

เทคนิคการมอดูเลตสำหรับรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุ
ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาพิเตอร์

A PULSE-WIDTH MODULATION TECHNIQUE FOR ENERGY BALANCING
OF CAPACITORS IN A FLYING-CAPACITOR MULTILEVEL INVERTER



๕๕๗
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาวิจัยทางวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

-KMUTT-2010-EN-M-020-021

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคการมอดดูเลตสำหรับรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุ
ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

A PULSE-WIDTH MODULATION TECHNIQUE FOR ENERGY BALANCING
OF CAPACITORS IN A FLYING - CAPACITOR MULTILEVEL INVERTER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL 2010-EN-M-020-021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A PULSE-WIDTH MODULATION TECHNIQUE FOR ENERGY BALANCING
OF CAPACITORS IN A FLYING - CAPACITOR MULTILEVEL INVERTER**



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

2010

KMITL 2010-EN-M-020-021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการมอดูเลตสำหรับรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุในอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

Thesis Title A Pulse-Width Modulation Technique for Energy Balancing of Capacitors in a Flying -
Capacitor Multilevel Inverter

นักศึกษานายไพบุลย์ แก้ววรสูตร

รหัสประจำตัว 50060227

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สมภพ ผลไม้

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-020-021

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิจิตร	กฤษเรศ	
ผศ.ดร.สุรินทร์	คำผอย	
ผศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
ดร.สุเมธ	เนติศักดิ์านนท์	
ดร.สมภพ	ผลไม้	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2553 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจก.
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
วันที่ 29 เดือน มี.ค. พ.ศ. 2553
ลงชื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลับสงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการมอดูเลตสำหรับรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์
นักศึกษา	นายไพฑูย์ แก้ววรสูตร
รหัสนักศึกษา	50060227
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สมภพ ผลไม้

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการมอดูเลตสำหรับรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ในเทคนิคนี้สัญญาณแคเรียร์ถูกพัฒนามาจากเทคนิคการมอดูเลตแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (IPDPWM) และถูกนำมาจัดเรียงใหม่ตามวิธีการของเทคนิคการมอดูเลตแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM) สัญญาณแคเรียร์ที่ได้ จึงรวมข้อดีของเทคนิคการมอดูเลตทั้งสองไว้ คือให้แรงดันด้านขาออกที่มีความเพี้ยนต่ำ และสามารถรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุไว้ได้ เรียกเทคนิคการมอดูเลตนี้ว่าการมอดูเลตแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) เทคนิคการมอดูเลตนี้ถูกศึกษาจากการจำลองในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ จากผลการจำลองแสดงถึงข้อจำกัดต่างๆของเทคนิคการมอดูเลตนี้ซึ่งได้แก่ความยุ่งยากในการสร้างวงจรจริง และการที่ไม่สามารถรักษาระดับพลังงานของตัวเก็บประจุไว้ได้ในกรณีที่ตัวประกอบกำลังของโหลดไม่เท่ากับหนึ่ง ข้อจำกัดแรกนั้นสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ FPGA ส่วนข้อจำกัดหลังนั้นสามารถแก้ไขได้โดยใช้การหมุนวนสัญญาณเกต อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์เครื่องต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบ และการมอดูเลตแบบ CRPWM นี้ถูกโปรแกรมใน FPGA ซึ่งถูกควบคุมโดยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล ผลการทดสอบมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการจำลองและเป็นการยืนยันความสามารถของเทคนิคที่นำเสนอ

Thesis Title	A Pulse-Width Modulation Technique For Energy Balancing of Capacitors in a Flying - Capacitor Multilevel Inverter
Student	Mr. Paiboon Keawworasut
Student ID.	50060227
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Dr. Sompob Polmai

ABSTRACT

This thesis presents a pulse-width modulation technique for energy balancing of capacitors in a flying-capacitor multilevel inverter. In this technique, the carriers of pulse-width modulation are derived from the in-phase phase-disposition pulse-width modulation (IPDPWM) technique and re-arranged in the phase-shift pulse-width modulation (PSPWM) fashion. The resulting carriers combine the advantages of the two techniques: low output voltage distortion and good energy balance between the flying capacitors. This technique is called carrier redistribution pulse-width modulation (CRPWM). The simulation results of a five-level flying-capacitor inverter with CRPWM technique reveal the effectiveness in energy balancing with some limitations. These limitations include the difficulty of implementation and inability to maintain energy balance under non-unity power factor load. The former limitation is solved by using FPGA, while the later limitation is resolved by gate-signal rotation. The CRPWM is implemented with a laboratory-scale prototype five-level flying-capacitor inverter by using a FPGA based digital signal controller. The experimental results show a good agreement with the simulation results which confirm the validity of the proposed technique.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ และการให้คำปรึกษาจาก ดร.สมภพ ผลไม้ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และผศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา ข้าพเจ้า รู้สึกซาบซึ้งในพระคุณ และความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่าน จึงขอกราบขอบพระคุณ เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า ตลอดการศึกษาในระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องทำวิจัย Power Applications and Energy Conversion Research Laboratory (Pearl lab) Room ECC407 ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสำนักบริหารวิชาการ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และกำลังใจจากครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ไพบุสย์ แก้วรสสุตร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
ตัวย่อที่ใช้ในการวิจัย.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	5
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	5
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
บทที่ 2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับและเทคนิคการมอดูเลตแบบไซน์.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	7
2.2.1 ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการวิจัย.....	10
2.2.2 โครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด ฟลายอิงคาปาซิเตอร์.....	10
2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์.....	15
2.3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	15
2.3.1 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์(PSPWM).....	16
2.3.2 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์(IPDPWM).....	17
2.3.3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่(CRPWM).....	19
2.4 คุณลักษณะของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่.....	23
3.1 บทนำ.....	23
3.2 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ.....	23
3.2.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ.....	23
3.2.2 เทคนิค CRPWM สำหรับการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์.....	25
3.2.3 วิธีปรับปรุงเทคนิคสำหรับการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์.....	29
3.3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ.....	29
3.3.1 การพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลคืนใน เทคนิค CRPWM แบบ 5 ระดับ.....	30
3.3.2 เทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกิดสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ.....	32
3.4 การสร้างเทคนิคCRPWMแบบ 5 ระดับด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (FPGA).....	33
3.4.1 เปรียบเทียบการใช้ Resource ของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มใน FPGA.....	36
บทที่ 4 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSCAD/EMTDC.....	39
4.1 บทนำ.....	39
4.2 การสร้างแบบจำลองของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ แบบ 3 เฟส.....	39
4.3 การจำลองและผลการจำลองความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันสาย (%THDv).....	43
4.4 การจำลองและผลการจำลองในส่วนของการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุ ฟลายอิงค์ในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์.....	46
4.5 สรุปผลการจำลอง.....	53
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	55
5.1 บทนำ.....	55
5.2 การทดลองและผลการทดลองความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันสาย(%THDv).....	57
5.3 การทดลองและผลการทดลองในส่วนของการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุ ฟลายอิงค์ในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

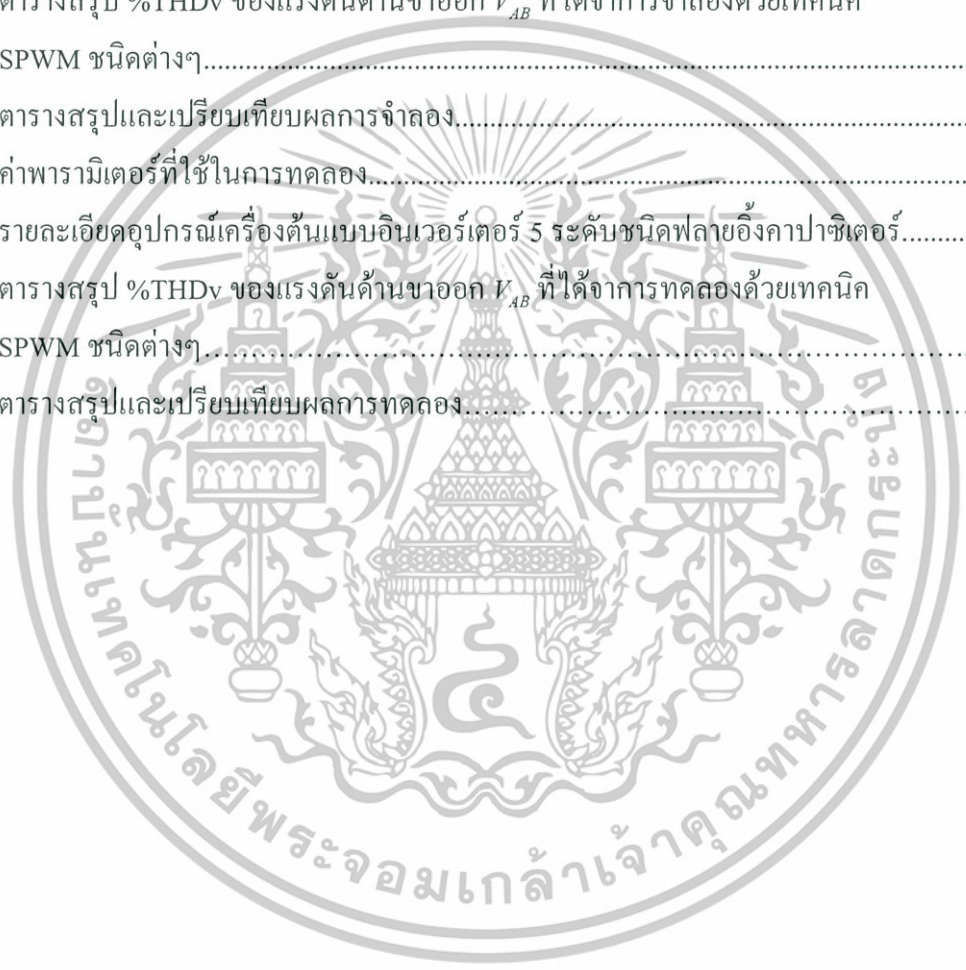
สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4 การเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Fundamental voltage และ modulation index ของเทคนิคพีดับบลิวเอ็ม 3 เทคนิค.....	72
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
6.2 อุปสรรคและข้อเสนอแนะ.....	77
6.2.1 อุปสรรค.....	77
6.2.2 แนวทางแก้ไข.....	77
6.2.3 แนวทางการศึกษาในอนาคต.....	77
บรรณานุกรม.....	79
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	100
ภาคผนวก ค.....	103
ภาคผนวก ง.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การทำงานของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (1 เฟส).....13
3.1	สถานะการสวิตช์สำหรับแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์.....24
4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....40
4.2	ตารางสรุป %THD _v ของแรงดันด้านขาออก V_{AB} ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค SPWM ชนิดต่างๆ.....45
4.3	ตารางสรุปและเปรียบเทียบผลการจำลอง.....53
5.1	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....56
5.2	รายละเอียดอุปกรณ์เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์.....56
5.3	ตารางสรุป %THD _v ของแรงดันด้านขาออก V_{AB} ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค SPWM ชนิดต่างๆ.....60
6.1	ตารางสรุปและเปรียบเทียบผลการทดลอง.....76



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	การทำงานพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ n ระดับ.....1
1.2	โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ประเภทอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ.....2
2.1	แผนภาพของอินเวอร์เตอร์ที่มีหลายระดับ.....7
2.2	โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ประเภทอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ.....8
2.3	วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบ 1 เฟส.....11
2.4	วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ แบบ 3 เฟส.....12
2.5	ตัวอย่างการสร้างระดับแรงดันด้านขาออกบางสถานะ.....14
2.6	รูปแบบการสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์.....15
2.7	ตัวอย่างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์.....16
2.8	ตัวอย่างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์.....18
2.9	ตัวอย่างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่.....19
2.10	สถานะตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ที่ระดับมอดดูเลตเดียวกัน.....20
2.11	การจำลองลักษณะแรงดันสายของเทคนิคพีดับบลิวเอ็ม.....22
3.1	วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ 1 เฟส.....23
3.2	ทิศทางกระแสไหลของกระแสของสภาวะการสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์.....24
3.3	ลักษณะสัญญาณแคเรียร์เทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ.....25
3.4	การเปรียบเทียบเทคนิคพีดับบลิวเอ็ม PSPWM กับ CRPWM.....25
3.5	ผลกระทบของระดับการมอดดูเลต.....26
3.6	สภาวะการใช้งานจริงของกระแสไหลในอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ.....28
3.7	เทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกต (Pulse rotation technique) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ.....29
3.8	ลักษณะสัญญาณแคเรียร์เทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ.....30
3.9	สภาวะการใช้งานจริงของกระแสไหลในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ.....31
3.10	เทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกต (Pulse rotation technique) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ.....32
3.11	การสร้างสัญญาณแคเรียร์สามเหลี่ยมของวงจรนับ(Counter)ทั้ง 4 ชุด.....33
3.12	การสร้างสัญญาณแคเรียร์เทคนิค CRPWM ของวงจรนับ(Counter)ทั้ง 4 ชุด.....35
3.13	บล็อกไดอะแกรมวงจรมอดดูเลตใน 1 เฟสด้วย FPGA ที่ใช้เทคนิค CRPWM.....35
3.14	โปรแกรมที่ใช้ในการเขียน FPGA โปรแกรม Quartus II 8.1 Web Edition.....36
3.15	การใช้ resource ของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มใน FPGA.....38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้ามอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์.....	40
4.2 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มของเทคนิค PSPWM และเทคนิค IPDPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส.....	41
4.3 แบบจำลองวงจรช่วยสร้างระดับแรงดันเริ่มต้นให้กับตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ ก่อนสร้างแรงดันทางด้านขาออก.....	41
4.4 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์และสัญญาณเลือกแคเรียร์ของเทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส.....	42
4.5 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณแคเรียร์ของเทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส.....	42
4.6 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มของเทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส.....	42
4.7 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 1$ ($m_f = 15$ $f_m = 50$ Hz $f_{cr} = 750$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz).....	44
4.8 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค IPDPWM ที่ $m_a = 1$ ($m_f = 60$ $f_m = 50$ Hz $f_{cr} = 3000$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz).....	44
4.9 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค CRPWM ที่ $m_a = 1$ ($m_f = 15$ $f_m = 50$ Hz $f_{cr} = 750$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz).....	44
4.10 กราฟรูป %THD _v ของแรงดันด้านขาออก V_{AB} ที่ได้จากการจำลองด้วย SPWM ชนิดต่างๆที่ค่า $0.1 \leq m_a \leq 1.0$ พิจารณาถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 100 th	45
4.11 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$	47
4.12 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$	47
4.13 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	48
4.14 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	49
4.16 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	49
4.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	50
4.18 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	50
4.19 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}) ,แรงดัน ไลน์เทียบกับจุดนิวทรอน(V_{An}) ,แรงดัน ไลน์เทียบกับดิซิ่งค์ด้านลบ(V_{Ao}) และกระแส ไลน์(IL) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$	51
4.20 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}) ,แรงดัน ไลน์เทียบกับจุดนิวทรอน(V_{An}) ,แรงดัน ไลน์เทียบกับดิซิ่งค์ด้านลบ(V_{Ao}) และกระแส ไลน์(IL) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค IPDPWM(with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	51
4.21 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}) ,แรงดัน ไลน์เทียบกับจุดนิวทรอน(V_{An}) ,แรงดัน ไลน์เทียบกับดิซิ่งค์ด้านลบ(V_{Ao}) และกระแส ไลน์(IL) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	52
4.22 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}) ,แรงดัน ไลน์เทียบกับจุดนิวทรอน(V_{An}) ,แรงดัน ไลน์เทียบกับดิซิ่งค์ด้านลบ(V_{Ao}) และกระแส ไลน์(IL) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	52
5.1 วงจรกำลังเครื่องต้นแบบ 3 เฟสของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงค์คาปาซิเตอร์.....	55
5.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานโดยรวม.....	56
5.3 วงจรกำลัง 1 เฟสที่ใช้ทดลองผลของสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์และเปอร์เซ็นต์ THDv ของแรงดันด้านออกระหว่างสาย V_{AB}	57
5.4 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 1.0$ ($m_f = 15$ $f_m = 50$ Hz $f_{cr} = 750$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz)	59
5.5 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค IPDPWM ที่ $m_a = 1.0$ ($m_f = 60$ $f_m = 50$ Hz $f_{cr} = 3000$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz)	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค CRPWM ที่ $m_a = 1.0$ ($m_f = 15$ $f_m = 50$ Hz $f_{cr} = 750$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz)	59
5.7 กราฟสรุป %THDv ของแรงดันด้านขาออก V_{AB} ที่ได้จากการทดลองด้วย SPWM ชนิดต่างๆที่ค่า $0.1 \leq m_a \leq 1.0$ พิจารณาถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 100^{th}	60
5.8 วงจรกำลัง 1 เฟสที่ใช้ทดลองในการรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ของ อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงค์คาปาซิเตอร์	61
5.9 วงจร 1 โมดูลของวงจรตรวจจับระดับแรงดัน (Voltage detector) ที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์	62
5.10 ผลของระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์แต่ละตัวของเฟส A ที่เกิดจากเทคนิคการ Start-up	62
5.11 สัญญาณเกตที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 1$	63
5.12 สัญญาณเกตที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ $m_a = 1$	63
5.13 สัญญาณเกตที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ $m_a = 1$	64
5.14 สัญญาณเกตที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ $m_a = 1$	64
5.15 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการ ทดลองด้วย เทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$	65
5.16 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการ ทดลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$	65
5.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการ ทดลองด้วยเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	66
5.18 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการ ทดลองด้วยเทคนิค IPDPWM (rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	66
5.19 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการ ทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	67
5.20 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการ ทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	67
5.21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการ ทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	68
5.22 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการ ทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวทวไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเพียงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.23 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก ที่ได้จากเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 1.0$	69
5.24 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก ที่ได้จากเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ $m_a = 1.0$	69
5.25 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก ที่ได้จากเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ $m_a = 1.0$	70
5.26 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก ที่ได้จากเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ $m_a = 1.0$	70
5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างFundamental voltage และ modulation index ของเทคนิค PSPWM.....	72
5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างFundamental voltage และ modulation index ของเทคนิค IPDPWM.....	73
5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างFundamental voltage และ modulation index ของเทคนิค CRPWM.....	73
6.1 รูปคลื่นพลังงานของเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$	75
6.2 รูปคลื่นพลังงานของเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	75
6.3 รูปคลื่นพลังงานของเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$	75

