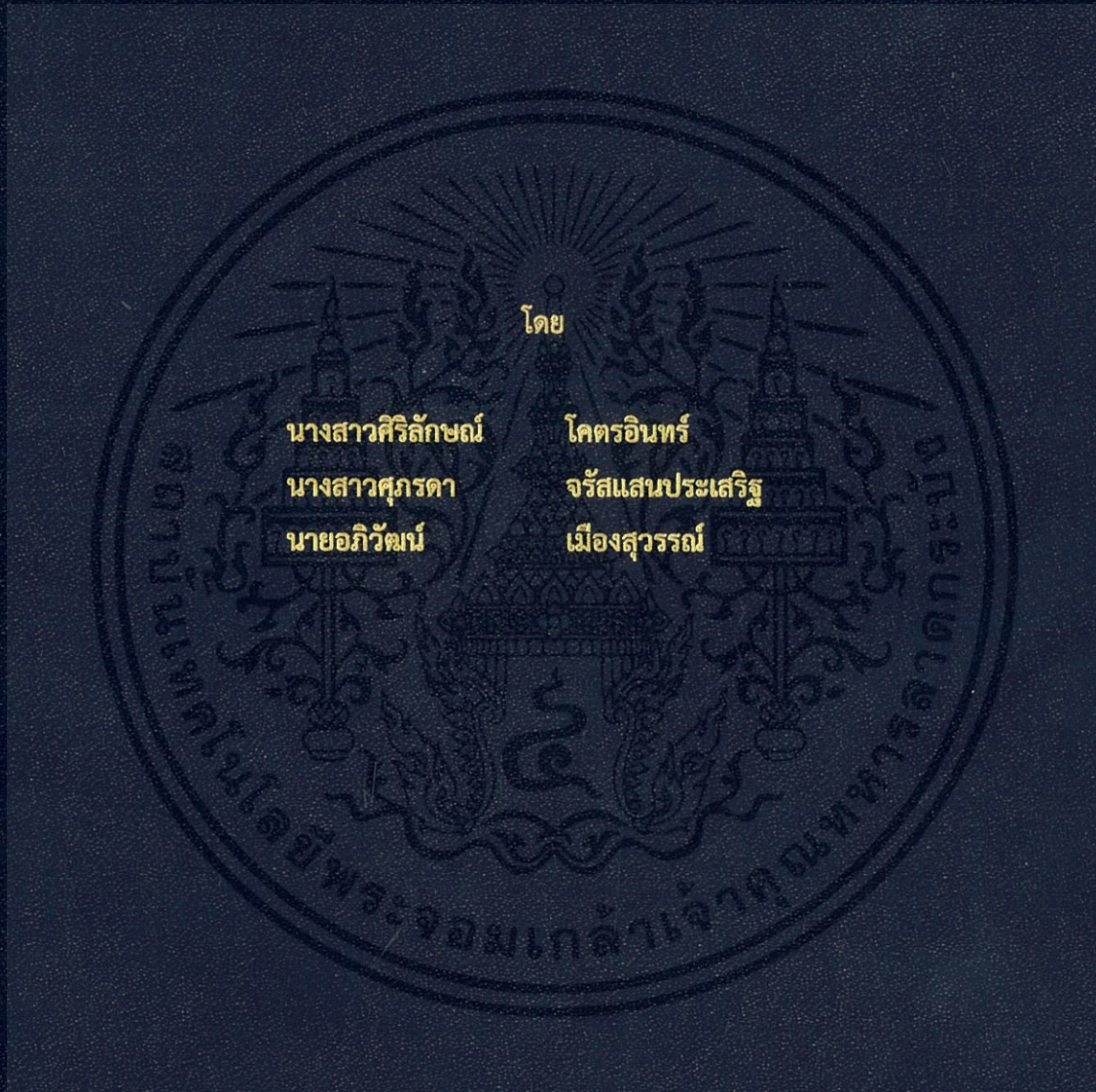


ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริด
BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM FOR MICROGRID



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริด
BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM FOR MICROGRID



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM FOR MICROGRID



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริด
BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM FOR MICROGRID



โดย
นางสาวศิริลักษณ์ โคตรอินทร์
นางสาวศุภรดา จรัสแสนประเสริฐ
นายอภิวัฒน์ เมืองสุวรรณ

อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.สมภาพ ผลไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริด

ผู้จัดทำ

1. นางสาวศิริลักษณ์ โคตรอินทร์
2. นางสาวศุภรดา จรัสแสนประเสริฐ
3. นายอภิวัฒน์ เมืองสุวรรณ



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.สมภพ ผลไม้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริด

นางสาวศิริลักษณ์	โคตรอินทร์
นางสาวศุภรดา	จรัสแสนประเสริฐ
นายอภิวัฒน์	เมืองสุวรรณ
ดร.สมภาพ	ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2561	

บทคัดย่อ

ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานถูกนำมาใช้ในไมโครกริดเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองให้แก่ระบบไมโครกริด ปริมาณงานนี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไมโครกริดด้วยระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า และเพื่อแก้ปัญหาค่าใช้จ่ายที่ไม่สม่ำเสมอของการผลิตพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ที่ส่งผลให้เกิดความผันผวนในการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเกิดความผันผวนทางความถี่ขึ้นมาตามลำดับ โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าขาออกของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานให้สอดคล้องกับส่วนที่ผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ปริมาณงานนี้ได้ดำเนินการออกแบบและจำลองผลวงจรควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานด้วยโปรแกรม PSIM และยืนยันผลการจำลองด้วยการทดลองกับไมโครกริดสาธิตในห้องปฏิบัติการ

BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM FOR MICROGRID

Ms.SIRILUCK

KHOT-IN

Ms.SUPARADA

JARUSSAENPRASERT

Mr.APIWAT

MUANGSUWAN

Dr.SOMPOB

POLMAI

ADVISOR

ABSTRACT

Battery Energy Storage System (BESS) is used in Microgrid for emergency energy reservation. The objective of this study is to improve power quality of the microgrid using BESS in order to maintain system stability, and to mitigate frequency fluctuation due to intermittence nature of renewable energy resource in the microgrid. The frequency suppression is achieved by controlling the output power of BESS in accordant with the power fluctuation part of the renewable energy resource. In this thesis, the design and simulation of the BESS control system are carried out using PSIM. The design parameters are implemented in the laboratory demonstration microgrid and the validation of the control system is confirmed by the experimental results.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สมภพ ผลไม้ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และคำชี้แนะเพื่อเป็นแนวทางและความช่วยเหลือสำหรับการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาผู้ถ่ายทอดความรู้ให้กับคณะผู้จัดทำอย่างใกล้ชิด ให้ความรู้ในการทำโครงงาน และมีทักษะที่ดีเพื่ออนาคตในภายภาคหน้าต่อไป

ขอขอบคุณ คุณกิตติโชติ สุนทรทวีทรัพย์ และคุณ Darith Leng ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ ทั้งทางด้านเนื้อหา การออกแบบอุปกรณ์และการเขียนโปรแกรม จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ส่งเสริมสนับสนุน การศึกษา การวิจัย และการทำโครงงานของนักศึกษา

ท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง ที่เป็นกำลังใจสำคัญที่ตีเสมอมา

คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบให้บิดา มารดาและครอบครัว ตลอดจนคณาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์แก่คณะผู้จัดทำ

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 แผนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 โครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานិพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ระบบไมโครกริด	5
2.2 ระบบกักเก็บพลังงาน	6
2.3 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics Circuits)	6
2.4 PWM Inverter	10
2.5 ระบบควบคุม (Control Systems)	14
2.6 เทคนิคการควบคุมที่ใช้	23
2.7 เฟสล็อกคูลูป (Phase Locked Loop)	24
2.8 วงจรกรองความถี่ (Filter)	25
2.9 ฮาร์มอนิกส์กับคุณภาพกำลังไฟฟ้า	28
บทที่ 3 ออกแบบและจำลองผลวงจรควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า สำหรับระบบกักเก็บพลังงาน	32
3.1 วงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง	33
3.2 วงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง	35
3.3 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนพาวเวอร์โมดูล	42

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	44
4.1 ผลการทำงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน	44
4.2 ผลจำลองการเชื่อมต่อระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเข้าสู่ไมโครกริด	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง อุปสรรคและข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุปผลการทดลอง	54
5.2 อุปสรรคและข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก	57
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	58
ภาคผนวก ข Poster	63
ภาคผนวก ค Mitsubishi Intelligent Power Modules PM50RL1A120 Datasheet	65
ภาคผนวก ง DSP F28335 Datasheet	75
ประวัติผู้เขียน	80



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แหล่งกำเนิดและโหลดที่เชื่อมต่อกันโดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า	6
2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสามารถทำงานเป็น Rectifier หรือ Inverter ขึ้นอยู่กับทิศทางของกำลังไฟฟ้า	8
2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง	8
2.4 การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง	9
2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเฟสเดียว	10
2.6 วงจรการมอดูเลต ความกว้างของพัลส์	11
2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ H Bridge	11
2.8 การสวิตซ์แรงดันแบบสองขั้ว (Bipolar PWM)	12
2.9 การสวิตซ์แรงดันแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar PWM)	13
2.10 เปรียบเทียบฮาร์มอนิกไซด์แบนระหว่างไบโพลาร์กับยูนิโพลาร์	14
2.11 ส่วนประกอบของระบบควบคุม	14
2.12 ตัวควบคุมแบบพี	15
2.13 ตัวควบคุมแบบไอ	16
2.14 ตัวควบคุมแบบดี	16
2.15 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์	17
2.16 ตัวควบคุมแบบพีไอ	17
2.17 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์	17
2.18 ตัวควบคุมแบบพีไอดี	18
2.19 ตัวควบคุมแบบพีดี	18
2.20 ตัวควบคุมแบบพีไอดี	19
2.21 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบฟีดแบ็กแบบอูตมคติ	20
2.22 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบฟีดแบ็กแบบไม่อูตมคติ	20
2.23 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบฟีดแบ็กแบบไม่อูตมคติดูกับการชดเชยฮาร์มอนิกส์	21
2.24 แผนภาพโบท	22
2.25 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง	23
2.26 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงเป็นกระแสสลับ	24
2.27 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเฟสล็อกคลุก	25

2.28	วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	26
2.29	วงจรรองความถี่สูงผ่าน	26
2.30	วงจรรองแถบความถี่ผ่าน	26
2.31	วงจรรองกำจัดแถบความถี่	27
2.32	วงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบ T	27
2.33	วงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาย	28
2.34	วงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบ LCL	28
3.1	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองทิศทาง	32
3.2	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง	33
3.3	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางด้วยโปรแกรม PSIM	33
3.4	วงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง	34
3.5	ผลการจำลองวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง	35
3.6	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง	35
3.7	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงด้วยโปรแกรม PSIM	36
3.8	วงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง	36
3.9	กระแสไฟฟ้าอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์	36
3.10	กระแสไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานและกระแสไฟฟ้าจากไมโครกริด	37
3.11	FFT ของกระแสของระบบกักเก็บพลังงานก่อนมีการชดเชยฮาร์มอนิกส์	37
3.12	FFT ของกระแสของระบบกักเก็บพลังงานหลังมีการชดเชยฮาร์มอนิกส์	37
3.13	วงจรควบคุมเฟสล็อกคูลูป (Phase Locked Loop)	38
3.14	ขนาดของแรงดันอ้างอิง (Voltage Magnitude Reference)	39
3.15	มุมอ้างอิง (Theta Reference)	39
3.16	สัญญาณไซน์อ้างอิงและโคไซน์อ้างอิง (Sine Reference and Cosine Reference)	40
3.17	แรงดันไฟฟ้าจากไมโครกริดและแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง	40
3.18	วงจรหน่วงเวลา (Delay) การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง	41
3.19	สถานะของสัญญาณ PWM	41
3.20	Mitsubishi Intelligent Power Modules PM50RL1A120	42
3.21	Application Example Circuit Datasheet	42

3.22 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนในโปรแกรม Altium Designer	43
3.23 PCB วงจรขับเคลื่อนที่ออกแบบ	43
4.1 วงจรแปลงผันกำลังโดยใช้พาวเวอร์โมดูล	44
4.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า	45
4.3 ชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการ	45
4.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า	46
4.5 วงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ	46
4.6 รูปคลื่นของกระแสและแรงดัน	47
4.7 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าโหมดย้ายพลังงานเข้าสู่ไมโครกริด	47
4.8 ขนาดของกระแสและแรงดัน	48
4.9 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับเคลื่อนวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง	48
4.10 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์	49
4.11 รูปคลื่นของกระแสและแรงดัน	49
4.12 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าโหมดย้ายพลังงานจากไมโครกริด	50
4.13 ขนาดของกระแสและแรงดัน	50
4.14 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับเคลื่อนวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง	51
4.15 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์	51
4.16 โปรไฟล์กำลังไฟฟ้าของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง	52
4.17 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการจ่ายพลังงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน	52
4.18 กำลังไฟฟ้าที่ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานจ่ายหรือรับเพื่อชดเชยความผันผวนทาง ความถี่ของกำลังไฟฟ้า	53

สารบัญตาราง

ตารางที่

1.1 แผนการดำเนินงาน

หน้า

2



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการพัฒนาของโลกเป็นไปอย่างก้าวกระโดด ไม่ว่าจะเป็นการขยายตัวของจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น การเติบโตของระบบเศรษฐกิจ รวมถึงขีดความสามารถทางเทคโนโลยีที่เพิ่มขึ้น ล้วนส่งผลให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณ เมื่ออุปสงค์เพิ่มขึ้นจึงจำเป็นต้องผลิตพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเพื่อรองรับความต้องการในส่วนนี้ อย่างไรก็ตามในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันถูกจำกัดด้วยปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีจำนวนจำกัดและมีปริมาณลดลงซึ่งไม่สามารถเป็นแหล่งพลังงานที่มั่นคงได้อีกต่อไป เช่นเดียวกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์ซึ่งมีความเสี่ยงด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือ ประกอบกับการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างฟุ่มเฟือย นับตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อนที่ส่งผลกระทบต่อทั่วโลก ค่านิยมในปัจจุบันจึงให้ความสำคัญกับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ดังนั้นพลังงานหมุนเวียนจึงเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ก้าวข้ามข้อจำกัดดังกล่าวและได้รับความนิยมในปัจจุบัน

สำหรับระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปที่เชื่อมต่อกันเป็นระบบขนาดใหญ่ เมื่อเกิดความผิดปกติที่คาดไม่ถึงกับระบบไฟฟ้า ความเสียหายที่เกิดขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อเป็นบริเวณกว้างหากระบบป้องกันไม่สามารถป้องกันระบบได้ ดังนั้นเพื่อให้ระบบไฟฟ้าสามารถดำเนินการต่อไปได้โดยไม่ได้รับผลกระทบ ระบบไมโครกริดแบบแยกอิสระจึงถูกพัฒนาขึ้น โดยระบบไมโครกริดดังกล่าวสามารถเชื่อมต่อเข้ากับกริดและสามารถแยกตัวออกมาเป็นอิสระหากมีความผิดปกติเกิดขึ้นกับกริดได้

โดยทั่วไปพลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าหลักสำหรับระบบไมโครกริด ซึ่งพลังงานหมุนเวียนมีความไม่แน่นอนในการผลิตพลังงาน กล่าวคือมีความผันผวนสูง ดังนั้นระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System) จึงถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบไมโครกริด เพื่อใช้ชดเชยความผันผวนที่เกิดจากความสามารถในการผลิตพลังงานจากพลังงานหมุนเวียนและเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองให้แก่ระบบ ซึ่งระบบกักเก็บพลังงานช่วยปรับปรุงทั้งเสถียรภาพและคุณภาพของระบบไฟฟ้าได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้าง หลักการทำงานและหลักการควบคุมระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด

1.2.2 เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังสำหรับระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด

1.2.3 เพื่อปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด

1.2.4 เพื่อชดเชยความผันผวนทางความถี่ของกำลังไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ออกแบบระบบควบคุมสำหรับระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดสาธิตในห้องปฏิบัติการเพื่อรักษาเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าขณะใช้งานระบบกักเก็บพลังงานร่วมกับระบบไมโครกริดสาธิตในห้องปฏิบัติการ

1.4 แผนการดำเนินงาน

ตาราง 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ศึกษาเกี่ยวกับหลักการ ทำงานของระบบไมโคร กริดและระบบกักเก็บ พลังงานสำหรับไมโคร กริด									
ศึกษาเกี่ยวกับวงจรควบคุม วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ของระบบกักเก็บพลังงาน ในไมโครกริด									
ออกแบบและจำลองผล วงจรควบคุมควบคุมวงจร แปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อ ปรับปรุงคุณภาพกระแส ไฟฟ้าของระบบกักเก็บ									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานสำหรับไมโครกริด									
ทดสอบการทำงานของ วงจรควบคุมวงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้าเพื่อปรับปรุง คุณภาพกระแสไฟฟ้าของ ระบบกักเก็บพลังงาน สำหรับไมโครกริด									
นำระบบกักเก็บพลังงานมา ใช้กับระบบไมโครกริดสาธิต ในห้องปฏิบัติการเพื่อลด ความผันผวนทางความถี่ที่ ของกำลังไฟฟ้าเกิดจากการ ผลิตพลังงานไฟฟ้าจาก พลังงานหมุนเวียน									

←-----→ แสดงระยะเวลาที่วางแผนจะทำการปฏิบัติงาน

←-----→ แสดงระยะเวลาปฏิบัติงานจริง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจโครงสร้างและหลักการทำงานของระบบไมโครกริด รวมถึงหลักการทำงานและหลักการควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด
2. สามารถเขียนและเข้าใจโครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังที่ใช้ในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานกับระบบไมโครกริด

1.6 โครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญาพันธ์

เนื้อหาในปฏิญญาพันธ์ ประกอบไปด้วย

บทที่ 1 บทนำ ประกอบด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของโครงการ ขอบเขตของการศึกษา แผนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับไมโครกริด ระบบกักเก็บพลังงาน วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สัญญาณ PWM ระบบควบคุมแบบต่าง ๆ และเทคนิคการควบคุมที่เลือกใช้ เฟสล็อกคูลูป วงจรกรองความถี่และฮาร์มอนิกกับคุณภาพกำลังไฟฟ้า

บทที่ 3 ออกแบบและจำลองผลวงจรควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบกักเก็บพลังงาน เป็นการจำลองผลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริง วงจรควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า จำลองผลการเชื่อมต่อบทที่กักเก็บพลังงานเข้ากับกริดด้วยโปรแกรม PSIM และการออกแบบแผ่นวงจรขับเคลื่อนเวอริโมดูล

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง ผลการทำงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานและผลจำลองการเชื่อมต่อบทที่กักเก็บพลังงานเข้าสู่ไมโครกริด

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง อุปสรรคและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้ไฟฟ้าวรรวมถึงผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน เพื่อเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของระบบจึงมีการนำระบบไมโครกริดมาเชื่อมต่อกับกริดหลัก โดยระบบไมโครกริดมีแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เป็นต้น ซึ่งจะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้าหรือใช้ในกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้นในกริดหลัก และยังสามารถลดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ในการใช้งานระบบไมโครกริด มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำระบบกักเก็บพลังงานเข้ามาใช้ เพื่อลดความผันผวนทางความถี่ของระบบที่เกิดจากการใช้พลังงานหมุนเวียนในการผลิตไฟฟ้า

2.1 ระบบไมโครกริด

กริด (Grid) หมายถึง ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในปัจจุบันมีระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดระบบกริดที่ขนาดใหญ่จนกลายเป็นโครงข่าย วัตถุประสงค์ของโครงข่ายไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในอดีตคือส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าด้วยระบบที่ใช้เทคโนโลยีเดิมนี่ส่งผลให้เกิดความสูญเสีย (Loss) ขึ้นในระบบไฟฟ้ามาก เนื่องจากต้องส่งไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าที่มีระยะทางไกลจากผู้ใช้ไฟ และใช้เวลาในการแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้องนาน เนื่องจากไม่รู้ตำแหน่งเกิดเหตุผิดปกติ (Fault) ระบบไมโครกริดจึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อปรับปรุงระบบกริดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ระบบไมโครกริด (Microgrid) คือโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีการต่อเชื่อมแหล่งผลิตไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานทดแทนร่วมกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนร่วม ซึ่งระบบไมโครกริดต่อเข้ากับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้แก่กลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้า ข้อดีของระบบไมโครกริดคือสามารถเชื่อมต่อกับกริดหลักและสามารถปลดตัวเองออกจากกริดหลักและสามารถผลิตและส่งกำลังไฟฟ้าภายในพื้นที่ (Island) ได้ ดังนั้นเมื่อระบบกริดหลักเกิดความผิดปกติ ระบบไมโครกริดสามารถปลดตัวเองออกเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อระบบไมโครกริดได้และสามารถเชื่อมต่อกลับเข้าระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้เมื่อความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้รับการแก้ไข ทั้งนี้การมีอยู่ของระบบไมโครกริดช่วยเสริมความมั่นคงแก่กริดหลักเนื่องจากระบบไมโครกริดมุ่งเน้นการผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าภายในพื้นที่ การเพิ่มขึ้นของไมโครกริดจะไม่ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังหลัก ในขณะเดียวกันก็ช่วยเสริมความมั่นคงของการส่งจ่ายไฟฟ้าวรรวมถึงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้า ในพื้นที่ของไมโครกริดความต้องการเสริมความมั่นคงทางพลังงานจะได้รับการ

ตอบสนอง ขณะที่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตไฟฟ้าก็น้อยลงจากการใช้พลังงานหมุนเวียน และประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมที่เพิ่มขึ้น [1]

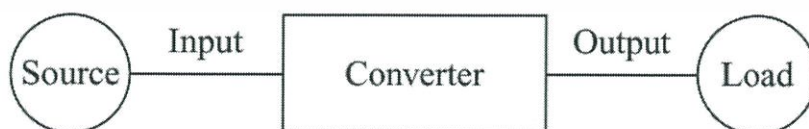
2.2 ระบบกักเก็บพลังงาน

ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) หมายถึง ระบบที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปแบบอื่น เพื่อใช้สำหรับกักเก็บพลังงานและนำไปใช้ในเวลาอื่นได้ โดยระบบกักเก็บพลังงานจะแปลงพลังงานที่กักเก็บกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าเมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้า ตัวอย่างระบบกักเก็บพลังงานที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ แบตเตอรี่

ระบบกักเก็บพลังงานสามารถทำงานร่วมกับองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าได้ ช่วยส่งเสริมให้ระบบผลิตไฟฟ้ามีเสถียรภาพและรักษาคุณภาพไฟฟ้าโดยการทำงานร่วมกับแหล่งผลิตไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับแหล่งพลังงานหมุนเวียน สถานีไฟฟ้า ระบบไมโครกริด ไปจนถึงผู้ใช้ไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานจะทำหน้าที่เก็บพลังงานส่วนเกินเข้าสู่ระบบกักเก็บพลังงานในกรณีที่มีการผลิตไฟฟ้ามากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ในทางตรงกันข้าม ระบบกักเก็บพลังงานจะทำหน้าที่จ่ายพลังงานเข้าสู่ระบบในกรณีที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้ามากกว่าการผลิตไฟฟ้า เพื่อรองรับความผันผวนในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน การนำระบบกักเก็บพลังงานมาใช้ร่วมกับพลังงานหมุนเวียน จะช่วยลดความผันผวนที่เกิดขึ้น ช่วยรักษาความถี่ของระบบไฟฟ้า (Frequency Regulation) ช่วยเป็นกำลังไฟฟ้าสำรอง (Spinning Reserve) ช่วยรักษาแรงดันของระบบไฟฟ้า (Voltage Support)

2.3 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics Circuits)

วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังแปลงพลังงานไฟฟ้าจากรูปแบบหนึ่งไปยังอีกรูปแบบหนึ่งโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำงานโดยใช้เซมิคอนดักเตอร์เป็นอุปกรณ์สวิตชิงซึ่งจะควบคุมโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า วัตถุประสงค์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังคือเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตรงกับความต้องการของโหลดจากแหล่งกำเนิด วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจะเชื่อมต่ออยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดและโหลดดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แหล่งกำเนิดและโหลดที่เชื่อมต่อกันโดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจำแนกตามความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตได้ดังนี้

AC-DC Converter

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วงจรเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifier)

DC-AC Converter

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

DC-DC Converter

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ใช้เพื่อเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสตรง

AC-AC Converter

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ใช้เพื่อเปลี่ยนระดับและ/หรือ ความถี่ของสัญญาณกระแสสลับ

2.3.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC Converter)

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นวงจรไฟฟ้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในระดับแรงดันอื่น เพื่อควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงจำแนกตามระดับแรงดันเอาต์พุตได้ 2 แบบ คือ

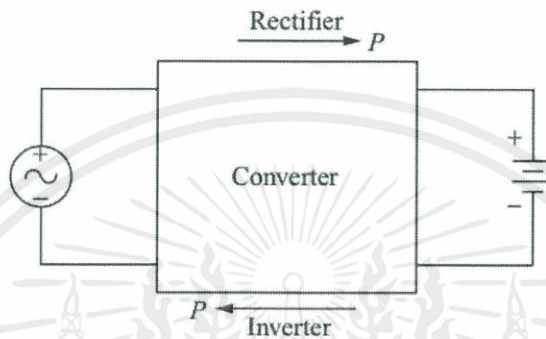
Buck (Step-Down) Converter

เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ให้แรงดันเอาต์พุตน้อยกว่าแรงดันอินพุต วงจรนี้เรียกว่า Buck Converter หรือ Step-Down Converter

Boost (Step-Up) Converter

เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ให้แรงดันเอาต์พุตมากกว่าแรงดันอินพุต วงจรนี้เรียกว่า Boost Converter หรือ Step-Up Converter

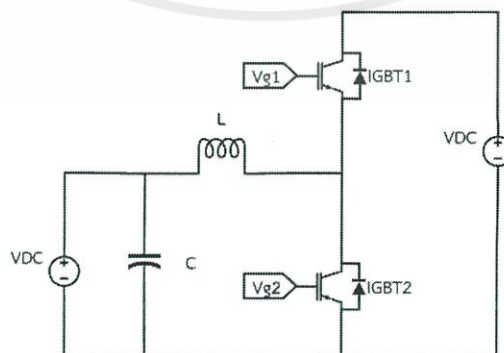
เนื่องจากแบตเตอรี่มีการรับและจ่ายพลังงานในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อต้องนำไปเชื่อมต่อกับระบบไมโครกริดที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จึงจำเป็นต้องมีการแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความเข้ากันได้ระหว่างแบตเตอรี่และไมโครกริด โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC Converter) และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหรือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (Inverter or Rectifier) เพื่อให้สามารถรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่กับระบบไมโครกริดได้ [2]



รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสามารถทำงานเป็น Rectifier หรือ Inverter ขึ้นอยู่กับทิศทางของกำลังไฟฟ้า

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC to DC Converter) เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับกรณีที่ต้องการให้มีการไหลของกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง ตัวอย่างเช่น มีกำลังไฟฟ้าไหลเข้ามาเพื่อชาร์จแบตเตอรี่และไหลออกจากแบตเตอรี่เพื่อไปใช้งาน ซึ่งอาจจะประยุกต์ใช้ในรถไฟฟ้า, การเก็บและจ่ายพลังงานของโซลาร์เซลล์ เป็นต้น

โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบควบคุมได้ (IGBT หรือ MOSFET) จำนวน 2 ตัวที่ต่อไดโอดขนานกันแบบกลับทิศ (Freewheeling Diode) ดังรูปที่ 2.3

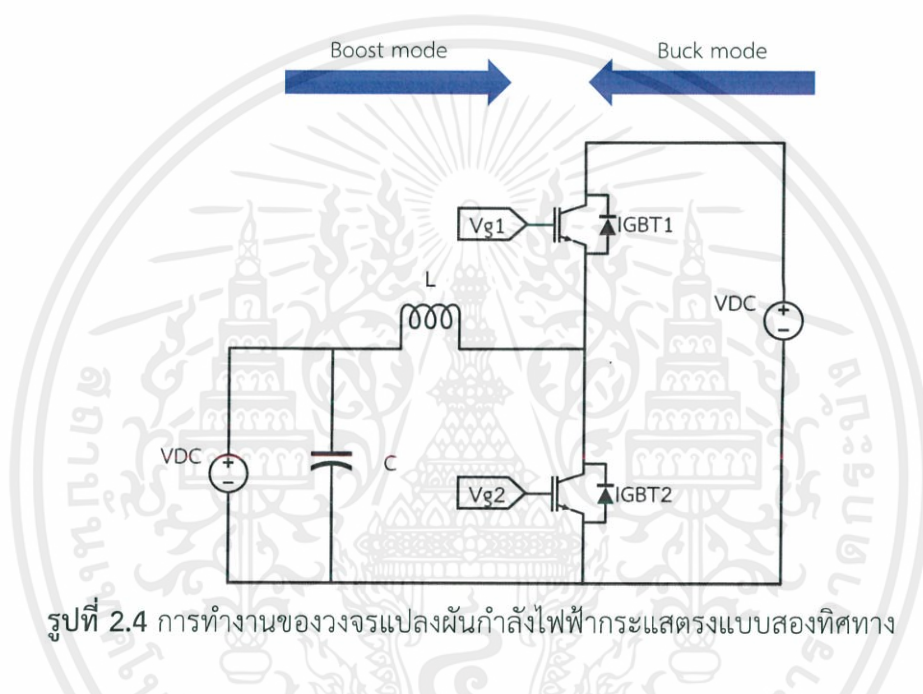


รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางมีการทำงานเป็นสองโหมดการทำงาน นั่นคือ โหมดบัคและโหมดบูส ซึ่งโหมดบัคเป็นวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) และ โหมดบูสทำงานเป็นวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter)

