสานเวลา (Time Synchronization) การทำงานของ PMU แต่ละตัวด้วยการรับสัญญาณจาก Global Positioning System (GPS) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงถึงบล็อกไดอะแกรมการส่งแรงดันโครงข่ายที่ PMU วัดจาก PCC โดยอธิบายเรื่องของเวลาที่ PMU ทั้งสองส่งให้ระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ได้ดังนี้ PMU ที่ใช้เวลาจาก Master Clock เดียวกันทำงานบนพื้นฐานของเวลาเดียวกันและมีฟังก์ชันประทับเวลา (Time Stamps) ทำให้ทราบถึงเวลาที่ส่งสัญญาณมายังระบบควบคุมได้ สำหรับการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดระยะไกลก็จะทราบได้ถึงความต่างของเวลาจากการส่งสัญญาณระยะไกลได้ จะเห็นได้ว่า PMU เป็น

อุปกรณ์ที่ช่วยเติมเต็มการทำงานของระบบควบคุมแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ เพื่อการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดได้อย่างดี

ในโครงการนำร่องไมโครกริดนี้ ฝ่ายระบบควบคุมและป้องกัน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ออกแบบโดยเลือกใช้ PMU รุ่น SEL-351A ของบริษัท SEL [28] เพื่อให้สามารถอ้างอิงกับอุปกรณ์ที่มีการใช้งานได้จริงในไมโครกริด SEL-351A นั้นเป็นอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการตรวจวัดค่าได้ด้วยและการตรวจวัดค่าของ SEL-351A นั้นเป็น Synchrophasors Measurement ตามมาตรฐาน IEEE C37.118-2005 ทำงานเป็น PMU คือวัดค่าความถี่ มุมเฟส และขนาดของแรงดันที่จุดอ้างอิงได้ ซึ่งมีการทำงานย่านเวลาระดับไมโครวินาที สามารถสื่อสารได้ด้วยรูปแบบทั้ง IEC61850 MMS GOOSE, Standard Modbus, Standard DNP3 Level 2, IEEE C37.118-2005, ASCII, SEL Fast Meter, SEL Fast Message และ ฯลฯ เพื่อส่งข้อมูลให้กับระบบควบคุมได้ PMU จะส่งข้อมูลเข้าไปยังส่วนควบคุมแปลงผันกำลังหรืออินเวอร์เตอร์ของ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ เพื่อใช้เป็นแรงดันอ้างอิงสำหรับส่วนเวกเตอร์เฟสล็อก



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมการตรวจจับแรงดันโครงข่ายด้วย PMU



รูปที่ 4.4 การส่งสัญญาณจากอุปกรณ์วัดผ่านระบบสื่อสารของผู้ให้บริการสัญญาณ

จากในรูปที่ 4.4 แสดงการส่งสัญญาณที่วัดด้วย PMU ผ่านระบบสื่อสารของผู้ให้บริการสัญญาณ ซึ่งในหัวข้อถัดไปได้กล่าวถึงรายละเอียดของเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากระบบสื่อสารตั้งแต่ PMU ต้นทางส่งสัญญาณที่วัดได้ผ่านใยแก้วนำแสงไปยังเราต์เตอร์ของระบบสื่อสารของผู้ให้บริการไปจนถึงเราต์เตอร์ปลายทางเพื่อส่งแรงดันที่วัดได้นี้ให้กับระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ต่อไป

4.3 เวลาประวิงจากระบบสื่อสารที่เกิดขึ้นในการตรวจวัดสัญญาณ

ในการตรวจวัดหรือระบบควบคุมหลากหลายรูปแบบในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่อาศัยระบบสื่อสารในการเชื่อมโยงและรับส่งข้อมูลต่างๆ จากต้นทางไปยังปลายทางเพื่อให้อุปกรณ์ที่เชื่อมโยงต่อกันนั้นสามารถทำงานได้ซึ่งการส่งสัญญาณนี้ก็ไม่ว่าจะหลีกเลี่ยงเวลาประวิงในการสื่อสารที่เกิดขึ้นได้ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมหรือการวัดค่าสัญญาณนั้นๆได้โดยเวลาประวิงที่มีผลต่อการตรวจวัดสัญญาณนั้นมาจาก อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณต้นทาง ขนาดของข้อมูลที่อุปกรณ์วัดต้นทางส่งออกมา ชนิดของตัวนำที่ใช้เชื่อมต่อสำหรับการสื่อสาร เราต์เตอร์ที่ใช้ภายในระบบสื่อสาร ขั้นตอนในการแปลงสัญญาณ ระยะทางในการส่งสัญญาณต้นทางไปยังปลายทาง

รวมไปถึงจำนวนของโหนดการรับส่งสัญญาณภายในโครงข่ายของระบบสื่อสารด้วย ในงานวิจัยฉบับนี้จะได้กล่าวถึงตัวแปรขั้นพื้นฐานเบื้องต้นเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจและการคำนวณเวลาประวิงเพื่อนำไปวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อภารกิจชิงโครไนซ์ด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ตั้งต่อไป

4.3.1 เวลาประวิงจากแบนด์วิธหรือตัวกลางในการส่งผ่าน (Bandwidth or Transmission Delay, $t_{d,trans}$)

เราเตอร์ต้องการเวลาสำหรับการส่งชุดข้อมูลออกไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความยาวของชุดข้อมูลหรือ ขนาดของชุดข้อมูลนั่นเอง และอัตราในการส่งข้อมูลได้ของตัวกลางส่งผ่านที่เชื่อมต่อจากเราเตอร์ไปยังอุปกรณ์รับข้อมูลปลายทางโดยจะไม่เกี่ยวข้องกับระยะทางระหว่างอุปกรณ์ต้นทางและปลายทาง โดยปกติชุดข้อมูลจะถูกส่งโดยที่ชุดข้อมูลใดมาถึงก่อนก็ได้รับส่งออกไปก่อน เมื่อขนาดของชุดข้อมูลมีหน่วยเป็น L บิต (bits) อัตราการส่งข้อมูลของตัวกลางส่งผ่านเท่ากับ R บิต/วินาที (bits per sec, bps) ซึ่งอัตราความเร็ว R ถูกกำหนดโดยอัตราการส่งข้อมูลของตัวกลางที่เราเตอร์ B ยกตัวอย่างเวลาประวิงจากการส่งข้อมูลขนาด 100 บิต ผ่านอุปกรณ์ที่มีอัตราการส่งข้อมูลแบนด์วิธ 50 บิต/วินาที เวลาประวิงที่เกิดขึ้นคือ 2 วินาทีสำหรับกรณีดังกล่าว ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขนาดชุดข้อมูลของ PMU นั้นมีขนาดตั้งแต่ 52 ไบต์ขึ้นไป [10] ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงใช้ขนาดเฟรมที่ 256 ไบต์แทนขนาดของชุดข้อมูลของ PMU ซึ่งมีการเผื่อขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดทั่วไปถึง 5 เท่า สำหรับการจำลองถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้อ้างอิงถึงแบนด์วิธ 32 Mbps จากระบบสื่อสารที่ทางฝ่ายระบบสื่อสาร กฟผ. ได้ออกแบบไว้ และข้อมูลของ PMU ขนาด 256 ไบต์ ส่ง 50 เฟรมต่อวินาที เมื่อทำการคำนวณค่า $t_{d,trans}$ จะได้ว่า $t_{d,trans} = \frac{256 \times 8 \times 50}{32 \times 10^6} = 0.0032$ วินาที เมื่อ PMU วัดค่าสัญญาณแล้วจะส่งสัญญาณผ่านตัวนำซึ่งก็มีเวลาในการที่ข้อมูลเดินทางผ่านตัวนำนั้น ซึ่งก็คือ เวลาประวิงการแพร่กระจายดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

4.3.2 เวลาประวิงการแพร่กระจาย (Propagation Delay, $t_{d,prop}$)

ในการแพร่กระจายนั้นหมายถึงการกระจายชุดข้อมูลผ่านตัวนำที่ใช้ในระบบสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ซึ่งจะมีผลตามระยะทางของการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์นั้นๆด้วย ดังนั้นเวลาประวิงการแพร่กระจายนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำที่เลือกใช้ในการสื่อสาร โดยทางผู้ผลิตตัวนำจะระบุความเร็วในการส่งผ่านของตัวนำ (Propagation Speed) แต่ละชนิดมาให้ดังแสดงในตัวอย่างในตารางที่ 4.1 ทำให้ผู้ใช้งานสามารถทราบถึงเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากการส่งชุดข้อมูลผ่านตัวนำชนิด

นั้น ซึ่งไม่ขึ้นกับขนาดของชุดข้อมูลที่ต้องการส่ง แต่จะขึ้นอยู่กับระยะทางในการส่งดังที่ได้กล่าวมาแล้วเท่านั้น

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างของตัวนำในการส่งผ่าน โดยค่า $c = 299.792$ เมตร/ไมโครวินาที

Media	% of c	Description
Thick coaxial cable	77%	Originally used for ethernet, referred to as "thicknet"
Thin coaxial cable	65%	Referred to as ethernet "thinnet" or "cheapernet"
Unshielded twisted pair	59%	Multipaired copper cabling used for LAN and telecom applications
Microstrip	57%	PCB trace on FR4 dielectric, $\mu_r = 3.046$
Stripline	47%	PCB trace in FR4 dielectric, $\mu_r = 4.6$
Optical fiber	67%	Silica waveguide used to transport optical energy
Vacuum	100%	Vacuum or free space

และจากการออกแบบโดยฝ่าย อรค., กฟผ. โดยการใช้ตัวนำชนิดใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง ทำให้สามารถคำนวณเวลาประวิงการแพร่กระจายได้ดังนี้ โดยระยะทางคร่าวๆในการส่งตั้งแต่ PMU ไปยังระบบควบคุมการแปลงผันของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่แล้วประมาณ 20 กิโลเมตรจะได้ว่า $t_{d,prop} = \frac{20 \times 10^3}{299.792 \times 0.67} = 99.5715 \mu s$ จากนั้นสัญญาณก็จะถูกส่งผ่านการแพร่กระจายนี้ไปยังเรอต์เตอร์ของผู้ให้บริการซึ่งเวลาประวิงที่เกิดจากเรอต์เตอร์จะได้ถูกกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

4.3.3 เวลาประวิงจากกระบวนการภายในเรอต์เตอร์

เวลาประวิงจากกระบวนการภายในเรอต์เตอร์จะมีอยู่ด้วยกัน 2 องค์ประกอบ คือ เวลาประวิงจากกระบวนการของโหนด (Processing Delay in Node) และ เวลาประวิงการรอคิว ซึ่งสามารถอธิบายถึงสาเหตุของเวลาประวิงทั้ง 2 พอสังเขปได้ดังนี้

4.3.3.1 เวลาประวิงกระบวนการที่โหนด (Processing Delay in Node, $t_{d,proc}$)

ระบบสื่อสารจะมี โหนด (Node) หรือ ฮอป (Hop) สำหรับการส่งผ่านข้อมูลภายในเครือข่าย โดยมีเรอต์เตอร์ (Router) เป็นอุปกรณ์ซึ่งเป็นเป็นอุปกรณ์ระดับที่ 3 (Layer 3) ที่ทำหน้าที่จัดหาเส้นทางสื่อสารที่เหมาะสมให้กับข้อมูลที่ได้รับและส่งต่อไปยังอุปกรณ์รับข้อมูลที่ปลายทางได้ นอกจากนี้เรอต์เตอร์จะทำหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการจัดเรียงข้อมูลที่เรียกว่า ชุดข้อมูล (Data Package) ก่อนที่จะส่งต่อไป หากการจัดเรียงรูปแบบของข้อมูลไม่ถูกต้อง เรอต์เตอร์จะไม่ส่งข้อมูลนั้นออกไป และจะทำการเรียกซ้ำเพื่อส่งข้อมูลชุดใหม่มาแทน กระบวนการดังกล่าวข้างต้นทำให้เกิดเวลาประวิงจากกระบวนการของโหนดได้ $t_{d,proc}$

4.3.3.2 เวลาประวิงจากการรอคิว (Queueing Delay; $t_{d,que}$)

เวลาประวิงนี้เป็นช่วงเวลาที่ชุดข้อมูลอยู่ในคิว คือ เมื่อมีการส่งชุดข้อมูลไปยังเราต์เตอร์เริ่มต้น โดยเราต์เตอร์เริ่มต้นจะส่งชุดข้อมูลไปรออยู่ที่คิว จุดพักข้อมูลนี้เรียกว่า บัฟเฟอร์ (Buffer) เพื่อตรวจสอบรูปแบบของข้อมูลว่าเป็นไปตามรูปแบบที่ตั้งค่าไว้หรือไม่ก่อนที่จะส่งข้อมูลผ่านการตรวจสอบแล้วไปยังเราต์เตอร์ตัวต่อไป หากในคิวการส่งข้อมูลนั้นมีชุดข้อมูลอื่นๆ อยู่ก่อนแล้ว จะเกิดการหน่วงเวลาเพื่อส่งข้อมูลชุดเดิมออกไปให้หมดก่อน ความล่าช้าหรือเวลาประวิงที่เกิดจากการการเข้าคิว $t_{d,que}$ จึงมีความไม่แน่นอน ซึ่งค่าเวลาประวิงดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับทราฟฟิก (Traffic) ของกลุ่มสัญญาณที่เข้ามาในการรอคิว

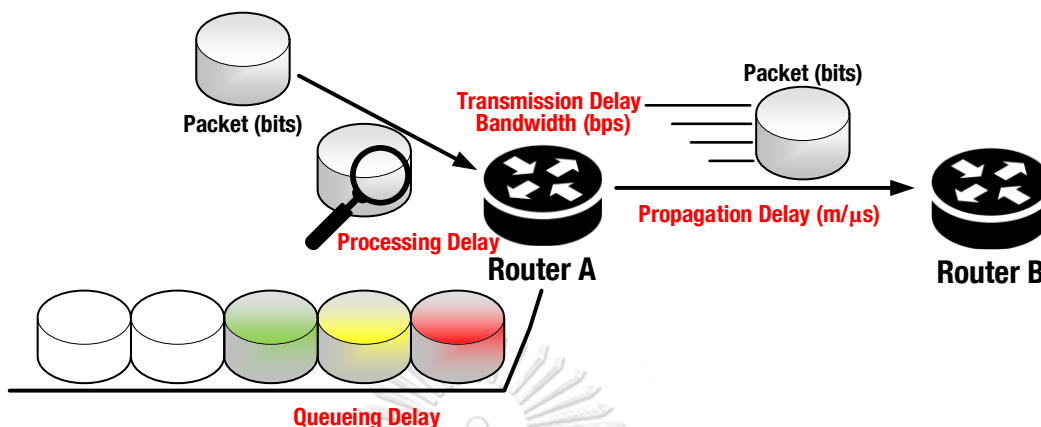
ในทางปฏิบัติเวลาประวิงทั้งสอง ($t_{d,proc}$, $t_{d,que}$) สามารถอ้างอิงได้จากรายละเอียดอุปกรณ์เราต์เตอร์ ซึ่งผู้ผลิตได้ให้ข้อมูลการทดสอบไว้ในวิทยานิพนธ์จะเลือกตัวอย่างอุปกรณ์เราต์เตอร์ของบริษัท Cisco รุ่น ASR1000-ESP20 ที่อยู่กลุ่มของอุปกรณ์ที่ผู้ให้บริการ (Service Provider) ภายในประเทศนิยมใช้กันโดยทั่วไป เวลาประวิงจะพิจารณาจากผลการทดสอบของผู้ผลิต RFC 2544 Latency Test [2] ด้วยรูปลักษณะทางตรรกะ (Logical Topology) ที่ให้ผลการทดสอบในรูปลักษณะของ WAN Aggregation Topology ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดย

ตารางที่ 4.2 ASR1000-ESP20 WAN Aggregation Testing – Tracking Latency Up to NDR with Services (Shaping QoS) [2]

Frame Size (bytes)	Load (%)	Tx Frame Rate (fps)	Tx Frames	Rx Frames	Loss (%)	Latency Min (µsec)	Latency Avg (µsec)	Latency Max (µsec)
256	100	9057971	2717400515	2717400515	0	33.54	1179.081	2846.29

จากกระบวนการทดสอบเวลาประวิงในผลการทดสอบ [2] ผลการทดสอบที่ได้ในตารางที่ 4.2 จะเป็นค่าเวลาประวิงรวมทั้งหมดของกระบวนการภายในเราต์เตอร์ $t_{d,proc} + t_{d,que}$ ที่มีค่าไม่แน่นอน โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกพิจารณากรณีที่แย่ที่สุด ที่ค่าเวลาประวิงที่สูงสุด (Latency Max) เท่ากับ 2.84629 ms (2846.29 µsec) เนื่องจากเวลาประวิงจะขึ้นอยู่กับจำนวนโหนดหรือเราต์เตอร์ที่ใช้ในโครงข่ายสื่อสาร และจากการสอบถามข้อมูลจากผู้ให้บริการในพื้นที่อำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน ระยะทางระหว่างสถานีไฟฟ้าจังหวัดแม่ฮ่องสอนและโรงไฟฟ้าผาบ่อง จะมีจำนวนโหนดทั้งหมด 5 โหนด ดังนั้น

เวลาประวิงสูงสุดทั้งหมดจากกระบวนการภายในเราต์เตอร์ $t_{d,proc} + t_{d,que}$ ทั้ง 5 ตัวจะมีค่าเท่ากับ 14.23145 ms (5×2.84629 ms)



รูปที่ 4.5 เวลาประวิงที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ต้นทางไปยังอุปกรณ์ปลายทางผ่านระบบสื่อสาร

จากที่ได้อธิบายถึงเวลาประวิงที่เกิดขึ้นทั้งหมดในการส่งสัญญาณผ่านระบบสื่อสารของการวัดสัญญาณต้นทางส่งมายังปลายทางซึ่งสามารถเขียนเป็นภาพรวมของเวลาประวิงที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.4 และการคำนวณเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากระบบสื่อสารแสดงได้ดังสมการที่ 4.1

$$\text{Total Time Delay}(T_d) = t_{d,trans} + t_{d,prop} + t_{d,proc} + t_{d,que} \quad (4.1)$$

เมื่อ $t_{d,proc}$ คือ เวลาประวิงจากกระบวนการของโหนด (Processing Delay in Node)

$t_{d,que}$ คือ เวลาประวิงจากการรอคิว (Queueing Delay)

$t_{d,trans}$ คือ เวลาประวิงจากแบนด์วิธหรือตัวกลางในการส่งผ่าน
(Bandwidth or Transmission Delay)

$t_{d,prop}$ คือ เวลาประวิงจากการแพร่กระจาย (Propagation Delay)

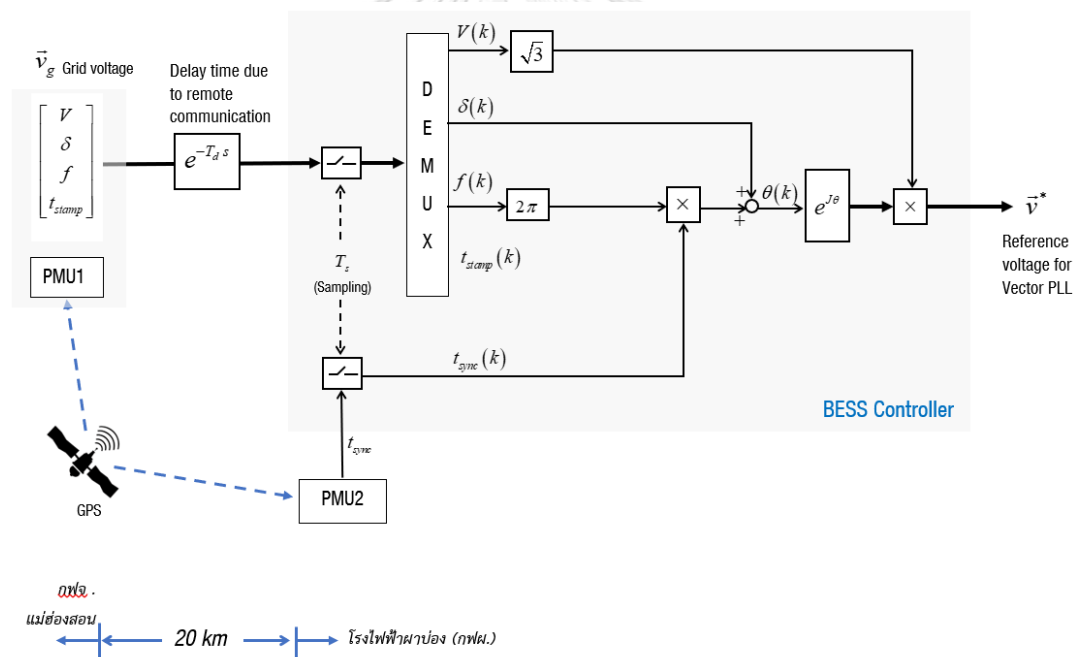
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถทำการคำนวณเวลาประวิงจากข้อมูลของระบบสื่อสารที่มีจากฝ่ายระบบสื่อสาร กฟผ. และผลการทดสอบของเราเตอร์ที่อ้างอิง [2] ได้ค่าเวลาประวิงที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากเราต์เตอร์นั้นจะมีน้อยมากที่สุด ดังนั้นเพื่อให้เห็นถึงผลกระทบของเวลาประวิงสำหรับการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอน

ในการจำลองเหตุการณ์ผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารที่มีต่อกระบวนการรีซิงโครไนซ์ ระยะไกลนี้จะอ้างอิงจากค่าในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การคำนวณเวลาประวิงสำหรับการจำลองในระบบไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

จำนวน hop ในระบบสื่อสาร (hop)	$t_{d,proc} + t_{d,que}$ (μs)	$t_{d,trans}$ (μs)	$t_{d,prop}$ (μs)	T_d (μs)
1	2846.29	320	99.5715	3265.8615
5	14231.45	320	99.5715	14651.0215

4.4 ผลกระทบของเวลาประวิงต่อการรีซิงโครไนซ์ระยะไกล [16]

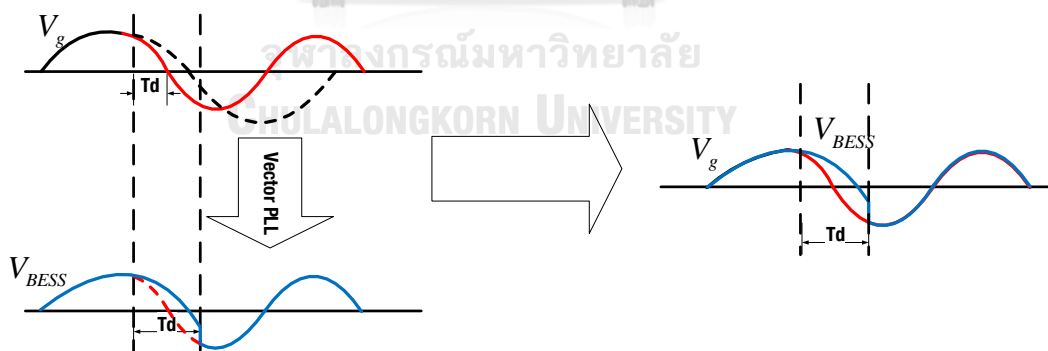


รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมการตรวจจับและส่งแรงดันโครงข่ายด้วย PMU ผ่านระบบสื่อสารไปยังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่อยู่ไกลออกไปจากจุด PCC

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงเงื่อนไขที่จะทำให้การรีซิงโครไนซ์ของไมโครกริดสำเร็จอย่างรวดเร็วแล้ว แต่สำหรับการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลนั้นต่างออกไปเพราะการส่งสัญญาณผ่านระบบสื่อสารไปยังระบบควบคุมที่ไกลออกไปจากจุด PCC จะต้องคำนึงถึงเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากระบบสื่อสารดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นบล็อกไดอะแกรมของการตรวจวัดแรงดันโครงข่ายด้วย PMU และส่งผ่าน

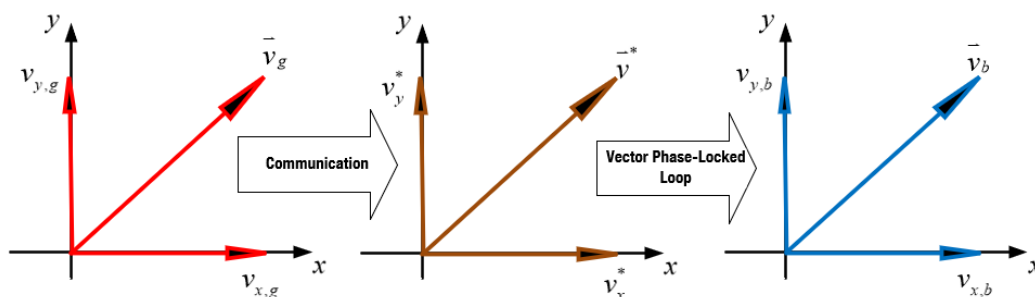
ระบบสื่อสารไปยังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ไกลออกไป 20 กิโลเมตรเพื่อใช้เป็นแรงดันอ้างอิงในการปรับแต่งความถี่และมุมเฟสของแรงดันไมโครกริดให้ซิงโครไนซ์กับโครงข่าย

หากการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลนี้ดำเนินการในช่วงเวลาที่ระบบไมโครกริดไม่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังทางไฟฟ้านั้นก็สามารถเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงานจากโหมดแยกตัวอิสระไปยังโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายได้อย่างราบรื่น แต่หากในขณะของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดมีเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเกิดขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงกำลังภายในไมโครกริดอย่างยืดยาวทำให้สัญญาณแรงดันทางด้านโครงข่ายที่วัดจากจุด PCC ที่ กฟจ. มีความคลาดเคลื่อนไปเพราะแรงดันที่ PMU ส่งมายังระบบแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่นั้นเป็นแรงดันในอดีตไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงตามพลวัตของระบบ การตรวจจับความต่างเฟสด้วยเวกเตอร์เฟสล็อกที่รับแรงดันของโครงข่ายในอดีตมาเป็นแรงดันอ้างอิง ส่งผลให้การปรับความถี่ของระบบควบคุมความถี่นั้นปรับแรงดันของไมโครกริดตามแรงดันที่ตรวจจับมาได้ ซึ่งไม่ตรงกับความถี่ของแรงดันโครงข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงไปแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ส่งผลให้รีเลย์ตรวจสอบการรีซิงโครไนซ์อัตโนมัติไม่สามารถสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุด PCC ปิดวงจรได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาผลกระทบจากเวลาประวิงในการส่งข้อมูลผ่านการสื่อสารที่มีผลต่อการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดเพราะหากมีปล่อยให้ระบบควบคุมทำงานเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ความต่างมุมเฟส และความต่างความถี่ จะไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่มาตรฐานการรีซิงโครไนซ์กำหนด



รูปที่ 4.7 ผลกระทบจากเวลาประวิงของระบบสื่อสารต่อการรีซิงโครไนซ์

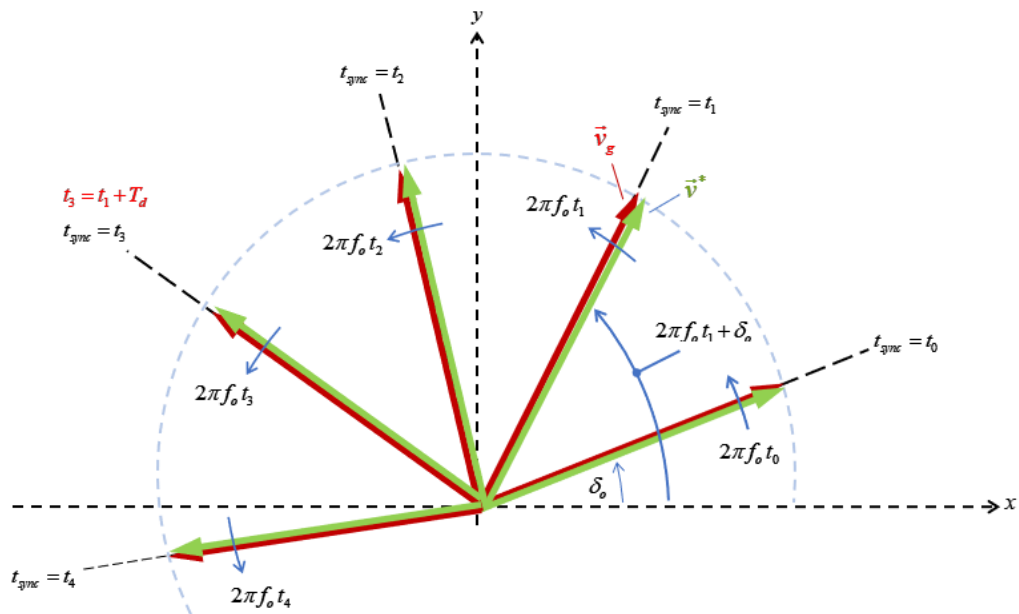
4.5 การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงต่อการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน



รูปที่ 4.8 แรงดันปริภูมิในการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยเวลาประวิงจากระบบสื่อสาร