ตัวย่อที่ใช้ในการวิจัย

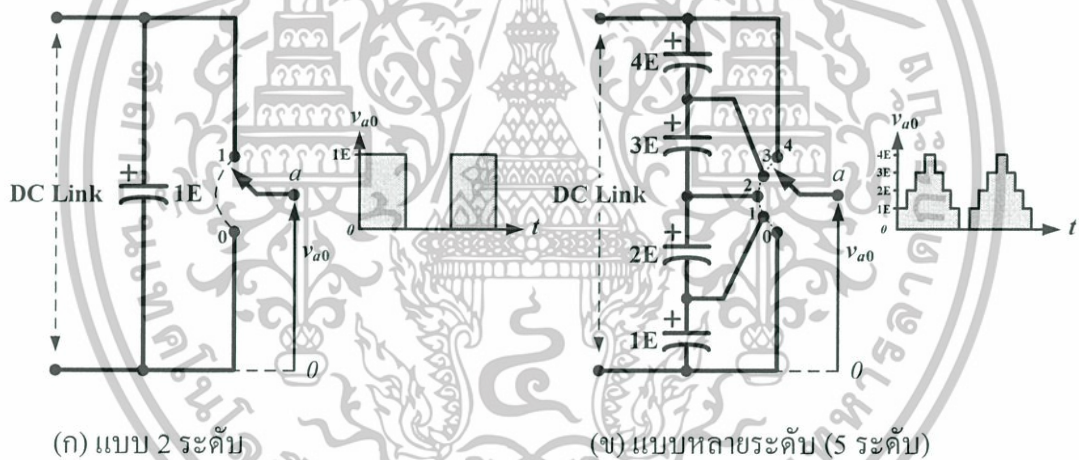
AC Drive	คือ	Alternating current drive
CMMLI	คือ	Cascade multi cell multilevel inverter
CRPWM	คือ	Carrier - redistribution PWM
DC-link	คือ	Direct Current – link
DCMLI	คือ	Diode clamped multilevel inverter
EMI	คือ	Electromagnetic interference
FCMLI	คือ	Flying capacitor multilevel inverter
FPGA	คือ	Field programmable gate array
IPDPWM	คือ	In-phase disposition PWM
PSPWM	คือ	Phase-shifted PWM
PWM	คือ	Pulse width modulation
SPWM	คือ	Sinusoidal pulse width modulation technique
SVC	คือ	Space vector control
THD _v	คือ	Total Harmonic Distortions voltage
VHDL	คือ	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ มีความต้องการอุปกรณ์ขับเคลื่อน (AC Drive) กำลังสูง ซึ่งต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง โดยมีระดับแรงดันที่สูงเป็นระดับ กิโลโวลต์ จึงเป็นการยากที่จะนำอุปกรณ์กึ่งตัวนำ (Power semiconductor) เพียงตัวเดียวมาต่อเข้า โดยตรงกับระบบ (2.3, 3.3 หรือ 6.9 kV) ฉะนั้นจึงได้นำวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel inverter) มาใช้แทนที่วงจรขับเคลื่อนแบบ 2 ระดับ (Two - level inverter) [1-2] และวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับยังมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน เช่น โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic), พลังงานลม (Wind Turbine) และ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) [5-6]



รูปที่ 1.1 การทำงานพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ n ระดับ

ในอินเวอร์เตอร์แบบ 2 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (ก) เมื่อนำมาใช้ที่ระดับแรงดันสูงทำให้ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ

1. ในด้านของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับจะให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเป็นสี่เหลี่ยม
2. เกิดการสูญเสียที่สวิทช์กำลังมาก (Switching loss)
3. แรงดันที่ถูกสร้างขึ้นมีความผิดเพี้ยนมาก และ $\frac{dv}{dt}$ สูง
4. กระแสด้านขาออกมีความผิดเพี้ยนมาก
5. ต้องนำสวิทช์กำลังมาอนุกรมกันเพื่อเพิ่มอัตราการทนแรงดันให้เพิ่มขึ้น ทำให้

เอกสารนี้เป็นการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากำลังสูงให้ทำงานพร้อมกันทำได้ยากที่ความถี่สูง เนื่องจากคุณสมบัติของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์สวิตช์กำลังในแต่ละตัวจะมีคุณสมบัติ (Turn on-off characteristic) ที่ต่างกันเล็กน้อยจากกระบวนการผลิตจากโรงงาน

ดังนั้นเมื่อนำอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (ข) มาใช้ที่ระดับแรงดันสูงทำให้มีข้อได้เปรียบ คือ

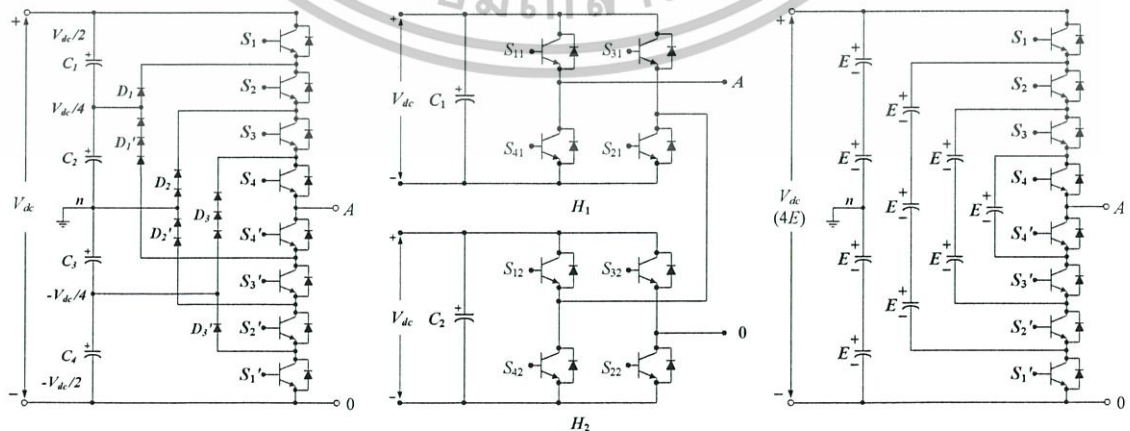
1. แรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์มีความใกล้เคียงไซน์
2. แรงดันที่ถูกสร้างขึ้นมีความผิดเพี้ยนน้อย และ $\frac{dv}{dt}$ ต่ำ
3. กระแสด้านขาออกมีความผิดเพี้ยนน้อย
4. สวิตช์กำลังแต่ละตัวทำงานที่สวิตช์ซึ่งความถี่ต่ำ

อย่างไรก็ตาม การใช้งานอินเวอร์เตอร์หลายระดับก็มีข้อจำกัดบางประการ คือ

1. มีแหล่งจ่าย หรือตัวเก็บประจุจำนวนมาก
 - ส่งผลให้ต้องจัดหาแหล่งกำเนิดแรงดันจำนวนมาก
 - การรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุทำได้ยาก
2. เนื่องจากมีสวิตช์กำลังจำนวนมากทำให้ต้องใช้สัญญาณเกตจำนวนมาก

รูปแบบพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ได้รับการวิจัยและศึกษากัน โดยทั่วไปมี 3 ชนิด คือ

- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (Diode-clamped multilevel inverter, DCMLI)
- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดมีลติเซลล์ (Cascaded multicell multilevel inverter, CMMLI)
- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor multilevel inverter, FCMLI)



(ก) ไดโอด-แคลมป์ (DCMLI) (ข) คาสเคดมีลติเซลล์ (CMMLI) (ค) ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (FCMLI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 1.2 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ประเภทอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.2 เป็นลักษณะการต่อใช้งานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับซึ่งการต่อวงจรแต่ละรูปแบบมีข้อจำกัดและข้อเด่น-ข้อด้อย ต่างกันไป อย่างเช่น อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอด-แคดมบี้ มีคอมมอนดีซีลิงค์ แต่ไม่สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์กำลังได้และการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุที่ซีซีลิงค์ทำได้ยาก ส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดมัลติ-เซลล์ สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์กำลังได้ แต่ไม่มีคอมมอนดีซีลิงค์และมีตัวเก็บประจุแยกอิสระในแต่ละเซลล์ จึงทำให้สิ้นเปลืองแหล่งจ่ายอิสระหลายแหล่งจ่าย ส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ สามารถเลือกรูปแบบสวิตช์กำลังได้และยังมีคอมมอนดีซีลิงค์ แต่ต้องใช้ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์เป็นจำนวนมากและยังต้องการการรักษาสถิตแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์อีกด้วย

จากข้อจำกัดด้านจำนวนของตัวเก็บประจุที่มีจำนวนมากและความกังวลเรื่องการรักษาสถิตแรงดันที่ตัวเก็บประจุ ทำให้อินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์แบบอื่นๆ [2] อย่างไรก็ตามหากสามารถแก้ปัญหาเรื่องการรักษาสถิตแรงดันของตัวเก็บประจุได้ โดยไม่ต้องมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้น อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ก็อาจจะได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในอนาคต

ในการศึกษาเทคนิคการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ที่ผ่านมา[3] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง 2 เทคนิคด้วยกันคือ เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (Phase-shifted Pulse Width Modulation, PSPWM) และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (Level-shifted Pulse Width Modulation, IPDPWM) ซึ่งผลของการศึกษาดังกล่าว ทำให้ได้ข้อสรุปว่า เทคนิค PSPWM มีความสามารถในการรักษาสถิตของพลังงานที่จ่ายเข้าและออก ที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ เนื่องจากการเลื่อนเฟสของสัญญาณแคเรียร์ทำให้สวิตช์กำลังแต่ละตัวทำงานด้วยวัฏจักรการทำงาน เท่าๆกัน ในขณะที่เทคนิค IPDPWM อาศัยการเลื่อนระดับของแคเรียร์ทำให้วัฏจักรการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวไม่เท่ากัน จึงไม่สามารถรักษาสถิตของพลังงานที่จ่ายเข้าและออกที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ไว้ได้ ในแง่คุณภาพของแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ พบว่าเทคนิคการมอดูเลตแบบ IPDPWM จะให้ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออก ต่ำกว่าเทคนิค PSPWM ในทุกย่านของการมอดูเลต โดยเฉพาะในย่านค่าดัชนีการมอดูเลตต่ำ พบว่าเทคนิค IPDPWM ให้ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกต่ำกว่าเทคนิค PSPWM อย่างมาก แต่ที่ย่านค่าดัชนีการมอดูเลตสูงกว่า 0.6 แล้ว เทคนิค PSPWM จะให้ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออก ต่ำลงใกล้เคียงกับเทคนิค IPDPWM มากขึ้น

ในความพยายามที่จะทำให้ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกและการรักษาสถิตพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์สามารถทำได้ทั้งคู่ จึงได้มีการนำเสนอเทคนิคการมอดูเลตที่นำเทคนิค PSPWM และ IPDPWM มาผสมกันเป็นเทคนิคการมอดูเลตแบบใหม่ เรียกว่า เทคนิคการมอดูเลตแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (Carrier Redistribution Pulse Width

Modulation, CRPWM)[4] โดยมีการแบ่งแคเรียร์ออกเป็นชุดๆ ตามดัชนีการมอดูเลตและตามจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ โดยในเวลาหนึ่งๆจะมีการเลือกใช้แคเรียร์จากชุดใดชุดหนึ่งเท่านั้น ตามค่าดัชนีการมอดูเลต นอกจากนี้ในแต่ละชุดของแคเรียร์จะมีการจัดเรียงสลับตำแหน่งกันทั้งภายในชุดแคเรียร์และระหว่างชุดแคเรียร์ เพื่อให้ได้แรงดันด้านขาออกมีรูปแบบเดียวกันกับเทคนิค IPD PWM ผลที่ได้จะทำให้วัฏจักรการทำงานของสวิทช์กำลังแต่ละตัวมีการทำงานเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน และการรักษาระดับพลังงานของตัวเก็บประจุทำได้ดีขึ้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำเทคนิค CRPWM มาศึกษาเพื่อนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยศึกษาในด้านสมรรถนะการรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ และความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกและเปรียบเทียบผลที่ได้กับเทคนิค PSPWM และเทคนิค IPD PWM นอกจากนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวมอดูเลตแบบ CRPWM โดยใช้อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA) และการนำไปใช้กับเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อการทดลองและยืนยันผล

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบเทคนิคการมอดูเลตแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่กับเทคนิคการมอดูเลตแบบเดิม ในด้านความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกและการรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

โดยในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) และนำมาใช้กับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคนี้กับเทคนิคเดิมที่ใช้คือเทคนิค PSPWM และ เทคนิค IPD PWM โดยการศึกษาจะออกแบบตัวสร้างสัญญาณขับเกตสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์โดยใช้อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA)

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ศึกษาวิธีการมอดูเลตแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่(CRPWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

1.4.2 ศึกษาเปรียบเทียบ ข้อดี-ข้อด้อย ของการมอดูเลตแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) กับเทคนิคเดิมดังนี้

- ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออก V_{AB} (THDv)
- การรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์์ในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

1.4.3 เพื่อออกแบบตัวมอดูเลตสัญญาณเพื่อสร้างสัญญาณเกิดตามวิธีการของเทคนิค CRPWM ด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงค์์คาปาซิเตอร์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ได้เทคนิคพีดับบลิวเอ็มที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงค์์คาปาซิเตอร์ โดยสามารถรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์์ได้ และยังให้ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกต่ำอีกด้วย

1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะของ 3 เทคนิคคือเทคนิคพีดับบลิวเอ็มการจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM), เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM) และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (IPDPWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงค์์คาปาซิเตอร์ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกที่ได้ และความสามารถในการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์์ โดยมีรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ได้แบ่งออกเป็น 6 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบต่างๆและเทคนิคพีดับบลิวเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

บทที่ 3 กล่าวถึงเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่และการสร้างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA)

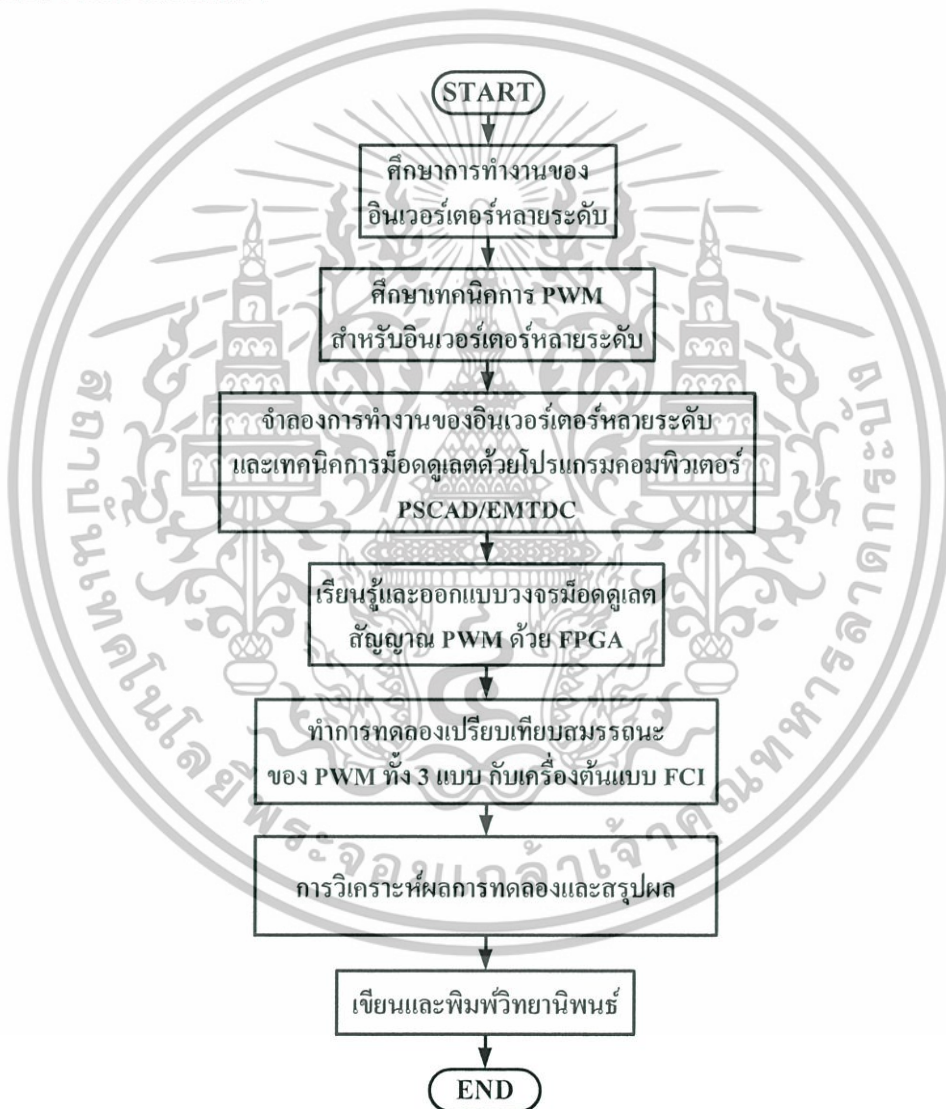
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSCAD/EMTDC

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองโดยมีหัวข้อพิจารณาคือ ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกที่ได้ และความสามารถในการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา



บทที่ 2

อินเวอร์เตอร์หลายระดับและเทคนิคการมอดูเลตแบบไซน์

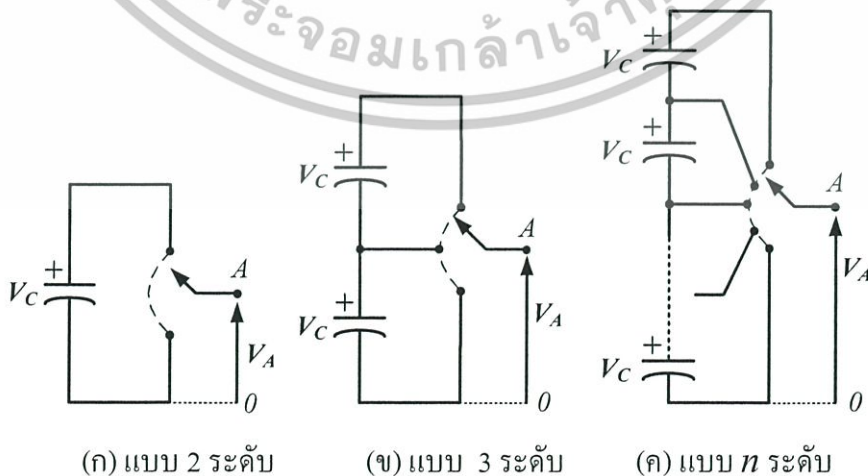
2.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีเบื้องต้นและหลักทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor multilevel inverter , FCMLI) เป็นต้น อีกทั้งวิทยานิพนธ์ในบทนี้ยังได้นำเสนอเทคนิคการมอดูเลตแบบไซน์ ที่ใช้ในการควบคุมสวิทช์กำลังสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ [1-3]

2.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ[1-3]

อินเวอร์เตอร์หลายระดับจะอาศัยการต่ออนุกรมกันของอุปกรณ์สวิทช์กำลัง เพื่อใช้ในการแบ่งแรงดันและเพิ่มจำนวนระดับของสัญญาณแรงดันระหว่างสายด้านขาออกเป็นขั้นบันได ทำให้มีลักษณะใกล้เคียงไซน์มากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ การอนุกรมกันของอุปกรณ์สวิทช์กำลังดังกล่าว ทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีความสามารถในการทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

การสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบพื้นฐาน โดยสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับต่อมาได้มีการเพิ่มจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่ได้มีระดับเป็นขั้นบันไดมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยลดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกได้ แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมสวิทช์กำลังก็ทำได้ยากขึ้นเช่นเดียวกันเนื่องจากสวิทช์กำลังที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีจำนวนมากขึ้นตามระดับของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.1 แผนภาพของอินเวอร์เตอร์ที่มีหลายระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