เมื่อวงจรทำงานในโหมดบัค IGBT1 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์และ IGBT2 ทำหน้าที่เป็นไดโอด ทำให้ได้เป็นวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

เมื่อวงจรทำงานในโหมดบูส IGBT2 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์และ IGBT1 ทำหน้าที่เป็นไดโอด ทำให้ได้เป็นวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์



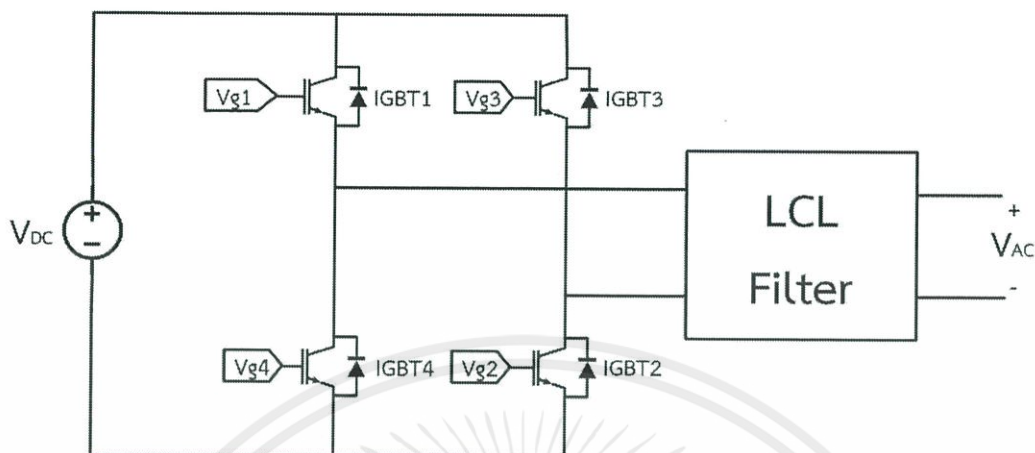
รูปที่ 2.4 การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง

2.3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC to AC Converter) หรืออินเวอร์เตอร์ (Inverter)

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหรืออินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งกำเนิดไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับไปยังโหลดกระแสสลับ ส่วนใหญ่มักใช้เทคนิคการสวิตชิงแบบ PWM (Pulse Width Modulation) เป็นสัญญาณในการควบคุมอุปกรณ์สวิตชิงเพื่อควบคุมการทำงานให้ได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดและความถี่ตามที่ต้องการ โดยแรงดันขาออกสามารถตั้งค่าให้คงที่หรือปรับค่าได้ตามต้องการที่ความถี่ใด ๆ

โดยพื้นฐานแล้ว วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับประกอบด้วย อุปกรณ์สวิตชิงและชุดวงจรควบคุมการทำงานอุปกรณ์สวิตชิง หลังจากนั้นนำไปผ่านวงจรกรองความถี่สูงเพื่อให้เหลือเฉพาะความถี่ต่ำ จึงจะสามารถได้รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เป็นรูปไซน์

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเป็นไปดังรูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

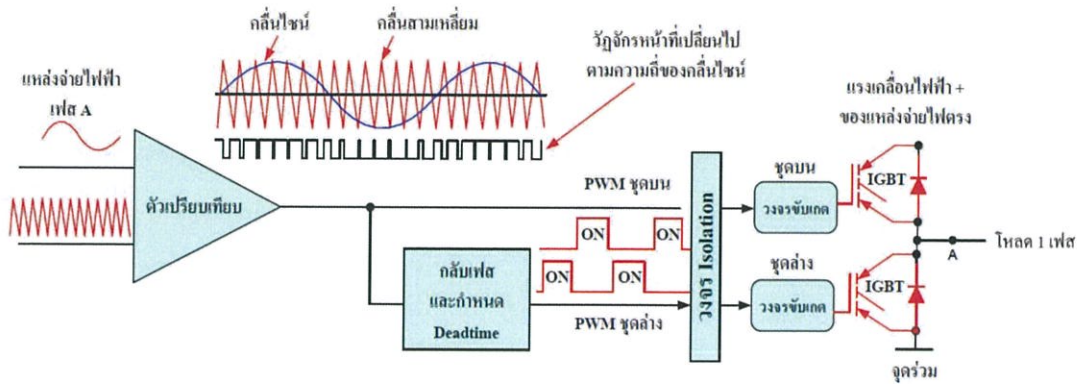


รูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับเฟสเดียว

2.4 PWM Inverter

อินเวอร์เตอร์แบบ PWM หมายถึง อินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าความถี่และค่าแรงดันไฟฟ้าได้ โดยการปรับรูปแบบการสวิตช์ที่อินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการมอดูเลตความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation) เนื่องจากการมอดูเลตความกว้างของพัลส์สามารถเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ได้ พร้อมกับการปรับเปลี่ยนความถี่

การมอดูเลตความกว้างพัลส์ใช้หลักการสัญญาณอ้างอิงรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Signal) เปรียบเทียบกับสัญญาณแคเรียร์ (Carrier Wave) เป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular Waveform) ผ่านวงจรเปรียบเทียบดังรูปที่ 2.6 เอาต์พุทที่ได้จะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมลักษณะพัลส์ (Pulse) ที่มีความกว้างไม่เท่ากันเนื่องจากถูกทำการมอดูเลต ซึ่งคลื่นพัลส์ที่ได้เป็นผลมาจากการเปรียบเทียบสัญญาณสองแบบ ความกว้างของพัลส์จะแปรผันตามสัดส่วนของคลื่นไซน์ ความถี่ของสัญญาณอ้างอิงจะเป็นตัวกำหนดความถี่ของเอาต์พุท ความกว้างสูงสุดของสัญญาณอ้างอิงจะควบคุมดัชนีการมอดูเลต และค่าแรงดันเอาต์พุทและความถี่ในการสวิตช์ซึ่งจะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมพัลส์ดังกล่าวจะถูกนำไปขับเกตอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งภายในวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งชุดบนทำงานด้วยสัญญาณ PWM ชุดบนและอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งชุดล่างทำงานด้วยสัญญาณ PWM ชุดล่างที่มีเฟสตรงกันข้าม รูปที่ 2.6 เป็นตัวอย่างผลของการมอดูเลตเฟส A ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งทำงาน [3]

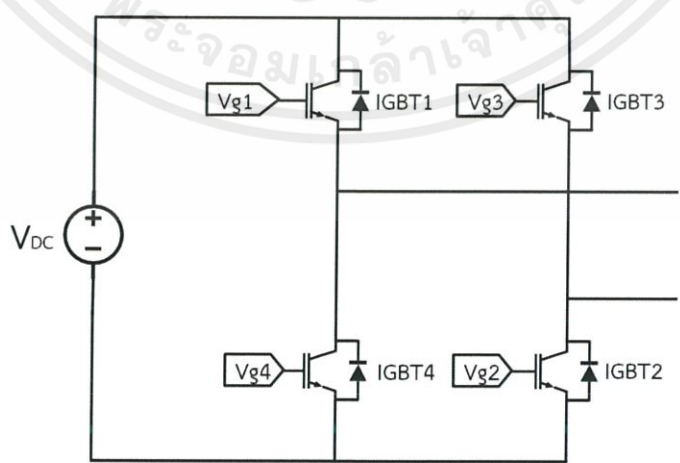


รูปที่ 2.6 วงจรการมอดูเลต ความกว้างของพัลส์

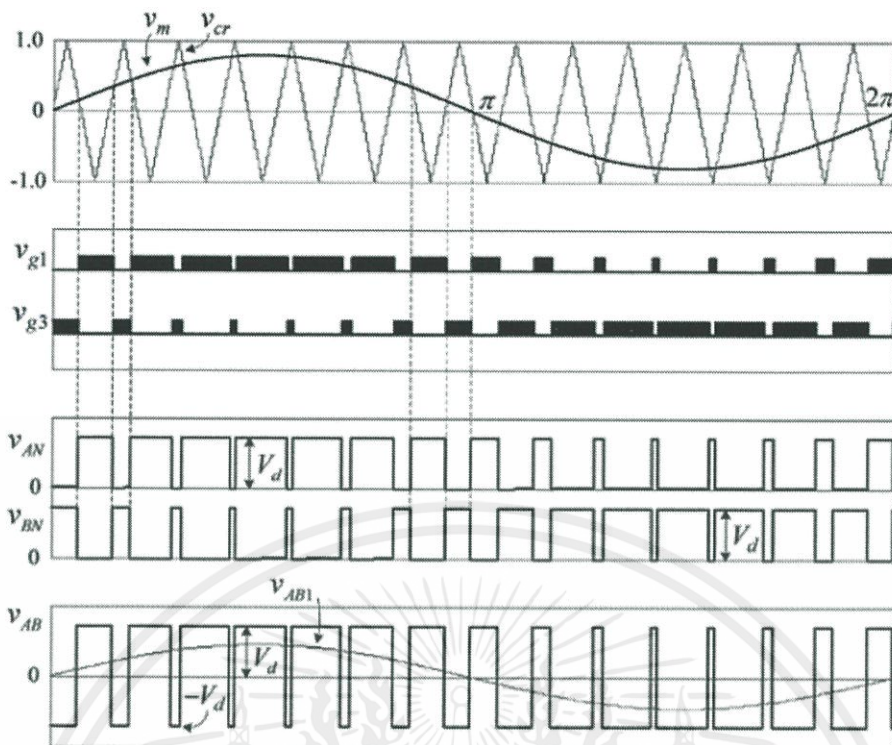
การควบคุมการสวิตช์ซึ่งด้วยสัญญาณ PWM นี้ แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การสวิตช์ซึ่งแรงดันแบบไบโพลาร์และการสวิตช์ซึ่งแรงดันแบบยูนิโพลาร์

1) การสวิตช์ซึ่งแรงดันแบบไบโพลาร์

การสวิตช์ซึ่งแรงดันแบบไบโพลาร์ เป็นการควบคุมให้สวิตช์แบบบริดจ์ดังรูปที่ 2.7 ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ โดยสวิตช์ IGBT1 และ IGBT2 ถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลา และสวิตช์ IGBT3 และ IGBT4 ถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลา ดังนั้นจะทำการพิจารณาเพียงสองสัญญาณที่เป็นอิสระจากกันคือ V_{g1} และ V_{g2} ซึ่งพัลส์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยการเปรียบเทียบสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Wave) V_m และสัญญาณแคเรียร์ (Carrier Wave) เป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular Waveform) V_c แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์จะแสดงโดย V_{AN} และ V_{BN} และแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันทางไฟฟ้า V_{AB} เนื่องจากรูปแบบของ V_{AB} สวิตช์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านบวกและลบ รูปแบบนี้จึงเรียกว่า การสวิตช์ซึ่งแรงดันแบบสองขั้ว (Bipolar PWM) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



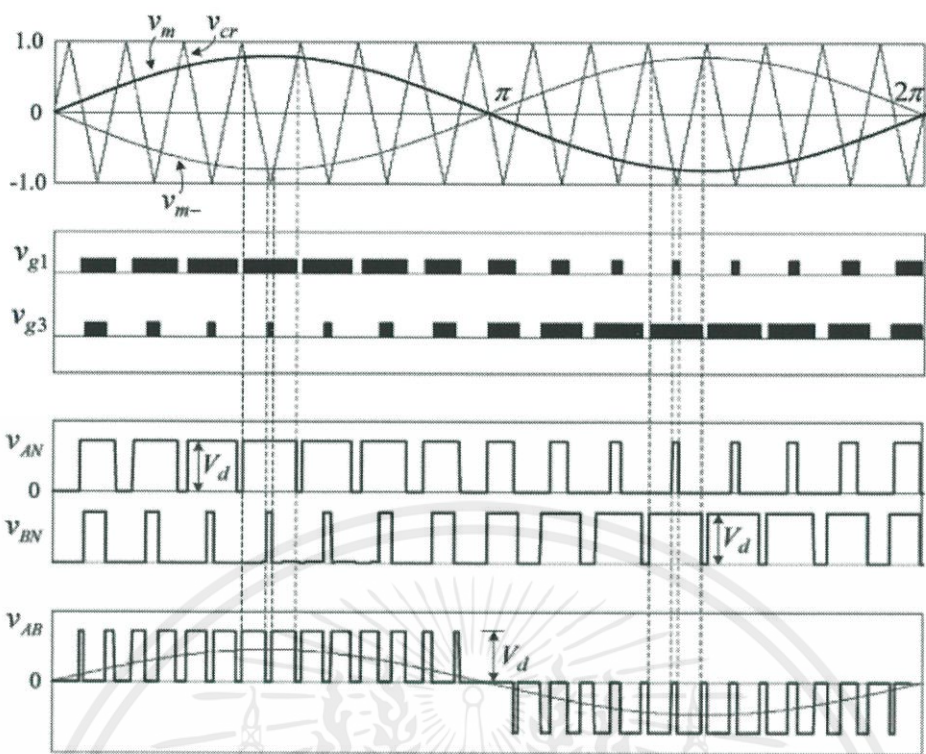
รูปที่ 2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ H Bridge



รูปที่ 2.8 การสวิตซ์แรงดันแบบสองขั้ว (Bipolar PWM)

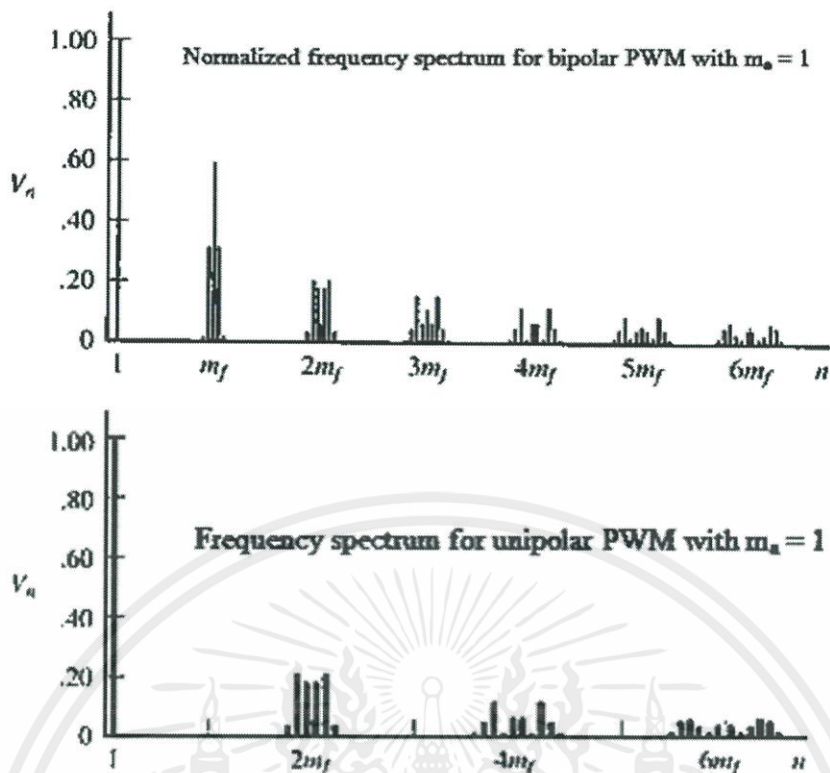
2) การสวิตซ์แรงดันแบบยูนิโพลาร์

การมอดูเลตแบบยูนิโพลาร์ ปกติต้องใช้รูปคลื่นไซน์มอดูเลตสองแบบ คือ V_m และ $-V_m$ ซึ่งมีขนาดและความถี่เท่ากัน เฟสต่างกัน 180° คลื่นมอดูเลตสองตัวถูกเปรียบเทียบกับคลื่นแคเรียร์ (Carrier Wave) แบบรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular Waveform) ก่อให้เกิดสัญญาณพัลส์ V_{g1} และ V_{g2} สำหรับสวิตช์ด้านบนทั้งสองตัว S_1 และ S_3 ซึ่งการมอดูเลตแบบนี้จะมีการสลับอุปกรณ์ทั้งสองสวิตช์ในเวลาเดียวกัน แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ V_{AB} จะสลับระหว่าง 0 ถึง $+V_d$ ระหว่างรอบครึ่งบวกหรือระหว่าง 0 ถึง $-V_d$ ในระหว่างรอบครึ่งทางลบของความถี่พื้นฐาน ดังนั้นรูปแบบนี้จึงเรียกว่า การสวิตซ์แรงดันแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar PWM) วงจรแปลงผันกำลังทางไฟฟ้าที่มีการสวิตซ์แรงดันแบบยูนิโพลาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ช่วยลดการสูญเสียในการสวิตซ์



รูปที่ 2.9 การสวิตซ์แรงดันแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar PWM)

การสวิตซ์แบบยูนิโพลาร์นี้ทำให้มีจุดเด่นที่ดีกว่าการสวิตซ์แบบไบโพลาร์ คือ มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาออกจากรศูนย์ไปบวกหรือศูนย์ไปลบ ทำให้แรงดันขาออกมีความถี่เป็นสองเท่า ได้ไซด์แบนฮาร์โมนิกส์เป็น 2mf , 4mf , 6mf เป็นต้น การออกแบบวงจรองความถี่จึงทำได้ง่ายขึ้น ตัวเหนี่ยวนามีขนาดเล็กลง ทำให้วงจรรวมเบาและประหยัด [4]



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์ไซด์แบนระหว่างไบโพลาร์กับยูนิโพลาร์

2.5 ระบบควบคุม (Control Systems)

2.5.1 ความหมายและคำนิยามของระบบควบคุม



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของระบบควบคุม

ระบบ (System) หมายถึง ส่วนหรือหน่วยที่ได้รวบรวมสิ่งต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

ควบคุม (Control) หมายถึง การบังคับหรือสั่งการ

ระบบควบคุม (Control Systems) หมายถึง ส่วนหรือหน่วยที่ได้รวบรวมสิ่งต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อใช้บังคับหรือสั่งการ เพื่อให้สิ่งใดสิ่งหนึ่งเป็นไปตามความต้องการ

2.5.2 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

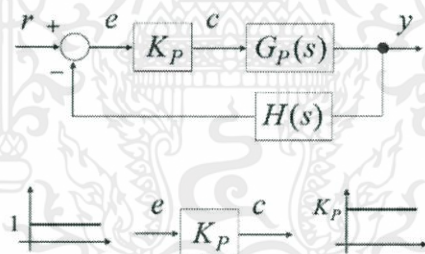
ระบบควบคุมแบบพีไอดีมีตัวควบคุมย่อย 3 ตัว คือ

- 1) ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมพี
- 2) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมไอ
- 3) ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือตัวควบคุมดี

ในการควบคุมระบบทั่วไปมักใช้งานตัวควบคุมร่วมกัน เช่น การควบคุมแบบพีไอ การควบคุมแบบพีดี และการควบคุมแบบพีไอดี รายละเอียดการทำงานของตัวควบคุมแต่ละแบบมีดังนี้

ตัวควบคุมแบบพีหรือตัวควบคุมแบบสัดส่วน

ตัวควบคุมแบบพีมีอินพุตเป็นสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุต ตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการขยายสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวด้วยค่าอัตราขยายของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2.12

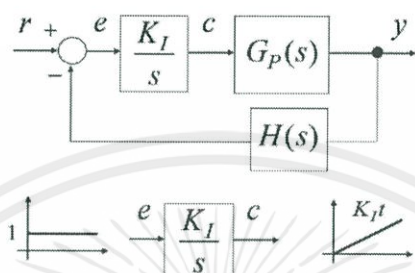


รูปที่ 2.12 ตัวควบคุมแบบพี

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบพีคือ อัตราขยายที่สูงมีผลทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็ว แต่จะเกิดปัญหาเมื่อนำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System Type 0) ตัวควบคุมแบบนี้ไม่สามารถจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ แต่สามารถทำให้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าน้อยลงได้ด้วยการปรับค่าอัตราขยายให้สูง ซึ่งในทางปฏิบัติ เอาต์พุตจากตัวควบคุมมีค่าจำกัดและการปรับอัตราขยายสูงสำหรับระบบที่มีอันดับสูงส่งผลให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่ต้องการ เช่น การปรับอัตราขยายให้สูงขึ้นสำหรับระบบอันดับสอง ผลที่ตามมาคือค่าพุ่งเกินจะสูงขึ้นตาม

ตัวควบคุมแบบโอหรือตัวควบคุมแบบปริพันธ์

ตัวควบคุมแบบโอไม่มีอินพุทเป็นสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุท ตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุทด้วยการอินทิเกรตสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวแล้วคูณด้วยอัตราขยายของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2.13

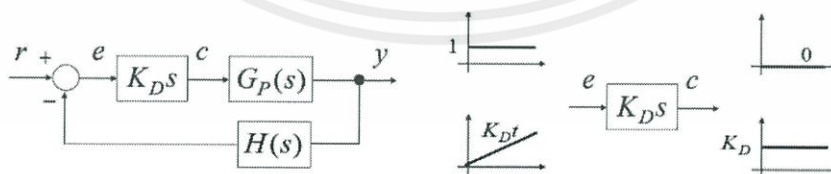


รูปที่ 2.13 ตัวควบคุมแบบโอ

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบโอคือเมื่อนำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System Type 0) จะสามารถกำจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือตัวควบคุมแบบโอไม่สามารถลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้และการปรับอัตราขยายให้มีค่าสูงส่งผลให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่ต้องการ เช่น การปรับอัตราขยายให้สูงขึ้นอาจจะมีผลทำให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งตัวได้

ตัวควบคุมแบบดีหรือตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบดีมีอินพุทเป็นสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุท ตัวควบคุมสร้างสัญญาณเอาต์พุทด้วยการอนุพันธ์สัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว แล้วคูณด้วยอัตราขยายของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2.14



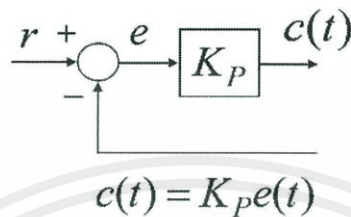
รูปที่ 2.14 ตัวควบคุมแบบดี

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบดีคือค่าอัตราขยายที่เหมาะสมส่งผลให้ลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนอง ลดการแกว่งของผลตอบสนอง แต่ปัญหาคือตัวควบคุมแบบดีไม่สามารถทำงานในระบบสัญญาณรบกวนซึ่งมีผลทำให้ขยายสัญญาณรบกวนและระบบทำงานเพี้ยนได้

2.5.3 ตัวควบคุมที่นำไปใช้งาน

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

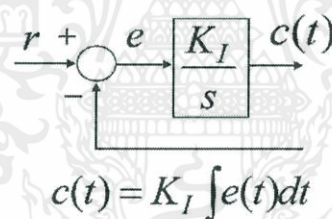
ลักษณะการทำงานก็คือการส่งสัญญาณเอาต์พุตออกมาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัญญาณค่าความผิดพลาด บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control)

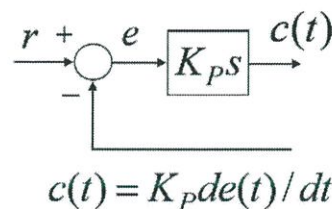
ลักษณะการทำงานก็คือการส่งสัญญาณเอาต์พุตออกมาจากการอินทิเกรตสัญญาณค่าความผิดพลาด บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ตัวควบคุมแบบพีไอ

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

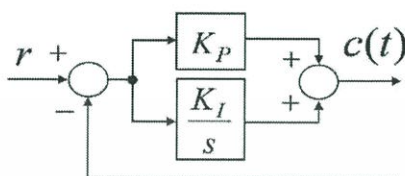
ลักษณะการทำงานก็คือการส่งสัญญาณเอาต์พุตออกมาจากการอนุพันธ์สัญญาณค่าความผิดพลาด บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ หรือ ตัวควบคุมแบบพีไอ (Proportional-Integral Control: PI Control) แบบแยกการปรับค่าอัตราขยาย

ลักษณะการทำงานก็คือการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมแบบสัดส่วนและตัวควบคุมแบบปริพันธ์ บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ตัวควบคุมแบบพีไอ

ตัวควบคุมแบบพีไอสามารถเขียนในรูปของลาปลาซและได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุม ดังสมการต่อไปนี้

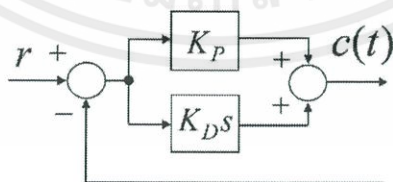
$$G(S) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (2.1)$$

โดย K_P คือ อัตราขยายแบบสัดส่วน

K_I คือ อัตราขยายแบบปริพันธ์

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ หรือ ตัวควบคุมแบบพีดี (Proportional-Derivative Control: PD Control) แบบแยกการปรับค่าอัตราขยาย

ลักษณะการทำงานก็คือการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมแบบสัดส่วนและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ตัวควบคุมแบบพีดี

ตัวควบคุมแบบพีดีสามารถเขียนในรูปของลาปลาซและได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุม ดังสมการต่อไปนี้

$$G(S) = K_P + K_D s \quad (2.2)$$

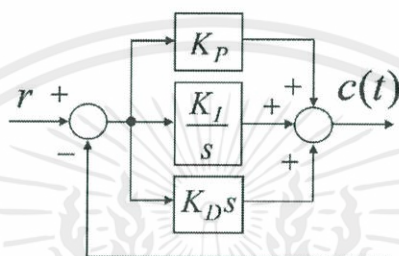
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย K_P คือ อัตราขยายแบบสัดส่วน

K_D คือ อัตราขยายแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์และอนุพันธ์ หรือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional- Integral Control: PID Control) แบบแยกการปรับค่าอัตราขยาย

ลักษณะการทำงานก็คือการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ บล็อกไดอะแกรมและฟังก์ชันการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถเขียนในรูปของลาปลาซและได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมดังสมการต่อไปนี้

$$G(S) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2.3)$$

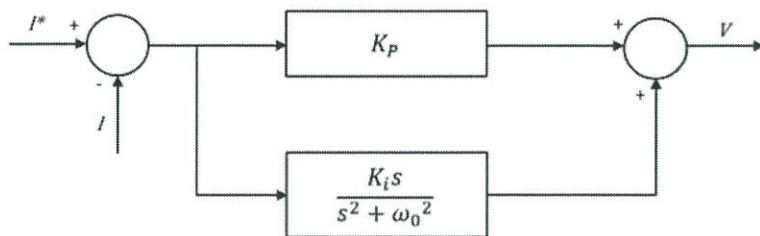
โดย K_P คือ อัตราขยายแบบสัดส่วน

K_I คือ อัตราขยายแบบปริพันธ์

K_D คือ อัตราขยายแบบอนุพันธ์ [5]

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์หรือตัวควบคุมแบบพีอาร์ (Proportional Resonant Control: PR Control)

ลักษณะการทำงานก็คือการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมแบบสัดส่วน และตัวควบคุมแบบเรโซแนนซ์ ตัวควบคุมแบบพีอาร์แบบอุดมคติมีบล็อกไดอะแกรมและบล็อกไดอะแกรมเป็นดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบพีอาร์แบบอุดมคติ

$$G_{PR}(S) = K_P + \frac{2K_I\omega_c S}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2.4)$$

โดย K_P คือ อัตราขยายแบบสัดส่วน

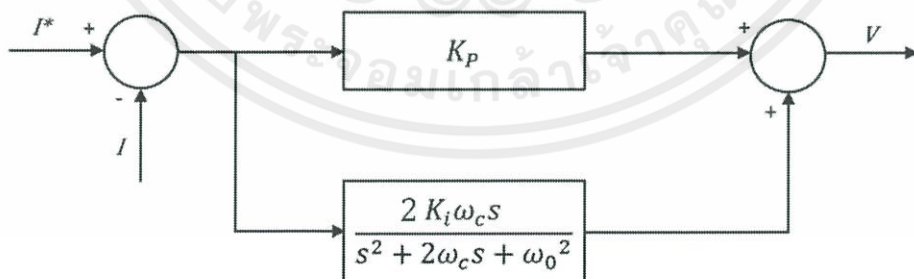
K_I คือ อัตราขยายแบบปริพันธ์

ω_0 คือ ความถี่เรโซแนนซ์ ($\omega_0 = 2\pi f$)

สมการ (2.4) ตัวควบคุมแบบพีอาร์แบบอุดมคติอาจทำให้เกิดปัญหาเสถียรภาพที่อัตราขยายมีค่านันต์และการเปลี่ยนเฟสที่ความถี่เรโซแนนซ์อย่างฉับพลัน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ก) เพื่อบรรเทาปัญหาเสถียรภาพที่ความถี่มูลฐาน ตัวควบคุมแบบพีอาร์แบบไม่อุดมคติในสมการ (2.5) สามารถใช้กับผลตอบสนองเชิงความถี่จะแสดงในรูปที่ 2.24 (ข) และบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.22

$$G_{PR}(S) = K_P + \frac{2K_I\omega_c S}{s^2 + 2\omega_c S + \omega_0^2} \quad (2.5)$$

