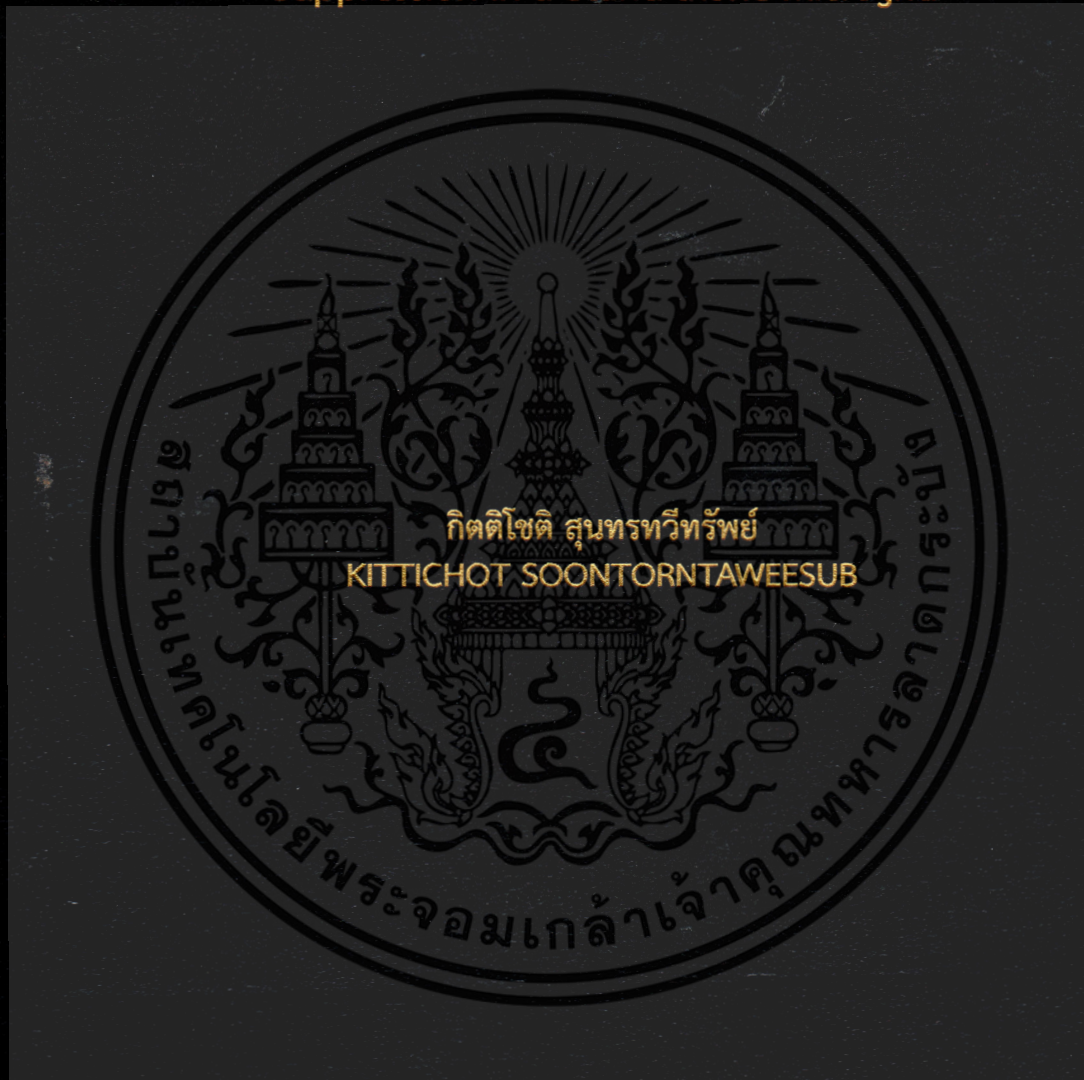


การควบคุมระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเพื่อลดความผันผวนทางความถี่  
ในไมโครกริดแบบแยกอิสระ

Control of Battery Energy Storage System for Frequency Deviation  
Suppression in a Stand-alone Microgrid



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2561  
KMITL-2018-EN-M-020-103

การควบคุมระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเพื่อลดความผันผวนทางความถี่  
ในไมโครกริดแบบแยกอิสระ

Control of Battery Energy Storage System for Frequency Deviation  
Suppression in a Stand-alone Microgrid



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-020-103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Control of Battery Energy Storage System for Frequency Deviation  
Suppression in a Stand-alone Microgrid

KITTICHOT SOONTORNTAWEE SUB

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

KMITL-2018-EN-M-020-103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2018**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเพื่อลดความผันผวนทางความถี่ในไมโครกริดแบบแยกอิสระ  
Thesis Title Control of Battery Energy Storage System for Frequency Deviation Suppression in a Stand-alone Microgrid  
นักศึกษา นายกิตติโชติ สุนทรทวีทรัพย์  
รหัสประจำตัว 59601294  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สมภพ ผลไม้  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-020-103

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุเมธ	เนติลัดदानนท์	
รศ.ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข	
ผศ.ดร.วรชาติ	สุวรรณงาม	
ดร.สมภพ	ผลไม้	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-11.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-305 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ฉบับตี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเพื่อลดความผันผวนทางความถี่ในไมโครกริดแบบแยกอิสระ
นักศึกษา	นายกิติโชติ สุนทรทวีทรัพย์
รหัสประจำตัว	59601294
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สมภพ ผลไม้

### บทคัดย่อ

การลดความผันผวนทางความถี่ของระบบมีความจำเป็นอย่างยิ่งในระบบขนาดเล็กที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนจำนวนมากอย่างไม่โครกริดแบบแยกอิสระ การใช้ระบบกักเก็บพลังงานร่วมกับการควบคุมที่เหมาะสมเป็นหนึ่งในแนวทางที่จะช่วยลดความผันผวนของความถี่ของระบบได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ระบบกักเก็บพลังงานเป็นแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วเชื่อมต่อผ่านอินเวอร์เตอร์เข้าไปยังระบบไมโครกริด กำลังไฟฟ้าควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ กำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเร็วซึ่งได้จากการกรองผ่านความถี่สูงของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และส่วนกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงช้าซึ่งได้จากผลต่างของกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์อ้างอิงที่คำนวณจากค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ที่ต้องการกับส่วนกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงช้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ผลการควบคุมนี้ทำให้กำลังไฟฟารวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานมีความราบเรียบ ส่งผลให้ความถี่ไฟฟ้าของระบบมีความผันผวนน้อยลง นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมสถานะประจุของแบตเตอรี่ได้ตามต้องการอีกด้วย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการจำลองการทำงานของระบบไมโครกริดแบบแยกอิสระซึ่งมีระบบกักเก็บพลังงานซึ่งถูกควบคุมโดยวิธีการที่นำเสนอ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าสามารถลดความผันผวนทางความถี่ให้อยู่ในย่าน  $\pm 0.2$  Hz ได้ และสามารถควบคุมสถานะประจุของแบตเตอรี่ได้ตามที่กำหนด นอกจากนี้เครื่องต้นแบบระบบกักเก็บพลังงานที่ใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อทดสอบการทำงานให้ห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองขั้นต้นพบว่าสามารถควบคุมการประจุแบตเตอรี่ได้ตามที่ออกแบบ ส่วนการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านเอซียังประสบปัญหาสัญญาณรบกวนทำให้ยังไม่สามารถทดสอบได้โดยสมบูรณ์

<b>Thesis</b>	Control of Battery Energy Storage System for Frequency Deviation Suppression in a Stand-alone Microgrid
<b>Student</b>	Mr.Kittichot Soontorntaweesub
<b>Student ID.</b>	59601294
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Dr.Sompob Polmai

## ABSTRACT

Frequency deviation suppression is important for a small system with high renewable energy integration such as stand-alone microgrid. Energy storages system with proper control can effectively suppress frequency deviation. In this thesis, lead-acid batteries that connect to a microgrid through an inverter is used as an energy storage system. The controlled power of the energy storage system is divided in to two parts; the fast changing power which can obtained from high-pass filtering of the power of the photovoltaic generator and the slow changing power which is the difference between the reference photovoltaic power and the slow-changing part of the power of photovoltaic generator. With this proposed control method, the combined power from photovoltaic generator and the energy storage system is smoothen and lessen the frequency deviation. Furthermore, the state of charge of the battery is also monitored and controlled. In this thesis, the simulations were carried out for a stand-alone microgrid with the energy storage system controlled by the proposed method. The simulation results show that the frequency deviation could be suppressed within +/- 0.2 Hz and the state of charge of the battery was kept at the predetermined level. Moreover, a prototype energy storage system using lead-acid batteries was designed and built for laboratory experiment. The preliminary experimental results show that the charging and discharging could be done as designed but the AC power control encountered the noise problem and the complete experiment could not be finished.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สมภพ ผลไม้ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ พี่ Darith Leng ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการเขียนโปรแกรมและออกแบบอุปกรณ์ รวมถึงน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำการทดลอง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นไปได้ด้วยดี

สุดท้ายต้องขอขอบคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา รวมถึงสนับสนุนให้โอกาสทางการศึกษาแก่ข้าพเจ้า

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

กิตติโชติ สุนทรทวีทรัพย์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา .....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน.....	4
2.1 ระบบไมโครกริด.....	4
2.1.1 ความหมายและความเป็นมาของไมโครกริด .....	4
2.1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ .....	5
2.1.3 ข้อดีของระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์.....	5
2.1.4 โครงข่ายระบบจำหน่ายแบบแอกทีฟ.....	6
2.1.5 กรอบความคิดของไมโครกริด.....	6
2.1.6 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของไมโครกริด และหน้าที่ของแต่ละส่วนประกอบ .....	7
2.1.7 ตัวควบคุมในระบบไมโครกริด .....	9
2.1.8 แหล่งพลังงานในไมโครกริด.....	14
2.1.9 การจัดการและปัญหาการดำเนินงานของไมโครกริด .....	15

2.2 ระบบกักเก็บพลังงาน [2] .....	15
2.2.1 ประโยชน์ของระบบกักเก็บพลังงาน .....	16
2.2.2 การใช้งานในระบบไมโครกริด .....	16
2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power converter) [2].....	17
2.3.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง .....	17
2.3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเฟสเดียว .....	18
2.4 เทคนิคการควบคุมที่ใช้.....	22
2.4.1 เฟสล็อกคูลูป (Phase Locked Loop) .....	22
2.4.2 การควบคุมวงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง .....	23
2.4.3 การควบคุมวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ .....	24
2.4.5 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกรีซแนนซ์ (Proportional plus Resonant Controller) 26	
บทที่ 3 การจำลองผลและการออกแบบ .....	28
3.1 การจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink .....	28
3.1.1 การจำลองระบบไมโครกริด.....	28
3.1.2 แบบจำลองทางทฤษฎีของแบตเตอรี่ .....	30
3.1.3 การควบคุมระบบสำรองพลังงานในระบบไมโครกริด.....	39
3.1.4 การลดความผันผวนของความถี่ .....	40
3.1.5 การตั้งค่าเวลาจำลองผลในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และโปรไฟล์ต่าง ๆ .....	42
3.1.6 ผลการเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงาน .....	43
3.2 การจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM .....	48
3.2.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง .....	48
3.2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ.....	51
3.2.3 ผลการรวมวงจรแปลงผันกำลังเข้าด้วยกัน.....	54

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง .....	61
4.1 ผลการสร้างวงจรแปลงผันกำลัง .....	61
4.2 ผลเชื่อมต่อบระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเข้าสู่ระบบไมโครกริด .....	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	70
5.1 สรุปผล .....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	71
5.3 แนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไป .....	71
เอกสารอ้างอิง .....	72
ภาคผนวก .....	73
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า .....	74
ภาคผนวก ข. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	91



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พิกัดของอุปกรณ์ต่าง ๆ.....	30
3.2 ค่าคงที่ที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว.....	35



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของไมโครกริด .....	8
2.2 รูปแบบทั่วไปของ MC.....	10
2.3 รูปสำหรับ V-Q Droop Controller.....	11
2.4 คุณลักษณะครุฑของกำลังจริงเทียบกับความถี่ .....	12
2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง .....	18
2.6 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเฟสเดียว .....	19
2.7 สัญญาณไซน์เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อควบคุมสวิตช์แบบไบโพลาร์.....	20
2.8 สัญญาณแรงดันขาออกของการสวิตช์แบบไบโพลาร์.....	20
2.9 สัญญาณไซน์เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อควบคุมสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ .....	21
2.10 สัญญาณแรงดันขาออกของการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์.....	21
2.11 เปรียบเทียบฮาร์มอนิกไซด์แบนระหว่างไบโพลาร์ กับ ยูนิโพลาร์.....	22
2.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเฟสล็อกคูลูป .....	23
2.13 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง.....	23
2.14 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ .....	24
2.15 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรพีไอดี.....	24
2.16 แสดง Bode plot ของการควบคุมแบบฟีดแบ็คที่กำหนดให้ค่า $K_p$ คงที่ .....	27
3.1 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบไมโครกริดที่มีการเพิ่มระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน.....	29
3.2 ผังการควบคุมของระบบไมโครกริดสถิตแบบแยกอิสระ .....	30
3.3 วงจรสมมูลที่อธิบายด้วยสมการคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ตาม MATLAB/Simulink.....	31
3.4 กราฟคุณลักษณะแบตเตอรี่ .....	32
3.5 แบบจำลองแสดงย่านเอ็กโปเนนเชียล .....	35
3.6 แบบจำลองแสดงการคายประจุ .....	36
3.7 แบบจำลองแสดงการอัดประจุ .....	36
3.8 แบบจำลองแสดงสถานะประจุ .....	37
3.9 แบบจำลองแบตเตอรี่.....	38

รูปที่	หน้า
3.10 วงจรสมมูลแบตเตอรี่.....	39
3.11 Insolation เพื่อใช้อ้างอิงการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่.....	40
3.12 บล็อกไดอะแกรมแสดงรูปแบบการคำนวณ Pfast และ Pslow.....	41
3.13 สัญญาณ Pfast.....	41
3.14 สัญญาณ Pslow.....	42
3.15 กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของระบบก่อนการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน .....	44
3.16 ความถี่ไฟฟ้ากำลังก่อนเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน.....	44
3.17 กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของระบบหลังการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน.....	45
3.18 ความถี่ไฟฟ้ากำลังหลังเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน.....	45
3.19 ผลลัพธ์การอัดและคายประจุในแบตเตอรี่.....	46
3.20 ผลลัพธ์การอัดและคายประจุในแบตเตอรี่เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าคำสั่งเพียง Pfast.....	47
3.21 ความถี่ไฟฟ้ากำลังหลังเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าคำสั่งเพียง Pfast.....	47
3.22 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมโดยใช้กระแส.....	48
3.23 วงจรกำลังสำหรับการจำลองผลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบ สองทิศทาง.....	49
3.24 วงจรควบคุมสำหรับการจำลองผลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบ สองทิศทาง.....	50
3.25 ผลการจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสองทิศทาง.....	51
3.26 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมโดยใช้กระแสและนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันกริด.....	52
3.27 วงจรกำลังสำหรับการจำลองผลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ.....	52
3.28 วงจรควบคุมสำหรับการจำลองผลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ.....	53
3.29 วงจรเฟสล็อกลูป (Phase Locked loop) สำหรับการจำลองผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสสลับเฟสเดียว.....	53
3.30 ผลการจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ.....	54
3.31 วงจรกำลังสำหรับการจำลองผลของการรวมวงจรแปลงผันกำลังทั้งสองเข้าด้วยกัน.....	55

รูปที่	หน้า
3.32 วงจรควบคุมสำหรับการจำลองผลในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็น กระแสตรงแบบสองทิศทาง .....	56
3.33 วงจรควบคุมสำหรับการจำลองผลในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็น กระแสสลับ .....	57
3.34 วงจรเฟสล็อกสำหรับการจำลองผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ .....	57
3.35 วงจร Delay การทำงานสำหรับการจำลองผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็น กระแสสลับ .....	58
3.36 ผลการจำลองในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง .....	59
3.37 ผลการจำลองในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงเป็นกระแสสลับ .....	60
4.1 โมดูล IGBT ของ Mitsubishi (PM50RLA120).....	61
4.2 วงจรสำหรับขับเคลื่อนภายในโมดูลที่แนะนำไว้ใน Datasheet .....	62
4.3 วงจรสำหรับขับเคลื่อนภายในโมดูล IGBT .....	62
4.4 แผนผังการต่อวงจรแปลงผันกำลังโดยใช้โมดูล IGBT.....	63
4.5 วงจรควบคุมที่มีการต่อตัวตรวจจับกระแสและแรงดัน.....	64
4.6 วงจรกำลังทั้งในฝั่ง DC-DC และ DC-AC.....	64
4.7 การจัดชุดวงจรทดลองต้นแบบที่ใช้ในการทดลองจริง.....	65
4.8 ผลการทดลองในโหมด boost ของวงจร DC-DC.....	65
4.9 ผลการทดลองในโหมด buck ของวงจร DC-DC .....	66
4.10 แรงดันจากรวงจร DC-AC เทียบกับแรงดันกริด .....	66
4.11 แผนผังระบบไมโครกริดที่ใช้ในการทดลอง .....	67
4.12 การจัดชุดทดลองระบบไมโครกริดสาธิตที่มีการเชื่อมต่อบatteryกับพลังงาน .....	68
4.13 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ .....	69

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโลกได้มีการวิวัฒนาการไปอย่างก้าวกระโดด ทั้งการเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคม การขยายตัวของประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความต้องการใช้ไฟฟ้ามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับในอดีตที่ผ่านมา ทำให้ต้องมีการสร้างโรงไฟฟ้าเพื่อให้มีการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นนี้ แต่เนื่องด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เป็นแหล่งเชื้อเพลิงหลักในการผลิตไฟฟ้ามีปริมาณลดน้อยลงเรื่อย ๆ สวนทางกับความต้องการที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งการตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้พลังงานหมุนเวียนได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้ว กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนจะมีปริมาณการผลิตที่ไม่แน่นอนหรือมีความผันผวนเป็นอย่างมาก เมื่อการผลิตกำลังไฟฟ้ามีความผันผวนก็จะทำให้ความถี่ของระบบมีความผันผวนไปด้วย ซึ่งทำให้คุณภาพทางไฟฟ้าและเสถียรภาพของระบบแยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบขนาดเล็กที่ประกอบไปด้วยแหล่งพลังงานหมุนเวียนจำนวนมากอย่างไม่โครกริดแบบแยกอิสระ ซึ่งเป็นระบบที่การผลิตส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับกำลังขาออกของแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียน จึงต้องมีการลดความผันผวนทางความถี่ของระบบเพื่อปรับปรุงคุณภาพและเสถียรภาพของระบบ การใช้แหล่งกักเก็บพลังงาน (Energy storage) เป็นหนึ่งในแนวทางที่จะช่วยลดความผันผวนของความถี่และยังช่วยเสริมคุณภาพทางไฟฟ้าและเสถียรภาพของระบบขึ้นได้อีกด้วย [1-2] นอกจากนี้ยังสามารถเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้เป็นพลังงานสำรองให้กับระบบไว้ใช้ยามฉุกเฉินได้อีกด้วย

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ระบบไมโครกริดเป็นระบบไฟฟ้ารูปแบบใหม่ที่สามารถปฏิบัติการในโหมดแยกอิสระได้ ซึ่งจำเป็นต้องมีระบบควบคุมที่มีความฉลาด เพื่อให้สามารถรักษาเสถียรภาพและคุณภาพของไฟฟ้าในขณะที่อยู่ในโหมดนี้ได้เหมาะสม การสร้างระบบควบคุมที่เหมาะสมจึงเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องทำให้ในการทำงานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ แก้ปัญหาต่าง ๆ ได้อย่างอย่างทันท่วงที ในอนาคตระบบไมโครกริดอาจเข้ามามีบทบาทในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการทำงานและผลกระทบของการใช้ไฟฟ้าในระบบไมโครกริด เพื่อให้สามารถรับมือกับการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของระบบการผลิตไฟฟ้าแบบใหม่นี้ได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังเป็นการเตรียมการสำหรับการผนวก  
รวมระบบเข้าสู่ระบบ

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ออกแบบและสร้างระบบกักเก็บพลังงานสำหรับใช้งานร่วมกับระบบไมโครกริดขนาดเล็ก  
เล็กสำหรับการทดลอง เพื่อลดความผันผวนทางความถี่ของระบบไมโครกริด รวมถึงพัฒนาระบบจัด  
การพลังงานที่เหมาะสมเพื่อใช้รักษาเสถียรภาพทางพลังงานของระบบไมโครกริดขนาดเล็ก  
สำหรับการทดลองนี้ให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาหลักการและปัญหาของระบบไมโครกริด
2. ศึกษาแนวทางและวิธีการแก้ปัญหาที่พบ
3. ทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM
4. จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์สร้างระบบกักเก็บพลังงาน
5. สร้างวงจรแปลงผันกำลังสำหรับเชื่อมต่อแหล่งกักเก็บพลังงานเข้าสู่ระบบไมโครกริด
6. ทดสอบและพัฒนาระบบควบคุมระบบกักเก็บพลังงานให้สามารถทำงานได้อย่างมี  
ประสิทธิภาพ
7. เชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานเข้าไปยังระบบไมโครกริดขนาดเล็กสำหรับการทดลอง
8. ทดสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดสำหรับการนำระบบกักเก็บพลังงานเชื่อมต่อเข้าไปยังระบบ  
ไมโครกริด
9. รวบรวมข้อมูลและสรุปผลการทดลอง
10. เรียบเรียงและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

เข้าใจหลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังในการเชื่อมต่อแหล่งกักเก็บพลังงานแบบเตอร์รี่  
เข้าสู่ระบบไมโครกริด รวมถึงการออกแบบระบบควบคุมระบบกักเก็บพลังงานในระบบไมโครกริดให้

สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานให้แก่ผู้วิจัยอื่น ๆ และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นงานวิจัยใหม่ได้

## 1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบไปด้วย เนื้อหาทั้งหมด 6 บท แต่ละบทจะประกอบไปด้วยเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ความเป็นมาของงานวิจัย, ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์, ขอบเขตงานวิจัย, ขั้นตอนการศึกษา, และประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับระบบไมโครกริด, ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบกักเก็บพลังงาน, วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบเฟสเดียวและการควบคุมต่าง ๆ ที่ใช้ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้า

บทที่ 3 การจำลองผลและการออกแบบ จะกล่าวถึง การออกแบบโดยใช้โปรแกรมจำลองผล ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างระบบควบคุมสำหรับลดความผันผวนทางความถี่ และการจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อสร้างต้นแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อระบบไมโครกริด

บทที่ 4 จะกล่าวถึง การสร้างวงจรแปลงผันกำลังและผลการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังที่เชื่อมต่อแบตเตอรี่เข้าไปยังไมโครกริด ว่าสามารถควบคุมให้ลดความผันผวนทางความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าวิจัย สรุปผลการจำลองและทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยนี้

ภาคผนวก ก. โปรแกรมบน DSP ใน code composer studio ที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อเข้าไปยังระบบไมโครกริด

ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

## ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

### 2.1 ระบบไมโครกริด

#### 2.1.1 ความหมายและความเป็นมาของไมโครกริด

กริด (Grid) หมายถึง ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังซึ่งในปัจจุบันมีระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดระบบกริดที่เป็นขนาดใหญ่จนกลายเป็นโครงข่าย ด้วยระบบที่ใช้เทคโนโลยีเดิมนี้นำมาซึ่งความสูญเสีย (Loss) ขึ้นในระบบไฟฟ้ามาก เนื่องจากต้องส่งไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าที่มีระยะทางไกลจากผู้ใช้ไฟ และใช้เวลาในการแก้กระแสไฟฟ้าขัดข้องนาน เนื่องจากไม่รู้ตำแหน่งที่เกิดเหตุผิดปกติ (Fault) จากสาเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดแนวคิดต่าง ๆ เพื่อมาพัฒนาระบบกริดให้ดียิ่งขึ้น โดยการนำเทคโนโลยีหลายๆอย่างมาทำงานร่วมกัน ก่อให้เกิดระบบต่าง ๆ เช่น ระบบไมโครกริด

ระบบไมโครกริด คือ การเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานทดแทน เป็นระบบสายส่งแรงดันต่ำเพื่อจ่ายให้แก่กลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ไม่ไกลจากกัน โดยมีหลักการสำคัญของการผลิตไฟฟ้าในระบบไมโครกริด คือการสร้างสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากดังกล่าวข้างต้น ให้พอดีกับภาระทางไฟฟ้าภายในไมโครกริด ขณะเดียวกันไมโครกริดยังสามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในโครงข่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่เดิมได้ด้วย ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังหลัก (Grid) ไมโครกริดจะสามารถปลดตัวเองออกจากระบบไฟฟ้ากำลังหลัก และทำงานในแบบผลิตและส่งกำลังไฟฟ้าภายในพื้นที่ (Island) ได้อย่างอัตโนมัติและสามารถเชื่อมต่อกลับเข้าไปกับระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้เมื่อความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้รับการแก้ไข การเพิ่มขึ้นของไมโครกริดจะไม่ทำให้เกิดปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลังหลัก ในขณะเดียวกันก็ช่วยเสริมความมั่นคงของการส่งจ่ายไฟฟ้า รวมทั้งความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้า ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตไฟฟ้าก็น้อยลงจากการใช้พลังงานหมุนเวียน [1]

แนวคิดไมโครกริดจะถูกมองเป็นระบบควบคุมหน่วยหนึ่งจากระบบไฟฟ้ากำลังหลักและจะไม่สร้างปัญหาเช่นการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า การแกว่งไกวของความถี่ไฟฟ้า เป็นต้น ให้กับระบบไฟฟ้ากำลังหลัก ไมโครกริดที่มีคุณสมบัตินี้ถูกนิยามให้เป็น พลเมืองดี (Good Citizen) ของระบบกำลังไฟฟ้าหลัก ในขณะเดียวกันไมโครกริดยังสามารถช่วยสนับสนุนการทำงานของระบบไฟฟ้า

กำลังหลักได้ เช่น การให้บริการคุณภาพไฟฟ้าชั้นเยี่ยม การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารทศวรรษวิสาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครกริดที่มีคุณสมบัตินี้ถูกนิยามให้เป็นพลเมืองตัวอย่าง (Model Citizen) ของระบบไฟฟ้ากำลังหลัก แนวความคิดไมโครกริดนี้ถูกให้ความสำคัญอย่างมากในหลายประเทศ

### 2.1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์

เป็นการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียน เช่น ก๊าซธรรมชาติ พลังงานลม เซลล์แสงอาทิตย์ ระบบไมโครเทอร์ไบน์ เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ต่อเครือข่ายการจำหน่าย การผลิตไฟฟ้าแบบศูนย์กระจาย หรือ Distributed Generation (DG) และแหล่งพลังงานเหล่านี้จะเรียกว่า แหล่งพลังงานแบบกระจายศูนย์ หรือ Distributed Energy Resources (DER) จากการศึกษาและวิจัยได้ข้อสรุปลักษณะทั่วไปของ DG ได้ดังต่อไปนี้

1. ไม่เป็นศูนย์กลางของระบบไฟฟ้าหรือศูนย์กลางการจำหน่ายไฟฟ้า
2. มีขนาดเล็กกว่า 50 เมกะวัตต์
3. แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์มักจะเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่มีขนาดของแรงดัน 230/415 V ถึง 145 kV

### 2.1.3 ข้อดีของระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์

1. ความจำเป็นในความต้องการของพลังงานทั่วไปที่เพิ่มขึ้นทำให้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าลดลง ด้วยเหตุนี้เราจึงต้องหาพลังงานทดแทนและหมุนเวียนมาเพื่อเป็นพลังงานสำรอง
2. ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เป็นพลังงานสะอาดที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก
3. มีการใช้ประโยชน์จากความร้อนเสียของโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานทั้งหมดของโรงจักรไฟฟ้า
4. เนื่องจากระยะทางจากโหนดถึงแหล่งจ่ายไม่ไกลกันจึงทำให้ง่ายต่อการค้นหาและช่วยลดในเรื่องของการก่อสร้างและเงินทุน อีกทั้งยังช่วยลดการสูญเสียในการส่งจ่าย
5. การดำเนินงานในโหมดแยกอิสระ (Stand-alone) และโหมดเชื่อมต่อกับกริด (Grid-connect) ของ DER จะช่วยในการขยายการผลิตและนับเป็นการช่วยปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าและความน่าเชื่อถือโดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 โครงข่ายระบบจำหน่ายแบบแอกทีฟ

โครงข่ายระบบแบบจำหน่ายที่ไม่มี DG นั้นจะเรียกว่าเป็นโครงข่ายระบบจำหน่ายแบบพาสซีฟ และจะกลายเป็นระบบแบบแอกทีฟเมื่อมีหน่วย DG เพิ่มเข้าไปในระบบจำหน่าย จึงกลายเป็นการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสองทิศทาง โครงข่ายระบบจำหน่ายแบบแอกทีฟจำเป็นที่จะต้องมีการรวมเอาความยืดหยุ่นและความชาญฉลาดในการควบคุมเข้าไว้ด้วยกัน และเพื่อเป็นการควบคุมพลังงานให้เป็นพลังงานที่สะอาดจากการผลิตของ DER ที่เป็นพลังงานหมุนเวียน ดังนั้นโครงข่ายระบบการจำหน่ายแบบแอกทีฟจึงควรจะนำมาใช้ในการปฏิบัติงานของโครงข่ายระบบจำหน่ายในอนาคตซึ่งจะนำไปสู่การเป็นกริดอัจฉริยะ หรือ สมาร์ทกริด (Smart Grid) หรือโครงข่ายไมโครกริด (Microgrid) ดังนั้นในการที่จะใช้วิวัฒนาการโครงข่ายระบบการจำหน่ายแบบแอกทีฟเพื่อการควบคุมการดำเนินงานที่มีความยืดหยุ่นและสั่งการอย่างชาญฉลาด การวิจัยที่ครอบคลุมจึงเป็นสิ่งจำเป็นโดยการวิจัยจะมุ่งเน้นในประเด็นเหล่านี้เป็นหลัก

- การควบคุมพื้นที่บริเวณกว้าง
- ความสามารถในการปรับตัวสำหรับการป้องกันและควบคุม
- อุปกรณ์ในการจัดการโครงข่าย
- การจำลองระบบโครงข่ายแบบเวลาจริง
- เซ็นเซอร์และเครื่องมือวัดระดับสูง
- การสื่อสารอย่างกว้างขวางในระบบการจำหน่าย
- กระบวนการคิดและวิเคราะห์ด้วยวิธีการอันชาญฉลาด

### 2.1.5 กรอบความคิดของไมโครกริด

เป็นระบบแรงดันต่ำโดยที่โครงข่ายการรองรับการจ่ายโหลดด้วยระบบการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (Combined Heat and Power : CHP) ได้ถูกออกแบบมาเพื่อผลิตไฟฟ้าและโหลดความร้อนสำหรับพื้นที่ขนาดเล็ก โดยส่วนใหญ่แล้วไมโครกริดจะเป็นโครงข่ายระบบจำหน่ายแบบแอกทีฟเสียส่วนใหญ่ทั้งนี้เนื่องจากแนวคิดของไมโครกริดนั้นได้รวมเอาระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ (DG) และโหลดที่แตกต่างกัน ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าในการจำหน่ายเข้าไว้ด้วยกัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือแหล่งจ่ายขนาดเล็กที่ใช้ในระบบไมโครกริดส่วนมากเป็นพลังงานหมุนเวียนและพลังงานทดแทน

ซึ่งแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ณ จุดใช้งาน (DER) จะรวมเอาแหล่งพลังงานทั้ง 2 เข้าด้วยกันเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าที่แรงดันของระบบจำหน่าย

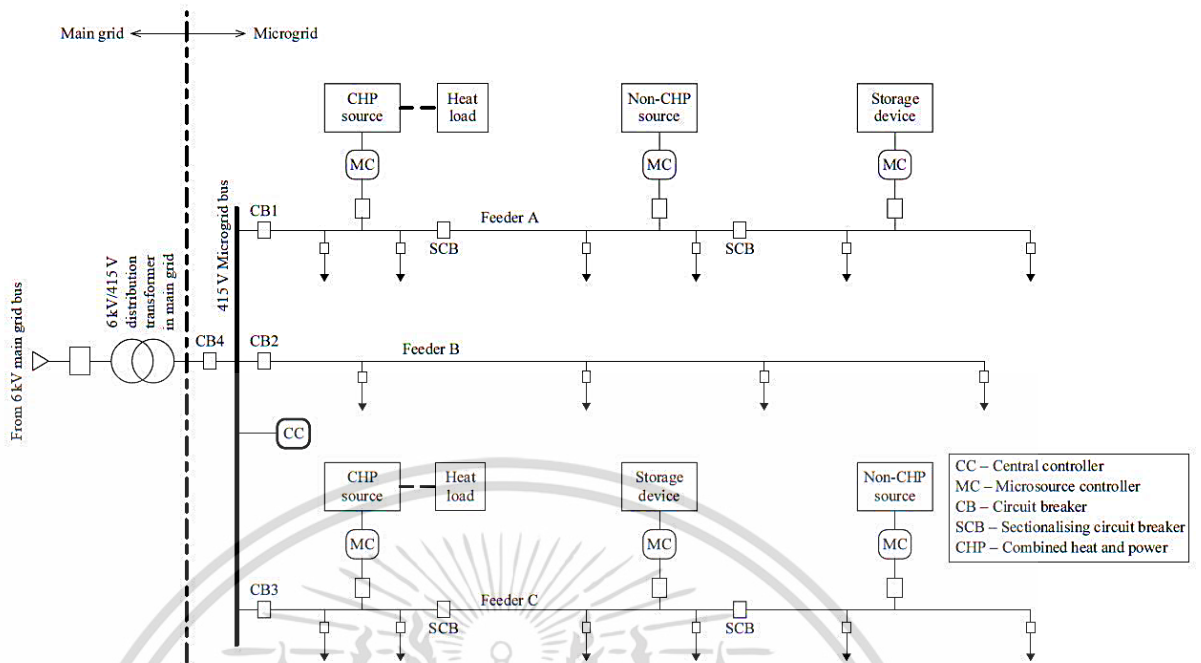
ในมุมมองของกริดหลัก (Main Grid) สามารถมองไมโครกริดรวมเป็นภาระทางไฟฟ้าได้เลย ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการควบคุม สามารถรักษาระดับแรงดันโดยไม่ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ และความปลอดภัยในการใช้ประโยชน์จากกำลังไฟฟ้า

ในมุมมองจากผู้บริโภค ไมโครกริดนั้นจะมีประโยชน์มากในด้านการรองรับช่วงไฟดับ ปรับปรุงความน่าเชื่อถือในระบบไฟฟ้า ช่วยลดกำลังสูญเสียบนสายส่งและมีการรองรับระดับแรงดันภายในพื้นที่อีกด้วย

ในมุมมองทางด้านสิ่งแวดล้อม ไมโครกริดนั้นจะลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและภาวะโลกร้อนผ่านการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีการลดคาร์บอนไดออกไซด์

### 2.1.6 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของไมโครกริด และหน้าที่ของแต่ละส่วนประกอบ

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของไมโครกริดเป็นไปตามรูปที่ 2.1 จะประกอบด้วยภาระทางไฟฟ้าหรือความร้อนรวมทั้งแหล่งจ่ายขนาดเล็ก (Micro source) โดยมีการเชื่อมต่อในโครงข่ายระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะเห็นว่าภาระจะถูกวางไว้ใกล้กับแหล่งจ่ายเพื่อลดการสูญเสียโดยเฉพาะภาระทางความร้อน (CHP source)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของไมโครกริด

ไมโครกริดนั้นจะเชื่อมต่อกับกริดหลัก (Main Grid) แรงดันระดับกลางผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งเป็นจุดต่อร่วม (Point of Common Coupling : PCC) หรือ CB4 ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมต่อและตัดตอนไมโครกริด ทั้งหมดจากกริดหลักตามโหมดที่เลือกการดำเนินงานนั้นคือ ถ้า CB4 ปิดแสดงว่าไมโครกริดทำงานอยู่ในโหมดเชื่อมต่อกับกริด (Grid-connected) แต่ถ้า CB4 เปิดแสดงว่าไมโครกริดทำงานอยู่ในโหมดแยกอิสระ (Stand-alone)