ในการเปรียบเทียบแรงดันของแรงดันโครงข่าย แรงดันโครงข่ายที่ตรวจจับด้วย PMU ส่งผ่านระบบสื่อสารไปยังระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (เป็นแรงดันอ้างอิงในการปรับแต่งความถี่) และ แรงดันขาออกของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ จะแสดงด้วยการเปรียบเทียบแรงดันปริภูมิ 2 มิติ แทนแรงดัน 3 เฟส เพราะเมื่อผ่านเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่มแรงดันอ้างอิงจะอยู่ในรูปปริภูมิ 2 มิติอยู่ดี แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยที่ $v_{x,g}$ และ $v_{y,g}$ คือแรงดันปริภูมิของระบบโครงข่ายก่อนที่ทำการวัดค่าแล้วส่งแรงดันดังกล่าวมายังระบบการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ผ่านระบบสื่อสารของไมโครกริด v_x^* และ v_y^* คือแรงดันที่ผ่านการตรวจจับด้วยเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่มเพื่อใช้เป็นแรงดันอ้างอิงให้กับแรงดันขาออกของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ นั่นก็คือ $v_{x,b}$ และ $v_{y,b}$ ซึ่งหากไม่มีผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยเวลาประวิงจากระบบสื่อสารแรงดันดังกล่าวก็จะมีมุมเฟส และ ความถี่ที่ตรงตามเงื่อนไขการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 เมื่อเทียบกับแรงดันปริภูมิของระบบไฟฟ้าหลัก

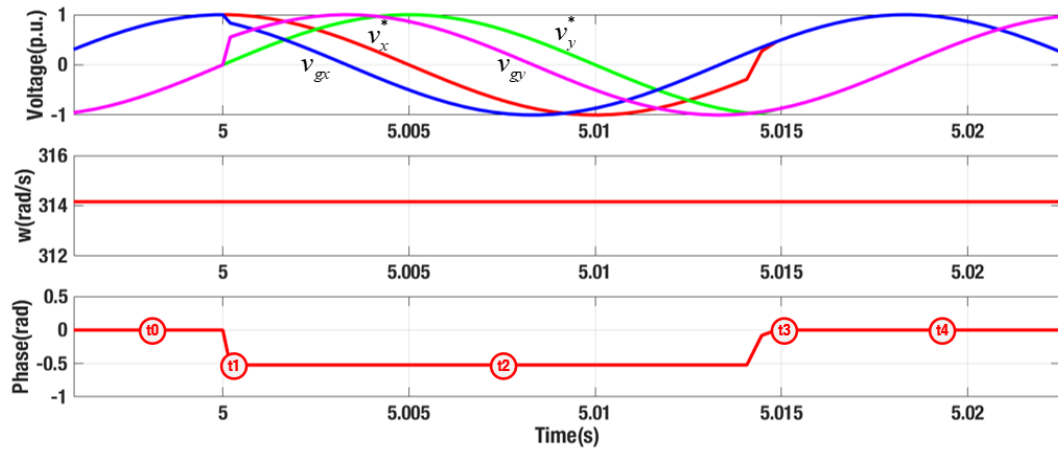
เมื่อได้เวลาประวิงจากการคำนวณด้วยระบบสื่อสารไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนจากหัวข้อที่ผ่านมาสามารถนำเวลาประวิง T_d ที่ได้นี้ เป็นค่าเวลาประวิงในการจำลองเพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนว่ามีผลต่อการตรวจจับแรงดันที่ทำการแปลงสู่ปริภูมิ 2 มิติเพื่อเป็นแรงดันอ้างอิงให้กับส่วนการควบคุมเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่มนำแรงดันดังกล่าวไปเทียบกับแรงดันปริภูมิ 2 มิติของไมโครกริด การจำลองเพื่อให้เห็นถึงผลกระทบของรูปคลื่นสัญญาณของทางโครงข่ายซึ่งเมื่อส่งผ่านระบบสื่อสารไปยังระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ซึ่งระบบควบคุมจะรับสัญญาณดังกล่าวมาเป็นสัญญาณอ้างอิงแล้วทำการตรวจจับความแตกต่างด้วยเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่มก่อนที่จะปรับปรุงด้วยระบบควบคุมหลักต่อไป



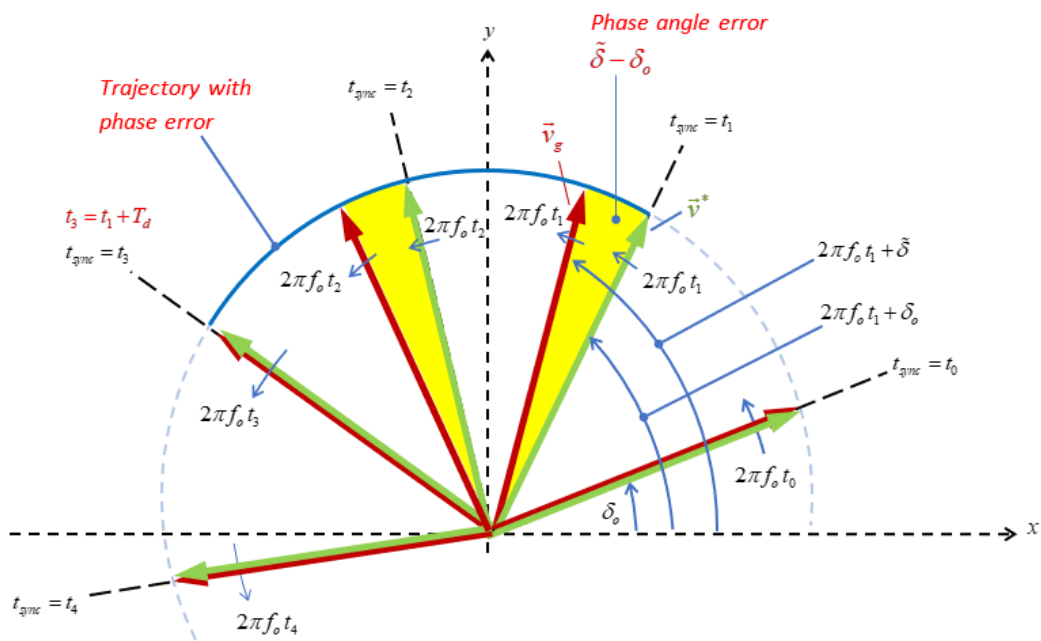
รูปที่ 4.9 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันโครงข่ายเทียบกับแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอร์รี่เมื่อไม่มีผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารต่อการรีซิงโครไนซ์ของไมโครกริด

และเพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างเป็นพลวัตได้ดีขึ้นรูปที่ 4.9 แสดงเวกเตอร์ไดอะแกรมการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันโครงข่ายกับแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอร์รี่ในการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด หากไม่มีผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารต่อการรีซิงโครไนซ์แรงดันโครงข่ายและแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอร์รี่จะไม่มี ความแตกต่างใดๆ ซึ่งในการจำลองในหัวข้อที่ 4.5.1 จะเปรียบเทียบสัญญาณของโครงข่ายเทียบกับสัญญาณที่ส่งไปยังระบบควบคุมการแปลงผันกำลัง โดยในจะทำการจำลองเหตุการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่และมุมเฟสของแรงดันโครงข่ายดังกล่าวขณะที่มีเวลาประวิงของระบบสื่อสารที่คำนวณได้จากหัวข้อ 4.3 เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบที่ร้ายแรงที่สุดจึงใช้ค่าสูงสุดจากการคำนวณเวลาประวิงประกอบในการจำลองผลกระทบที่เกิดขึ้น และจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของผลการจำลองด้วยเวกเตอร์ไดอะแกรมเพื่อให้เห็นพลวัตของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน

4.5.1 กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสเกิดขึ้นและมีเวลาประวิงจากระบบสื่อสาร



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบแรงดัน ความถี่ และมุมเฟส ของโครงข่ายขณะไม่มีเวลาประวิงเทียบกับสัญญาณที่ส่งมายังระบบควบคุมแปลงผันกำลังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมเฟส

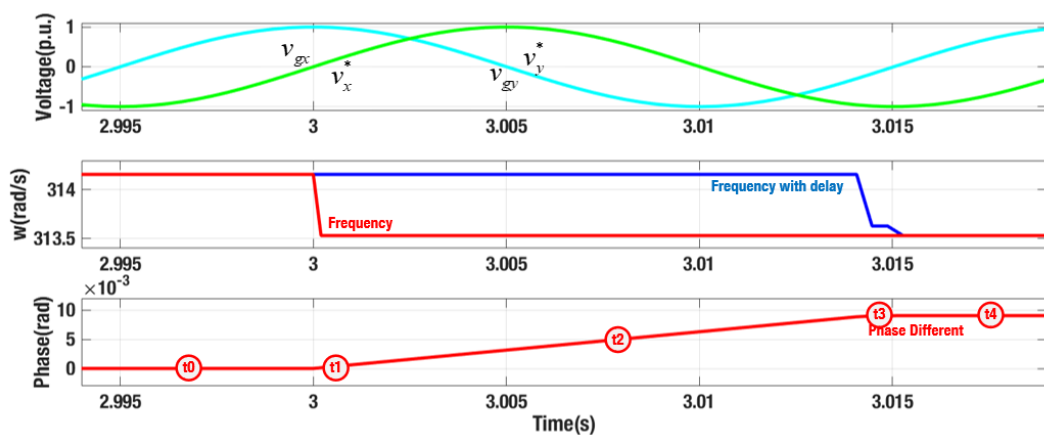


รูปที่ 4.11 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันโครงข่ายเทียบกับแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของแรงดันโครงข่ายขณะที่มีเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเกิดขึ้น

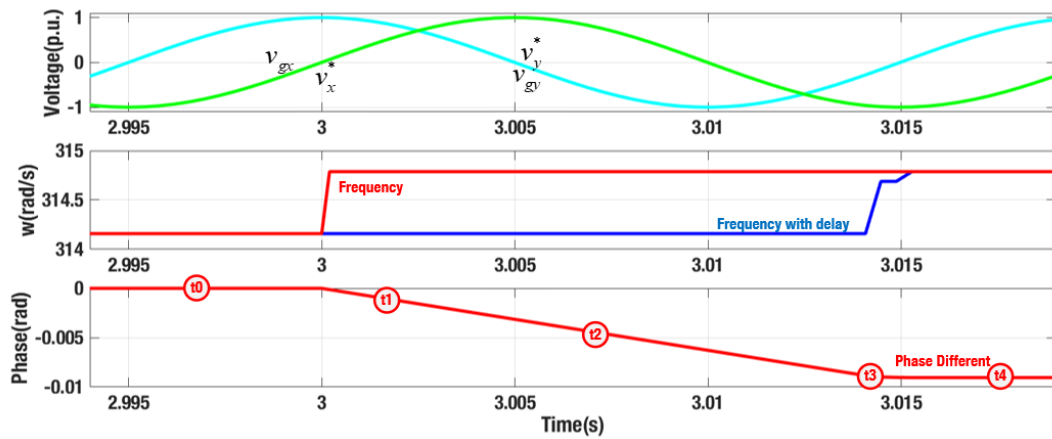
ผลการจำลองในรูปที่ 4.10 สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างค่อนข้างเป็นพลวัตได้ด้วยเวกเตอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 4.11 ก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสที่จุด t_0 แรงดันทั้งสองจะมีมุมเฟสที่ตรงกัน เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสขึ้นซึ่งจากการจำลองนี้ที่จุด t_1 โดยมุมที่เปลี่ยนแปลงนี้มีขนาด 30° จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสเมื่อมีเวลาประวิงจากการสื่อสารของการส่งสัญญาณที่วัดได้ 14.651 มิลลิวินาที ค่าความต่างมุมเฟสระหว่างสัญญาณตั้งต้นเทียบกับสัญญาณที่ปลายทางนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงคงที่ที่จุด t_2 นานเท่ากับเวลาประวิงจากการสื่อสารส่งผลกระทบต่อแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ หากความต่างเฟสนี้เกินขอบเขตของมาตรฐานก็ไม่สามารถทำการรีซิงโครไนซ์ได้ แต่หลังจากนั้นแรงดันทั้งสองก็กลับไปซิงโครไนซ์กันดังเดิม ที่จุด t_3 และเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆดังแสดงได้ที่จุด t_4

ดังนั้นหากมีการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสเกิดขึ้นนั้นในขณะที่มีเวลาประวิงจากระบบสื่อสารการรีซิงโครไนซ์จะไม่สามารถทำได้ในช่วงที่มุมเฟสมีการเปลี่ยนแปลง แต่การรีซิงโครไนซ์จะเกิดขึ้นได้เมื่อรอนมุมเฟสของโครงข่ายคงที่

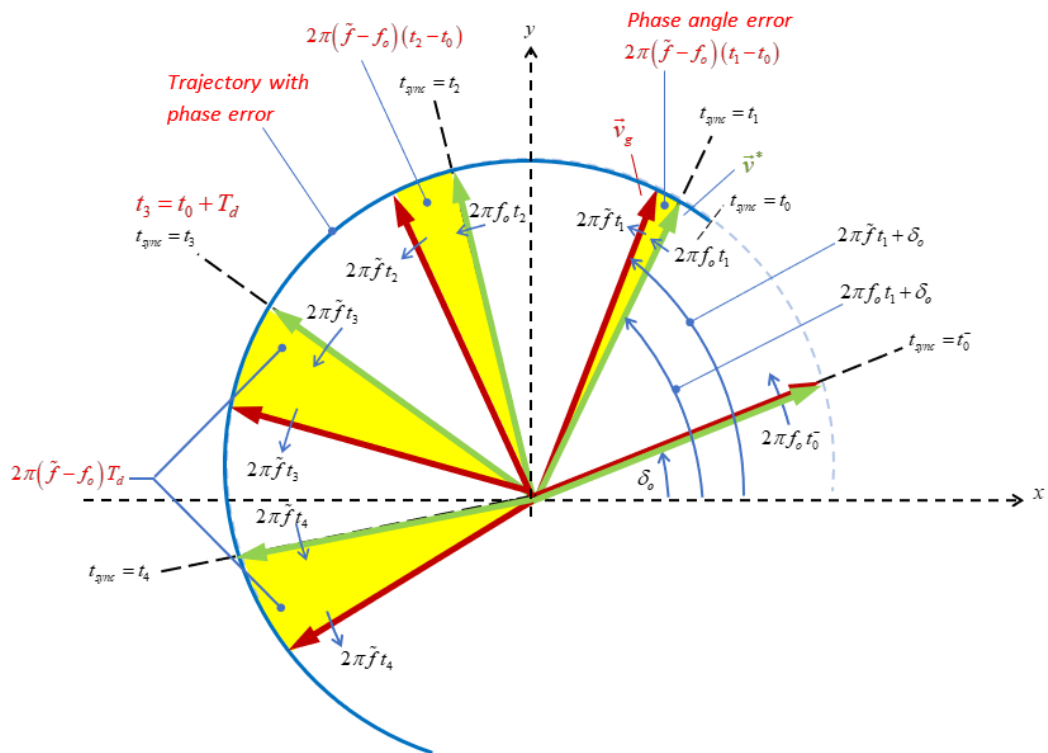
4.5.2 กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่เกิดขึ้นและมีเวลาประวิงจากระบบสื่อสาร



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองเปรียบเทียบ แรงดัน ความถี่ และมุมเฟส ของโครงข่ายขณะไม่มีเวลาประวิงเทียบกับสัญญาณที่ส่งมายังระบบควบคุมแปลงผันกำลังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในช่วงที่มีการลดลงของความถี่