โดย ω_c คือ ค่าความถี่คัทออฟ



รูปที่ 2.22 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบพีอาร์แบบไม่อุดมคติ

ในการควบคุมผลตอบสนองของระบบ เช่น bandwidth, phase และ gain margins จำเป็นต้องมีการปรับค่า K_P และ K_I ให้เหมาะสม โดยสามารถหาค่าที่เหมาะสมได้โดยใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ

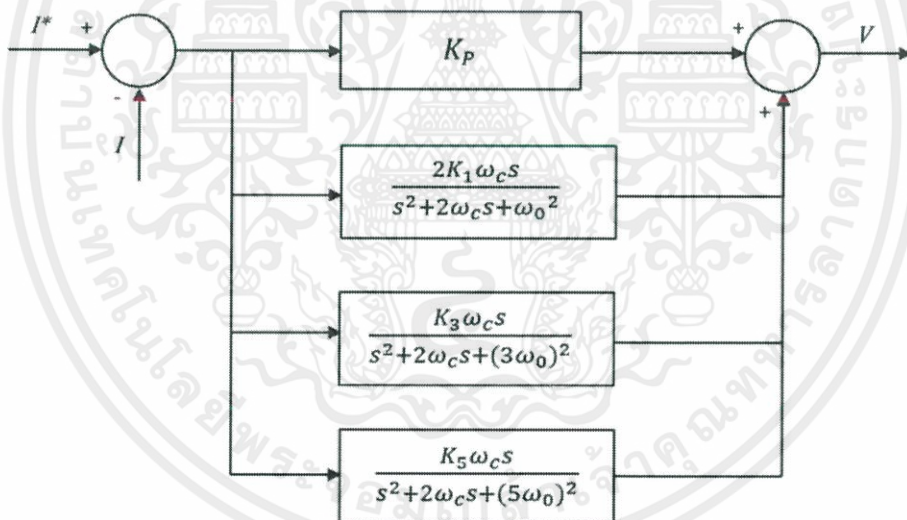
ในกรณีที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบ โดยเฉพาะฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำ เช่น ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่สาม ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ห้าและฮาร์มอนิกส์ลำดับที่เจ็ด สามารถกระทำได้โดยเพิ่มตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คที่ย่านความถี่ที่กำหนด ดังสมการ (2.6) และบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.23

$$G_h(S) = \sum_{h=3,5,7} K_{Ih} \frac{s}{s^2 + (h\omega_0)^2} \quad (2.6)$$

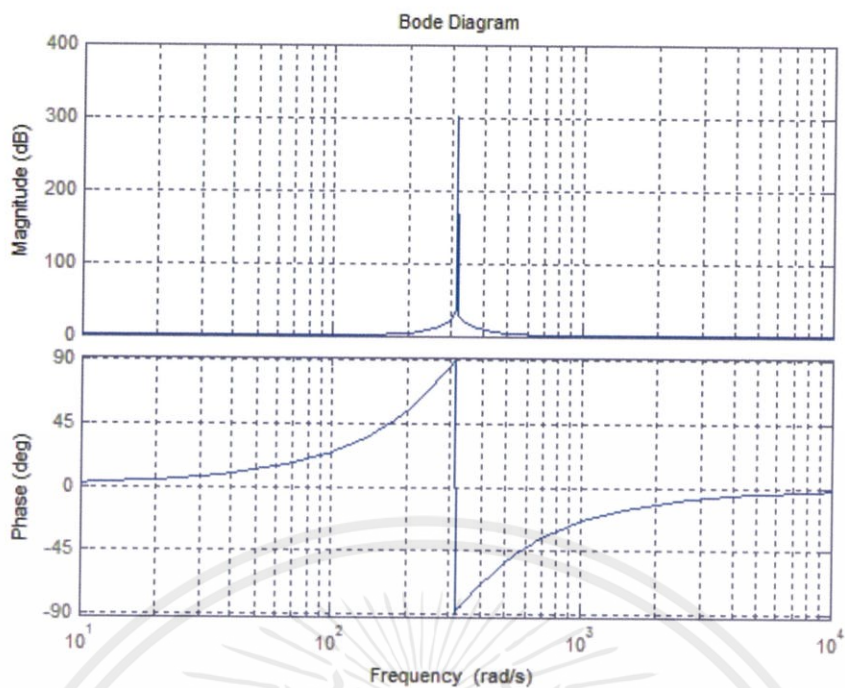
โดย ω_0 คือ ความถี่มูลฐาน

h คือ ลำดับของฮาร์มอนิกส์

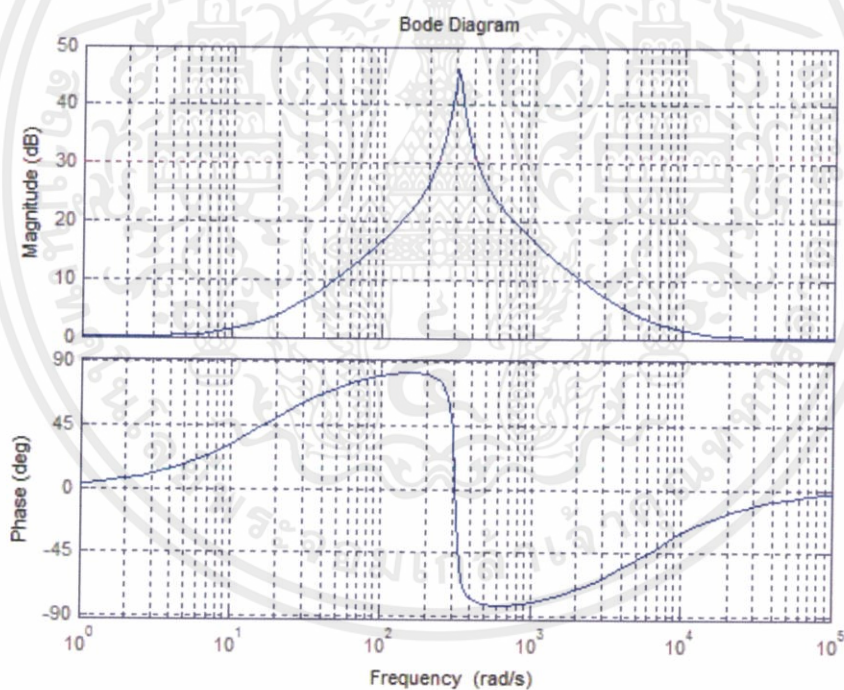
K_{Ih} คือ อัตราขยายเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่กำหนด ซึ่งจำเป็นต้องมีการปรับค่าให้สูงในกรณีที่ต้องการกำจัดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว



รูปที่ 2.23 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คแบบไม่อุดมคติรวมกับการชดเชยฮาร์มอนิกส์



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.24 แผนภาพโบเด (ก) ตัวควบคุมแบบพีดาร์แบบอูตมคติ

(ข) ตัวควบคุมแบบพีดาร์แบบไม่อูตมคติ

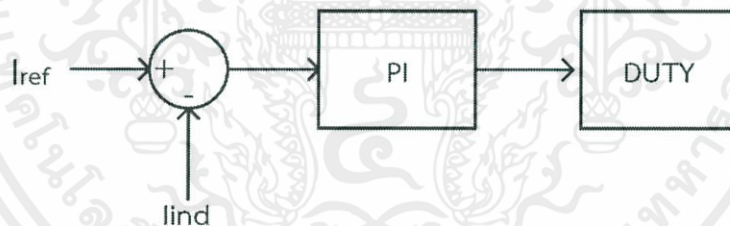
$$\text{ที่ } K_P = 1 \quad K_I = 200 \quad \omega_c = 0.1 \text{ rad/s}$$

สิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานเข้ากับโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้า คือคุณภาพของกระแสที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไปมักใช้วิธีการควบคุมกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งปัจจุบันมีวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ หรือ ตัวควบคุมแบบพีไอ ที่มีประสิทธิภาพ ง่าย และมีความน่าเชื่อถือสูง แต่ไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีเมื่อมีสัญญาณอ้างอิงเป็นไซน์นูนขอยด์ เนื่องจากยังมีค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวอยู่ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเทคนิคการควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนซ์เข้ามาใช้ควบคุมกระแสสำหรับอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากเทคนิคการควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนซ์มีอัตราขยายเป็นอนันต์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ทำให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวลดลงเป็นศูนย์และสามารถจัดการเมื่อระบบถูกรบกวนจากสิ่งรบกวนภายนอกได้ดี [6]

2.6 เทคนิคการควบคุมที่ใช้

2.6.1 การควบคุมวงจรมอเตอร์กำลังกระแสตรงแบบสองทิศทาง

มีหลักการการทำงานโดยใช้กระแสอ้างอิงมาเปรียบเทียบกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจรมอเตอร์กำลังกระแสตรงแบบสองทิศทางซึ่งจะได้ค่าความผิดพลาด นำค่าความผิดพลาดเข้าสู่บล็อกการควบคุมกระแสแบบ PI (Proportional-Integral Controllers) และนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นอัตราส่วนดีวตีซ์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงแบบสองทิศทางต่อไป ดังรูป 2.25

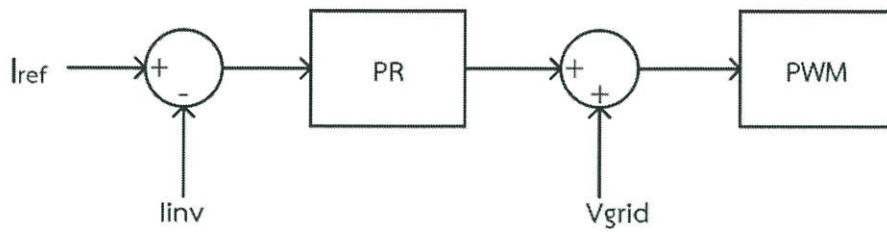


รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของ

วงจรมอเตอร์กำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

2.6.2 การควบคุมวงจรมอเตอร์กำลังกระแสตรงเป็นกระแสสลับ

มีหลักการการทำงานโดยใช้กระแสอ้างอิงมาเปรียบเทียบกับกระแสที่ไหลภายในไมโครกริดซึ่งจะได้ค่าความผิดพลาด นำค่าความผิดพลาดเข้าสู่บล็อกการควบคุมกระแสแบบ PR (Proportional-Resonant Controllers) และนำค่าที่ได้ไปรวมกับแรงดันที่ไมโครกริดเพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงในการมอดูเลตกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณ PWM สำหรับขับสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไป ดังรูป 2.26



รูปที่ 2.26 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงเป็นกระแสสลับ

2.7 เฟสล็อกคูลูป (Phase Locked Loop)

เฟสล็อกคูลูปคือระบบระบบที่สามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่มีความถี่ที่สอดคล้องกับสัญญาณอินพุต โดยที่ระบบยังสามารถสร้างเอาต์พุตให้ติดตามความถี่ของสัญญาณอินพุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเฟสล็อกคูลูปมาประยุกต์ใช้กับอินเวอร์เตอร์แบบต่อเข้ากริด (Grid-Connected Inverter) เมื่อพิจารณาจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งาน สามารถแยกประเภทของเฟสล็อกคูลูปได้ 2 แบบคือ เฟสล็อกคูลูปแบบหนึ่งเฟสและเฟสล็อกคูลูปแบบสามเฟส ซึ่งในที่นี้ศึกษารายละเอียดของเฟสล็อกคูลูปแบบหนึ่งเฟสเป็นหลัก

โดยทั่วไปเฟสล็อกคูลูปประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ

1. ตัวตรวจจับเฟส (Phase Detector: PD)

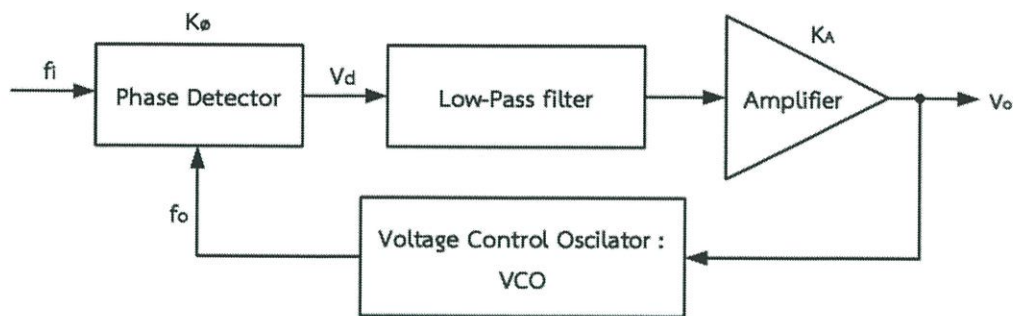
สร้างสัญญาณค่าความผิดพลาดโดยเป็นส่วนส่วนกับค่าความต่างเฟส เช่น ค่าความต่างเฟสของสัญญาณอินพุตและสัญญาณออสซิลเลเตอร์ของเฟสล็อกคูลูป

2. ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter: LF)

ทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณความถี่สูงและกรองสัญญาณความถี่ต่ำจากบล็อกตัวตรวจจับเฟส ซึ่งนิยมใช้ตัวกรองความถี่ต่ำอันดับหนึ่งหรือตัวควบคุมพีไอ

3. ออสซิลเลเตอร์ควบคุมแรงดัน (Voltage-Controlled Oscillator: VCO)

ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ขึ้นอยู่กับแรงดันขาเข้า



รูปที่ 2.27 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเฟสล็อกคูลูป

หลักการทำงาน

ตัวตรวจจับเฟสเปรียบเทียบความต่างเฟสของสัญญาณอินพุตและสัญญาณออสซิลเลเตอร์ได้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณค่าความผิดพลาด ซึ่งสัญญาณค่าความผิดพลาดนี้จะถูกป้อนเข้าตัวกรองความถี่ต่ำผ่านต่อไปเพื่อที่จะกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ต้องการ สัญญาณเอาต์พุตของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านจะควบคุมความถี่ของออสซิลเลเตอร์ควบคุมแรงดัน

เมื่อความถี่ของสัญญาณอินพุตต่างจากค่าความถี่ของออสซิลเลเตอร์ จะมีการปรับค่าความถี่ของออสซิลเลเตอร์ให้เท่ากับความถี่ของสัญญาณอินพุต โดยเอาต์พุตของตัวตรวจจับเฟสหรือสัญญาณค่าความผิดพลาดนั้นควรมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเฟสล็อกคูลูปจึงสามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่มีเฟสตรงกับสัญญาณอินพุตโดยอาจมีค่าความต่างเฟสเพียงเล็กน้อย โดยค่าความต่างเฟสนี้สามารถทำให้มีค่าน้อยลงได้ถ้าหากมีการออกแบบเฟสล็อกคูลูปที่เหมาะสม [7]

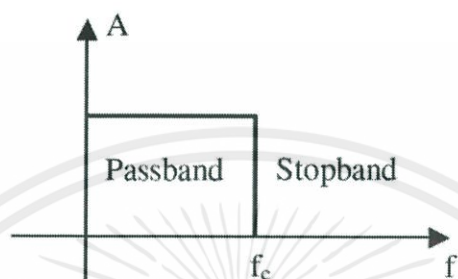
2.8 วงจรกรองความถี่ (Filter)

วงจรกรองความถี่คือวงจรเลือกความถี่ ซึ่งยอมให้สัญญาณความถี่ที่กำหนดผ่านได้และลดทอนสัญญาณนอกเหนือจากความถี่ที่กำหนด ซึ่งปกติสัญญาณดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของแรงดัน และสามารถแบ่งประเภทของวงจรกรองความถี่ได้เป็น 2 ประเภท คือ วงจรกรองความถี่ที่ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter) ส่วนวงจรกรองความถี่ที่ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ เช่น ทรานซิสเตอร์ ออปแอมป์ ที่ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟ (Active Filter) หรืออาจจะเรียกอีกชื่อหนึ่งคือ วงจรกรองความถี่แบบอนาล็อก (Analog Filter)

โดยทั่วไปแล้ววงจรกรองความถี่มีประโยชน์มากในงานอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคมทั่วไป ในด้านการกรองสัญญาณ เช่น การกรองสัญญาณรบกวน (Noise) การกรองสัญญาณฮาร์มอนิกส์ (Harmonics) หรือการใช้ในงานด้านสื่อสารเฉพาะกิจ สามารถกรองสัญญาณพาหะ (Carrier) ที่ต้องการได้ โดยสามารถจำแนกชนิดของวงจรกรองความถี่ได้เป็น

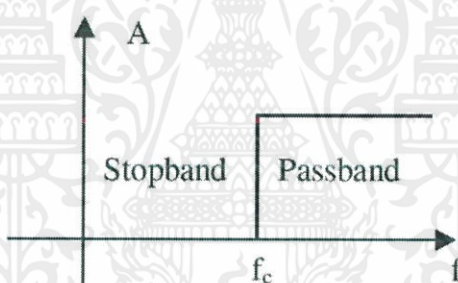
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter: LPF)
2. วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-Pass Filter: HPF)
3. วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-Pass Filter)
4. วงจรกรองก้ำจืดแถบความถี่ (Band-Reject Filter)



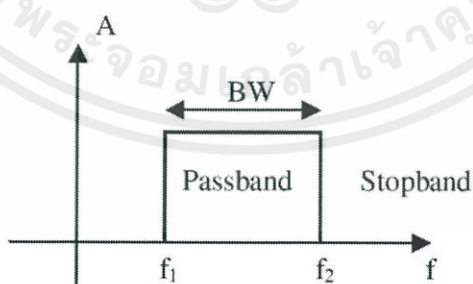
LOW-PASS FILTER RESPONSE

รูปที่ 2.28 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



HIGH-PASS FILTER RESPONSE

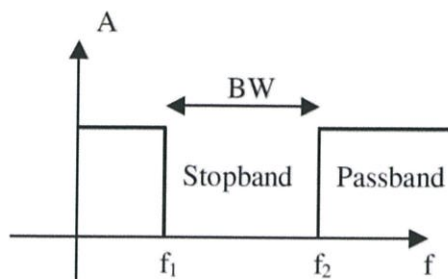
รูปที่ 2.29 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน



BANDPASS FILTER RESPONSE

รูปที่ 2.30 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



BANDSTOP FILTER RESPONSE

รูปที่ 2.31 วงจรกรองกำจัดแถบความถี่

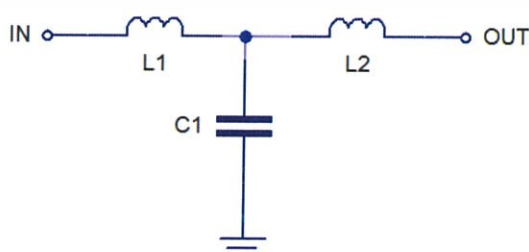
2.8.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านหรือ High-Cut Filter คือตัวกรองความถี่ที่อนุญาตให้ความถี่ต่ำผ่านเท่านั้นและจะมีการลดทอนความถี่สูง ซึ่งความสามารถในการลดทอนความถี่จะขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจร

วงจร Low-Pass Filter มีลักษณะการต่อใช้งานคือ ใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับวงจรและต่อตัวเก็บประจุขนาน คุณสมบัติของวงจรคือ เมื่อป้อนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำเข้าสู่วงจร ตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าความต้านทาน X_L ต่ำและตัวเก็บประจุมีค่าความต้านทาน X_C สูง ส่งผลให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำผ่านตัวเหนี่ยวนำได้สะดวก ระดับสัญญาณเอาต์พุตจึงผ่านได้มาก แต่เมื่อสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าที่กำหนด ค่า X_L จะมากขึ้น แต่ค่า X_C จะลดลง ทำให้สัญญาณผ่านขดลวดได้ลดลง สัญญาณบางส่วนที่ผ่านไปได้จะถูกตัวเก็บประจุดึงลงกราวด์ ระดับสัญญาณเอาต์พุตจึงผ่านได้น้อยมาก

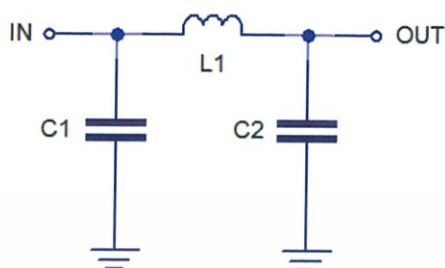
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

T Type Low Pass Filter มีการใช้ตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียว ซึ่งไม่สามารถกำจัดสัญญาณความถี่สูงได้หมดตรงจุดคัทออฟ ทำให้ความถี่สูงผ่านไปได้ จึงแก้ปัญหาโดยการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำเข้าไปในวงจรอีกชุด เมื่อต่อแล้ววงจรมีลักษณะคล้ายตัว T จึงวงจรกรองแบบนี้เรียกว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ T



รูปที่ 2.32 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ T

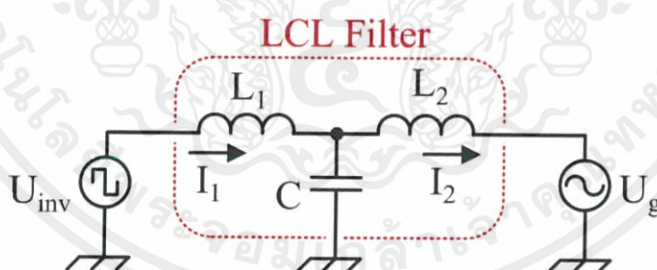
Pi Type Low Pass Filter วงจรนี้จะใช้ตัวเก็บประจุ 2 ตัวและตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว ต่อร่วมกัน ดังรูปที่ 2.33 ซึ่งวงจรมีลักษณะคล้ายตัว Pi (พาย) จึงเรียกววงจรกรองแบบนี้ว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาย วงจรแบบนี้จะนิยมใช้ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและวงจรรักษาระดับ (Regulator)



รูปที่ 2.33 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาย

2.8.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ LCL (LCL Filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ LCL เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟ เนื่องจากแรงดันและกระแสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์นั้นมีสัญญาณฮาร์มอนิกส์ประกอบอยู่ ดังนั้นเพื่อให้ได้แรงดันและกระแสกระแสไฟฟ้าสลับที่มีความเพี้ยนต่ำและเป็นไปตามมาตรฐานจึงต้องใช้วงจรกรองความถี่โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L) ตัวเหนี่ยวนำร่วมกับตัวเก็บประจุ (LC) หรือตัวเหนี่ยวนำสองตัวร่วมตัวเก็บประจุ (LCL) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอินเวอร์เตอร์ที่ต่อเข้ากับกริด โดยทั่วไปสามารถแสดงส่วนประกอบได้ดังรูปที่ 2.34 [8]



รูปที่ 2.34 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ LCL

2.9 ฮาร์มอนิกส์กับคุณภาพกำลังไฟฟ้า

โดยทั่วไปฮาร์มอนิกส์คือสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้คุณภาพของกำลังไฟฟ้าต่ำลง โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมที่มีปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้ามากกว่าผู้ใช้ไฟฟ้าภาคอื่น ๆ และสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นในระบบไฟฟ้าอย่างมากในปัจจุบันคือวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

การพัฒนาในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังหรือการพัฒนาในด้านสวิตซ์สารกึ่งตัวนำกำลัง คือ สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาเรื่องของฮาร์มอนิกส์ที่อาจจะเรียกว่ามลภาวะทางฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Pollution) ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ เนื่องจากอุปกรณ์สวิตซ์สารกึ่งตัวนำเป็น องค์ประกอบหลักที่ขาดไม่ได้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้งานทั้งในภาคอุตสาหกรรม ภาคธุรกิจ หรือภาคครัวเรือน ตัวอย่างเช่น วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverters or AC Drives) แหล่งจ่ายไฟแบบไม่หยุดชะงัก (UPSs) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PCs) เครื่องเชื่อมไฟฟ้า (Electric Welders) โทรทัศน์ พริ้นเตอร์ เป็นต้น และวงจรเหล่านี้ที่เป็นตัวกำเนิด ฮาร์มอนิกส์

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อันเนื่องมาจากวงจรเรียงกระแสที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น สามารถ จำแนกได้เป็นสองชนิดคือ แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์แบบแหล่งกระแส (Harmonic Current Sources) และแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์แบบแหล่งแรงดัน (Harmonic Voltage Sources)

1. แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์แบบแหล่งกระแส (Harmonic Current Sources)

วงจรที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์แบบแหล่งกระแสได้แก่วงจรเรียงกระแสที่มีตัว เหนี่ยวนำเป็นวงจรกรองด้านออก เนื่องจากวงจรนี้มีกระแสฮาร์มอนิกส์ที่แทบจะไม่ขึ้นอยู่กับ แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ดังนั้นจึงเรียกว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์แบบแหล่งกระแส วงจรนี้จะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้กระแสด้านออกมีค่าคงตัวหรือ เกือบจะคงตัว

2. แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์แบบแหล่งแรงดัน (Harmonic Voltage Sources)

วงจรที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์แบบแหล่งแรงดันได้แก่วงจรเรียงกระแสที่มีตัว เก็บประจุเป็นวงจรกรองด้านออก แอมพลิจูดของกระแสฮาร์มอนิกส์ของวงจรชนิดนี้จะ ค่อนข้างขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับด้วย ดังนั้นจึงพิจารณาให้เป็น แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์แบบแหล่งแรงดัน

ผลของฮาร์มอนิกส์และการลดผลของฮาร์มอนิกส์

การที่เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นมาในระบบนี้จะก่อให้เกิดปัญหาตามมา ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นมานี้ อาจจะไปเรโซแนนซ์กับตัวเก็บประจุที่ใช้แก้ตัวประกอบกำลังภายใต้ระบบไฟฟ้าแรงต่ำระบบเดียวกัน ผลที่ตามมาคือการเกิดกระแสค่าสูงไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ใช้แก้ตัวประกอบกำลังนั้น ทำให้เกิดความ ร้อนสะสม และเกิดปัญหาการชำรุดเสียหายของตัวเก็บประจุตามมา

การแก้ปัญหาหรือการลดผลของฮาร์มอนิกส์แบ่งออกเป็นสองวิธีคือการใช้วงจรรองฮาร์มอนิกส์แบบพาสซีฟและวงจรรองฮาร์มอนิกส์แบบแอกทีฟ

1) วงจรรองฮาร์มอนิกส์แบบพาสซีฟ (Passive Filers)

วงจรรองฮาร์มอนิกส์แบบพาสซีฟ เป็นวิธีการแก้ปัญหาอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกส์ที่นิยมอันเนื่องมาจากความง่ายของวงจรและมีความทนทาน

โครงสร้างของวงจรรองฮาร์มอนิกส์แบบพาสซีฟ ก็คือวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม โดยจะออกแบบให้ค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับความถี่ของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นฮาร์มอนิกส์จะมองเห็นวงจรรองนี้มีอิมพีแดนซ์ต่ำสุด และจะทำให้เกิดกระแสที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ไหลผ่านวงจรรองนี้เป็นจำนวนมาก ซึ่งกระแสนี้จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น และเป็นสาเหตุที่ทำให้มีโอกาสเกิดกระแสไหลเกินหรือโอเวอร์โหลด หากมีการปรับปรุงหรือเพิ่มเติมระบบของโรงงาน (เช่น การเพิ่มระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟสลับ) จะทำให้กระแสฮาร์มอนิกส์เพิ่มขึ้น และทำให้เกิดกระแสไหลผ่านวงจรรองฮาร์มอนิกส์แบบพาสซีฟเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ได้ออกแบบไว้

2) วงจรรองฮาร์มอนิกส์แบบแอกทีฟ

วงจรรองฮาร์มอนิกส์แบบแอกทีฟ แท้จริงแล้วคือวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ถูกออกแบบมาให้ทำหน้าที่แทนวงจรรองแบบพาสซีฟ โดยที่ไม่มีข้อเสียทั้งหลายดังเช่นวงจรรองแบบพาสซีฟมี

โดยโครงสร้างและหลักการทำงานแล้วจะมีความแตกต่างจากวงจรรองแบบพาสซีฟ วงจรรองแบบแอกทีฟจะทำการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ของระบบ และหลังจากนั้นจะกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่และขนาดเท่ากับที่วัดได้แต่ว่ามีทิศทางตรงกันข้าม และจ่ายเข้าสู่ระบบ ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลดสร้างขึ้นจะถูกหักล้างด้วยกระแสฮาร์มอนิกส์ที่วงจรรองแบบแอกทีฟสร้างขึ้นมา ทำให้กระแสไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับจะกลายเป็นกระแสที่ปราศจากฮาร์มอนิกส์

ชนิดของวงจรรองแบบแอกทีฟ

1.) Parallel Active Filters

Parallel Active Filters จะต่อวงจรในลักษณะที่ขนานกับโหลดที่ต้องการจะกำจัดฮาร์มอนิกส์ โดยจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลดสร้างขึ้นมา

วงจรแบบนี้เหมาะกับแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์แบบกระแส หรือวงจรเรียงกระแสที่มีตัวเหนี่ยวนำเป็นวงจรกรองหรือเป็นโหลด โดยที่ถ้าหากแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์แบบเป็นแหล่งจ่ายกระแส จะทำให้การทำงานของเป็นอิสระจากอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ ถ้าหากใช้วงจรแบบนี้กับโหลดประเภทที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์แบบแหล่งจ่ายแรงดันก็อาจจะมีโอกาสเกิดกรณีกระแสเกินได้

2.) Series Active Filters

Series Active Filters จะต่อวงจรในลักษณะอนุกรมกับโหลดที่ต้องการจะกำจัดฮาร์มอนิกส์และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อที่จะบังคับให้กระแสให้เป็นรูปไซน์ โดยจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