ไมโครกริดดำเนินการในสองโหมด : (1) เชื่อมต่อกับกริด และ (2) ในโหมดแยกอิสระ โดยในโหมดเชื่อมต่อกับกริดนั้น ไมโครกริดจะยังคงเชื่อมต่อกับกริดหลักทั้งหมดหรือบางส่วนและนำเข้าหรือส่งกำลังไปยังกริดหลัก ในกรณีที่เกิดสัญญาณรบกวนในกริดหลัก ไมโครกริดจะสลับไปยังโหมดแยกอิสระ ในขณะที่ยังคงจ่ายกำลังให้กับภาระที่สำคัญเหมือนเดิม

การทำงานจะต้องผ่านตัวควบคุมซึ่งทำงานร่วมกันผ่านตัวควบคุมแหล่งจ่าย (MC) และตัวควบคุมส่วนกลาง(CC)

Energy Management Module หรือ EMM จะทำการส่งค่าของจุดอ้างอิงของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน แรงดันไฟฟ้าละความถี่ไปยังแต่ละ MC เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงในการทำงาน

Protection Co-ordination Module หรือ PCM จะทำการตอบสนองต่อความผิดปกติในไมโครกริด รวมถึงกริดหลักและสภาวะหายไปของกริด

### 2.1.7 ตัวควบคุมในระบบไมโครกริด

ในระบบไมโครกริดจะมีตัวควบคุมหลักๆ อยู่ 2 ชนิดคือตัวควบคุมแหล่งจ่ายและตัวควบคุมส่วนกลาง

#### 1. ตัวควบคุมแหล่งจ่าย (Micro Source Controller: MC)

เงื่อนไขการทำงานคือ (i) การเพิ่มแหล่งจ่ายตัวใหม่เข้าไปในระบบโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเดิม (ii) ไมโครกริดสามารถสับ/ปลด โดยตัวเองได้อย่างรวดเร็ว (iii) สามารถควบคุมกำลังจริงและกำลังเสมือนได้อิสระ (iv) สามารถแก้ไขแรงดันตก (Voltage Sag) และความไม่สมดุลของระบบได้ (v) สามารถจัดการกับความผิดปกติต่าง ๆ ได้ (vi) ไมโครกริดสามารถตอบสนองความต้องการของพลศาสตร์ของภาระได้

MC จะถูกออกแบบเพื่อติดต่อสื่อสารกับ CC และกระทำตามคำสั่งของตัวมันเอง มันสามารถแทนที่คำสั่งของ CC ที่แหล่งจ่ายไม่สามารถยอมรับได้

ฟังก์ชันการควบคุมของตัวควบคุมแหล่งจ่าย ประกอบด้วย

- การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน (Active and Reactive Power Control)
- การควบคุมแรงดัน (Voltage Control)
- ความต้องการในการจัดเก็บพลังงานสำหรับการติดตามภาระอย่างรวดเร็ว
- การจัดสรรภาระผ่านการควบคุมกำลังและความถี่ (P-f Control)

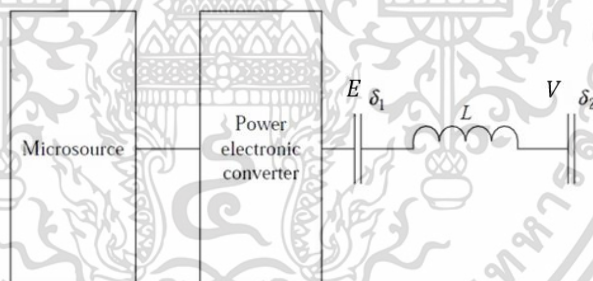
การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน (Active and Reactive Power Control)

แหล่งจ่ายขนาดเล็กที่เรียกว่า Micro Source อาจเป็นแหล่งจ่ายแหล่งจ่ายกระแสตรงอย่างเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Cell) เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) อุปกรณ์สำรองพลังงาน (Storage Battery) สำหรับแหล่งจ่ายกระแสตรงนั้นจะถูกแปลงเป็นกระแสสลับโดยตรงที่ P-f (50/60 Hz) แต่ขณะที่กระแสสลับซึ่งมีความถี่ที่ไม่เป็นที่แน่นอนจะถูกแปลงเป็นกระแสตรงก่อนและจึงแปลงกลับเป็นกระแสสลับอีกครั้งที่ความถี่ปกติด้วยอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทั้งสองอย่างต่างก็ต้องใช้ DC/AC Converter

ในรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทั่วไปของ MC ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายขนาดเล็ก (Micro Source) และอินเวอร์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic Converter) โดย อินเวอร์เตอร์ของแหล่งจ่ายแรงดัน ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์จะควบคุมขนาดแรงดัน (V) และ มุมเฟส ( $\delta_2$ ) ของแรงดันขาออก ( $V\angle\delta_2$ ) ผ่านค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่ารีแอกแตนซ์ X โดยปกติ ( $E\angle\delta_1$ ) จะนำหน้า ( $V\angle\delta_2$ ) อยู่ที่มุมกำลัง ( $\delta$ ) โดยที่ ( $\delta = \delta_1 - \delta_2$ ) การไหลของกำลังไฟฟ้าจริง (P) จะถูกควบคุมโดยการควบคุม ( $\delta$ ) ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือน จะถูกควบคุมโดยการควบคุม V ตัวควบคุมจะอยู่บนพื้นฐานของการควบคุมลูปปิด (Feedback Loop) ของกำลังขาออก P และ ขนาดแรงดันบัส E ซึ่งเป็นไปตาม สมการที่ 2.1 และ สมการที่ 2.2 ตามลำดับ ดังนี้

$$P = \frac{3EV}{2X} \sin(\delta) \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{3V}{2X} (E \cos(\delta) - V) \quad (2.2)$$



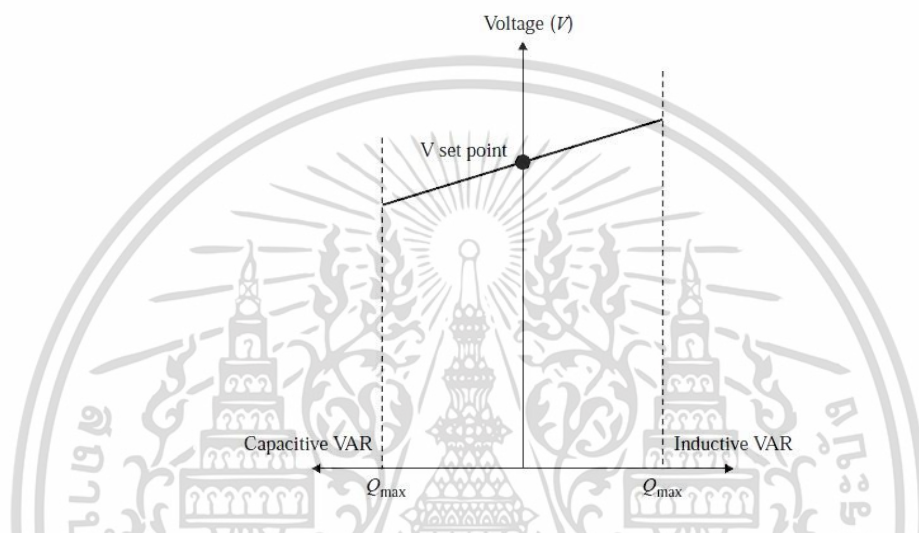
รูปที่ 2.2 รูปแบบทั่วไปของ MC

#### การควบคุมแรงดัน (Voltage Control)

นอกจากการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) แล้ว การควบคุมแรงดันที่บัสของไมโครกริดจะมีความสำคัญต่อเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของไมโครกริดอีกด้วย ไมโครกริดที่มีแหล่งจ่ายจำนวนมาก อาจมีปัญหาในเรื่องการแกว่งของกำลังเสมือน (Reactive Power) ซึ่งเกิดจากไม่มีการควบคุมแรงดันที่บัสให้เหมาะสม ฟังก์ชันควบคุมแรงดันของ MC จะ

จัดการปัญหากระแสไหลวนระหว่างไมโครกริดให้บรรเทาลง ในส่วนของไมโครกริดนั้นยังมีปัญหาค่าค่อนข้างชัดเจน เนื่องจากสายป้อนมักเป็นจุดกระจายรัศมีซึ่งมีอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายต่ำ

บางครั้งกระแสไหลวนเหล่านี้อาจทำให้กระแสของแหล่งจ่ายมีค่าเกินพิกัด แม้ว่าจุดอ้างอิงแรงดันจะมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย กระแสไหลวนเหล่านี้สามารถถูกควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมรูปแรงดันรีแอคทีฟ (Voltage-Reactive Power (V-Q) Droop Controller) กับคุณลักษณะการลดตัวซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปสำหรับ V-Q Droop Controller

การควบคุมแรงดันที่บัสของไมโครกริดนั้นจำเป็นจะต่อภาพรวมของเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของไมโครกริด ไมโครกริดที่มีแหล่งจ่ายจำนวนมากอาจมีปัญหาให้เรื่องการแกว่งของกำลังเสมือน (Reactive Power) หากปราศจากการควบคุมแรงดันที่เหมาะสม ฟังก์ชันควบคุมแรงดันของ Micro Source จะจัดการปัญหากระแสไหลวน (Circulating Reactive Current) ระหว่างสองไมโครกริดให้น้อยลง ในไมโครกริดกระแสไหลวนเหล่านี้สามารถถูกควบคุมโดยวิธี (Voltage Reactive Power (V-Q) Droop Controller) ดังกราฟแสดงคุณลักษณะลดลงของแรงดันซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3

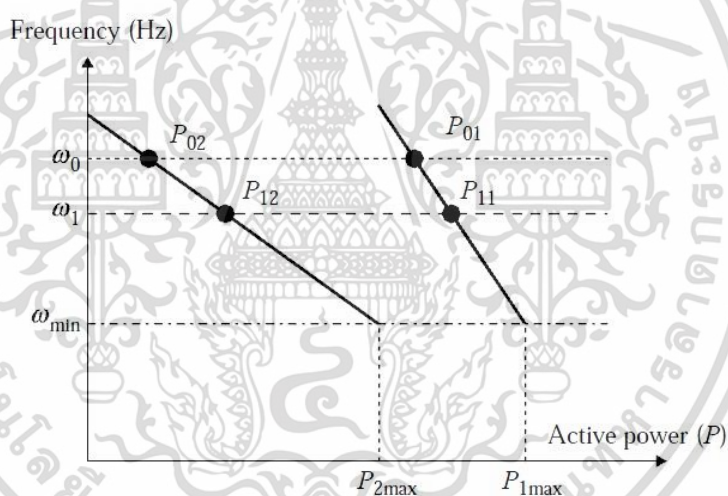
#### ข้อกำหนดในการสำรองพลังงานเพื่อสมดุลโหลด

สำหรับการทำงานของไมโครกริดโหมดการเชื่อมต่อกิตติความสมดุลของกำลังเริ่มต้น ขณะที่มีการต่อภาระเพิ่มเข้ามาใหม่จะได้รับการดูแลโดยความเฉื่อยที่มีมากของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่สำหรับการดำเนินงานในโหมดแยกอิสระ ไมโครกริดจะต้องมีการรักษาสมดุลของกำลังเริ่มต้นโดยการใช้

อุปกรณ์จัดเก็บสำรองพลังงานที่มีประสิทธิภาพพอเป็นความเชื่อใจในระบบไมโครกริด อุปกรณ์สำรองพลังงานกระแสตรงจะถูกเชื่อมต่อที่บัสกระแสตรง (DC bus) ของ แหล่งจ่ายขณะที่อุปกรณ์สำรองพลังงานกระแสสลับจะถูกเชื่อมต่อโดยตรงที่บัสของไมโครกริด ดังนั้น MC จะสร้างความมั่นใจในการใช้อุปกรณ์สำรองพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการติดตามโหลดอย่างรวดเร็ว

#### การจัดสรรภาระผ่านการควบคุมกำลังและความถี่ (P-f Control)

ตัวควบคุมไมโครกริดต้องทำให้แน่ใจว่าเกิดความเรียบและเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติจาก โหมดเชื่อมต่องริดเป็นโหมดแยกอิสระ ซึ่งหลักการนี้จะมีความคล้ายกับการดำเนินการของระบบสำรองไฟฟ้า (Uninterrupted Power Supply : UPS) โดยในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโหมดแยกอิสระนั้น MC ของแต่ละแหล่งจ่าย จะใช้การควบคุมกำลังและความถี่ เพื่อเปลี่ยนจุดที่ดำเนินการ เพื่อให้เกิดความสมดุลของกำลังไฟฟ้าเมื่อปรับเปลี่ยนโหมดใหม่ ตัวควบคุมจะทำการดำเนินงานด้วยตนเองหลังจากการติดตามโหลดโดยไม่ต้องรอคำสั่งจาก CC หรือ MC ตัวอื่น รูปที่ 2.4 แสดงคุณลักษณะของกำลังและความถี่ที่ใช้ใน MC สำหรับการควบคุมกำลังและความถี่ (P-f Control)



รูปที่ 2.4 คุณลักษณะรูปของกำลังจริงเทียบกับความถี่

ในโหมดแยกอิสระโหลดของไมโครกริดจะได้รับพลังงานจากทั้งกริดหลักและจาก แหล่งจ่าย ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้บริโภค เมื่อแหล่งจ่ายจากกริดหลักเกิดการหยุดชะงัก (Interrupt) เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ ไมโครกริดจะสับเปลี่ยนเป็นโหมดแยกอิสระ ในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลง โหมดการทำงานมุมเฟสของแรงดันที่แหล่งจ่ายจะเปลี่ยนแปลงตาม นำไปสู่เกิดการตกของกำลังไฟฟ้า ขาออกได้อย่างชัดเจน ทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลง โดยในกรณีนี้แหล่งจ่ายแต่ละตัวจะมีการจัดสรร ภาระเสียใหม่โดยไม่มีการส่งกำลังไฟฟ้ามาจาก CC ยกตัวอย่างเช่น กำหนดให้ แหล่งจ่าย 2 แหล่ง

ดำเนินการที่ความถี่ปกติต่ำสุดที่ความจุ  $P_{1\max}$  และ  $P_{2\max}$  ในโหมดเชื่อมต่อกับกริด นั้นจะทำงานที่ความถี่พื้นฐานในการส่งกำลัง  $P_{01}$  และ  $P_{02}$  ตามลำดับ เมื่อความต้องการโหลดเปลี่ยนไปแหล่งจ่ายจะทำงานที่ความถี่ที่แตกต่างอันเป็นเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของมุมกำลังและความถี่ในการทำงานที่ลดลงจากปกติกับสัดส่วนความแตกต่างของภาระ ซึ่งจะเกิดเป็นคุณลักษณะของกำลังกับความถี่ (P-F) ดังรูปที่ 2.4 เมื่อความถี่ในไมโครกริดลดลงแล้ว ดังนั้น MC ก็ต้องรวบรวมฟังก์ชันเพื่อฟื้นฟูการทำงานที่ความถี่ปกติกับการแบ่งสัดส่วนโหลดที่เหมาะสมและควบคุมความถี่ไม่ให้เกินช่วง  $\pm 5\%$

## 2. ตัวควบคุมส่วนกลาง (Central Controller: CC)

CC มีอำนาจควบคุมผ่านโมดูลการจัดการพลังงานและโมดูลป้องกันในการทำงานร่วมกัน

### โมดูลการจัดการพลังงาน (Energy Management Module : EMM)

ประกอบด้วยฟังก์ชันการควบคุมต่าง ๆ สำหรับการควบคุมพลังงานในไมโครกริดได้อย่างเหมาะสม

#### ฟังก์ชันพื้นฐานในการควบคุมแหล่งจ่าย

EMM แบบพื้นฐานจะทำการหาจุดอ้างอิงของกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันของ MC ในขณะที่พื้นฐานควบคุมแหล่งจ่ายจะทำงานผ่าน MC เท่านั้น ค่าแรงดันอ้างอิงจะถูกเก็บในแถบที่ตั้งไว้เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในการรักษาระดับแรงดันในไมโครกริด

#### การควบคุมแรงดัน (Voltage Control)

โดยปกติโหลดและตัวประกอบกำลังในไมโครกริดจะถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนขนาดแรงดันและมุมเฟสของแหล่งจ่ายเพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนในการควบคุม EMM การควบคุมแรงดันและตัวประกอบกำลังของแหล่งจ่ายจะถูกบังคับผ่าน MC และไมผ่าน EMM ซึ่ง EMM จะทำเพียงแค่หาค่าแรงดันอ้างอิงไปยัง MC สำหรับบัสที่สำคัญบางบัสของไมโครกริด เมื่อสายป้อนในการจำหน่ายไม่ได้จ่ายโหลดเต็มพิกัดในไมโครกริด อาจมีแนวโน้มแรงดันเพิ่มขึ้นที่สายป้อน ในการหยุดการเพิ่มของแรงดันนั้น MC จะต้องคอยตรวจสอบแรงดันและจัดการป้อนค่ากลับไปให้ EMM จากนั้น EMM จะนำค่าแรงดันอ้างอิงไปยัง MC เพื่อปรับให้ได้แรงดันที่ต้องการ เป้าหมายของวิธีการควบคุมเช่นนี้คือ เพื่อควบคุมให้ภาระทำงานที่เป็นค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1 (Unity p.f.) และควบคุมให้แรงดันไม่ใช้เกินช่วง  $\pm 5\%$

#### การควบคุมตัวประกอบกำลัง (Power Factor Control)

ตัวประกอบกำลังจึงขึ้นอยู่กับโหลด MC ทุกตัวจะมีการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง พร้อมคุณสมบัติฟังก์ชันการติดตามโหลด อย่างไรก็ตามสามารถนำเอาอิเล็กทรอนิกส์กำลังของแหล่งจ่ายบางตัวซึ่งอาจประกอบด้วยตัวควบคุมตัวประกอบกำลังมาควบคุมมุมเฟสของกระแสและลดฮาร์มอนิกส์

ให้น้อยที่สุด คุณลักษณะการควบคุมตัวประกอบกำลังจะถูกจัดรวมไว้ใน MC ดังเช่นนั้นแล้ว จึงไม่ปรากฏคำสั่งใดๆ จาก EMM อีก ยกเว้นค่าแรงดันอ้างอิง

#### การควบคุมความเร็วต้นกำลัง (Prime Mover Speed Control)

คุณลักษณะนี้จะมีสำหรับแหล่งจ่ายที่มีการหมุนด้วยต้นกำลังเช่น กังหันแก๊สขนาดเล็ก (Micro Turbine) หรือ กังหันลม เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงโหลดของไมโครกริด ต้นกำลังของแหล่งจ่ายจะต้องปรับความเร็วให้สอดคล้องกับภาวะโหลดใหม่ ในที่นี้ต้นกำลังที่ความเร็วคงที่ควรจะเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าไป ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของต้นกำลังโดยประสิทธิภาพจะเป็นฟังก์ชันของเชื้อเพลิงที่ใช้และความเร็ว ดังนั้น การควบคุมความเร็วของต้นกำลังควรทำให้เกิดความมั่นใจว่าจะทำให้แหล่งจ่ายเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ในการออกแบบเบื้องต้น การควบคุมนี้จะถูกบังคับผ่าน MC

#### การรักษาระดับความถี่ (Frequency Regulation)

ไมโครกริด สามารถผลิตกำลังได้ตามต้องการด้วยการช่วยจากระบบคอนเวอร์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์ (Power Electronic Converter) ของ MC ของมันเอง ในโหมดเชื่อมต่อกับกริด MC ไม่จำเป็นต้องสั่งการควบคุมกำลังและความถี่ (P-f Control) ผ่านคุณลักษณะดังรูปของกำลังและความถี่เพราะการเปลี่ยนความถี่จะสามารถดูแลตัวเองได้ ส่วนในโหมดแยกอิสระ MC จำเป็นต้องสั่งการควบคุมกำลังและความถี่ เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงโหลดในระบบความถี่คงที่ สำหรับทั้งสองโหมดการทำงาน EMM จะไม่รบกวนคุณลักษณะการควบคุมของ MC ใดๆก็ตาม EMM ก็ยังคงคอยตรวจสอบความถี่ในไมโครกริดตลอด และเมื่อใดที่ความถี่ตกและไม่ได้รับการฟื้นฟูจาก MC ภายในระยะเวลาที่กำหนด EMM จะทำการปลดโหลดอย่างรวดเร็วในยามฉุกเฉิน เพื่อให้เกิดความสมดุลของกำลังไฟฟ้าและทำให้เกิดเสถียรภาพในไมโครกริด

#### **2.1.8 แหล่งพลังงานในไมโครกริด**

เป็นแหล่งจ่ายขนาดเล็ก (Micro Sources) มีวัตถุประสงค์เพื่อรวมนำข้อดีของแหล่งกำเนิดพลังงานที่ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ต่ำและแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าร่วมกับความร้อน (Combined Heat and Power : CHP) ที่มีประสิทธิภาพสูง DER ที่ใช้ในไมโครกริดมีดังนี้

- Combined Heat and Power
- Wind Energy Conversion
- Solar Photovoltaic
- Small-scale Hydroelectric
- Storage Device

## 2.1.9 การจัดการและปัญหาการดำเนินงานของไมโครกริด

### ด้านสิ่งแวดล้อม

การลดการใช้เชื้อเพลิงแก๊สให้น้อยที่สุดและลดการแพร่ของ CO<sub>2</sub> ให้น้อยที่สุด ลดการกำหนดใช้ในวงจำกัดโดยควรจะเป็นกระบวนการเผาไหม้ในขั้นสุดท้ายเพื่อช่วยระบบทั้งหมด เมื่อแหล่งจ่ายงานอื่นทำงานได้ไม่เพียงพอ การใช้ไมโครกริดและแหล่งผลิตพลังงานย่อยควรช่วยกันเพิ่มความตระหนัก ของการใช้พลังงานไปในทางที่เหมาะสม

### ด้านการใช้งานและการเงิน

การลดค่าความสูญเสียทางกำลังไฟฟ้าในการส่งและการจำหน่ายกำลังไฟฟ้าและช่วยลดการลงทุนสร้างการขยายของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยจัดการใช้ทรัพย์สินในวงจำกัด

### ด้านคุณภาพของกำลังไฟฟ้า

มีความสอดคล้องกันอย่างดีระหว่างการจ่ายพลังงานไฟฟ้าพอเพียงต่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า การลดผลกระทบของ ค่ากำลังไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, ความถี่ในการใช้งานได้ เมื่อระบบส่งจ่ายและผลิตกำลังไฟฟ้าของส่วนกลางขาดหายไป

## 2.2 ระบบกักเก็บพลังงาน [2]

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) หมายถึง ระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นเพื่อให้สามารถกักเก็บไว้เพื่อการใช้งานในเวลาอื่นที่จำเป็นได้ โดยระบบกักเก็บพลังงานจะแปลงพลังงานที่กักเก็บไว้ในกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งเมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้า ทั้งนี้ ระบบกักเก็บพลังงานที่ดีจะต้องลดความสูญเสียในการแปลงรูปพลังงานให้เหลือน้อยที่สุด

ระบบกักเก็บพลังงานนั้นมีหลากหลายรูปแบบและมีตั้งแต่ขนาดเล็ก เช่น แบตเตอรี่โทรศัพท์ ไปจนถึงขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบสูบกลับ (Pumped-storage Hydropower Plant) เป็นต้น อุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่เห็นได้ชัดและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายคือแบตเตอรี่ ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานประเภทแบตเตอรี่นี้ได้มีการเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยมีการนำไปใช้งานร่วมกับระบบสมาร์ตกริดและรถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 ประโยชน์ของระบบกักเก็บพลังงาน

ระบบกักเก็บพลังงานมีความจำเป็นสำหรับระบบไฟฟ้าในอนาคตเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากระบบกักเก็บพลังงานสามารถส่งเสริมให้ระบบผลิตไฟฟ้ามีเสถียรภาพและรักษาคุณภาพไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ยังเป็นส่วนสนับสนุนการเปลี่ยนโหลดทางไฟฟ้าไปสู่ช่วงเวลาที่เหมาะสม (Load Shifting) โดยระดับความไวในการจ่ายไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้าหลักมีตั้งแต่ ระดับมิลลิวินาที (ms) ระดับวินาที (s) ระดับนาที่ ไปจนถึงระดับชั่วโมง ทั้งนี้ บทบาทและวัตถุประสงค์ของระบบกักเก็บพลังงานแต่ละประเภทนั้นแตกต่างกันออกไป

ระบบกักเก็บพลังงานสามารถถูกติดตั้งให้ทำงานร่วมกับองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า เช่น แหล่งผลิตไฟฟ้า (โดยเฉพาะจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน) สถานีไฟฟ้า (Substation) ระบบไมโครกริด ไปจนถึงผู้ใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ระบบกักเก็บพลังงานช่วยให้ระบบไฟฟ้าในทุกภาคส่วนมีเสถียรภาพ โดยจะทำหน้าที่เก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินในกรณีที่มีการผลิตไฟฟ้ามากกว่าความต้องการ ขณะนั้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีความต้องการไฟฟ้าสูงกว่าการผลิตไฟฟ้าในขณะนั้น ระบบกักเก็บพลังงานจะจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบ เป็นการรักษาคุณภาพไฟฟ้าและรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

จุดประสงค์หลักประการหนึ่งที่มีการนำระบบกักเก็บพลังงานมาใช้ในเทคโนโลยีระบบโครงข่ายสมาร์ตกริดก็คือ เพื่อรองรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนซึ่งมีความไม่แน่นอนสูง เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โรงไฟฟ้าพลังงานลม เป็นต้น โดยเมื่อมีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนได้เป็นจำนวนมากกว่าโหลดไฟฟ้าที่มีอยู่ ก็สามารถนำพลังงานส่วนเกินนั้นมาเก็บสะสมไว้ในระบบกักเก็บพลังงาน ต่อมา ในช่วงเวลาที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนลดน้อยลง เช่น ช่วงเวลาที่ไม่มีแดดหรือลม ระบบกักเก็บพลังงานจะจ่ายพลังงานที่กักเก็บไว้เข้าในระบบในรูปแบบพลังงานไฟฟ้า ส่งผลให้ระบบไฟฟ้ายังคงมีความมั่นคงและความเชื่อถือได้สูงแม้ในกรณีที่โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนไม่สามารถผลิตไฟฟ้าเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบได้

### 2.2.2 การใช้งานในระบบไมโครกริด

รูปแบบการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงานที่สำคัญ คือ ใช้งานในระบบไมโครกริด ระบบไมโครกริดสมัยใหม่จะมีการใช้พลังงานหมุนเวียน และรถยนต์ไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งของระบบ โดยระบบควบคุมไมโครกริดจะทำหน้าที่ควบคุมและบริหารจัดการให้การผลิตและการใช้พลังงานภายใน

ไมโครกริดเป็นไปอย่างสมดุลตลอดเวลา ซึ่งในทางเทคนิคแล้ว ระบบก็เก็บพลังงานถือเป็นส่วนหนึ่งของระบบไมโครกริดที่ขาดไม่ได้ เพื่อให้สามารถบริหารจัดการทรัพยากรพลังงานต่าง ๆ ในระบบไมโครกริดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

การเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานประเภทแบตเตอรี่เข้ากับระบบไมโครกริดสามารถทำหน้าที่ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังได้มากมาย เช่น กลยุทธ์ในการทำกำไรจากผลต่างของราคาค่าไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ (Arbitrage) การปรับเปลี่ยนความต้องการทางไฟฟ้า (Demand Shift) การรองรับการรวมแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเข้ามาในระบบ (Renewable Energy Integration) นอกจากนี้ ยังรวมไปถึงการทำหน้าที่เป็นระบบสนับสนุน (Ancillary Service) เช่น การรักษาความถี่ของระบบไฟฟ้า (Frequency Regulation) กำลังไฟสำรอง (Spinning Reserve) ช่วยรักษาความดันของระบบไฟฟ้า (Voltage Support) เป็นต้น

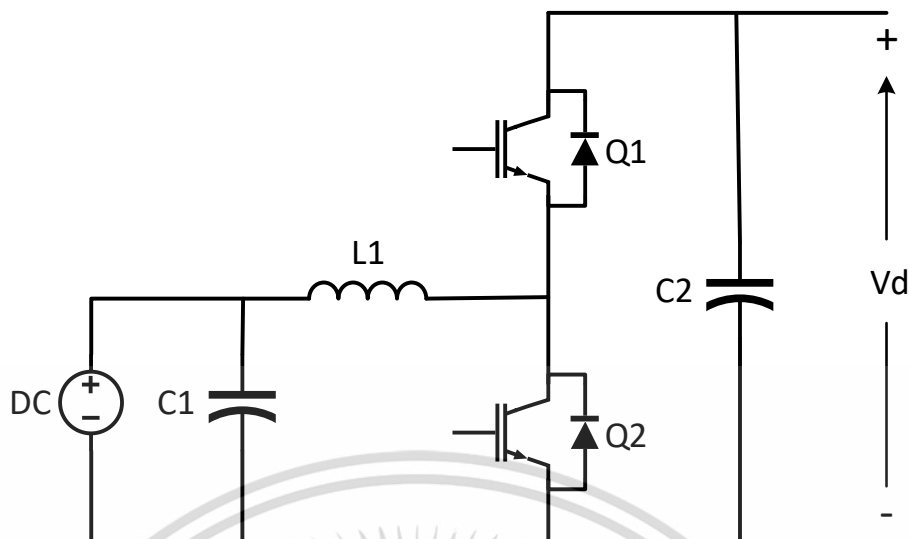
## 2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power converter) [2]

วงจรแปลงผันกำลัง คือวงจรที่ทำให้เกิดความเข้ากันได้ของวงจรกำลังทางฝั่งขาเข้าและขาออก เนื่องจากแบตเตอรี่มีการรับและจ่ายพลังงานในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่จะต้องนำไปเชื่อมต่อกับระบบไมโครกริดที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จึงต้องมีการแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความเข้ากันได้ระหว่างกัน โดยจะใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง และผ่านวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ เพื่อให้สามารถรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ได้

### 2.3.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC to DC converter) เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับกรณีที่ต้องการให้มีการไหลของกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง ตัวอย่างเช่นมีกำลังไฟฟ้าไหลเข้ามาเพื่อชาร์จแบตเตอรี่และไหลออกจากแบตเตอรี่เพื่อไปใช้งาน ซึ่งอาจจะประยุกต์ใช้ในพวงกรงไฟฟ้า, การเก็บและจ่ายพลังงานของโซลาร์เซลล์ เป็นต้น

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางประกอบไปด้วยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบควบคุมได้จำนวน 2 ตัวที่ต่อไดโอดขนานกันแบบกลับทิศอยู่ดังรูปที่ 2.5

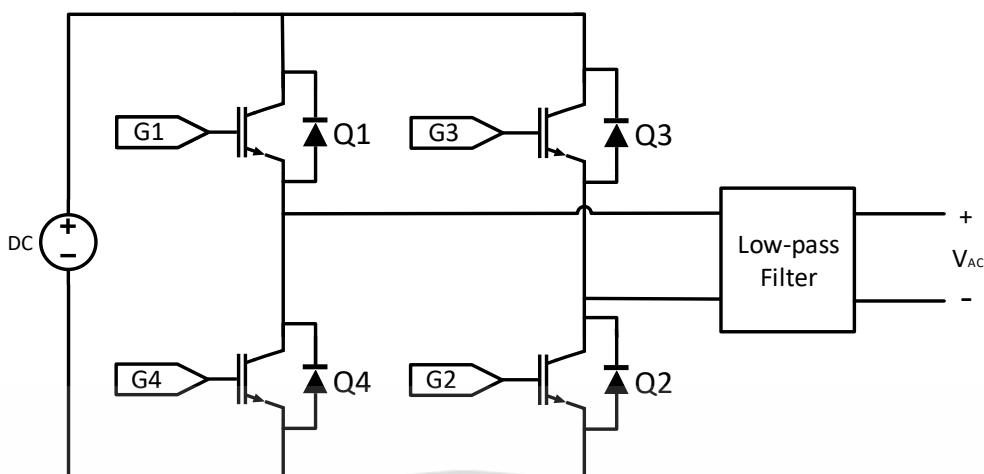


รูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

### 2.3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเฟสเดียว

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ (Inverter) เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสสลับ โดยใช้อุปกรณ์การสวิตชิงควบคุมการทำงาน ให้ได้ขนาดและความถี่ตามที่ต้องการ โดยแรงดันขาออกนั้นสามารถตั้งค่าให้คงที่หรือปรับค่าได้ตามต้องการที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง หรือเปลี่ยนความถี่ไปก็ได้ เหมาะแก่การนำไปใช้แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงอื่น เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ และอาจนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมมอเตอร์กระแสสลับได้อีกด้วย

โดยพื้นฐานแล้ว วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับจะประกอบด้วย อุปกรณ์สวิตชิงชนิดควบคุมได้และชุดวงจรควบคุมเพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิงนี้ให้วงจรแปลงผันกำลังทำงานได้เหมาะสมกับคุณสมบัติตามที่ต้องการ หลังจากนั้นก็จะนำไปผ่านวงจรกรองความถี่สูงออกไปเพื่อให้เหลือเฉพาะความถี่ต่ำ จึงจะสามารถได้รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เป็นรูปไซน์ที่ถูกต้อง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเฟสเดียว

### 2.2.2.1 SPWM (Sinusoidal pulse width modulation)

การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งให้สามารถสร้างแรงดันขาออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ได้ จะใช้สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular waveform) ซึ่งความถี่ในการสวิตซ์จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม เรียกว่า การสวิตซ์แบบพิสัยเบิวยูเอ็ม (Sinusoidal pulse width modulation : SPWM) โดยมีค่าตัวแปรที่สำคัญดังนี้

$V_{sin}$  คือ สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่นำมามอดดูเลต

$V_{tri}$  คือ สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่นำมามอดดูเลต

$\hat{V}_{sin}$  คือ ค่ายอดของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่นำมามอดดูเลต

$\hat{V}_{tri}$  คือ ค่ายอดของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่นำมามอดดูเลต

$\hat{V}_o$  คือ ค่ายอดของสัญญาณที่ถูกมอดดูเลต

$\hat{V}_{o,1}$  คือ ค่ายอดที่ความถี่หลักมูลของสัญญาณที่ถูกมอดดูเลต

$m_a$  คือ อัตราส่วนแอมพลิจูดของมอดดูเลชัน

$m_f$  คือ อัตราส่วนความถี่ของมอดดูเลชัน

$f_o$  คือ ความถี่มูลฐานของสัญญาณขาออกของอินเวอร์เตอร์

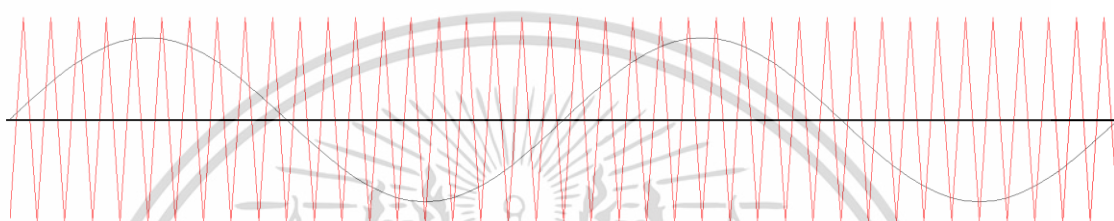
$f_s$  คือ ความถี่การสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์

โดยค่า  $m_a$ ,  $m_f$  สามารถหาได้จาก  $m_a = \hat{V}_{sin} / \hat{V}_{tri}$  และ  $m_f = f_s / f_o$  ตามลำดับ