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองเปรียบเทียบ แรงดัน ความถี่ และมุมเฟส ของโครงข่ายขณะไม่มีเวลาประวิง เทียบกับสัญญาณที่ส่งมายังระบบควบคุมแปลงผันกำลังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในช่วงที่มีการเพิ่มขึ้นของความถี่

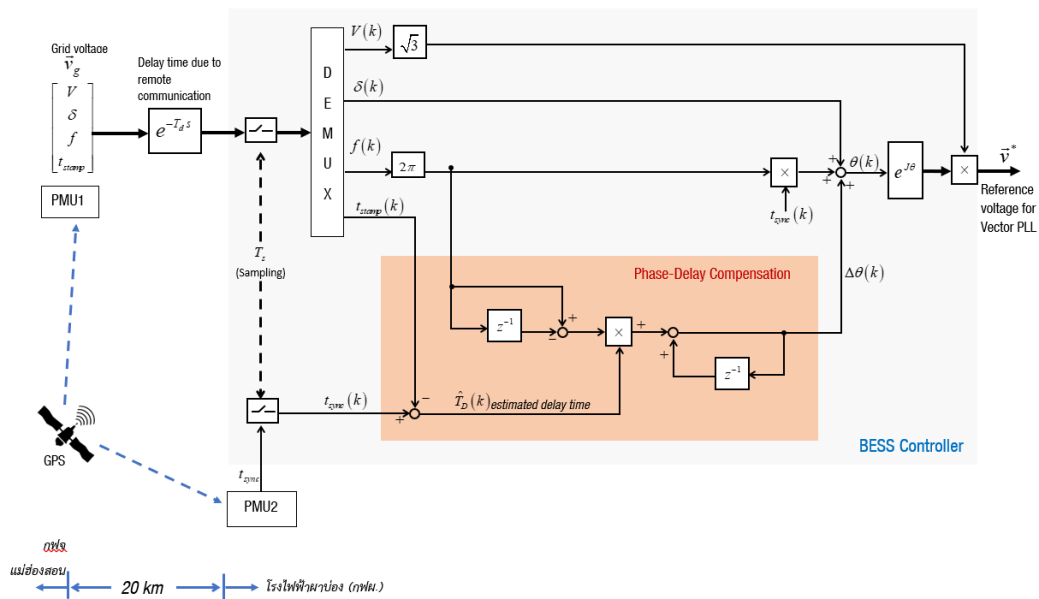


รูปที่ 4.14 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันโครงข่ายเทียบกับแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงาน แบตเตอรี่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันโครงข่ายขณะที่มีเวลาประวิงจากระบบสื่อสาร เกิดขึ้น

จากผลการจำลองกรณีที่เกิดเปลี่ยนแปลงความถี่ของโครงข่ายเกิดขึ้นนั้นจากรูปที่ 4.12 ความถี่ลดลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ มายัง 49.9 เฮิร์ตซ์ และ รูปที่ 4.13 ความถี่เพิ่มขึ้นจาก 50 เฮิร์ตซ์ ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ สามารถอธิบายด้วยเวกเตอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 4.14 ได้ดังนี้ที่จุด t_0 ก่อนมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ แรงดันต้นทางและปลายทางยังซิงโครไนซ์กันอยู่ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ ในช่วงที่มีเวลากระพริงจากระบบสื่อสารที่จุด t_1 ส่งผลกระทบที่ทำให้ความต่างของมุมเฟสระหว่าง สัญญาณต้นทางและสัญญาณปลายทางที่เริ่มมีความต่างของมุมเฟสมากขึ้นดังแสดงได้ที่จุด t_2 ไปจนถึงจุด t_3 ระยะเวลาเท่ากับเวลากระพริงจากระบบสื่อสาร ซึ่งเป็นจุดที่ความถี่ของแรงดันอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลง และจะคงสภาพที่จุด t_4 เช่นนี้ไปเรื่อยๆ ซึ่งหากความต่างเฟสนี้เกินขอบเขตเงื่อนไขของมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดก็ไม่สามารถทำการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดได้ แต่อย่างไรก็ดี เหตุการณ์ดังกล่าวนี้สามารถทำการแก้ไขได้ด้วยการชดเชยมุมเฟสของระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่นำเสนอด้วยหลักการชดเชยมุมเฟสในหัวข้อที่ 4.6

4.6 หลักการและแนวทางในการแก้ไขปัญหาผลกระทบจากเวลากระพริงของระบบสื่อสาร

จากหัวข้อที่ 4.5.2 จะเห็นถึงผลกระทบจากเวลากระพริงของระบบสื่อสารในการส่งสัญญาณแรงดันของโครงข่ายไปยังระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่อยู่ไกลออกไป ซึ่งส่งผลกระทบให้ไมโครกริดไม่สามารถทำการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลได้เลยหากการเปลี่ยนแปลงไปจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ในขณะที่มีเวลากระพริงจากระบบสื่อสารนี้ส่งผลให้ค่าความต่างมุมเฟสมีค่าเกินไปจากเงื่อนไขตามที่มาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ในตารางที่ 3.3 กำหนด ดังนั้นความต่างของมุมเฟสนี้จะต้องได้รับการชดเชยให้กับแรงดันอ้างอิงของเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่มเพื่อให้การปรับแต่งความถี่ด้วยระบบควบคุมกำลังจริงของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่นั้นได้รับความถี่เริ่มต้นที่ตรงกับความถี่ของโครงข่าย โดยการชดเชยมุมเฟสจะกระทำได้ด้วยระบบควบคุมที่ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้



รูปที่ 4.15 บล็อกไดอะแกรมการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันโครงข่ายส่งมาจาก PMU ผ่านระบบสื่อสารไปยังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่อยู่ไกลออกไปจากจุด PCC เพื่อใช้เป็นแรงดันอ้างอิงให้กับเวกเตอร์เฟสบล็อกในการรีซิงโครไนซ์ระยะไกล

บล็อกไดอะแกรมได้แสดงในรูปที่ 4.15 อธิบายตั้งแต่การตรวจวัดแรงดันโครงข่ายจาก กฟจ. แม่ฮ่องสอนด้วย PMU1 ณ จุด PCC ที่ทำงานบนพื้นฐานเวลาเดียวกันกับ PMU2 ณ รพฟ. ฝายบ่อบึง ดังนั้นระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่สามารถทราบถึงเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากการส่งสัญญาณของ PMU1 ผ่านระบบสื่อสารของผู้ให้บริการ ด้วยเวลาประทับ t_{stamp} จาก PMU1 เทียบกับเวลาพื้นฐานของ PMU ทั้งสองตัวขณะนั้น t_{sync} ได้เป็น T_d เพื่อใช้ในการชดเชยมุมเฟส $\Delta\theta$ ซึ่ง $\Delta\theta$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2 จากนั้นจึงรวม $\Delta\theta$ ให้กับมุมรวมก่อนที่จะใช้ในการสร้างแรงดันอ้างอิงของเวกเตอร์เฟสบล็อก \vec{v}^* นั่นเอง ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะได้แสดงการจำลองการชดเชยมุมเฟสด้วยหลักการที่ได้อธิบายมาด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory เพื่อให้เห็นว่าหลังจากที่ทำการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิง \vec{v}^* แล้วแรงดันของไมโครกริดซิงโครไนซ์กับแรงดันของโครงข่ายและเป็นไปตามเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ เพื่อให้การรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอแม่ฮ่องสอนสามารถทำได้อย่างราบรื่น

$$\Delta\theta = \theta_{i1} + 2\pi(f_2 - f_1)T_d \quad (4.2)$$

4.7 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบจากเวลาประวิงของระบบสื่อสารในซีไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

การจำลองจะจำลองเหตุการณ์ที่ความถี่ของระบบไฟฟ้าหลักมีการเปลี่ยนแปลงเพราะมีผลกระทบต่อมุมเฟสที่ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ได้รับการจำลองที่ได้แสดงในหัวข้อ 4.5.2 ดังนั้นเพื่อให้เห็นผลกระทบที่ชัดเจนและความจำเป็นในการชดเชยมุมเฟสของแรงดันที่ระบบกักเก็บพลังงานได้รับมาเป็นแรงดันอ้างอิง v_x^* และ v_y^* จึงได้แบ่งกรณีศึกษาของผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเป็นกรณีต่างๆ ดังจะได้แสดงในหัวข้อนี้ ถ้าหากว่าการจำลองกรณีนั้นไม่มีผลกระทบต่อกริดวิงโครโนสก็ไม่ต้องทำการชดเชยมุมเฟส แต่ถ้ากริดศึกษานั้นส่งผลกระทบเกินขอบเขตเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์จะทำการแสดงผลการจำลองที่ชดเชยมุมเฟสให้กรณีดังกล่าวเพื่อให้การรีซิงโครไนซ์ระยะไกลนั้นเกิดขึ้นได้ตามเงื่อนไขของมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ โดยผลการจำลองเหตุการณ์จะแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบแรงดันปริภูมิ 2 มิติ ดังต่อไปนี้

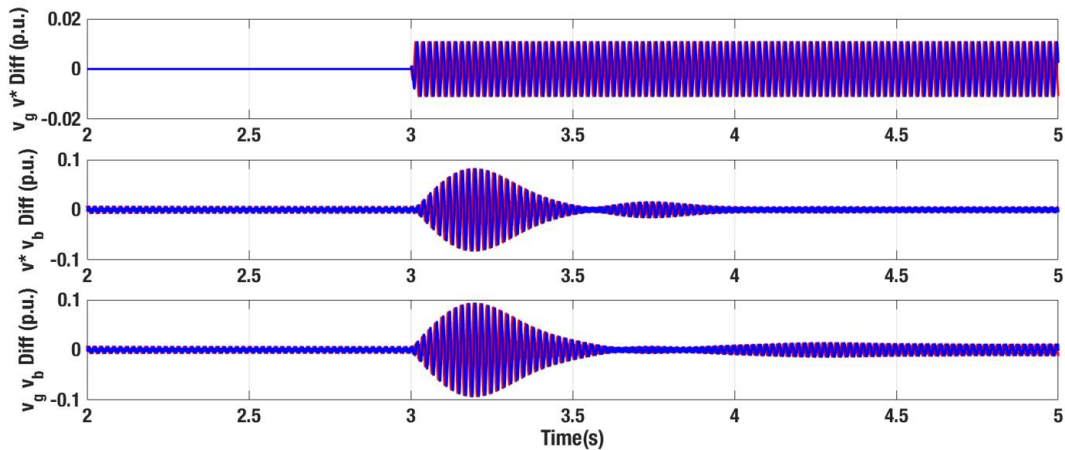
$v_{x,g}$ เทียบกับ v_x^* และ $v_{y,g}$ เทียบกับ v_y^* เพื่อให้เห็นถึง ผลกระทบของเวลาประวิง

v_x^* เทียบกับ $v_{x,b}$ และ v_y^* เทียบกับ $v_{y,b}$ เพื่อให้เห็นถึง สมรรถนะของเวกเตอร์เฟสล็อกคู่

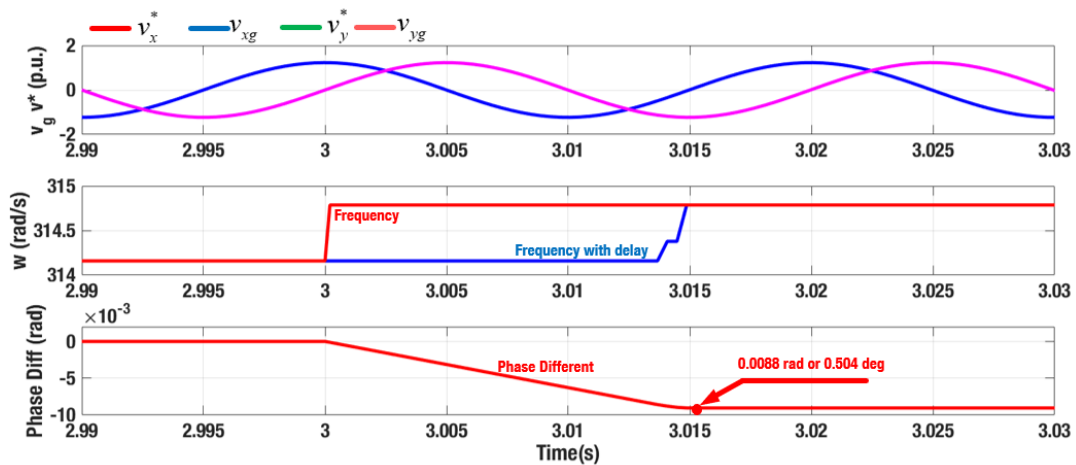
$v_{x,g}$ เทียบกับ $v_{x,b}$ และ $v_{y,g}$ เทียบกับ $v_{y,b}$ นี้เพื่อให้เห็นถึง สมรรถนะในการรีซิงโครไนซ์

นอกจากนี้ผลการจำลองยังแสดงแรงดันปริภูมิ 2 มิติของแรงดันโครงข่ายเทียบกับแรงดันปริภูมิ 2 มิติของแรงดันที่ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ใช้เป็นแรงดันอ้างอิง ความถี่ของแรงดันโครงข่ายเทียบกับความถี่ของแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ และ ความแตกต่างของมุมเฟสของแรงดันโครงข่ายกับแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารที่มีต่อการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

4.7.1 การจำลองผลกระทบขณะก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 14 มิลลิวินาทีแบบคงที่



รูปที่ 4.16 การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 14 มิลลิวินาที

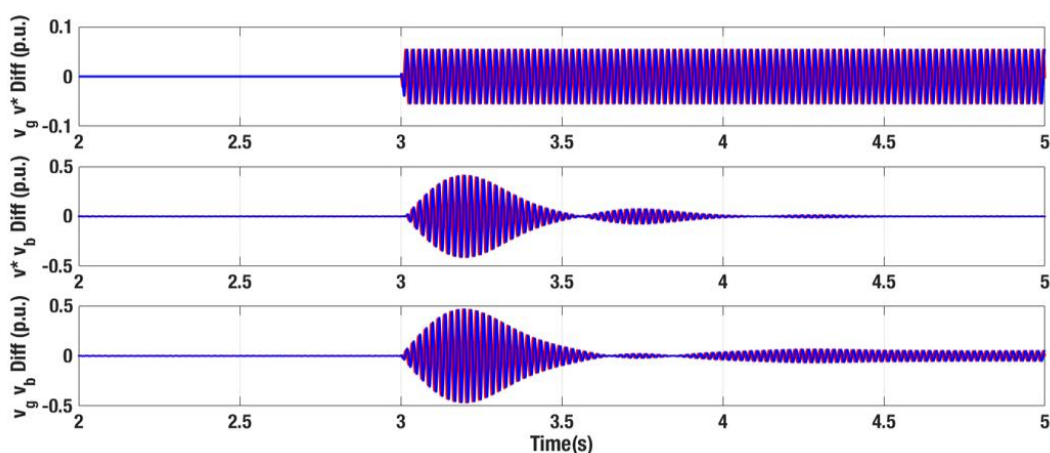


รูปที่ 4.17 การจำลองเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลเมื่อมีผลกระทบของเวลาประวิงก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 14 มิลลิวินาที