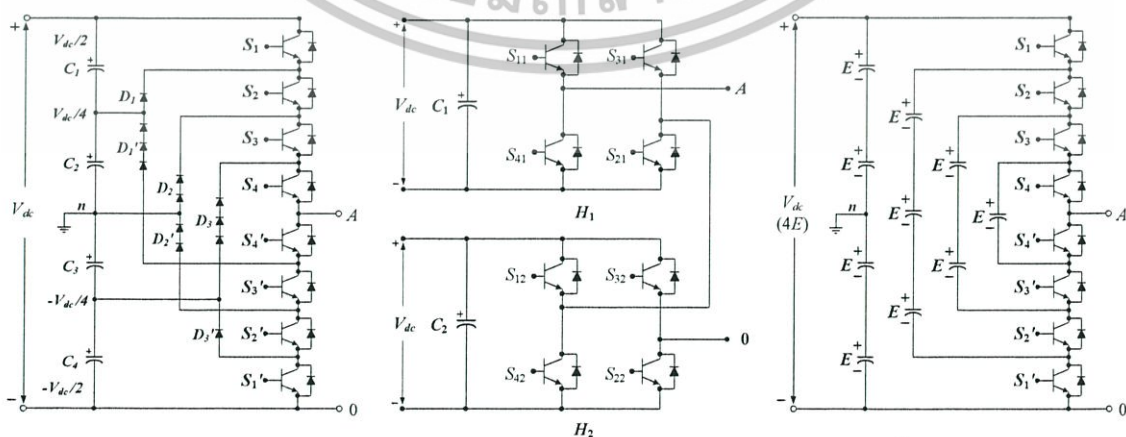
จากรูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพของอินเวอร์เตอร์ที่มีหลายระดับ โดยในที่นี้อุปกรณ์สวิตช์กำลังถูกสมมุติให้เป็นสวิตช์ในอุดมคติ อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) จะสามารถสร้างแรงดันได้ 2 ค่า เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง ซึ่งจุดอ้างอิงในที่นี้ คือ ขาลบของตัวเก็บประจุ (Negative DC-link) ขณะที่อินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) จะสามารถสร้างแรงดันได้ 3 ค่า เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง ขณะที่อินเวอร์เตอร์ n ระดับ ดังรูปที่ 2.1 (ค) จะสามารถสร้างแรงดันได้ n ค่าเช่นเดียวกัน

คุณสมบัติที่น่าสนใจของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

1. รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีความใกล้เคียงไซน์
2. แรงดันที่ถูกสร้างขึ้นมีความผิดเพี้ยนน้อย และ $\frac{dv}{dt}$ ต่ำ
3. กระแสด้านขาออกมีความผิดเพี้ยนน้อย
4. สวิตช์กำลังแต่ละตัวทำงานที่สวิตช์ซึ่งความถี่ต่ำ

การประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีหลากหลายรูปแบบทั้งใช้เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ แก้วค่าฮาร์มอนิกส์ และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า หรือใช้เป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟให้กับภาระทางไฟฟ้าแทนระบบ เป็นต้น

รูปแบบพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ได้รับการวิจัยและศึกษากันโดยทั่วไปมี 3 ชนิด คือ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (Diode-clamped multilevel inverter), อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดมัลติเซลล์ (Cascaded multicell multilevel inverter) และอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor multilevel inverter) โดยวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีส่วนประกอบหลัก คือ อุปกรณ์สวิตช์กำลังจำนวนมากและมีตัวเก็บประจุหรือแหล่งจ่ายอิสระจำนวนมาก เพื่อที่จะทำการสร้างระดับแรงดันเป็นรูปคลื่นขั้นบันได โดยค่าแรงดันที่ได้นั้นเกิดจากการจัดเรียงระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุหรือแหล่งจ่ายอิสระทำให้ได้ค่าระดับแรงดันมีค่าที่สูงขึ้น



(ก) ไดโอด-แคลมป์ (DCMLI) (ข) คาสเคดมัลติเซลล์ (CMMLI) (ค) ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (FCMLI)

รูปที่ 2.2 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ประเภทอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

จากรูปที่ 2.2 เมื่อพิจารณาอินเวอร์เตอร์หลายระดับในแต่ละประเภทจากลักษณะการต่อวงจร ทำให้สามารถเห็นข้อจำกัด และข้อเด่น-ข้อด้อย แตกต่างกันได้

1. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอด-แคลมป์

(Diode-clamped multilevel inverter, DCMLI) ในรูปที่ 1.2 (ก)

- ไม่สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์กำลังได้
- มีคอมมอนดีซีลิงค์
- การสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุที่ดีซีลิงค์ทำได้ยาก (รูปแบบการสวิตช์มี

จำกัด)

2. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดมัลติเซลล์

(Cascaded multi-cell multilevel inverter, CMMLI) ในรูปที่ 1.2 (ข)

- สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์กำลังได้
- ไม่มีคอมมอนดีซีลิงค์
- มีตัวเก็บประจุแยกอิสระในแต่ละเซลล์ จึงสิ้นเปลืองแหล่งจ่ายอิสระหลาย

แหล่งเช่นกัน

3. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

(Flying capacitor multilevel inverter, FCMLI) ในรูปที่ 1.2 (ค)

- สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์กำลังได้
- มีคอมมอนดีซีลิงค์
- สิ้นเปลืองตัวเก็บประจุ และตัวเก็บประจุที่ใช้มีขนาดใหญ่

หากมองในแง่ของการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ มีข้อได้เปรียบ กล่าวคือ ใช้แหล่งจ่ายดีซีลิงค์เพียงแหล่งจ่ายเดียว อีกทั้งยังสามารถรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุได้เองโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะเพิ่มขึ้น จากข้อได้เปรียบดังกล่าว ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor multilevel inverter , FCMLI) มาทำการศึกษาและวิจัย

2.2.1 ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการวิจัย

m	คือ จำนวนระดับของแรงดันเมื่อเทียบกับขั้วลบของคิซีลิ่งค์ (Voltage level)
SW	คือ จำนวนสวิทช์กำลัง (Power semi-conductor)
C	คือ จำนวนตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์ (Flying capacitor)
k	คือ จำนวนระดับของแรงดันระหว่างสาย (Line voltage)
p	คือ จำนวนระดับของแรงดันเฟสของภาระไฟฟ้า 3 เฟส (Phase voltage)
f_m	คือ ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency)
f_{cr}	คือ ความถี่แคเรียร์ (Carrier frequency)
$f_{sw,dev}$	คือ ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิทช์ซิ่ง (Frequency switching device)
$f_{sw,inv}$	คือ ความถี่การสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ (Switching frequency of inverter)
m_f	คือ อัตราส่วนระหว่าง f_{cr}/f_m (Frequency modulation index)
m_a	คือ อัตราการมอดูเลตระหว่างสัญญาณมูลฐานและสัญญาณแคเรียร์
v_{cr}	คือ แรงดันสัญญาณแคเรียร์ หรือแรงดันสัญญาณแคเรียร์
v_m	คือ แรงดันสัญญาณมูลฐาน หรือแรงดันสัญญาณไซน์
\hat{V}_{cr}	คือ แรงดันแอมพลิจูดของสัญญาณแคเรียร์ หรือแรงดันแอมพลิจูดของสัญญาณแคเรียร์
\hat{V}_m	คือ แรงดันแอมพลิจูดของสัญญาณมูลฐาน หรือแรงดันแอมพลิจูดของสัญญาณไซน์

2.2.2 โครงสร้างพื้นฐาน และ หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ [1-3]

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ หรือ เรียกว่า คาปาซิเตอร์แคลมป์ (Capacitor-clamped) แสดงดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และอุปกรณ์สวิทช์กำลัง (Power Semi-conductor) โดยตัวเก็บประจุนอกสุดเรียกว่า คอมมอนคิซีลิ่งค์ (Common DC link) เป็นตัวสะสมพลังงาน ขณะที่ตัวเก็บประจุนั้นๆ เรียกว่า ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (Flying capacitor) เป็นตัวสร้างแรงดันในระดับต่างๆ โดยแรงดันที่ได้ในแต่ละระดับ เกิดจากผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์แต่ละตัวในสถานะการสวิทช์นั้นๆ ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์ในแต่ละตัว คือ $1E$

สมการพื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ สามารถสรุปเป็นสมการ ได้ดังนี้

กำหนดให้ m คือ จำนวนระดับของแรงดันเมื่อเทียบกับขั้วลบของคิซีลิ่งค์

SW คือ จำนวนสวิทช์กำลัง

C คือ จำนวนคาปาซิเตอร์ฟลายอิงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อนุญาตให้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k คือ จำนวนระดับของแรงดันระหว่างสาย

p คือ จำนวนระดับของแรงดันเฟสของภาระไฟฟ้า 3 เฟส

เมื่อทำการพิจารณาองค์ประกอบของวงจรใน 1 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.3

$$SW = (m-1) \times 2 \quad (2.1)$$

$$C = \frac{(m-1) \times (m-2)}{2} \quad (2.2)$$

$$m = \frac{SW}{2} + 1 \quad (2.3)$$

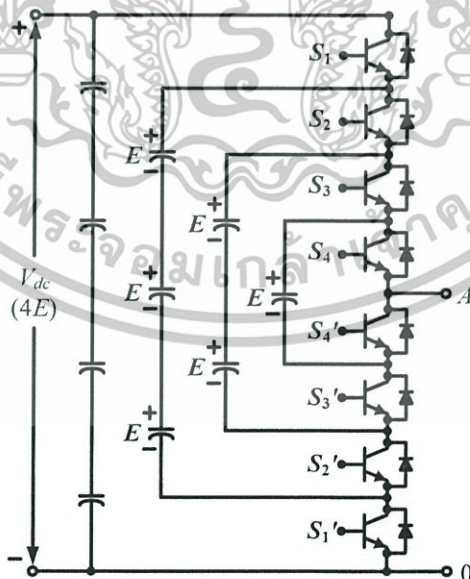
เมื่อทำการพิจารณาองค์ประกอบของวงจรในแบบ 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.4

$$SW = ((m-1) \times 2) \times 3 \quad (2.4)$$

$$C = \left(\frac{(m-1) \times (m-2)}{2} \right) \times 3 \quad (2.5)$$

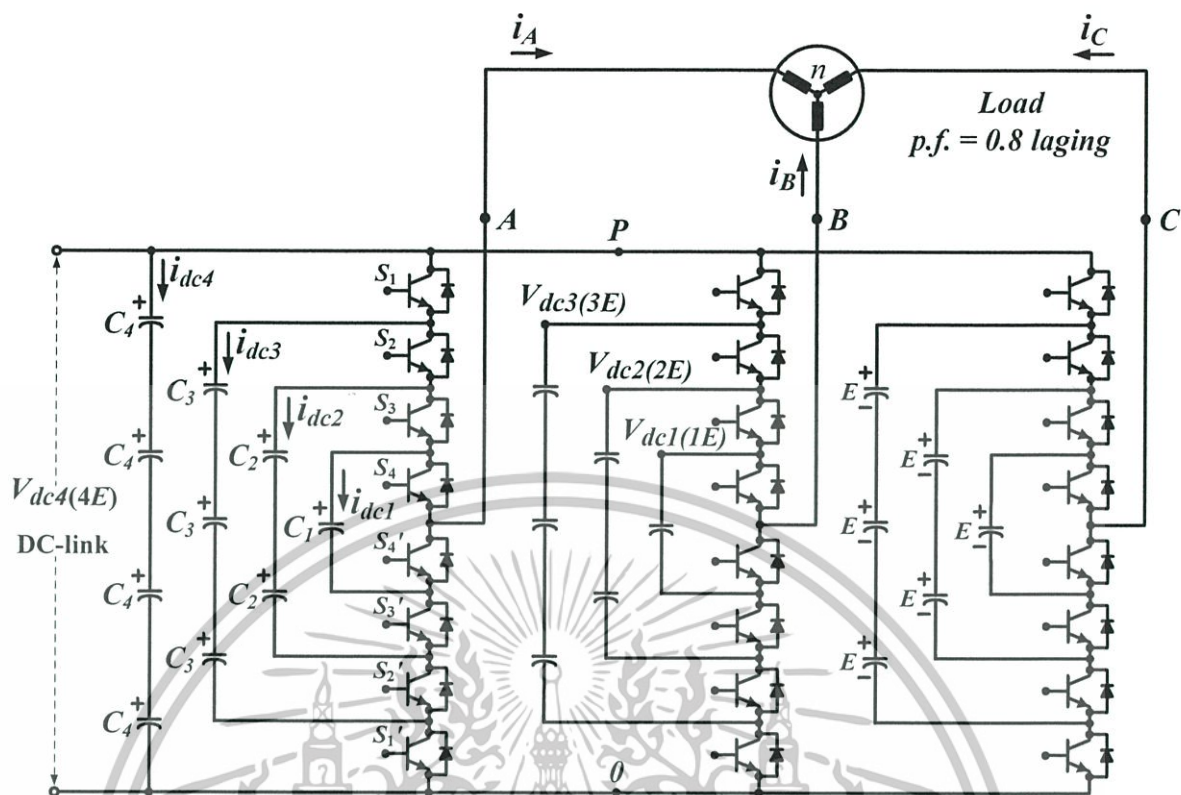
$$k = 2m - 1 \quad (2.6)$$

$$p = 2k - 1 \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.3 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบ 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ แบบ 3 เฟส

จากรูปที่ 2.4 เมื่อทำการกำหนดแหล่งจ่ายไฟ DC-link ให้มีค่าเท่ากับ V_{dc} โดยที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงคัใน แต่ละตัวจะมีแรงดันตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุเท่ากัน คือ $1E$ ดังนั้นแรงดันของตัวเก็บประจุจากวงนอกสุดจะมีระดับแรงดันเป็น $4E$, $3E$, $2E$ และวงในสุดมีระดับแรงดัน $1E$ ตามลำดับ โดยจะขึ้นอยู่กับการ “ON” และ “OFF” ของสวิตช์กำลังแต่ละตัว นอกจากนั้นระดับแรงดันด้านขาออกยังสามารถสร้างได้หลายวิธี แต่มีผลการประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุฟลายอิงคั แต่ละวงที่แตกต่างกัน โดยที่สามารถนำข้อมูลมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ของระดับแรงดันด้านขาออกได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การทำงานของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (1 เฟส)

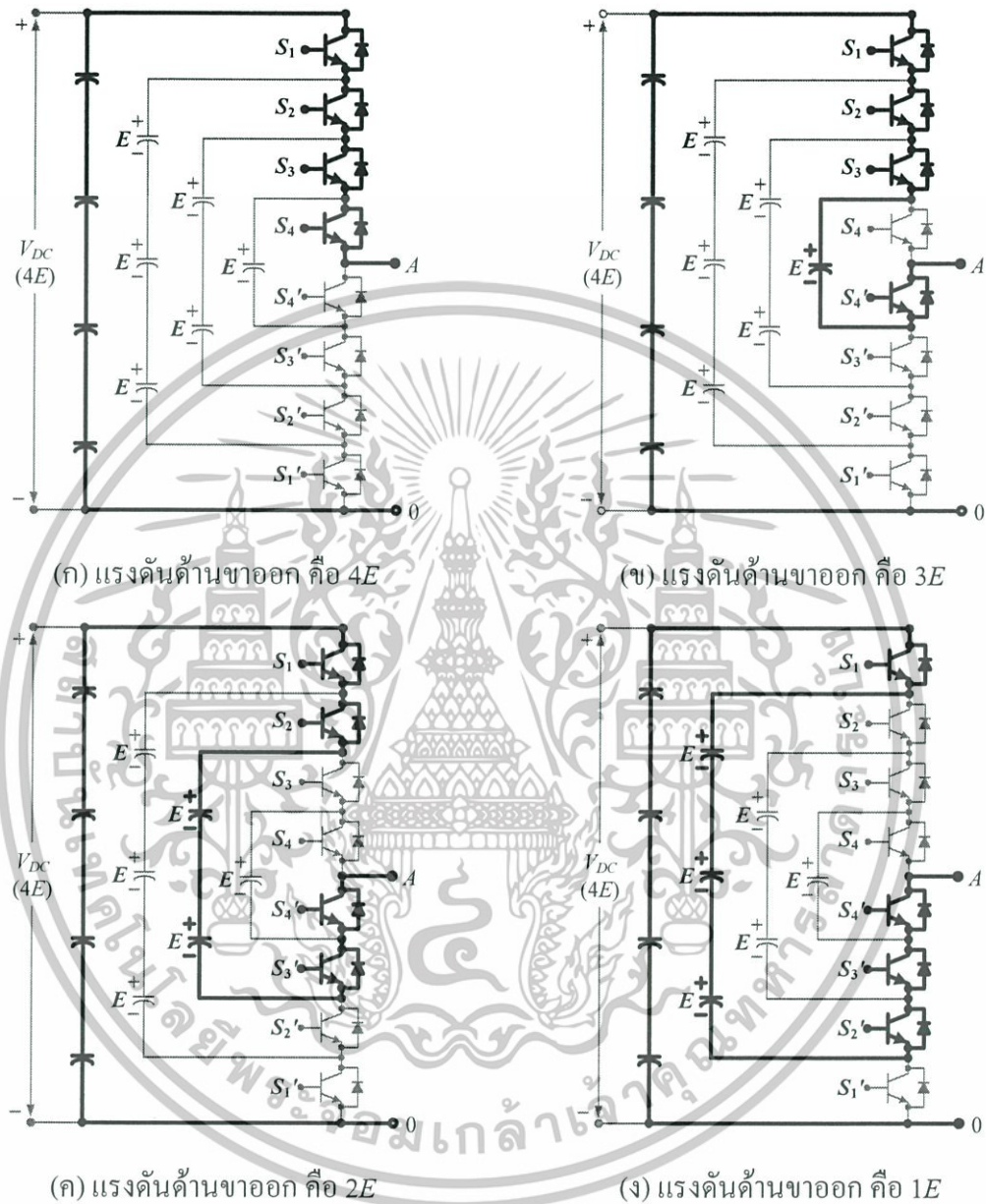
สถานะการสวิตช์				แรงดันผลรวม ของตัวเก็บประจุ	แรงดันด้าน ขาออก v_{AO}	C_4	C_3	C_2	C_1
S_1	S_2	S_3	S_4						
1	1	1	1	$4E$	$V_{dc}(4E)$	-	N	N	N
1	1	1	0	$4E - 1E$	$3E$	-	N	N	+
1	1	0	1	$4E - 2E + 1E$		-	N	+	-
1	0	1	1	$4E - 3E + 2E$		-	+	-	N
0	1	1	1	$3E$		N	-	N	N
1	1	0	0	$4E - 2E$	$2E$	-	N	+	N
1	0	1	0	$4E - 3E + 2E -$		-	+	-	+
0	1	1	0	$1E$		N	-	N	+
1	0	0	1	$3E - 1E$		-	+	N	-
0	1	0	1	$4E - 3E + 1E$		N	-	+	-
0	0	1	1	$3E - 2E + 1E$		N	N	-	N
1	0	0	0	$4E - 3E$	$1E$	-	+	N	N
0	1	0	0	$3E - 2E$		N	-	+	N
0	0	1	0	$2E - 1E$		N	N	-	+
0	0	0	1	$1E$		N	N	N	-
0	0	0	0	0	0	N	N	N	N

หมายเหตุ: 1 = สวิตช์ทำงาน, 0 = สวิตช์ไม่ทำงาน, N = สถานะลอยตัว, + อัดประจุ, - คายประจุ