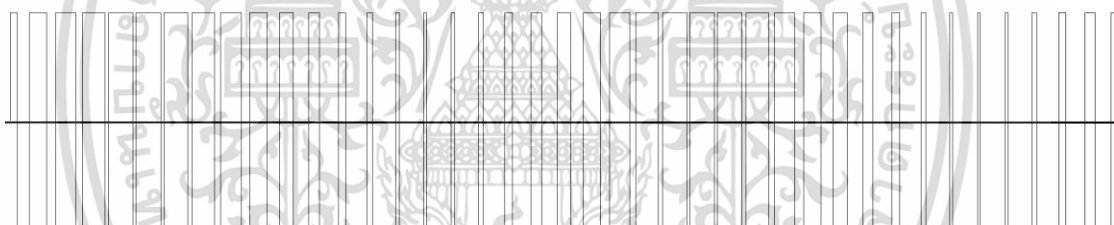
ซึ่งการควบคุมการสวิตซ์ซึ่งแรงดันด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มนี้ แบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ การสวิตซ์ซึ่งแรงดันแบบไบโพลาร์ และ การสวิตซ์ซึ่งแรงดันแบบยูนิโพลาร์

### 1. การสวิตซ์ซึ่งแรงดันแบบไบโพลาร์

การสวิตซ์ซึ่งแรงดันแบบไบโพลาร์ เป็นการควบคุมให้สวิตซ์แบบบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ๆ โดยสวิตซ์ S1, S2 จะถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลา และอีกคู่หนึ่งคือการทำงานของสวิตซ์ S3, S4 [3]



รูปที่ 2.7 สัญญาณไซน์เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อควบคุมสวิตซ์แบบไบโพลาร์

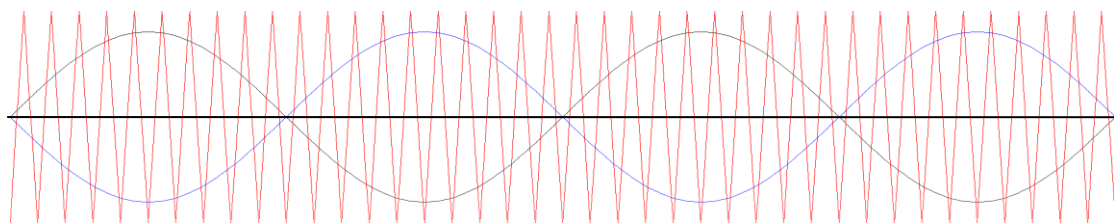


รูปที่ 2.8 สัญญาณแรงดันขาออกของการสวิตซ์ซึ่งแบบไบโพลาร์

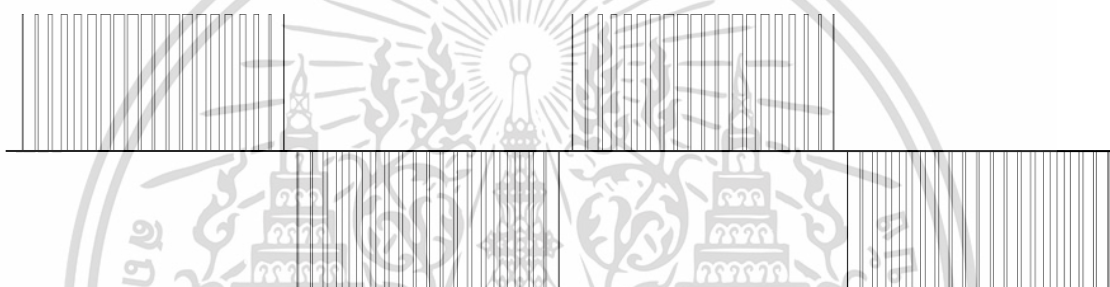
### 2. การสวิตซ์ซึ่งแรงดันแบบยูนิโพลาร์

การสวิตซ์ซึ่งแรงดันแบบยูนิโพลาร์ เป็นการสวิตซ์ซึ่งโดยแยกสัญญาณควบคุมระหว่าง S1, S4 และ S2, S3 ออกจากกัน โดยที่ S1, S4 จะถูกควบคุมโดย สัญญาณไซน์เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม หากค่าสัญญาณไซน์มีค่ามากกว่าสามเหลี่ยมจะทำให้ S1 นำกระแส S4 ไม่นำกระแสและหากค่าสัญญาณไซน์มีค่าน้อยกว่าสามเหลี่ยมจะทำให้ S1 ไม่นำกระแส S4 นำกระแส ส่วนที่ S2, S3 จะถูกควบคุมโดย สัญญาณไซน์ที่มูฟเฟสเคลื่อนไป  $180^\circ$  เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม หากค่าสัญญาณไซน์ที่มูฟเฟสเคลื่อนไป  $180^\circ$  มีค่ามากกว่าสามเหลี่ยมจะทำให้ S3 นำกระแส S2 ไม่

นำกระแสและหาค่าสัญญาณไซน์ที่มุมเฟสเคลื่อนไป  $180^\circ$  มีค่าน้อยกว่าสามเหลี่ยมจะทำให้ S3 ไม่นำกระแส S2 นำกระแส จึงทำให้ได้แรงดันขาออกมีค่าจากศูนย์ไปบวกและจากศูนย์ไปลบ [3]

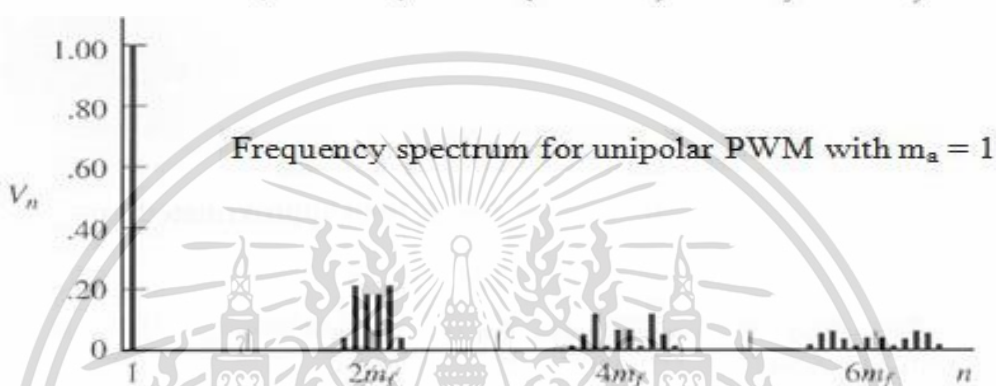
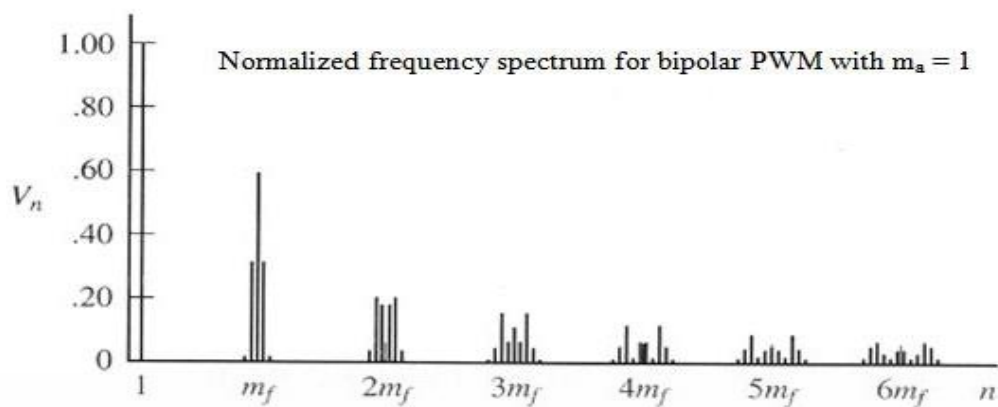


รูปที่ 2.9 สัญญาณไซน์เทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อควบคุมสวิตช์แบบยูนิโพลาร์



รูปที่ 2.10 สัญญาณแรงดันขาออกของการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์

การสวิตช์แบบยูนิโพลาร์นี้ทำให้มีจุดเด่นที่ดีกว่าการสวิตช์แบบไบโพลาร์ คือ มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกจากศูนย์ไปบวกหรือศูนย์ไปลบ ทำให้แรงดันด้านออกมีความถี่เป็นสองเท่าได้ไซด์แบนฮาร์โมนิกเป็น  $2m_f$ ,  $4m_f$ ,  $6m_f$  เป็นต้น การออกแบบวงจรกรองความถี่จึงทำได้ง่ายขึ้น ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดเล็กลง ทำให้วงจรรวมเบาและประหยัด [7]



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบฮาร์มอนิกไซด์แบนระหว่างไบโพลาร์ กับ ยูนิโพลาร์

## 2.4 เทคนิคการควบคุมที่ใช้

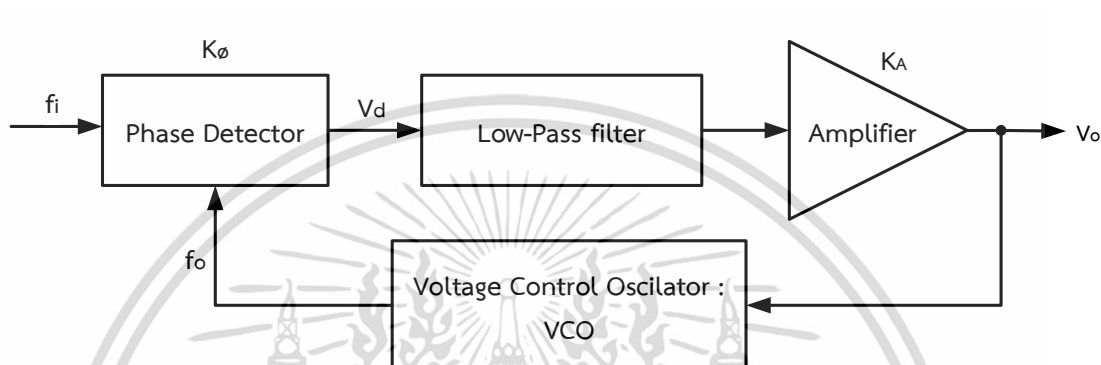
### 2.4.1 เฟสล็อกคูลูป (Phase Locked Loop)

เฟสล็อกคูลูป เป็นระบบที่สามารถสร้างสัญญาณขาออกให้มีความถี่ที่สอดคล้องกับสัญญาณขาเข้า โดยที่ระบบยังสามารถสร้างสัญญาณขาออกให้สามารถติดตามความถี่ของสัญญาณขาเข้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง เฟสล็อกคูลูปประกอบไปด้วยสามส่วนหลักคือ ตรวจจับเฟส (Phase Detector) ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter) และวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบเปลี่ยนความถี่ด้วยแรงดัน (Voltage Control Oscillator; VCO) เฟสล็อกคูลูปนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย

1. ตัวตรวจจับเฟส (Phase detector; PD) ทำหน้าที่ตรวจจับความต่างเฟสของสัญญาณขาเข้าและสัญญาณที่ได้จากออสซิลเลเตอร์ สัญญาณความต่างเฟสที่ได้นั้นจะมีองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง

2. ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter; LF) ทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณความถี่สูง และกรองสัญญาณความถี่ต่ำจากบล็อกตัวตรวจจับเฟสผ่าน ซึ่งนิยมใช้ตัวกรอง ความถี่ต่ำอันดับหนึ่งหรือตัวควบคุมพีไอ

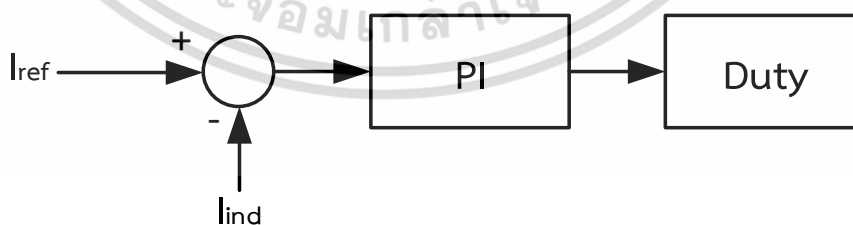
3. ออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Oscillator; VCO) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ขึ้นอยู่กับแรงดันด้านขาเข้า



รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเฟสล็อกคูลูป

#### 2.4.2 การควบคุมวงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง

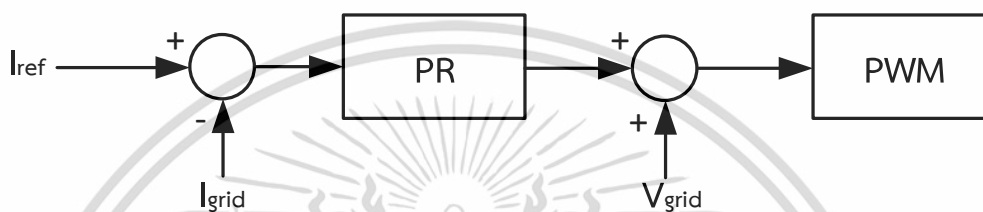
อาศัยการทำงานโดยใช้ค่ากระแสอ้างอิงมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ภายในวงจรแปรผันกำลังกระแสตรงแบบสองทิศทางซึ่งจะทำให้ได้ค่าความผิดพลาดจากนั้นนำค่าที่ได้ไปเข้าบล็อกการควบคุมแบบ PI (Proportional-Integral Controllers) และนำค่าออกมาได้ไปใช้เพื่อเป็นอัตราส่วนดิวตีในการขับสวิตซ์ต่อไป ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง

### 2.4.3 การควบคุมวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสลับ

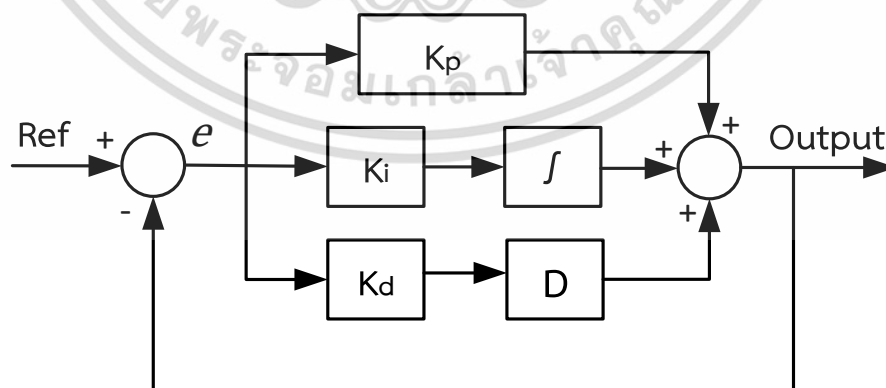
อาศัยการทำงานโดยใช้ค่ากระแสอ้างอิงมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากกระแสที่ไหลผ่านเข้าไปในระบบกริดซึ่งจะทำให้ได้ค่าความผิดพลาด จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเข้าบล็อกการทำงานแบบ PR (Proportional-Resonant Controllers) แล้วนำค่าที่ออกมาจากบล็อกไปบวกเข้ากับแรงดันที่รับค่ามาจากกริดเพื่อจะได้นำค่าที่ได้ไปสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงในการไปตัดกับสัญญาณฟันปลาเพื่อสร้าง PWM ไปใช้ในการขับ IGBT ในวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไป ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสลับ

### 2.4.4 ระบบการควบคุมแบบ พีไอดี (PID Controller)

เป็นระบบการควบคุมแบบป้อนกลับโดยเป็นการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าที่เราต้องการโดยจะทำให้ได้ค่าความผิดพลาดและนำค่าความผิดพลาดที่ได้นั้นไปใช้ในการควบคุมโดยตัววงจรจะพยายามทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงต่ำที่สุดโดยในการควบคุมพีไอดีจะเป็นการควบคุมค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต และค่าการแกว่งของระบบ



รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4.1 การควบคุมแบบพี (P controller)

การควบคุมแบบพี เป็นการควบคุมแบบใช้สัดส่วนคุณเข้าปดิ่งสมการ 2.3 โดยการควบคุมนี้จะเป็นการขยายค่าความผิดพลาดซึ่งถ้าหากมีค่ามากเกินไปจะทำให้ระบบไม่เสถียรได้แต่ในทางกลับกันถ้ามีค่าน้อยเกินไประบบก็ช้าตามไปด้วย

$$P_{out} = K_p * e(t) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $P_{out}$  คือ สัญญาณขาออกจากการควบคุมแบบพี

$K_p$  คือ ค่าอัตราส่วน

$e(t)$  คือ ค่าความผิดพลาด

#### 2.4.4.2 การควบคุมแบบไอ (I controller)

การควบคุมแบบไอ เป็นการควบคุมโดยใช้หลักการปริพันธ์โดยจะเป็นผลรวมของความผิดพลาด ดังสมการ 2.4 โดยการควบคุมจะเป็นการกำจัดค่าความผิดพลาดให้หมดไป แต่อาจจะทำให้ระบบเกิดโอเวอร์ชูตได้

$$I_{out} = K_I \int e(t) dt \quad (2.4)$$

เมื่อ  $I_{out}$  คือ สัญญาณขาออกจากการควบคุมแบบไอ

$K_I$  คือ ค่าอัตราส่วนปริพันธ์

$e(t)$  คือ ค่าความผิดพลาด

T คือ เวลา

#### 2.4.4.3 การควบคุมแบบดี (D controller)

การควบคุมแบบดี เป็นการควบคุมโดยใช้หลักการอนุพันธ์โดยจะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด ดังสมการ 2.5 โดยการควบคุมนี้จะช่วยให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วขึ้นอีกทั้งยังช่วยลดโอเวอร์ชูตที่เกิดจากการควบคุมแบบไอได้อีกด้วย แต่ในทางกลับกันถ้าระบบมีสัญญาณรบกวนสัญญาณรบกวนก็จะถูกขยายเข้าไปด้วยทำให้เกิดผลเสียแก่การทำงานได้

$$D_{out} = K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.5)$$

เมื่อ $D_{out}$	คือ สัญญาณขาออกจากการควบคุมแบบดี
$K_D$	คือ ค่าอัตราส่วนอนุพันธ์
$e(t)$	คือ ค่าความผิดพลาด

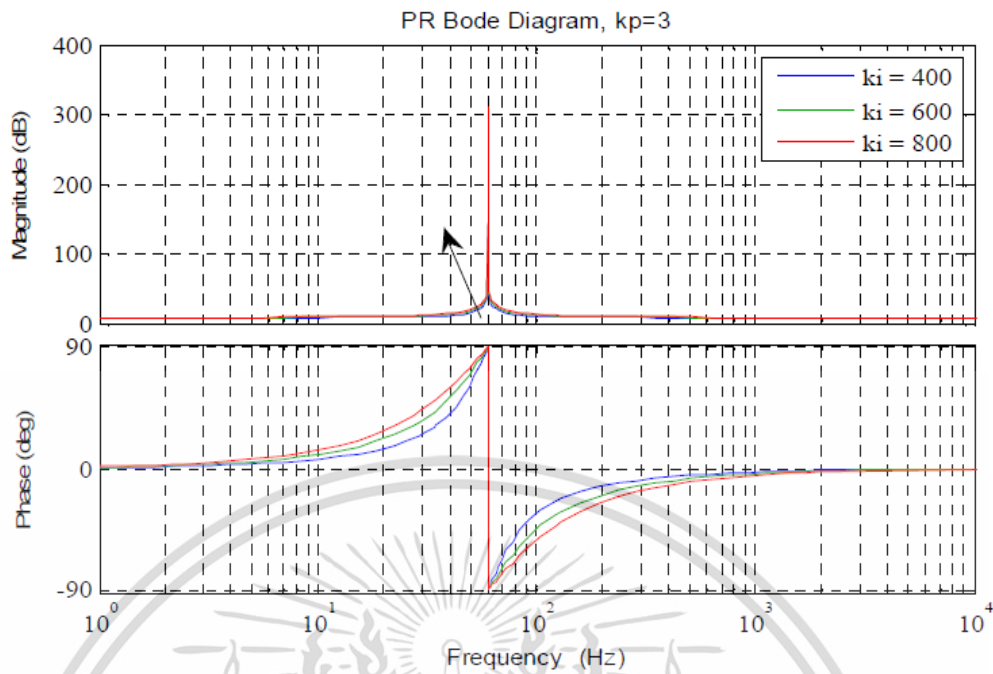
#### 2.4.5 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนซ์ (Proportional plus Resonant Controller)

การควบคุมแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนซ์หรือแบบพีอาร์เป็นเทคนิคการควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์ที่สามารถลดความผิดเพี้ยนของกระแส (THD<sub>i</sub>) จากการใช้อินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มาจากแหล่งพลังงานทดแทนลงได้ ซึ่งมีความแตกต่างจากการควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์แบบพีโอที่ใช้แกนอ้างอิงซิงโครนัส (Synchronously reference frame,  $i_{dq}$ ) แต่การควบคุมแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนซ์จะใช้การควบคุมกระแสบนแกนอ้างอิงนิ่ง (stationary reference frame,  $i_{\alpha\beta}$ ) ทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าแบบพีโอ นอกจากนี้การควบคุมแบบพีอาร์ยังสามารถติดตามสัญญาณแรงดันและความถี่ได้ดีกว่าแบบพีโอ ซึ่งอัตราขยายตัวควบคุมแบบพีอาร์จะขยายเป็นอนันต์ที่ความถี่มูลฐานของระบบ สมการอุดมคติของตัวควบคุมแบบพีอาร์ดังสมการ

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega^2} \quad (2.6)$$

เมื่อ $K_p$	คือ อัตราขยายสัดส่วน
$K_i$	คือ อัตราขยายปริพันธ์
$\omega$	คือ ความถี่เชิงมุมเรโซแนนซ์

จากรูปที่ 2.16 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ด้วยแผนภาพโพลเดที่กำหนดให้ค่า  $K_p$  คงที่ และเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย  $K_i$  พบว่า เมื่อค่า  $K_i$  มีค่าเพิ่มขึ้นผลตอบสนองทางเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ และอัตราขยายการควบคุมแบบพีอาร์ในทางอุดมคติจะขยายเป็นอนันต์ที่ความถี่มูลฐานของระบบ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบพีอาร์สามารถขจัดค่าความผิดพลาดของระบบที่สภาวะคงตัวได้



รูปที่ 2.16 แสดง Bode plot ของการควบคุมแบบพีดาร์ที่กำหนดให้ค่า  $K_p$  คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การจำลองผลและการออกแบบ

เนื้อหาในบทนี้จะเกี่ยวกับการจำลองผล โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อออกแบบระบบควบคุมระบบกักเก็บพลังงานและแสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถช่วยลดความผันผวนทางความถี่ในระบบไมโครกริดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในส่วนที่สองในจะเป็นการจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อออกแบบสร้างวงจรแปลงผันกำลังเพื่อเชื่อมต่อระหว่างแบตเตอรี่และระบบไมโครกริดที่เหมาะสม

#### 3.1 การจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

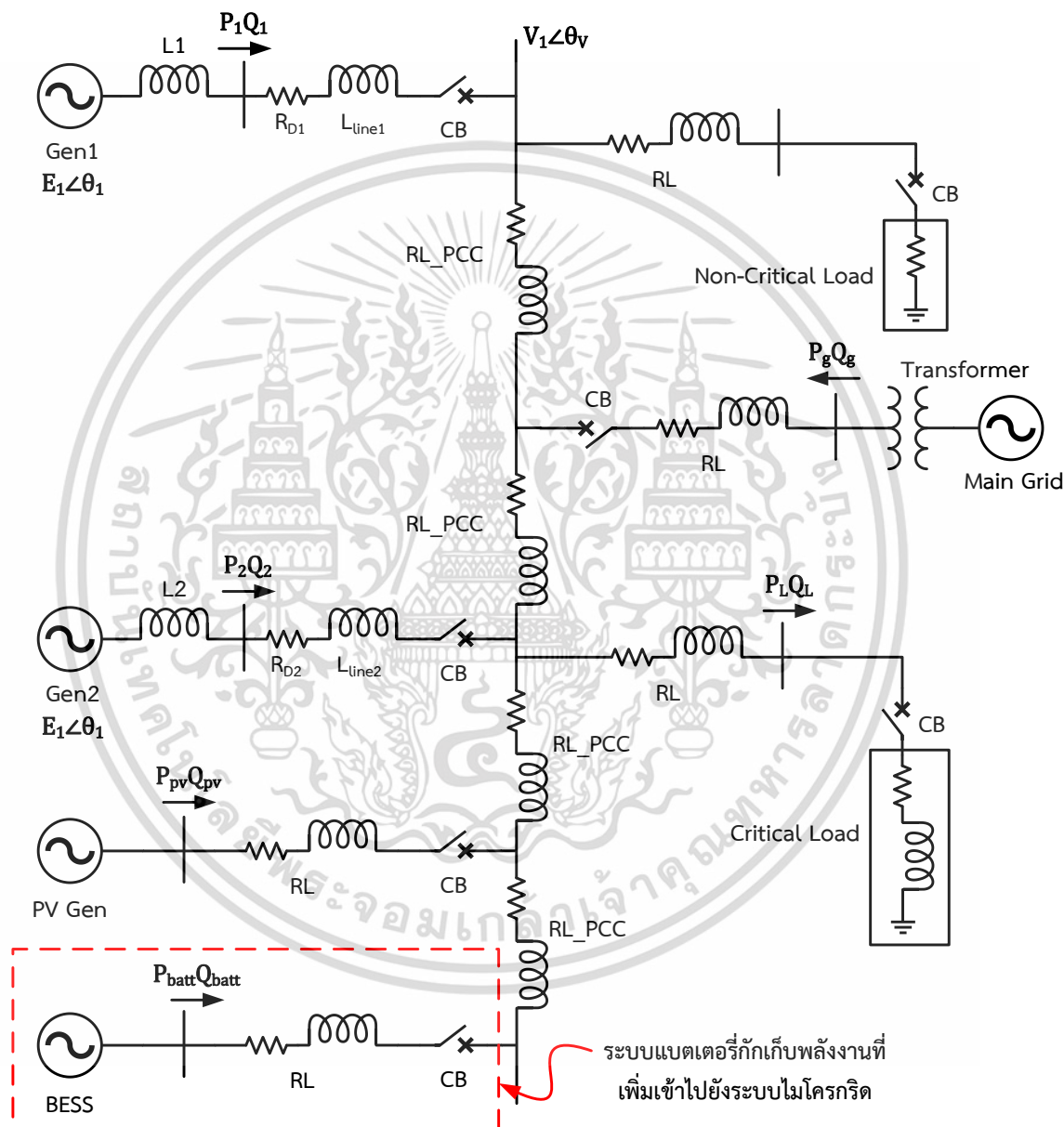
การออกแบบระบบควบคุมระบบกักเก็บพลังงานนี้ จะเริ่มจากการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อออกแบบและพัฒนากลยุทธ์การควบคุม และแสดงให้เห็นว่ากลยุทธ์ที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะมีการสร้างแบบจำลองส่วนต่าง ๆ ของระบบไมโครกริดที่อ้างอิงมาจากระบบไมโครกริดสาธิตเฟสเดียวในห้องปฏิบัติการ [8] และทำการสร้างระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน (Battery Energy Storage System : BESS) เพื่อเชื่อมต่อเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองไมโครกริดที่สร้างขึ้น โดยอ้างอิงตามข้อกำหนดจำเพาะของแบตเตอรี่ที่จะนำมาใช้งานในระบบจริง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงในระบบที่มีอยู่ในขั้นตอนต่อไป

##### 3.1.1 การจำลองระบบไมโครกริด

แบบจำลองระบบไมโครกริดที่ใช้ในการทดลองนี้ สร้างขึ้นใน MATLAB/Simulink โดยอ้างอิงมาจากระบบไมโครกริดสาธิตเฟสเดียวในห้องปฏิบัติการ [8] ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 2 เครื่องที่มีการควบคุมแบบ P-f droop และ Q-V droop แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน 1 เครื่อง และมีการเชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้า โดยแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลองนี้ จะใช้เป็นพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใส่โพรไฟล์แสงอาทิตย์ที่เก็บข้อมูลมาจากระบบจริง ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการเพิ่มส่วนของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานโดยจะใช้เป็นแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว (Lead-acid battery) ที่สร้างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สามารถทำการย่อแค้นเวลา ให้เป็นไปตามแบบจำลองไมโครกริดที่มีการย่อแค้นเวลาไว้แล้วได้ อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ ภายในแบตเตอรี่ได้ โดยสามารถสร้างแบบจำลองตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดอะแกรมเส้นเดียว โดยทำการเพิ่มระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานที่มีการผ่านวงจรแปลงผันกำลังให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแล้ว ดังรูปที่ 3.2 และมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 และมีผังการควบคุมระบบไมโครกริดดังรูปที่ 3.2 ซึ่งในกรอบสีแดงจะแสดงส่วนของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานที่เพิ่มเข้ามา

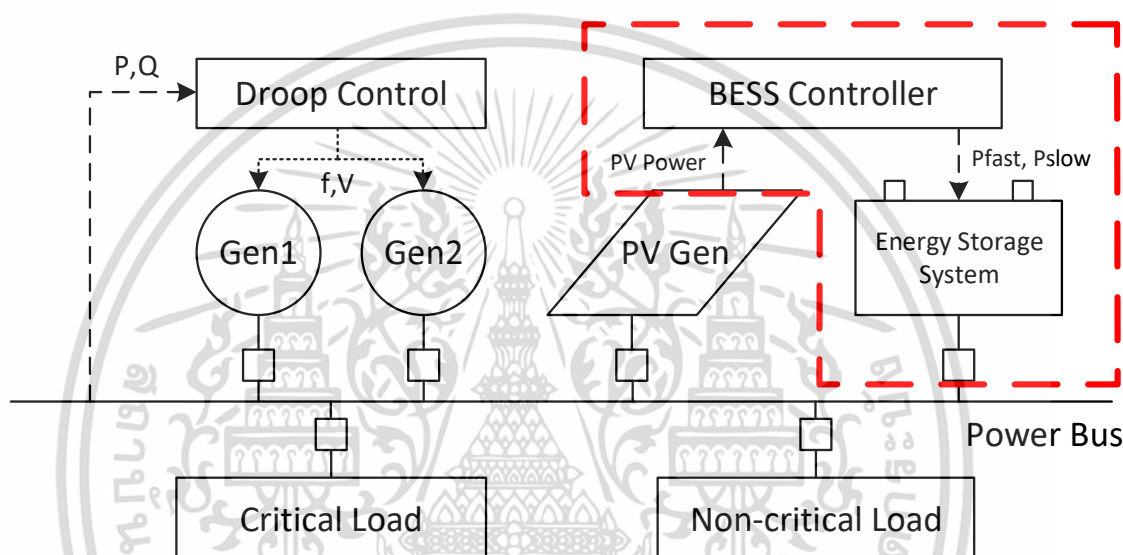


รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบไมโครกริดที่มีการเพิ่มระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พิกัดของอุปกรณ์ต่าง ๆ

อุปกรณ์	ข้อกำหนดเฉพาะ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2	ตัวละ 2000 VA
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	3000 VA
แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรด	12 V 65 Ah 8 หน่วย
ภาระไฟฟ้าจำเป็น	1500W + 1275VA
ภาระไฟฟ้าปกติ	1300W



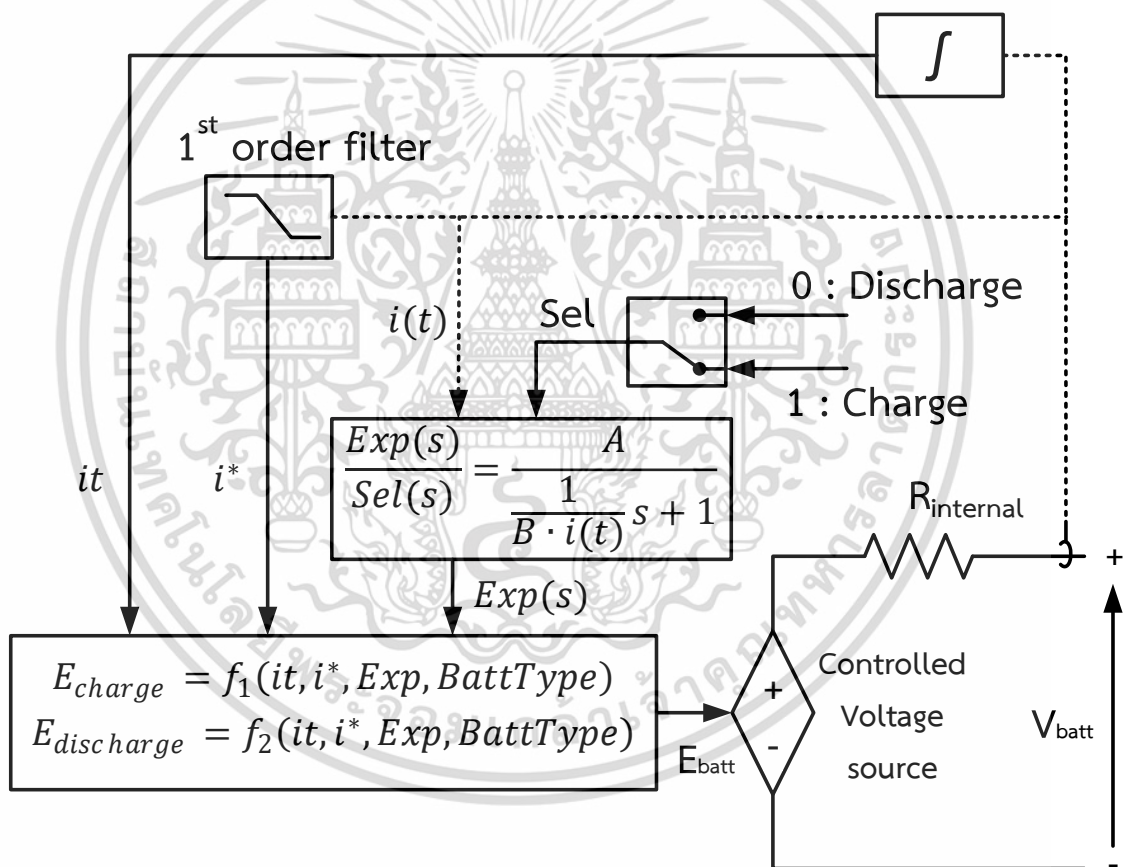
รูปที่ 3.2 ผังการควบคุมของระบบไมโครกริดชนิดแบบแยกอิสระ

เมื่อทำการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงานเข้ากับระบบไมโครกริดจะต้องมีการสร้างระบบควบคุมการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ โดยจากรูปที่ 3.2 แสดงระบบโดยรวมของระบบไมโครกริดแบบแยกอิสระ และผังการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีการเพิ่มระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในกรอบสีแดงเข้าไปในระบบ ซึ่งจะจำลองแบตเตอรี่ที่ผ่านวงจรแปลงผันกำลังให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อเชื่อมต่อเข้าไปยังระบบไมโครกริดที่เป็นกระแสสลับ

### 3.1.2 แบบจำลองทางทฤษฎีของแบตเตอรี่

ในการทดลองนำระบบกักเก็บพลังงานหรือแบตเตอรี่เสริมเข้าไปในระบบไมโครกริดนี้ จะทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/SIMULINK แต่เนื่องจากแบบจำลองไมโครกริดที่มี