วงจรแบบนี้เหมาะกับแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์แบบแรงดัน หรือวงจรเรียงกระแสที่มีตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองแรงดัน โดยหากแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์แบบเป็นแหล่งแรงดัน จะทำให้การทำงานของเป็นอิสระจากอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

การควบคุมวงจรกรองแบบแอกทีฟ

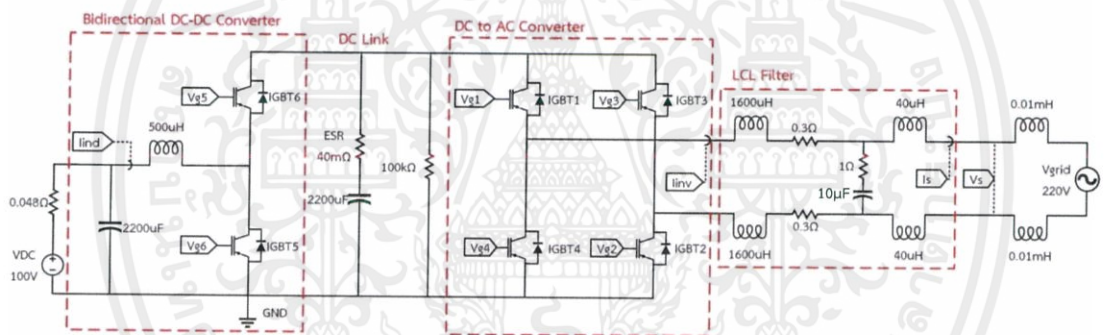
การควบคุมวงจรกรองแบบแอกทีฟจะมี 2 แบบ คือการควบคุมวงรอบเปิด (Open Loop Control) และการควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed Loop Control)

การควบคุมวงรอบเปิดจะทำการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ด้านโหลด และทำการคำนวณกระแสที่จะต้องสร้างขึ้นมาชดเชยเพื่อที่จะจ่ายกระแสเข้าสู่ระบบ ซึ่งมีข้อดีที่ระบบควบคุมง่าย ในขณะที่การควบคุมวงรอบปิดนั้นจะทำการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และทำการคำนวณกระแสที่จะต้องสร้างขึ้นมาชดเชยเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบ ดังนั้นการควบคุมแบบวงรอบปิดนี้จะควบคุมผลของการกรองฮาร์มอนิกส์โดยตรง ซึ่งมีข้อดีที่การควบคุมจะกระทำได้แม่นยำกว่า แต่อย่างไรก็ตามระบบควบคุมก็จะมีคามยุ่งยากและสลับซับซ้อนกว่า [9]

บทที่ 3

ออกแบบและจำลองผลวงจรควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า สำหรับระบบกักเก็บพลังงาน

ในการเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานเข้ากับไมโครกริดนั้น เนื่องจากไฟที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ หรือที่ชาร์จเข้าแบตเตอรี่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรง แต่ไมโครกริดเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ จึงต้องใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าในการเชื่อมต่อ โดยใช้อินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางเพื่อเพิ่มระดับแรงดันกระแสตรง 100 โวลต์ จากแบตเตอรี่เป็น 400 โวลต์ ที่ DC link เพื่อให้อินเวอร์เตอร์สามารถแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ 220 โวลต์ ได้ เมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานสู่อินเวอร์เตอร์ และลดระดับแรงดันเมื่อต้องการกักเก็บพลังงาน และเนื่องจากแรงดันและกระแสจากอินเวอร์เตอร์นั้นมีสัญญาณฮาร์มอนิกส์ปนอยู่ จึงได้มีการนำ LCL Filter มาใช้เพื่อลดทอนความถี่ของกระแสก่อนจะจ่ายสู่อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองทิศทาง

จากรูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองทิศทางที่นำมาใช้กับระบบกักเก็บพลังงาน โดยการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง มาทำงานร่วมกันเพื่อทำการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองทิศทางเพื่อเชื่อมต่อกับไมโครกริด

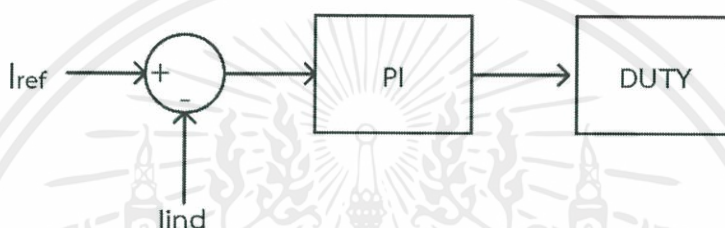
โดยการควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

- วงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง
- วงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

3.1 วงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

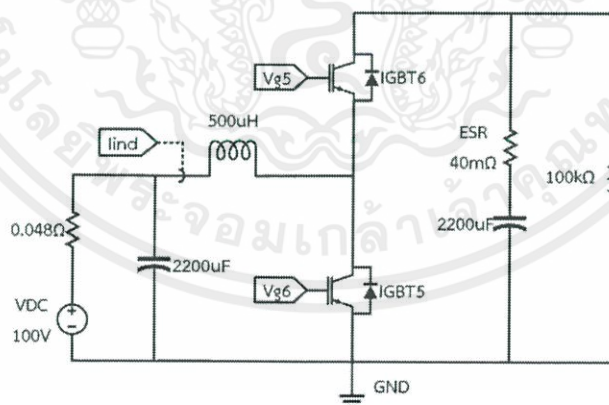
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางถูกนำมาใช้ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้าหรือลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับทิศทางของการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยถูกนำมาเชื่อมต่อระหว่างแบตเตอรี่และดีซีลิงค์เพื่อยกระดับหรือลดทอนแรงดันจากแบตเตอรี่กับแรงดันที่ดีซีลิงค์ 400 โวลต์

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางใช้เทคนิคควบคุมกระแสแบบพีไอดังรูปที่ 3.2 โดยนำผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิงกับกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำมาเข้าสู่การควบคุมพีไอจากนั้นนำค่าวิตซ์ที่ได้เข้าสู่ตัวสร้างสัญญาณ PWM เพื่อขับอุปกรณ์สวิตซ์ต่อไป

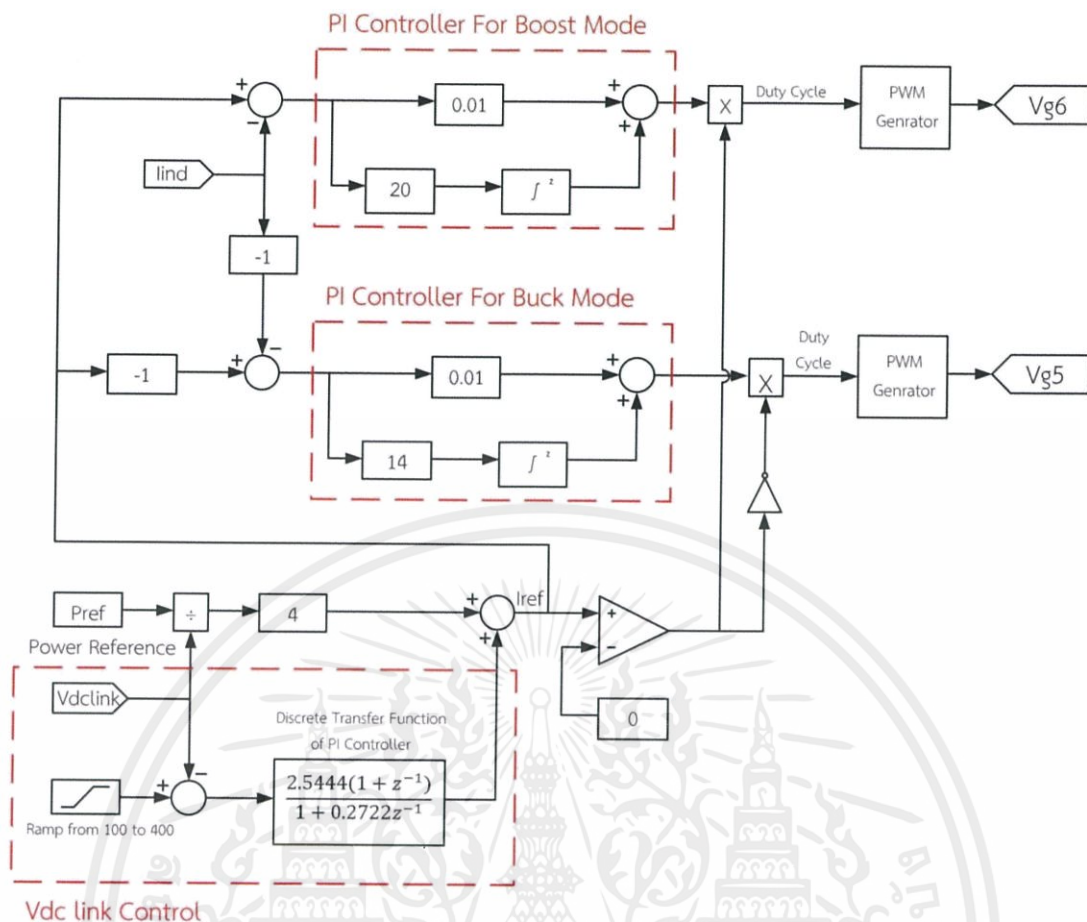


รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

วงจรการจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM เป็นไปดังรูปที่ 3.3 โดยมีวงจรควบคุมดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางด้วยโปรแกรม PSIM



รูปที่ 3.4 วงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

จากรูปที่ 3.4 ใช้หลักการนำผลต่างระหว่างกระแสที่อ้างอิงกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ มาเข้าสู่ตัวควบคุมกระแสแบบ PI เพื่อให้ได้สัญญาณ PWM ในการขับอุปกรณ์สวิตชิง ซึ่งสามารถควบคุมค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำให้เป็นไปตามกระแสอ้างอิงได้

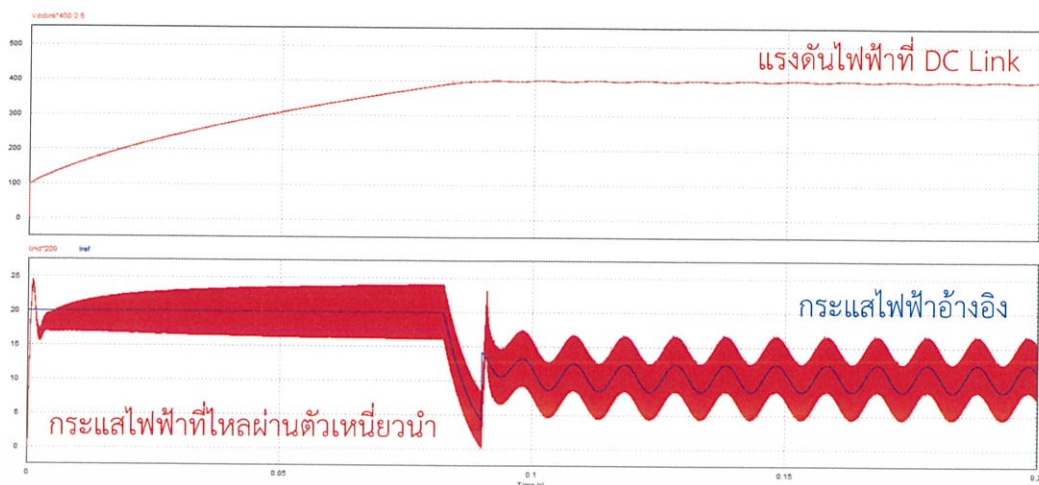
ในการทดลองกำหนดให้แรงดัน DC Link มีค่าเท่ากับ 400 โวลต์ ซึ่งแรงดันที่แบตเตอรี่ในช่วงคงที่มีค่าเท่ากับ 100 โวลต์ จากกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ DC Link

$$P_{Batt} = P_{DC_Link} \tag{3.1}$$

$$V_{Batt}I_{Batt} = V_{DC_Link}I_{DC_Link} \tag{3.2}$$

$$I_{Batt} = 4I_{DC_Link} \tag{3.3}$$

จากสมการที่ (3.3) จะได้ว่ากระแสที่แบตเตอรี่มีค่าเท่ากับสี่เท่าของกระแสที่ DC Link ดังนั้นจึงมีการคูณ 4 ที่วงจรควบคุมเพื่อให้ได้ผลที่เป็นไปตามเงื่อนไขก่อนที่จะส่งเข้าสู่ตัวควบคุมกระแสต่อไป

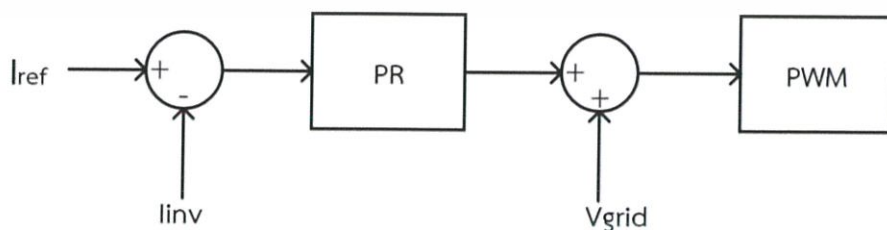


รูปที่ 3.5 ผลการจำลองวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง

จากรูปที่ 3.5 ผลการจำลองพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นไปตามสัญญาณกระแสอ้างอิง ทั้งนี้ยังสามารถรักษาระดับแรงดันดีซีลิงค์ให้มีค่าคงที่ที่ 400 โวลต์ได้

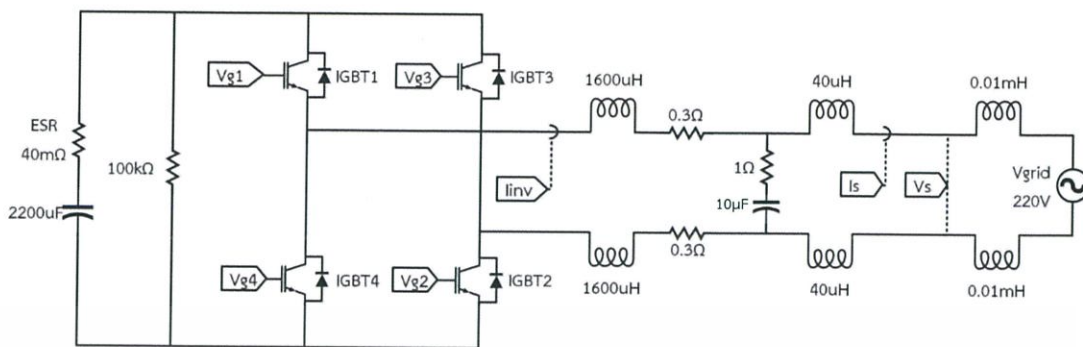
3.2 วงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหรือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ใช้หลักการเปรียบเทียบกระแสในการควบคุม นั่นคือ เปรียบเทียบผลต่างระหว่างกระแสที่ไหลสู่กริดกับกระแสอ้างอิงที่เกิดจากการนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบกักเก็บพลังงานจ่ายสู่ไมโครกริด หาค่าด้วยขนาดของแรงดันอ้างอิง และบวกด้วยส่วนชดเชยกระแสที่ตัวเก็บประจุของ LCL Filter เพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่มีเฟสตรงกับกระแสจากไมโครกริด โดยการควบคุมจะใช้ตัวควบคุมแบบตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ เนื่องจากตัวควบคุมชนิดนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดีเมื่อมีสัญญาณอ้างอิงเป็นไซน์ชอยด์ และสามารถลดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกส์รวมได้ จากนั้นรวมผลจากตัวควบคุมเข้ากับค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันของไมโครกริดเพื่อนำไปสร้างสัญญาณ PWM ควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหรือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง จะได้แผนภาพแสดงการทำงาน ดังรูปที่ 3.6

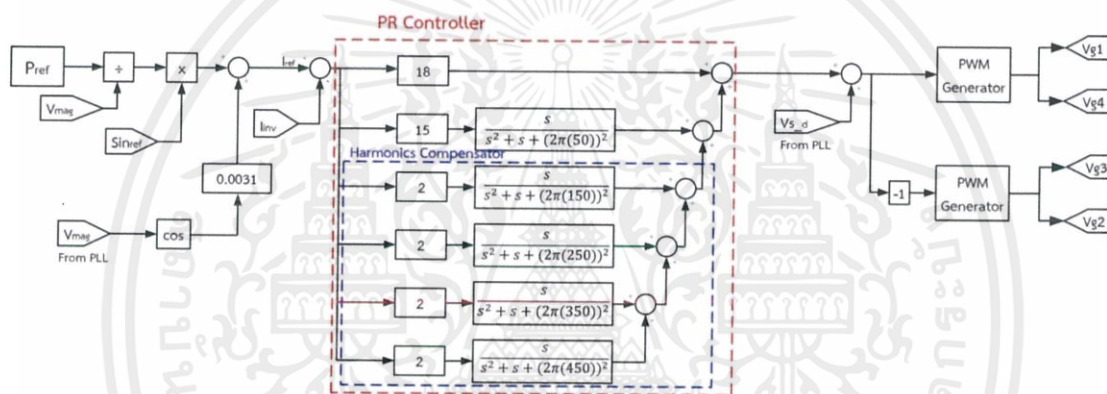


รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

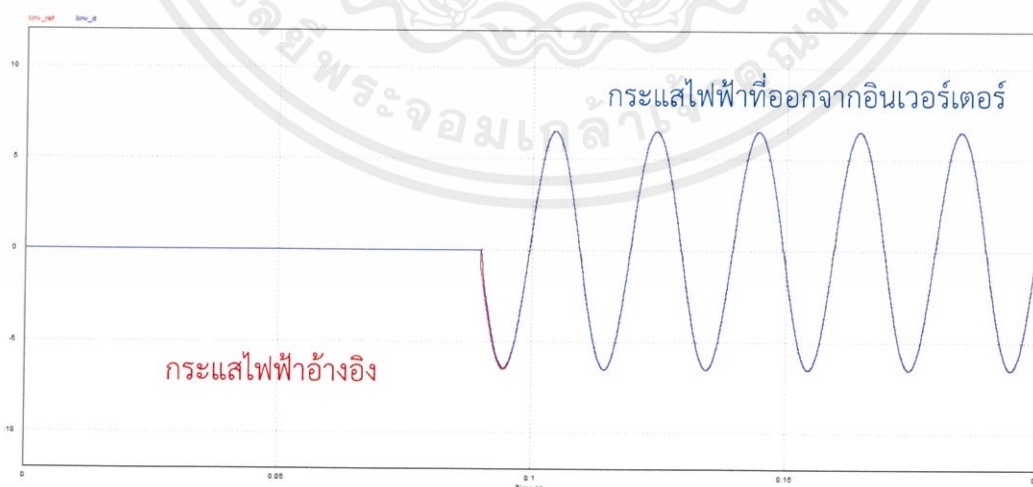
วงจรการจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM เป็นไปดังรูปที่ 3.7 โดยมีวงจรควบคุมดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงด้วยโปรแกรม PSIM



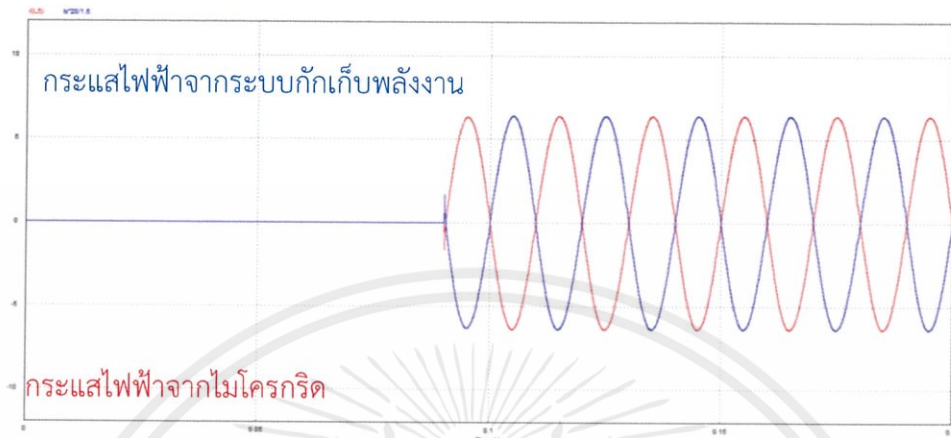
รูปที่ 3.8 วงจรควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง



รูปที่ 3.9 กระแสไฟฟ้าอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.9 การจำลองผลการควบคุมจะเห็นว่ากระแสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์หรือกระแสที่ต้องการควบคุม สามารถเกาะกับกระแสอ้างอิงที่ต้องการได้

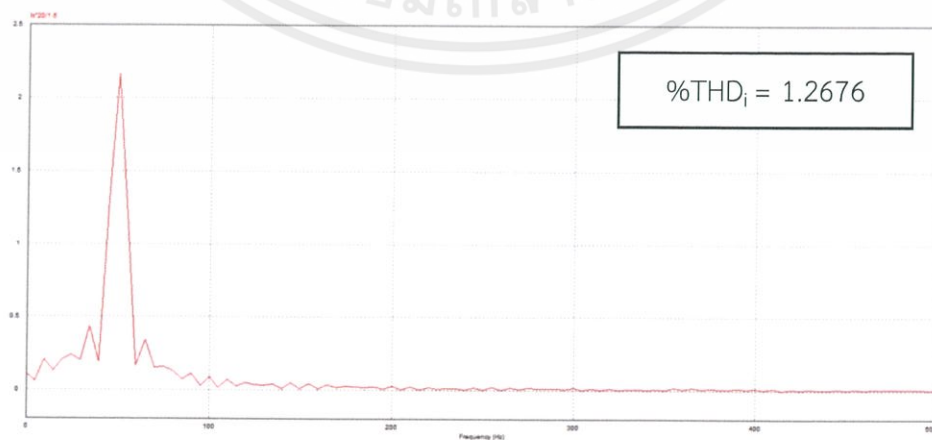
การเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานกับไมโครกริด



รูปที่ 3.10 กระแสไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานและกระแสไฟฟ้าจากไมโครกริด



รูปที่ 3.11 FFT ของกระแสของระบบกักเก็บพลังงานก่อนมีการชดเชยฮาร์มอนิกส์



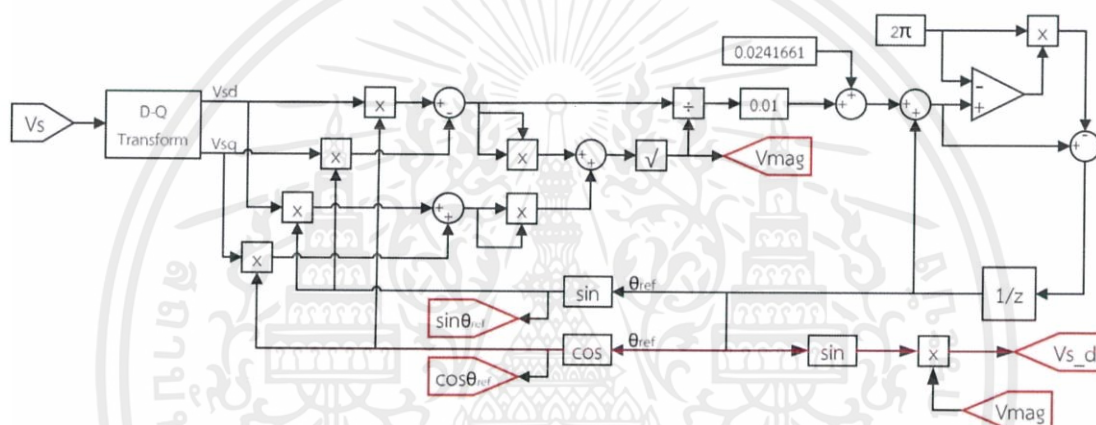
รูปที่ 3.12 FFT ของกระแสของระบบกักเก็บพลังงานหลังมีการชดเชยฮาร์มอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 ผลการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานสู่มอเตอร์ จะเห็นว่ากระแสจากระบบกักเก็บพลังงานมีเฟสตรงกับกระแสจากมอเตอร์ และจากรูปที่ 3.11 และ 3.12 มีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกสรวมลดลงเมื่อมีการชดเชยฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3, 5, 7 และ 9 ด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์

วงจรถวลุมเฟสล็อค

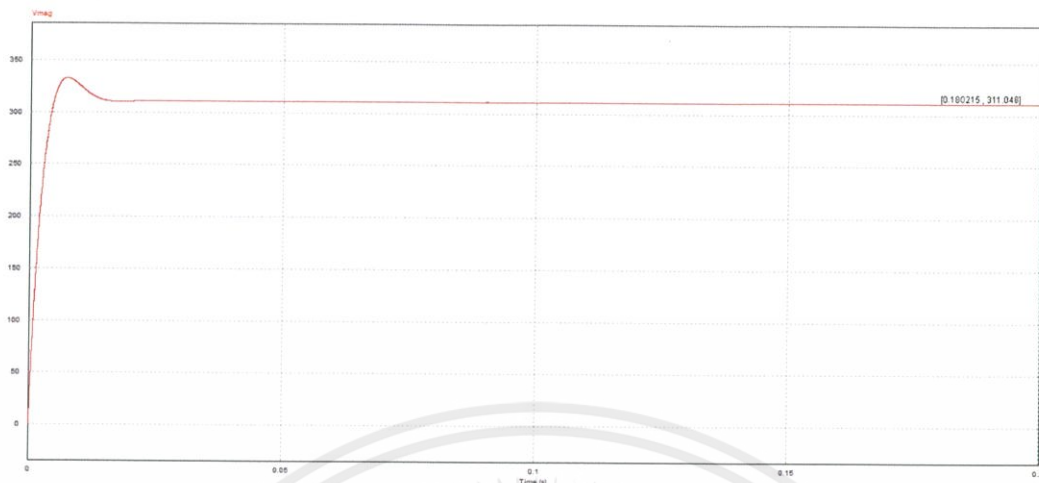
เนื่องจากวงจรถวลุมเฟสล็อคเป็นระบบที่สร้างสัญญาณเอาท์พุทที่มีความถี่ที่สอดคล้องกับสัญญาณอินพุท โดยที่ระบบยังสามารถสร้างเอาท์พุทให้ติดตามความถี่ของสัญญาณอินพุทเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงนำวงจรถวลุมเฟสล็อคมาใช้ในการเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานเข้ามอเตอร์ โดยมียังวงจรถวลุมเฟสล็อคดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรถวลุมเฟสล็อค (Phase Locked Loop)

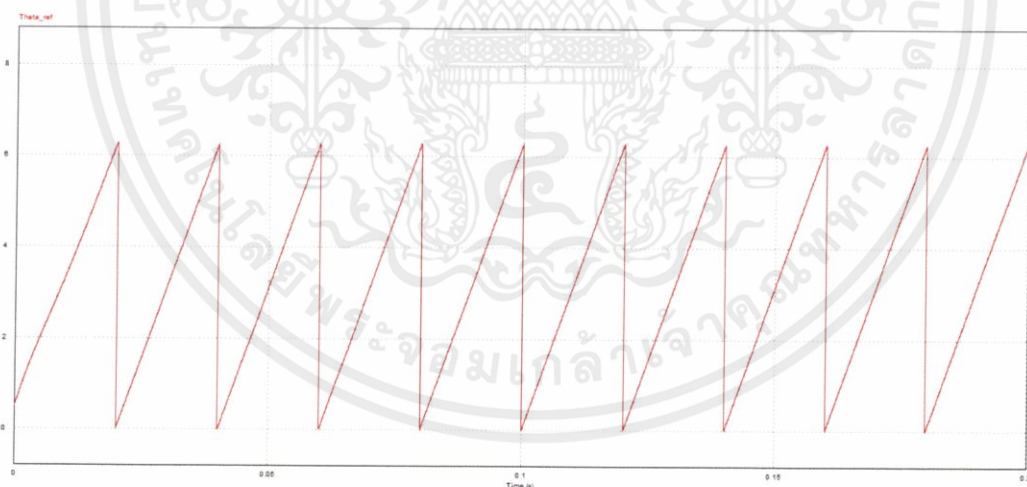
จากรูปที่ 3.13 เป็นการนำสัญญาณแรงดันจากมอเตอร์มาทำการแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิง D-Q เพื่อทำการหาขนาดของแรงดันอ้างอิง (Voltage Magnitude Reference) และมุมอ้างอิง (Theta Reference) แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปใช้ในการควบคุมกระแสในวงจรถวลุมอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ค่ากระแสที่มีความถี่ตรงกับมอเตอร์และยังเป็นการนำสัญญาณที่ได้ไปชดเชยในวงจรถวลุมอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีเฟสตรงกับมอเตอร์

สัญญาณที่ได้จากวงจรถวลุมเฟสล็อกคูล (Phase Locked Loop)