จากรูปที่ 4.16 นั้นจะเห็นว่าเวลาประวิงจากระบบสื่อสารของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนนั้นเมื่อมีความถี่ที่เพิ่มขึ้น 0.1 เฮิร์ตซ์ จะเกิดความแตกต่างของแรงดันโครงข่ายที่รับมา และแรงดันอ้างอิงที่ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ได้รับมา แต่เพราะเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจะทำให้ความแตกต่างระหว่างแรงดันจากระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่กับแรงดันโครงข่ายมีความแตกต่างกันอยู่

รูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าเวลาประวิงจากระบบสื่อสารของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนนั้นเมื่อมีความถี่ที่เพิ่มขึ้นทำให้มุมเฟสนั้นเปลี่ยนแปลงไปและคงที่อยู่ที่ประมาณ 0.01 เรเดียน หรือ 0.573 องศา และแรงดันไม่ได้รับผลกระทบใดๆ ดังนั้นแม้จะไม่ได้ทำการชดเชยมุมเฟสก็ยังเป็นไปตามมาตรฐานการวิจัยโครโนซีไมโครกริด

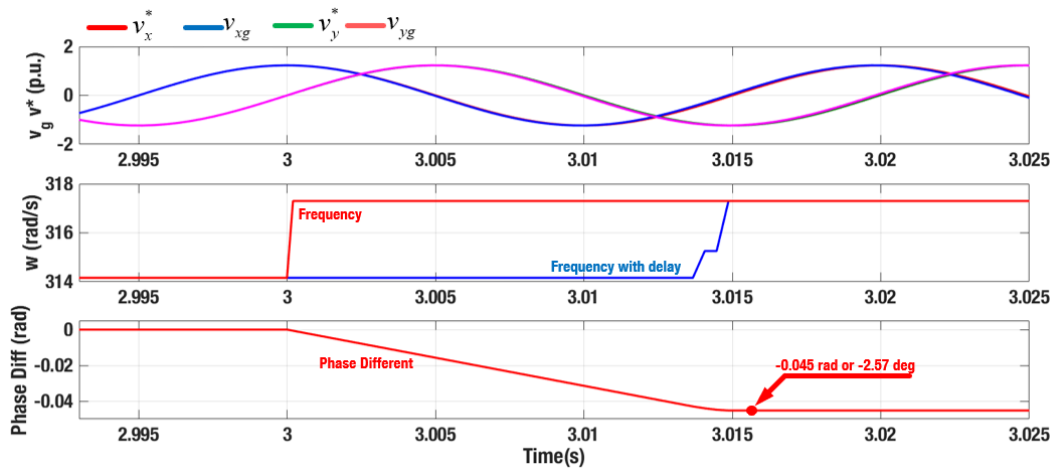
4.7.2 การจำลองผลกระทบขณะก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.5 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 14 มิลลิวินาทีแบบคงที่



รูปที่ 4.18 การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.5 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 14 มิลลิวินาที

รูปที่ 4.18 ทำการจำลองเหตุการณ์ลักษณะเดียวกับหัวข้อ 4.7.1 แตกต่างกันคือความถี่ของระบบไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจาก 50 เฮิร์ตซ์ เป็น 50.5 เฮิร์ตซ์ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเยาะสำหรับระบบไฟฟ้าหลักแต่เวลาประวิงที่เกิดจากระบบสื่อสารที่ส่งแรงดันของระบบไฟฟ้าหลักไปยังระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่นั้นคงที่ที่ 14 มิลลิวินาที ผลปรากฏว่ามีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับรูปที่

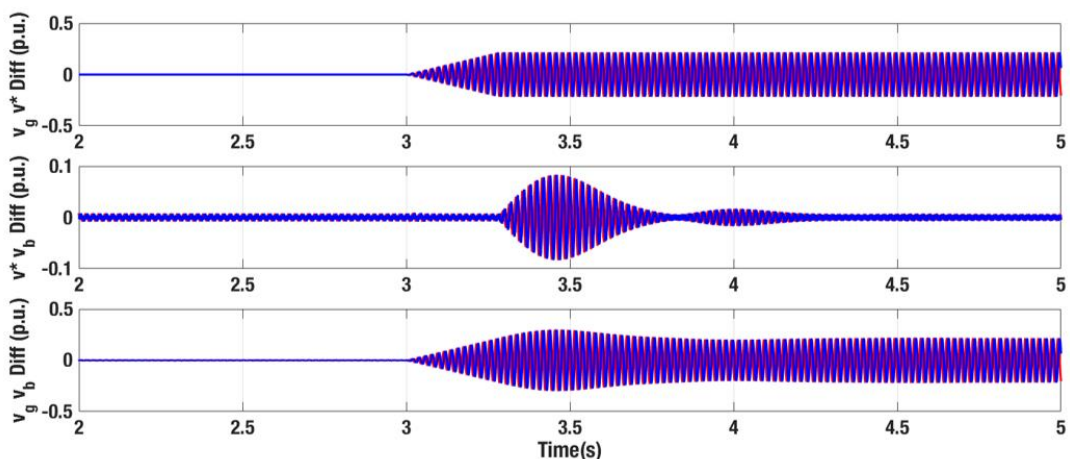
4.13



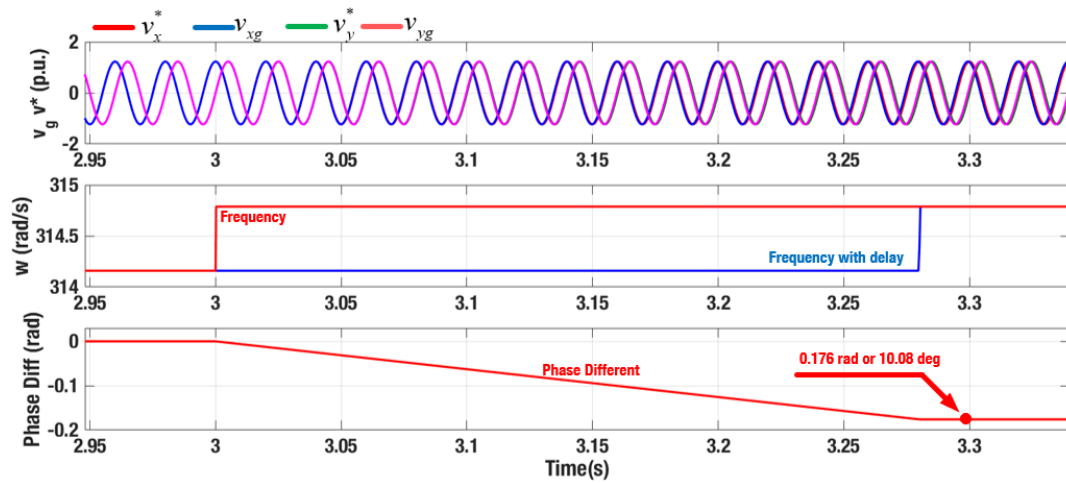
รูปที่ 4.19 การจำลองเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลเมื่อมีผลกระทบของเวลาประวิงก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 14 มิลลิวินาที

ส่วนรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นถึงมุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นกว่ารูปที่ 4.14 นั่นคือมุมเฟสเปลี่ยนไปที่ 0.045 เรเดียน หรือ 2.57 องศา ซึ่งผลกระทบในระดับนี้ยังอยู่ในเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์

4.7.3 การจำลองผลกระทบขณะก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 280 มิลลิวินาทีแบบคงที่



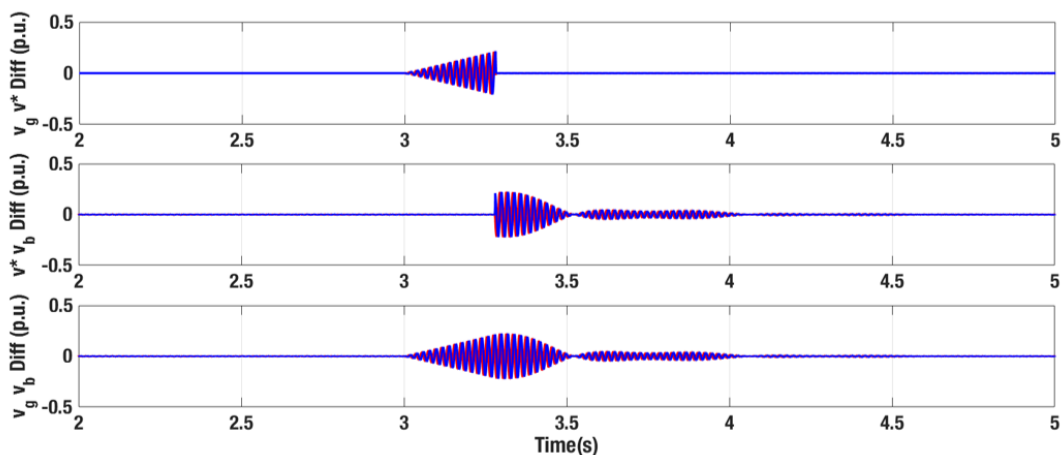
รูปที่ 4.20 การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 280 มิลลิวินาที



รูปที่ 4.21 การจำลองเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลเมื่อมีผลกระทบของเวลาประวิงก่อนใส่ตัวชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 280 มิลลิวินาที

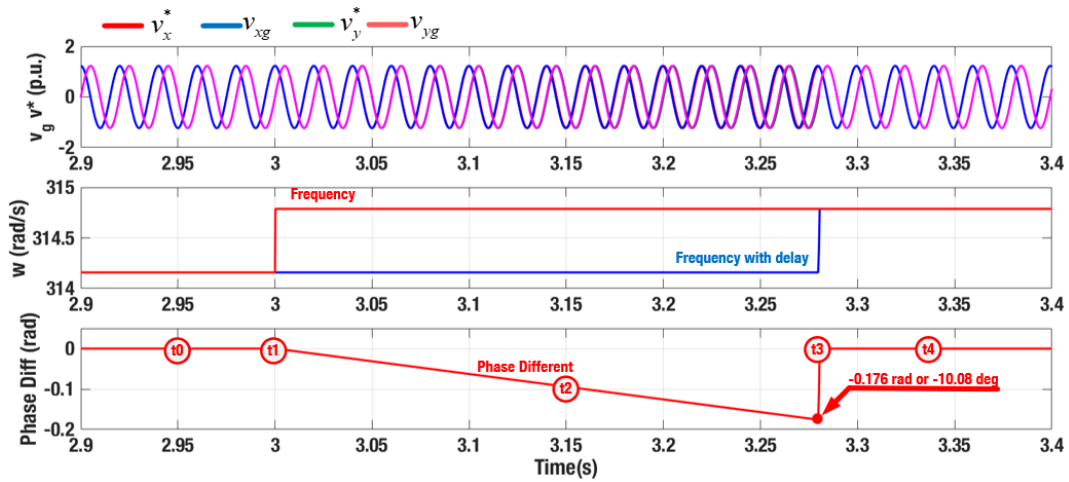
ในกรณีศึกษาจากผลการจำลองในรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของแรงดันปริภูมิของ \vec{v}_g และ \vec{v}^* ค่อนข้างมาก ส่วนสมรรถนะของเวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่ปนั้นทำงานได้ดี และความแตกต่าง \vec{v}_g ของ \vec{v}_b และ จะมีค่าค่อนข้างสูงซึ่งแสดงว่าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่มาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดกำหนด นอกจากนี้รูปที่ 4.21 ยังแสดงให้เห็นชัดถึงความแตกต่างของมุมเฟสซึ่งมากถึง 0.176 เรเดียน หรือ 10.08 องศา ซึ่งเกินจากขอบเขตของการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด จึงควรได้รับการชดเชยมุมเฟสเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขของมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด

4.7.4 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเมื่อความถี่เปลี่ยนจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 280 มิลลิวินาทีแบบคงที่

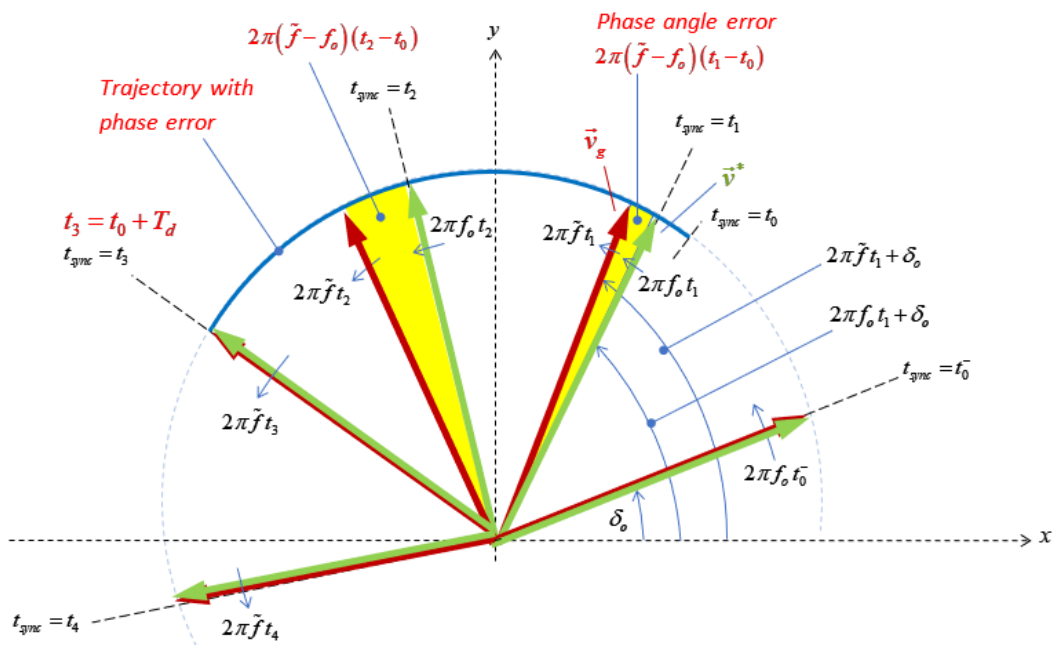


รูปที่ 4.22 การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 280 มิลลิวินาที

ผลการจำลองเมื่อทำการชดเชยมุมเฟสให้กับแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานจะเห็นได้ว่าความแตกต่างของแรงดันในรูปที่ 4.22 นั้นหลังทำการชดเชยแล้ว หลังช่วงเวลาที่เกิดเวลาประวิงนั้น แรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานเทียบกับแรงดันแรงดันของโครงข่ายไม่มีความแตกต่างกัน ส่วนสมรรถนะของการปรับแรงดันของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอร์จะใช้เวลาเพียง 1.5 วินาทีในการปรับแต่งแรงดันให้ตรงกับแรงดันอ้างอิงเป็นไปตามการออกแบบสมรรถนะของระบบควบคุม



รูปที่ 4.23 การจำลองเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลเมื่อมีผลกระทบของเวลาประวิงที่ทำให้การชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 280 มิลลิวินาที