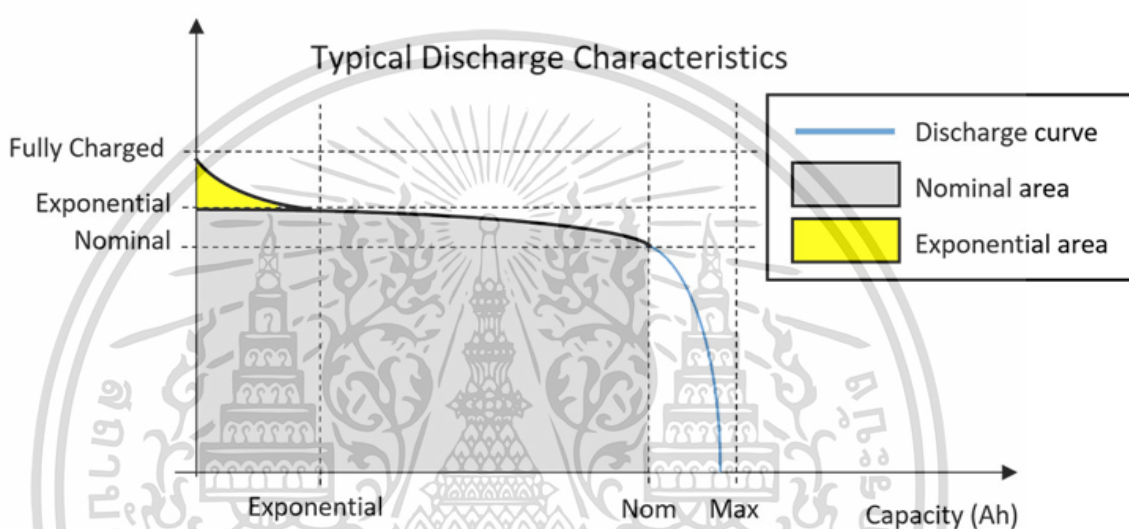
อยู่นั้นมีการย่อแกนเวลาอยู่ จึงไม่สามารถใช้บล็อกจำลองแบตเตอรี่ที่มีอยู่แล้วในโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้ เนื่องจากไม่สามารถย่อแกนเวลาได้ ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่ขึ้นมาใหม่ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ดังรูปที่ 3.3 [4] เพื่อให้สามารถจำลองผลด้วยการย่อแกนเวลาได้ อีกทั้งยังสามารถหาผลการทดลองที่เกิดขึ้นเมื่อใช้พารามิเตอร์ตามคุณลักษณะของแบตเตอรี่ที่ใช้จริงได้อีกด้วย และที่สำคัญยังสามารถสังเกตการณ์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญภายในแบตเตอรี่ได้ เช่น ค่าสถานะประจุ (SOC) และ ค่าแรงดันภายในแบตเตอรี่ ได้ด้วย เพียงแต่สมการทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางแบตเตอรี่นี้ ไม่ได้คำนึงถึงผลของอุณหภูมิ และ วงรอบการใช้งานของแบตเตอรี่



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลที่อธิบายด้วยสมการคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ตาม MATLAB/Simulink

### 3.1.2.1 สมการคุณลักษณะแบตเตอรี่

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ เริ่มต้นจากการศึกษากราฟคุณลักษณะของแบตเตอรี่ดังรูปที่ 3.4 [4] ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสามช่วง คือ ช่วงแรกเป็นย่านเอ็กโปเนนเชียล แรงดันจะตกหลังจากเริ่มคายประจุ เข้าสู่ช่วงที่สองเป็นการใช้งานแบตเตอรี่ที่แรงดันปกติตามคุณลักษณะของแบตเตอรี่ และหลังจากคายประจุจนกระทั่งประจุใกล้หมด แรงดันจะตกทันทีทันใด โดยกราฟคุณลักษณะของแบตเตอรี่จะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของแบตเตอรี่ และผู้ผลิต



รูปที่ 3.4 กราฟคุณลักษณะแบตเตอรี่

สมการคุณลักษณะแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลอง เป็นสมการคุณลักษณะแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ซึ่งแสดงพฤติกรรม Charge และ Discharge ของแบตเตอรี่ โดยสมการจะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของแบตเตอรี่ที่ใช้ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันและสถานะการประจุของแบตเตอรี่อธิบายได้ด้วยสมการคายประจุ และ อัดประจุ ดังต่อไปนี้ [4-5]

$$\text{Discharge : } V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q-i_t} \cdot (i_t + i^*) + Exp(t) \quad (3.1)$$

$$\text{Charge : } V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{i_t - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q-i_t} \cdot i_t + Exp(t) \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$V_{batt}$  = แรงดันแบตเตอรี่ ณ เวลานั้นๆ (V)

$E_0$  = ค่าคงที่แรงดันแบตเตอรี่ (V) (ตั้งค่าเป็น Initial ในโปรแกรม MATLAB)

$R$  = ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ( $\Omega$ )

$i$  = กระแสแบตเตอรี่ (A)

$K$  = ค่าความต้านทานโพลาริเซชัน ( $\Omega$ ) หรือค่าคงที่โพลาริเซชัน (V/Ah)  
(ตั้งค่าเป็น Initial ในโปรแกรม MATLAB)

$Q$  = ความจุแบตเตอรี่ (Ah)

$i_t$  =  $\int idt$  = ค่าการประจุแบตเตอรี่ (Ah)

$i^*$  = กระแสที่ผ่าน Low-pass Filter (A)

$A$  = Exponential Zone Amplitude (V) (ตั้งค่าเป็น Initial ในโปรแกรม MATLAB)

$B$  = Exponential Zone Time Constant Inverse  $(Ah)^{-1}$  (ตั้งค่าเป็น Initial ในโปรแกรม MATLAB)

$Exp(s)$  = สมการพลศาสตร์ในย่านเอ็กโปเนนเชียล

$Sel(s)$  = โหมดของแบตเตอรี่ เมื่อ อัดประจุ เป็น 1 และคายประจุ เป็น 0

โดยในย่านเอ็กโปเนนเชียล ในสมการ 3.1 และ 3.2 จะแสดงให้เห็นถึงพลวัตการอัดและคายประจุ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ Hysteresis โดยจะไม่ขึ้นกับค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ โดยพลวัตกรรมนี้จะปรากฏเฉพาะในย่านเอ็กโปเนนเชียลเท่านั้นตามรูปที่ 3.4 โดยสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

$$Exp(t) = B \cdot |i(t)| \cdot (-Exp(t) + A \cdot u(t)) \quad (3.3)$$

เมื่อ

$Exp(t)$  = แรงดันในย่านเอ็กโปเนนเชียล

$i(t)$  = กระแสแบตเตอรี่

$u(t)$  = สถานะของการอัดประจุ และการคายประจุ

แรงดันในย่านเอ็กโปเนนเชียลจะขึ้นอยู่กับค่า  $Exp(t_0)$  และสถานะของการ Charge ( $u(t)=0$ ) และการ Discharge ( $u(t)=1$ )

การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในสมการที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 จะนำค่ามาจาก Datasheet โดยผู้ผลิตแบตเตอรี่จะกำหนดมาให้ โดยค่าที่กำหนดมาให้แล้วคือค่า Fully Charged Voltage ( $V_{full}$ ) ค่าพารามิเตอร์ในช่วงสิ้นสุดย่านเอ็กโปเนนเชียล ( $Q_{exp}, V_{exp}$ ) ค่าพารามิเตอร์ในช่วงสิ้นสุด Norminal Zone ( $Q_{nom}, V_{nom}$ ) คือในช่วงก่อนที่แรงดันตกอย่างรวดเร็ว ค่า Maximum Capacity ( $Q$ ) และค่า Internal Resistance ( $R$ ) โดยค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดข้างต้นนี้จะสามารถนำมาหาพารามิเตอร์  $A, B, E_0$  และ  $K$  ได้ดังสมการนี้ โดยต้องทำการถอดสมการ  $V_{full}, V_{exp}$  และ  $V_{nom}$  พร้อมกันด้วยวิธีเมทริก

$$V_{full} = E_0 - R \cdot i + A \quad (3.4)$$

ในช่วงสิ้นสุดของ Exponential Zone ค่า  $B$  สามารถประมาณได้ด้วย  $\frac{3}{Q_{exp}}$

$$V_{exp} = E_0 - K \frac{Q}{Q - Q_{exp}} \cdot (Q_{exp} + i) - R \cdot i + A \exp\left(\frac{-3}{Q_{exp}} \cdot Q_{exp}\right) \quad (3.5)$$

และแรงดันที่ Norminal Zone คือ

$$V_{nom} = E_0 - K \frac{Q}{Q - Q_{nom}} \cdot (Q_{nom} + i) - R \cdot i + A \exp\left(\frac{-3}{Q_{exp}} \cdot Q_{nom}\right) \quad (3.6)$$

เมื่อทำการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB แล้วจะได้ค่า Exponential Zone Amplitude ( $A$ ) คือ 0.8208 ค่า Exponential Zone Time Constant inverse ( $B$ ) คือ 13.8461 ค่า Polarization Constant ( $K$ ) คือ 0.0052 และ ค่าคงที่แรงดันแบตเตอรี่ ( $E_0$ ) คือ 12.3230

ค่า  $i^*$  สามารถคำนวณได้จากการทดลองหรือ Simulation ในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยมีค่าคงที่เวลาในการทำการทดลองจะเท่ากับ 30 วินาที โดยสมมุติให้ในการจำลองผล มีความต้านทานภายในของแบตเตอรี่คงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามการ Charge หรือ Discharge ของ

แบตเตอรี่ ค่าความจุของแบตเตอรี่จะไม่เปลี่ยนตามขนาดกระแส อุณหภูมิจะไม่เป็นผลต่อการจำลองนี้ และแบตเตอรี่ที่ทำการจำลองไม่มี Memory Effect

### 3.1.2.2 แบบจำลองการคำนวณแบตเตอรี่ที่ใช้ในโปรแกรม

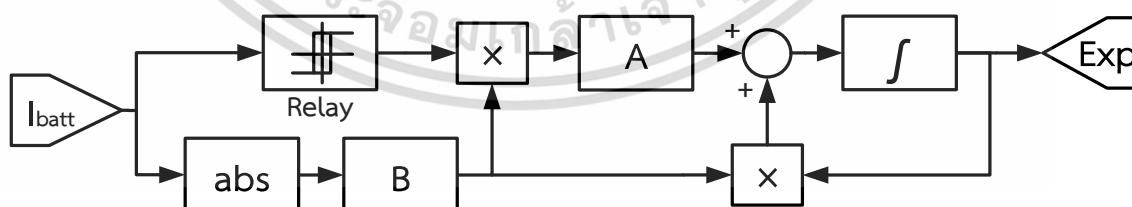
แบบจำลองการคำนวณสมการคุณลักษณะของแบตเตอรี่ แสดงให้เห็นถึงสมการคุณลักษณะของแบตเตอรี่ข้างต้นที่ได้กล่าวถึงแล้ว ซึ่งการสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่นี้ จะมีค่าคงที่ที่สำคัญที่ต้องใช้โดยได้จากการคำนวณในส่วนที่แล้วและ Datasheet ของแบตเตอรี่ที่ใช้ ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว สรุปได้ดังตารางที่ 3.2 โดยสมการในการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมMATLAB/Simulink ได้ถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ แสดงตัวอย่างได้ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ค่าคงที่ที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว

ตัวแปร	ค่าคงที่
$A$	0.8208
$B$	13.8461
$K$	0.0052
$E_0$	12.3230
$Q$	67.7083

#### 1. แบบจำลองแสดงย่านเอ็กโปเนนเชียล

สร้างจากสมการที่ 3.3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงย่านเอ็กโปเนนเชียลของกราฟคุณลักษณะแบตเตอรี่

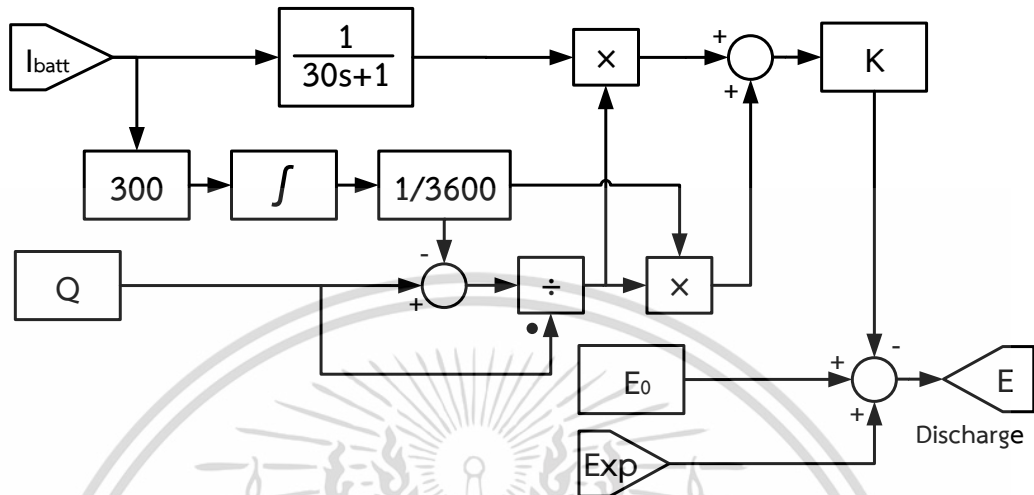


รูปที่ 3.5 แบบจำลองแสดงย่านเอ็กโปเนนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. แบบจำลองแสดงการคายประจุ

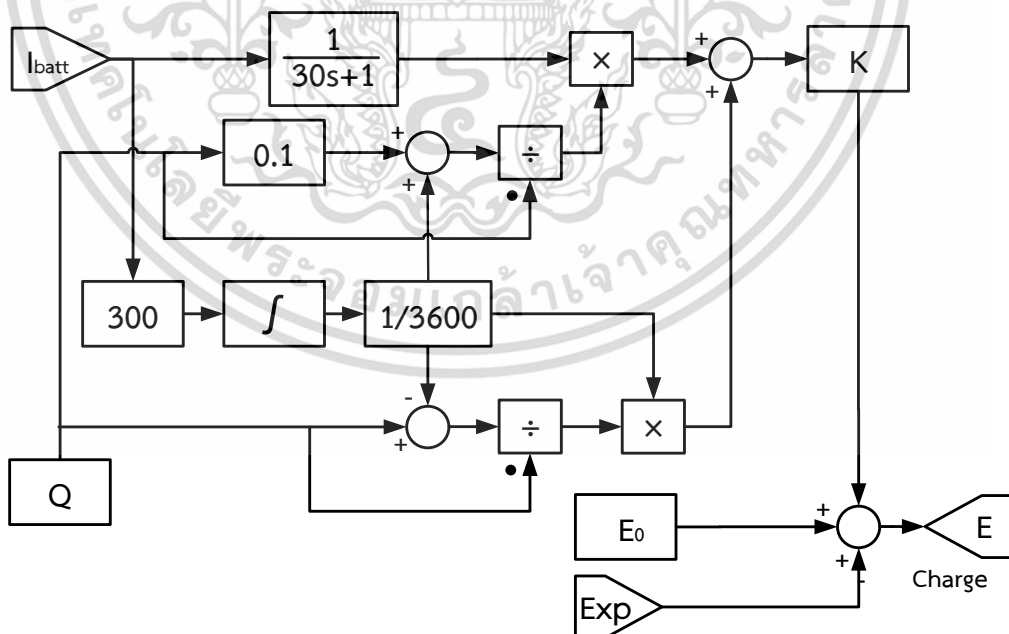
สร้างจากสมการคุณลักษณะของแบตเตอรี่ ตามสมการที่ 3.1 หรือสมการการคายประจุ



รูปที่ 3.6 แบบจำลองแสดงการคายประจุ

## 3. แบบจำลองแสดงการอัดประจุ

สร้างจากสมการคุณลักษณะของแบตเตอรี่ ตามสมการที่ 3.2 หรือสมการการอัดประจุ



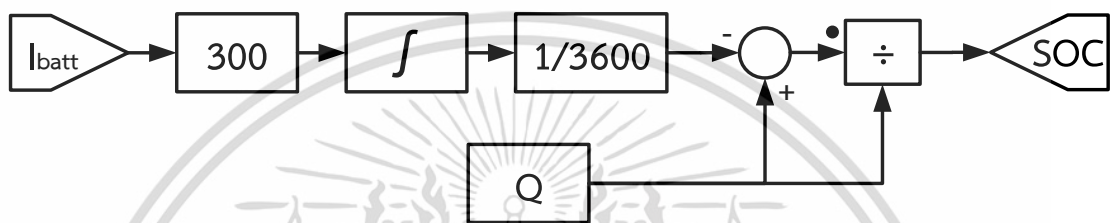
รูปที่ 3.7 แบบจำลองแสดงการอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. แบบจำลองแสดงสถานะประจุ

ค่าสถานะประจุ หรือ State of Charge (SOC) คือค่าที่บ่งบอกระดับการใช้งานคงเหลือของแบตเตอรี่ระหว่าง 0% (Discharge จนหมด) ถึง 100% (Charge จนเต็ม) โดยสมการของค่า SOC แสดงได้ดังนี้

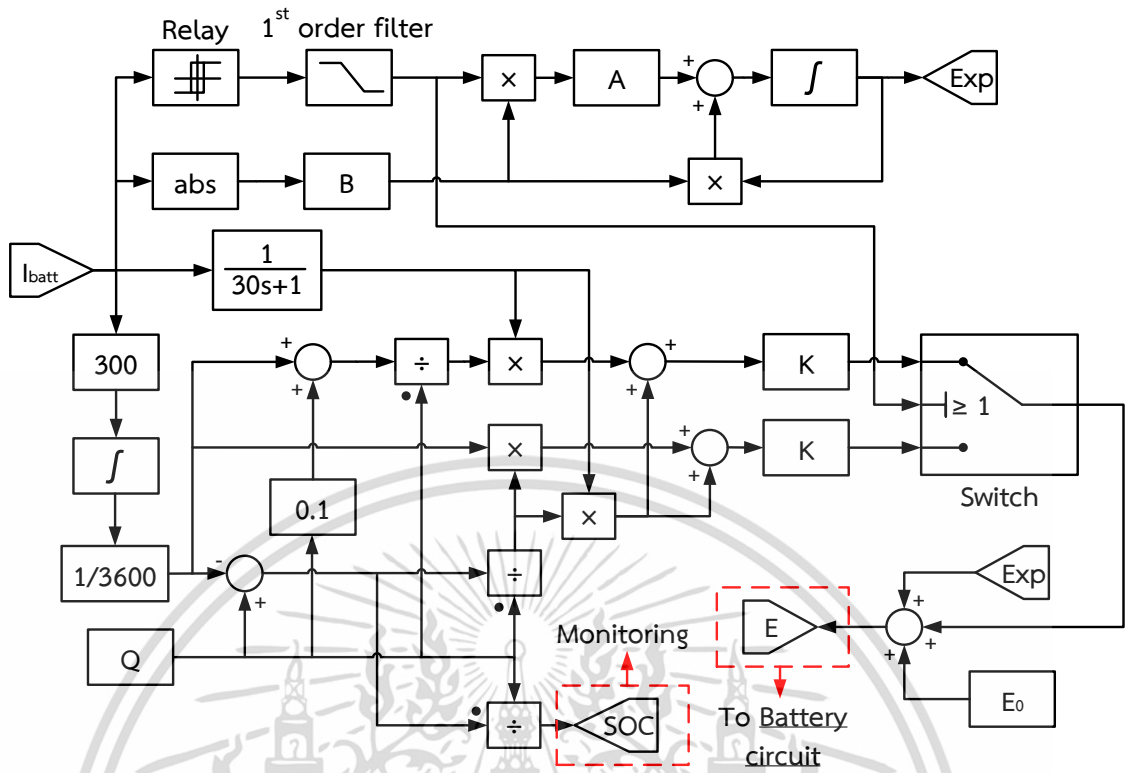
$$SOC = \frac{Q - i_t}{Q} \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.8 แบบจำลองแสดงสถานะประจุ

#### 5. แบบจำลองแบตเตอรี่

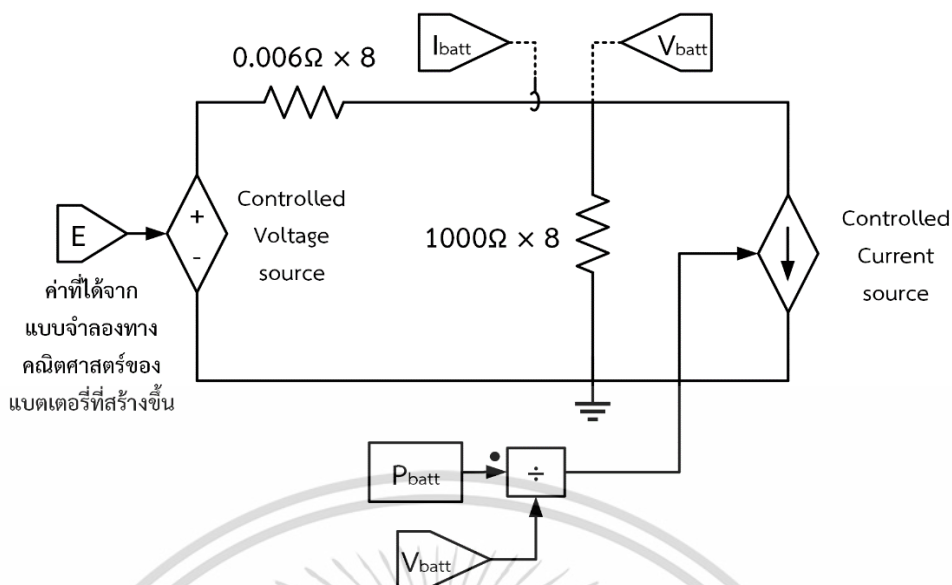
เมื่อรวมแบบจำลองทั้ง 4 ข้างต้น เข้าด้วยกันจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ที่สมบูรณ์เพื่อใช้ในการจำลองผลร่วมกับแบบจำลองไมโครกริด ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แบบจำลองแบตเตอรี่

### 3.1.2.3 การเชื่อมต่อแบบจำลองแบตเตอรี่เข้าไปยังแบบจำลองระบบไมโครกริด

หลังจากที่ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่แล้วก็จะทำการต่อวงจรสมมูลแบตเตอรี่เป็นดังรูปที่ 3.10 เพื่อจำลองการต่อแบตเตอรี่เข้าไปยังระบบไมโครกริด โดยต่อเข้าไปยังแบบจำลองระบบไมโครกริดดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลแบตเตอรี่

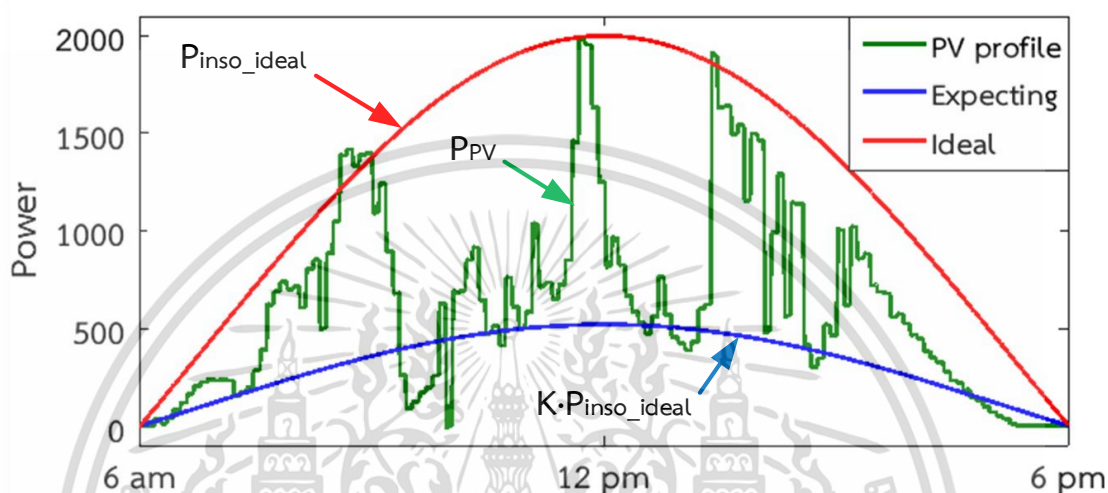
แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดตะกั่ว-กรด มีค่า Norminal Voltage ที่ 12 V และ Rated Capacity ที่ 65 Ah นำมาต่ออนุกรมกัน 8 หน่วยแบตเตอรี่ หมายความว่าแบตเตอรี่จะมีพิกัดประมาณ 50 kWh

การควบคุมแบตเตอรี่จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการเปรียบเทียบปริมาณการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ต่อวัน และปริมาณอ้างอิง Insolation ต่อวันของพระอาทิตย์ ขั้นตอนที่ 2 คือการควบคุมการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ด้วยค่าสถานะประจุ (SOC)

### 3.1.3 การควบคุมระบบสำรองพลังงานในระบบไมโครกริด

การควบคุมระบบสำรองพลังงานจะอ้างอิงกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ และสถานะประจุ (SOC) ของแบตเตอรี่ [6] โดย ในแต่ละวันของปี พลังงานแสงอาทิตย์ที่รับได้บนผิวโลก ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งจะถูกนำมาอ้างอิงเป็นกำลังผลิตไฟฟ้าในอุดมคติ  $P_{inso\_ideal}$  จากความจุแบตเตอรี่ คงเหลือในแต่ละวันนำมาคำนวณหาพลังงานที่ต้องการในการประจุแบตเตอรี่ให้ได้ SOC อย่างน้อย 95% เมื่อดวงอาทิตย์ตกดิน แล้วสร้างเส้นการผลิตไฟฟ้ารวมที่คาดหวังด้วย  $K \cdot P_{inso\_ideal}$  โดยเมื่อการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จริงมากกว่าการผลิตไฟฟ้ารวมที่คาดหวัง ( $P_{pv} > K \cdot P_{inso\_ideal}$ ) กำลังไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกประจุ ให้กับแบตเตอรี่ ในทางกลับกันเมื่อ  $P_{pv} < K \cdot P_{inso\_ideal}$  ก็จะเป็นการคายประจุดังรูปที่ 3.11 โดยที่ค่า  $K$  มีค่าระหว่าง 0 -1 และจะเปลี่ยนไปในแต่

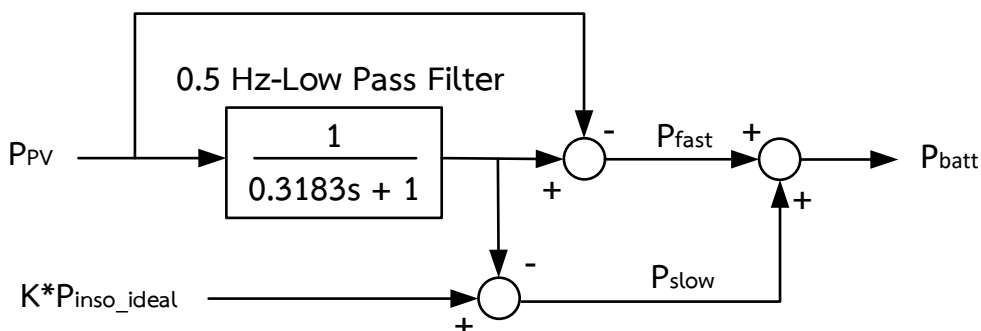
ละวันโดยขึ้นอยู่กับ เส้นโค้ง  $P_{inso\_ideal}$  และ SOC เมื่อเริ่มวัน SOC ของแบตเตอรี่ระหว่างวันจะถูก กำหนดให้ไม่ต่ำกว่า 30% กรณีการสำรองพลังงานในสถานะฉุกเฉิน และไม่ต่ำกว่า 50% ในสถานะ การใช้งานปกติซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานมากกว่า 2 ปี ตามการอ้างอิงของผู้ผลิตแบตเตอรี่ ประเภทตะกั่วกรด



รูปที่ 3.11 Insolation เพื่อใช้อ้างอิงการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่

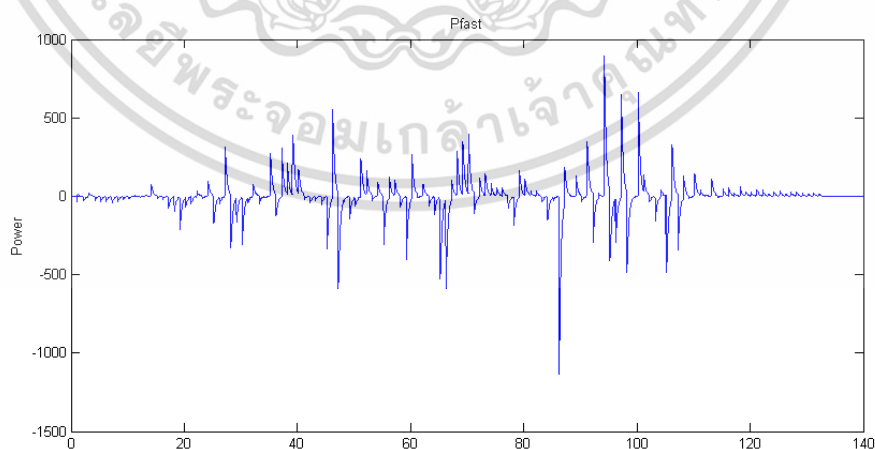
### 3.1.4 การลดความผันผวนของความถี่

ความผันผวนของความถี่ของไมโครกริดซึ่งควบคุมกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการ ควบคุมความถี่และแรงดันมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตอย่างรวดเร็วอาจมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลัน และหรือจากการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตอย่างรวดเร็วของ ระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ในการลดความผันผวนของความถี่ของระบบไมโครกริดนี้ กำลังไฟฟ้า คำสั่งของแบตเตอรี่จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ  $P_{fast}$  และ  $P_{slow}$  ซึ่งตั้งชื่อตามลักษณะของสัญญาณที่ ได้ โดยมีแผนภาพการคำนวณดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมแสดงรูปแบบการคำนวณ Pfast และ Pslow

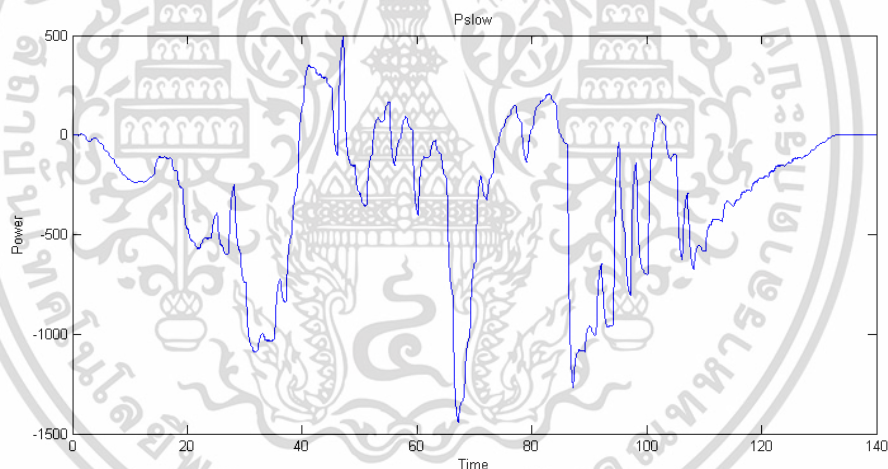
Pfast เกิดจากการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ตามเวลาจริง และกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ตามเวลาจริงที่ผ่าน Low-pass Filter แล้ว โดยนำสัญญาณทั้งสองลบกัน ผลต่างของสัญญาณทั้งสองจะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่รวดเร็วเนื่องจากความผันผวนในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งปริมาณพลังงานเหล่านี้ส่งผลเสียต่อความถี่ของระบบเนื่องจากกระบวนการ P-f Droop Control ดังนั้น Pfast จึงใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาที่รวดเร็ว โดยจะทำการคายประจุจากแบตเตอรี่ตลอดเวลา ในทุกช่วงของ P-f Droop Control ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ของระบบสม่ำเสมอขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ความถี่ของระบบมีความผันผวนน้อยลง โดย Pfast แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อ SOC ของแบตเตอรี่เนื่องจากการคายประจุจากแบตเตอรี่ในปริมาณที่น้อยมากและรวดเร็ว จึงสามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่องทั้งวัน



รูปที่ 3.13 สัญญาณ Pfast

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Pslow** เกิดจากการเปรียบเทียบสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ตามเวลาจริงที่ผ่าน Low-pass Filter แล้วและสัญญาณพลังงาน Ideal Insolation ที่คูณด้วยค่า Gain ( $K = 0.36$ ) แล้ว Pslow จะแสดงให้เห็นถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ทำการอัดและคายประจุในแบตเตอรี่ โดยหากพลังงาน (กราฟสีน้ำเงิน) มากกว่า 0 ขึ้นไปจะเป็นการคายพลังงานให้กับระบบ และหากพลังงานน้อยกว่า 0 จะเป็นการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ ดังนั้น Pslow จะส่งผลกระทบต่อ SOC โดยตรง เนื่องจากการคายประจุจากแบตเตอรี่ในปริมาณที่มาก ประโยชน์ของ Pslow คือ การจ่ายพลังงานให้กับระบบเพื่อทำการแบ่งเบาภาระให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และทำให้การผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยพลังงานไฟฟ้าที่คายประจุจากแบตเตอรี่ออกไปจะแทนที่การผลิตที่ตกลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอันเป็นผลมาจาก P-f Droop Control และทำการ Discharge Pslow ในการกระทำ Demand Shifting โดยจะจ่ายให้กับโหลดในช่วงเวลากลางคืนเพื่อลดภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 3.14 สัญญาณ Pslow

### 3.1.5 การตั้งค่าเวลาจำลองผลในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และโปรไฟล์ต่าง ๆ

การจำลองผลจะแสดงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นตลอด 24 ชั่วโมง โดยเริ่มที่เวลา 6.00 น. ถึง 6.00 น. ในวันถัดไป และเวลาในการจำลองผลจะทำการย่อขนาดเวลาลง ซึ่งทุก ๆ 1 วินาทีในการจำลองผล จะคิดเป็นเวลา 5 นาทีของเวลาจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

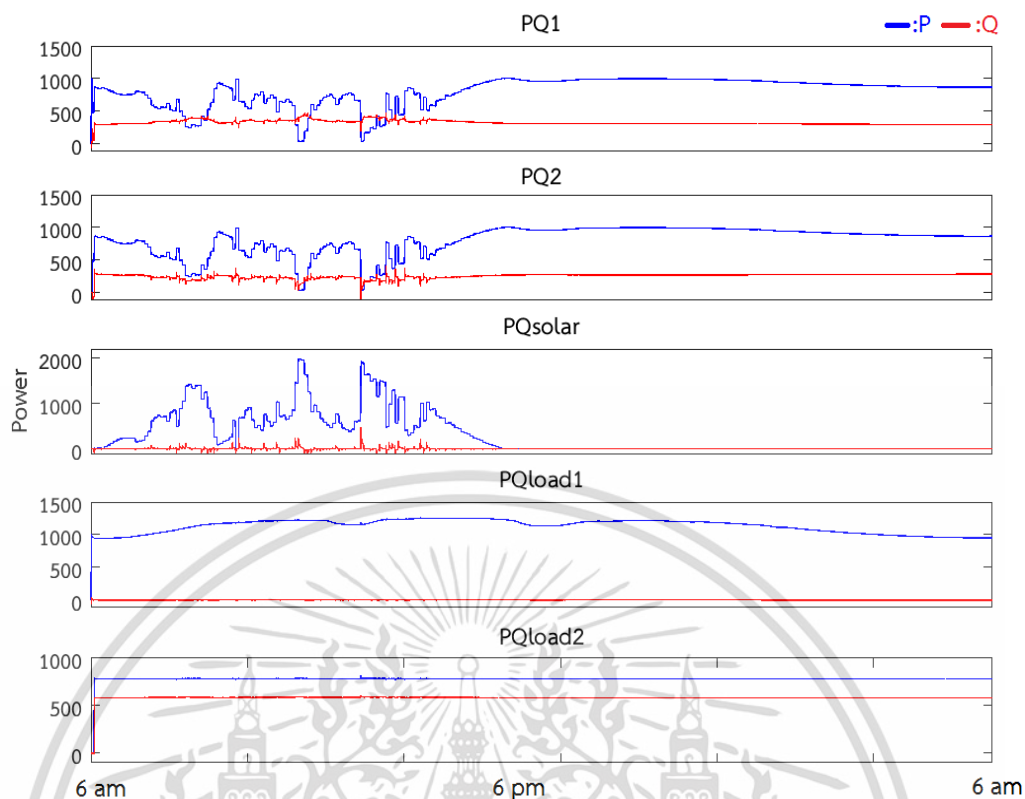
โพรไฟล์อ้างอิงที่ใช้ในการจำลองผลจะใช้โพรไฟล์การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โพรไฟล์พลังงาน Insolation และโพรไฟล์อ้างอิงโหลด โดยโพรไฟล์อ้างอิงการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะบันทึกตลอดทั้งวันโดยบันทึกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของห้องปฏิบัติการ Pearl Lab