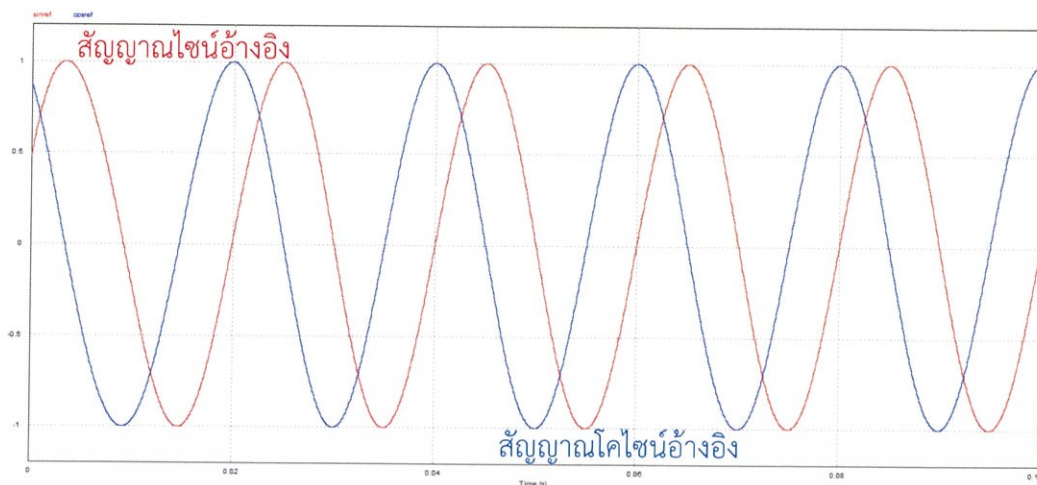


รูปที่ 3.14 ขนาดของแรงดันอ้างอิง (Voltage Magnitude Reference)

จากรูปที่ 3.14 ขนาดของแรงดันอ้างอิงที่ได้จากวงจรถวลุมเฟสล็อกคูลโดยการนำสัญญาณแรงดันจากจากไมโครกริดมาทำการแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิง D-Q ขนาดของแรงดันอ้างอิงที่ได้ถูกนำไปใช้ในการหาขนาดของกระแส โดยขนาดของแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการจำลองผล (Simulation) ในโปรแกรม PSIM มีค่าประมาณ 311 โวลต์

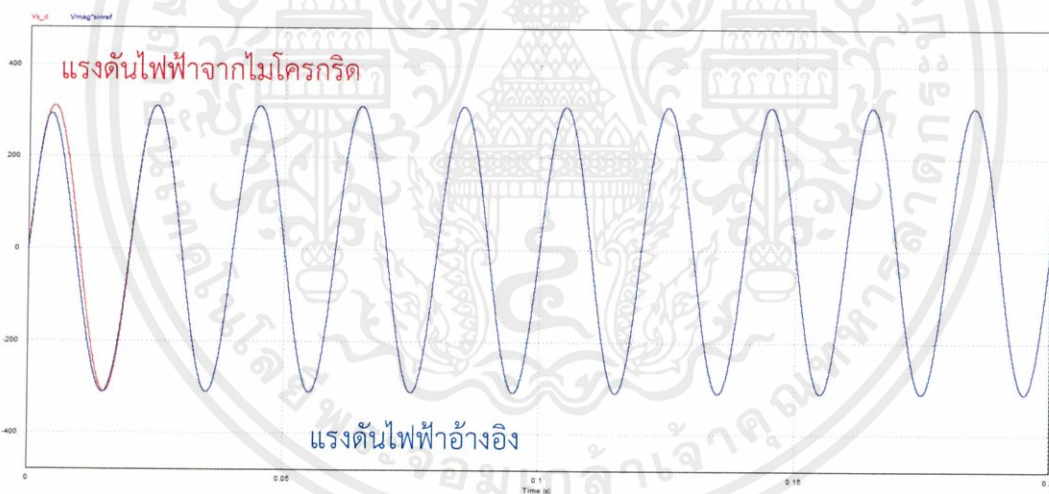


รูปที่ 3.15 มุมอ้างอิง (Theta Reference)



รูปที่ 3.16 สัญญาณไซน์อ้างอิงและโคไซน์อ้างอิง (Sine Reference and Cosine Reference)

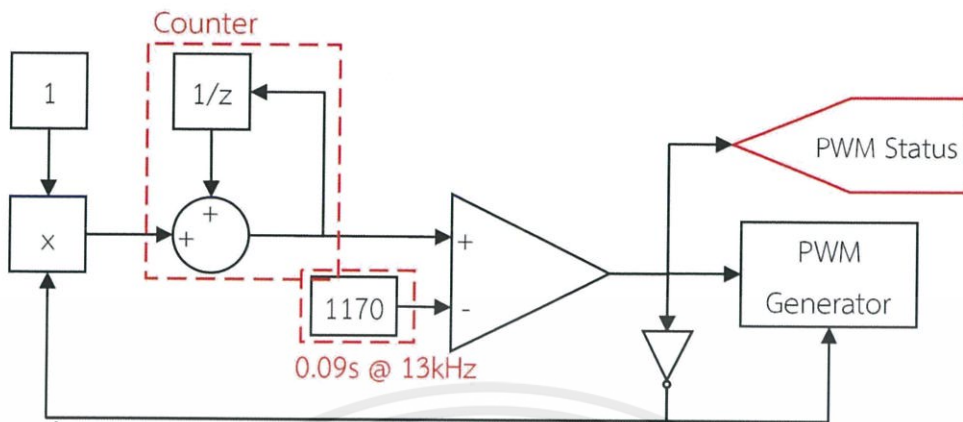
จากรูปที่ 3.15 จะนำมุมอ้างอิงที่ได้มาใช้ในการสร้างรูปคลื่นที่มีความถี่ของสัญญาณตรงกับไมโครกริด ซึ่งจะได้รูปคลื่นไซน์อ้างอิงและโคไซน์อ้างอิง (Sine Reference and Cosine Reference) ดังรูปที่ 3.16 เพื่อนำไปใช้ในวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้ได้รูปคลื่นกระแสที่มีความถี่และเฟสตรงกับไมโครกริด



รูปที่ 3.17 แรงดันไฟฟ้าจากไมโครกริดและแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

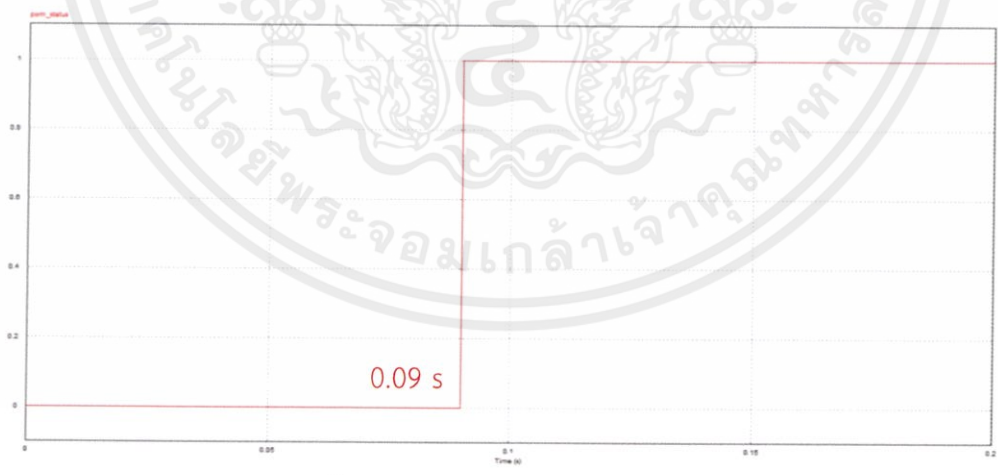
จากรูปที่ 3.17 แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงซึ่งเกาะกับแรงดันไฟฟ้าจากไมโครกริด เนื่องจากการใช้ วงจรเฟสล็อกเพื่อช่วยในการเชื่อมต่อระบบกักเก็บพลังงานกับไมโครกริด

วงจรหน่วงเวลาการทำงาน



รูปที่ 3.18 วงจรหน่วงเวลา (Delay) การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

จากรูปที่ 3.18 วงจรหน่วงเวลา (Delay) การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ซึ่งทำหน้าที่หน่วงเวลาการทำงานเพื่อรอให้แรงดันไฟฟ้าที่ DC Link มีค่าที่เหมาะสม รวมถึงทำให้เฟสของแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ตรงกับเฟสแรงดันของไมโครกริดก่อน จากนั้นจึงสั่งให้อินเวอร์เตอร์ให้เริ่มทำงานและเชื่อมต่อเข้ากับไมโครกริด ซึ่งระบบควบคุมทั้งหมดใช้ความถี่สวิตซิ่ง (Switching Frequency) 13 kHz และให้ระบบเริ่มทำงานที่เวลา 0.09 วินาที



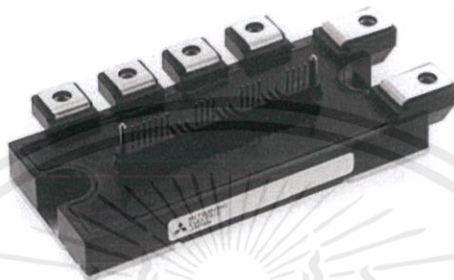
รูปที่ 3.19 สถานะของสัญญาณ PWM

จากรูปที่ 3.19 สถานะของสัญญาณ PWM ซึ่งเมื่อเวลา 0 วินาที สัญญาณมีสถานะเป็น 0 คือ PWM Generator ยังไม่ทำงาน แต่เมื่อเวลา 0.09 วินาที สัญญาณเปลี่ยนสถานะจาก 0 เป็น 1 คือให้ PWM Generator เริ่มทำงาน

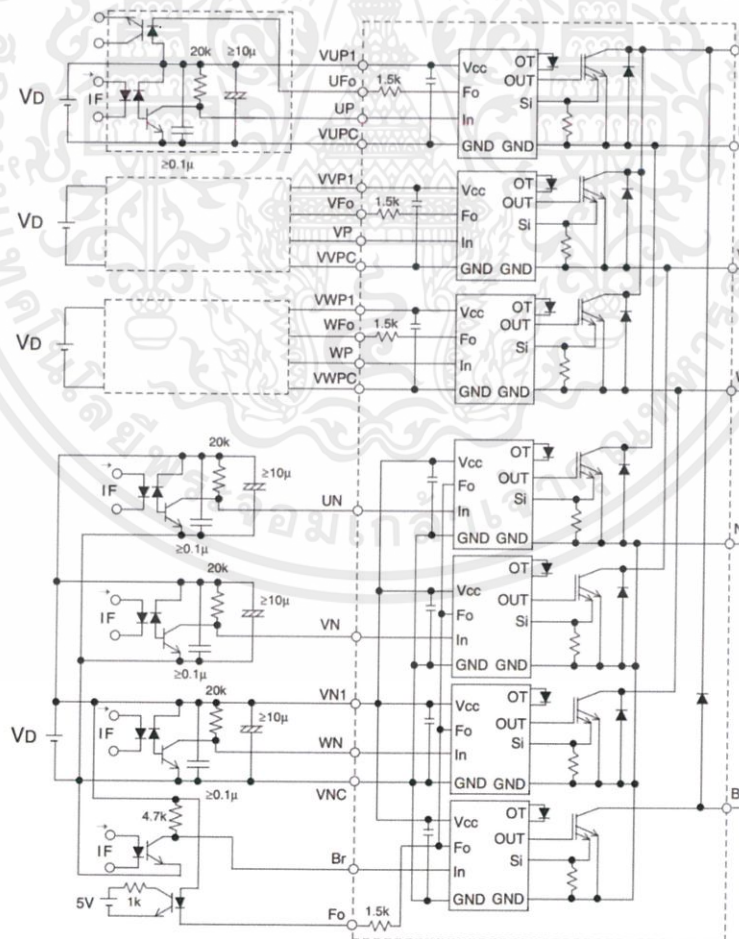
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนพาวเวอร์โมดูล

พาวเวอร์โมดูลที่ใช้ในการควบคุมระบบเบตเตอร์ก็ักเก็บพลังงาน ได้แก่ Mitsubishi Intelligent Power Modules PM50RL1A120 ดังรูปที่ 20 โดยทั่วไป นิยมใช้ในการควบคุมมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตชิง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรขับเคลื่อนพาวเวอร์โมดูลเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิง ดังรูปที่ 21 ซึ่งเป็นวงจรขับเคลื่อนที่แนะนำโดยบริษัทผู้ผลิต

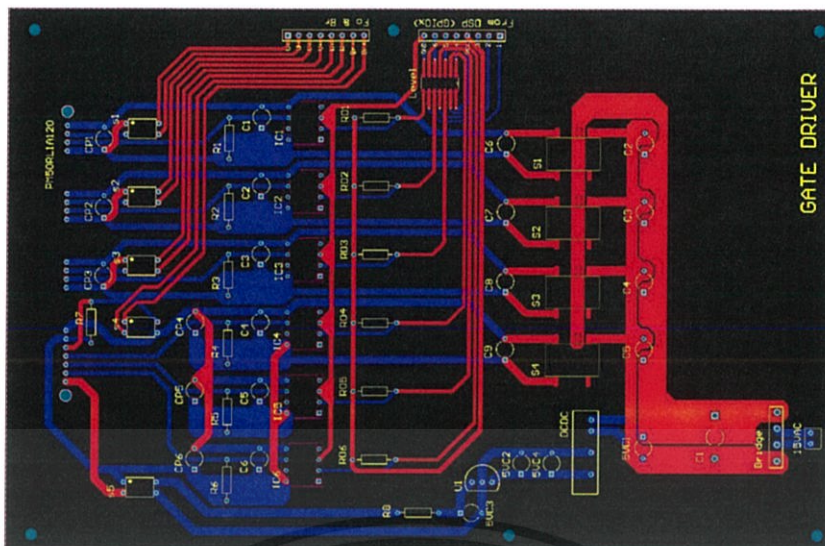


รูปที่ 3.20 Mitsubishi Intelligent Power Modules PM50RL1A120



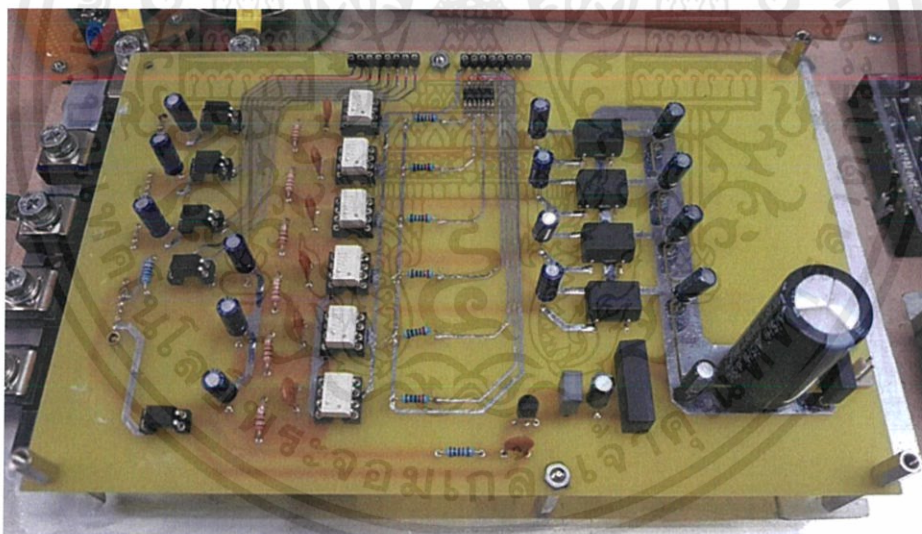
รูปที่ 3.21 Application Example Circuit Datasheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.22 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนในโปรแกรม Altium Designer

จากรูป 3.22 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนในโปรแกรม Altium Designer โดยทำการออกแบบวงจรขับเคลื่อนตาม Datasheet ของพาวเวอร์โมดูลและอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกัน ได้ PCB ของวงจรขับเคลื่อนดังรูปที่ 3.23 ที่สามารถนำไปต่อร่วมกับอุปกรณ์ตัวอื่นเพื่อให้ทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.23 PCB วงจรขับเคลื่อน

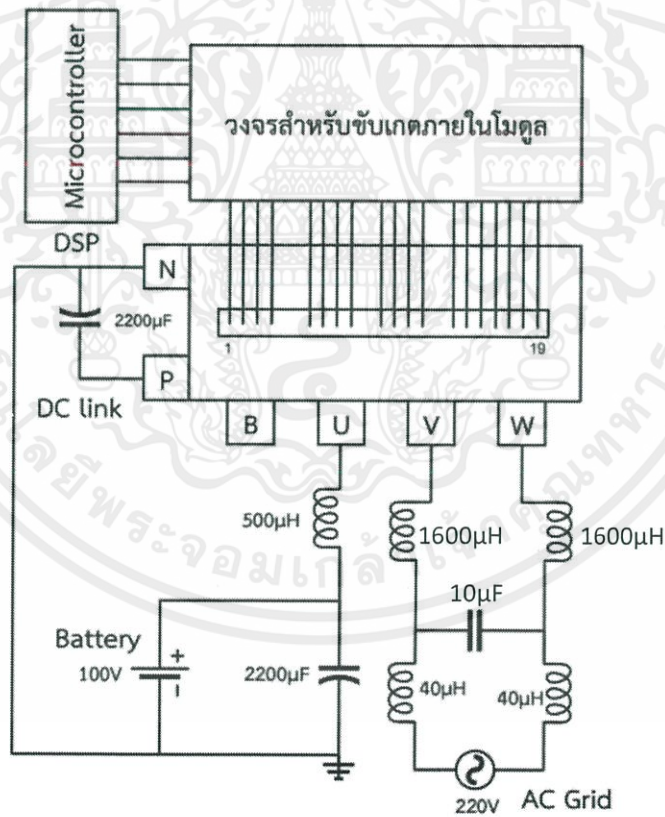
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

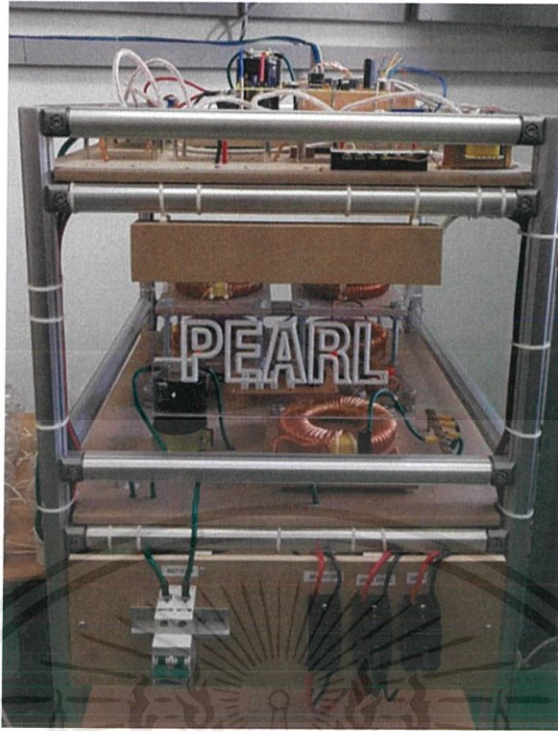
การทดลองและผลการทดลอง

4.1 ผลการทำงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน

ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานถูกนำมาใช้ในไมโครกริดแบบแยกอิสระเพื่อชดเชยความผันผวนทางความถี่ของกำลังไฟฟ้าและเพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำรองให้แก่ระบบ ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานประกอบด้วย วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC/DC Converter) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ/วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (Inverter/Rectifier) วงจรกรองความถี่ LCL Filter ดังรูปที่ 4.1 วงจรแปลงผันกำลังโดยใช้พาวเวอร์โมดูลที่ใช้ในการทดลอง และรูปที่ 4.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการนำค่าผลการจำลองในโปรแกรม PSIM

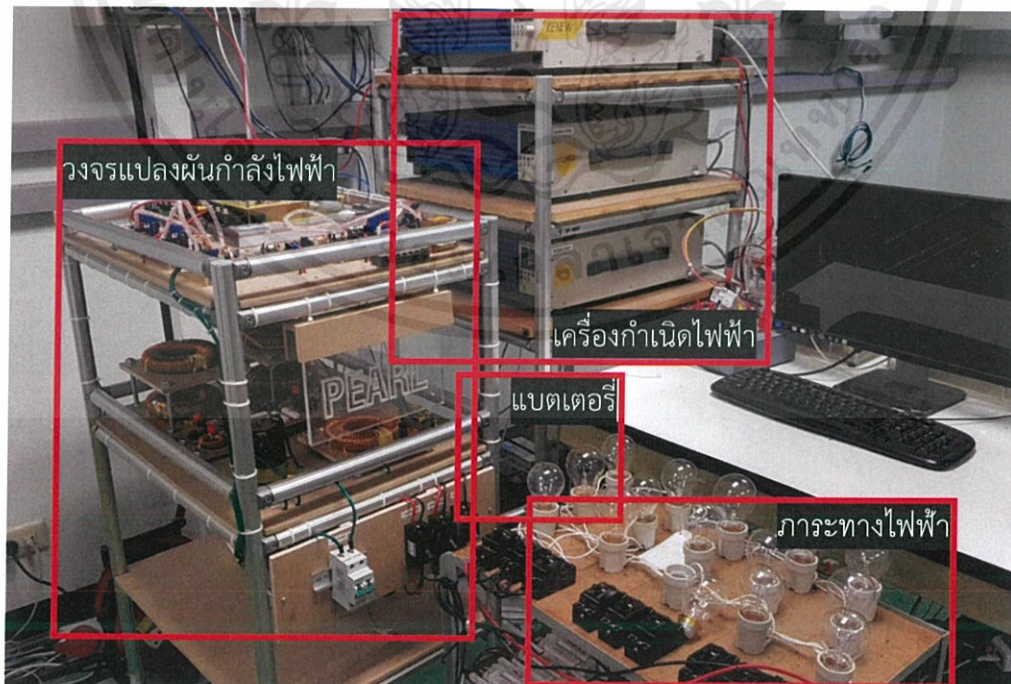


รูปที่ 4.1 วงจรแปลงผันกำลังโดยใช้พาวเวอร์โมดูล



รูปที่ 4.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

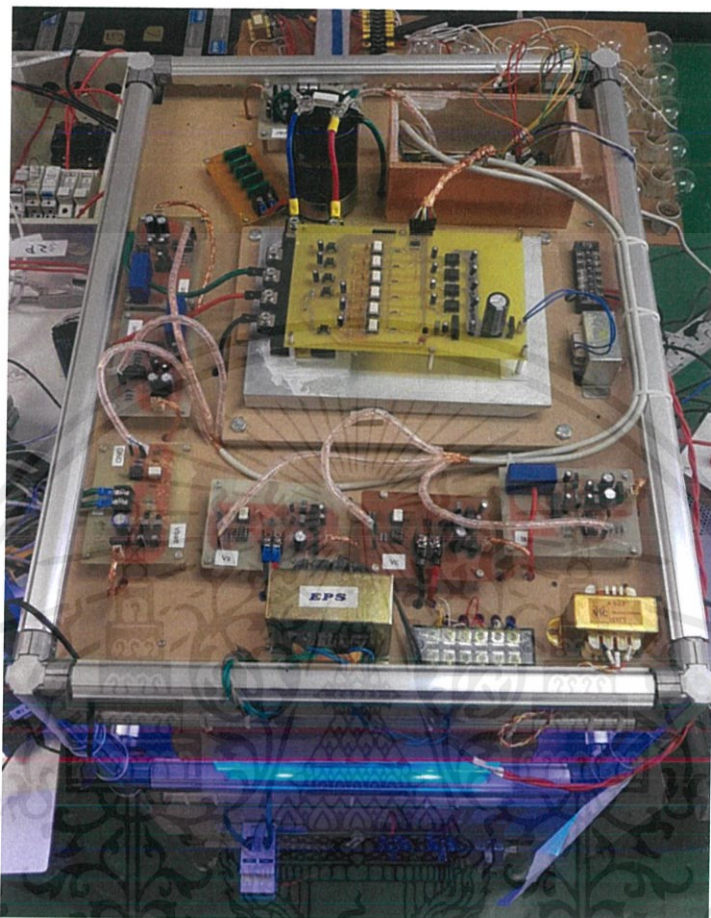
ในการเชื่อมต่อระบบแบตเตอรี่ก็เก็บพลังงานเข้ากับไมโครกริดสาธิตในห้องปฏิบัติการ รูปที่ 4.3 วงจรที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย ชุดแบตเตอรี่ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ภาชนะทางไฟฟ้า และแหล่งกำเนิดไฟฟ้า



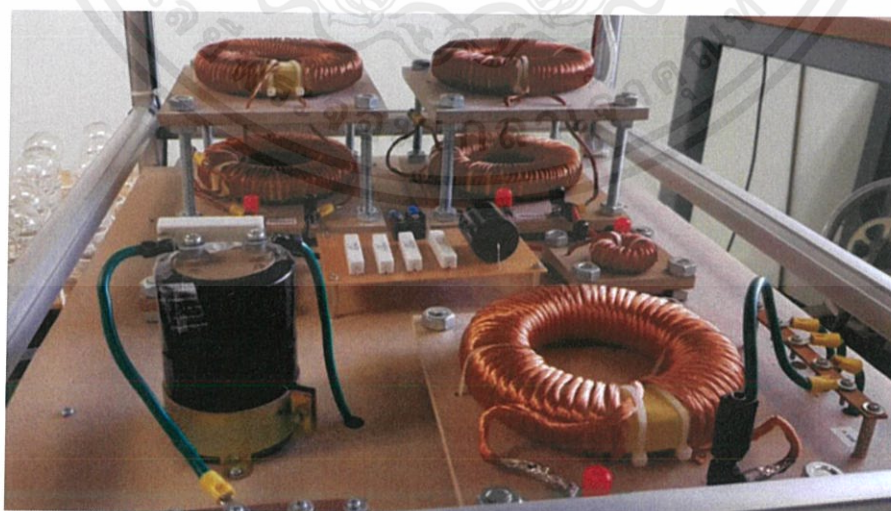
รูปที่ 4.3 ชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในห้องปฏิบัติการ
การเป็นไปดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

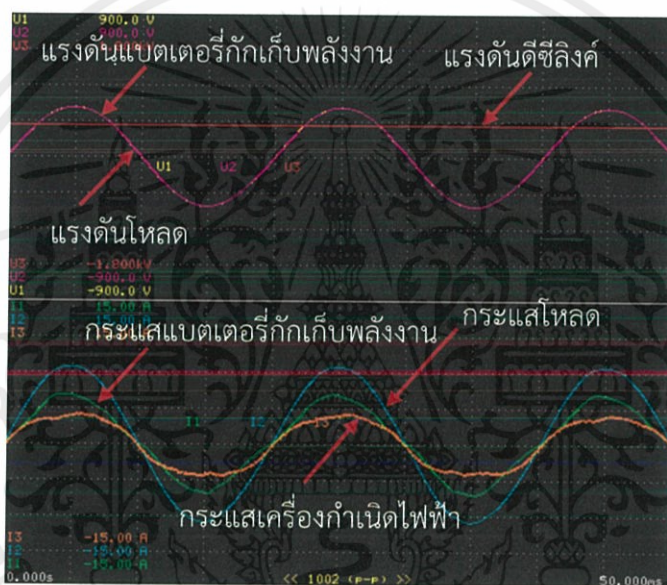


รูปที่ 4.5 วงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

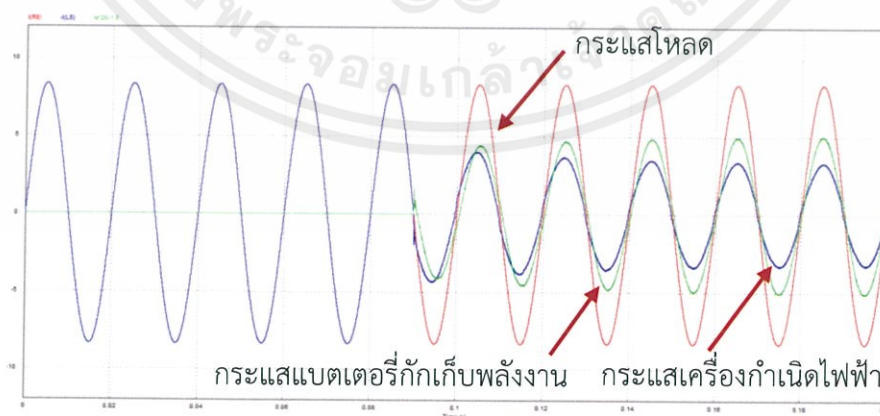
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 การทดสอบการทำงานระบบกักเก็บพลังงานในโหมดจ่ายพลังงานเข้าสู่ไมโครกริด

เพื่อทดสอบผลการทำงานจ่ายพลังงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเข้าสู่ไมโครกริด กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายแรงดันกระแสสลับ 220 โวลต์ ให้ภาระทางไฟฟ้าขนาด 1300 วัตต์ และกำหนดให้ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์เข้าสู่ไมโครกริด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 ลักษณะของรูปคลื่น เปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นผลการจำลองที่ กำลังไฟฟ้าเท่ากัน รูปที่ 4.8 ขนาดของแรงดันและกระแส ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบ แบตเตอรี่กักเก็บพลังงานสามารถทำงานในโหมดจ่ายพลังงานเข้าสู่ไมโครกริดได้ โดยกระแสไฟฟ้าที่ถูก ส่งจากระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานมีรูปคลื่นใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม PSIM



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นของกระแสและแรงดัน

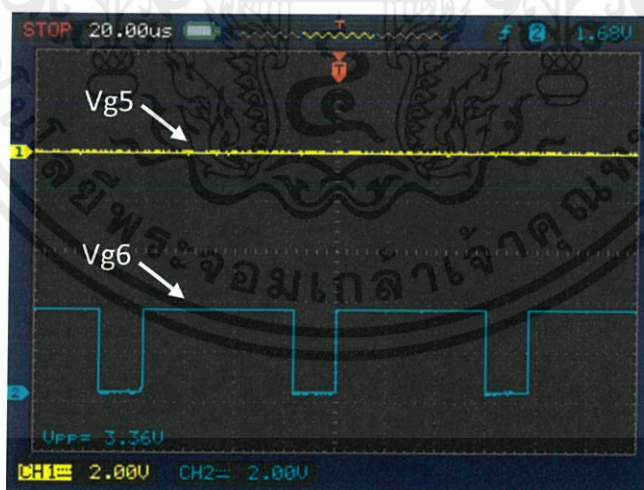


รูปที่ 4.7 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าโหมดจ่ายพลังงานเข้าสู่ไมโครกริด