ข้อสังเกตการทำงานของสวิตช์กำลัง โดยพิจารณาที่ระดับแรงดันทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ คือ หากต้องการระดับแรงดัน $4E$ ก็ให้เลือกสวิตช์กำลังทำงาน 4 ตัว หรือถ้าต้องการระดับแรงดัน $3E$ ก็เลือกสวิตช์กำลัง 3 ใน 4 ตัวทำงานพร้อมกัน หรือถ้าต้องการระดับแรงดัน $2E$ ก็เลือกสวิตช์กำลัง 2 ใน 4 ตัวทำงานพร้อมกัน และหากต้องการระดับแรงดัน $1E$ ก็เลือกสวิตช์กำลัง 1 ใน 4 ตัวทำงาน จะเห็นได้ว่าลักษณะการทำงานของสวิตช์กำลังสามารถเลือกทำงานได้หลายแบบตามระดับแรงดันที่ต้องการ ซึ่งการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังจะเกิดจากการนำค่าสัญญาณมูลฐานกับสัญญาณแคเรียร์มาทำการเปรียบเทียบกัน ทำให้ได้เป็นสัญญาณขับเกตเพื่อนำไปขับสวิตช์กำลัง ซึ่งเรียกว่าวิธี ไซนูซอยคัลพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) ซึ่งมีด้วยกันหลายเทคนิค โดยแบ่งตามลักษณะการจัดรูปแบบของสัญญาณแคเรียร์ สัญญาณขับเกตที่ได้จากการมอดูเลตในช่วง 1 ไซเคิล จึงมีโอกาที่จะทำให้สวิตช์กำลังทำงานไม่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นผลทำให้เกิดกำลังสูญเสียที่สวิตช์กำลังมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้อัตราของกระแสการอัดประจุและคายประจุไม่สมดุลกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์ จึงต้องคำนึงถึงการทำงานของสวิตช์กำลังเฉลี่ยเป็นหลัก ในรูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างการสร้างระดับแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ในบางสถานะ



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการสร้างระดับแรงดันด้านขาออกบางสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

ข้อดี

- แรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังแต่ละตัวมีค่าต่ำ จึงสามารถนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทนแรงดันต่ำมาสร้างแรงดันด้านขาออกที่สูงขึ้นได้

- ให้คุณภาพของรูปคลื่นของแรงดันด้านขาออกที่มีคุณภาพสูงมีความใกล้เคียงไซน์ โดยที่สวิตช์กำลังแต่ละตัวทำงานที่สวิตช์ความถี่ต่ำ

- ด้านแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก จะมีค่าความผิดพลาดต่ำ และมีผลของ $\frac{dv}{dt}$ ต่ำ ซึ่งจะลดปัญหาเกี่ยวกับ EMI

- มีแรงดัน โหมดผลร่วมต่ำ (Common mode voltage) จะช่วยลดผลสัญญาณรบกวน

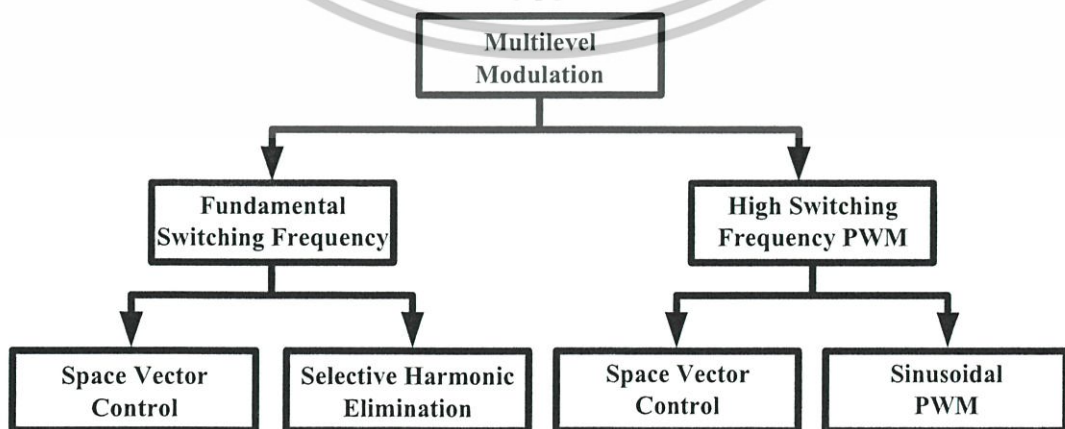
ข้อเสีย

- ต้องใช้ตัวเก็บประจุในวงจรเป็นจำนวนมาก

- เนื่องจากใช้อุปกรณ์สวิตช์กำลังจำนวนมากทำให้ต้องใช้สัญญาณเกตจำนวนมากตามไปด้วย

2.3 เทคนิคที่ดับปลิวเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ [1-3]

ในการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้น สามารถใช้ได้กับเทคนิคการมอดูเลตแบบต่างๆ ซึ่งเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาและนำมาใช้ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยทั่วไป มีด้วยกันหลายแบบ ซึ่งสามารถแบ่งตามความถี่ของการสวิตช์กำลังได้ดังในรูปที่ 2.6 เช่น ไซน์ชวยคอลลพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน (sinusoidal pulse width modulation, SPWM), สเปซเวกเตอร์คอนโทรล (Space vector control, SVC) และซีเลคทีฟฮาร์โมนิกอีลิมีเนชัน (selective harmonic elimination) เป็นต้น [1]



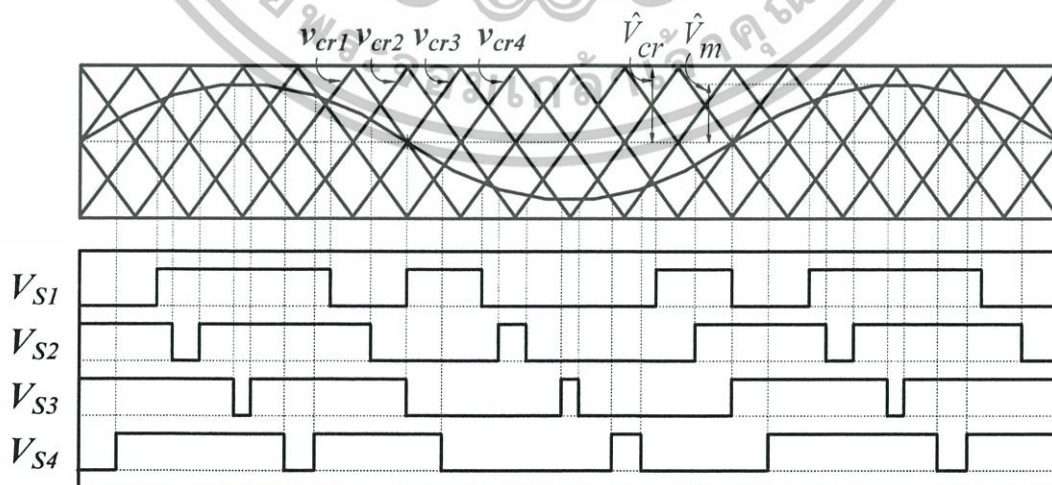
รูปที่ 2.6 รูปแบบการสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้างต้นเทคนิคการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง ที่นำมาใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สามารถใช้ได้กับเทคนิคการมอดูเลตแบบต่างๆ แต่เทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณขับเคลื่อนมากที่สุด สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับคือ ไซนูซอยดอลพัลส์วidthมอดูเลชัน (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)[1] ซึ่งมีด้วยกัน 2 แบบ คือ เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (Phase-shifted Pulse Width Modulation) หรือเรียกว่า PSPWM และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์(In-phase disposition Pulse Width Modulation) หรือเรียกว่า IPDPWM [1-3]และเทคนิคที่เกิดใหม่จากการนำรูปแบบของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์รวมเข้าด้วยกันคือเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (Carrier - redistribution Pulse Width Modulation) หรือเรียกว่า CRPWM [4]

2.3.1 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (Phase-shifted Pulse Width Modulation) [1-3]

เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (Phase-shifted Pulse Width Modulation) ซึ่งต่อจากนี้จะเรียกว่า PSPWM มีลักษณะของการจัดเรียงสัญญาณแคเรียร์แบบเลื่อนเฟสเป็นมุมเท่าๆ กันตามจำนวนของสัญญาณแคเรียร์ที่ใช้ โดยในรูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างของเทคนิค PSPWM ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์แบบ 5 ระดับ ($m = 5$) ดังนั้นจำนวนของสัญญาณแคเรียร์ที่ใช้จึงเท่ากับ $(m - 1) = 4$ สัญญาณ ซึ่งผลที่ได้จากการนำเทคนิค PSPWM ไปใช้งาน มีผลทำให้ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Device switching frequency, $f_{sw,dev}$) มีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ (Carrier frequency, f_{cr})



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์

คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากเทคนิค PSPWM [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราการมอดูเลต

$$m_a = \hat{V}_m / \hat{V}_{cr} \quad \text{เมื่อ } 0 \leq m_a \leq 1 \quad (2.8)$$

- อัตราส่วนจำนวนเท่าระหว่างความถี่สัญญาณแคเรียร์และความถี่สัญญาณมูลฐาน

$$m_f = f_{cr} / f_m \quad (2.9)$$

- ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Frequency Switching Device)

$$f_{sw,dev} = f_{cr} \quad (2.10)$$

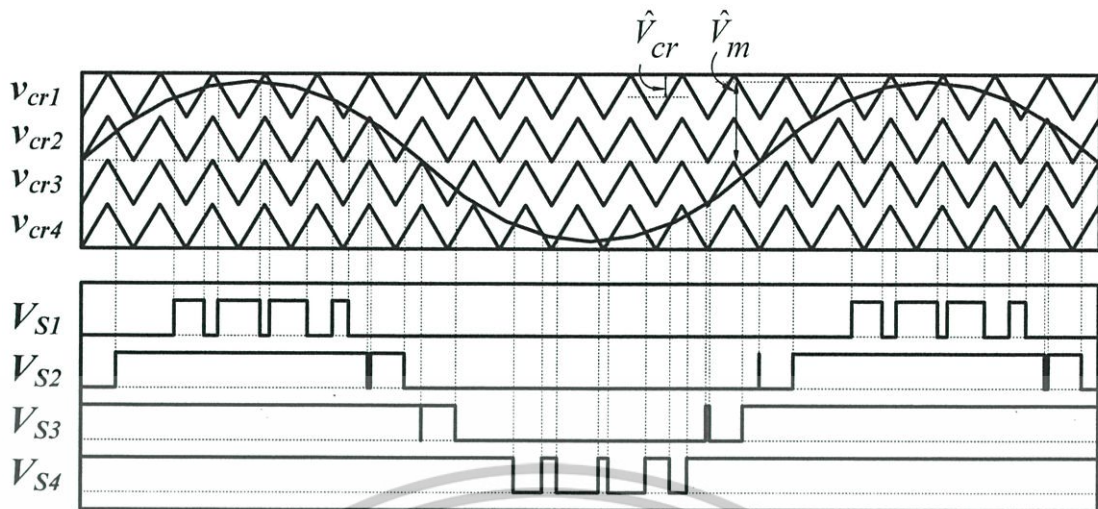
- ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (Switching Frequency of Inverter)

$$f_{sw,mv} = (m-1)f_{sw,dev} \quad (2.11)$$

ซึ่งแรงดันด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะมีฮาร์มอนิกส์ปรากฏที่อันดับสูงคือ ปรากฏขึ้นบริเวณรอบๆ ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ $(m-1)m_f = 4m_f$ จึงทำให้สามารถกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำได้ง่าย โดยที่อินเวอร์เตอร์เป็นแบบสามเฟส มีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบไซน์ นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งก็คือสัญญาณแคเรียร์แบบเลื่อนเฟสจำนวน 4 สัญญาณ แล้วนำผลของสัญญาณพัลส์ ที่ได้ไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลังในแต่ละเฟส โดยเลือกใช้สัญญาณแคเรียร์จำนวน $(m-1) = 4$ สัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณมีมุมเลื่อนเฟสกัน $\phi_{cr} = 360^\circ / (m-1) = 90$ องศา

2.3.2 เทคนิคพิดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (In-phase disposition Pulse Width Modulation) [1-3]

เทคนิคพิดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ ซึ่งต่อจากนี้จะเรียกว่า IPDPWM มีลักษณะของการจัดเรียงมุมเฟสระหว่างสัญญาณแคเรียร์ $v_{cr1} - v_{cr4}$ เป็นแบบอินเฟสกัน (in-phase) โดยในรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของเทคนิค IPDPWM ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์แบบ 5 ระดับ ($m = 5$) ดังนั้นจำนวนของสัญญาณแคเรียร์ที่ใช้จึงเท่ากับ $(m-1) = 4$ ด้วยคุณสมบัติของเทคนิค IPDPWM จากการนำไปใช้งาน มีผลทำให้ความถี่การสวิตช์ซึ่งของอินเวอร์เตอร์ (Switching frequency of inverter, $f_{sw,mv}$) จะเท่ากับความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ (Carrier frequency, f_{cr})



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างเทคนิคพีดีดับบลิเว็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์

คุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากเทคนิค IPDPWM[2]

- อัตราการมีอคติ

$$m_a = \hat{V}_m / \hat{V}_{cr} (m-1) \quad \text{เมื่อ } 0 \leq m_a \leq 1 \quad (2.12)$$

- อัตราส่วนจำนวนเท่าระหว่างความถี่สัญญาณแคเรียร์และความถี่สัญญาณมูลฐาน

$$m_f = f_{cr} / f_m \quad (2.13)$$

- ความถี่การสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ (Switching Frequency of inverter)

$$f_{sw,inv} = f_{cr} \quad (2.14)$$

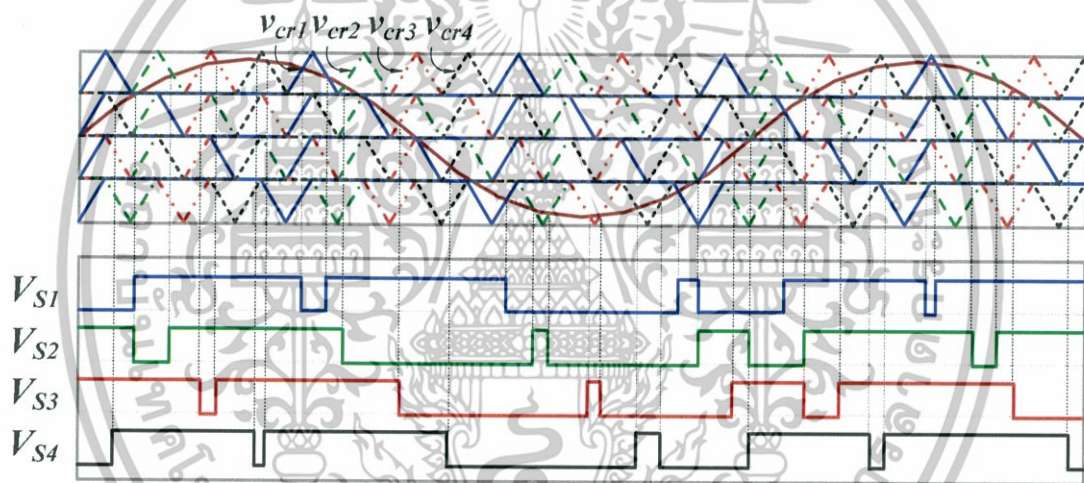
- ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง(Frequency Switching Device)

$$f_{sw,dev} = f_{cr} / (m-1) \quad (2.15)$$

ซึ่งแรงดันด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะมีฮาร์มอนิกส์ปรากฏที่อันดับสูงคือ ปรากฏขึ้นบริเวณรอบๆ ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ m_f จึงทำให้สามารถกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำได้ง่าย โดยที่อินเวอร์เตอร์เป็นแบบสามเฟส มีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบไซน์ นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งก็คือสัญญาณแคเรียร์แบบเลื่อนระดับจำนวน 4 สัญญาณ แล้วนำผลของสัญญาณพัลส์ที่ได้ไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์กำลังในแต่ละเฟส โดยจำนวนระดับสัญญาณแคเรียร์หาได้จากจำนวนระดับของแรงดันที่ได้อินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ จึงเป็น $(m-1) = 4$ ระดับ

2.3.3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (Carrier - redistribution Pulse Width Modulation)[4]

เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ ซึ่งต่อจากนี้จะเรียกว่า CRPWM มีลักษณะรูปแบบแคเรียร์เหมือนกับเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ คือ มีการเลื่อนเฟสของแคเรียร์และการเลื่อนระดับของแคเรียร์อยู่ในตัวเดียวกัน โดยในรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของเทคนิค CRPWM ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์แบบ 5 ระดับ ($m = 5$) แต่จำนวนของสัญญาณแคเรียร์ที่ใช้มีทั้งหมด 16 สัญญาณเพราะเนื่องจากโดยปกติเทคนิค PSPWM และ IPDPWM จะใช้สัญญาณแคเรียร์ 1 ตัว ควบคุมสวิตช์ 1 ตัว แต่เทคนิค CRPWM สวิตช์ 1 ตัวจะต้องใช้สัญญาณแคเรียร์ 4 สัญญาณในการควบคุม จึงทำให้สัญญาณแคเรียร์มีทั้งหมด 16 สัญญาณ



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่

คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากเทคนิค CRPWM [4]

- อัตราส่วนจำนวนเท่าระหว่างความถี่สัญญาณแคเรียร์และความถี่สัญญาณมูลฐาน

$$m_f = f_{cr} / f_m \quad (2.16)$$

- ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Frequency Switching Device)

$$f_{sw.dev} = f_{cr} \quad (2.17)$$

- ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (Switching Frequency of Inverter)

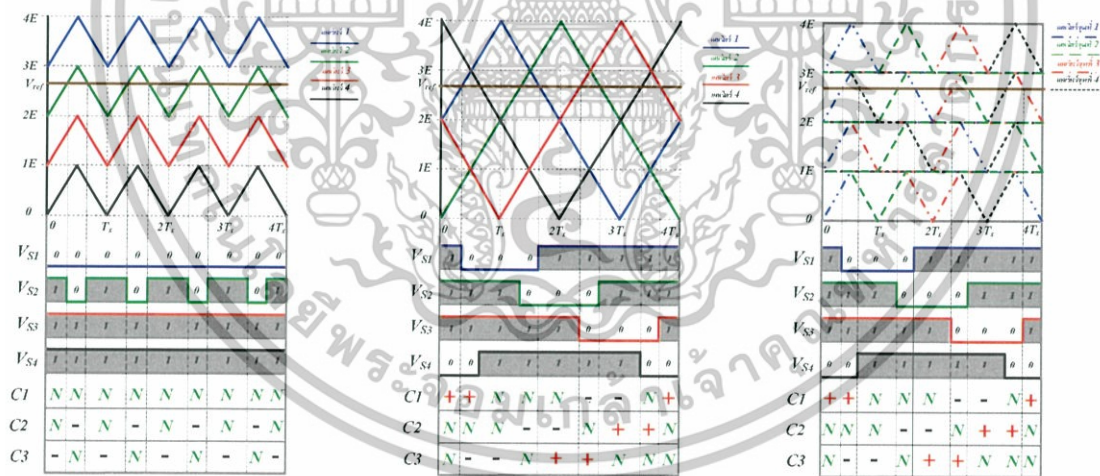
$$f_{sw.inv} = (m-1)f_{sw.dev} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแรงดันด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะมีฮาร์มอนิกส์ปรากฏที่อันดับสูงคือปรากฏขึ้นบริเวณรอบๆ ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ $(m-1)m_f = 4m_f$ จึงทำให้สามารถกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำได้ง่าย โดยที่อินเวอร์เตอร์เป็นแบบสามเฟส มีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบไซน์ นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม ซึ่งก็คือสัญญาณแคเรียร์แบบการจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ จำนวน 16 สัญญาณ แล้วนำผลของสัญญาณพัลส์ ที่ได้ไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์กำลังในแต่ละเฟส

2.4 คุณลักษณะของเทคนิคพีดีบีบลิวเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

พิจารณาเปรียบเทียบลักษณะการสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ใน 1 ไซเคิลของของสัญญาณแคเรียร์หรือในช่วงคาบเวลา $4T_s$ โดยให้ระดับมอดดูเลตอยู่ในระดับเดียวกัน จากรูปที่ 2.10(ก) แสดงการสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ของเทคนิค IPDPWM จากรูปเห็นได้ว่าสถานะของตัวเก็บประจุ C2 และ C3 มีการคายประจุเพียงอย่างเดียว จึงส่งผลให้ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุลดลง ซึ่งทำให้ไม่สามารถรักษาสถิติสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ใน 1 ไซเคิลของสัญญาณแคเรียร์หรือในช่วงคาบเวลา $4T_s$