โพรไฟล์ Insolation แสดงพลังงานจากแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวันโดยขึ้นกับตำแหน่งที่อยู่ของผู้สังเกต โดยอ้างอิงจากตำแหน่งประเทศไทยที่ละติจูด 15 องศาเหนือ โพรไฟล์อ้างอิงทั้ง 2 ข้างต้นจะนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงควบคุมการอัดและคายประจุในแบตเตอรี่ต่อไป

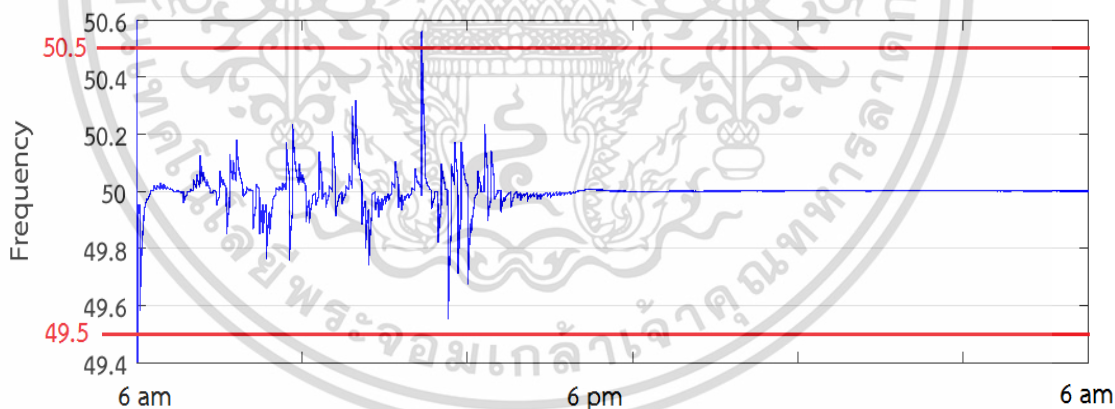
โพรไฟล์อ้างอิงโหลดแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ โพรไฟล์โหลดจากการไฟฟ้านครหลวงเป็น Load Curve ซึ่งจะแสดงเวลาในตอนกลางวันเวลาที่เวลา 6.00 น. ถึง 18.00 น. หรือเวลาในการจำลองผลที่  $t=0$  ถึง  $t=140$  ในช่วงเวลากลางคืนยังไม่มีโพรไฟล์โหลดที่ใช้อ้างอิง ดังนั้นในการทดลองจึงต้องทำการเพิ่มโพรไฟล์โหลดที่เป็นค่าคงที่เพื่อในการทดลองเท่านั้น โดยแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรก หรือช่วงพีคของโหลดในเวลากลางคืนแสดงการใช้งานโหลดอย่างมากในช่วงเวลา 18.00 น.ถึง 22.00 น. ที่ 2100 W หรือเวลาในการจำลองผลที่  $t=141$  ถึง  $t=185$  และช่วงกลางดึกเวลา 22.00 น.ถึง 6.00 น.ในวันถัดไป ที่ 800 W หรือเวลาในการจำลองผลที่  $t=186$  ถึง  $t=280$

### 3.1.6 ผลการเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงาน

ผลของการจำลองระบบก่อนทำการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงานในช่วงการผลิตที่ไม่สม่ำเสมอของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (PQsolar) เมื่อทำการควบคุม P-f Droop Control ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 3 หน่วยแล้ว จะสังเกตเห็นว่ากำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 (PQ1) และ 2 (PQ2) ในรูปที่ 3.15 จะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยซึ่งเป็นผลจาก P-f Droop Control ซึ่งจะทำให้ความถี่กำลังไฟฟ้าของระบบมีการเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้นตามไปด้วยดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของระบบก่อนการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน

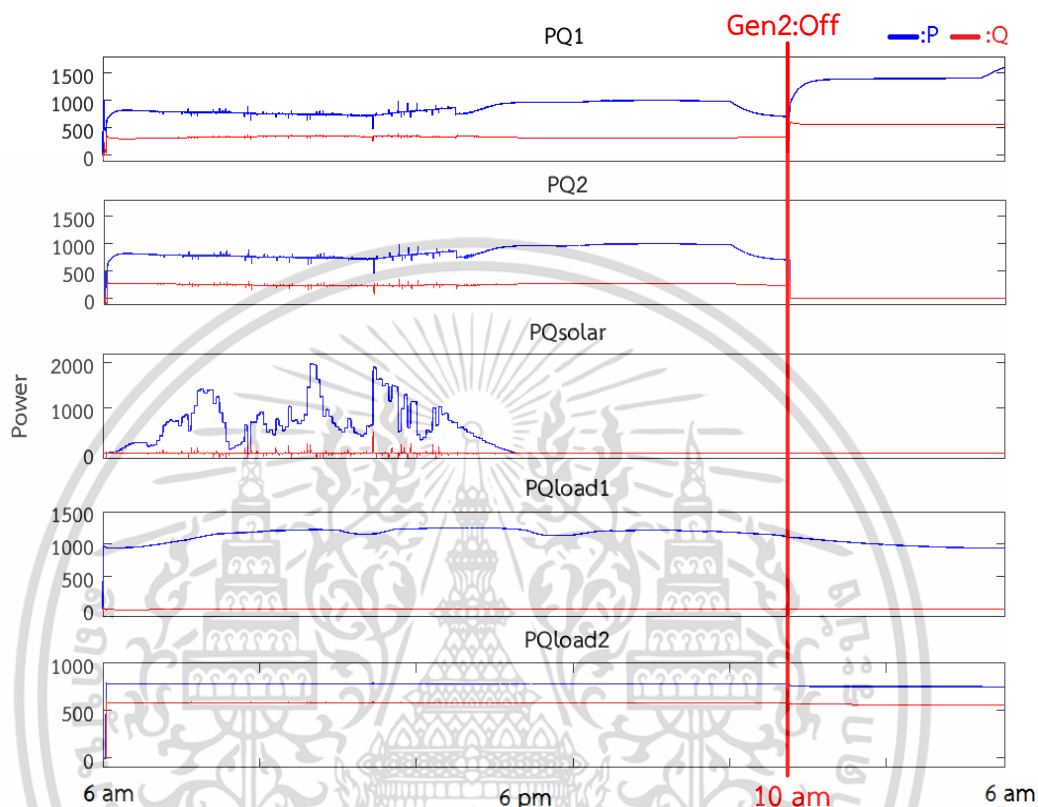


รูปที่ 3.16 ความถี่ไฟฟ้ากำลังก่อนเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน

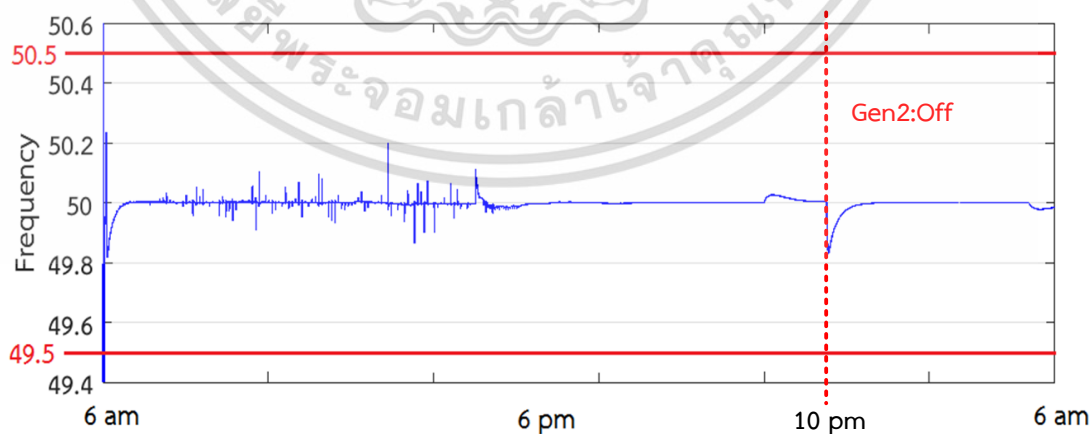
เมื่อทำการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงานให้กับระบบไมโครกริด การผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2 หรือ PQ1 และ 2 จะมีความสม่ำเสมอราบเรียบมากขึ้นดังรูปที่ 3.17 ความถี่กำลังไฟฟ้าของระบบมีความผันผวนน้อยลงหลังจากการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน โดยไม่เกินค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน หรืออยู่ในช่วงไม่เกิน  $\pm 0.5$  Hz ดังรูปที่ 3.18 เนื่องจากการทดแทนด้วยพลังงาน Pfast ซึ่งทดแทนด้วยความรวดเร็วในช่วงที่เกิดการผันผวนของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในระยะเวลานั้นๆ

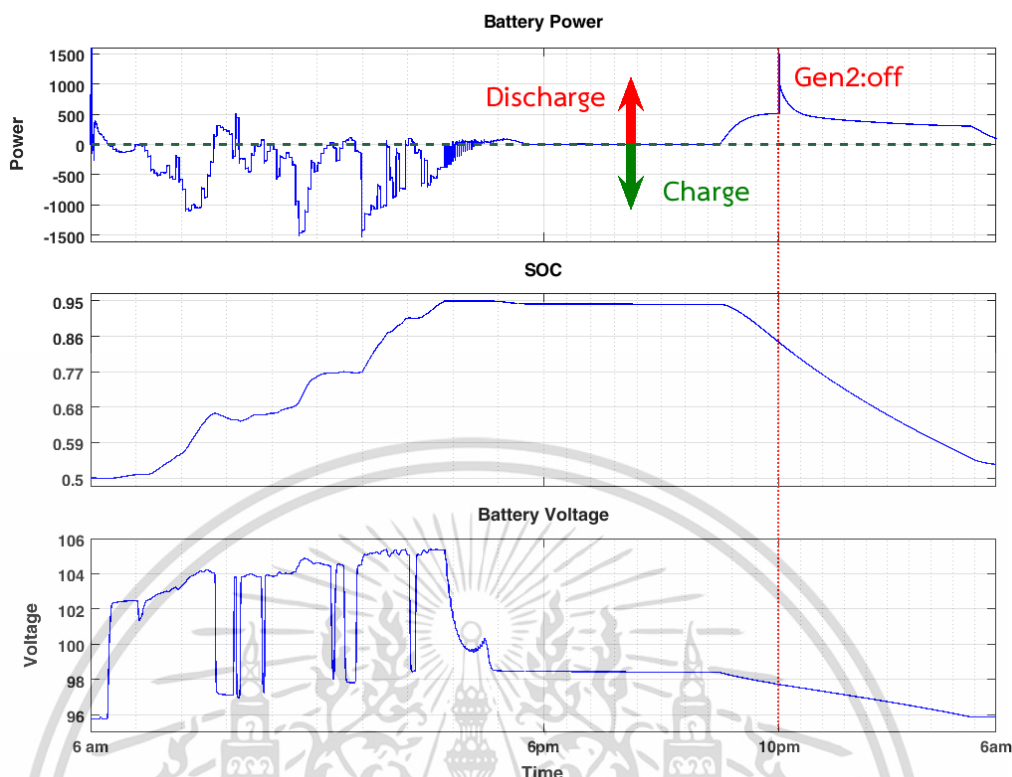


รูปที่ 3.17 กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของระบบหลังการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 3.18 ความถี่ไฟฟ้ากำลังหลังเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

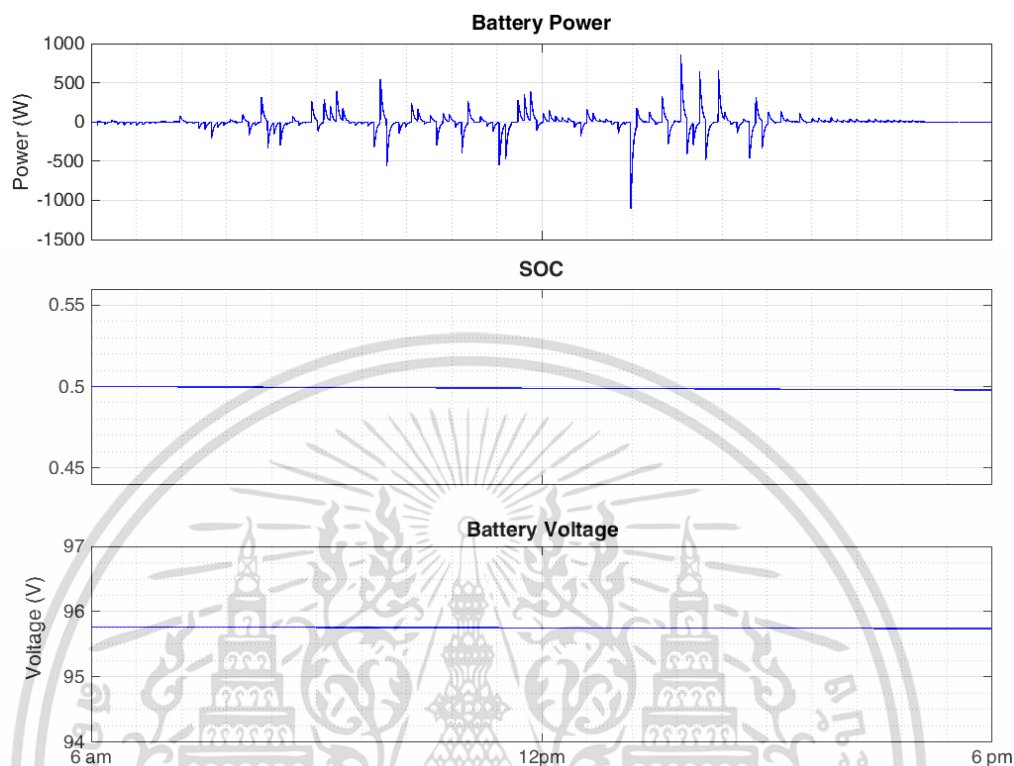


รูปที่ 3.19 ผลลัพธ์การอัดและคายประจุในแบตเตอรี่

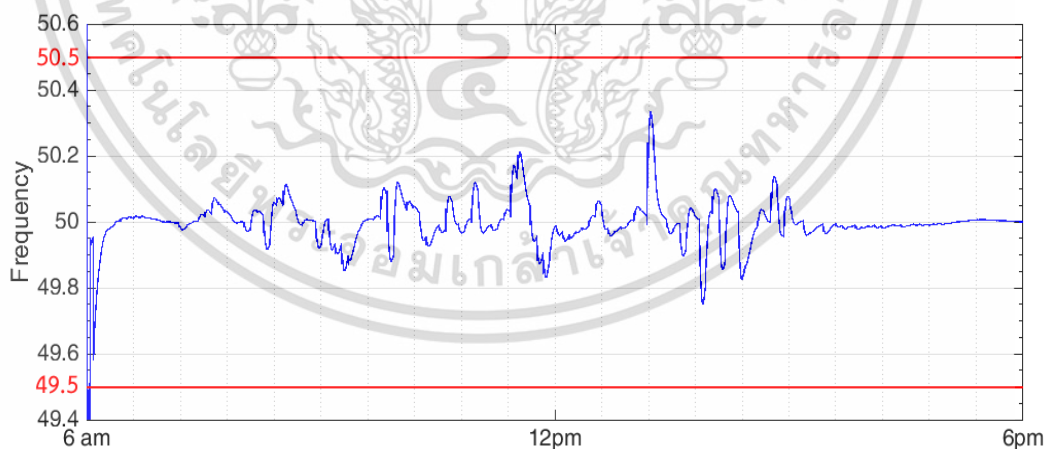
กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะถูกแสดงดังรูปที่ 3.19 (กราฟบนสุด) โดยหากกำลังไฟฟ้ามากกว่าศูนย์จะเป็นการคายประจุออกจากแบตเตอรี่เพื่อจ่ายให้กับระบบ และหากน้อยกว่าศูนย์จะเป็นการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ ในการจำลองกำหนดให้ SOC เริ่มต้นอยู่ที่ 50% และ เมื่อดวงอาทิตย์ SOC จะต้องไม่ต่ำกว่า 95% กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะถูกใช้ในตอนกลางคืนเพื่อทดแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ 2 เมื่อความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดรวมลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนด แรงดันของแบตเตอรี่จะอยู่ในช่วง 96-106 V โดยแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วที่ใช้ ต่ออนุกรมด้วยกัน 8 หน่วย การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเกิดจากการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ตามความสัมพันธ์ที่นำเสนอไว้ในหัวข้อ 3.1.2

เมื่อทำการทดลองใช้กำลังไฟฟ้าคำสั่งเพียง Pfast จะได้ผลของการอัดและคายประจุดังรูปที่ 3.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสถานะประจุเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในขณะที่มีความผันผวนทางความถี่เกิดขึ้นตลอดทั้งวัน แต่ก็ยังสามารถใช้ลดความผันผวนทางความถี่ของระบบให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอยู่ได้ แต่จะลดได้เพียงความผันผวนทางความถี่ที่เป็นองค์ประกอบความถี่สูงเพียงเท่านั้น จึงยังมีความผัน

ผวนทางความถี่ที่เป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำอยู่เล็กน้อย จึงจำเป็นที่จะต้องมีการใช้กำลังไฟฟ้าคำสั่ง Pslow ควบคุมกันไป เพื่อให้ลดความผันผวนได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ดังเช่นรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 ผลลัพธ์การอัดและคายประจุในแบตเตอรี่เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าคำสั่งเพียง Pfast



รูปที่ 3.21 ความถี่ไฟฟ้ากำลังหลังเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าคำสั่งเพียง Pfast

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

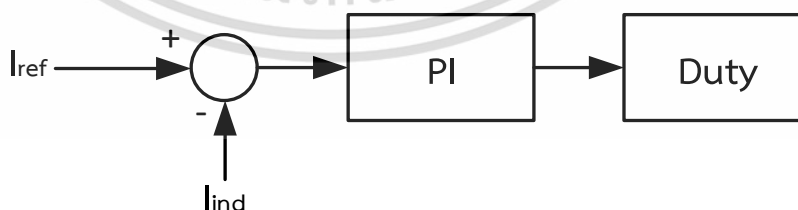
## 3.2 การจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM

การออกแบบและพัฒนางจรแปลงผันกำลังสำหรับการเชื่อมต่อแบตเตอรี่จะเริ่มจากการจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อให้สามารถกำหนดและเลือกใช้อุปกรณ์และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ โดยจะทำการออกแบบวงจรและกำหนดค่าให้อุปกรณ์ก่อน แล้วจึงสร้างระบบควบคุมที่เหมาะสมต่อไป โดยจะแบ่งการศึกษาเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง ช่วงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ และผลการรวมวงจรแปลงผันกำลังเข้าด้วยกัน

### 3.2.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

เนื่องจากแบตเตอรี่จำนวน 8 หน่วยที่มีอยู่ไม่สามารถแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220V ได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางเพื่อยกระดับแรงดันให้เป็น 400V และนำไปยังวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับได้ต่อไป อีกทั้งยังสามารถรับกำลังไฟฟ้ากลับเข้ายังแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

ในการควบคุมจะสามารถควบคุมได้ 2 วิธีคือ 1.ควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่มีค่าคงที่ 2.ควบคุมให้แรงดันที่ดิวดี (DC link) มีค่าคงที่ โดยแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน คือ ถ้าหากเราควบคุมให้แรงดันที่แบตเตอรี่มีค่าคงที่จะส่งผลให้แรงดันที่ดิวดีมีค่าคงที่ ซึ่งจะส่งผลให้การควบคุมอินเวอร์เตอร์ทำได้ยากแต่แบตเตอรี่ก็จะรับภาระน้อยลง แต่ถ้าหากควบคุมให้แรงดันที่ดิวดีมีค่าคงที่จะง่ายในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ แต่แบตเตอรี่ก็จะรับภาระหนักยิ่งขึ้นแทนไปด้วย ซึ่งในที่นี่จะเลือกวิธีที่ควบคุมแรงดันที่ดิวดีให้มีค่าคงที่และทำการจำลองผลการทดลองในโปรแกรม PSIM โดยใช้หลักการการควบคุมกระแส (Current control) ซึ่งจะมีบล็อกไดอะแกรมการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.22 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมโดยใช้กระแส

ซึ่งในการจำลองผลการทดลองจะกำหนดให้แรงดันดีซีลิงค์ มีค่าเท่ากับ 400 โวลต์ ซึ่งในช่วงคองที่จะมีค่าแรงดันที่แบตเตอรี่เท่ากับ 100 โวลต์ และกำหนดให้ประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 1 จะได้

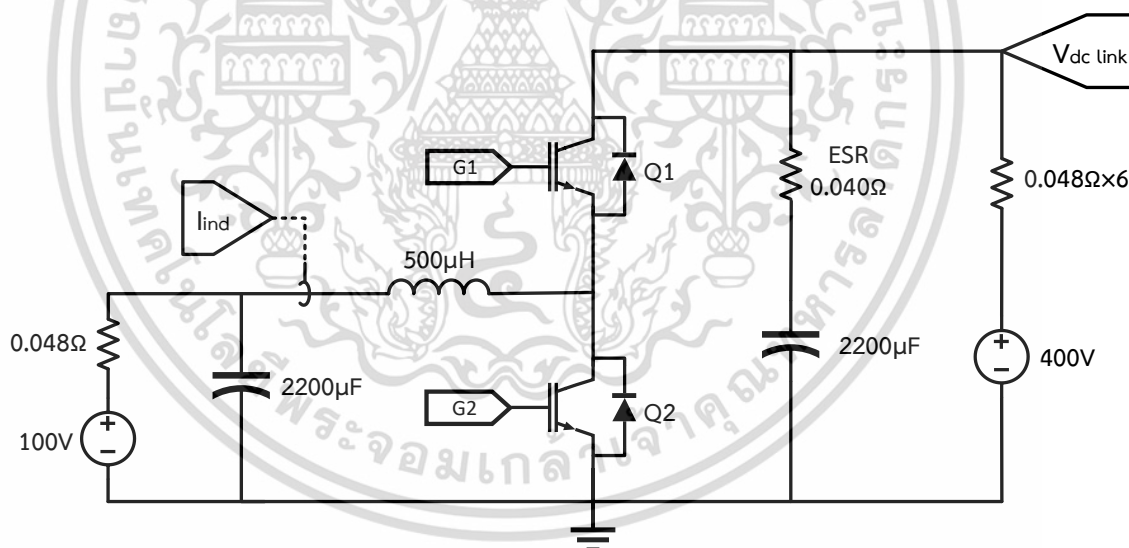
$$P_{Batt} = P_{DC} \quad (3.8)$$

$$V_{Batt}I_{Batt} = V_{DC}I_{DC} \quad (3.9)$$

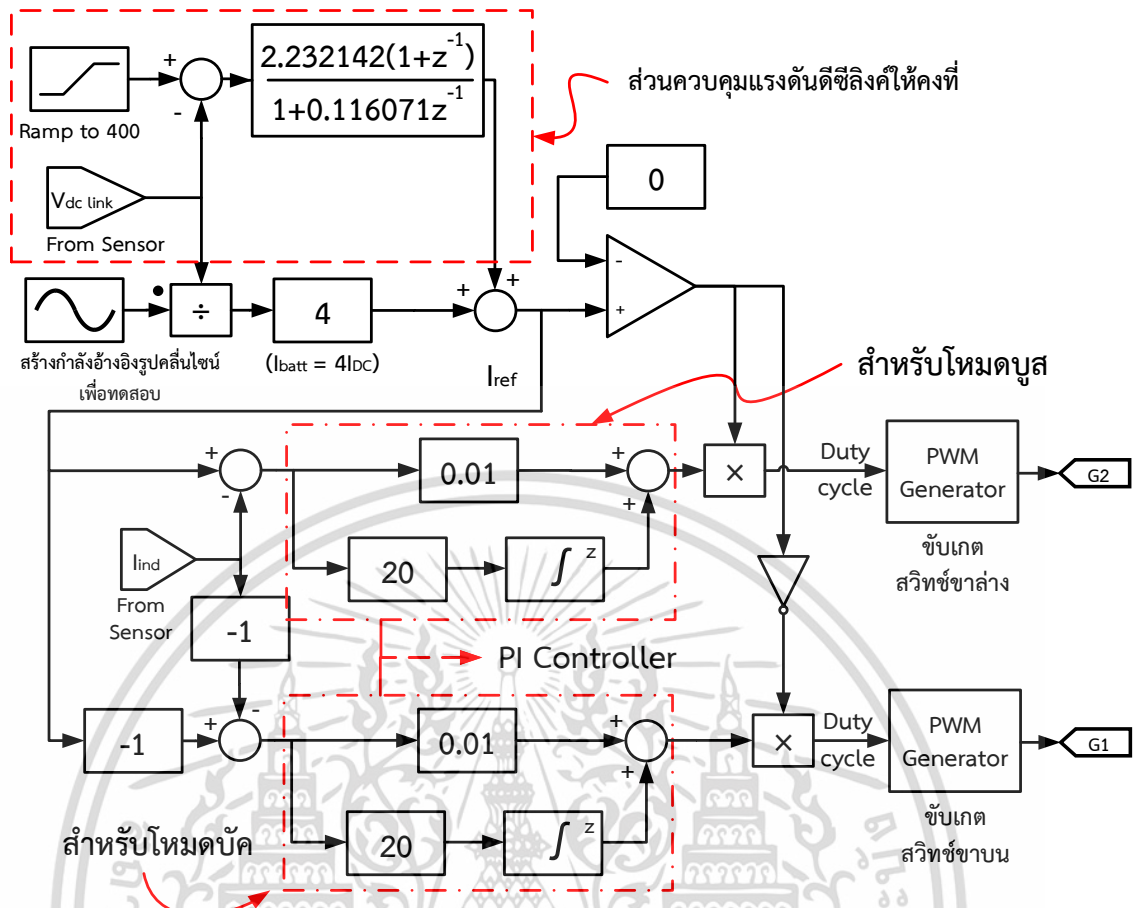
$$I_{Batt} = 4I_{DC} \quad (3.10)$$

จะได้ว่าค่ากระแสที่แบตเตอรี่มีค่าเป็น 4 เท่าของกระแสที่ดีซีลิงค์ โดยในรูปที่ 3.24 ในส่วนวงจรควบคุมจึงมีการคูณ 4 ที่ส่วนของการสร้างกระแสอ้างอิงจากกำลังไฟฟ้าคำสั่งเพื่อในการเอาไปคำนวณค่ากระแสที่ดีซีลิงค์จะเท่ากับกระแสที่แบตเตอรี่ เพื่อจะได้ส่งผลให้แรงดันที่ดีซีลิงค์เป็นไปตามเงื่อนไขการควบคุมที่อธิบายข้างต้นและจะได้ค่าที่ส่งเข้าวงจรควบคุมต่อไป

การจำลองผลโดยใช้โปรแกรม PSIM จะสร้างวงจรกำลังตามรูปที่ 3.23 โดยมีวงจรควบคุมตามรูปที่ 3.24

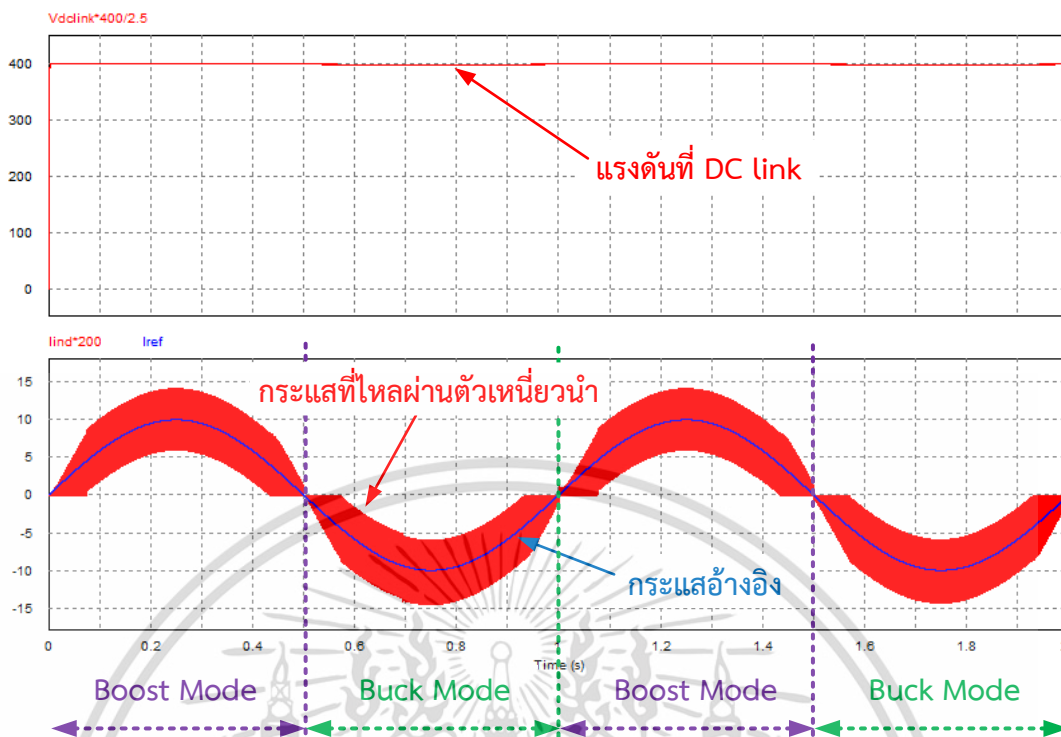


รูปที่ 3.23 วงจรกำลังสำหรับการจำลองผลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง



รูปที่ 3.24 วงจรควบคุมสำหรับการจำลองผลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

ภายในวงจรควบคุมรูปที่ 3.24 นี้ จะใช้หลักการในการเปรียบเทียบกระแสอ้างอิงกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จากนั้นจึงนำค่าที่เปรียบเทียบแล้วไปเข้าลูการควบคุมแบบพีไอ ซึ่งสามารถควบคุมค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำให้สามารถเป็นไปตามกระแสอ้างอิงได้ โดยจะทำการทดสอบโดยการสร้างสัญญาณกำลังไฟฟ้าอ้างอิงรูปคลื่นไซน์เพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่มีทั้งด้านบวกและลบทำให้สามารถเห็นการทำงานในโหมตเพิ่มและลดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสามารถเป็นไปตามกระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้องดังรูปที่ 3.25



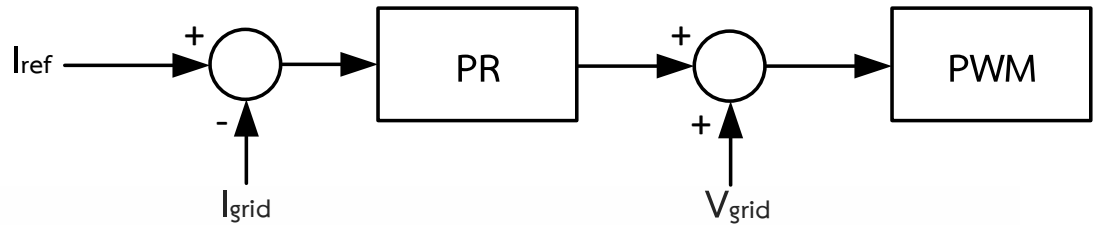
รูปที่ 3.25 ผลการจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสองทิศทาง

จากรูปที่ 3.25 แสดงผลการทดลองข้างต้นเป็นการควบคุมโดยใช้กระแสอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1 Hz เพื่อทดสอบว่าในช่วงที่รูปคลื่นไซน์มีค่ามากกว่า 0 จะจำลองให้วงจรทำงานในโหมดเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และในช่วงที่รูปคลื่นไซน์มีค่าน้อยกว่า 0 จะจำลองให้วงจรทำงานในโหมดลดแรงดันไฟฟ้างดังแสดงในรูปที่ 3.25 แล้วจะพบว่าค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสามารถเป็นไปตามค่ากระแสอ้างอิงได้ดังรูปที่ 3.25 ในขณะที่ยังสามารถรักษาแรงดันที่ดิสซิ่งค์ให้มีค่าคงที่ที่ 400 Vdc ได้อย่างถูกต้อง

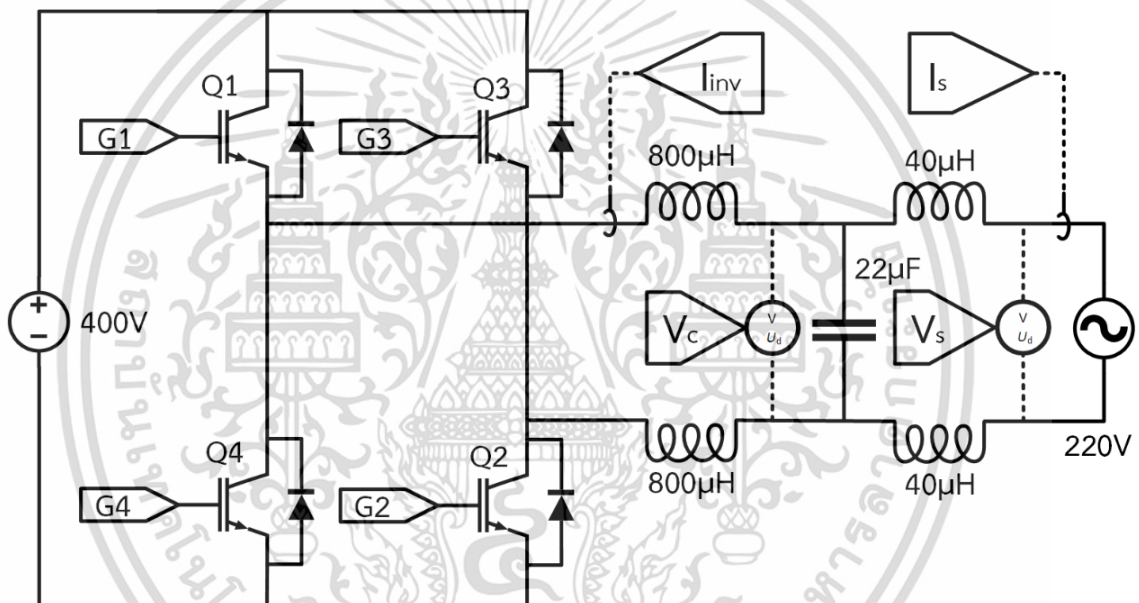
### 3.2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ

การจำลองผลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยโปรแกรม PSIM จะใช้หลักการควบคุมกระแสในการควบคุม ซึ่งหลักการจะคล้ายกับการจำลองผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง นั่นคือเปรียบเทียบผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิงกับค่ากระแสที่ไหลสู่กริดดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.26 โดยในการจำลองผลจะทำการสร้างวงจรกำลังสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับตามรูปที่ 3.27 แลวงจร

ควบคุมตามรูปที่ 3.28 โดยจะใช้งานควบคุมกับวงจรเฟสล็อกูปที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 3.29 เมื่อทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM จะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3.30

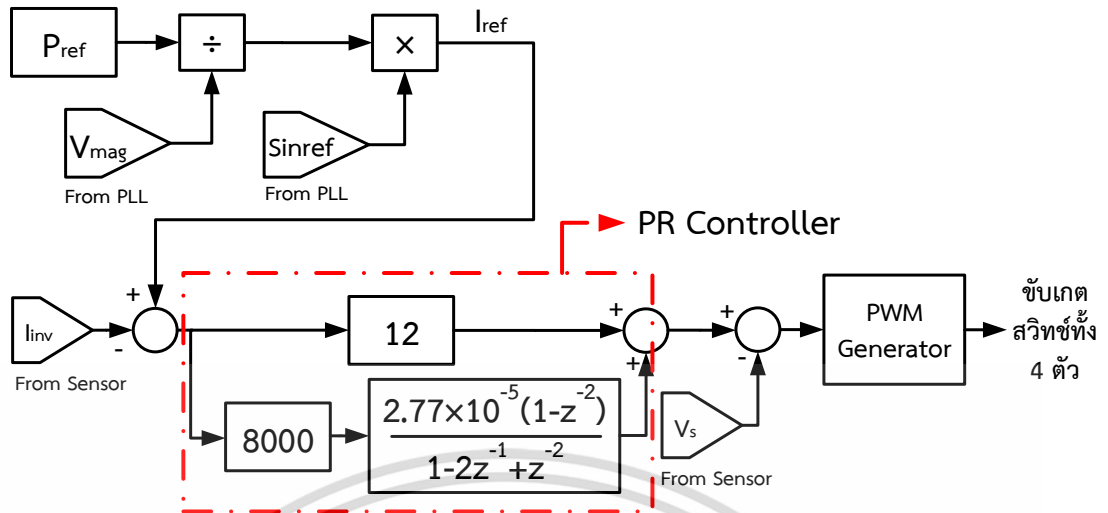


รูปที่ 3.26 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมโดยใช้กระแสและนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันกริด

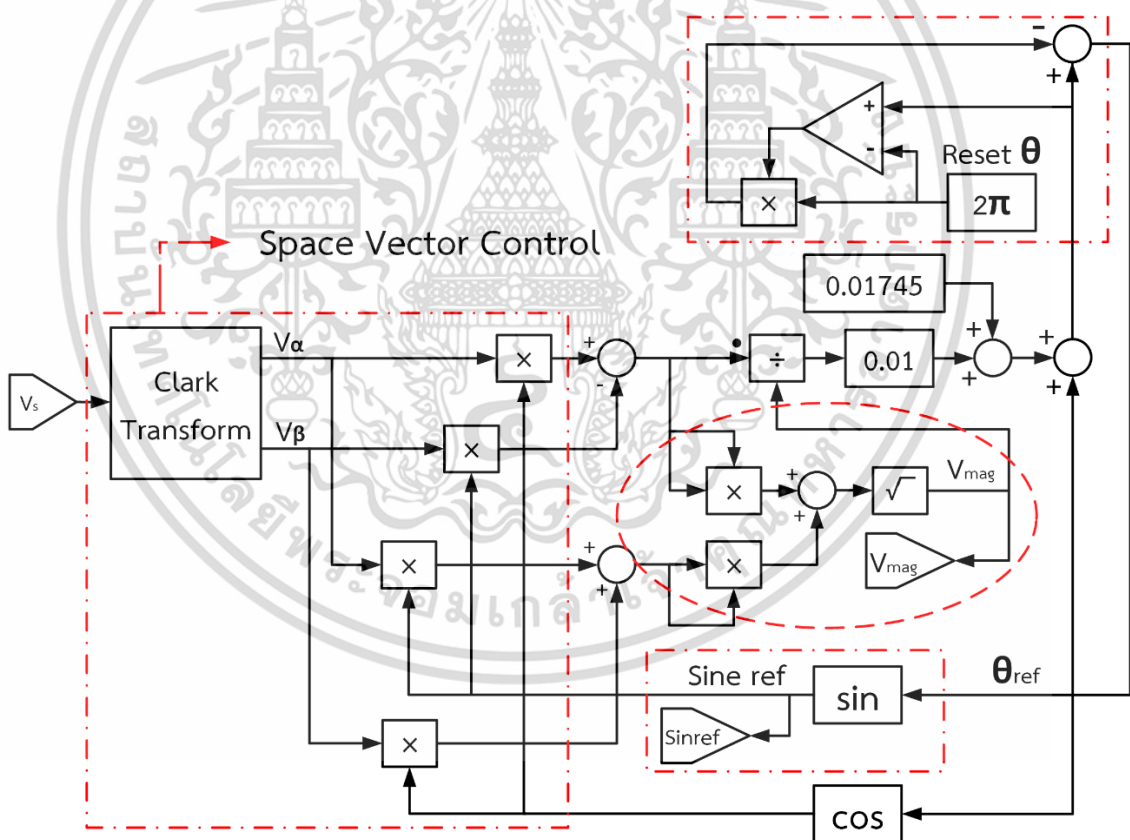


รูปที่ 3.27 วงจรกำลังสำหรับการจำลองผลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

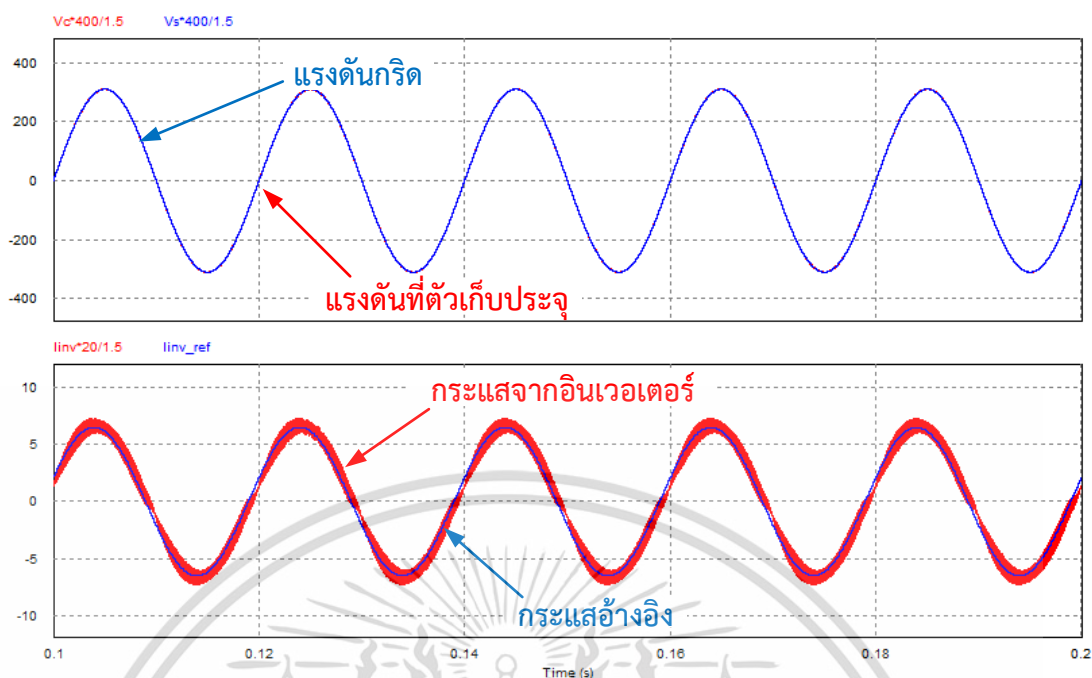


รูปที่ 3.28 วงจรควบคุมสำหรับการจำลองผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ



รูปที่ 3.29 วงจรเฟสล็อก (Phase Locked loop) สำหรับการจำลองผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเฟสเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

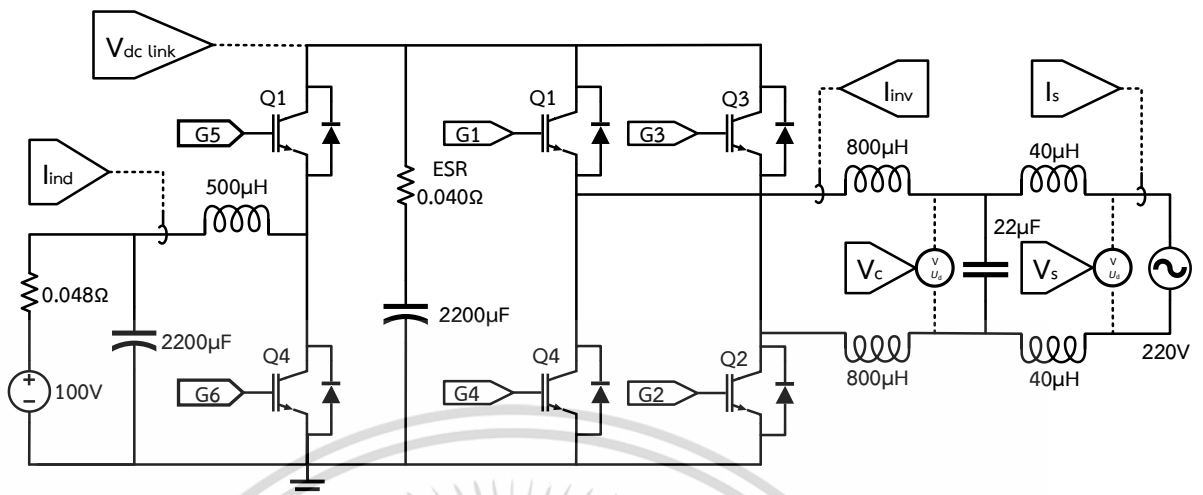


รูปที่ 3.30 ผลการจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ

จากรูปที่ 3.30 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุในวงจรรองความถี่สูงซึ่งเป็นแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์กับแรงดันที่กริด และกระแสที่ไหลเข้าสู่กริดกับกระแสอ้างอิงที่สถานะคงตัวผลการจำลองวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ จะเห็นได้สามารถควบคุมให้ค่ากระแสที่ไหลเข้าสู่กริดเท่ากับค่ากระแสอ้างอิงที่ต้องการได้

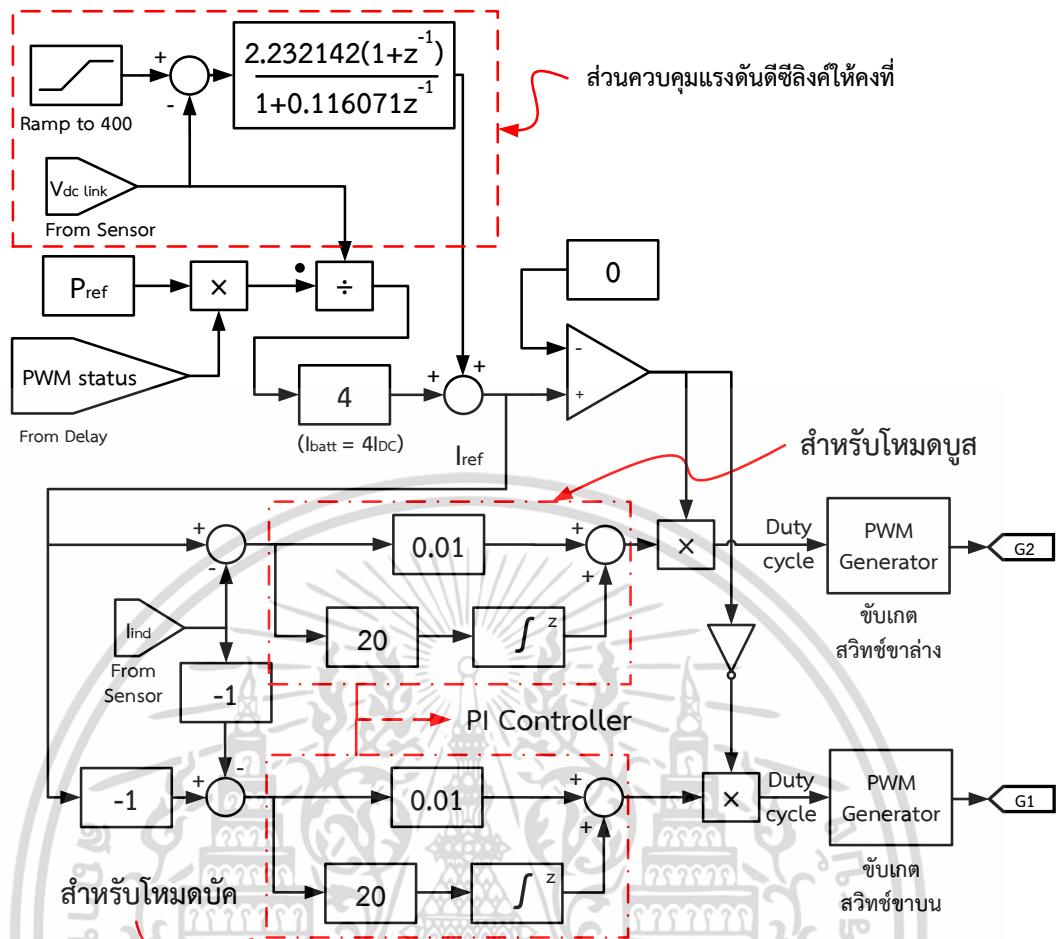
### 3.2.3 ผลการรวมวงจรแปลงผันกำลังเข้าด้วยกัน

เมื่อทำการรวมวงจรแปลงผันกำลังทั้ง 2 เข้าด้วยกัน จะสร้างวงจรกำลังของวงจรแปลงผันกำลังได้ตามรูปที่ 3.31 และสร้างวงจรควบคุมได้ตามรูปที่ 3.32 และรูปที่ 3.33 ซึ่งเป็นวงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง และวงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ตามลำดับ และจำเป็นต้องมีวงจรเฟสล็อกเพื่อทำการซิงค์แรงดันของอินเวอร์เตอร์กับแรงดันไฟฟ้าจากกริดซึ่งสร้างตามรูปที่ 3.34 แต่เนื่องจากการเริ่มต้นวงจรกำลังจำเป็นต้องมีการรอให้แรงดันที่ดีซีลิงค์มีค่าที่เหมาะสมและต้องรอให้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์สามารถซิงค์กับแรงดันไฟฟ้าที่กริดเสียก่อนด้วยวงจรเฟสล็อกจึงต้องมีการใส่วงจรดีเลย์การทำงานของตัวขับเคลื่อนสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งสร้างด้วย counter ตามรูปที่ 3.35



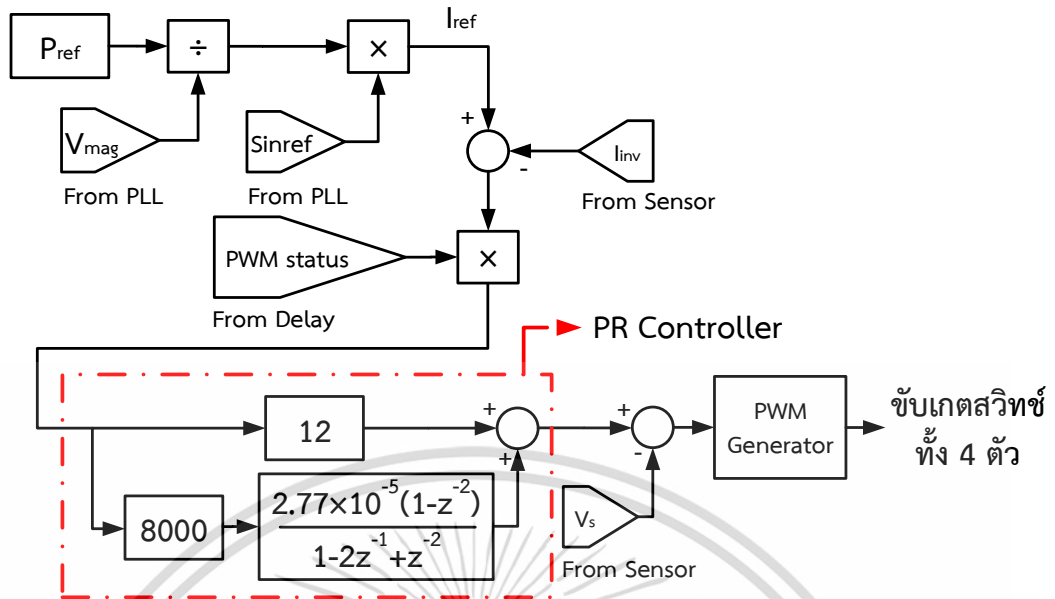
รูปที่ 3.31 วงจรกำลังสำหรับการจำลองผลของการรวมวงจรแปลงผันกำลังทั้งสองเข้าด้วยกัน

จากรูปที่ 3.31 ทางฝั่งซ้ายจะจำลองเป็นส่วนของแบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อกับกริดซึ่งอยู่ทางฝั่งขวา โดยถ้าหากถ่ายโอนพลังงานจากแบตเตอรี่ไปกริดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางจะทำงานในโหมดบูสต์แรงดันไฟฟ้าขึ้นจาก 100 Vdc ไปที่ 400 Vdc ตรงดิซีลิงค์ และหลังจากนั้นอินเวอร์เตอร์จะทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและผ่านวงจรกรองเพื่อเข้าสู่กริด 220 Vac ในทางตรงข้ามกันถ้าหากจะถ่ายโอนพลังงานจากกริดไปสู่แบตเตอรี่ก็จะให้อินเวอร์เตอร์แปลงแรงดันไฟฟ้าจากกริดที่ 220 Vac เข้าสู่ดิซีลิงค์ 400 Vdc และหลังจากนั้นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางจะทำงานในโหมดบัคเพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้ลดลงเหลือ 100 Vdc เพื่อไปชาร์จเก็บในแบตเตอรี่

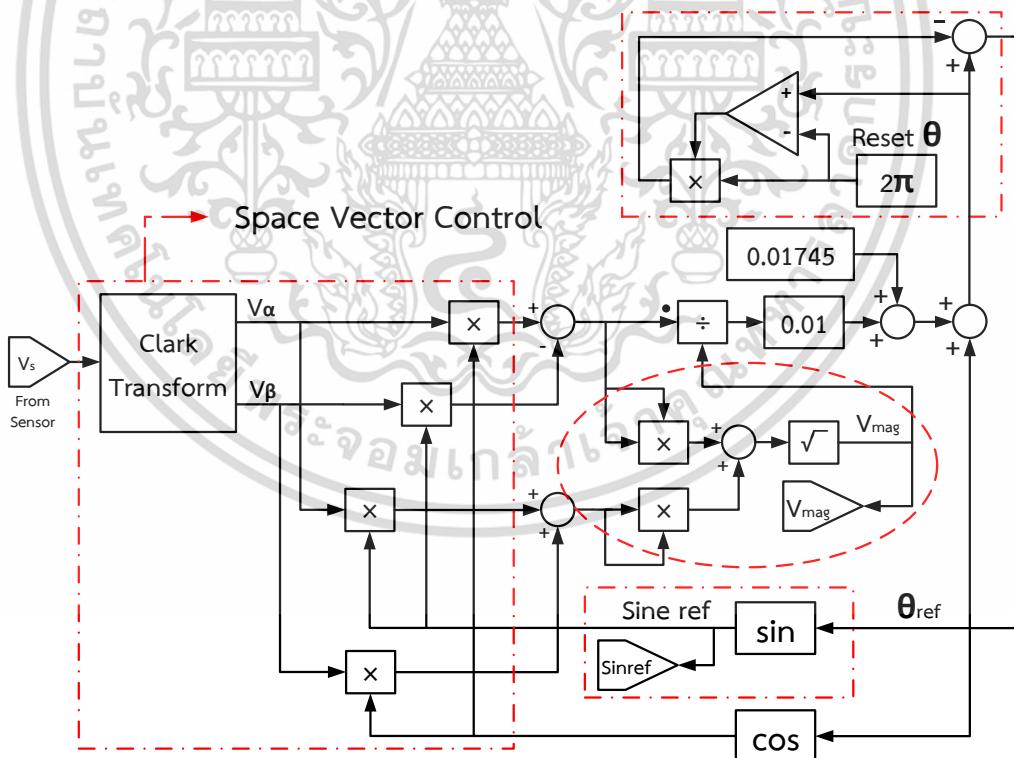


รูปที่ 3.32 วงจรควบคุมสำหรับการจำลองผลในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

จากรูปที่ 3.32 แสดงวงจรควบคุมโดยในวงจรควบคุมนี้จะใช้หลักการสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อเทียบกับแรงดันดีซีลิงค์เพื่อรักษาแรงดันดีซีลิงค์ให้มีค่าคงที่ป้องกันการควบคุมอินเวอร์เตอร์ต่อไป โดยจะได้ค่าความผิดพลาด จากนั้นนำค่าที่ได้ไปบวกเข้ากับค่ากระแสย้อนกลับที่ได้มาจากการนำกำลังไฟฟ้าที่ได้มาจากการส่งการมาหารด้วยแรงดันไฟฟ้าของดีซีลิงค์ จากนั้นนำไปเข้าวงจรควบคุมแบบพีไอและจะได้อัตราส่วนดิวิตีออกมาเพื่อเอาไปใช้สร้างสัญญาณขับเกตในวงจรกำลังสำหรับโหมตบู้สต์และโหมตบู้ดต่อไป

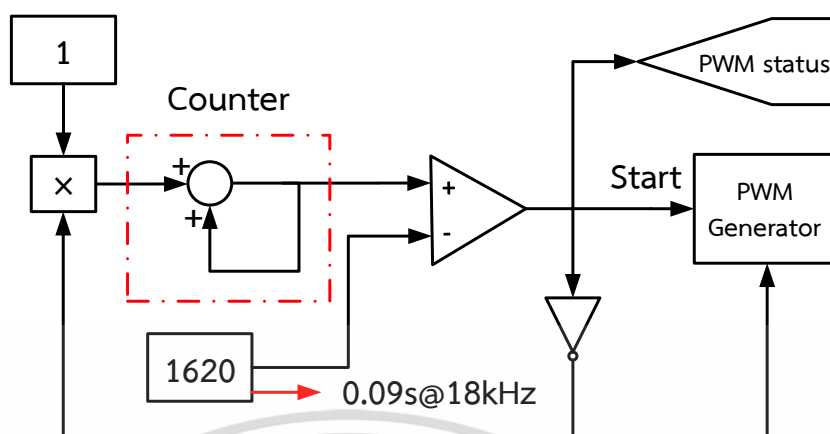


รูปที่ 3.33 วงจรควบคุมสำหรับการจำลองผลในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ



รูปที่ 3.34 วงจรเฟสล็อกสำหรับจำลองผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ

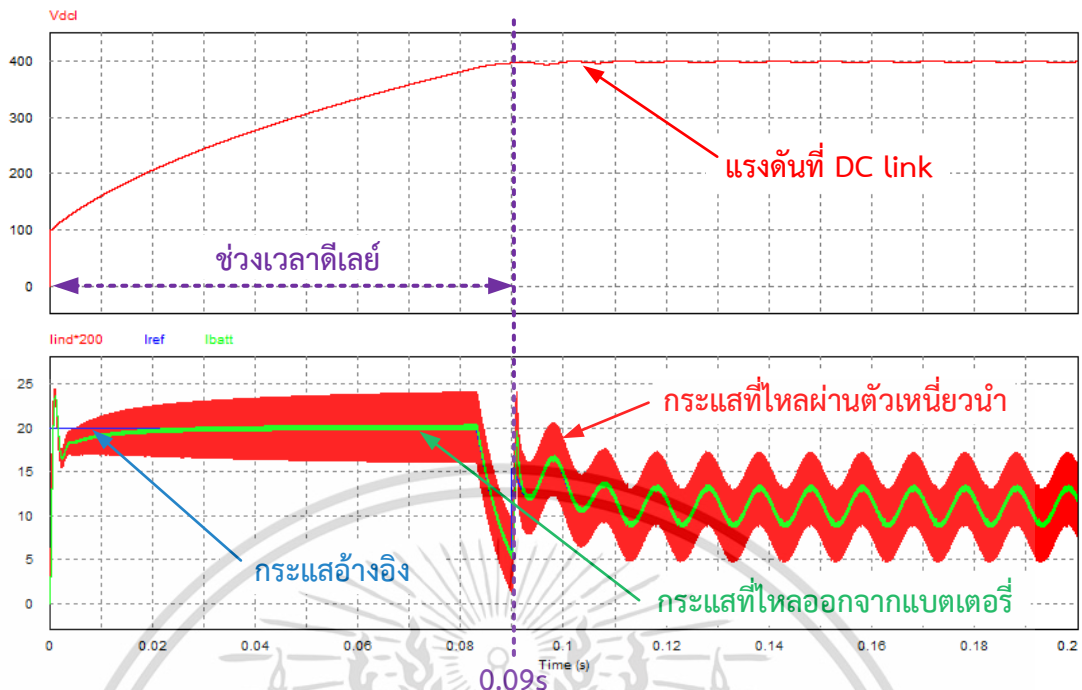
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 วงจร Delay การทำงานสำหรับการจำลองผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสสลับ

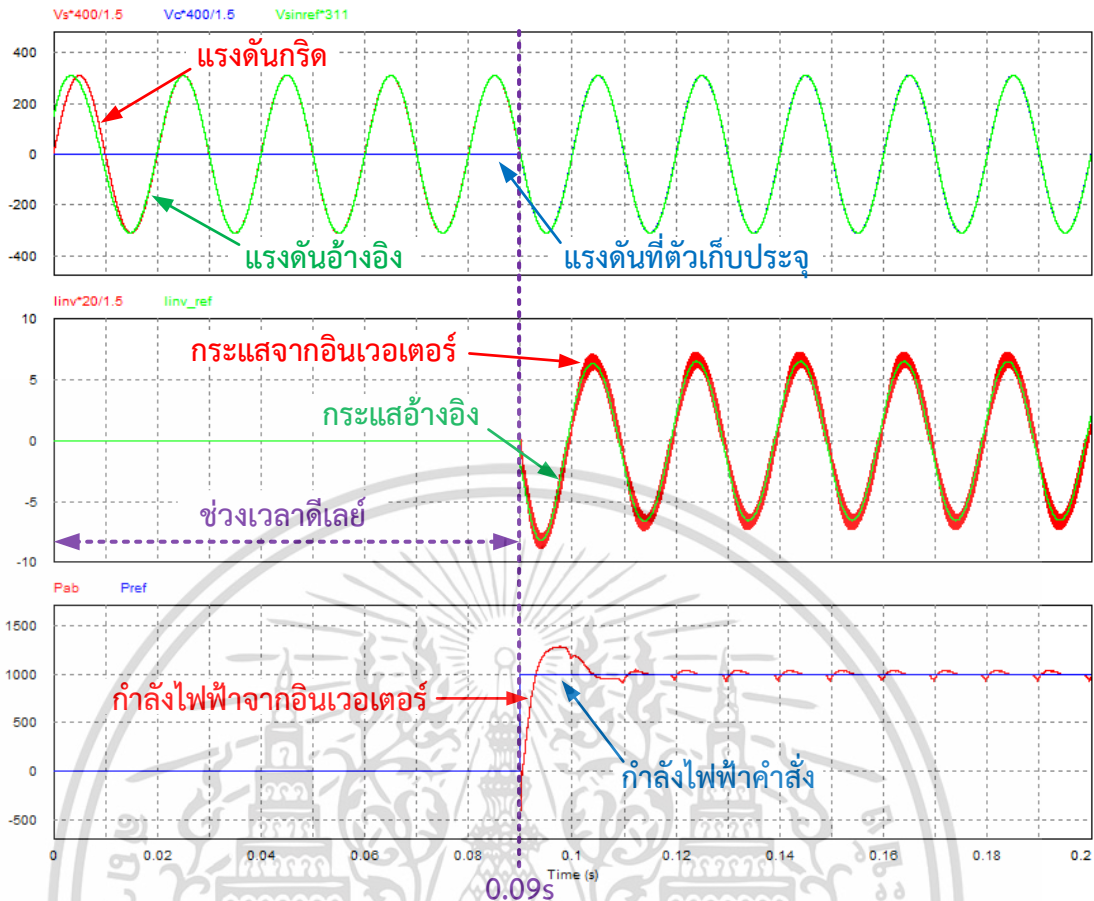
จากรูปที่ 3.33 แสดงวงจรควบคุมโดยในวงจรควบคุมนี้จะให้หลักการเช่นเดียวกับรูปที่ 3.32 นั่นคือ จะนำค่ากำลังไฟฟ้าที่คำนวณมาจากการสั่งการไปหารด้วยขนาดของแรงดันไฟฟ้าของแรงดันขาออกเพื่อจะได้ค่ากระแสสำหรับมาใช้ในวงจรควบคุม และนำกระแสที่ไปบวกกับค่ากระแสชดเชยที่ได้จากตัวเก็บประจุเพื่อไปเข้าวงจรควบคุมแบบฟีดแบ็ค และหลังจากนั้นจะได้ค่าเพื่อมาใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อใช้ในการขับสวิตช์ของวงจรกำลังต่อไป และในรูปที่ 3.34 จะเป็นวงจรเฟส ล็อคคูลูปซึ่งจะเป็นการควบคุมให้เฟสของแรงดันขาออกตรงกับเฟสของแรงดันที่กริดเพื่อใช้ในการซิงค์ กันระหว่างอินเวอร์เตอร์กับกริด โดยในวงจรเฟสล็อคคูลูปจะเป็นการนำค่าแรงดันจากกริดมาแปลงเป็น แกนดีและแกนคิวโดยใช้หลักการของสเปซเวกเตอร์ และใช้ค่าที่ได้จากการแปลงมาเพื่อหาค่าแอมพิ จูดของแรงดันมาเพื่อใช้ในการควบคุมให้เฟสของแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ตรงกับแรงดันที่กริด และในรูป ที่ 3.35 เป็นส่วนของวงจรดีเลย์ซึ่งทำหน้าที่ดีเลย์รอเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ DC link มีค่าที่เหมาะสม รวมถึงให้เฟสของแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ตรงกับเฟสของแรงดันที่กริดก่อนจากนั้นค่อยสั่งให้อินเวอร์เตอร์ ทำงานและเชื่อมต่อเข้ากับกริดไฟฟ้าต่อไป

ผลที่ได้จากการจำลองวงจรแปลงผันกำลังทั้งสอง จะได้ผลการจำลองในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง ดังรูปที่ 3.36 และผลการจำลองในส่วนของ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.36 ผลการจำลองในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

จากรูปที่ 3.36 แสดงผลการจำลองผลในโปรแกรม PSIM ซึ่งจำลองในกรณีถ่ายโอนพลังงานจากแบตเตอรี่เข้าสู่กริด โดยจะมีการกำหนดช่วงเวลาดีเลย์เพื่อรอให้แรงดันที่ดิสคิปลิ่งมีค่าถึง 400Vdc ก่อน จึงเริ่มสั่งให้อินเวอร์เตอร์ทำงานและเชื่อมต่อเข้าสู่กริดไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบควบคุมนี้สามารถรักษาระดับแรงดันที่ดิสคิปลิ่งไว้ที่ 400 Vdc และสามารถควบคุมให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสามารถเกาะกับกระแสอ้างอิงที่ต้องการได้ และจะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแบตเตอรี่นั้นมีระลอกคลื่นของกระแสน้อยกว่าระลอกคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำ เป็นผลมาจากการต่อตัวเก็บประจุรอมแบตเตอรี่ที่จะคอยช่วยสนับสนุนการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่สูง อีกทั้งยังคอยลดภาระของแบตเตอรี่ เนื่องจากการควบคุมแรงดันดิสคิปลิ่งให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา เพื่อให้การควบคุมอินเวอร์เตอร์ง่ายขึ้นได้อีกด้วย



รูปที่ 3.37 ผลการจำลองในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงเป็นกระแสสลับ

จากรูปที่ 3.37 แสดงผลการจำลองในส่วนของวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยแสดงการควบคุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงด้วยวงจรเฟสล็อกที่สามารถควบคุมให้แรงดันอ้างอิงซิงค์เข้ากับแรงดันที่กริดได้ และแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถทำให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุซึ่งเป็นแรงดันอินเวอร์เตอร์ที่ผ่านการกรองความถี่สูงแล้วเป็นไปตามแรงดันอ้างอิงที่ซิงค์กับแรงดันกริดได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า กระแสที่ไหลออกจากอินเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมให้เป็นไปตามกระแสอ้างอิงได้เมื่อระบบทำซิงค์กับกริดเรียบร้อยแล้ว อีกทั้งยังสามารถควบคุมให้กำลังไฟฟ้าขาออกเป็นไปตามที่กำลังไฟฟ้ามำสั่งที่กำหนดไว้ได้

หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เหมาะสมและระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพเรียบร้อยแล้ว จึงนำไปสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อสร้างระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานและเชื่อมต่อเข้ากับไมโครกริดต่อไป

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

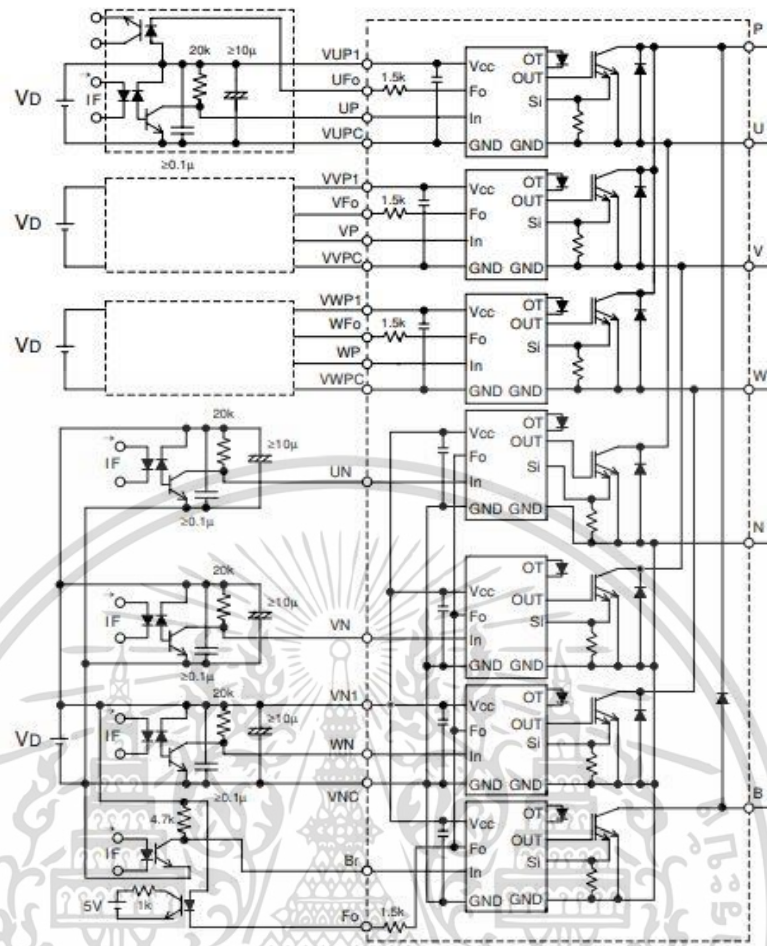
#### 4.1 ผลการสร้างวงจรแปลงผันกำลัง

เมื่อทำการสร้างวงจรแปลงผันกำลังโดยใช้โมดูล IGBT ของ Mitsubishi (PM50RLA120) [8] ที่เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานจำพวกอินเวอร์เตอร์ และการควบคุมมอเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.1 ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ ซึ่งจะต้องมีการสร้างวงจรสำหรับขับเคลื่อนภายในโมดูลตามที่ Datasheet แนะนำไว้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งหลังจากทำการออกแบบและสร้างแผงวงจรแล้วจะได้เป็นดังรูปที่ 4.3

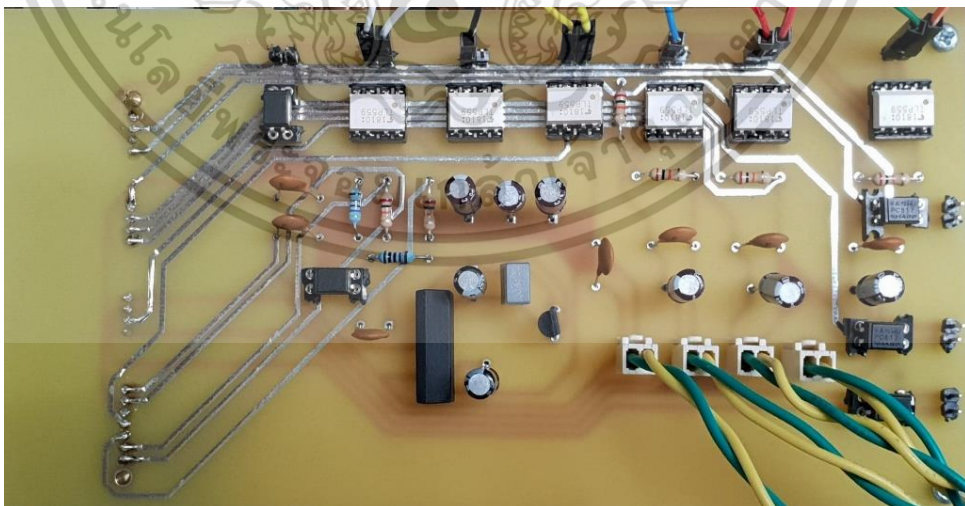


รูปที่ 4.1 โมดูล IGBT ของ Mitsubishi (PM50RLA120)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