Urms1	219.66 V
Irms1	3.4147 A
Urms2	219.17 V
Irms2	5.7473 A
Udc3	403.88 V
Irms3	2.43 A
P1	0.7465kW
P2	1.2596kW

รูปที่ 4.8 ขนาดของกระแสและแรงดัน

รูปที่ 4.9 สัญญาณ PWM ที่ใช้ในการขับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงในโหมดการทำงานแบบ Boost Converter มีอัตราส่วนดิวตี้แปรผันตามวงจรควบคุม และรูปที่ 4.10 สัญญาณ PWM ที่ใช้ในการขับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหรืออินเวอร์เตอร์ มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณที่ได้จากวงจรควบคุม



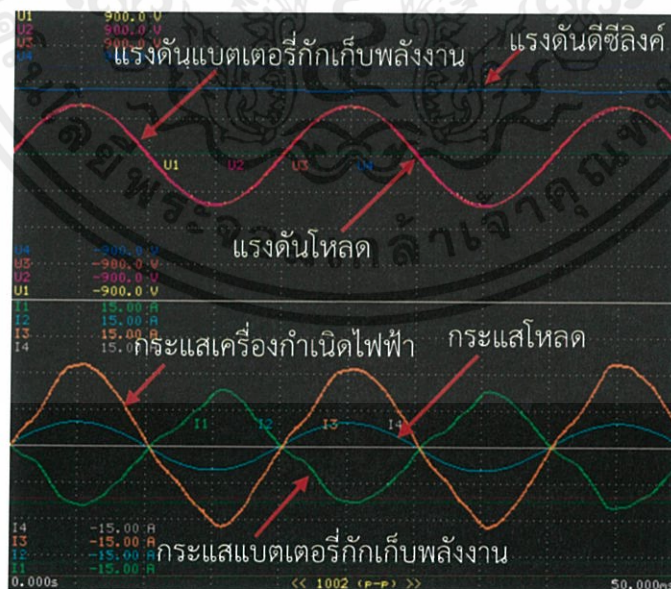
รูปที่ 4.9 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง



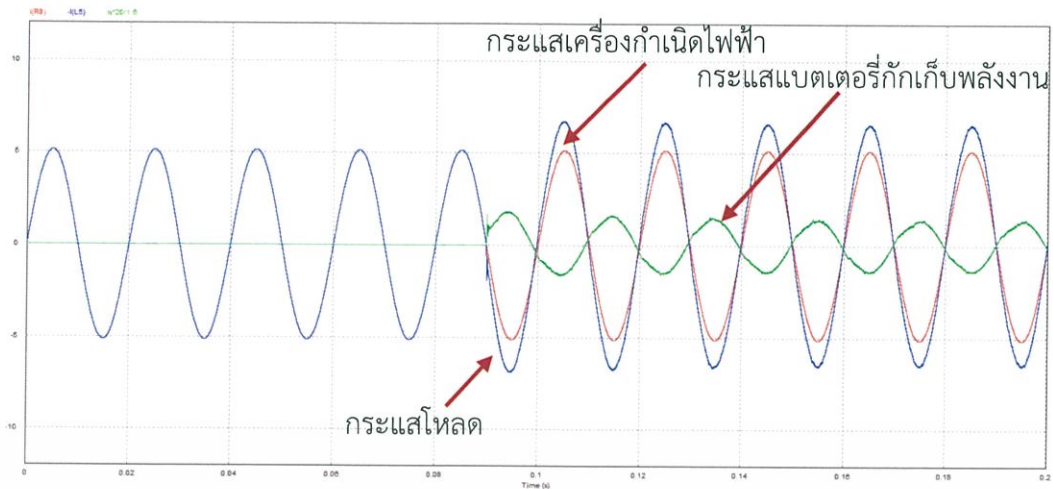
รูปที่ 4.10 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับอินเวอร์เตอร์

4.1.2 การทดสอบการทำงานระบบกักเก็บพลังงานในโหมดรับพลังงานจากไมโครกริด

เพื่อทดสอบผลการทำงานรับพลังงานจากไมโครกริดเข้าสู่ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายแรงดันกระแสสลับ 220 โวลต์ ภาระทางไฟฟ้าขนาด 400 วัตต์ และกำหนดให้ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานรับกำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์จากไมโครกริด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 ลักษณะของรูปคลื่น เปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นผลการจำลองที่ กำลังไฟฟ้าเท่ากัน และรูปที่ 4.13 ขนาดของแรงดันและกระแส ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานสามารถทำงานในโหมดรับพลังงานจากไมโครกริดได้



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นของกระแสและแรงดัน

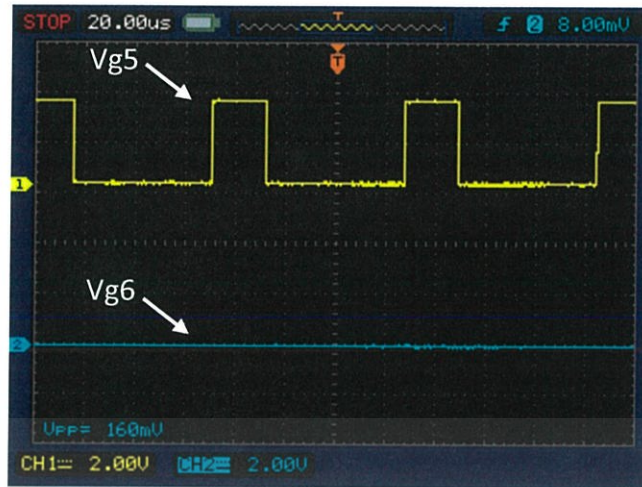


รูปที่ 4.12 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าโหมตรับพลังงานจากไมโครกริด

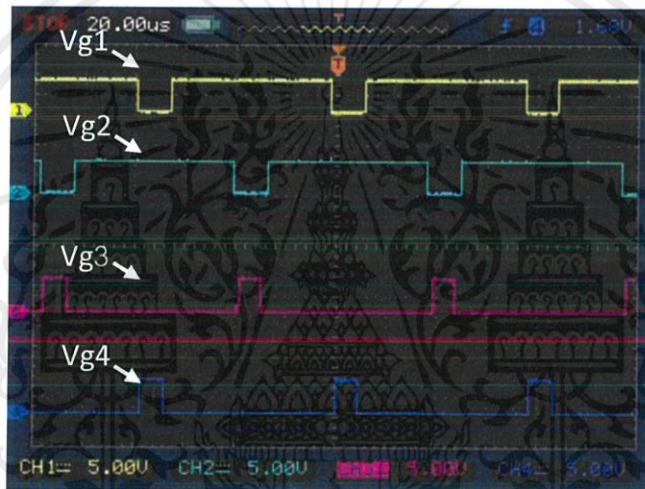
Urms1	215.55	U	P1	-0.6465	kW
Irms1	3.1326	A	Q1	0.1948	kvar
Urms2	216.28	U	P2	0.5698	kW
Irms2	2.6536	A	Q2	0.0683	kvar
Urms3	220.38	U	P3	1.23	kW
Irms3	5.66	A	Q3	0.22	kvar
Udc4	409.13	U	fU1	50.000	Hz
Idc4	0.0037	A	fU2	49.999	Hz

รูปที่ 4.13 ขนาดของกระแสและแรงดัน

รูปที่ 4.14 สัญญาณ PWM ที่ใช้ในการขับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงในโหมดการทำงานแบบ Buck Converter มีอัตราส่วนดิวตี้แปรผันตามวงจรควบคุม และรูปที่ 4.15 สัญญาณ PWM ที่ใช้ในการขับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหรืออินเวอร์เตอร์ มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณที่ได้จากวงจรควบคุม



รูปที่ 4.14 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขั้ววงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง



รูปที่ 4.15 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับอินเวอร์เตอร์

4.2 ผลจำลองการเชื่อมต่อบรรยากาศแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเข้าสู่ไมโครกริด

ความผันผวนทางความถี่ที่เกิดขึ้นในไมโครกริดเกิดจากความสามารถในการผลิตพลังงานจากแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียน เนื่องจากแหล่งจ่ายดังกล่าวมีความไม่แน่นอนในการผลิตพลังงาน จึงทำให้เกิดความผันผวนทางความถี่ที่เกิดขึ้นในระบบ

เพื่อให้เกิดการชดเชยความผันผวนในการผลิตพลังงานของแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนในไมโครกริด จำเป็นที่ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในไมโครกริดต้องจ่ายพลังงานชดเชยในส่วนที่หายไปหรือรับพลังงานชดเชยในส่วนที่เกินจากแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่แบตเตอรี่ กระบวนการดังกล่าวอ้างอิงมาจากโปรไฟล์การจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลดังรูปที่ 4.16 เป็นตัวอ้างอิงการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน



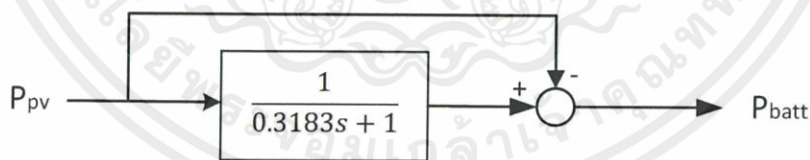
รูปที่ 4.16 โพรไฟล์กำลังไฟฟ้าของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง

โดย

Ideal Power คือพลังงานแสงอาทิตย์ในอุดมคติ

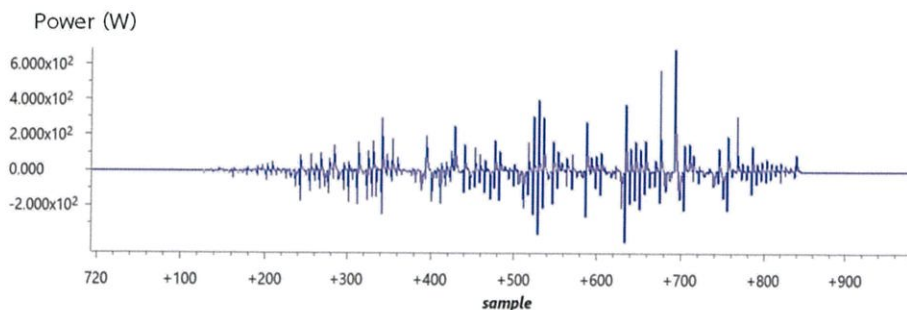
PV Power คือพลังงานแสงอาทิตย์ที่จ่ายจริง

และ Expecting Power คือพลังงานแสงอาทิตย์ที่คาดหวังที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงการจ่ายหรือรับพลังงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน โดยนำ PV Power มาผ่าน 0.5 Hz Low-Pass Filter จะได้กำลังไฟฟ้าที่ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานต้องจ่ายหรือรับเข้าสู่ระบบ รูปที่ 4.17 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการจ่ายพลังงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน



รูปที่ 4.17 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการจ่ายพลังงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน

จากการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนกับไมโครกริด ผลที่ได้คือสัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานต้องจ่ายหรือรับเพื่อชดเชยความผันผวนทางความถี่ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียน สัญญาณการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากโปรแกรม CCS เพื่อควบคุมการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเป็นไปดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานต้องจ่ายหรือรับ เพื่อชดเชยความผันผวนทางความถี่ของกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.18 เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานต้องจ่ายหรือรับโดยคำนวณมาจากโปรไฟล์กำลังไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 4.16 โดยค่ากำลังไฟฟ้าบวกคือระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานจ่ายพลังงานเข้าสู่ไมโครกริดและค่ากำลังไฟฟ้าลบคือระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานรับพลังงานจากไมโครกริด กำลังไฟฟ้าที่ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานจ่ายหรือรับจะช่วยชดเชยความผันผวนทางความถี่ของกำลังไฟฟ้าจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เนื่องจากการทำงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานทำให้เกิดสัญญาณรบกวนการทำงานของอุปกรณ์สื่อสาร CANBUS ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงไม่สามารถรับค่ากำลังไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อนำมาใช้ในการประมวลผลควบคุมการจ่ายพลังงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานได้

สรุปผลการทดลอง อุปสรรคและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

พลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าหลักสำหรับระบบไมโครกริด แต่เนื่องด้วยระบบไมโครกริดเป็นระบบขนาดเล็กจึงมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก ทั้งยังมีข้อจำกัดในการผลิตพลังงานที่ไม่มีความสม่ำเสมอของแหล่งพลังงานหมุนเวียน ซึ่งส่งผลให้เกิดความผันผวนทางความถี่ของกำลังไฟฟ้าขึ้นในระบบไมโครกริด ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานจึงถูกนำมาใช้งานในระบบไมโครกริดเพื่อช่วยลดปัญหาความผันผวนทางความถี่อันเนื่องมาจากแหล่งผลิตพลังงานหมุนเวียนในระบบไมโครกริด และระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานดังกล่าวยังสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองให้แก่ระบบไม่ว่าในสถานะใดก็ตาม ซึ่งระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานจะช่วยปรับปรุงทั้งเสถียรภาพและคุณภาพของระบบไฟฟ้าภายในระบบไมโครกริด ปริญญาบัตรฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอแนวทางในการแก้ปัญหาที่อาจพบได้ในระบบไมโครกริดแบบแยกอิสระจากการใช้งานระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในไมโครกริด ซึ่งเน้นในเรื่องการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในไมโครกริดให้มีประสิทธิภาพ และการนำระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานมาชดเชยความผันผวนทางความถี่ของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบไมโครกริด

ปริญญาบัตรฉบับนี้ดำเนินการออกแบบและปรับปรุงระบบควบคุมสำหรับระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในไมโครกริดสาธิตในห้องปฏิบัติการ เพื่อรักษาเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าขณะใช้งานระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานร่วมกับระบบไมโครกริดสาธิตในห้องปฏิบัติการ ผ่านการจำลองผลในโปรแกรม PSIM และปฏิบัติการร่วมกับระบบไมโครกริดสาธิตในห้องปฏิบัติการ

ในการออกแบบระบบควบคุมสำหรับการควบคุมวงจรถูกกำลังของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานประกอบด้วยการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (PI Controller) ใช้ควบคุมวงจรถ่วงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางและการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ (PR Controller) ใช้ควบคุมวงจรถ่วงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบสองทิศทาง การดำเนินการผ่านการจำลองผลในโปรแกรม PSIM ช่วยในการหาอัตราขยายที่เหมาะสมเพื่อควบคุมวงจรถ่วงกำลังที่ใช้ในระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน ทั้งนี้การดำเนินการผ่านการจำลองผลในโปรแกรมยังครอบคลุมไปถึงการปรับปรุงวงจรถ่วงความถี่ชนิดวงจรถ่วงความถี่ต่ำผ่านแบบ LCL (LCL Filter) เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในไมโครกริด ซึ่งผลการจำลองในโปรแกรม PSIM ยืนยันถึงความสามารถในการควบคุมระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ระบบไมโครกริดจะมีคุณภาพและเสถียรภาพมากขึ้นและจากการนำระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานมาใช้ในระบบไมโครกริดสาธิตในห้องปฏิบัติการสามารถชดเชยความผันผวนทางความถี่อันเกิดจากการผลิตพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน

การนำระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานมาใช้ในระบบไมโครกริด นอกจากจะช่วยลดความผันผวนทางความถี่แล้ว ยังสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองให้แก่ระบบไมโครกริดในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดให้มีประสิทธิภาพทำให้เกิดเสถียรภาพและคุณภาพของระบบไฟฟ้า และยังช่วยลดความผันผวนทางความถี่ที่เกิดขึ้นภายในระบบไมโครกริด

5.2 อุปสรรคและข้อเสนอแนะ

ปัญหานิวรณ์ฉบับนี้ทำการทดลองในระบบไมโครกริดสาธิตในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านต่าง ๆ เช่น พื้นที่ เวลาหรือสภาพอากาศ ซึ่งในการปฏิบัติการบางส่วนในห้องปฏิบัติการได้ผลที่คลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลองในโปรแกรม สาเหตุเนื่องจากความสามารถในการวัดของวงจรวัดกระแสมีความแม่นยำไม่มากพอ การประมวลผลของ DSP ที่ยังไม่มีความละเอียดมากพอ รวมถึงสัญญาณรบกวนที่มีผลต่อการประมวลผลของ DSP และการทำงานของ CAN Bus ดังนั้นจึงทำให้ไม่ผลการทดลองไม่ได้อย่างที่ควรจะเป็น

การดำเนินการในการแก้ไขปัญหาควรเริ่มจากการทดลองและบันทึกข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น วิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาและหาแนวทางที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นต่อไป การนำไปประยุกต์ใช้กับระบบไมโครกริดจริงยังต้องมีการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับสภาพการณ์นั้น ๆ อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, and P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*, The Institution of Engineering and Technology, 2552.
- [2] Daniel W. Hart, *Power Electronics*, New York, McGraw-Hill, 2554.
- [3] ชนกร ม่วงรอด และ อนุสรณ์ เฮงสาธร, “การออกแบบและสร้างชุดทดลองการควบคุมมอเตอร์อินดักชันสามเฟสด้วยพีแอลซี,” *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสยาม*, 2556.
- [4] Anuja Namboodiri, “Unipolar and Bipolar PWM Inverter,” *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, Volume 1 Issue 7, 2557, pp. 1-4.
- [5] สุชาติ จันทรจักรมานิตย์, *ระบบควบคุม Control Systems*, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 2555.
- [6] M. Parvez, M.F.M Elisa and N. A. Rahim, “Performance analysis of PR current controller for single-phase inverters,” *IEEE Conferences*, 2559, pp. 1-4.
- [7] ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข, “หลักการเบื้องต้นเฟสล็อกสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบต่อเข้ากริด,” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่9, ฉบับที่2*, 2557, หน้า 86-94.
- [8] Sonthaya Nongnuch, “วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit),” *บทความเพื่อนนักอิเล็กทรอนิกส์*, 2558.
- [9] ผศ. ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์, “ฮาร์มอนิกกับคุณภาพกำลังไฟฟ้า”, *บทความวิชาการ, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม*, 2539
- [10] กิตติโชติ สุนทรทวีทรัพย์, “การควบคุมระบบเบตเตอร์ก็กเก็บพลังงานเพื่อลดความผันผวนทางความถี่ในไมโครกริดแบบแยกอิสระ” *ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2561



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริด

Battery Energy Storage System for Microgrid

ศิริลักษณ์ โคตรอินทร์ ศุภรดา จรัสแสนประเสริฐ และ อภิวัฒน์ เมืองสุวรรณ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ถนนฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 0-2739-2478

บทคัดย่อ

ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานถูกนำมาใช้ในไมโครกริดเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองให้แก่ระบบไมโครกริด ปัญหานี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไมโครกริดด้วยระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า และเพื่อแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของการผลิตพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ที่ส่งผลให้เกิดความผันผวนในการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเกิดความผันผวนทางความถี่ขึ้นตามลำดับ โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าขาออกของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานให้สอดคล้องกับส่วนที่ผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ปัญหานี้ได้ดำเนินการออกแบบและจำลองผลวงจรควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานด้วยโปรแกรม PSIM และยืนยันผลการจำลองด้วยการทดลองกับไมโครกริดสาธิตในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน, ไมโครกริด

Abstract

Battery Energy Storage System (BESS) is used in Microgrid for emergency energy reservation. The objective of this study is to improve power quality of the microgrid using BESS in order to maintain system stability, and to mitigate frequency fluctuation due to intermittence nature of renewable energy resource in the microgrid. The frequency suppression is achieved by controlling the output power of BESS in accordant with the power fluctuation part of the renewable energy resource. In this thesis, the design and simulation of the BESS control system are carried out using PSIM. The design parameters are implemented in the laboratory demonstration microgrid and the validation of the control system is confirmed by the experimental results.

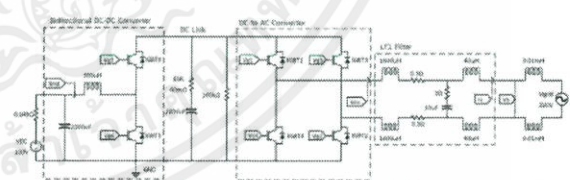
Keyword: Battery Energy Storage System, Microgrid

1. บทนำ

สำหรับระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปที่เชื่อมต่อกันเป็นระบบขนาดใหญ่ เมื่อเกิดความผิดปกติที่คาดไม่ถึงกับระบบไฟฟ้า ความเสียหายที่เกิดขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อเป็นบริเวณกว้างหากระบบป้องกันไม่สามารถป้องกันระบบได้ ดังนั้นเพื่อให้ระบบไฟฟ้าสามารถดำเนินการต่อไปได้โดยไม่ได้รับผลกระทบ ระบบไมโครกริดแบบแยกอิสระจึงถูกพัฒนาขึ้น โดยระบบไมโครกริดดังกล่าวสามารถเชื่อมต่อเข้ากับกริดและสามารถแยกตัวออกมาเป็นอิสระหากมีความผิดปกติเกิดขึ้นกับกริดได้

โดยทั่วไปพลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าหลักสำหรับระบบไมโครกริด ซึ่งพลังงานหมุนเวียนมีความไม่แน่นอนในการผลิตพลังงาน กล่าวคือมีความผันผวนสูง ดังนั้นระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System) จึงถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบไมโครกริด เพื่อใช้ชดเชยความผันผวนที่เกิดจากความสามารถในการผลิตพลังงานจากพลังงานหมุนเวียนและเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองให้แก่ระบบ ซึ่งระบบกักเก็บพลังงานช่วยปรับปรุงทั้งเสถียรภาพและคุณภาพของระบบไฟฟ้าได้

2. วงจรพื้นฐานสำหรับการส่งถ่ายพลังงาน



รูปที่ 1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองทิศทาง

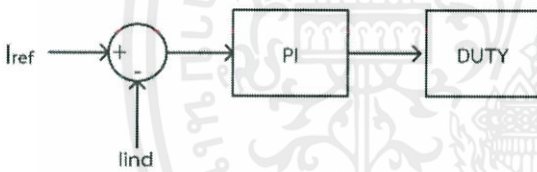
เนื่องจากแบตเตอรี่มีการรับและจ่ายพลังงานในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อต้องนำไปเชื่อมต่อกับระบบไมโครกริดที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จึงจำเป็นต้องมีการแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความเข้ากันได้ระหว่างแบตเตอรี่และไมโครกริด โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC Converter) และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหรือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (Inverter or Rectifier) เพื่อให้สามารถรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่กับระบบไมโครกริดได้

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC Converter) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับกรณีที่ต้องการให้มีการไหลของกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง เช่น มีกำลังไฟฟ้าไหลเข้ามาเพื่อชาร์จแบตเตอรี่และไหลออกจากแบตเตอรี่เพื่อไปใช้งาน

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับหรืออินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งกำเนิดไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และเนื่องจากแรงดันและกระแสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์นั้นมีสัญญาณฮาร์มอนิกส์ประกอบอยู่ ดังนั้นเพื่อให้ได้แรงดันและกระแสไฟฟ้าสลับที่มีความเพี้ยนต่ำและเป็นไปตามมาตรฐานจึงใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ LCL

3. การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

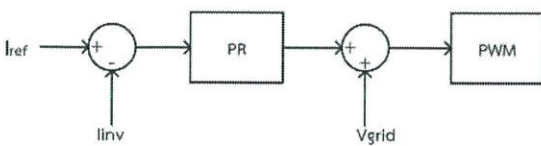
มีหลักการการทำงานโดยใช้กระแสอ้างอิงมาเปรียบเทียบกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางซึ่งจะได้ค่าความผิดพลาด นำค่าความผิดพลาดเข้าสู่บล็อกการควบคุมกระแสแบบพีโอ และนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นอัตราส่วนดิวตี้ซวิตซ์ ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงแบบสองทิศทาง

4. การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ

มีหลักการการทำงานโดยใช้กระแสอ้างอิงมาเปรียบเทียบกับกระแสที่ไหลภายในไมโครกริดซึ่งจะได้ค่าความผิดพลาด นำค่าความผิดพลาดเข้าสู่บล็อกการควบคุมกระแสสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ และนำค่าที่ได้ไปรวมกับแรงดันที่ไมโครกริดเพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงในการมอดูเลตกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณ PWM สำหรับซัพพลายในวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไป



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ

5. ตัวควบคุมแบบพีโอ

มีลักษณะการทำงานคือการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมแบบสัดส่วนและตัวควบคุมแบบปริพันธ์ สามารถเขียนในรูปของลาปลาซและได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมดังสมการต่อไปนี้

$$G(S) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

โดย K_p คือ อัตราขยายแบบสัดส่วน และ K_i คือ อัตราขยายแบบปริพันธ์

6. ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์

เทคนิคการควบคุมกระแสแบบสัดส่วนบวกเรโซแนนซ์มีอัตราขยายเป็นอนันต์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ทำให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวลดลงเป็นศูนย์และสามารถจัดการเมื่อระบบถูกรบกวนจากสิ่งรบกวนภายนอกได้ดี โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมดังสมการ (2)

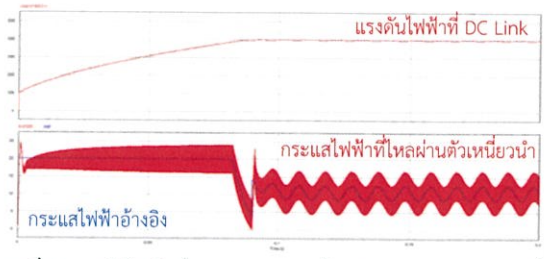
$$G_{PR}(S) = K_p + \frac{2K_i\omega_c s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2)$$

โดย K_p คือ อัตราขยายแบบสัดส่วน, K_i คือ อัตราขยายแบบปริพันธ์ และ ω_0 คือ ความถี่เรโซแนนซ์

7. การจำลองผลและผลการทดลอง

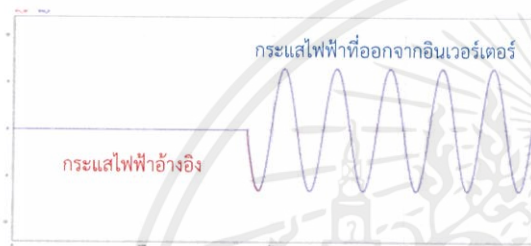
7.1 การจำลองผลการทำงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานโดยใช้โปรแกรม PSIM

ในการเชื่อมต่อนระบบกักเก็บพลังงานเข้ากับไมโครกริดนั้น เนื่องจากไฟที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ หรือที่ชาร์จเข้าแบตเตอรี่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรง แต่ไมโครกริดเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ จึงต้องใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าในการเชื่อมต่อ โดยใช้อินเวอร์เตอร์แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางเพื่อเพิ่มระดับแรงดันกระแสตรง 100 โวลต์ จากแบตเตอรี่เป็น 400 โวลต์ ที่ DC link เพื่อให้อินเวอร์เตอร์สามารถแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ 220 โวลต์ ได้ เมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟจากระบบกักเก็บพลังงานสู่อินเวอร์เตอร์ และลดระดับแรงดันเมื่อต้องการกักเก็บ

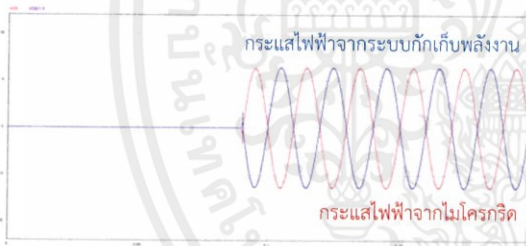


รูปที่ 4 แรงดันไฟฟ้าที่ DC link กระแสไฟฟ้าอ้างอิง และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

จากรูปที่ 4 ผลการจำลองพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นไปตามสัญญาณกระแสอ้างอิง ทั้งนี้ยังสามารถรักษาระดับแรงดัน DC link ให้มีค่าคงที่ 400 โวลต์



รูปที่ 5 กระแสไฟฟ้าอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 6 กราฟแสดงกระแสไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานและกระแสไฟฟ้าจากไมโครกริด

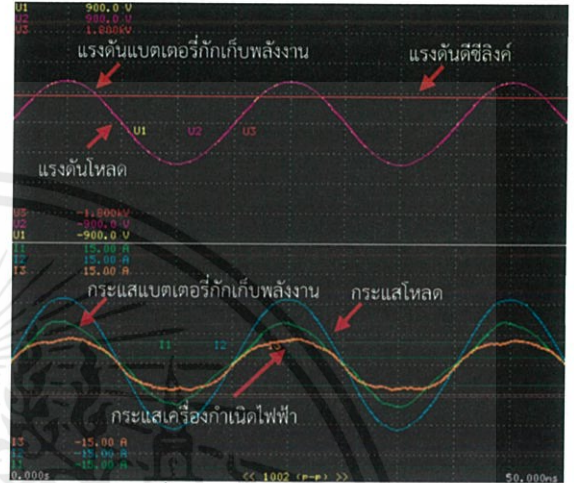
จากรูปที่ 5 การจำลองผลการควบคุมจะเห็นได้ว่ากระแสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์หรือกระแสที่ต้องการควบคุมสามารถเกาะกับกระแสอ้างอิงที่ต้องการได้ และจากรูปที่ 6 ผลการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานสู่มิโครกริด จะเห็นว่ากระแสจากระบบกักเก็บพลังงานมีเฟสตรงกับกระแสจากไมโครกริด