หมายเหตุ : + อัดประจุ, - คายประจุ, N= สถานะลอยตัว

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.10 สถานะตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ที่ระดับมอดดูเลตเดียวกัน

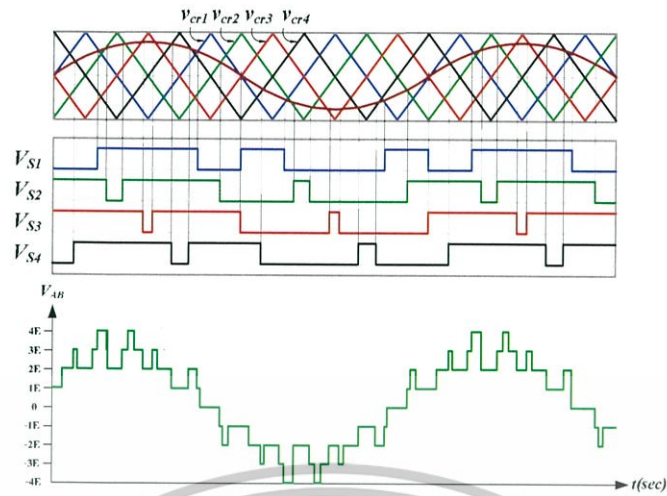
ในรูปที่ 2.10(ข) แสดงการสมมูลแรงดันที่ตัวเก็บประจุหลายอ็องค์ของเทคนิค PSPWM จากรูปเห็นได้ว่าสถานะของตัวเก็บประจุ C1, C2 และ C3 มีการคายประจุและอัดประจุอยู่เท่ากัน จึงส่งผลให้สามารถรักษาสมมูลแรงดันที่ตัวเก็บประจุหลายอ็องค์ได้ใน 1 ไซเคิลของสัญญาณแคเรียร์หรือในช่วงคาบเวลา $4T_s$

ในรูปที่ 2.10(ค) แสดงการสมมูลแรงดันที่ตัวเก็บประจุหลายอ็องค์ของเทคนิค CRPWM จากรูปเห็นได้ว่าสถานะของตัวเก็บประจุ C1, C2 และ C3 มีการคายประจุและอัดประจุอยู่เท่ากัน จึงส่งผลให้สามารถรักษาสมมูลแรงดันที่ตัวเก็บประจุหลายอ็องค์ได้ใน 1 ไซเคิลของสัญญาณแคเรียร์หรือในช่วงคาบเวลา $4T_s$

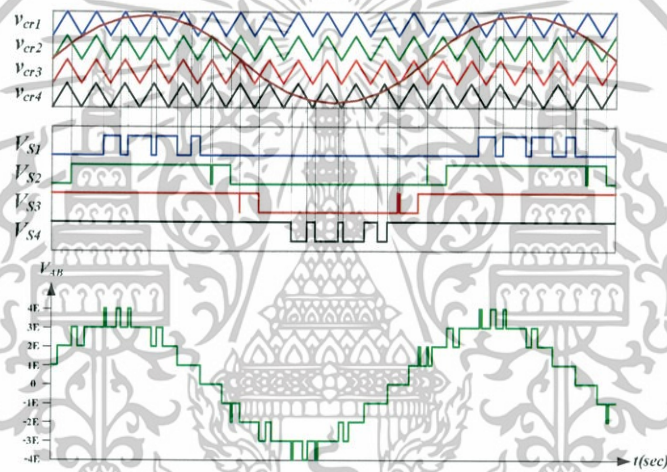
จากเทคนิค CRPWM จะสังเกตได้ว่าลักษณะสัญญาณเกตที่ได้มีความคล้ายคลึงกันกับลักษณะของสัญญาณเกต PSPWM จึงส่งผลให้สามารถรักษาสมมูลแรงดันที่ตัวเก็บประจุหลายอ็องค์ได้เช่นกัน

จากรูปที่ 2.11 แสดงการจำลองลักษณะการสร้างแรงดันสาย โดยในรูปที่ 2.11(ก) เป็นการจำลองแรงดันสายของเทคนิค PSPWM และในรูปที่ 2.11(ข) เป็นการจำลองแรงดันสายของเทคนิค IPDPWM และในรูปที่ 2.11(ค) เป็นการจำลองแรงดันสายของเทคนิค CRPWM จากรูปเห็นว่าลักษณะแรงดันสายของเทคนิค CRPWM มีความคล้ายกับเทคนิค IPDPWM จึงส่งผลให้ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสายต่ำเท่ากับเทคนิค IPDPWM

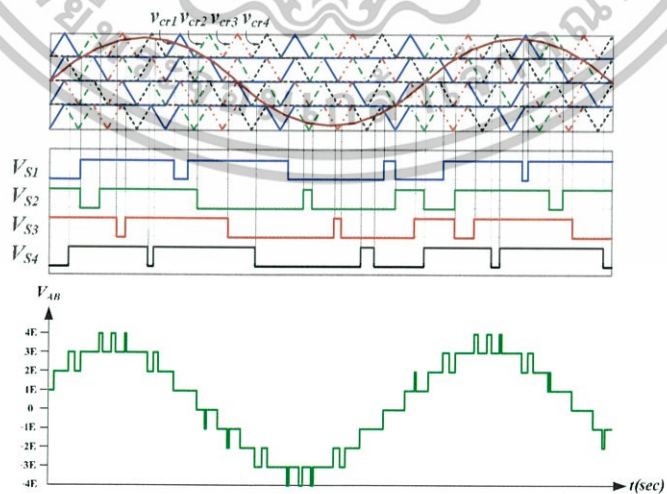
โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคพีดับบลิวเอ็ม ทั้ง 3 แบบ เพื่อให้ได้เทคนิคพีดับบลิวเอ็มที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยสามารถรักษาสมมูลพลังงานที่ตัวเก็บประจุหลายอ็องค์ได้ และยังให้คุณภาพแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกอีกด้วย โดยเทคนิคพีดับบลิวเอ็มทั้ง 3 ชนิดจะสร้างบนอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (FPGA) และสามารถรับข้อมูลสัญญาณควบคุมต่างๆ จากไมโครโปรเซสเซอร์ได้



(ก) เทคนิค PSPWM



(ข) เทคนิค IPD PWM



(ค) เทคนิค CRPWM

รูปที่ 2.11 การจำลองลักษณะแรงดันสายของเทคนิคพีดับบลิวเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

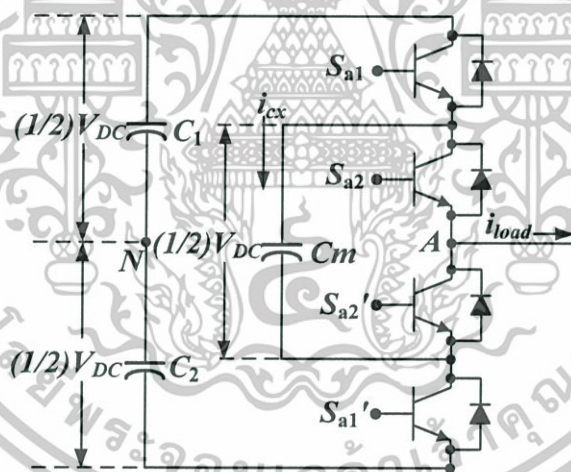
เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่

3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ในบทนี้ได้นำเสนอเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) แบบ 3 ระดับ [4] และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) แบบ 5 ระดับสำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ อีกทั้งในบทนี้ยังนำเสนอการสร้างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) ด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (FPGA) และเปรียบเทียบการใช้ resource ของอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (FPGA) ในแต่ละเทคนิคด้วย

3.2 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ [4]

3.2.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ



รูปที่ 3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ 1 เฟส

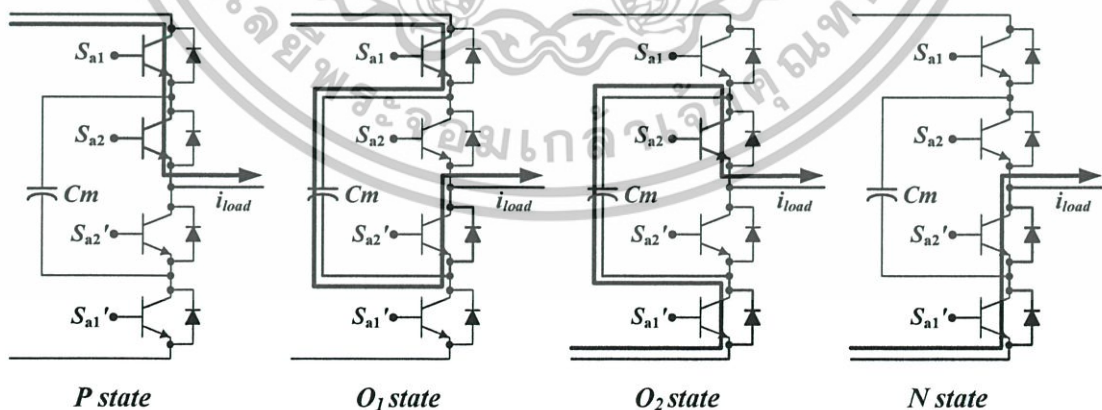
รูปที่ 3.1 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ 1 เฟส การทำงานของสถานะการสวิตช์ ถ้าสวิตช์ On ให้มีค่าเป็น “ 1 ” และถ้าสวิตช์ Off ให้มีค่าเป็น “ 0 ” ให้แรงดันด้านขาออกอยู่ระหว่างจุด A และ จุด N สำหรับแรงดันด้านขาออกเท่ากับ $V_{DC}/2$ สวิตช์ S_{a1} และ สวิตช์ S_{a2} ทำงาน หรือมีค่าเท่ากับ “ 1 ” สำหรับแรงดันด้านขาออกเท่ากับ $-V_{DC}/2$ สวิตช์ S_{a1} และ สวิตช์ S_{a2} ไม่ทำงาน หรือมีค่าเท่ากับ “ 0 ” สำหรับแรงดันด้านขาออกเท่ากับศูนย์ สวิตช์ S_{a1} และ สวิตช์ S_{a2}' ทำงาน หรือมีค่าเท่ากับ “ 1 ” และเช่นเดียวกันสวิตช์ S_{a1}' และ สวิตช์ S_{a2} ทำงาน หรือมีค่าเท่ากับ “ 1 ” ฉะนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออก V_{AN} ได้ดังสมการที่ 3.1

$$V_{AN} = S_{a2} \times V_{Cm} + S_{a1} \times (V_{DC} - V_{Cm}) - V_{DC}/2 \dots\dots\dots(3.1)$$

การสมมุติทางเดินกระแสด้านขาออก(กระแสไหลด) หมายถึงคาบเวลาการสวิตช์ครั้งที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ C_m จะอัดประจุเมื่อสวิตช์ S_{a1} และ สวิตช์ S'_{a2} ทำงาน หรือมีค่าเท่ากับ “ 1 ” และตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ C_m จะคายประจุเมื่อสวิตช์ S'_{a1} และ สวิตช์ S_{a2} ทำงาน หรือมีค่าเท่ากับ “ 1 ” ตารางที่ 3.1 แสดงสถานะการสวิตช์สำหรับแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดฟลายอิงค์ปาซีเตอร์ โดยสมมุติว่าไหลดเป็นลักษณะตัวเหนี่ยวนำและทิศทางไหลออกดังรูปที่ 3.1 สถานะสวิตช์ O_1 , หมายถึงตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ C_m กำลังอัดประจุและสถานะสวิตช์ O_2 , หมายถึงตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ C_m กำลังคายประจุ รูปที่ 3.2 แสดงการพิจารณาทิศทางการไหลของกระแสของสภาวะการสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดฟลายอิงค์ปาซีเตอร์

ตารางที่ 3.1 สถานะการสวิตช์สำหรับแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดฟลายอิงค์ปาซีเตอร์

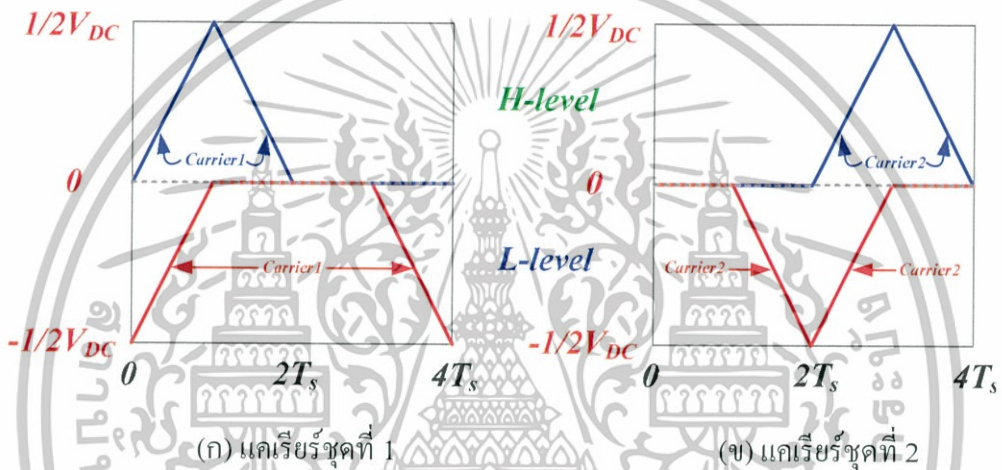
Output Voltage (V_{AN})	Switch State	Switch Sequence		C_m State
		S_{a1}	S_{a2}	
$V_{DC}/2$	P	1	1	constant
0	O_1	1	0	charging
	O_2	0	1	discharging
$-V_{DC}/2$	N	0	0	constant



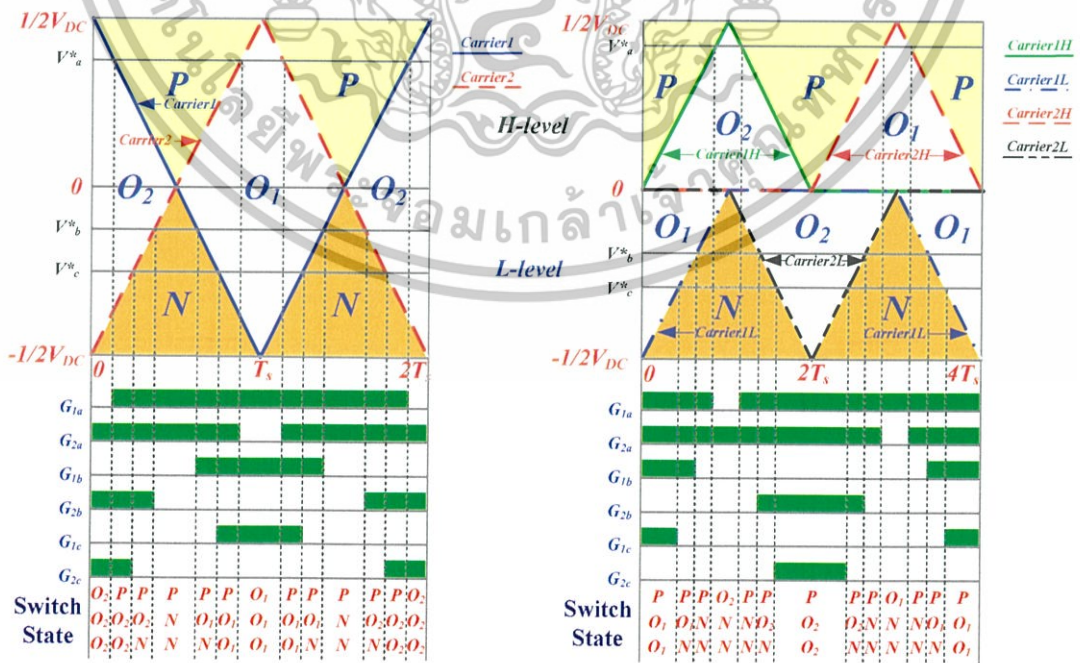
รูปที่ 3.2 ทิศทางการไหลของกระแสของสภาวะการสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดฟลายอิงค์ปาซีเตอร์

3.2.2 เทคนิค CRPWM สำหรับการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ C_m

สัญญาณแคเรียร์ของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ ซึ่งต่อจากนี้จะเรียกว่าสัญญาณแคเรียร์ของเทคนิค CRPWM สำหรับเทคนิค CRPWM ลักษณะสัญญาณแคเรียร์เกิดจากการนำแคเรียร์รูปสามเหลี่ยมมาแบ่งออกเป็นชั้นๆ ซึ่งจำนวนชั้นจะเท่ากับ $(m - 1)$ เมื่อ $m = 3$ จำนวนชั้นของสัญญาณแคเรียร์จึงถูกแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคือระดับ H และระดับ L ซึ่งสวิตช์กำลัง 1 ตัว ใช้สัญญาณแคเรียร์ 2 สัญญาณในการควบคุมสวิตช์ จึงทำให้มีสัญญาณแคเรียร์ทั้งหมด 4 สัญญาณ โดยสัญญาณแคเรียร์ชุดที่ 1 ควบคุมสวิตช์ S_{a1} และสัญญาณแคเรียร์ชุดที่ 2 ควบคุมสวิตช์ S_{a2} ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะสัญญาณแคเรียร์เทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ



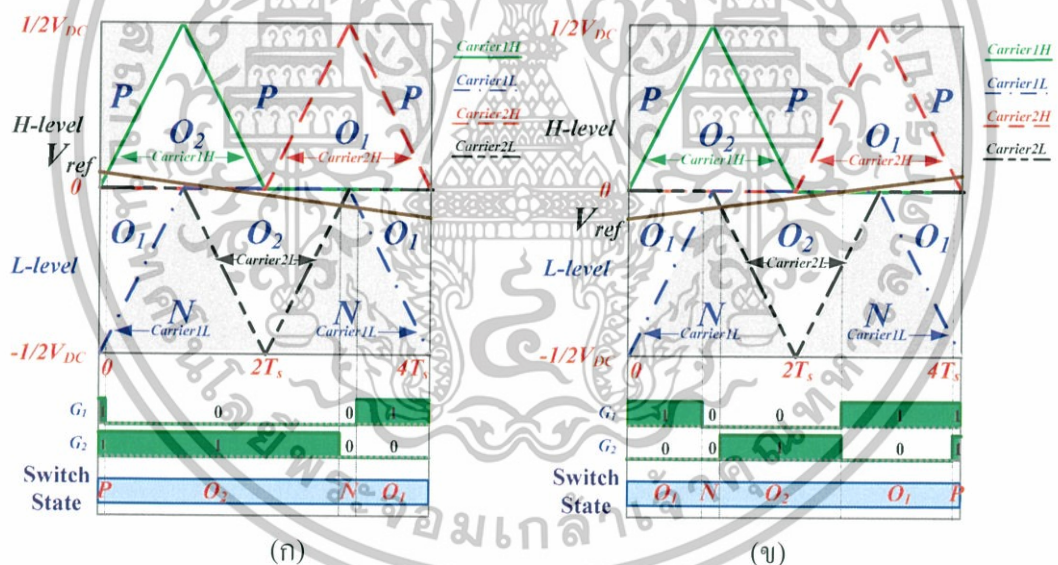
(ก) เทคนิค PSPWM

(ข) เทคนิค CRPWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบเทคนิคพีดับบลิวเอ็ม PSPWM กับ CRPWM
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขในการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุคือในครึ่งคาบเวลาการสวิตช์ ต้องมีสถานะการอัดประจุ O_1 และสถานะการคายประจุ O_2 อยู่เท่าๆกัน โดยอธิบายจากรูปที่ 3.4 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างเทคนิค PSPWM และเทคนิค CRPWM ซึ่งการนำเทคนิค PSPWM มาเปรียบเทียบนั้นเพราะว่าเทคนิค PSPWM มีการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ที่ดีที่สุด [3] จากรูปที่ 3.4(ก) แสดงแรงดันอ้างอิง 3 สัญญาณคือ V_a^* , V_b^* , V_c^* ซึ่งแรงดันอ้างอิง V_a^* ตั้งในอยู่ระดับ H และแรงดันอ้างอิง V_a^* , V_b^* ตั้งอยู่ในระดับ L การใช้แคเรียร์ 1 และแคเรียร์ 2 ในช่วงเวลาเดียวกัน ให้ผลของสถานะการอัดประจุ O_1 และสถานะการคายประจุ O_2 เท่ากันในช่วงเวลา T_s ของเทคนิค PSPWM ซึ่งทำให้สามารถรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้