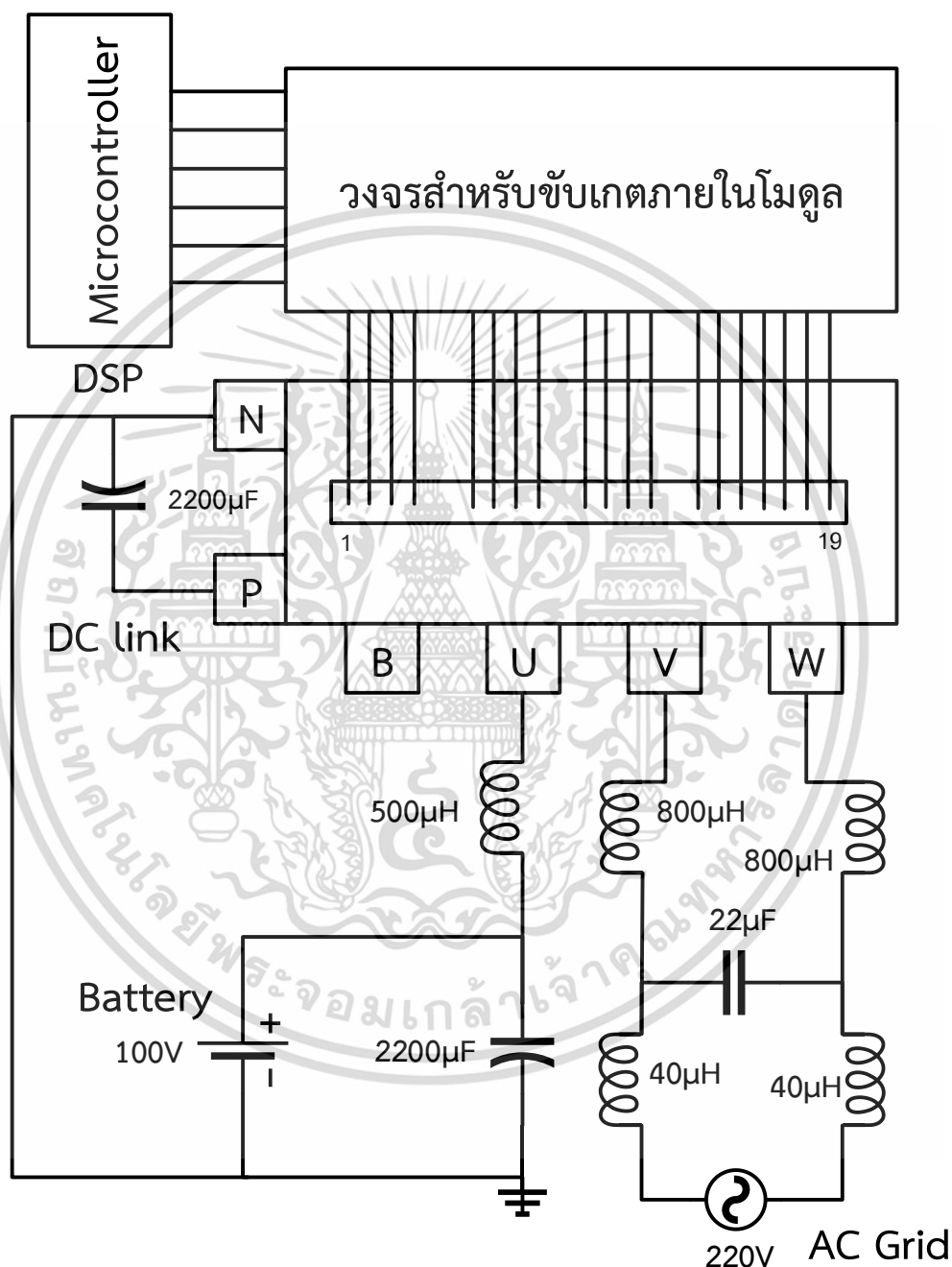
รูปที่ 4.2 วงจรสำหรับขับเคลื่อนภายในโมดูลที่แนะนำไว้ใน Datasheet



รูปที่ 4.3 วงจรสำหรับขับเคลื่อนภายในโมดูล IGBT

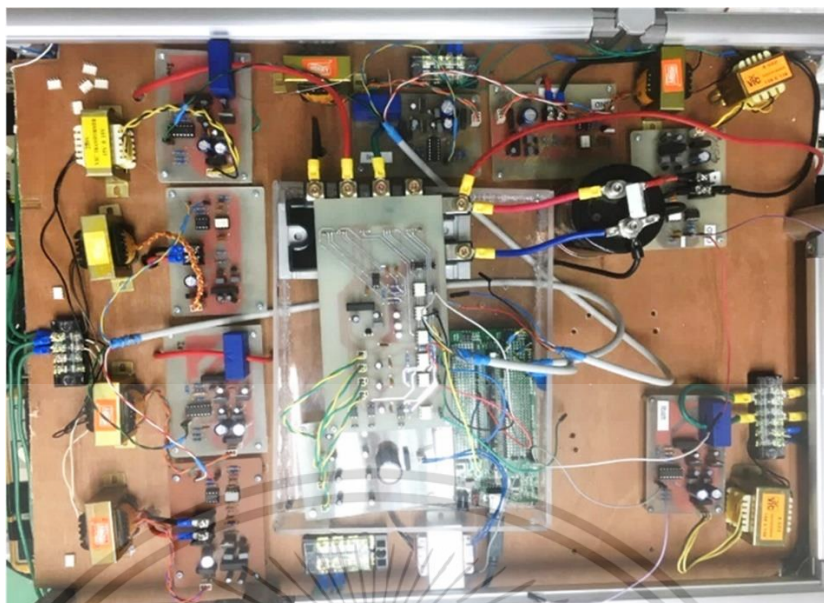
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำแผงวงจรสำหรับขับเคลื่อนไปติดตั้งบนโมดูล IGBT และนำมาเชื่อมต่อตามแผนผังวงจรแปลงผันกำลังดังรูปที่ 4.4 โดยต่อร่วมกับตัวตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.5 เพื่อที่จะอ่านค่าที่วัดได้เข้าไปยังดีเอสพี เพื่อใช้ในการประมวลผลการของวงจรควบคุมต่อไป



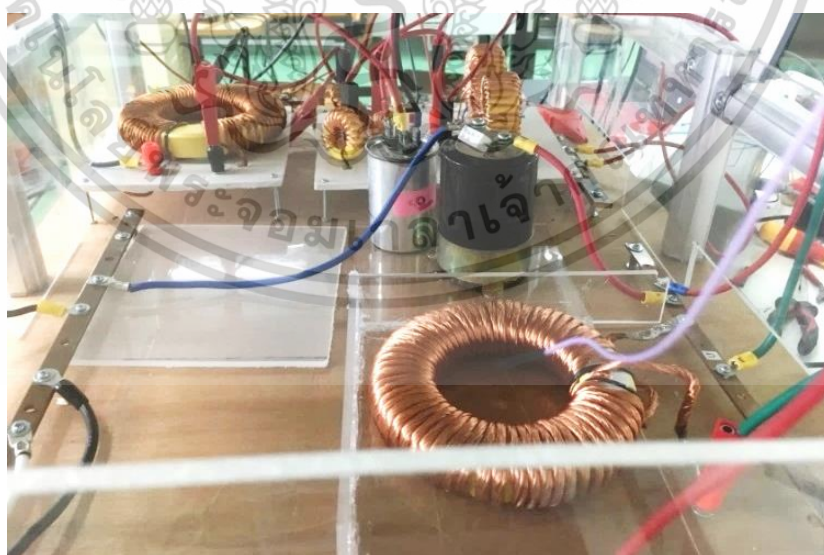
รูปที่ 4.4 แผนผังการต่อวงจรแปลงผันกำลังโดยใช้โมดูล IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 วงจรควบคุมที่มีการต่อตัวตรวจจับกระแสและแรงดัน

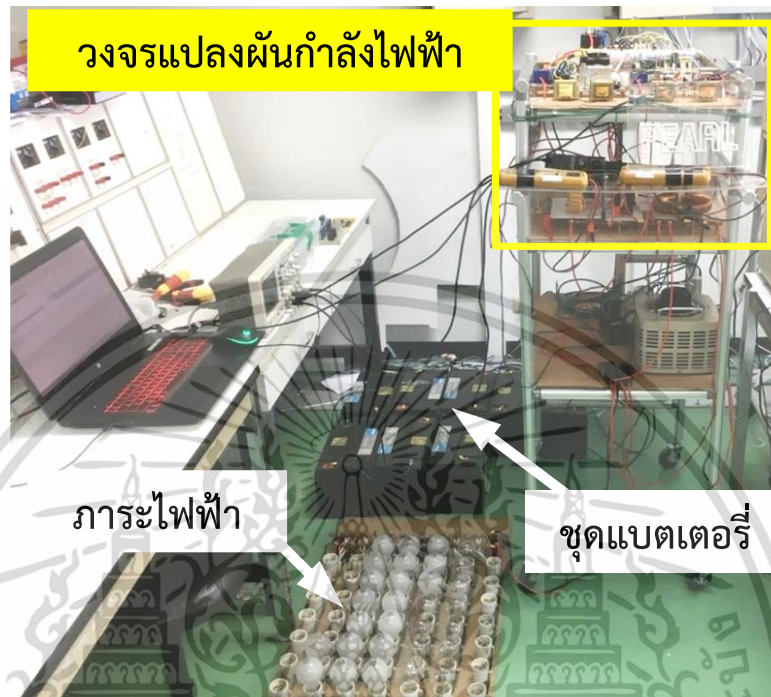
นำค่าความเหนี่ยวนำที่เลือกจากผลการจำลองในโปรแกรม PSIM มาเลือกขนาดแกนเหล็ก และพื้นที่ขดลวดให้มีขนาดตามที่ได้จากการจำลองทั้งด้านวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสองทิศทางและด้านวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ แล้วนำมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันตามแผนผังการทำงานของวงจรได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งในส่วนนี้เป็นส่วนของวงจรกำลัง



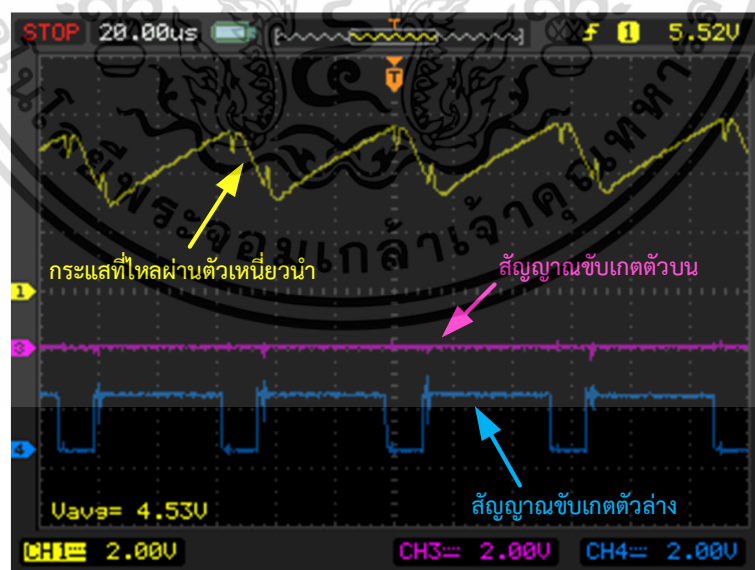
รูปที่ 4.6 วงจรกำลังทั้งในฝั่ง DC-DC และ DC-AC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจึงต่อวงจรแปลงผันเข้ากับแบตเตอรี่และโหลด โดยจัดชุดทดลองดังรูปที่ 4.7 เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลทางปฏิบัติและผลจากโปรแกรมจำลองผล ซึ่งจะได้ผลดังนี้

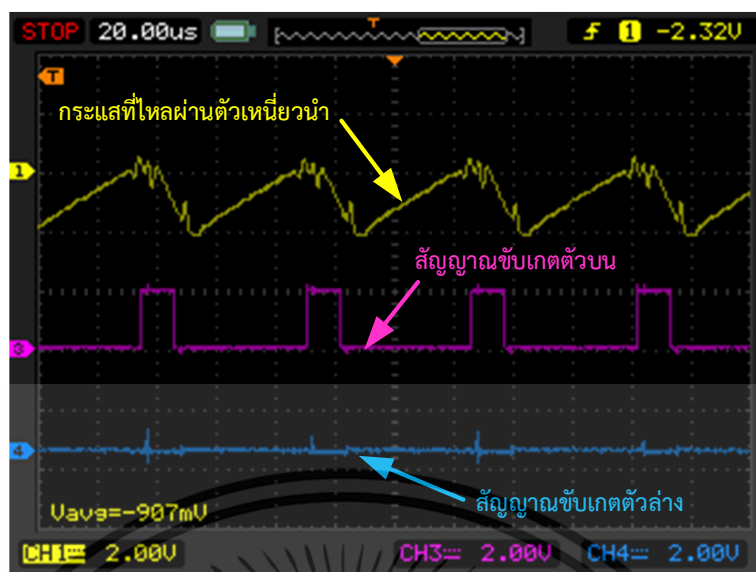


รูปที่ 4.7 การจัดชุดวงจรทดลองต้นแบบที่ใช้ในการทดลองจริง

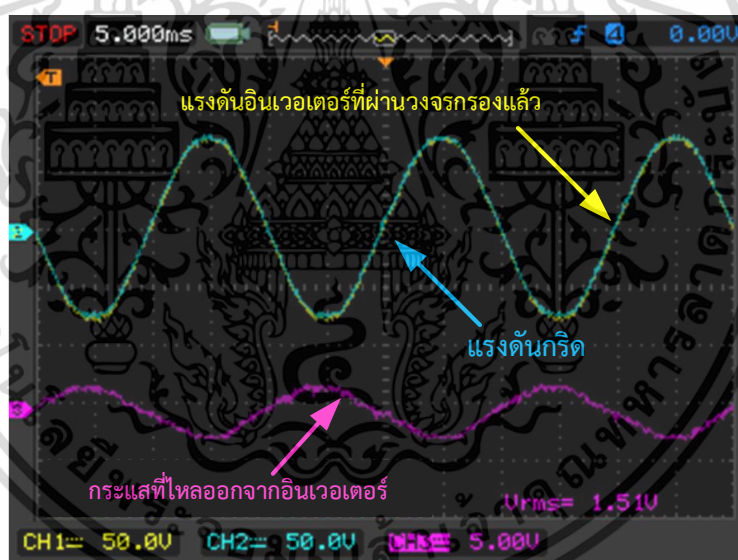


รูปที่ 4.8 ผลการทดลองในโหมด boost ของวงจร DC-DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองในโหมด buck ของวงจร DC-DC



รูปที่ 4.10 แรงดันจากวงจร DC-AC เทียบกับแรงดันกริด

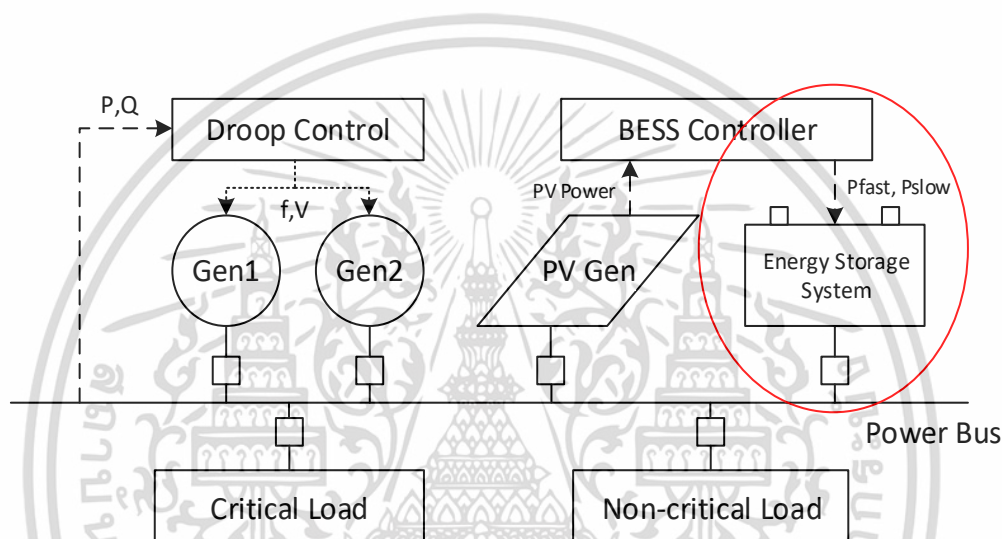
จากรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าสามารถควบคุมกระแสให้เป็นไปตามโหมดแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ต้องการได้ ทั้งโหมดบัค และโหมดบูสต์แรงดัน และจากรูปที่ 4.10 เมื่อส่งให้กำลังไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเป็น -350W จะเห็นได้ระบบกักเก็บพลังงานที่สร้างขึ้นนี้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิงได้ และจะเห็นได้ว่าสามารถควบคุมให้แรงดันอินเวอร์เตอร์ที่ผ่านวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรองแล้วเป็นไปตามแรงดันไฟฟ้าที่กริด ซึ่งเป็นไปตามผลการจำลองในโปรแกรม PSIM ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่แล้ว

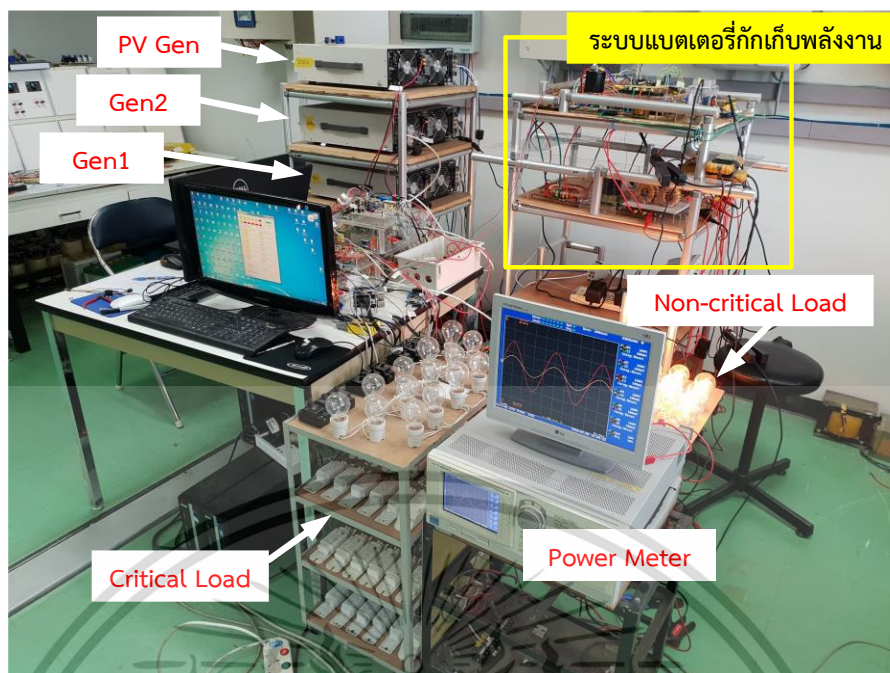
## 4.2 ผลเชื่อมต่อบระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเข้าสู่ระบบไมโครกริด

เมื่อทำการเชื่อมต่อบระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเข้าไปยังระบบไมโครกริดขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4.11 และทำการทดสอบเดินระบบไมโครกริด โดยการจำลองการทดลองเพื่อทำการทดลองดังรูปที่ 4.12



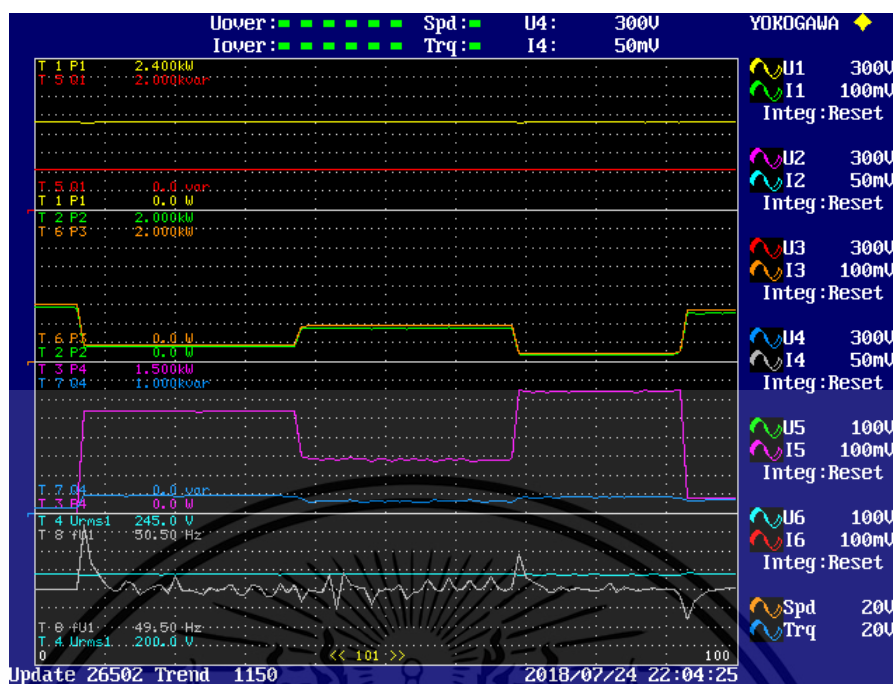
รูปที่ 4.11 แผนผังระบบไมโครกริดที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การจัดชุดทดลองระบบไมโครกริดสาธิตที่มีการเชื่อมต่อบatteryกักเก็บพลังงาน

รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองเมื่อให้ค่ากำลังผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ซึ่งส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 และ 2 มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้ความถี่ของระบบไมโครกริดมีความผันผวนโดยที่เมื่อกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีกำลังเพิ่มขึ้นจาก 0 W เป็น 1000 W ทำให้ความถี่ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.4 Hz เป็นเวลาสั้นๆ เนื่องจากผลของการฟื้นคืนความถี่ของการควบคุมแบบดรอปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่อง ในทางตรงกันข้าม เมื่อกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีกำลังลดลงจาก 1200 W เป็น 100 W ก็ส่งผลให้ความถี่ไฟฟ้านลดลง 0.25 Hz เป็นเวลาสั้นๆ และฟื้นคืนความถี่กลับมาเช่นกัน ด้วยเหตุนี้การจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานด้วยกำลังไฟฟ้าคำสั่ง  $P_{fast}$  จึงน่าจะสามารถลดการเปลี่ยนแปลงความถี่อย่างฉับพลันได้



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์อย่างทันทีทันใด

จากรูปที่ 4.13 กราฟแรกจะแสดงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟของภาระไฟฟ้าซึ่งจะให้ความคงที่ตลอดเวลา เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยของค่ากำลังผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเพียงอย่างเดียว ส่วนกราฟที่สองจะแสดงกำลังผลิตไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่องที่มีการควบคุมแบบครูปทำให้มีแบ่งกันจ่ายภาระไฟฟ้าที่ทำกัน ในกราฟที่สามจะแสดงกำลังผลิตไฟฟ้าจริงและกำลังผลิตไฟฟารีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และในกราฟสุดท้ายแสดงแรงดันและความถี่ของระบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความถี่ของระบบนั้นมีความผันผวนไปตามการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์อย่างทันทีทันใด

อย่างไรก็ตามการทดลองเพื่อยืนยันผลการลดทอนความผันผวนทางความถี่ด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้ ยังอยู่ในขั้นตอนการแก้ไขความผิดพลาดของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีผลมาจากสัญญาณรบกวน โดยคาดว่าจะสามารถรายงานผลการทดลองอย่างสมบูรณ์ได้ ในอนาคตอันใกล้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาที่อาจพบได้ในระบบไมโครกริดแบบแยกอิสระ ซึ่งกระทบต่อคุณภาพและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าภายในระบบไมโครกริด เนื่องจากระบบไมโครกริดแบบแยกอิสระนั้น เป็นระบบขนาดเล็กจึงมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้น เมื่อมีสิ่งรบกวนต่อระบบไมโครกริด ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นไปในเรื่องการนำระบบกักเก็บพลังงานมาใช้ในระบบไมโครกริด เพื่อแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน ที่ส่งผลให้เกิดความผันผวนในการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเกิดความผันผวนทางความถี่ขึ้นตามมา

โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบกักเก็บพลังงานสำหรับใช้งานร่วมกับระบบไมโครกริดขนาดเล็กสำหรับการทดลอง เพื่อลดความผันผวนทางความถี่ของระบบไมโครกริด ที่เป็นผลมาจากความไม่สม่ำเสมอในการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน รวมถึงพัฒนาระบบจัดการพลังงานที่เหมาะสมเพื่อใช้รักษาเสถียรภาพทางพลังงานของระบบไมโครกริดขนาดเล็กสำหรับการทดลองนี้ให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงาน โดยใช้ค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าที่คาดหวังในการกำหนดกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพื่อให้ได้ SOC เพียงพอก่อนดวงอาทิตย์ตก และการใช้กำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่เพื่อลดความผันผวนของความถี่จากกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ Pfast และ Pslow โดย Pfast จะทำให้ความผันผวนของความถี่ลดลง และ Pslow จะทำการแบ่งเบาภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 และ 2 ในการ Sharing Load ทั้งนี้ยังใช้ในการกักเก็บพลังงานในแบตเตอรี่เพื่อไว้จ่ายให้กับโหลดในช่วงเวลาที่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ได้ ซึ่งผลการจำลองด้วย MATLAB/Simulink ทำให้เห็นว่าการใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถลดความแปรปรวนทางความถี่ลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในส่วนของการสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าได้มีการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อ

แบตเตอรี่จำนวน 8 หน่วย เข้าไปยังระบบไมโครกริดขนาดเล็กสำหรับทดลอง ซึ่งผลการจำลอง จะเห็นได้ว่าวงจรแปลงผันกำลังที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมให้เชื่อมต่อระบบไมโครกริดได้อย่างถูกต้อง

เมื่อนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจริงจากค่าตัวแปรที่ได้จากผลการจำลองและระบบ ควบคุมระบบกักเก็บพลังงานที่ผ่านการพัฒนามาเชื่อมต่อเข้ากับระบบไมโครกริด จะเห็นได้ว่าสามารถ ควบคุมให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ แต่เนื่องด้วยความผิดพลาดในระบบจากสัญญาณรบกวน จึงทำให้ ยังไม่สามารถเสนอผลการทดลองเพื่อยืนยันผลการลดทอนความผันผวนทางความถี่ด้วยวิธีการที่ นำเสนอแล้วไปได้ แต่คาดว่าจะสามารถรายงานผลการทดลองที่สมบูรณ์ได้ในอนาคตอันใกล้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้จัดการทดลองขึ้นในระบบไมโครกริดขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น พื้นที่และเวลาที่มีจำกัด สภาพอากาศที่ไม่สามารถควบคุมได้ และอีก หลาย ๆ ประการ จึงทำให้อาจมีความแตกต่างและคลาดเคลื่อนไม่ตรงกับระบบไมโครกริดจริงอยู่บ้าง โดยเฉพาะในส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นเครื่อง จำลองสร้างสัญญาณไฟฟ้าในการทำการทดลอง ซึ่งมีข้อจำกัดและมีความแตกต่างจากเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าที่เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าค่อนข้างมาก เนื่องจากเป็นเพียงระบบสาธิต การนำไปประยุกต์ใช้กับ ระบบจริงจึงควรมีการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับสภาพการณ์ ณ สถานที่นั้น ๆ รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบไมโครกริดนั้น ๆ อีกด้วย อีกทั้งเนื่องจากการสวิตชิงวงจรแปลงผันกำลังด้วยความถี่ที่สูง มาก ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนระบบในส่วนต่าง ๆ จึงควรมีการป้องกันสัญญาณรบกวนทั้งจากวงจร แปลงผันกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์รอบข้าง เพื่อให้ระบบไมโครกริดสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์

## 5.3 แนวทางการทำการวิจัยขั้นต่อไป

1. สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในด้านการควบคุมแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานให้มีความสามารถ ในการกักเก็บพลังงานไปใช้ในช่วงเย็นที่ไม่มีแสงอาทิตย์ หรือในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงได้
2. สามารถนำเทคโนโลยีมัลติเอเจนท์เข้ามาผสมผสานเข้ากับระบบควบคุมที่มีอยู่ เพื่อเพิ่ม ความเหมาะสมให้กับระบบให้มีการตอบสนองที่ดียิ่งขึ้น และยังสามารถเพิ่มความสามารถในการ สังเกตการณ์จากระยะไกลได้อีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Anis Ur Rehman, Shah Zeb, Hanif Ullah Khan, S. Shahbaz U. Shah, Atta Ullah. “Design and Operation of Microgrid with Renewable Energy Sources and Energy Storage System: A Case Study.” 2017 IEEE 3rd International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS). Aug 2017, pp: 1-6.
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.). เว็บไซต์เผยแพร่ข้อมูลการดำเนินงานด้านสมาร์ตกริดของประเทศไทย. [Online]. Available : <http://www.thai-smartgrid.com/ระบบกักเก็บพลังงาน/>
- [3] วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ. พรินติ้ง. 2553.
- [4] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, “Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications”, World Electric Vehicle Journal Vol.3, ISSN 2032-6653, May 2009, pp.0289-0298.
- [5] Sergei Melentjev, Deniss Lebedev, “Overview of Simplified Mathematical Models of Batteries”, Tallinn University of Technology (Estonia), pp.231-235.
- [6] H. s. Lee and B. G. Koo, "The Strategy Control of Islanded Microgrid Using Battery's State-of-Charge," *2015 6th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, Kuala Lumpur, 2015, pp. 164-168.
- [7] Nidhi Gupta and Ashish Chonbey, “Comparative Performance Analysis of Bipolar and Unipolar Single Phase Full Bridge Inverter”, International Journal of Recent Research in Electrical and Electronics Engineering, Vol.3 Issue2, 2016, pp.39-45.
- [8] Darith Leng, “Study of a multi-agent system for a single-phase microgrid”, Thesis for the degree of master in engineering computing system, International College, King Monkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2015
- [9] [https://www.mitsubishielectric-mesh.com/products/pdf/pm50rla120\\_e.pdf](https://www.mitsubishielectric-mesh.com/products/pdf/pm50rla120_e.pdf)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****

// This code is created by SimCoder Version 2.0 for F28335 Hardware Target
//
// SimCoder is copyright by Powersim Inc., 2009
//
// Date: May 13, 2018 16:29:41
*****/

#include <math.h>
#include "PS_bios.h"
typedef float DefaultType;
#define GetCurTime() PS_GetSysTimer()

interrupt void Task();

DefaultType fGblVdclpf = 0.0;
DefaultType fGblVref = 0.0;
DefaultType fGblDu2 = 0.0;
DefaultType fGblVek = 0.0;
DefaultType fGblVerror = 0.0;
DefaultType fGblV12 = 0.0;
DefaultType fGblV13 = 0.0;
DefaultType fGblD1 = 0.0;
DefaultType fGblVs_d = 0.0;
DefaultType fGblIs_d = 0.0;
DefaultType fGblIinv_d = 0.0;
DefaultType fGblVdcl = 0.0;
DefaultType fGblVref = 0.0;
DefaultType fGblV7 = 0.0;
DefaultType fGblV8 = 0.0;
DefaultType fGblDuty = 0.0;
DefaultType fGblIo = 0.0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DefaultType fGblIind_z = 0.0;
DefaultType fGblV20 = 0.0;
DefaultType fGblV27 = 0.0;
DefaultType fGblIinv_ref = 0.0;
DefaultType fGblV16 = 0.0;
DefaultType fGblV17 = 0.0;
DefaultType fGblV18 = 0.0;
DefaultType fGblV19 = 0.0;
DefaultType fGblV21 = 0.0;
DefaultType fGblV22 = 0.0;
DefaultType fGblV23 = 0.0;
DefaultType fGblVsinref = 0.0;
DefaultType fGblUDELAY8 = 0.5;
DefaultType fGblV25 = 0.0;
DefaultType fGblV26 = 0.0;
DefaultType fGblUDELAY9 = 0;
DefaultType fGblUDELAY10 = 1;
DefaultType fGblV28 = 0.0;
DefaultType fGblVp = 0.0;
DefaultType fGblVint = 0.0;
DefaultType fGblPab = 0.0;
DefaultType fGblVdce = 0.0;
DefaultType fGblVdcon = 0.0;
DefaultType fGblIcomp = 0.0;
DefaultType fGblVc_d = 0.0;

DefaultType fC10, fB1, fLIM2, fTI_ADC1_4, fZOH4, fFILTER_D3, fSUM7,
fFILTER_D6, fLIM14;

DefaultType fC14, fC13, fMULT25, fZOH8, fSUMP18, fC17, fCOMP5, fMULT31,
fLIM12, fDIVD1;

DefaultType fSUMP5, fLIM13, fTI_ADC1_5, fZOH5, fSUM6, fC6, fCOMP4,
fMULT7, fP26, fD2;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DefaultType fP9, fP10, fB3, fSUM31, fLIM1, fMULT4, fSUM1, fNOT2, fMULT6,
fP2, fC7, fMULT8;

DefaultType fP3, fB2, fSUMP2, fABS3, fSUM2, fLIM6, fMULT5, fTI_ADC1_1,
fZOH14, fTI_ADC1_2;

DefaultType fZOH2, fTI_ADC1_3, fZOH3, fTI_ADC1_6, fZOH6, fCOS_R1,
fMULT20, fFILTER_D10;

DefaultType fSIN_R3, fMULT9, fSUM14, fMULT22, fMULT18, fMULT19, fSUMP8,
fMULT21, fSUMP9;

DefaultType fSQ1, fP30, fLIM8, fDIVD4, fMULT27, fFILTER_D12, fMULT28,
fSUMP23, fP33;

DefaultType fSUM16, fMULT29, fP35, fB9, fP34, fSUMP24, fSUMP26, fLIM9,
fMULT3, fMULT30;

DefaultType fP24, fSUMP20, fSUM13, fMULT26, fK_P, fLIM11, fK_R,
fFILTER_D11, fSUMP16;

DefaultType fB8, fP20, fSUMP21, fP29, fP18, fSUMP7, fP28, fP27, fP32, fLIM10,
fDIVD5;

DefaultType fP31, fC15, fSUMP10, fSUMP11, fC16, fCOMP2, fMULT23, fSUM15,
fUDELAY8, fUDELAY9;

DefaultType fNOT3, fUDELAY10, fTI_ADC1, fZOH1, fPSM_DIN1, fZOH30 ;

int i=0;
int Array[360];
int Array2[360];

interrupt void Task()
{

    PS_EnableIntr();

    fUDELAY8 = fGblUDELAY8;

    fUDELAY9 = fGblUDELAY9;

    fUDELAY10 = fGblUDELAY10;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fPSM_DIN1 = (PS_GetDigitInA() & ((UInt32)1 << 14)) ? 1 : 0;
fZOH30 = fPSM_DIN1;
Array[i] = fZOH2*64;
Array2[i] = fP28*64;
i++;
if(i==360) i=0;

```