7.2 ผลการทดลอง

7.2.1 การทดสอบการทำงานระบบกักเก็บพลังงานในโหมดจ่ายพลังงานเข้าสู่ไมโครกริด

เพื่อทดสอบผลการทำงานจ่ายพลังงานของระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเข้าสู่ไมโครกริด กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายแรงดันกระแสสลับ 220 โวลต์ ให้ภาระฟ้าขนาด 1300

วัตต์ และกำหนดให้ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์เข้าสู่ไมโครกริด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7 ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานสามารถทำงานในโหมดจ่ายพลังงานเข้าสู่ไมโครกริดได้ โดยกระแสไฟฟ้าที่ถูกส่งจากระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานมีรูปคลื่นใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม PSIM ถือเป็นไขุขอยอดที่ดี ไม่มีฮาร์โมนิกอันดับอื่นปนอยู่



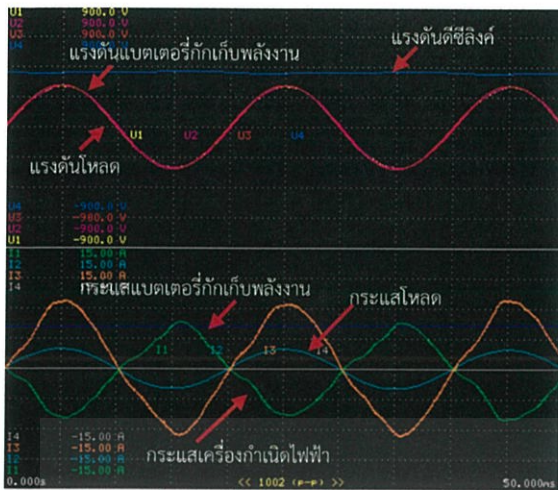
รูปที่ 7 รูปคลื่นของกระแสและแรงดัน

Urms1	219.66 V
Irms1	3.4147 A
Urms2	219.17 V
Irms2	5.7473 A
Udc3	403.88 V
Irms3	2.43 A
P1	0.7465kW
P2	1.2596kW

รูปที่ 8 ขนาดของกระแสและแรงดัน

7.2.2 การทดสอบการทำงานระบบกักเก็บพลังงานในโหมดรับพลังงานจากไมโครกริด

เพื่อทดสอบผลการทำงานรับพลังงานจากไมโครกริดเข้าสู่ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายแรงดันกระแสสลับ 220 โวลต์ ภาระทางไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ และวัตต์จากไมโครกริด กำหนดให้ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานรับกำลังไฟฟ้จากไมโครกริด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงขนาดของแรงดันและกระแส ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานสามารถทำงานในโหมดรับพลังงานจากไมโครกริดได้



รูปที่ 9 รูปคลื่นของกระแสและแรงดัน

Urns1	215.55	V	P1	-0.6465	kW
Irns1	3.1326	A	Q1	0.1948	kvar
Urns2	216.28	V	P2	0.5698	kW
Irns2	2.6536	A	Q2	0.0683	kvar
Urns3	220.38	V	P3	1.23	kW
Irns3	5.66	A	Q3	0.22	kvar
Udc4	409.13	V	fU1	50.000	Hz
Idc4	0.0037	A	fU2	49.999	Hz

รูปที่ 10 ขนาดของกระแสและแรงดัน

8. สรุปผล

พลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าหลักสำหรับระบบไมโครกริดแต่เนื่องด้วยระบบไมโครกริดเป็นระบบขนาดเล็กจึงมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก ทั้งยังมีข้อจำกัดในการผลิตพลังงานที่ไม่มีความสม่ำเสมอของแหล่งพลังงานหมุนเวียน ซึ่งส่งผลให้เกิดความผันผวนทางความถี่ของกำลังไฟฟ้าขึ้นในระบบไมโครกริด ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานจึงถูกนำมาใช้งานในระบบไมโครกริดเพื่อช่วยลดปัญหาความผันผวนทางความถี่ขึ้นเนื่องมาจากแหล่งผลิตพลังงานหมุนเวียนในระบบไมโครกริด และระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานดังกล่าวยังสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองให้ระบบไม่ว่าในสภาวะใดก็ตาม ซึ่งระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานจะช่วยปรับปรุงทั้งเสถียรภาพและคุณภาพของระบบไฟฟ้าภายในระบบไมโครกริด

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*, The Institution of Engineering and Technology, 2552.
- [2] Daniel W .Hart, *Power Electronics*, New York, McGraw-Hill, 2554.
- [3] ธนกร ม่วงรอด และ อนุสรณ์ เฮงสาร, "การออกแบบและสร้างชุดทดลองการควบคุมมอเตอร์อินดักชันสามเฟสด้วยพีแอลซี," *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์*, มหาวิทยาลัยสยาม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, บัณฑิต 2556.
- [4] Anuja Namboodiri, "Unipolar and Bipolar PWM Inverter," *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, Volume 1 Issue 7, 2557, pp. 1-4.
- [5] สุชาติ จันทร์จรมานิตย์, *ระบบควบคุม Control Systems*, กรุงเทพมหานครคณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
- [6] M .Parvez, M.F.M Elisa and N .A .Rahim, "Performance analysis of PR current controller for single-phase inverters," *IEEE Conferences*, 2559, pp. 1-4.
- [7] ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข, "หลักการเบื้องต้นเฟสล็อกกลูปสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบต่อเข้ากริด," *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิศวกรรมศาสตร์*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 2, 2557, หน้า 86-94.
- [8] Sonthaya Nongnuch, "วงจกรองความถี่ (Filter Circuit)," *บทความเพื่อนักอิเล็กทรอนิกส์*, 2558.
- [9] ผศ.ชัชชัย ศิลปวิจารณ์, "ฮาร์มอนิกกับคุณภาพ" *กำลังไฟฟ้า*, *บทความวิชาการ*, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, 2539
- [10] กิตติโชติ สุนทรทวีทรัพย์, "การควบคุมระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเพื่อลดความผันผวนทางความถี่ในไมโครกริดแบบแยกอิสระ" *ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต*, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2561



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Battery Energy Storage System for Microgrid

Siriluck Khot-in, Suparada Jarussaenprasert, Apiwat Muangsuwan and Dr. Sompob Polmai

Abstract

Battery Energy Storage System (BESS) is used in Microgrid for emergency energy reservation. The objective of this study is to improve power quality of the microgrid using BESS in order to maintain system stability, and to mitigate frequency fluctuation due to intermittence nature of renewable energy resource in the microgrid. The frequency suppression is achieved by controlling the output power of BESS in accordant with the power fluctuation part of the renewable energy resource. In this thesis, the design and simulation of the BESS control system are carried out using PSIM. The design parameters are implemented in the laboratory demonstration microgrid and the validation of the control system is confirmed by the experimental results.

Introduction

For years, electricity demand increases dramatically hence there's a need to generate electricity to meet such demand. However the border of power generation is limited for example, global warming crisis. So that modern trend tends to be environmentally conservative and renewable energy becomes popular in modernity. The use of renewable energy sources in Microgrid brings Microgrid a deviated frequency due to generation ability of the sources, so that the existence of Battery Energy Storage System (BESS) in Microgrid can suppress such the deviated frequency and also be energy storage system for the Microgrid as well as enlarge system stability.

Methodology

Power converter of Battery Energy Storage System consists; a Bidirectional DC-DC Converter, a DC-AC Converter, Control systems and a LCL low pass filter. The study firstly demonstrates Battery Energy Storage System in PSIM and then implements Battery Energy Storage System with demonstrated Microgrid in laboratory.

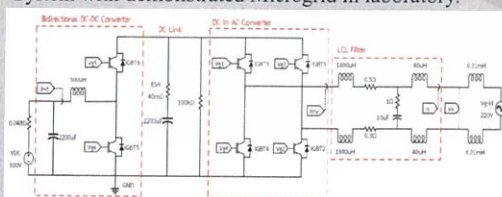


Fig. 1 BESS Simulation



Fig. 2 Power Converter



Fig. 3 Battery Energy Storage System and Demonstrated Microgrid

Results

Figure 4 simulated voltage (left) and implemented voltage (right). BESS Power Injection and BESS Power Absorption are in the same manner.

Figure 5 BESS Power Injection mode, Figure 6 BESS Power Absorption mode; left is from simulations and right is from experiments.

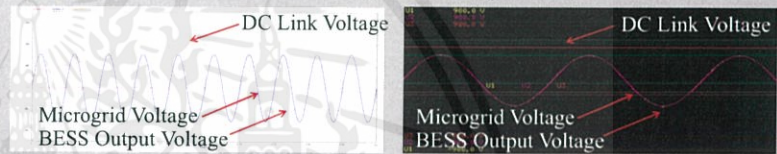


Fig. 4 BESS Voltage

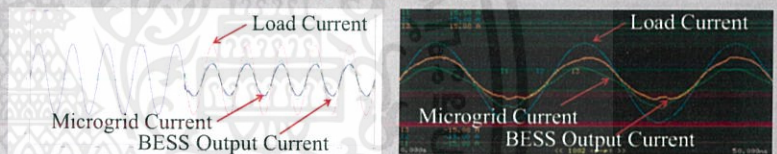


Fig. 5 BESS Power Injection Mode

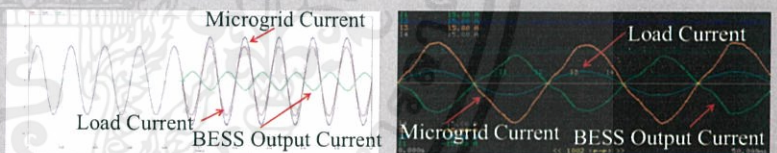


Fig. 6 BESS Power Absorption Mode

Conclusion

The study purposes an improvement of current quality of Battery Energy Storage System through simulations in PSIM and experiments with demonstrated Microgrid in laboratory.

- The study implements in PSIM for simulating an optimum point of each part. The result of PSIM simulations confirms the Battery Energy Storage System current sinusoidally.
- The experiments with demonstrated Microgrid in laboratory show that the result of connection between Battery Energy Storage System and demonstrated Microgrid purposes a Battery Energy Storage System current following the PSIM simulation.

References

- [1] K. Soontomtaweesub "Control of Battery Energy Storage System for Frequency Deviation Suppression in a Stand-alone Microgrid," Master of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2018.
- [2] K. Thanachalee, N. srirakul, T. Tawilputtikul, T. Annarat and R. Roshom "Control of Battery Energy Storage System for a Microgrid" Bachelor of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2017

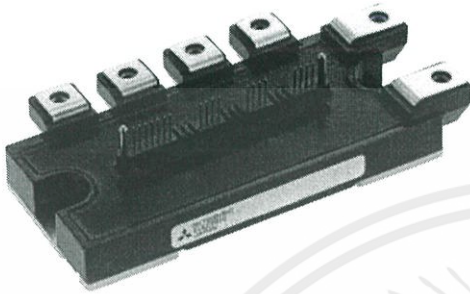




PM50RL1A120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

PM50RL1A120



FEATURE

Inverter + Brake + Drive & Protection IC

- a) Adopting new 5th generation Full-Gate CSTBT™ chip
- b) The over-temperature protection which detects the chip surface temperature of CSTBT™ is adopted.
- c) Error output signal is possible from all each protection upper and lower arm of IPM.
- d) Compatible L-series package.

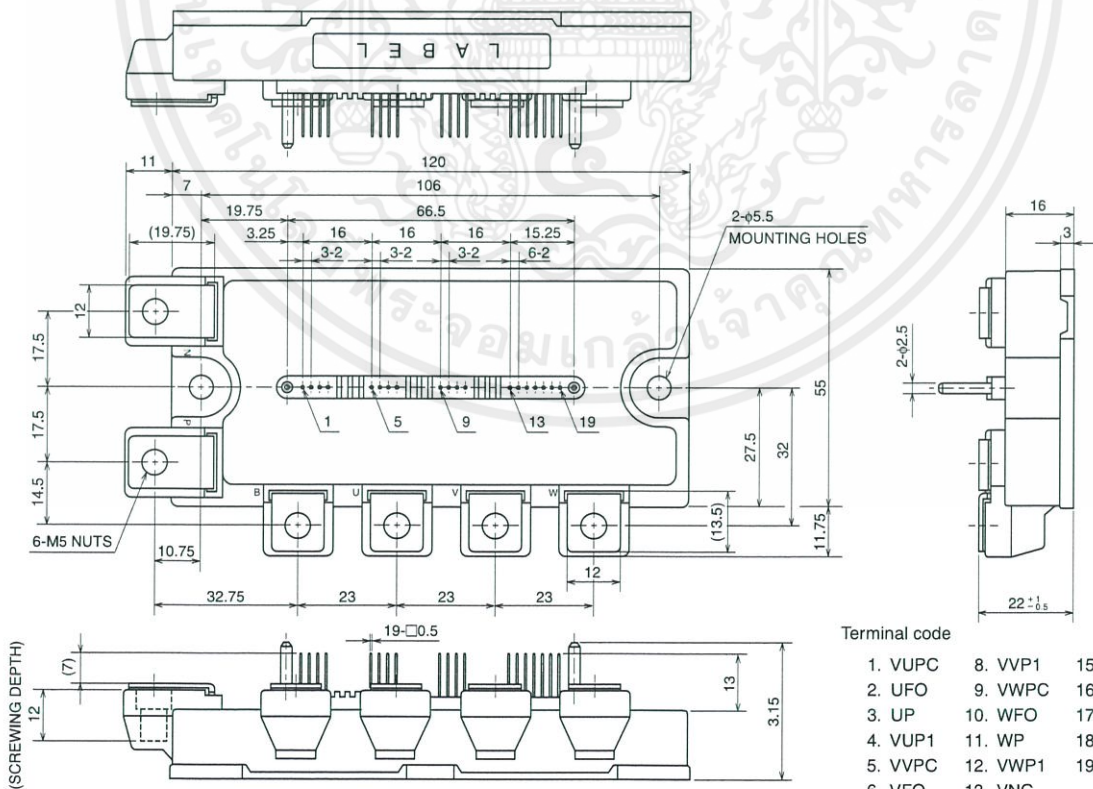
- 3φ 50A, 1200V Current-sense and temperature sense IGBT type inverter
- Monolithic gate drive & protection logic
- Detection, protection & status indication circuits for, short-circuit, over-temperature & under-voltage (P-Fo available from upper arm devices)
- UL Recognized

APPLICATION

General purpose inverter, servo drives and other motor controls

PACKAGE OUTLINES

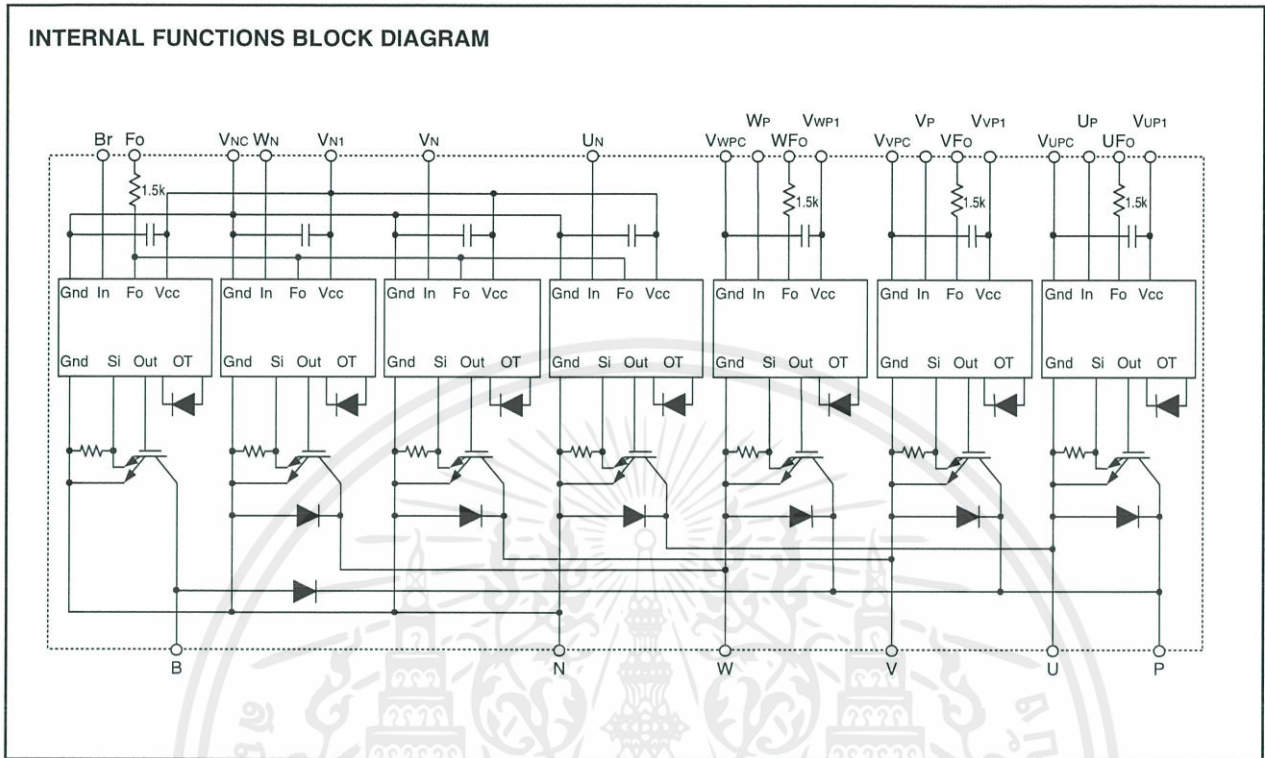
Dimensions in mm



PM50RL1A120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

INTERNAL FUNCTIONS BLOCK DIAGRAM



MAXIMUM RATINGS (Tj = 25°C, unless otherwise noted)

INVERTER PART

Symbol	Parameter	Condition	Ratings	Unit
V _{CEs}	Collector-Emitter Voltage	V _D = 15V, V _{CIN} = 15V	1200	V
±I _C	Collector Current	T _C = 25°C (Note-1)	50	A
±I _{CP}	Collector Current (Peak)	T _C = 25°C	100	A
P _C	Collector Dissipation	T _C = 25°C (Note-1)	462	W
T _j	Junction Temperature		-20 ~ +150	°C

*: T_C measurement point is just under the chip.

BRAKE PART

Symbol	Parameter	Condition	Ratings	Unit
V _{CEs}	Collector-Emitter Voltage	V _D = 15V, V _{CIN} = 15V	1200	V
I _C	Collector Current	T _C = 25°C (Note-1)	25	A
I _{CP}	Collector Current (Peak)	T _C = 25°C	50	A
P _C	Collector Dissipation	T _C = 25°C (Note-1)	320	W
I _F	FWDi Forward Current	T _C = 25°C	25	A
V _{R(DC)}	FWDi Rated DC Reverse Voltage	T _C = 25°C	1200	V
T _j	Junction Temperature		-20 ~ +150	°C

CONTROL PART

Symbol	Parameter	Condition	Ratings	Unit
V _D	Supply Voltage	Applied between : V _{UP1} -V _{UPC} , V _{VP1} -V _{VPC} V _{WP1} -V _{WPC} , V _{N1} -V _{Nc}	20	V
V _{CIN}	Input Voltage	Applied between : V _{UP} -V _{UPC} , V _{VP} -V _{VPc} , V _{WP} -V _{WPC} V _{UN} • V _N • V _{WN} • V _{Br} -V _{Nc}	20	V
V _{FO}	Fault Output Supply Voltage	Applied between : V _{UFO} -V _{UPC} , V _{Fo} -V _{VPC} , V _{WFO} -V _{WPC} V _{Fo} -V _{Nc}	20	V
I _{FO}	Fault Output Current	Sink current at V _{UFO} , V _{Fo} , V _{WFO} , V _{Fo} terminals	20	mA

PM50RL1A120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

TOTAL SYSTEM

Symbol	Parameter	Condition	Ratings	Unit
VCC(PROT)	Supply Voltage Protected by SC	V _D = 13.5 ~ 16.5V Inverter Part, T _j = +125°C Start	800	V
VCC(surge)	Supply Voltage (Surge)	Applied between : P-N, Surge value	1000	V
Tstg	Storage Temperature		-40 ~ +125	°C
Viso	Isolation Voltage	60Hz, Sinusoidal, Charged part to Base, AC 1 min.	2500	V _{rms}

THERMAL RESISTANCES

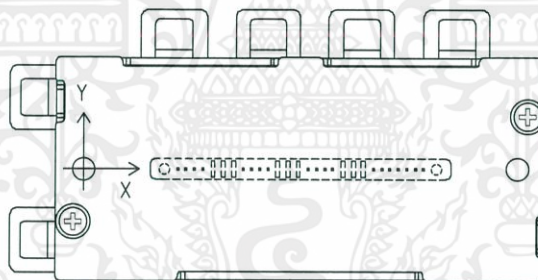
Symbol	Parameter	Condition	Limits			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Rth(j-c)Q	Junction to case Thermal Resistances	Inverter IGBT part (per 1 element) (Note-1)	—	—	0.27	°C/W
Rth(j-c)F		Inverter FWDi part (per 1 element) (Note-1)	—	—	0.47	
Rth(j-c)Q		Brake IGBT part (Note-1)	—	—	0.39	
Rth(j-c)F		Brake FWDi upper part (Note-1)	—	—	0.67	
Rth(c-f)	Contact Thermal Resistance	Case to fin, (per 1 module) Thermal grease applied (Note-1)	—	—	0.038	

* If you use this value, Rth(f-a) should be measured just under the chips.

(Note-1) T_c (under the chip) measurement point is below.

(unit : mm)

axis	arm	UP		VP		WP		UN		VN		WN		BR	
		IGBT	FWDi	IGBT	FWDi	IGBT	FWDi	IGBT	FWDi	IGBT	FWDi	IGBT	FWDi	IGBT	Di
X		28.6	28.6	65.4	65.4	87.4	87.4	38.6	38.6	54.6	54.6	76.6	76.6	18.0	19.3
Y		-8.4	0.2	-8.4	0.2	-8.4	0.2	6.8	-1.8	6.8	-1.8	6.8	-1.8	-8.9	5.0



Bottom view

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_j = 25°C, unless otherwise noted)

INVERTER PART

Symbol	Parameter	Condition	Limits			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
VCE(sat)	Collector-Emitter Saturation Voltage	V _D = 15V, I _C = 50A V _{CIN} = 0V, Pulsed (Fig. 1)	—	1.65	2.15	V
		T _j = 25°C T _j = 125°C	—	1.85	2.35	
VEC	FWDi Forward Voltage	-I _C = 50A, V _D = 15V, V _{CIN} = 15V (Fig. 2)	—	2.3	3.3	V
t _{on}	Switching Time	V _D = 15V, V _{CIN} = 0V ↔ 15V V _{CC} = 600V, I _C = 50A T _j = 125°C Inductive Load (Fig. 3,4)	0.3	0.8	2.0	μs
t _{rr}			—	0.3	0.8	
t _{c(on)}			—	0.4	1.0	
t _{off}			—	1.2	2.8	
t _{c(off)}			—	0.4	1.2	
ICES	Collector-Emitter Cutoff Current	V _{CE} = V _{CES} , V _D = 15V (Fig. 5)	—	—	1	mA
		T _j = 25°C T _j = 125°C	—	—	10	

PM50RL1A120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

BRAKE PART

Symbol	Parameter	Condition	Limits			Unit	
			Min.	Typ.	Max.		
VCE(sat)	Collector-Emitter Saturation Voltage	V _D = 15V, I _C = 25A V _{CIN} = 0V, Pulsed (Fig. 1)	T _J = 25°C	—	1.65	2.15	V
			T _J = 125°C	—	1.85	2.35	
VEC	FWDi Forward Voltage	-I _C = 25A, V _{CIN} = 15V, V _D = 15V (Fig. 2)	—	2.3	3.3	V	
ICES	Collector-Emitter Cutoff Current	VCE = VCES, V _D = 15V (Fig. 5)	T _J = 25°C	—	—	1	mA
			T _J = 125°C	—	—	10	

CONTROL PART

Symbol	Parameter	Condition	Limits			Unit	
			Min.	Typ.	Max.		
I _D	Circuit Current	V _D = 15V, V _{CIN} = 15V	V _{N1} -V _{N2}	—	8	16	mA
			V*P1-V*PC	—	2	4	
V _{th(ON)}	Input ON Threshold Voltage	Applied between : UP-VUPC, VP-VVPC, WP-VWPC UN • VN • WN • Br-VNC	—	1.2	1.5	1.8	V
V _{th(OFF)}	Input OFF Threshold Voltage		—	1.7	2.0	2.3	
SC	Short Circuit Trip Level	-20 ≤ T _J ≤ 125°C, V _D = 15V (Fig. 3,6)	Inverter part	100	—	—	A
			Brake part	50	—	—	
t _{off(SC)}	Short Circuit Current Delay Time	V _D = 15V (Fig. 3,6)	—	0.2	—	μs	
OT	Over Temperature Protection	Detect Temperature of IGBT chip	Trip level	135	—	—	°C
			Hysteresis	—	20	—	
UV	Supply Circuit Under-Voltage Protection	-20 ≤ T _J ≤ 125°C	Trip level	11.5	12.0	12.5	V
UV _r	Reset level		—	12.5	—		
I _{FO(H)}	Fault Output Current	V _D = 15V, V _{CIN} = 15V (Note-2)	—	—	0.01	mA	
I _{FO(L)}			—	10	15		
t _{FO}	Minimum Fault Output Pulse Width	V _D = 15V (Note-2)	1.0	1.8	—	ms	

(Note-2) Fault output is given only when the internal SC, OT & UV protections schemes of either upper or lower arm device operate to protect it.

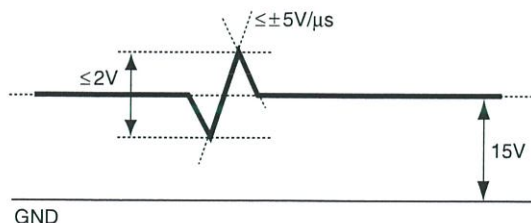
MECHANICAL RATINGS AND CHARACTERISTICS

Symbol	Parameter	Condition	Limits			Unit	
			Min.	Typ.	Max.		
—	Mounting torque	Mounting part	screw : M5	2.5	3.0	3.5	N • m
		Main terminal part		2.5	3.0	3.5	
—	Weight	—	—	380	—	g	

RECOMMENDED CONDITIONS FOR USE

Symbol	Parameter	Condition	Recommended value	Unit
V _{CC}	Supply Voltage	Applied across P-N terminals	≤ 800	V
V _D	Control Supply Voltage	Applied between : VUP1-VUPC, VVP1-VVPC VWP1-VWPC, VN1-VNC (Note-3)	15.0 ± 1.5	V
V _{CIN(ON)}	Input ON Voltage	Applied between : UP-VUPC, VP-VVPC, WP-VWPC UN • VN • WN • Br-VNC	≤ 0.8	V
V _{CIN(OFF)}	Input OFF Voltage		≥ 9.0	
f _{PWM}	PWM Input Frequency	Using Application Circuit of Fig. 8	≤ 20	kHz
t _{dead}	Arm Shoot-through Blocking Time	For IPM's each input signals (Fig. 7)	≥ 2.5	μs

(Note-3) With ripple satisfying the following conditions: dv/dt swing ≤ ±5V/μs, Variation ≤ 2V peak to peak



PM50RL1A120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

PRECAUTIONS FOR TESTING

1. Before applying any control supply voltage (V_{cIN}), the input terminals should be pulled up by resistors, etc. to their corresponding supply voltage and each input signal should be kept off state.
After this, the specified ON and OFF level setting for each input signal should be done.
2. When performing "SC" tests, the turn-off surge voltage spike at the corresponding protection operation should not be allowed to rise above V_{CEs} rating of the device.
(These test should not be done by using a curve tracer or its equivalent.)