รูปที่ 3.4(ข) แสดงเทคนิค CRPWM การใช้แคเรียร์ $1L$ และแคเรียร์ $2L$ ในระดับ L ให้ผลของสถานะการอัดประจุ O_1 และสถานะการคายประจุ O_2 เท่ากันในช่วงเวลา $2T_s$ แต่การใช้แคเรียร์ $1H$ และแคเรียร์ $2H$ ในระดับ H ยังไม่สามารถสมดุลแรงดันในช่วงเวลา $2T_s$ แต่สามารถสมดุลแรงดันในช่วงเวลา $4T_s$ ได้ เนื่องจากให้ผลของสถานะการอัดประจุ O_1 และสถานะการคายประจุ O_2 ไม่เท่ากันในช่วงเวลา $2T_s$



รูปที่ 3.5 ผลกระทบของระดับการมอดูเลต

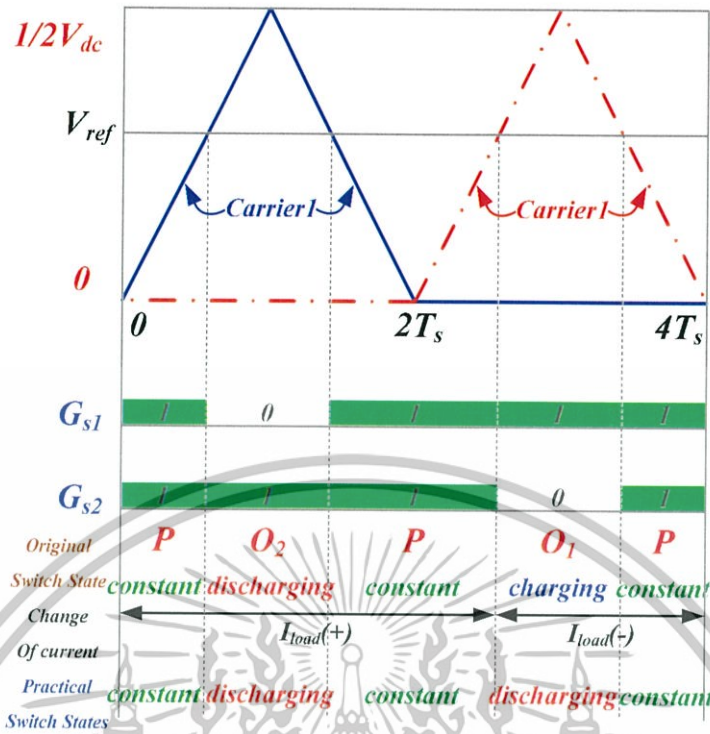
รูปที่ 3.5(ก) แสดงผลกระทบจากระดับการมอดูเลตของเทคนิค CRPWM โดยเกิดในช่วงระดับแรงดันอ้างอิงเปลี่ยนจากระดับ H เป็นระดับ L ทำให้สถานะตัวเก็บประจุฟลายอิงค์มีการคายประจุ O_2 มากกว่าการอัดประจุ O_1 ในช่วงคาบเวลา $4T_s$ ส่งผลให้ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ลดลง ทำให้ไม่สามารถรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ในช่วงคาบเวลา $4T_s$

รูปที่ 3.5(ข) แสดงผลกระทบจากระดับการมีอดดูเลตของเทคนิค CRPWM โดยเกิดในช่วงระดับแรงดันอ้างอิงเปลี่ยนจากระดับ L เป็นระดับ H ทำให้สถานะตัวเก็บประจุฟลายอิงค์มีการอัดประจุ O_1 มากกว่าการคายประจุ O_2 ในช่วงคาบเวลา $4T_s$ ส่งผลให้ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์เพิ่มขึ้น ทำให้ไม่สามารถรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ในช่วงคาบเวลา $4T_s$

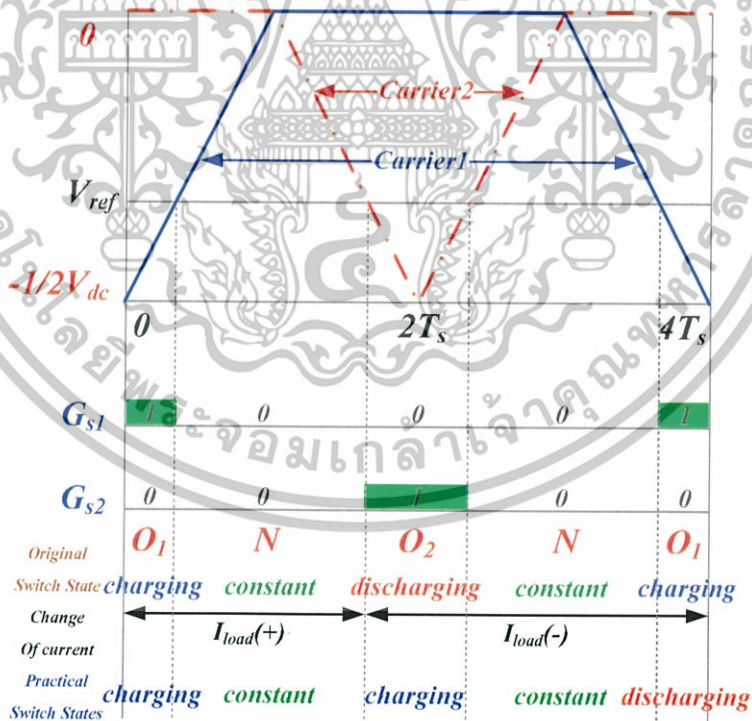
เมื่อนำเทคนิค CRPWM มาพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลตลอดในช่วงคาบเวลาการสวิตช์ในระดับ H ดังรูปที่ 3.6 (ก) แสดงการพิจารณาเมื่อแรงดันอ้างอิงมีค่ามากกว่าศูนย์ ถ้าการเปลี่ยนแปลงของสภาวะการอัดประจุและสภาวะการคายประจุของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ เกิดขึ้นในระดับ H สภาวะการสวิตช์แบบเดิมเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสภาวะสวิตช์ใช้งานจริง นั่นคือ สภาวะสวิตช์แบบเดิม $P - O_2(\text{คายประจุ}) - P - O_1(\text{อัดประจุ}) - P$ เปลี่ยนไปเป็น สภาวะสวิตช์ใช้งานจริง $P - O_2(\text{อัดประจุ}) - P - O_1(\text{อัดประจุ}) - P$ ซึ่งสาเหตุที่แรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์เพิ่มขึ้นนั้น เกิดจากกระแสไหลเปลี่ยนทุกๆ ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) ดังนั้นการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของกระแสไหล ณ เวลานั้นๆ และสภาวะสวิตช์สุดท้ายที่เวลานั้นๆ ด้วย

ในทำนองเดียวกัน ในระดับ L ดังรูปที่ 3.6 (ข) แสดงการพิจารณาเมื่อแรงดันอ้างอิงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ สภาวะการสวิตช์เดิม $O_1(\text{อัดประจุ}) - N - O_2(\text{คายประจุ}) - N - O_1(\text{อัดประจุ})$ เปลี่ยนไปเป็น สภาวะสวิตช์ใช้งานจริง $O_1(\text{อัดประจุ}) - N - O_2(\text{อัดประจุ}) - N - O_1(\text{คายประจุ})$ ฉะนั้น แรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ยังไม่คงที่มากนักในช่วงแรก $2T_s$ แต่อาจจะมียังค่าเพียงเล็กน้อย เพราะว่าค่าของกระแสไหลตลอดเข้าใกล้ศูนย์ในเวลา $2T_s$ ต่อไป ทำให้การอัดประจุและคายประจุแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน

ด้วยเหตุที่กล่าวมาทั้งหมดสรุปได้ว่าเทคนิค CRPWM มี 2 ปัจจัยที่ส่งผลกับการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์คือ ผลกระทบจากระดับมีอดดูเลต และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลเปลี่ยนตามสภาวะการสวิตช์ใช้งานจริง



(ก) ในกรณีที่แรงดันอ้างอิงมากกว่าศูนย์



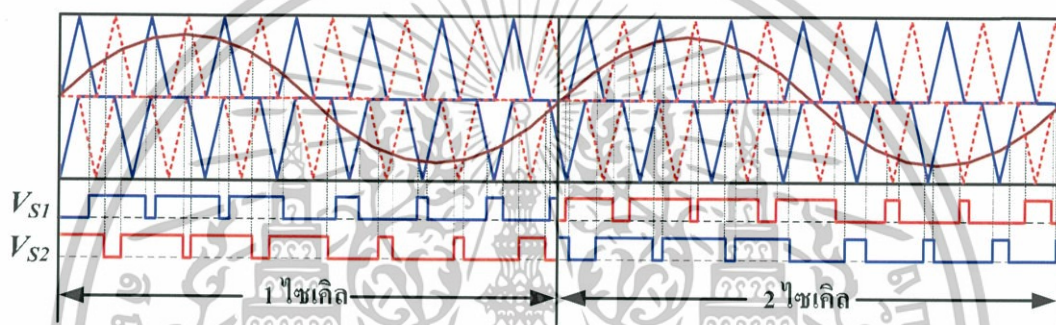
(ข) ในกรณีที่แรงดันอ้างอิงน้อยกว่าศูนย์

รูปที่ 3.6 สถานะการใช้งานจริงของกระแสไหลในอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 วิธีปรับปรุงเทคนิค CRPWM สำหรับการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ C_m

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ต้องการรูปแบบการสวิตช์ที่เวลาการอัดประจุและการคายประจุมีค่าเท่ากัน ซึ่งอยู่ในช่วงคาบเวลาการสวิตช์ เทคนิค PSPWM เป็นเทคนิคที่ดีที่สุดสำหรับการรักษาแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ แต่อย่างไรก็ตามเทคนิค PSPWM ยังมีสาร์มอริกส์มากของแรงดันค่านาออก ฉะนั้นหากพิจารณาเทคนิค CRPWM ที่สามารถปรับปรุงการรักษาแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์



รูปที่ 3.7 เทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกต (Pulse rotation technique)

สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

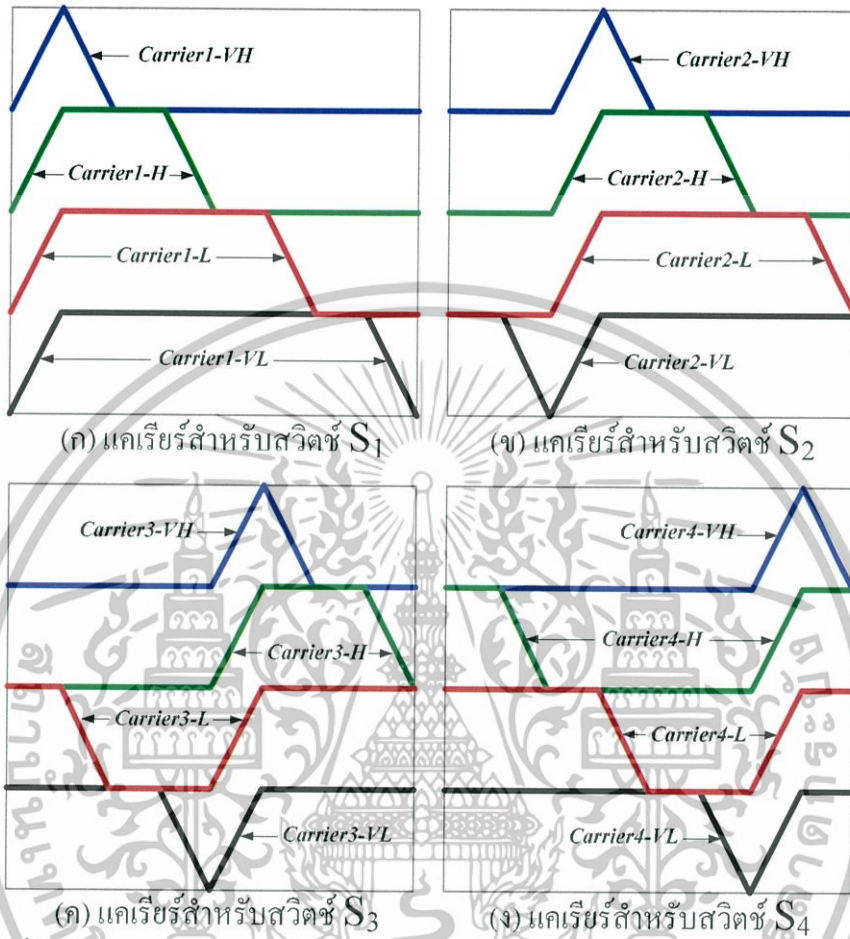
รูปที่ 3.7 แสดงการปรับปรุงสัญญาณเกตของเทคนิค CRPWM โดยใช้เทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกต (Pulse rotation technique) เข้ามาช่วย โดยเทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกต คือ การหมุนสัญญาณเกตในทุกๆ ไซเคิล หรือทุกๆ ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) เพื่อรักษาแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์

3.3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ได้นำเทคนิค CRPWM มาใช้ควบคุม ซึ่งเทคนิคนี้เกิดจากการนำเทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ [4] นำมาเพิ่มจำนวนแคเรียร์และระดับขั้นของแคเรียร์ โดยลักษณะสัญญาณ CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ เกิดจากการนำแคเรียร์รูปสามเหลี่ยมมาแบ่งออกเป็นชั้นๆ ซึ่งจำนวนชั้นจะเท่ากับ $(m - 1)$ เมื่อ $m = 5$ จำนวนชั้นของสัญญาณแคเรียร์จึงถูกแบ่งออกเป็น 4 ชั้นคือระดับ VH , H , L และ VL ซึ่งสวิตช์กำลัง 1 ตัว ใช้สัญญาณแคเรียร์ 4 สัญญาณในการควบคุมสวิตช์ จึงทำให้มีสัญญาณแคเรียร์

ทั้งหมด 16 สัญญาณ โดยสัญญาณแคเรียร์ชุดที่ 1 ควบคุมสวิตช์ S_{11} สัญญาณแคเรียร์ชุดที่ 2

ควบคุมสวิตช์ S_2 , สัญญาณแคเรียร์ชุดที่ 3 ควบคุมสวิตช์ S_3 และสัญญาณแคเรียร์ชุดที่ 4 ควบคุมสวิตช์ S_4 ดังรูปที่ 3.8

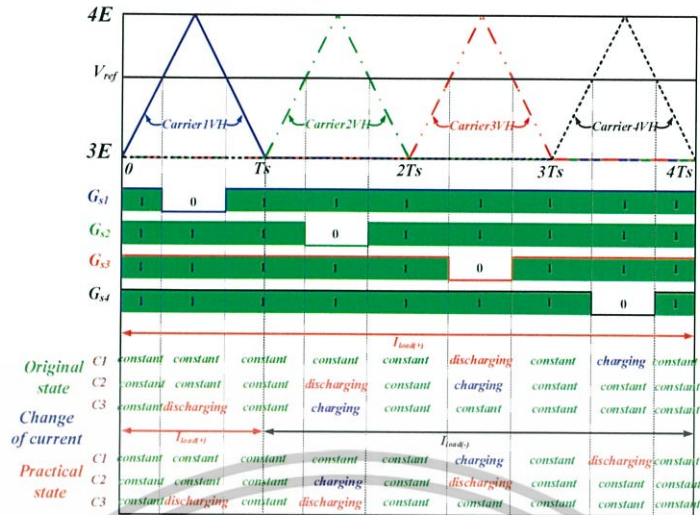


รูปที่ 3.8 ลักษณะสัญญาณแคเรียร์เทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

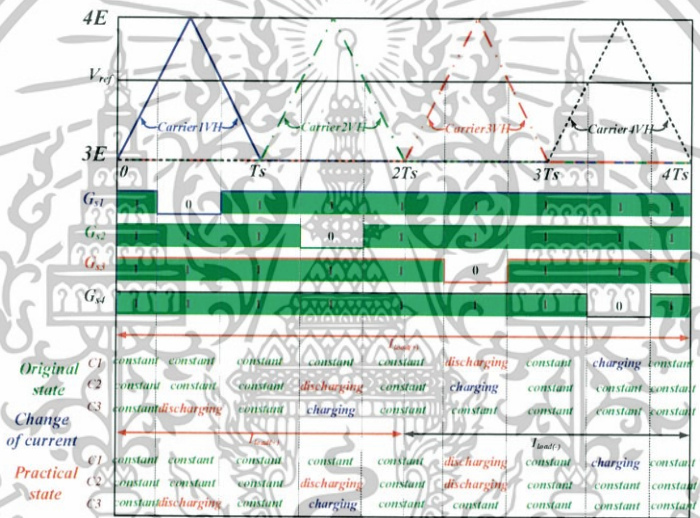
3.3.1 การพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลในเทคนิค CRPWM แบบ 5 ระดับ

การพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลของเทคนิค CRPWM แบบ 5 ระดับโดยในรูปที่ 3.9(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลในช่วงคาบเวลา T_s จากรูปเห็นได้ว่าการสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุใน 1 ไซเคิลของสัญญาณแคเรียร์หรือในช่วงคาบเวลา $4T_s$ ของตัวเก็บประจุ C1 และ C2 สามารถสมดุลแรงดันได้ แต่ตัวเก็บประจุ C3 ไม่สามารถสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุได้ เนื่องจากใน 1 ไซเคิลของสัญญาณแคเรียร์หรือในช่วงคาบเวลา $4T_s$ ตัวเก็บประจุ C3 มีสถานะคายประจุเพียงอย่างเดียว จึงส่งผลให้ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุลดลงในช่วงคาบเวลา $4T_s$ นั้นแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลในช่วงคาบเวลา T_s ส่งผลกระทบกับการสมดุลแรงดันของตัวเก็บประจุ C3

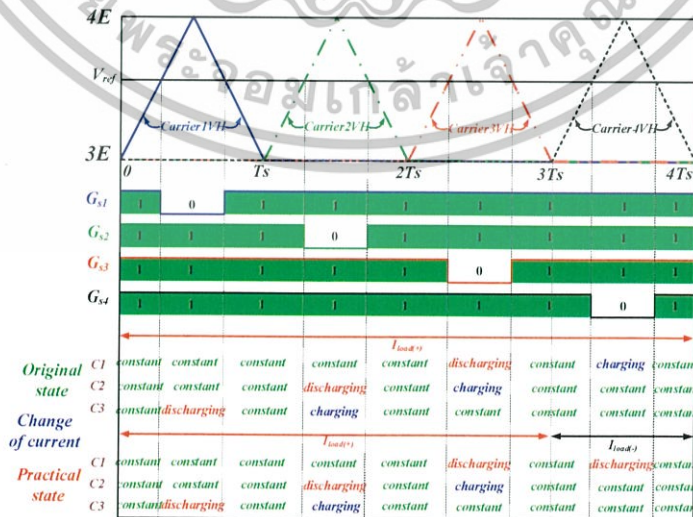
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การเปลี่ยนแปลงกระแสไหลดในช่วง T_s