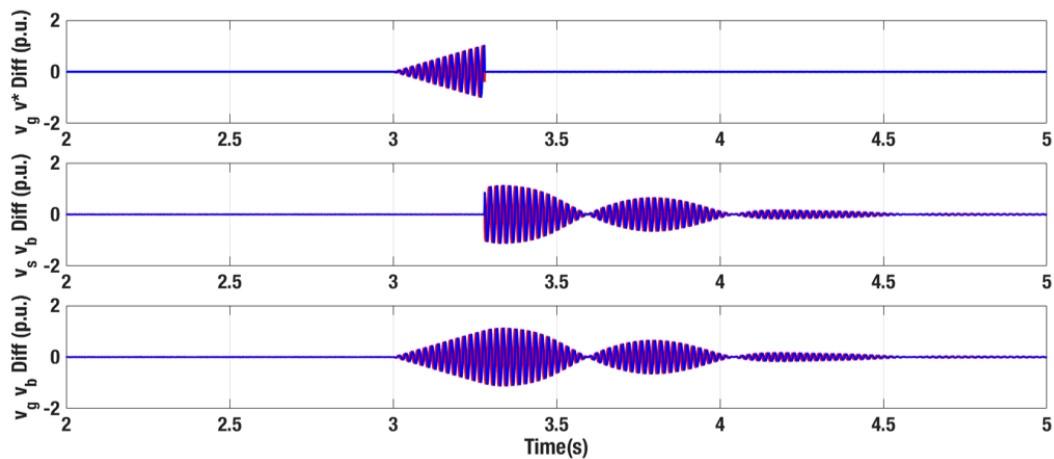
รูปที่ 4.24 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันโครงข่ายเทียบกับแรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอร์เมื่อมีการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันโครงข่ายขณะที่มีเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเกิดขึ้น

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.23 จะขออธิบายด้วยเวกเตอร์ไดอะแกรมสำหรับการชดเชยมุมเฟสในรูปที่ 4.24 และจะใช้ภาพนี้ภาพเดียวอธิบายถึงการชดเชยมุมเฟสของแรงดันอ้างอิงสำหรับผล

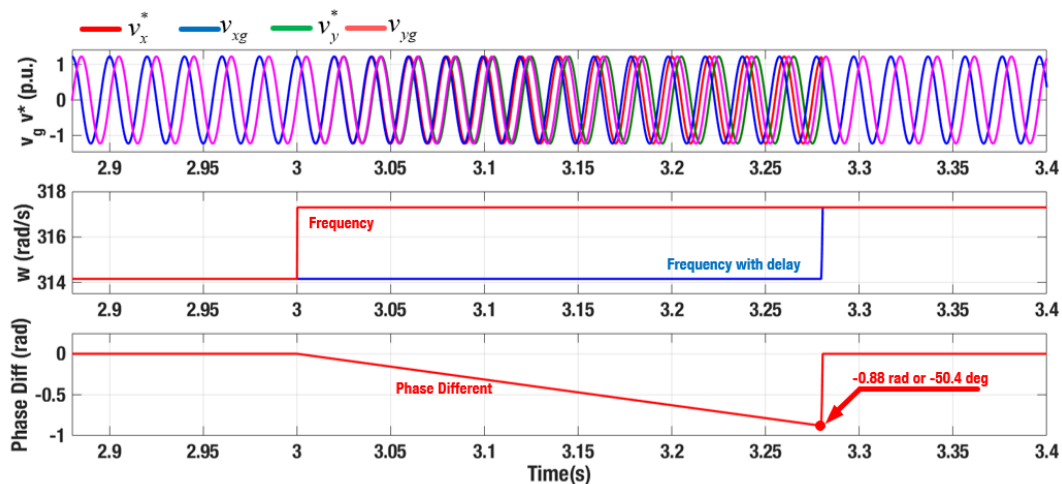
การทดลองต่อไป จะเห็นว่าที่จุด t_0 แรงดันทั้งสองยังซิงโครไนซ์กันอยู่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่จุด t_1 ส่งผลให้แรงดันทั้งสองเริ่มมีมุมเฟสแตกต่างกัน และมากขึ้นดังแสดงได้จากจุด t_2 จากนั้นด้วยการชดเชยมุมเฟสให้กับแรงดันอ้างอิงของระบบควบคุมทำให้มุมเฟสไม่มีความต่างที่จุด t_3 ซึ่งมีระยะเวลาเท่ากับเวลาประวิงจากระบบสื่อสารที่เกิดขึ้น ที่จุด t_4 แสดงให้เห็นถึงว่าแรงดันอ้างอิงซิงโครไนซ์กับแรงดันโครงข่ายและทำให้แรงดันของไมโครกริดเป็นไปตามเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์แก้ปัญหาผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารที่มีต่อการรีซิงโครไนซ์ได้

เนื่องจากการจำลองเหตุการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยมุมเฟสช่วยแก้ปัญหาผลกระทบของเวลาประวิงจากระบบสื่อสารต่อการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนได้ในหัวข้อต่อไปจะนำเสนอถึงสมรรถนะการทำงานของการทำงานของการชดเชยมุมเฟสเป็นกรณีศึกษาต่างๆ ดังจะได้แสดงต่อไป

4.7.5 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเมื่อความถี่เปลี่ยนจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.5 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 280 มิลลิวินาทีแบบคงที่



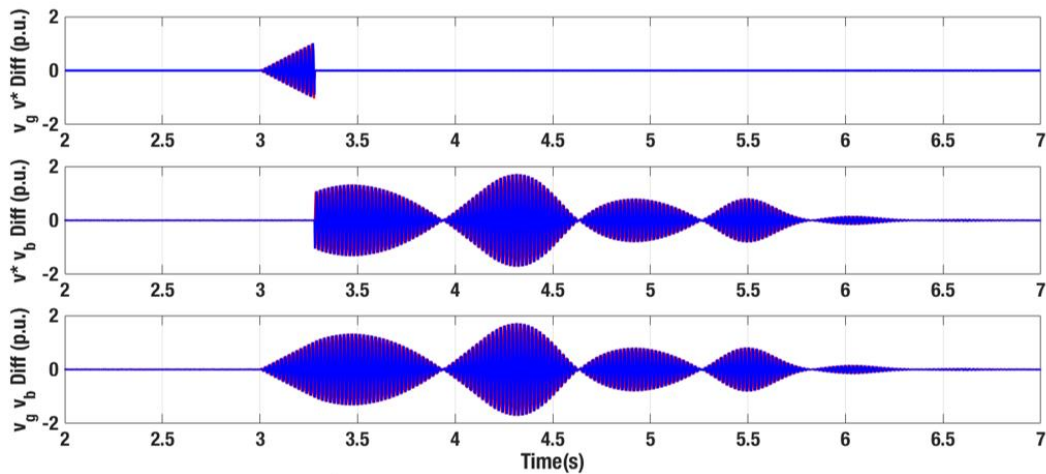
รูปที่ 4.25 การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.5 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 280 มิลลิวินาที



รูปที่ 4.26 การจำลองเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลเมื่อมีผลกระทบของเวลาประวิงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 280 มิลลิวินาที

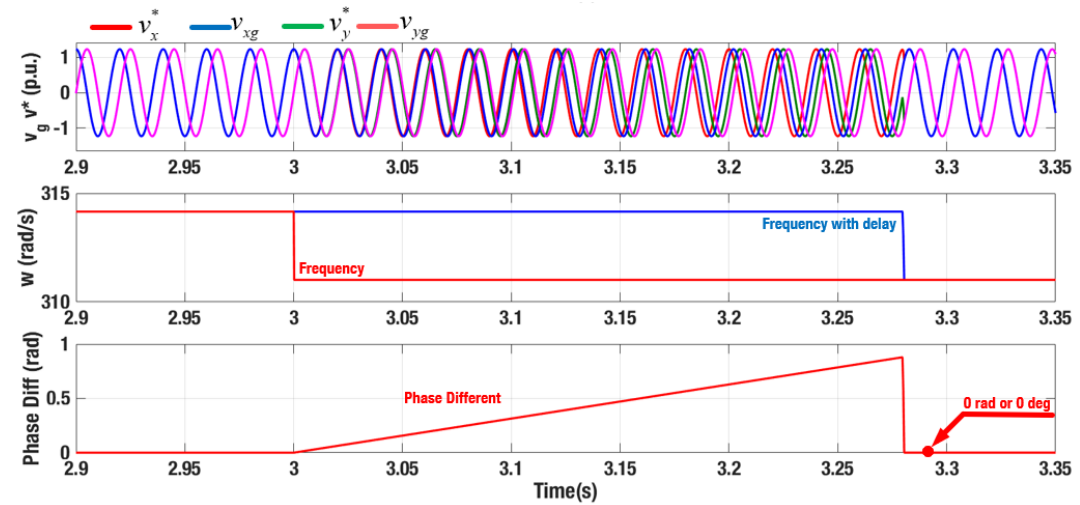
กรณีนี้มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ค่อนข้างสูงจาก 50 เฮิร์ตซ์ ไปยัง 50.5 เฮิร์ตซ์ จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าสมรรถนะของการชดเชยมุมเฟสจะเหมือนกับการจำลองในหัวข้อ 4.6.4 เพียงแต่มีค่าความแตกต่างที่สูงกว่า ผลกระทบจากค่าความแตกต่างนี้ทำให้ระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ใช้เวลา 2 วินาทีในการปรับแต่งแรงดันจันชิงโครไนซ์กับแรงดันโครงข่าย และในรูปที่ 4.25 จะเห็นว่าในช่วงที่เกิดเวลาประวิงนั้นด้วยความต่างของความถี่ที่มากส่งผลกระทบต่อความต่างเฟสของแรงดันอ้างอิงเทียบกับแรงดันโครงข่ายมีค่าค่อนข้างสูง แต่การชดเชยมุมเฟสก็ช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ และทำให้แรงดันอ้างอิงชิงโครไนซ์กับแรงดันของระบบโครงข่ายและเป็นไปตามเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์

4.7.6 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 49.5 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 280 มิลลิวินาทีแบบคงที่



รูปที่ 4.27 การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 49.5 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 280 มิลลิวินาที

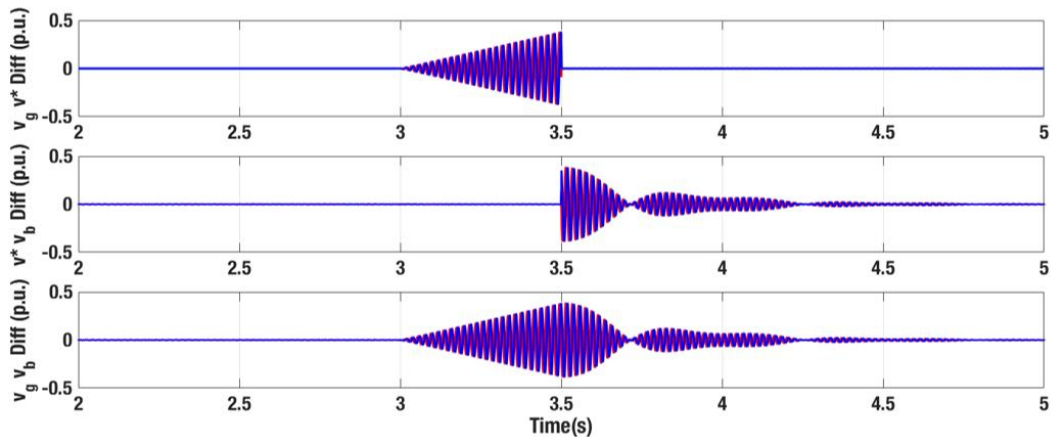
จากผลการจำลองในรูปที่ 4.26 จะเห็นว่าการชดเชยมุมเฟสนั้นสามารถแก้ปัญหาเวลาประวิงจากระบบสื่อสารได้เป็นอย่างดี แต่ด้วยความถี่ที่ตกสูงนี้ส่งผลให้เวกเตอร์เฟสล็อกกลุ่มใช้เวลานานขึ้นในการตรวจจับมุมเฟสและปรับแต่งแรงดันของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่แต่โดยรวมแล้วก็ยังคงทำให้แรงดันของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่นั้นซึ่งโครโนซ์กับระบบไฟฟ้าหลักได้



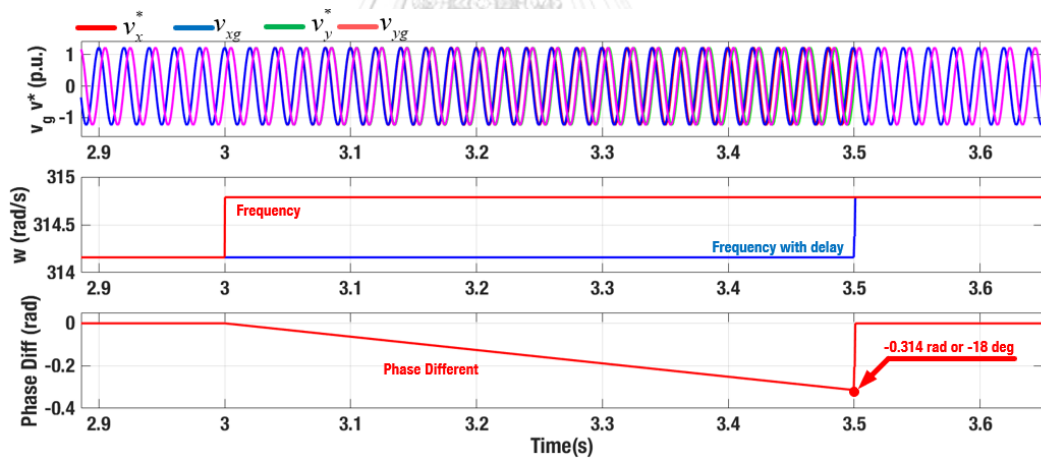
รูปที่ 4.28 การจำลองเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลเมื่อมีผลกระทบของเวลาประวิงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 49.5 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 280 มิลลิวินาที

ผลการจำลองในรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นถึงมุมเฟสนั้นแตกต่างกันค่อนข้างสูงแต่การชดเชยมุมเฟสและระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถปรับแต่งความถี่และมุมเฟสของแรงดันระบบก็เก็บพลังงานให้เป็นไปตามเงื่อนไขของมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ได้ ทำให้การรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนสามารถทำได้ในกรณีนี้

4.7.7 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 500 มิลลิวินาทีแบบคงที่