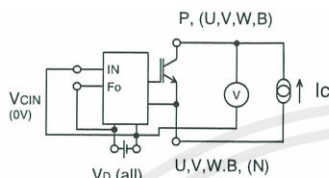


Fig. 1 $V_{CE(sat)}$ Test

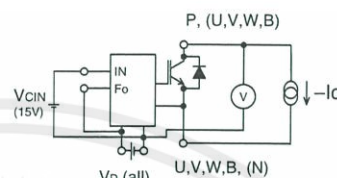


Fig. 2 V_{CE} , (VFM) Test

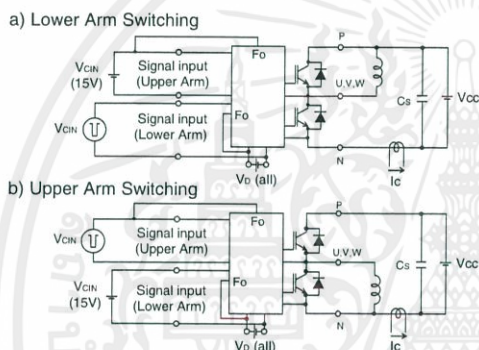


Fig. 3 Switching Time and SC Test Circuit

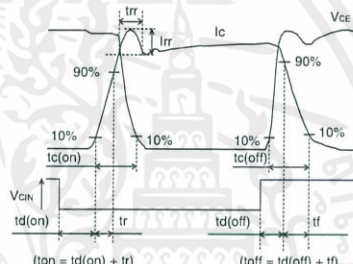


Fig. 4 Switching Time Test Waveform

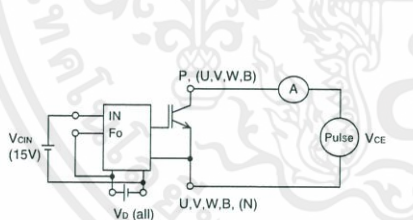


Fig. 5 I_{CES} Test

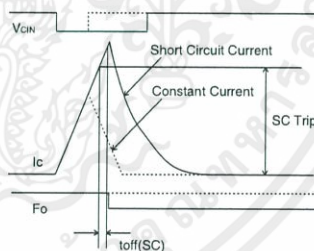
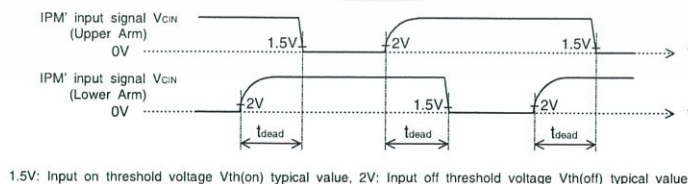


Fig. 6 SC Test Waveform



1.5V: Input on threshold voltage $V_{th(on)}$ typical value, 2V: Input off threshold voltage $V_{th(off)}$ typical value

Fig. 7 Dead time measurement point example

PM50RL1A120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

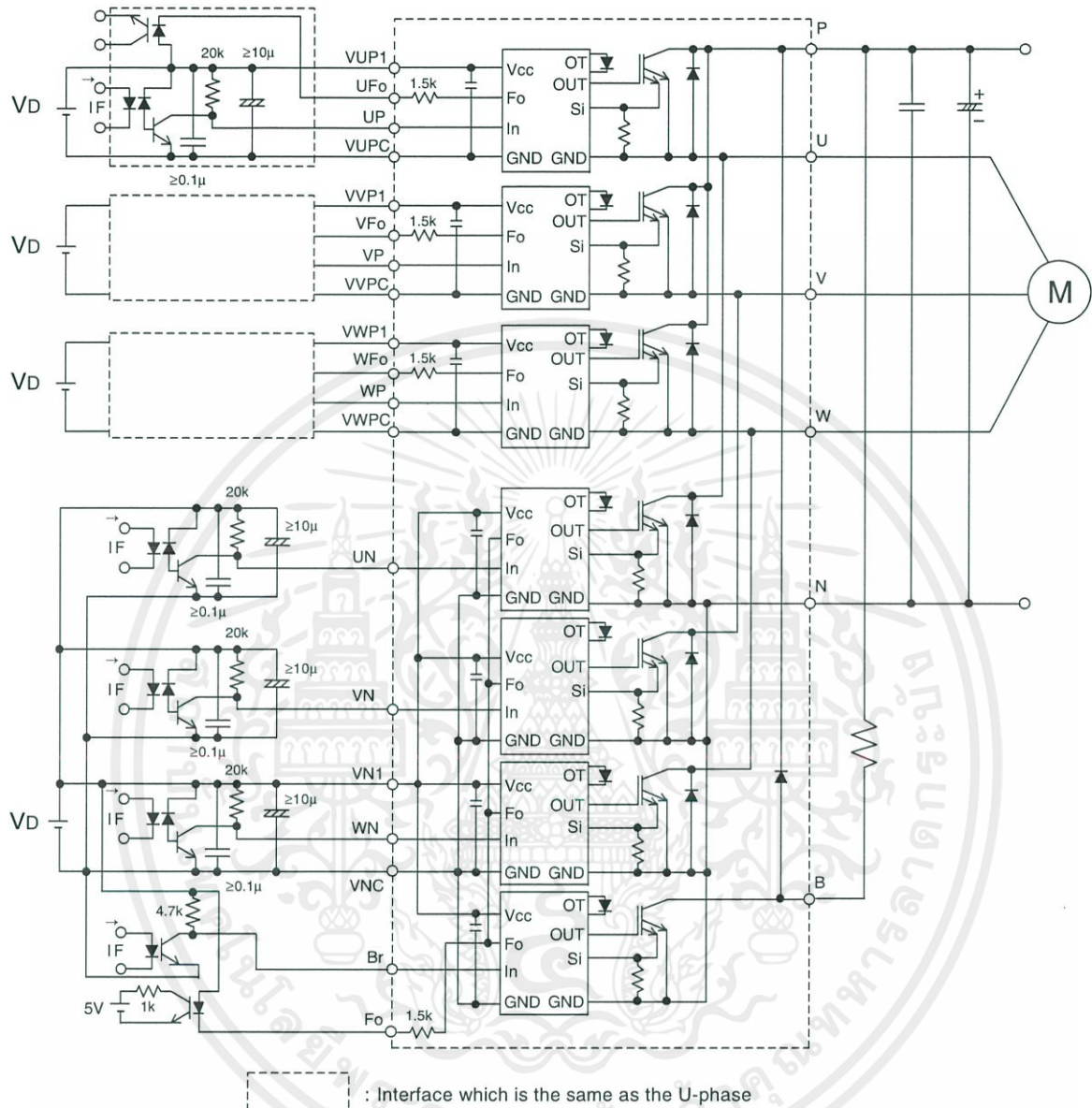


Fig. 8 Application Example Circuit

NOTES FOR STABLE AND SAFE OPERATION ;

- Design the PCB pattern to minimize wiring length between opto-coupler and IPM's input terminal, and also to minimize the stray capacity between the input and output wirings of opto-coupler.
- Connect low impedance capacitor between the Vcc and GND terminal of each fast switching opto-coupler.
- Fast switching opto-couplers: $t_{PLH}, t_{PHL} \leq 0.8\mu s$, Use High CMR type.
- Slow switching opto-coupler: CTR > 100%
- Use 4 isolated control power supplies (Vd). Also, care should be taken to minimize the instantaneous voltage charge of the power supply.
- Make inductance of DC bus line as small as possible, and minimize surge voltage using snubber capacitor between P and N terminal.
- Use line noise filter capacitor (ex. 4.7nF) between each input AC line and ground to reject common-mode noise from AC line and improve noise immunity of the system.

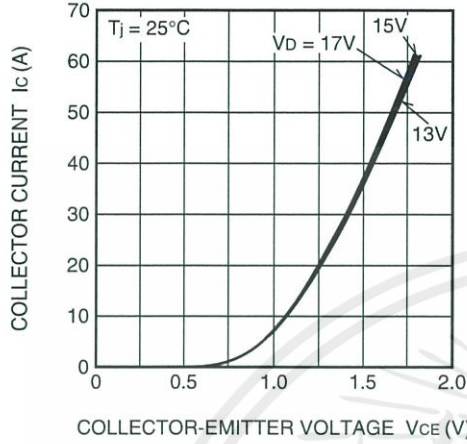
PM50RL1A120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

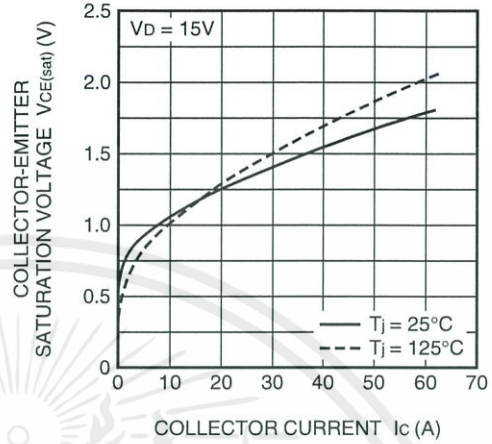
PERFORMANCE CURVES

(Inverter Part)

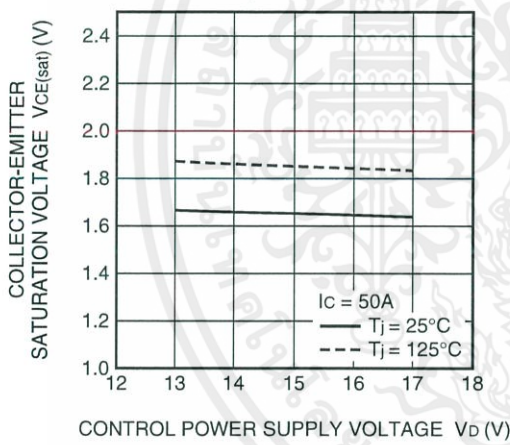
OUTPUT CHARACTERISTICS
(TYPICAL)



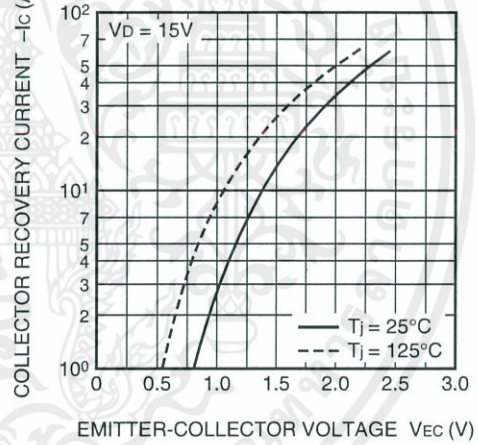
COLLECTOR-EMITTER SATURATION VOLTAGE (VS. I_c) CHARACTERISTICS
(TYPICAL)



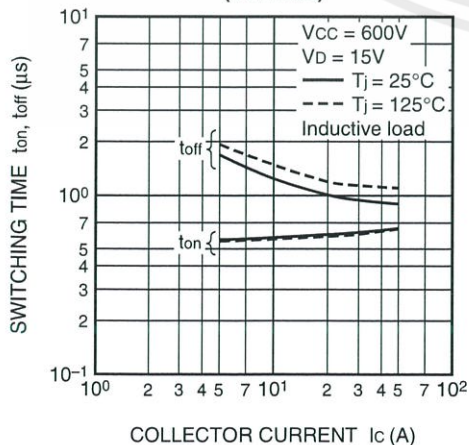
COLLECTOR-EMITTER SATURATION VOLTAGE (VS. V_d) CHARACTERISTICS
(TYPICAL)



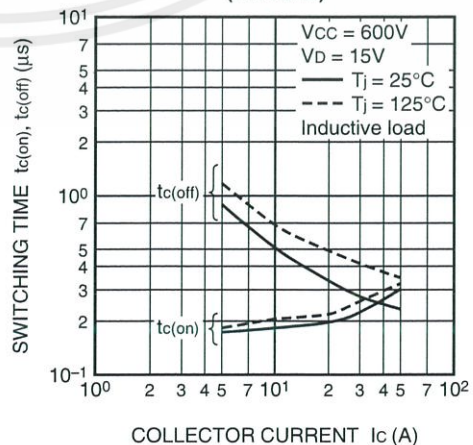
DIODE FORWARD CHARACTERISTICS
(TYPICAL)



SWITCHING TIME (t_{on} , t_{off}) CHARACTERISTICS
(TYPICAL)



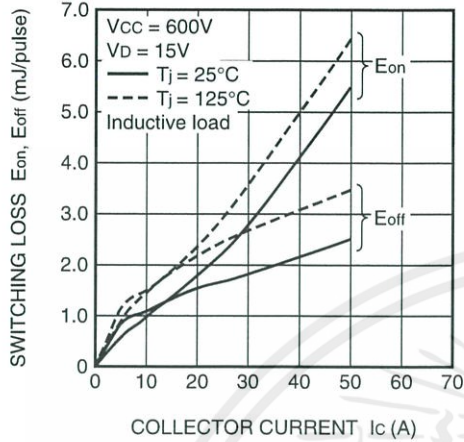
SWITCHING TIME ($t_{c(on)}$, $t_{c(off)}$) CHARACTERISTICS
(TYPICAL)



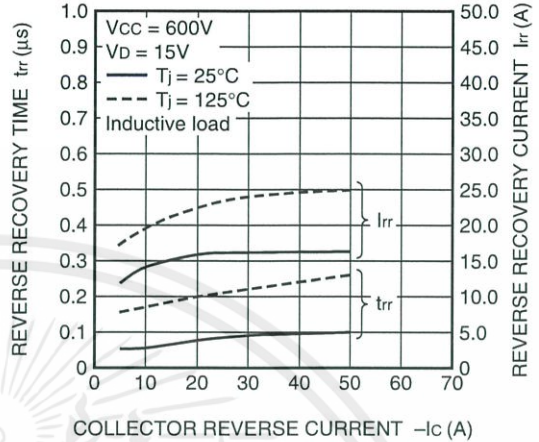
PM50RL1A120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

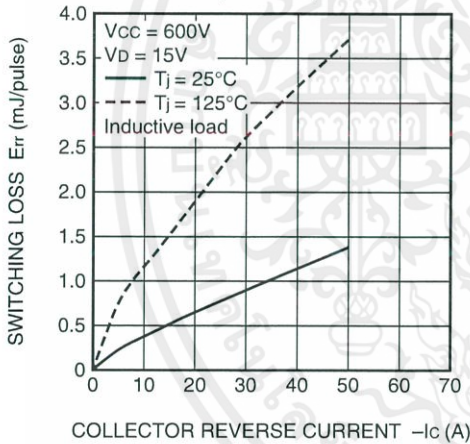
SWITCHING LOSS CHARACTERISTICS (TYPICAL)



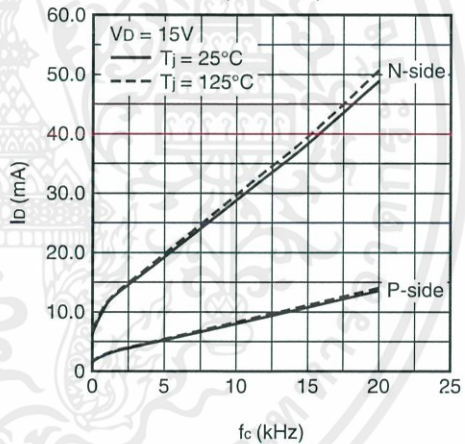
DIODE REVERSE RECOVERY CHARACTERISTICS (TYPICAL)



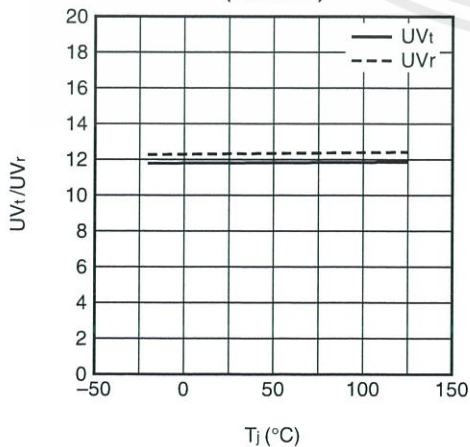
SWITCHING RECOVERY LOSS CHARACTERISTICS (TYPICAL)



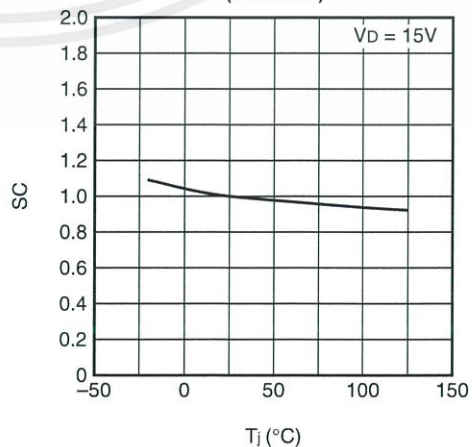
I_D VS. f_c CHARACTERISTICS (TYPICAL)



UV TRIP LEVEL VS. T_j CHARACTERISTICS (TYPICAL)



SC TRIP LEVEL VS. T_j CHARACTERISTICS (TYPICAL)

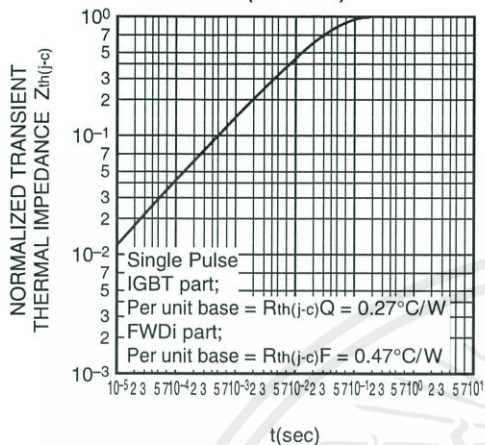


PM50RL1A120

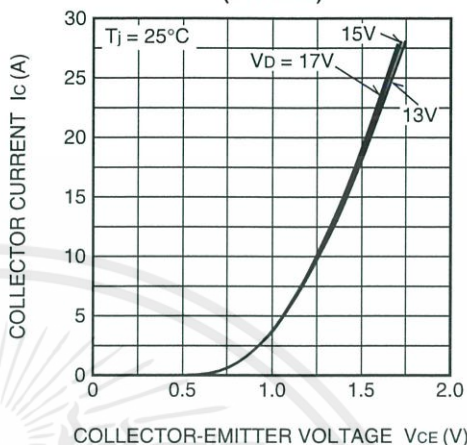
FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

(Brake Part)

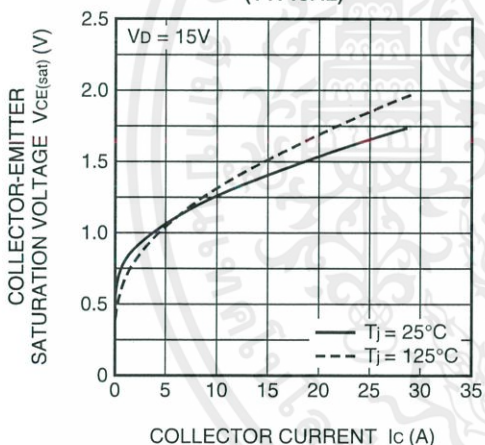
TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE CHARACTERISTICS (TYPICAL)



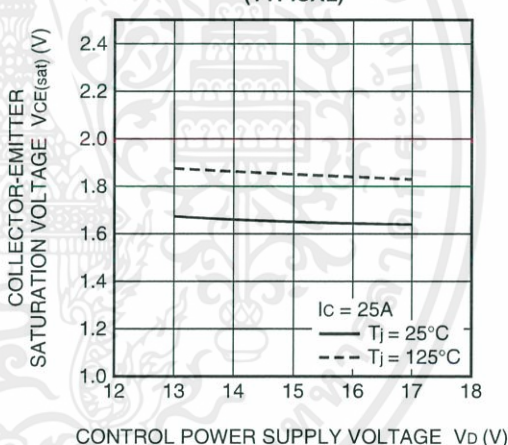
OUTPUT CHARACTERISTICS (TYPICAL)



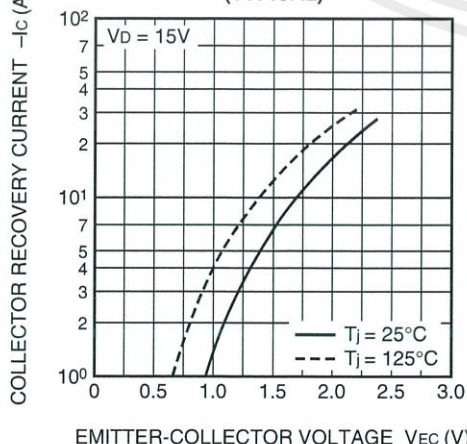
COLLECTOR-EMITTER SATURATION VOLTAGE (VS. I_c) CHARACTERISTICS (TYPICAL)



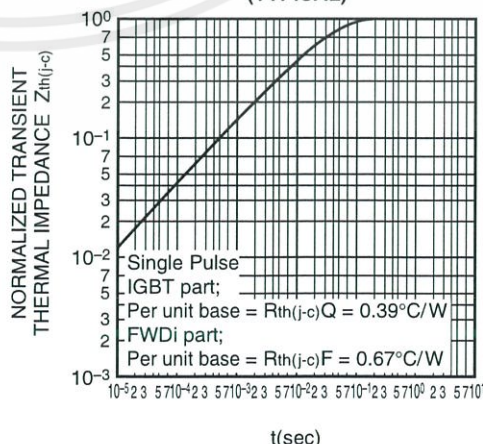
COLLECTOR-EMITTER SATURATION VOLTAGE (VS. V_D) CHARACTERISTICS (TYPICAL)



DIODE FORWARD CHARACTERISTICS (TYPICAL)



TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE CHARACTERISTICS (TYPICAL)





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TMS320F2833x, TMS320F2823x Digital Signal Controllers (DSCs)

1 Device Overview

1.1 Features

- High-Performance Static CMOS Technology
 - Up to 150 MHz (6.67-ns Cycle Time)
 - 1.9-V/1.8-V Core, 3.3-V I/O Design
- High-Performance 32-Bit CPU (TMS320C28x)
 - IEEE 754 Single-Precision Floating-Point Unit (FPU) (F2833x Only)
 - 16 × 16 and 32 × 32 MAC Operations
 - 16 × 16 Dual MAC
 - Harvard Bus Architecture
 - Fast Interrupt Response and Processing
 - Unified Memory Programming Model
 - Code-Efficient (in C/C++ and Assembly)
- Six-Channel DMA Controller (for ADC, McBSP, ePWM, XINTF, and SARAM)
- 16-Bit or 32-Bit External Interface (XINTF)
 - More Than 2M × 16 Address Reach
- On-Chip Memory
 - F28335, F28333, F28235: 256K × 16 Flash, 34K × 16 SARAM
 - F28334, F28234: 128K × 16 Flash, 34K × 16 SARAM
 - F28332, F28232: 64K × 16 Flash, 26K × 16 SARAM
 - 1K × 16 OTP ROM
- Boot ROM (8K × 16)
 - With Software Boot Modes (Through SCI, SPI, CAN, I2C, McBSP, XINTF, and Parallel I/O)
 - Standard Math Tables
- Clock and System Control
 - On-Chip Oscillator
 - Watchdog Timer Module
- GPIO0 to GPIO63 Pins Can Be Connected to One of the Eight External Core Interrupts
- Peripheral Interrupt Expansion (PIE) Block That Supports All 58 Peripheral Interrupts
- 128-Bit Security Key/Lock
 - Protects Flash/OTP/RAM Blocks
 - Prevents Firmware Reverse Engineering
- Enhanced Control Peripherals
 - Up to 18 PWM Outputs
 - Up to 6 HRPWM Outputs With 150 ps MEP Resolution
 - Up to 6 Event Capture Inputs
 - Up to 2 Quadrature Encoder Interfaces
 - Up to 8 32-Bit Timers (6 for eCAPs and 2 for eQEPs)
 - Up to 9 16-Bit Timers (6 for ePWMs and 3 XINTCTRs)
- Three 32-Bit CPU Timers
- Serial Port Peripherals
 - Up to 2 CAN Modules
 - Up to 3 SCI (UART) Modules
 - Up to 2 McBSP Modules (Configurable as SPI)
 - One SPI Module
 - One Inter-Integrated Circuit (I2C) Bus
- 12-Bit ADC, 16 Channels
 - 80-ns Conversion Rate
 - 2 × 8 Channel Input Multiplexer
 - Two Sample-and-Hold
 - Single/Simultaneous Conversions
 - Internal or External Reference
- Up to 88 Individually Programmable, Multiplexed GPIO Pins With Input Filtering
- JTAG Boundary Scan Support
 - IEEE Standard 1149.1-1990 Standard Test Access Port and Boundary Scan Architecture
- Advanced Emulation Features
 - Analysis and Breakpoint Functions
 - Real-Time Debug Using Hardware
- Development Support Includes
 - ANSI C/C++ Compiler/Assembler/Linker
 - Code Composer Studio™ IDE
 - DSP/BIOS™ and SYS/BIOS
 - Digital Motor Control and Digital Power Software Libraries

- Low-Power Modes and Power Savings
 - IDLE, STANDBY, HALT Modes Supported
 - Disable Individual Peripheral Clocks
- Endianness: Little Endian
- Package Options:
 - Lead-free, Green Packaging
 - Plastic Ball Grid Array (BGA) (ZJZ)
 - MicroStar BGA™ (ZHH)
 - Low-Profile Quad Flatpack (LQFP) (PGF)
 - Thermally Enhanced Low-Profile Quad Flatpack (HLQFP) (PTP)
- Temperature Options:
 - A: –40°C to 85°C (PGF, ZHH, ZJZ)
 - S: –40°C to 125°C (PTP, ZJZ)
 - Q: –40°C to 125°C (PTP, ZJZ)
(AEC Q100 Qualification for Automotive Applications)

1.2 Applications

- Industrial AC Inverter Drives
- Industrial Servo Amplifiers and Controllers
- Computer Numerical Control (CNC) Machining
- Uninterruptible and Server Power Supplies
- Telecom Equipment Power
- Solar Inverters



5 Specifications

This section provides the absolute maximum ratings and the recommended operating conditions.

5.1 Absolute Maximum Ratings⁽¹⁾⁽²⁾

Unless otherwise noted, the list of absolute maximum ratings are specified over operating temperature ranges.

		MIN	MAX	UNIT
Supply voltage	V_{DDIO} , V_{DD3VFL} with respect to V_{SS}	-0.3	4.6	V
	V_{DDA2} , V_{DDAIO} with respect to V_{SSA}	-0.3	4.6	
	V_{DD} with respect to V_{SS}	-0.3	2.5	
	V_{DD1A18} , V_{DD2A18} with respect to V_{SSA}	-0.3	2.5	
	V_{SSA2} , V_{SSAIO} , $V_{SS1AGND}$, $V_{SS2AGND}$ with respect to V_{SS}	-0.3	0.3	
Input voltage	V_{IN}	-0.3	4.6	V
Output voltage	V_O	-0.3	4.6	V
Input clamp current	I_{IK} ($V_{IN} < 0$ or $V_{IN} > V_{DDIO}$) ⁽³⁾	-20	20	mA
Output clamp current	I_{OK} ($V_O < 0$ or $V_O > V_{DDIO}$)	-20	20	mA
Operating ambient temperature, T_A	A version ⁽⁴⁾	-40	85	°C
	S version	-40	125	
	Q version	-40	125	
Junction temperature	T_J ⁽⁴⁾	-40	150	°C
Storage temperature	T_{stg} ⁽⁴⁾	-65	150	°C

- (1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Section 5.4* is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) All voltage values are with respect to V_{SS} , unless otherwise noted.
- (3) Continuous clamp current per pin is ± 2 mA. This includes the analog inputs which have an internal clamping circuit that clamps the voltage to a diode drop above V_{DDA2} or below V_{SSA2} .
- (4) One or both of the following conditions may result in a reduction of overall device life:
- long-term high-temperature storage
 - extended use at maximum temperature
- For additional information, see *Semiconductor and IC Package Thermal Metrics*.

5.4 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	NOM	MAX	UNIT
Device supply voltage, I/O, V_{DDIO}		3.135	3.3	3.465	V
Device supply voltage CPU, V_{DD}	Device operation @ 150 MHz	1.805	1.9	1.995	V
	Device operation @ 100 MHz	1.71	1.8	1.89	
Supply ground, V_{SS} , V_{SSIO} , V_{SSAIO} , V_{SSA2} , $V_{SS1AGND}$, $V_{SS2AGND}$			0		V
ADC supply voltage (3.3 V), V_{DDA2} , V_{DDAIO}		3.135	3.3	3.465	V
ADC supply voltage, V_{DD1A18} , V_{DD2A18}	Device operation @ 150 MHz	1.805	1.9	1.995	V
	Device operation @ 100 MHz	1.71	1.8	1.89	
Flash supply voltage, V_{DD3VFL}		3.135	3.3	3.465	V
Device clock frequency (system clock), $f_{SYSCLKOUT}$	F28335/F28334/F28235/F28234		2	150	MHz
	F28333/F28332/F28232		2	100	
High-level input voltage, V_{IH}	All inputs except X1		2	V_{DDIO}	V
	X1	$0.7 * V_{DD} - 0.05$		V_{DD}	
Low-level input voltage, V_{IL}	All inputs except X1			0.8	V
	X1			$0.3 * V_{DD} + 0.05$	
High-level output source current, $V_{OH} = 2.4$ V, I_{OH}	All I/Os except Group 2			-4	mA
	Group 2 ⁽¹⁾			-8	
Low-level output sink current, $V_{OL} = V_{OL MAX}$, I_{OL}	All I/Os except Group 2			4	mA
	Group 2 ⁽¹⁾			8	
Ambient temperature, T_A	A version	-40		85	°C
	S version	-40		125	
	Q version	-40		125	
Junction temperature, T_J				125	°C

(1) Group 2 pins are as follows: GPIO28, GPIO29, GPIO30, GPIO31, TDO, XCLKOUT, EMU0, EMU1, XINTF pins, GPIO35-87, XRD.

ประวัติผู้เขียน



นางสาวศิริลักษณ์ โคตรอินทร์
วัน/เดือน/ปีเกิด 11 ตุลาคม 2539
ที่อยู่: 641/268 หมู่1 ถนนทองประเสริฐ ตำบลในเมือง
อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น 40110
Email: Snook_n@hotmail.com



นางสาวศุภรดา จรัสแสนประเสริฐ
วัน/เดือน/ปีเกิด 18 พฤษภาคม 2540
ที่อยู่: 42/10 หมู่2 ถนนโพธิ์ชัย ตำบลบ้านไผ่ อำเภอบ้านไผ่
จังหวัดขอนแก่น 40110
Email: Suparada_JP@hotmail.com



นายอภิวัฒน์ เมืองสุวรรณ
วัน/เดือน/ปีเกิด 19 ตุลาคม 2539
ที่อยู่: 264/93 ซอยสมเด็จพระปิ่นเกล้า 2 ถนนสมเด็จพระปิ่น-
เกล้า แขวงบางยี่ขัน เขตบางพลัด กรุงเทพฯ 10700
Email: Apiwat.Muangsuwan@gmail.com