(ข) การเปลี่ยนแปลงกระแสไหลดในช่วง $2T_s$



(ค) การเปลี่ยนแปลงกระแสไหลดในช่วง $3T_s$

รูปที่ 3.9 สถานะการใช้งานจริงของกระแสไหลดในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

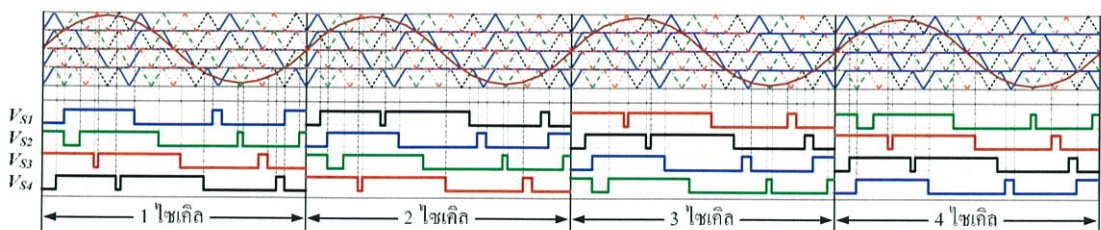
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นประโยชน์ประการใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลตลอดในช่วงคาบเวลา $2T_s$ จากรูปเห็นได้ว่าการสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุใน 1 ไชเคิลของสัญญาณแคเรียร์หรือในช่วงคาบเวลา $4T_s$ ของตัวเก็บประจุ C1 และ C3 สามารถสมดุลแรงดันได้ แต่ตัวเก็บประจุ C2 ไม่สามารถสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุได้ เนื่องจากใน 1 ไชเคิลของสัญญาณแคเรียร์หรือในช่วงคาบเวลา $4T_s$ ตัวเก็บประจุ C3 มีสถานะคายประจุเพียงอย่างเดียว จึงส่งผลให้ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุลดลงในช่วงคาบเวลา $4T_s$ นั้นแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลตลอดในช่วงคาบเวลา $2T_s$ ส่งผลกระทบกับการสมดุลแรงดันของตัวเก็บประจุ C2

รูปที่ 3.9(ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลตลอดในช่วงคาบเวลา $3T_s$ จากรูปเห็นได้ว่าการสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุใน 1 ไชเคิลของสัญญาณแคเรียร์หรือในช่วงคาบเวลา $4T_s$ ของตัวเก็บประจุ C2 และ C3 สามารถสมดุลแรงดันได้ แต่ตัวเก็บประจุ C1 ไม่สามารถสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุได้ เนื่องจากใน 1 ไชเคิลของสัญญาณแคเรียร์หรือในช่วงคาบเวลา $4T_s$ ตัวเก็บประจุ C3 มีสถานะคายประจุเพียงอย่างเดียว จึงส่งผลให้ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุลดลงในช่วงคาบเวลา $4T_s$ นั้นแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลตลอดในช่วงคาบเวลา $3T_s$ ส่งผลกระทบกับการสมดุลแรงดันของตัวเก็บประจุ C1

3.3.2 เทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกิดสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

ลักษณะของสัญญาณเกิดของเทคนิค CRPWM เมื่อสังเกตจะพบว่ามีความคล้ายกับสัญญาณเกิดของเทคนิค PSPWM ดังรูปในบทที่ 2 (รูปที่ 2.10) ซึ่งทำให้เทคนิค CRPWM น่าจะสามารถรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้เช่นเดียวกับเทคนิค PSPWM แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเทคนิค CRPWM ไม่ได้คำนึงถึงการเปลี่ยนทิศทางของกระแสไหลตลอดในช่วงครึ่งคาบเวลาของแรงดันขาออก จึงทำให้การรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ยังทำได้ไม่สมบูรณ์ [4] จึงได้มีการนำเทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกิด (Pulse rotation technique) มาช่วย โดยเป็นการหมุนวนสัญญาณเกิดทุกๆ ไชเคิลหรือทุกๆ สัญญาณมูลฐาน (Fundamental frequency) ดังรูปที่ 3.10



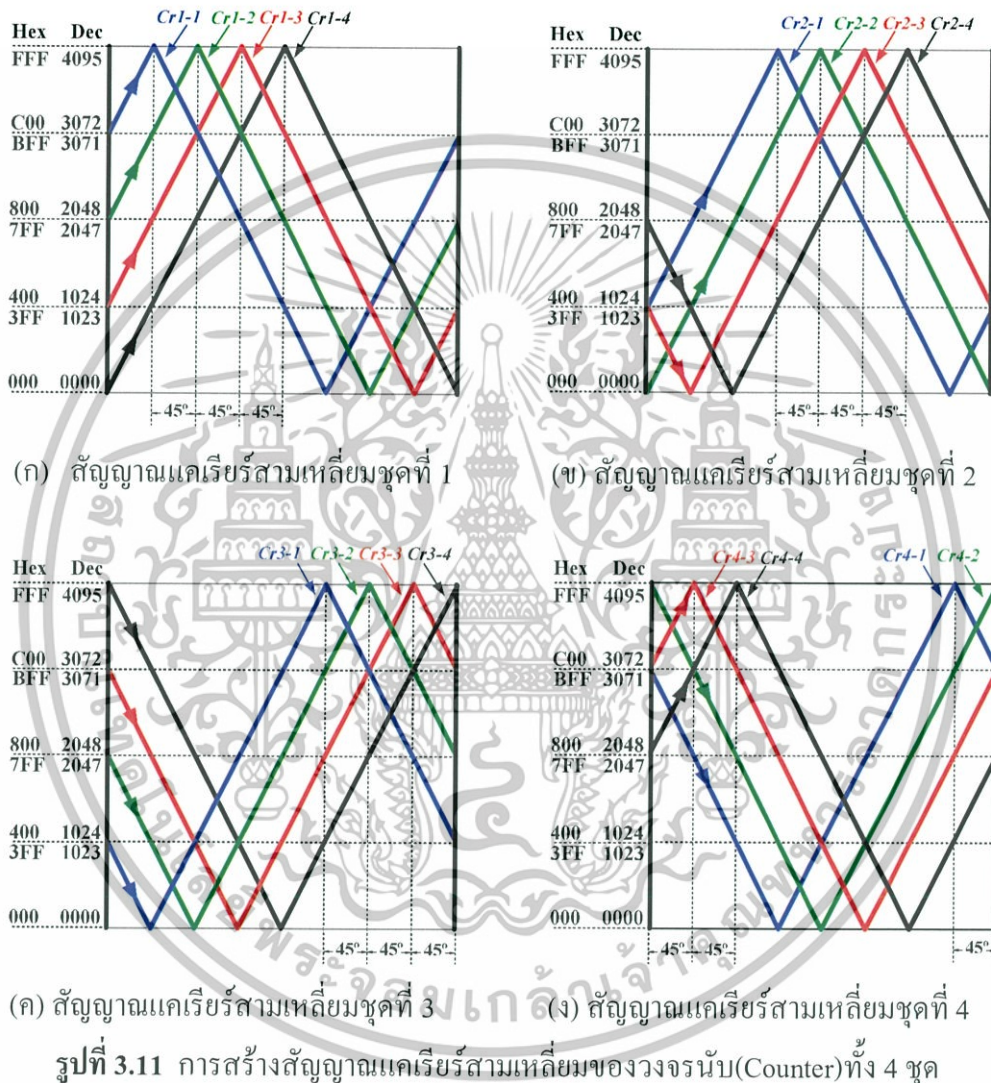
รูปที่ 3.10 เทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกิด (Pulse rotation technique)

สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสร้างเทคนิคCRPWMแบบ5ระดับด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA)

การออกแบบโปรแกรมได้กระทำบนโปรแกรม Quartus II 8.1 Web Edition โดยการสร้างบล็อกไดอะแกรมจาก MEGA Function ทำให้สามารถลดข้อผิดพลาดในการออกแบบ ไม่ยุ่งยากกับวงจรที่ซับซ้อน และง่ายต่อการตรวจสอบวงจร



การสร้างวงจรมีจุดดูแลสัญญาณเกิดสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA) จะประกอบไปด้วยวงจรถอดรหัส (Decoder), หน่วยเก็บข้อมูลชั่วคราว (Latch register), วงจรรนับ (Counter), วงจรเปรียบเทียบ (Comparator), วงจรสร้างความถี่ (Clock signal) และวงจรประวิงเวลา (Dead-time) ซึ่งวงจรถอดรหัสสามารถเชื่อมต่อกับระบบไมโครโปรเซสเซอร์ผ่านทางบัสข้อมูล 12 บิต และบัสแอสแตเรส 3 บิต ซึ่งสามารถควบคุมการ เปิด-ปิด สัญญาณเกิดได้โดยผ่านทางไมโครโปรเซสเซอร์ สัญญาณเกิดที่ทำการสร้างคือ เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM)

จากรูปที่ 3.11 เป็นรูปแบบการสร้างสัญญาณแคเรียร์สามเหลี่ยมเพื่อจะนำไปทำเป็นสัญญาณแคเรียร์เทคนิค CRPWM โดยสัญญาณแคเรียร์สามเหลี่ยมมีทั้งหมด 4 ชุดและในแต่ละชุดประกอบด้วย 4 แคเรียร์ โดยแต่ละแคเรียร์มีเฟสต่างกัน 45 องศาและในแต่ละแคเรียร์มีขอดคลื่นเท่ากันในแต่ละแคเรียร์ จากลักษณะดังกล่าวสามารถนำไปสร้างในอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA) ด้วยภาษา VHDL ได้ดังนี้ (ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกศึกษาบัสข้อมูล 12 บิต)

การสร้างสัญญาณแคเรียร์สามเหลี่ยมในชุดที่ 1 ดังรูปที่ 3.11(ก) สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของแคเรียร์(เป็น Hexadecimal หรือ Unsigned Decimal) ดังต่อไปนี้คือ Cr1-1 = C00, 3072(สถานะนับขึ้น), Cr1-2 = 800, 2048(สถานะนับขึ้น), Cr1-3 = 400, 1024(สถานะนับขึ้น), Cr1-4 = 000, 0000(สถานะนับขึ้น) จากนั้นเงื่อนไขการนับขึ้น-ลง เป็นตัวกำหนดขอดคลื่นของวงจรรนับ โดยเงื่อนไขการนับขึ้น-ลงได้กำหนดการเริ่มต้นในโปรแกรม

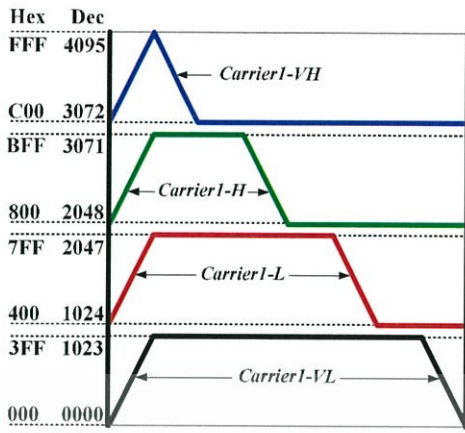
การสร้างสัญญาณแคเรียร์สามเหลี่ยมในชุดที่ 2 ดังรูปที่ 3.11(ข) สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของแคเรียร์(เป็น Hexadecimal หรือ Unsigned Decimal) ดังต่อไปนี้คือ Cr2-1 = 400, 1024(สถานะนับขึ้น), Cr2-2 = 000, 0000(สถานะนับขึ้น), Cr2-3 = 3FF, 1023(สถานะนับลง), Cr2-4 = 7FF, 2047(สถานะนับลง) จากนั้นเงื่อนไขการนับขึ้น-ลง เป็นตัวกำหนดขอดคลื่นของวงจรรนับ โดยเงื่อนไขการนับขึ้น-ลงได้กำหนดการเริ่มต้นในโปรแกรม

การสร้างสัญญาณแคเรียร์สามเหลี่ยมในชุดที่ 3 ดังรูปที่ 3.11(ค) สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของแคเรียร์(เป็น Hexadecimal หรือ Unsigned Decimal) ดังต่อไปนี้คือ Cr3-1 = 3FF, 1023(สถานะนับลง), Cr3-2 = 7FF, 2047(สถานะนับลง), Cr3-3 = BFF, 3071(สถานะนับลง), Cr3-4 = FFF, 4095(สถานะนับลง) จากนั้นเงื่อนไขการนับขึ้น-ลง เป็นตัวกำหนดขอดคลื่นของวงจรรนับ โดยเงื่อนไขการนับขึ้น-ลงได้กำหนดการเริ่มต้นในโปรแกรม

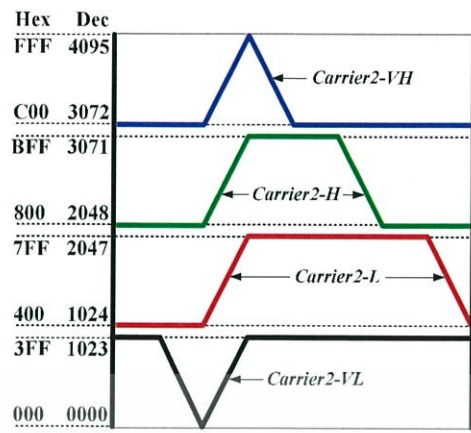
การสร้างสัญญาณแคเรียร์สามเหลี่ยมในชุดที่ 4 ดังรูปที่ 3.11(ง) สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของแคเรียร์(เป็น Hexadecimal หรือ Unsigned Decimal) ดังต่อไปนี้คือ Cr4-1 = BFF, 3071(สถานะนับลง), Cr4-2 = FFF, 4095(สถานะนับลง), Cr4-3 = C00, 3072(สถานะนับขึ้น), Cr4-4 = 800, 2048(สถานะนับขึ้น) จากนั้นเงื่อนไขการนับขึ้น-ลง เป็นตัวกำหนดขอดคลื่นของวงจรรนับ โดยเงื่อนไขการนับขึ้น-ลงได้กำหนดการเริ่มต้นในโปรแกรม

ดังนั้นแคเรียร์สามเหลี่ยมทั้ง 4 ชุด ต้องใช้วงจรรนับ (counter) ที่เขียนด้วยภาษาVHDL ทั้งหมด 16 ตัว และนำสัญญาณสามเหลี่ยมที่สร้างมาแล้ว เข้าตัวจำกัดสัญญาณ (limiter) เพื่อให้ได้สัญญาณแคเรียร์เทคนิค CRPWM ดังรูปที่ 3.12 โดยในแต่ละขั้นของสัญญาณแคเรียร์ 1 ชุด จะกำหนดขอบบนและขอบล่างของตัวจำกัดสัญญาณ(limiter) ดังนี้ ในขั้น VH กำหนดให้ขอบบน = 4095, ขอบล่าง = 3072 และในขั้น H กำหนดให้ขอบบน = 3071, ขอบล่าง = 2048 และในขั้น L กำหนดให้ขอบบน = 2047, ขอบล่าง = 1024 และในขั้น VL กำหนดให้ขอบบน = 1023, ขอบล่าง = 0000

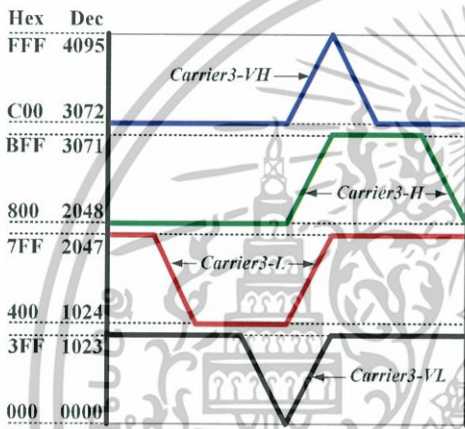
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



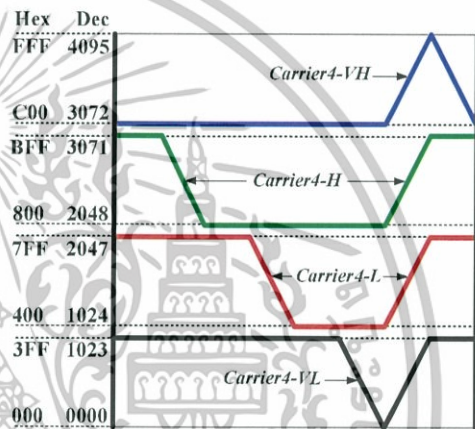
(ก) สัญญาณแคเรียร์ชุดที่ 1



(ข) สัญญาณแคเรียร์ชุดที่ 2

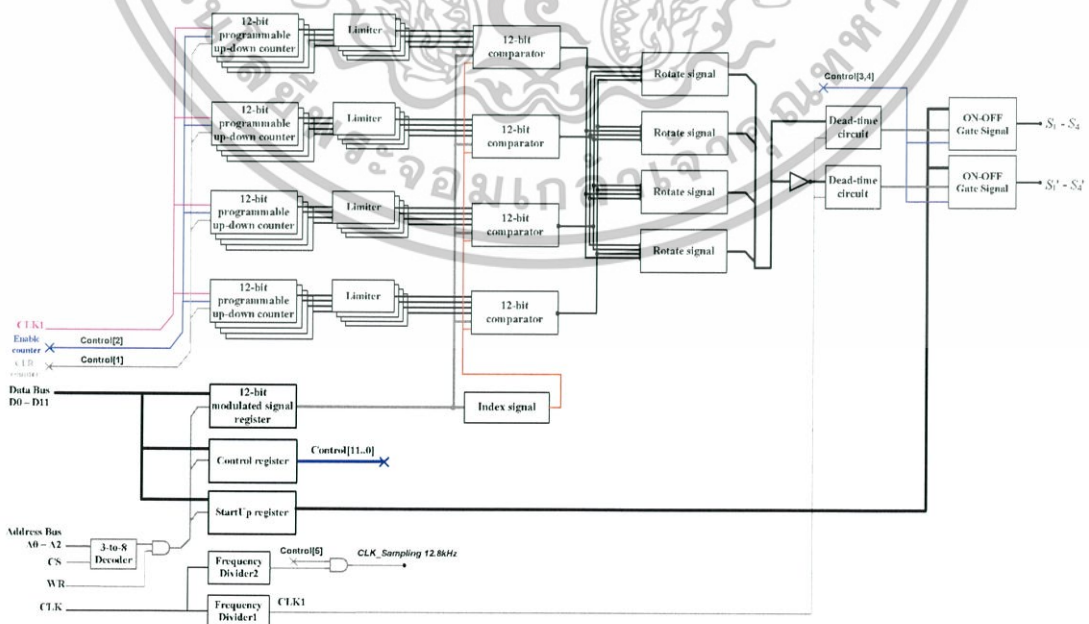


(ค) สัญญาณแคเรียร์ชุดที่ 3



(ง) สัญญาณแคเรียร์ชุดที่ 4

รูปที่ 3.12 การสร้างสัญญาณแคเรียร์เทคนิค CRPWM ของวงจรนับ(Counter)ทั้ง 4 ชุด



รูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมวงจรมีอคติใน 1 เฟสด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (FPGA) ที่ใช้เทคนิค CRPWM

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.13 แสดงไดอะแกรมวงจรมือถือคุณเลขใน 1 เฟสด้วยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (FPGA)ที่ใช้เทคนิค CRPWM โดยมีหน่วยเก็บข้อมูลชั่วคราว (Latch register) 3 ตัว ซึ่ง