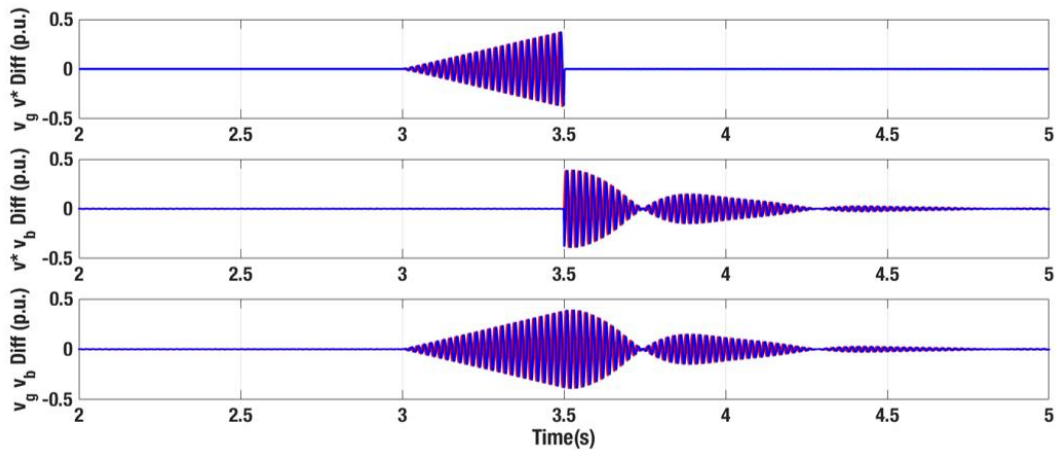
รูปที่ 4.29 การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 500 มิลลิวินาที



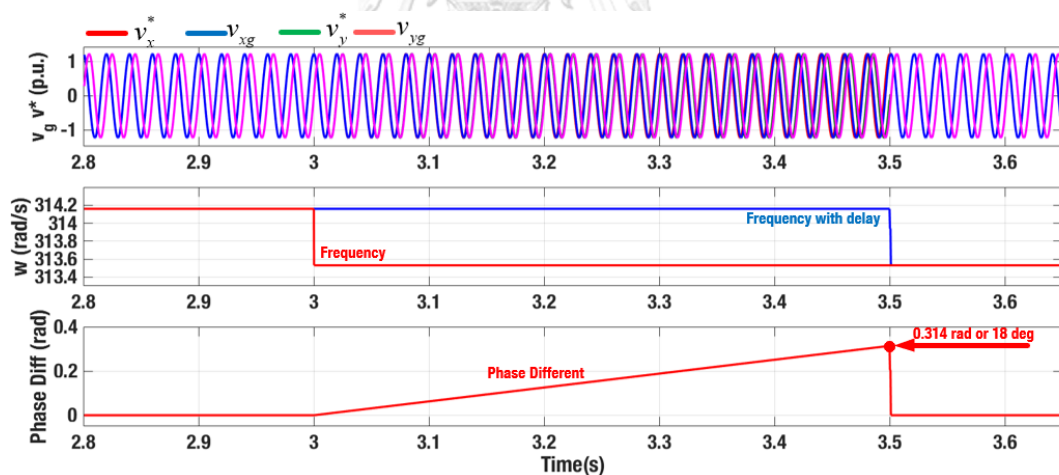
รูปที่ 4.30 การจำลองเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลเมื่อมีผลกระทบของเวลาประวิงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 50.1 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 500 มิลลิวินาที

เพื่อให้เห็นถึงสมรรถนะของการชดเชยมุมเฟส การจำลองเหตุการณ์ที่มีเวลาประวิงมากถึง 500 มิลลิวินาที จึงแสดงให้เห็นได้ว่าการชดเชยมุมเฟสนั้นสามารถทำได้เป็นอย่างดีช่วยเพื่อความเชื่อถือได้ให้กับการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนได้ แสดงได้ดังผลการจำลองในรูปที่ 4.28 และ 4.29

4.7.8 การจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบเวลาประวิงจากระบบสื่อสารเมื่อความถี่เปลี่ยนจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 49.9 เฮิร์ตซ์ และมีเวลาประวิงเกิดขึ้นที่ 500 มิลลิวินาทีแบบคงที่



รูปที่ 4.31 การจำลองผลกระทบของเวลาประวิงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 49.9 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 500 มิลลิวินาที



รูปที่ 4.32 การจำลองเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลเมื่อมีผลกระทบของเวลาประวิงที่ทำการชดเชยมุมเฟส เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 49.9 เฮิร์ตซ์ และเวลาประวิงที่เกิดขึ้นอย่างคงที่ 500 มิลลิวินาที

การจำลองกรณีศึกษาี้เพื่อแสดงสมรรถนะการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เช่นเดียวกับการจำลองกรณีศึกษาในหัวข้อที่ 4.7.7 เพียงแต่เปลี่ยนเป็นการลดความถี่ลงจาก 50 เฮิร์ตซ์ไปยัง 49.9 เฮิร์ตซ์ ซึ่งการจำลองในรูปที่ 4.30 และ 4.31 การชดเชยมุมเฟส

สามารถทำได้แม้ค่ามุมเฟสจะเป็นบวกหรือลบก็ตาม แสดงให้เห็นว่าแรงดันของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรีนั้นซิงโครไนซ์กับแรงดันของระบบไฟฟ้าหลักทำให้การรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนสามารถเป็นไปตามเงื่อนไขที่มาตรฐานการรีซิงโครไนซ์กำหนดได้ด้วยการชดเชยมุมเฟสด้วยหลักการที่นำเสนอ

4.8 สรุปผลการจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันของระบบกักเก็บพลังงานด้วยเบตเตอรี

จากการจำลองการชดเชยมุมเฟสให้แรงดันอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรีเพื่อแก้ปัญหาเวลาประวิงจากระบบสื่อสารของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่ผ่านมาในหัวข้อที่ 4.6 นอกจากนี้ในการคำนวณตามเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ สามารถคำนวณหาค่าเวลาประวิงสูงสุดที่มีผลต่อการรีซิงโครไนซ์จากเงื่อนไขของมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ คือ ความต่างมุมเฟสต้องไม่เกิน 10° และความต่างของความถี่ต้องไม่เกิน 0.1 เฮิร์ตซ์ ได้ดังนี้

$$\Delta\theta = 2\pi(\Delta f)(T_d)$$

$$10^\circ\left(\frac{\pi}{180^\circ}\right) = 2\pi(0.1)(T_d)$$

$$T_{d,\max} = 0.278 \text{ s}$$

ทำให้เห็นว่าการชดเชยมุมเฟสนั้นมีความจำเป็นหากค่าเวลาประวิงนั้นมากกว่า 278 มิลลิวินาทีเป็นต้นไป เพราะมีผลกระทบต่อมุมเฟสของแรงดันทางด้านไมโครกริดซึ่งมากเกินไปเขตเงื่อนไขของมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด แต่ถึงแม้ว่าจะมีมุมเฟสที่ไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด ระบบควบคุมระบบแปลงผันกำลังที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ของระบบกักเก็บพลังงานแบบเตอรีสามารถทำการชดเชยมุมเฟสได้ เพื่อช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน

บทที่ 5

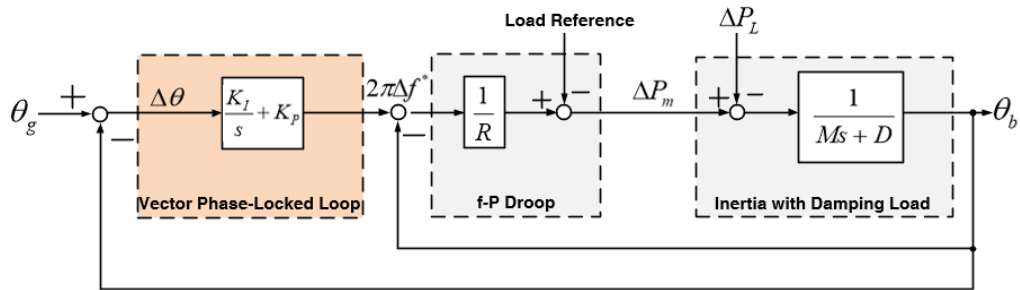
บทสรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนด้วยระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ด้วยระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ โดยทำการตรวจวัดความต่างของมุมเฟสด้วยเวกเตอร์เฟสล็อกแล้วทำการปรับรูปคลื่นสัญญาณความถี่ มุมเฟส และแรงดันของไมโครกริดด้วยระบบควบคุมกำลังจริง ซึ่งประกอบไปด้วยการทำงานของรูปความถี่กำลังจริง เพื่อให้ลักษณะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ทำงานในลักษณะเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจและใช้งานของผู้ดูแลระบบของทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนนำเสนอด้วยการจำลองด้วยโปรแกรม DigSILENT-Powerfactory โดยนำข้อมูลของระบบไฟฟ้าอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อให้ได้ลักษณะของการทำงานที่ใกล้เคียงกับไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนมากที่สุดเท่าที่ทำได้ ภายในงานวิจัยยังได้กล่าวถึงการทำงานในโหมดต่างๆ ของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนทั้ง โหมดเชื่อมต่อกับโครงข่าย โหมดเปลี่ยนผ่านจากโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไปยังโหมดแยกอิสระ โหมดแยกอิสระ และ การรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด ระบบควบคุมการแปลงผันกำลังที่นำเสนอสามารถทำงานตามโหมดการทำงานทั้ง 4 ได้ โดยเฉพาะโหมดของการเปลี่ยนผ่านที่นำระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่มาช่วยส่งผลให้การเปลี่ยนผ่านโหมดทั้งสองแบบทำงานได้อย่างราบรื่น ซึ่งโหมดของการรีซิงโครไนซ์นั้นเป็นโหมดการทำงานของไมโครกริดที่ทำหายมาก เมื่อมีการทำงานในโหมดนี้ด้วยระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่นำเสนอซึ่งสามารถควบคุมความถี่ และมุมเฟสของแรงดันด้านไมโครกริดให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 1547-2018 ได้ นอกจากนี้งานวิจัยยังได้สังเกตเห็นถึงปัญหาของการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลตามลักษณะของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนที่มีการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานที่อยู่ไกลออกไปถึง 20 กิโลเมตร ปัญหาดังกล่าวเกิดจากผลกระทบจากเวลาประวิงที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารเพื่อส่งสัญญาณจากอุปกรณ์วัดที่สามารถสื่อสารได้ โดยการสื่อสารของไมโครกริดแม่ฮ่องสอนได้ถูกออกแบบโดยฝ่ายสื่อสาร การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ให้ใช้โปรโตคอล MPLS และมีการเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์ด้วยใยแก้วนำแสง การจำลองในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงโครงสร้างของระบบสื่อสารตามที่ทางฝ่ายสื่อสารออกแบบ และระบบสื่อสารของผู้ให้บริการในพื้นที่ และได้อ้างอิงผลการทดสอบของอุปกรณ์เรดเตอร์ที่มีการใช้งานกันทั่วไป

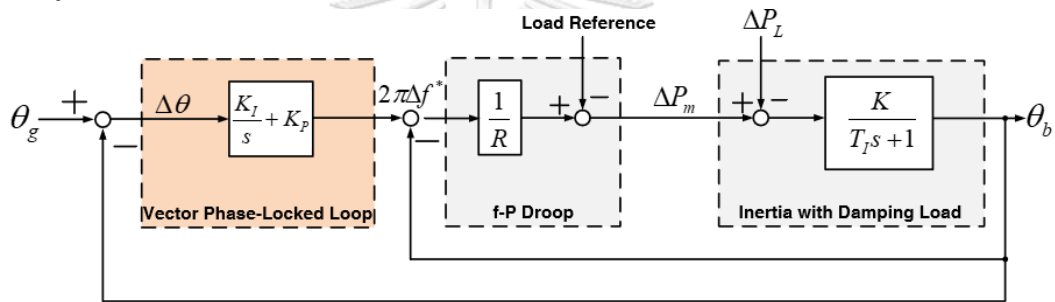
ภายในประเทศมาใช้ในการพิจารณาเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากระบบสื่อสารของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอน และด้วยฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์วัดอย่าง PMU ซึ่งทำงานได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วและที่สำคัญคือการทำงานของ PMU ร่วมกับ PMU ตัวอื่นบนพื้นฐานเวลาเดียวกันผ่าน GPS และมีการประทับเวลาของการวัดค่าที่ส่งมายังระบบควบคุมทำให้ระบบควบคุมแปลงผันกำลังทราบได้ถึงความแตกต่างของเวลาจาก PMU ต้นทางเทียบกับค่าเวลาพื้นฐานของ PMU ที่ รพพ.ผาบ่อง ทำให้ทราบได้ถึงเวลาประวิงที่เกิดขึ้นจากระบบสื่อสารในการแรงดัน ซึ่งผลกระทบจากเวลาประวิงดังกล่าวทำให้ระบบควบคุมได้รับค่าที่ไม่ตรงกับค่าปัจจุบันที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปแล้ว ส่งผลให้เวกเตอร์เฟสล็อกถูปรวบจับค่าความต่างมุมเฟสของสัญญาณอ้างอิงซึ่งเป็นอดีตมาเทียบกับแรงดันของไมโครกริดแล้วปรับด้วยส่วนควบคุมกำลังจริงที่ต่อเรียงอยู่ ทำให้ได้แรงดันที่ไม่ตรงกับแรงดันโครงข่าย ณ เวลาปัจจุบัน โดยในการจำลองได้แสดงถึงเหตุการณ์ที่มุมเฟสของโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งกรณีนี้ส่งผลกระทบต่อไม่รุนแรงมากนักเพราะมุมเฟสจะต่างกับสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงในช่วงเวลาตามเวลาประวิงเท่านั้นจากนั้นมุมเฟสของแรงดันที่ส่งไปยังระบบควบคุมการแปลงผันกำลังจะเท่ากับแรงดันตั้งต้นซึ่งไม่จำเป็นต้องทำการชดเชยใดๆ แต่ในกรณีที่ความถี่ของโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงทำให้ความต่างของมุมเฟสของสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณที่ส่งไปยังระบบควบคุมมีการความต่างคงที่ไปตลอด ในกรณีนี้หากความต่างของมุมเฟสเกินจากมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดก็จะส่งผลให้อุปกรณ์ตรวจสอบการรีซิงโครไนซ์ไม่สามารถสั่งการปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุด PCC ได้เพราะแรงดันทั้งสองไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่ตั้งค่าไว้ ดังนั้นจึงต้องทำการชดเชยมุมเฟสดังกล่าวให้สัญญาณที่ทางระบบควบคุมการแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ได้รับก็จะช่วยให้การรีซิงโครไนซ์ระยะไกลสามารถทำได้ตามเงื่อนไขของการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริดได้นั่นเอง ซึ่งระบบควบคุมระบบแปลงผันกำลังของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่นำเสนอขึ้นสามารถทำการชดเชยมุมเฟสดังกล่าวได้จึงเป็นการช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับการรีซิงโครไนซ์ระยะไกลของไมโครกริดอำเภอเมืองแม่ฮ่องสอนได้เป็นอย่างดี

ภาคผนวก ก

การหาฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่าง การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า ที่ BESS จะต้องจ่าย [29]



รูปที่ 1ก แผนภาพบล็อกสำหรับการทำรีซิงโครไนซ์โครงข่ายหลังจากประมาณให้เป็นระบบเชิงเส้น



รูปที่ 2ก แผนภาพบล็อกสำหรับการทำรีซิงโครไนซ์โครงข่ายหลังจากประมาณให้เป็นระบบเชิงเส้นประกอบการคำนวณเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับการรีซิงโครไนซ์

ฟังก์ชันถ่ายโอนของ $\frac{\Delta\theta}{\Delta P_L}$ สามารถคำนวณได้โดยเริ่มจากการนำระบบในรูปที่ 2ก มาวิเคราะห์และเขียนในรูป Open Loop Equivalent System ได้ตามสมการที่ (1ก) และได้ผลลัพธ์ตามทีแสดงในสมการที่ (2ก)

$$\theta_B = \frac{K(sK_p + K_I)}{R\tau_I s^3 + s^2(R + K) + sKK_p + KK_I} \theta_G + \frac{-sKR}{R\tau_I s^3 + s^2(R + K) + sKK_p + KK_I} \Delta P_L \quad (1ก)$$

กำหนดให้

$$\alpha = \frac{K(sK_p + K_I)}{R\tau_I s^3 + s^2(R + K) + sKK_p + KK_I}$$

และ

$$\beta = \frac{-sKR}{R\tau_I s^3 + s^2(R + K) + sKK_p + KK_I}$$

$$\theta_B = \alpha\theta_G + \beta\Delta P_L$$

$$(\alpha - 1)\theta_G(s) + \Delta\theta(s) + \beta\Delta P_L = 0$$

เมื่อให้ $\theta_G(s) = 0$ แล้ว

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta P_L} = -\beta = \frac{sKR}{R\tau_I s^3 + s^2(R+K) + sKK_P + KK_I} \quad (2ก)$$

การพิสูจน์เสถียรภาพรอบจุดทำงานของระบบควบคุมสำหรับการรีจิงโครไนซ์ด้วยวิธีเรอท์-เฮอร์วิทซ์ [29]

ระบบควบคุมในรูปที่ 1ก สามารถหา Open Loop Equivalent System ได้ตาม que แสดงในสมการที่ (1ก) ซึ่งระบบจะมีขั้วตาม que แสดงในสมการที่ (3ก)

$$P(s) = R\tau_I s^3 + s^2(R + K) + sKK_P + KK_I \quad (3ก)$$

สมการลักษณะเฉพาะของระบบคือ

$$\text{ให้ } P(s) = 0$$

$$\text{จะได้ } R\tau_I s^3 + s^2(R + K) + sKK_P + KK_I = 0$$

s^3	$R\tau_I$	KK_P
s^2	$(R + K)$	KK_I
s	$KK_P(R + K) - R\tau_I KK_I$	0
s^0	KK_I	

โดยที่ทุกตัวแปร มีค่ามากกว่าศูนย์

$$\text{ดังนั้น } KK_P(R + K) - R\tau_I KK_I > 0$$

$$\text{และ } KK_I > 0$$

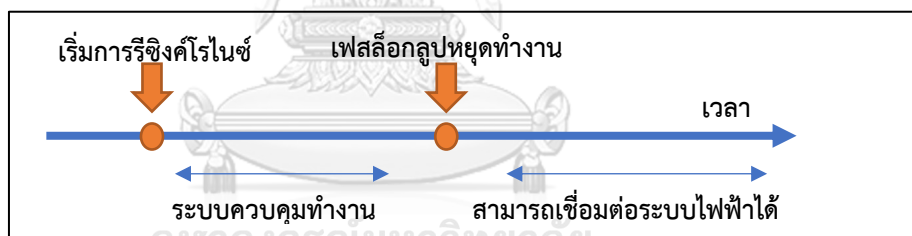
จึงสามารถสรุปเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบควบคุมที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (4ก) และ (5ก)

$$\frac{K_I}{K_P} < \frac{R + K}{R\tau_I} \quad (4ก)$$

$$K_I > 0 \quad (5ก)$$

การออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล [29]

ก่อนที่จะทำการรีซิงโครไนซ์ จะต้องทำให้ความถี่ไฟฟ้าระหว่างไมโครกริดและระบบไฟฟ้าหลักต่างกันไม่เกินเงื่อนไขของมาตรฐานการรีซิงโครไนซ์ไมโครกริด IEEE 1547-2018 โดยการออกแบบในงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นการออกแบบเพื่อให้ระบบสามารถควบคุมมุมเฟสของระบบไฟฟ้าทั้งสองให้มีค่าเท่ากันในเวลาที่กำหนดและมีค่าไม่เกินขอบเขต แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสของระบบไฟฟ้าหลักหรือการเปลี่ยนแปลงขนาดกำลังไฟฟ้าก็ตาม สาเหตุที่จะต้องมีการกำหนดเวลาในการทำงานของระบบควบคุม คือเพื่อให้สามารถกำหนดเวลาเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังแสดงในรูปที่ 3ก

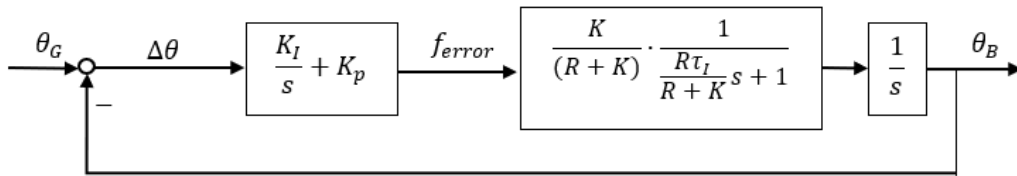


รูปที่ 3ก ลำดับเวลาแสดงขั้นตอนการรีซิงโครไนซ์

เทคนิคที่นำมาใช้ในการออกแบบนั้นคือเทคนิคการออกแบบสมรรถภาพของวงรอบควบคุมแบบปิดผ่านการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงรอบเปิด โดยเทคนิคนี้จะอาศัยการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล จนระบบควบคุมมี Gain Margin และ Phase Margin ที่เหมาะสม

ระบบควบคุมที่นำมาใช้ออกแบบนั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 4ก ซึ่งเกิดจากการนำระบบควบคุมในรูปที่ 1ก มาเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่าย และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการวงรอบเปิดได้ตามสมการที่ (6ก) โดยนิยามของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบควบคุมจะถูกแสดงในตารางที่ 1ก

$$L(s) = \frac{K}{(R + K)} \cdot \frac{1}{s(\frac{R\tau_I}{R + K}s + 1)} \times (\frac{K_I}{s} + K_P) \quad (6ก)$$



รูปที่ 4ก แผนภาพบล็อกสำหรับการทำรีซิงโครไนซ์ที่จัดรูปอย่างง่าย

ตารางที่ 1ก แสดงค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นของระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง

พารามิเตอร์	หน่วย	คำอธิบาย
R	p.u.	อัตราส่วนระหว่างความถี่ต่อกำลังจริงที่เปลี่ยนแปลง
K	-	อัตราขยายจากสัมประสิทธิ์การหน่วงจ่ายของโหลด
τ_I	วินาที	ค่าความเฉื่อยของส่วนควบคุมหลัก

การออกแบบนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัลที่ทำให้ระบบควบคุมมีความถี่ตัดของระบบ (ω_c) ที่ต้องการ ซึ่งสามารถคำนวณได้หาได้จากการแทนค่า $L(s)$ รอบจุด $s = j\omega_c$ ที่ต้องการตามที่แสดงในสมการที่ (7ก)

$$L(j\omega_c) = \frac{K}{j\omega_c(j\omega_c R\tau_I + (R + K))} \times (\frac{K_I}{j\omega_c} + K_P)$$

$$|L(j\omega_c)| = \left| \frac{K}{j\omega_c(j\omega_c R\tau_I + (R + K))} \times (\frac{K_I}{j\omega_c} + K_P) \right| \quad (7ก)$$

$$= 1$$

และด้วยเงื่อนไขที่ระบบต้องมีเสถียรภาพที่ทุกจุดทำงาน กำหนดให้ระบบควบคุมมี Phase Margin(PM) เท่ากับ 45 องศาจะสามารถตั้งสมการได้ตามสมการที่ (8ก)

$$\angle L(j\omega_c) = \angle \frac{K}{j\omega_c(j\omega_c R\tau_I + (R + K))} + \angle (\frac{K_I}{j\omega_c} + K_P)$$

$$\angle \frac{K}{j\omega_c(j\omega_c R\tau_I + (R + K))} + \angle \left(\frac{K_I}{j\omega_c} + K_P \right) = 135^\circ \quad (8ก)$$

จากสมการที่ (4ก) และ (5ก) จะสามารถแก้สมการให้อยู่ใน Analytic Form ได้ตามสมการที่ (9ก) และ (10ก)

$$\text{โดยที่ } \omega_m = \frac{R+K}{R\tau_I}$$

$$K_I = \frac{\omega_c^2 \times (R + K) \sqrt{\left(\frac{\omega_c}{\omega_m}\right)^2 + 1}}{K \sqrt{\tan(45^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{\omega_c}{\omega_m}\right))^2 + 1}} \quad (9ก)$$

$$K_P = \frac{K_I \tan(45^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{\omega_c}{\omega_m}\right))}{\omega_c} \quad (10ก)$$

โดยความถี่ตัด (*Cutoff Frequency* : ω_c) ของระบบนี้สามารถกำหนดได้จากการประมาณเป็นอัตราผกผันของเวลาผลตอบสนองของขาลง (*Fall Time*) ที่ต้องการออกแบบให้ระบบควบคุม

บรรณานุกรม

1. Cisco Systems I. Understanding Delay in Packet Voice Networks 2008.
2. Cisco Systems I. RFC 2544 Latency Testing on Cisco ASR 1000 Series Aggregation Services Routers 2009.
3. Commscope. Latency in optical fiber systems 2017.
4. Lab B. Microgrid Definitions 2019 [Available from: <https://building-microgrid.lbl.gov/microgrid-definitions>].
5. P. Kundur ; edited by Neal J. Balu MGL. Power system stability and control. New York: McGraw-Hill, ©1994; 1994. 1176 p.
6. The Institute of Electrical and Electronics Engineers I. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997 USA: IEEE; 2018.
7. ผศ.ดร. แนนบุญ หุนเจริญ การพัฒนาระบบโครงข่ายไฟฟ้าสมาร์ทโครงข่าย: กรณีศึกษาเมืองแม่ฮ่องสอน: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2559.
8. Shoeiby B, Davoodnezhad R, Holmes DG, McGrath BP, editors. A resonant current regulator based microgrid control strategy with smooth transition between islanded and grid-connected modes. 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG); 2014 24-27 June 2014.
9. W.Srithiam SA, and T.Sumranwanich., Application of Battery Energy Storage System in Coordination with MicroEMS for Mae Hong Son Microgrid during Islanding Mode. CIGRE AORC Technical Meeting 2014 2014.
10. Kuzlu M, Pipattanasomporn M, Rahman S. Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN. Comput Netw. 2014;67:74-88.
11. K.Raksina, S.Surapong. Converter Control Strategy of Battery Energy Storage System and Protection System Setting for Mae Hong Son AC Microgrid: Chulalongkorn University; 2016.
12. Guerrero JM, Vasquez JC, Matas J, Castilla M, de Vicuna LG. Control Strategy for

Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems. *IEEE T Ind Electron.* 2009;56(3):726-36.

13. Manson SM, Upreti A, Thompson MJ. Case Study: Smart Automatic Synchronization in Islanded Power Systems. *IEEE T Ind Appl.* 2016;52(2):1241-9.

14. Ochs DS, Mirafzal B, Sotoodeh P. A Method of Seamless Transitions Between Grid-Tied and Stand-Alone Modes of Operation for Utility-Interactive Three-Phase Inverters. *IEEE T Ind Appl.* 2014;50(3):1934-41.

15. Srivorakul A, Suwankawin S. A Synchro-Perspective-Based High-Frequency Voltage Injection Method for Position-Sensorless Vector Control of Doubly Fed Induction Machines. *IEEE T Ind Appl.* 2018;54(4):3326-37.

16. Best RJ, Morrow DJ, Lavery DM, Crossley PA. Synchrophasor Broadcast Over Internet Protocol for Distributed Generator Synchronization. *IEEE T Power Deliver.* 2010;25(4):2835-41.

17. Eissa MM, Masoud ME, Elanwar MMM. A Novel Back Up Wide Area Protection Technique for Power Transmission Grids Using Phasor Measurement Unit. *IEEE T Power Deliver.* 2010;25(1):270-8.

18. Cho C, Jeon JH, Kim JY, Kwon S, Park K, Kim S. Active Synchronizing Control of a Microgrid. *IEEE T Power Electr.* 2011;26(12):3707-19.

19. Liu J, Miura Y, Ise T. Comparison of Dynamic Characteristics Between Virtual Synchronous Generator and Droop Control in Inverter-Based Distributed Generators. *IEEE T Power Electr.* 2016;31(5):3600-11.

20. Rocabert J, Luna A, Blaabjerg F, Rodriguez P. Control of Power Converters in AC Microgrids. *IEEE T Power Electr.* 2012;27(11):4734-49.

21. Serban I, Marinescu C. Control Strategy of Three-Phase Battery Energy Storage Systems for Frequency Support in Microgrids and with Uninterrupted Supply of Local Loads. *IEEE T Power Electr.* 2014;29(9):5010-20.

22. Ashabani SM, Mohamed YARI. New Family of Microgrid Control and Management Strategies in Smart Distribution Grids-Analysis, Comparison and Testing. *IEEE T Power Syst.* 2014;29(5):2257-69.

23. Micallef A, Apap M, Spiteri-Staines C, Guerrero JM. Single-Phase Microgrid With Seamless Transition Capabilities Between Modes of Operation. *IEEE T Smart Grid.*

2015;6(6):2736-45.

24. Lidula NWA, Rajapakse AD. Voltage balancing and synchronization of microgrids with highly unbalanced loads. *Renew Sust Energy Rev.* 2014;31:907-20.

25. Techapakapong S. 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. Chulalongkorn University: Chulalongkorn University; 2017.

26. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ข้อกำหนดเกี่ยวกับการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Operation Code) ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ผู้เชื่อมต่อประเภท SPP Non-Firm ชนิดที่ใช้อุปกรณ์ Inverter. ประเทศไทย: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย; 2017.

27. IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems. IEEE Std C37118-2005 (Revision of IEEE Std 1344-1995). 2006:1-65.

28. SEL-351A Protection System Data Sheet. WA, U.S.A.: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.; 2009-2017. 32 p.

29. Pongjirapat K. Analysis and Design of a Re-synchronization Technique for Microgrids. 2019.

30. MiCOM P14x (P141, P142, P143 & P145) Technical Manual. FRANCE: Schneider Electric; 2014.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Thanakrit Kittiwarat
วัน เดือน ปี เกิด	13 November 1989
สถานที่เกิด	Lampang, Thailand
วุฒิการศึกษา	Bachelor Degree: Electrical Engineering, King Mongkutt's Institute of Technology Ladkrabang
ที่อยู่ปัจจุบัน	481/498 Charunsanitwong 37, Bangkunsri, Bangkoknoi, Bangkok
ผลงานตีพิมพ์	"A Control Methodology of Inverter-Based Battery Energy Storage System for AC Microgrid", IEEE Innovative Smart Grid Technologies ASIA 2019, Chengdu, China, 2019
รางวัลที่ได้รับ	2nd Generation of EGAT Smart Grid Scholarship, 2017