```

if(fZOH30 == 0){ //relay inverter
fC13 = 1.0;
}
else{
fC13 = 0;
fSUMP18 = 0;
fUDELAY9 = 0;
}
fC10 = 180000;
{
static DefaultType fB1_A = 100, fC10_A = 0.0;
fB1 = fB1_A + 0.5/18000 * (fC10 + fC10_A);
fB1_A = fB1;fC10_A = fC10;
}
fLIM2 = (fB1 > 200) ? 200 : ((fB1 < 50) ? 50 : fB1);
fTI_ADC1_4 = PS_GetAcAdc(4); //Vdcl
fZOH4 = fTI_ADC1_4*300;
{
static DefaultType fln = 0.0;
static DefaultType fOut = 0.0;
fFILTER_D3 = 0.0171539 * fZOH4 + 0.0171539 * fln - (-0.9656922) *
fOut;
fln = fZOH4;
fOut = fFILTER_D3;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
#ifdef _DEBUG
fGblVdclpf = fFILTER_D3;
#endif

    fSUM7 = fLIM2 - fFILTER_D3;
    {
        static DefaultType fln = 0.0;
        static DefaultType fOut = 0.0;
        fFILTER_D6 = 2.2321429 * fSUM7 + 2.2321429 * fln - 0.11607143 *
fOut;

        fln = fSUM7;
        fOut = fFILTER_D6;
    }
fLIM14 = (fFILTER_D6 > 20) ? 20 : ((fFILTER_D6 < -20) ? -20 : fFILTER_D6);
fC14 = 0; // power ref
fMULT25 = fC13 * fUDELAY10;
fZOH8 = fMULT25;
fSUMP18 = fZOH8 + fUDELAY9;
fC17 = 1; // relay 900
fCOMP5 = (fSUMP18 > fC17) ? 1 : 0;
fMULT31 = fC14 * fCOMP5;
fLIM12 = (fZOH4 > 220) ? 220 : ((fZOH4 < 50) ? 50 : fZOH4);
fDIVD1 = fMULT31 / fLIM12;
fSUMP5 = fLIM14 + fDIVD1;
fLIM13 = (fSUMP5 > 25) ? 25 : ((fSUMP5 < -25) ? -25 : fSUMP5);
#ifdef _DEBUG
    fGblIref = fLIM13;
#endif

    fTI_ADC1_5 = PS_GetDcAdc(6); //lind

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fZOH5 = (fTI_ADC1_5-1.51)*33.33;
fSUM6 = fLIM13 - fZOH5;
fC6 = 0.0;
fCOMP4 = (fSUMP5 > fC6) ? 1 : 0;
fMULT7 = fSUM6 * fCOMP4;
fP26 = fMULT7 * 0;
{
    static fP26_A = 0.0;
    fD2 = (fP26 - fP26_A) / 18000;
    fP26_A = fP26;
}
fP9 = fMULT7 * 0.01;
fP10 = fMULT7 * 20;
{
    static DefaultType fB3_A = 0, fP10_A = 0.0;
    fB3 = fB3_A + 0.5/18000 * (fP10 + fP10_A);
    fB3_A = fB3;fP10_A = fP10;
}
fSUM31 = fD2 * 1 + fP9 * 1 + fB3 * 1;
fLIM1 = (fSUM31 > 0.78) ? 0.78 : ((fSUM31 < 0) ? 0 : fSUM31);
#ifdef _DEBUG
    fGblDu2 = fLIM1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblVek = fP9;
#endif
    fMULT4 = fLIM1 * fCOMP4;
    PS_SetPwm3Rate(fMULT4);
#ifdef _DEBUG
    fGblerror = fMULT7;
#endif

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fSUM1 = fLIM13 - fZOH5;
fNOT2 = !fCOMP4;
fMULT6 = fSUM1 * fNOT2;
fP2 = fMULT6 * 0.0012;

#ifdef _DEBUG
    fGblV12 = fP2;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGblV13 = fLIM13;
#endif

fC7 = 1;
fMULT8 = fC7 * fNOT2;
fP3 = fMULT6 * 48;
{
    static DefaultType fB2_A = 0, fP3_A = 0.0;
    fB2 = fB2_A + 0.5/18000 * (fP3 + fP3_A);
    fB2_A = fB2;fP3_A = fP3;
}
fSUMP2 = fP2 + fB2;
fABS3 = fabs(fSUMP2);
fSUM2 = fMULT8 - fABS3;
fLIM6 = (fSUM2 > 0.3) ? 0.3 : ((fSUM2 < 0) ? 0 : fSUM2);
fMULT5 = fLIM6 * fNOT2;
PS_SetPwm4Rate(fMULT5);

#ifdef _DEBUG
    fGblD1 = fLIM6;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fTI_ADC1_1 = PS_GetAcAdc(1); //Vs
    fZOH14 = fTI_ADC1_1*266.667*1.28;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGblVs_d = fZOH14;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#endif

    FTI_ADC1_2 = PS_GetDcAdc(2); //ls
    fZOH2 = (FTI_ADC1_2-1.485)*33.33*1.056;
#ifdef _DEBUG
    fGbls_d = fZOH2;
#endif

    FTI_ADC1_3 = PS_GetDcAdc(3); //linv
    fZOH3 = (FTI_ADC1_3-1.489)*33.33;
#ifdef _DEBUG
    fGblinv_d = fZOH3;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblVdcl = fZOH4;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblVref = fLIM2;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV7 = fLIM14;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV8 = fLIM13;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblDuty = fSUM31;
#endif

    FTI_ADC1_6 = PS_GetDcAdc(5); //lo
    fZOH6 = (FTI_ADC1_6-1.49625)*33.33;
#ifdef _DEBUG
    fGbllo = fZOH6;
#endif

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#ifdef _DEBUG
    fGblind_z = fZOH5;
#endif

fCOS_R1 = cos(fUDELAY8);
fMULT20 = fZOH14 * fCOS_R1;
{
    static DefaultType fln = 0.0;
    static DefaultType fOut = 0.0;

    fFILTER_D10 = 0.9826977 * fZOH14 + (-1) * fln - (-0.9826977) * fOut;
    fln = fZOH14;
    fOut = fFILTER_D10;
}

#ifdef _DEBUG
fGblv20 = fFILTER_D10;
#endif

fSIN_R3 = sin(fUDELAY8);
fMULT9 = fFILTER_D10 * fSIN_R3;
fSUM14 = fMULT20 - fMULT9;
fMULT22 = fSUM14 * fSUM14;
fMULT18 = fFILTER_D10 * fCOS_R1;
fMULT19 = fZOH14 * fSIN_R3;
fSUMP8 = fMULT18 + fMULT19;
fMULT21 = fSUMP8 * fSUMP8;
fSUMP9 = fMULT22 + fMULT21;
fSQ1 = sqrt(fSUMP9);
fp30 = fSQ1 * 0.5;
fLIM8 = (fp30 > 400) ? 400 : ((fp30 < 1) ? 1 : fp30);
fDIVD4 = fC14 / fLIM8;
fMULT27 = fZOH14 * fZOH2;
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

static DefaultType fln = 0.0;
static DefaultType fOut = 0.0;
fFILTER_D12 = 0.9826977 * fZOH2 + (-1) * fln - (-0.9826977) * fOut;
fln = fZOH2;
fOut = fFILTER_D12;
}
fMULT28 = fFILTER_D12 * fFILTER_D10;
fSUMP23 = 0; // fMULT27 + fMULT28;
fP33 = fSUMP23 * 0.5;
fSUM16 = fC14 - fP33;
fMULT29 = fSUM16 * fCOMP5;
fP35 = fMULT29;
{
static DefaultType fB9_A = 0, fP35_A = 0.0;
fB9 = fB9_A + 0.5/18000 * (fP35 + fP35_A);
fB9_A = fB9;fP35_A = fP35;
}
fP34 = fMULT29 * (1.0/30000);
fSUMP24 = fB9 + fP34;
fSUMP26 = fDIVD4 + 0;//fSUMP24;
fLIM9 = (fSUMP26 > 15) ? 15 : ((fSUMP26 < -15) ? -15 : fSUMP26);
fMULT3 = fLIM9 * fSIN_R3;
fMULT30 = fCOS_R1 * fSQ1;
fP24 = fMULT30 * 0.0044;
fSUMP20 = fMULT3 + fP24;
fSUM13 = fSUMP20 - fZOH3;
fMULT26 = fSUM13 * fCOMP5;
fK_P = fMULT26 * 12;
fLIM11 = (fK_P > 20) ? 20 : ((fK_P < -20) ? -20 : fK_P);
fK_R = fMULT26 * 8000;
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

static DefaultType fln[3] = {0, 0, 0}, fOut[3] = {0, 0, 0};
fFILTER_D11 = (2.777412E-005) * fK_R + 0 * fln[0] - (-2) * fOut[0] + (-
2.777412E-005) * fln[1] - 1 * fOut[1];
fln[2] = fln[1];
fln[1] = fln[0];
fln[0] = fK_R;
fOut[2] = fOut[1];
fOut[1] = fOut[0];
fOut[0] = fFILTER_D11;
}
#ifdef _DEBUG
fGblV27 = fFILTER_D11;
#endif

fSUMP16 = fLIM11 + fFILTER_D11;
{
static DefaultType fB8_A = 0, fMULT26_A = 0.0;
fB8 = fB8_A + 0.5/18000 * (fMULT26 + fMULT26_A);
fB8_A = fB8;fMULT26_A = fMULT26;
}
fP20 = fB8 * 0;
fSUMP21 = fSUMP16 + fP20;
fP29 = fSUMP21*0; // ของเดิม fSUMP21*1
fP18 = fZOH14;
fSUMP7 = fP29 + fP18;
fP28 = fSUMP7 * (1.0/200);
PS_SetPwm1Rate(fP28);
fP27 = fP28 * (-1);
PS_SetPwm2Rate(fP27);
#ifdef _DEBUG
fGblInV_ref = fSUMP20;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV16 = fP28;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV17 = fSUMP7;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV18 = fZOH14;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV19 = fSUMP8;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV21 = fSUM14;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV22 = fCOS_R1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV23 = fUDELAY8;
#endif
    fP32 = fSIN_R3;
#ifdef _DEBUG
    fGblVsinref = fP32;
#endif
    fLIM10 = (fSQ1 > 400) ? 400 : ((fSQ1 < 1) ? 1 : fSQ1);
    fDIVD5 = fSUM14 / fLIM10;
    fP31 = fDIVD5 * 0.01;
    fC15 = 17.4532925199433e-003;
    fSUMP10 = fP31 + fC15;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fSUMP11 = fSUMP10 + fUDELAY8;
fC16 = 6.2831853071796;
fCOMP2 = (fSUMP11 > fC16) ? 1 : 0;
fMULT23 = fCOMP2 * fC16;
fSUM15 = fSUMP11 - fMULT23;
fGblUDELAY8 = fSUM15;

#ifdef _DEBUG
    fGblV25 = fCOMP2;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGblV26 = fDIVD5;
#endif

if (fCOMP5 > 0)
{
    PS_StartPwm(1);
}
if (fCOMP5 > 0)
{
    PS_StartPwm(2);
}
fGblUDELAY9 = fSUMP18;
fNOT3 = !fCOMP5;
if (fNOT3 != 0)
{
    PS_StopPwm(1);
}
if (fNOT3 != 0)
{
    PS_StopPwm(2);
}
fGblUDELAY10 = fNOT3;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#ifdef _DEBUG
    fGblV28 = fMULT3;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblVp = fLIM11;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblVint = fP20;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblPab = fP33;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblVdce = fSUM7;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblVdcon = fCOMP4;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblIcomp = fSUMP24;
#endif
    fTI_ADC1 = PS_GetAcAdc(0); //Vc
    fZOH1 = fTI_ADC1*300;
#ifdef _DEBUG
    fGblVc_d = fZOH1;
#endif
    PS_ExitPwm3General();
}

```

```
void Initialize(void)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    PS_SysInit(30, 10);
    PS_StartStopPwmClock(0);
    PS_InitTimer(0, 0xffffffff);
    PS_InitPwm(3, 1, 18000*1, (0e-6)*1e6, PWM_TWO_OUT, 40878); // pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
    PS_SetPwmPeakOffset(3, 1, 0, 1.0/1);
    PS_SetPwmIntrType(3, ePwmNoAdc, 1, 0);
    PS_SetPwmVector(3, ePwmNoAdc, Task);
    PS_SetPwm3Rate(0);
    PS_StartPwm(3);

    PS_InitPwm(4, 1, 18000*1, (0e-6)*1e6, PWM_TWO_OUT, 40878); // pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
    PS_SetPwmPeakOffset(4, 1, 0, 1.0/1);
    PS_SetPwmIntrType(4, ePwmNoAdc, 1, 0);
    PS_SetPwm4Rate(0);
    PS_StartPwm(4);

    PS_InitPwm(1, 1, 18000*1, (2e-6)*1e6, PWM_TWO_OUT, 40878); // pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
    PS_SetPwmPeakOffset(1, 2, (-1), 1.0/2);
    PS_SetPwmIntrType(1, ePwmNoAdc, 1, 0);
    PS_SetPwm1Rate(0);
    PS_StopPwm(1);

    PS_InitPwm(2, 1, 18000*1, (2e-6)*1e6, PWM_TWO_OUT, 40878); // pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
    PS_SetPwmPeakOffset(2, 2, (-1), 1.0/2);
    PS_SetPwmIntrType(2, ePwmNoAdc, 1, 0);
    PS_SetPwm2Rate(0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    PS_StopPwm(2);

    PS_ResetAdcConvSeq();
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 0, 1); //Vc
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 1, 1); //Vs
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 2, 1); //Is
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 3, 1); //linv
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 4, 1); //Vdcl
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 6, 1); //lind
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 5, 1); //lo
    PS_Adclnit(0, !0);

    PS_StartStopPwmClock(1);
}

void main()
{
    Initialize();
    PS_EnableIntr(); // Enable Global interrupt INTM
    PS_EnableDbgm();
    for (;;) {
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การควบคุมระบบกักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริดเพื่อลดความผันผวนทางความถี่

Control of Microgrid Energy Storage System for Frequency Deviation Suppression

กิตติโชติ สุนทรทวีทรัพย์<sup>1</sup> และ สมภพ ผลไม้<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [brightly.ks@gmail.com](mailto:brightly.ks@gmail.com)

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การลดความผันผวนทางความถี่ของระบบมีความจำเป็นอย่างยิ่งในระบบขนาดเล็กที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนจำนวนมากอย่างไม่โครกริดแบบแยกอิสระ การใช้ระบบกักเก็บพลังงานร่วมกับการควบคุมที่เหมาะสมเป็นหนึ่งในแนวทางที่จะช่วยลดความผันผวนของความถี่ของระบบได้ ในบทความนี้จะเลือกใช้ระบบกักเก็บพลังงานเป็นแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วเชื่อมต่อผ่านอินเวอร์เตอร์เข้าไปยังระบบไมโครกริด ส่วนการรับจ่ายกำลังของระบบกักเก็บพลังงานจะถูกควบคุมด้วยค่าสถานะของประจุของแบตเตอรี่ร่วมกับสถานะการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ โดยทำให้กำลังไฟฟ้ารวมของระบบกักเก็บพลังงานและระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มีความราบเรียบทำให้ความถี่ไฟฟ้าของระบบได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์น้อยลง ซึ่งในบทความนี้จะจำลองไมโครกริดแบบแยกอิสระที่ประกอบด้วยระบบกักเก็บพลังงานด้วย MATLAB/Simulink เพื่อแสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถช่วยลดความผันผวนทางความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังสามารถสำรองพลังงานและนำออกมาใช้ได้ตามที่ออกแบบไว้ได้อีกด้วย

**คำสำคัญ:** ไมโครกริด, ระบบกักเก็บพลังงาน, ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์, สถานะประจุ

Abstract

Frequency deviation suppression is important for a small system with high renewable energy integration such as stand-alone microgrid. Energy storages system with proper control can effectively suppress frequency deviation. In this paper, lead-acid batteries that connect to microgrid through an inverter were modelled. This energy storage system output power was controlled by state of charge (SOC) and output power of photovoltaic system. The combined power from the photovoltaic system and the energy storage system is smoothed and lessen the effect of fluctuated power on the frequency deviation. In this paper, a microgrid with energy storage system was modelled and simulated in MATLAB/Simulink to demonstrate the effectiveness of the proposed

control technique in suppressing frequency deviation and maintaining the state of charge of the energy storage system.

**Keywords** Microgrid, Energy storage system, Photovoltaic system, State of Charge (SOC)

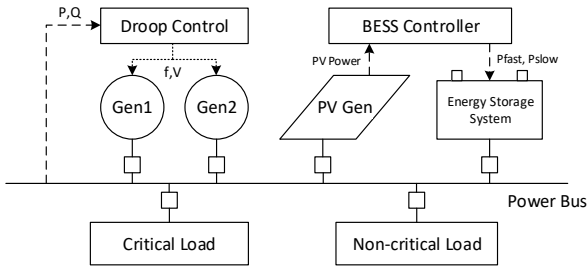
1. บทนำ

ปัจจุบันเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดน้อยลงเรื่อยๆ อีกทั้งการตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมส่งผลให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนมากขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้ว กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานหมุนเวียนจะมีปริมาณการผลิตที่ไม่แน่นอนหรือมีความผันผวนเป็นอย่างมาก เมื่อการผลิตกำลังไฟฟ้ามีความผันผวนก็จะทำให้ความถี่ของระบบมีความผันผวนไปด้วย ซึ่งทำให้คุณภาพทางไฟฟ้าและเสถียรภาพของระบบแย่ลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบขนาดเล็กที่ประกอบไปด้วยแหล่งพลังงานหมุนเวียนจำนวนมากอย่างไม่โครกริดแบบแยกอิสระ ซึ่งเป็นระบบที่การผลิตส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับกำลังขาออกของแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียน จึงต้องมีการลดความผันผวนทางความถี่ของระบบเพื่อปรับปรุงคุณภาพและเสถียรภาพของระบบ การใช้แหล่งกักเก็บพลังงาน (Energy storage) เป็นหนึ่งในแนวทางที่จะช่วยลดความผันผวนของความถี่และยังช่วยเสริมคุณภาพทางไฟฟ้าและเสถียรภาพของระบบขึ้นได้อีกด้วย [1-2] นอกจากนี้ยังสามารถเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้เป็นพลังงานสำรองให้กับระบบไว้ใช้ยามฉุกเฉินได้อีกด้วย

2. แบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง

2.1 การจำลองระบบไมโครกริด

ระบบไมโครกริดที่ใช้ในบทความนี้เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นใน MATLAB/Simulink โดยอ้างอิงมาจากระบบไมโครกริดสาธิตเฟสเดียวในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 2 เครื่องที่มีการควบคุมแบบ P-f droop และ Q-V droop แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน 1 เครื่อง ภาระไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงาน โดยแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลองนี้ จะใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยใส่โปรไฟล์แสงอาทิตย์ที่เก็บข้อมูลมาจากระบบจริง ส่วนระบบกักเก็บพลังงานจะใช้เป็นแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว (Lead-acid battery) ที่โมเดลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีการเชื่อมต่อกับภาระไฟฟ้า ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ไมโครกริดสาคิตแบบแยกอิสระ

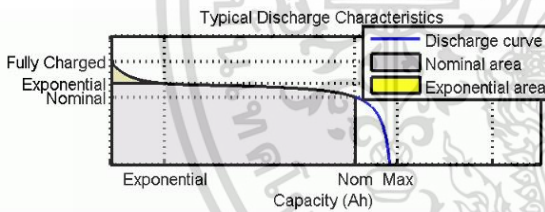
และมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พิกัดของอุปกรณ์ต่างๆ

อุปกรณ์	ข้อกำหนดเฉพาะ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 1 และ 2	กำลัง 2000 VA
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	3000 VA
แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรด	12 V 65 Ah 8 หน่วย

## 2.2 แบบจำลองทางทฤษฎีของแบตเตอรี่

แบบจำลองทางทฤษฎีของแบตเตอรี่ เริ่มต้นจากการศึกษากราฟคุณลักษณะของแบตเตอรี่ดังรูปที่ 2 [3] ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสามช่วงคือ ช่วงแรกเป็นย่านเอ็กโปเนนเชียล แรงดันจะตกหลังจากเริ่มคายประจุเข้าสู่ช่วงที่สองเป็นการใช้งานแบตเตอรี่ที่แรงดันปกติตามคุณลักษณะของแบตเตอรี่ และหลังจากคายประจุจนกระทั่งประจุใกล้หมด แรงดันจะตกทันทีทันใด โดยกราฟคุณลักษณะของแบตเตอรี่จะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของแบตเตอรี่ และผู้ผลิต



รูปที่ 2 กราฟคุณลักษณะแบตเตอรี่

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันและสถานะการประจุ ของแบตเตอรี่อธิบายได้ด้วยสมการคายประจุ และ อัดประจุ ดังต่อไปนี้ [3-4]

$$\text{Discharge} : V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q-i_t} \cdot (i_t + i^*) + \text{Exp}(t) \quad (1)$$

$$\text{Charge} : V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{i_t - 0.1Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q-i_t} \cdot i_t + \text{Exp}(t) \quad (2)$$

โดยในย่านเอ็กโปเนนเชียลอธิบายได้ด้วยสมการ

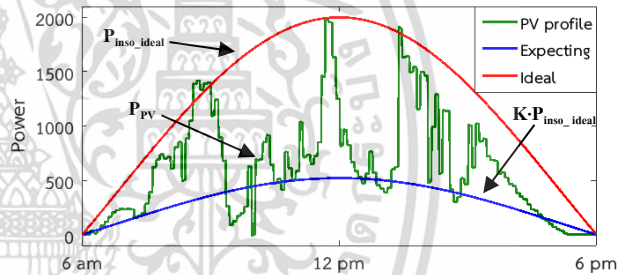
$$\text{Exp}(t) = B \cdot |i(t)| \cdot (-\text{Exp}(t) + A \cdot u(t)) \quad (3)$$

เมื่อ  $V_{batt}$  คือแรงดันแบตเตอรี่ (V),  $E_0$  คือแรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่ (V),  $R$  คือความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ( $\Omega$ ),  $i$  คือกระแสแบตเตอรี่ (A),  $K$  คือค่าความต้านทานโพลาริเซชัน ( $\Omega$ ) หรือค่าคงที่โพลาริเซชัน (V/Ah),  $Q$  คือความจุแบตเตอรี่ (Ah),  $i_t$  หรือ  $i_{idc}$  คือ ค่าการประจุแบตเตอรี่ (Ah),  $i^*$  คือกระแสที่ผ่าน Low-pass Filter (A),  $A$  คือแรงดันในย่านเอ็กโปเนนเชียล,  $B$  คือความจุในย่านเอ็กโปเนนเชียล,  $\text{Exp}(s)$  คือค่าพลวัตของย่านเอ็กโปเนนเชียล,  $\text{Sel}(s)$  คือ โหมดของแบตเตอรี่ เมื่ออัดประจุเป็น 1 และ คายประจุ เป็น 0

## 3. การควบคุมระบบสำรองพลังงานในระบบไมโครกริด

การควบคุมระบบสำรองพลังงานจะอ้างอิงกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ และสถานะประจุ (SOC) ของแบตเตอรี่ [5] โดยในแต่ละวันของปี พลังงานแสงอาทิตย์ที่รับได้บนผิวโลก ณ ตำแหน่งที่ตั้งติดตั้งจะถูกนำมาอ้างอิงเป็นกำลังผลิตไฟฟ้าในอุดมคติ  $P_{inso\_ideal}$  จากความจุแบตเตอรี่คงเหลือในแต่ละวันนำมาคำนวณหาพลังงานที่ต้องการในการประจุแบตเตอรี่ให้ได้ SOC อย่างน้อย 95% เมื่อดวงอาทิตย์ตกดินแล้วสร้างเส้นการผลิตไฟฟ้ารวมที่คาดหวังด้วย  $K \cdot P_{inso\_ideal}$  โดยเมื่อการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จริงมากกว่าการผลิตไฟฟ้ารวมที่คาดหวัง ( $P_{pv} > K \cdot P_{inso\_ideal}$ ) กำลังไฟฟ้าส่วนที่เกินจะถูกประจุให้กับแบตเตอรี่ ในทางกลับกันเมื่อ  $P_{pv} < K \cdot P_{inso\_ideal}$  ก็จะเป็นการคายประจุดังรูปที่ 3 โดยที่ค่า  $K$  มีค่าระหว่าง 0-1 และจะเปลี่ยนไปในแต่ละวันโดยขึ้นอยู่กับ เส้นโค้ง  $P_{inso\_ideal}$  และ SOC เมื่อเริ่มวัน

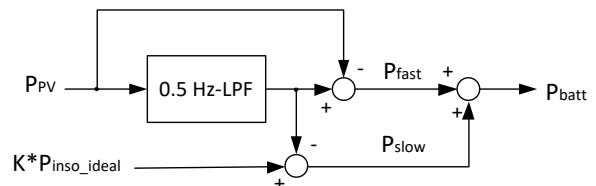
SOC ของแบตเตอรี่ระหว่างวันจะถูกกำหนดให้ไม่ต่ำกว่า 30% กรณีการสำรองพลังงานในสภาวะฉุกเฉิน และไม่ต่ำ 50% ในสภาวะการใช้งานปกติซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานมากกว่า 2 ปี ตามการอ้างอิงของผู้ผลิตแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่ว



รูปที่ 3 Insolation เพื่อใช้อ้างอิงการ Charge และ Discharge แบตเตอรี่

## 4. การลดความผันผวนของความถี่

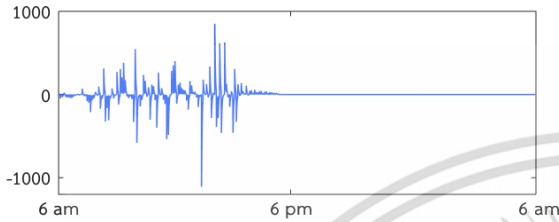
ความผันผวนของความถี่ของไมโครกริดซึ่งควบคุมกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการควบคุมความถี่และแรงดันมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตอย่างรวดเร็วอาจมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลัน และหรือจากการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตอย่างรวดเร็วของระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ในการลดความผันผวนของความถี่ของระบบไมโครกริดนี้ กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ Pfast และ Pslow ซึ่งตั้งชื่อตามลักษณะของสัญญาณที่ได้



รูปที่ 4 รูปแบบการคำนวณ Pfast และ Pslow

**Pfast**

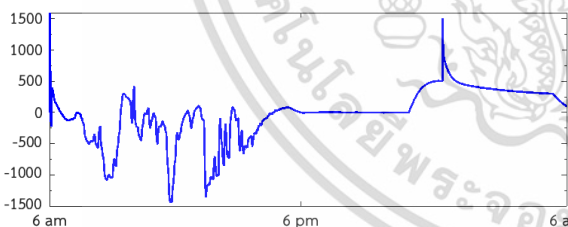
- สัญญาณ Pfast เป็นสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงซึ่งเกิดจากความผันผวนของการผลิตพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์
- ทำให้ความผันผวนของความถี่ไฟฟ้าซึ่งเป็นผลมาจาก P-f Droop Control ของระบบลดลง โดยทำการทดแทน Pfast ในทุกช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- ไม่ส่งผลกระทบต่อ SOC ของแบตเตอรี่เนื่องจากใช้ส่วนนี้เพียงช่วงสั้นๆ



รูปที่ 5 สัญญาณ Pfast

**Pslow**

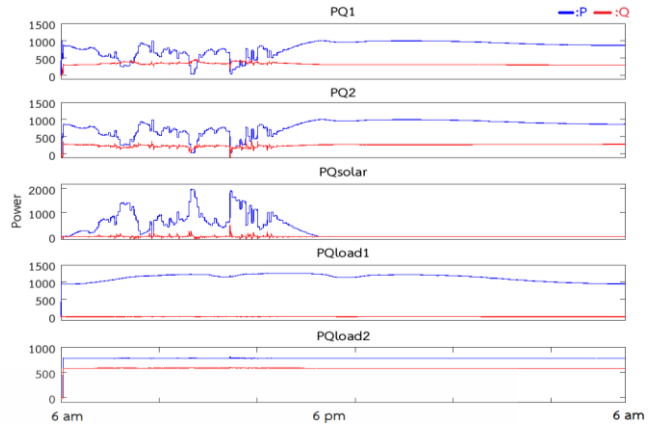
- สัญญาณ Pslow บ่งบอกปริมาณการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่
- ช่วยให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าของ Generator1 และ 2 มีความผันผวนน้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจาก P-f Droop Control ร่วมกับการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยพลังงานในส่วนนี้จะเข้าไปทดแทนในส่วนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง
- พลังงานที่กักเก็บได้จะใช้ในการจ่ายโหลดเพื่อแบ่งเบาภาระเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะช่วยทำการจ่ายโหลดในช่วงเวลากลางคืน และทำการจ่ายโหลดได้ในช่วงเวลาฉุกเฉินได้
- กรณี SOC < 30% จะให้ทำการ Charge ได้อย่างเดียว
- กรณี SOC > 95% จะให้ทำการ Discharge ได้อย่างเดียว



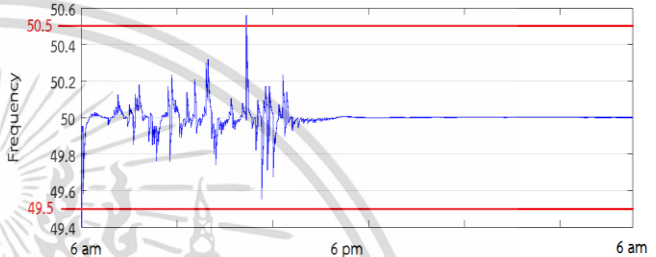
รูปที่ 6 สัญญาณ Pslow

**5. ผลการเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงาน**

ผลของการจำลองระบบก่อนทำการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงานในช่วงการผลิตที่ไม่สม่ำเสมอของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (PQsolar) เมื่อทำการควบคุม P-f Droop Control ระหว่าง Generator ทั้ง 3 หน่วยแล้ว จะสังเกตได้ว่ากำลังไฟฟ้าจาก Generator 1 (PQ1) และ 2 (PQ2) ในรูปที่ 7 จะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยซึ่งเป็นผลจาก P-f Droop Control ซึ่งจะทำให้ความถี่กำลังไฟฟ้าของระบบมีการเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้นตามไปด้วยดังรูปที่ 8



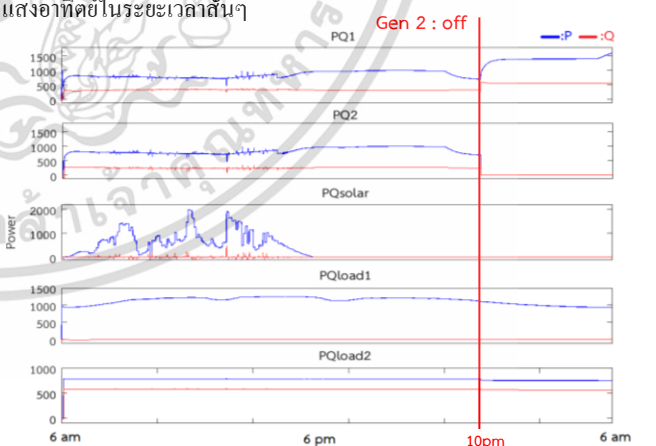
รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของระบบก่อนการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน



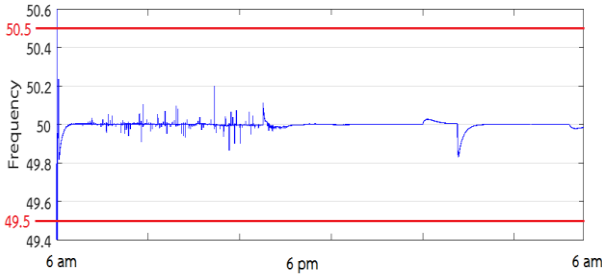
รูปที่ 8 ความถี่กำลังไฟฟ้าก่อนเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน

เมื่อทำการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงานให้กับระบบไมโครกริด การผลิตไฟฟ้าด้วย Generator 1 และ 2 หรือ PQ1 และ 2 จะมีความสม่ำเสมอมากขึ้นดังรูปที่ 9

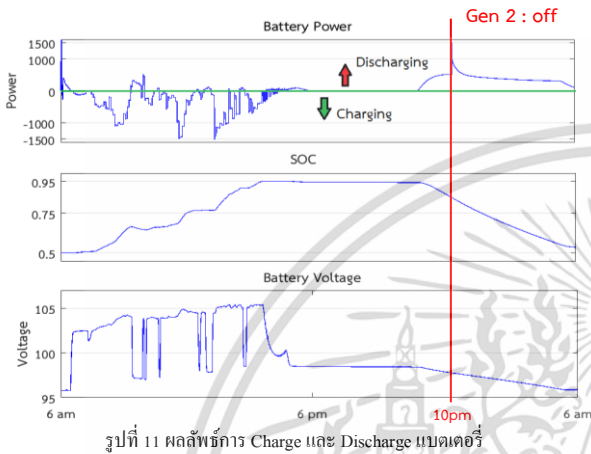
ความถี่กำลังไฟฟ้าของระบบมีความผันผวนน้อยลงหลังจากการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน โดยไม่เกินค่ามาตรฐาน หรืออยู่ในช่วงไม่เกิน  $\pm 0.5$  Hz ดังรูปที่ 10 เนื่องจากการทดแทนด้วยพลังงาน Pfast ซึ่งทดแทนด้วยความรวดเร็วในช่วงที่เกิดการผันผวนของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในระยะเวลานั้นๆ



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของระบบหลังการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 10 ความถี่ไฟฟ้ากำลังหลังเพิ่มระบบกักเก็บพลังงาน



รูปที่ 11 ผลลัพธ์การ Charge และ Discharge แบตเตอรี่

กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะถูกแสดงดังรูปที่ 11 (กราฟบนสุด) โดยหากกำลังไฟฟ้ามากกว่าศูนย์จะเป็นการคายประจุออกจากแบตเตอรี่เพื่อจ่ายให้กับระบบ และหากน้อยกว่าศูนย์จะเป็นการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ ในการจำลองกำหนดให้ SOC เริ่มต้นอยู่ที่ 50% และเมื่อดวงอาทิตย์ SOC จะต้องไม่ต่ำกว่า 95% กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะถูกใช้ในตอนกลางคืนเพื่อทดแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่ 2 เมื่อความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดรวมลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนด

แรงดันของแบตเตอรี่จะอยู่ในช่วง 96-106 V โดยแบตเตอรี่ประเภทกรดตะกั่วที่ใช้ ค่อนข้างด้วยกัน 8 หน่วย การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเกิดจากการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ตามความสัมพันธ์ที่นำเสนอไว้ในหัวข้อ 2.2

## 6. สรุป

บทความนี้ได้นำระบบกักเก็บพลังงานมาใช้ในระบบไมโครกริดเพื่อแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของการผลิตไฟฟ้าแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน โดยสามารถลดผลกระทบด้านความผันผวนของความถี่ของระบบไมโครกริด และสามารถกักเก็บพลังงานได้ตามที่คาดหวัง

การออกแบบระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงาน โดยใช้ค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าที่คาดหวังในการกำหนดกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ เพื่อให้ได้ SOC เพียงพอก่อนดวงอาทิตย์ตก และการใช้กำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ของแบตเตอรี่เพื่อลดความผันผวนของความถี่จากกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ Pfast และ Pslow โดย Pfast จะทำให้

ความผันผวนของความถี่ลดลง และ Pslow จะทำการแบ่งเบาภาระของ Generator 1 และ 2 ในการ Sharing Load ทั้งนี้ยังใช้ในการกักเก็บพลังงานในแบตเตอรี่เพื่อไว้จ่ายให้กับโหลดในช่วงเวลาที่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ได้ ซึ่งผลการจำลองด้วย MATLAB/Simulink ทำให้เห็นว่า การใช้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถลดความแปรปรวนทางความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] onmin Jo and H. Cha, "Stability of battery energy storage system operating with diesel generator in a stand-alone microgrid," *2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2017, pp. 1-5.
- [2] E. O Ogunniyi, HCvZ Pienaar, "Overview of Battery Energy Storage System Advancement for Renewable (Photovoltaic) Energy Applications" *2017 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*, Cape Town, South Africa, 2017, pp. 233-239.
- [3] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications", *World Electric Vehicle Journal Vol.3*, ISSN 2032-6653, May 2009, pp.0289-0298.
- [4] Sergei Melentjev, Deniss Lebedev, "Overview of Simplified Mathematical Models of Batteries", *Tallinn University of Technology (Estonia)*, pp.231-235.
- [5] H. s. Lee and B. G. Koo, "The Strategy Control of Islanded Microgrid Using Battery's State-of-Charge," *2015 6th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, Kuala Lumpur, 2015, pp. 164-168.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 209 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายกิตติโชติ สุนทรทวีทรัพย์  
 วัน เดือน ปีเกิด 20 พฤษภาคม 2537 ที่กรุงเทพฯ  
 ที่อยู่ 1414 ซอยอ่อนนุช 42 ถนนอ่อนนุช แขวงอ่อนนุช เขตสวนหลวง  
 จังหวัดกรุงเทพฯ 10250  
 ประวัติการศึกษา 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 (เกียรตินิยมอันดับ 1)  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ผลงานทางวิชาการ

1. กิตติโชติ สุนทรทวีทรัพย์, สมภาพ ผลไม้, “การควบคุมระบบกักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริด เพื่อลดความผันผวนทางความถี่,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐ (EECON-40), Vol 1, 2560, หน้า 206-209.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้