ตัวที่ 1 คือ 12-bit modulated signal register ทำหน้าที่เก็บสัญญาณไซน์

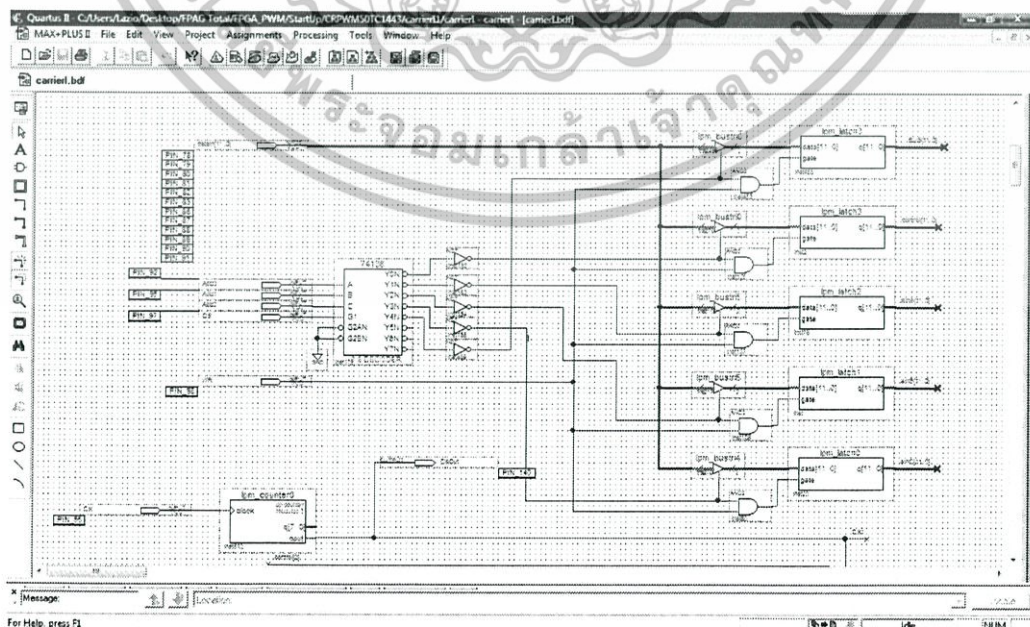
ตัวที่ 2 คือ Control register มีหลายหน้าที่ คือ

- ควบคุมการรีเซ็ตการนับขึ้น-นับลงของวงจรรนับ(Counter)
- ควบคุมการทำงานของวงจรรนับ(Counter)
- ควบคุมการเปิด-ปิดของสัญญาณเกต
- ควบคุมความถี่สำหรับแฮมปลิงไซน์

ตัวที่ 3 คือ StartUp register ทำหน้าที่เก็บข้อมูลสัญญาณเกตเริ่มต้น ณ ขณะตอนสตาร์ทอัพ เพื่ออัดประจุแรงดันที่ตัวเก็บประจุพลายอังก์ให้ได้แรงดันตามที่ต้องการ

3.4.1 เปรียบเทียบการใช้ resource ของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มใน FPGA

การสร้างสัญญาณแคเรียร์พีดับบลิวเอ็มในการทดลองได้ใช้อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA) ในการสร้าง ซึ่งอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA) จัดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดโปรแกรมได้ที่มีโครงข่ายการเชื่อมต่อภายในแบบแมตริกซ์ โครงสร้างภายในของอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA) นั้นสามารถโปรแกรมให้มีหน้าที่การทำงานเหมือนลอจิกเกตพื้นฐาน เช่น AND, OR, XOR, NOT หรือรวมกันหลายชนิด (combinational logic) เพื่อให้ทำหน้าที่ที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 3.14 โปรแกรมที่ใช้ในการเขียน FPGA โปรแกรม Quartus II 8.1 Web Edition เป็นต้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 เป็นการแสดงโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนในอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA) โดยใช้โปรแกรม Quartus II 8.1 Web Edition เขียนโปรแกรม ซึ่งการสร้างสัญญาณแคเรียร์แต่ละเทคนิคได้ใช้ resource ต่างกันไปขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของแต่ละเทคนิค ซึ่งในรูปที่ 3.15 (ก) แสดง resource ในอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA) ของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM) มีการใช้ไป 776 ใน 2880 ของอุปกรณ์ลอจิกทั้งหมด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 27 %

รูปที่ 3.15(ข) แสดง resource ในอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA) ของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (IPDPWM) มีการใช้ไป 790 ใน 2880 ของอุปกรณ์ลอจิกทั้งหมดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 27 %

รูปที่ 3.15(ค) แสดง resource ในอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้(FPGA) ของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) มีการใช้ไป 2203 ใน 2880 ของอุปกรณ์ลอจิกทั้งหมดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 76 %

จากรูป 3.15 สามารถสรุปได้ว่าเทคนิค CRPWM มีการใช้ resource มากกว่าเทคนิค PSPWM และเทคนิค IPDPWM เพราะเนื่องจากวงจรมีความซับซ้อนมากกว่า 2 เทคนิคดังกล่าวทำให้ต้องใช้จำนวน resource มากตามไปด้วย

Flow Summary	
Flow Status	Successful - Mon Sep 14 15:38:37 2009
Quartus II Version	8.1 Build 163 10/28/2008 SJ Web Edition
Revision Name	PSPWM50TC1443
Top-level Entity Name	PSPWM50TC1443
Family	ACEX1K
Device	EP1K50TC144-3
Timing Models	Final
Met timing requirements	No
Total logic elements	776 / 2,880 (27 %)
Total pins	43 / 102 (42 %)
Total memory bits	0 / 40,960 (0 %)
Total PLLs	0

(ก) เทคนิค PSPWM

Flow Summary	
Flow Status	Successful - Mon Sep 14 15:43:59 2009
Quartus II Version	8.1 Build 163 10/28/2008 SJ Web Edition
Revision Name	IPDPWM50TC1443
Top-level Entity Name	IPDPWM50TC1443
Family	ACEX1K
Device	EP1K50TC144-3
Timing Models	Final
Met timing requirements	No
Total logic elements	790 / 2,880 (27 %)
Total pins	43 / 102 (42 %)
Total memory bits	0 / 40,960 (0 %)
Total PLLs	0

(ข) เทคนิค IPDPWM

Flow Summary	
Flow Status	Successful - Tue Jan 26 11:10:55 2010
Quartus II Version	8.1 Build 163 10/28/2008 SJ Web Edition
Revision Name	carrier1
Top-level Entity Name	carrier1
Family	ACEX1K
Device	EP1K50TC144-3
Timing Models	Final
Met timing requirements	No
Total logic elements	2,203 / 2,880 (76 %)
Total pins	44 / 102 (43 %)
Total memory bits	0 / 40,960 (0 %)
Total PLLs	0

(ค) เทคนิค CRPWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สรุปที่ 3.15 การใช้ resource ของเทคนิคพีดีบีพลิวเอ็มใน FPGA ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSCAD/EMTDC

4.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง 3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มคือ เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM) เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (IPDPWM) และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบการจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) โดยหัวข้อทำการศึกษาคือ ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันสาย และความสามารถในการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการนำไปทดลองกับเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

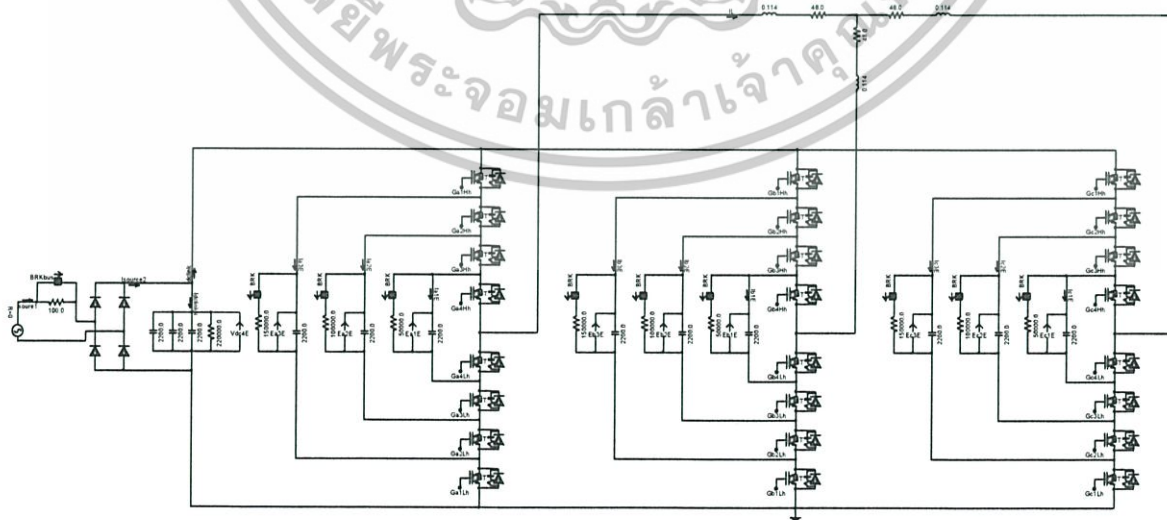
4.2 แบบจำลองทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ แบบ 3 เฟส

การสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC ดังรูปที่ 4.1 โดยการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าได้ทำการจำลองเป็นแบบ 3 เฟส ซึ่งทำการต่อโหลดเป็นแบบดาว (Star) และมีขั้นตอนในการจำลองแตกต่างกันไปตามหัวข้อที่ทำการศึกษาคือ ในเรื่องคุณภาพของแรงดันด้านขาออก ได้ทำการจำลองในสภาวะแรงดันที่ตัวเก็บประจุมีค่าคงที่ (ใช้แหล่งจ่าย DC แทนตัวเก็บประจุ) ส่วนในเรื่องความสามารถในการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ ต้องใช้แรงดันจากตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์ในการสร้างแรงดันในระดับต่างๆ โดยในช่วงก่อนการสร้างแรงดันทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ได้ใช้แหล่งจ่าย DC สร้างแรงดันให้กับตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ของแต่ละตัว ผ่านทางอุปกรณ์ช่วยในโปรแกรม คือ ไทเมอร์เบรกเกอร์ลอจิก (Timer breaker logic) ทำการตั้งเวลาการเปิดวงจร (Open circuit) ล่วงหน้า เมื่อระดับแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ถึงค่าที่ตั้งไว้ ก็ให้เปิดวงจร โดยทำการกำหนดแรงดันดีซีลิงค์เท่ากับ 200 โวลต์ และแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ เท่ากับ 150 โวลต์, 100 โวลต์ และ 50 โวลต์ ตามลำดับ

ในการจำลองนั้นได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองดังตารางที่ 4.1 โดยทั้ง 3 เทคนิคใช้พารามิเตอร์ค่าเดียวกันหมด แต่กเว้นความถี่แคเรียร์ไม่เท่ากัน โดยกำหนดให้เทคนิค PSPWM และ CRPWM มีค่าเท่ากันที่ 750 Hz ส่วน IPDPWM มีความถี่แคเรียร์เป็น 3000 Hz

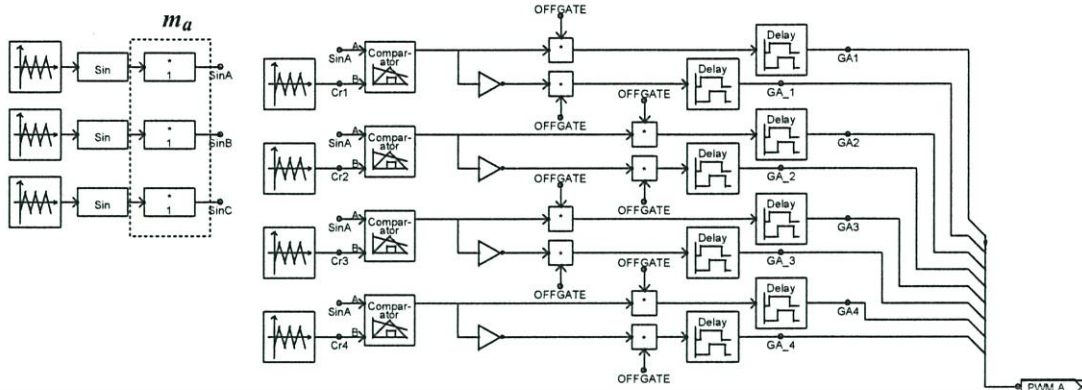
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์ในการจำลอง	เทคนิค PSPWM	เทคนิค IPDPWM	เทคนิค CRPWM
แรงดันดีซีลิงก์ (DC-link)	200 V		
ความถี่ด้านขาออก (f_m)	50 Hz		
ความถี่แคเรียร์ (f_{cr})	750 Hz	3000 Hz	750 Hz
ความถี่ของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง ($f_{sw,dev}$)	750 Hz		
ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ($f_{sw,inv}$)	3000 Hz		
มอดดูเลชันอินเด็กซ์ (m_a)	1		
ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3)	2200 μF		
โหลดความต้านทาน (R)	48 Ω		
โหลดตัวเหนี่ยวนำ (L)	0.114 H		
เพาเวอร์แฟกเตอร์ (PF)	0.8 lagging		

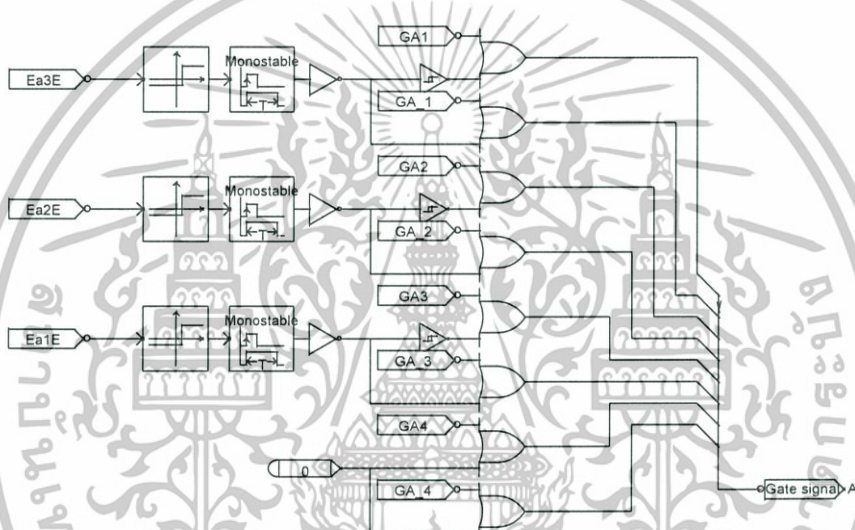


รูปที่ 4.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

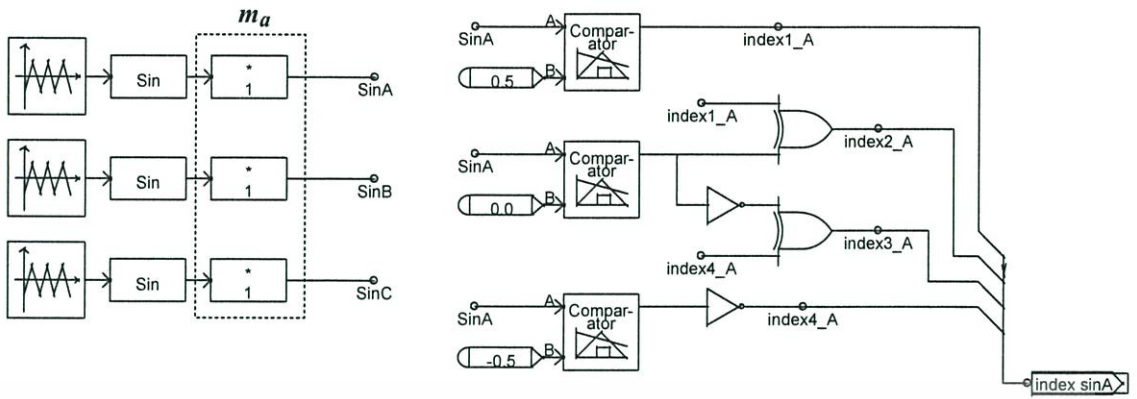


รูปที่ 4.2 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มของเทคนิค PSPWM และเทคนิค IPDPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส

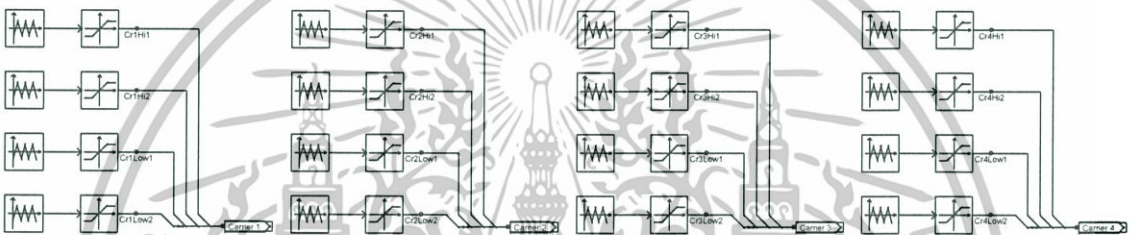


รูปที่ 4.3 แบบจำลองวงจรช่วยสร้างระดับแรงดันเริ่มต้นให้กับตัวเก็บประจุฟลายอิงคัก่อนสร้างแรงดันทางด้านขาออก

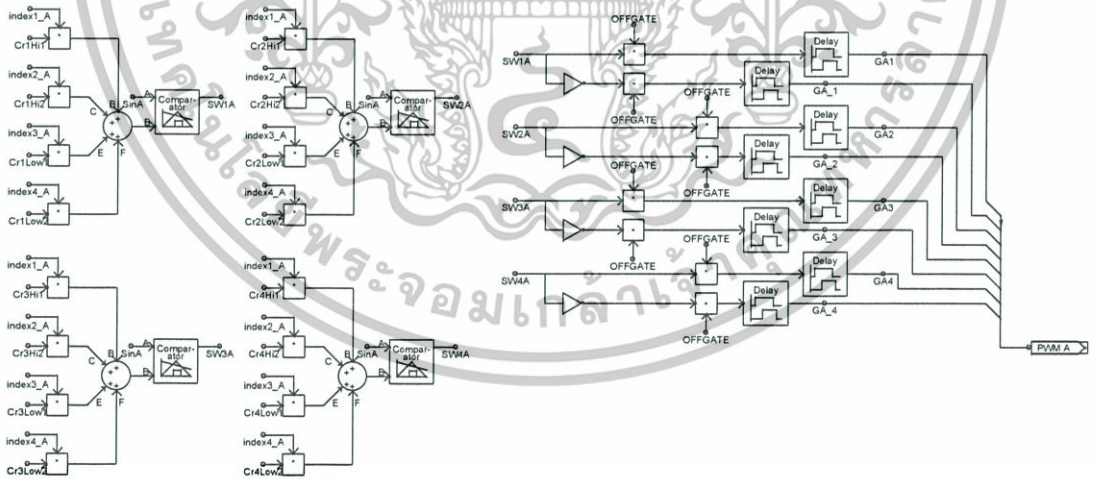
รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองทางไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์โดยต่อโหลดเป็นแบบวาย (Star) และรูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มของเทคนิค PSPWM และเทคนิค IPDPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส และรูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองวงจรช่วยสร้างระดับแรงดันเริ่มต้นให้กับตัวเก็บประจุฟลายอิงคัก่อนสร้างแรงดันทางด้านขาออก และรูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์และสัญญาณเล็ทแคเรียร์ของเทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิด ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส และรูปที่ 4.5 แสดงแบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณแคเรียร์ของเทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส และรูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มของเทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน



รูปที่ 4.4 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์และสัญญาณเลือกแคเรียร์ของเทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส



รูปที่ 4.5 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณแคเรียร์ของเทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส



รูปที่ 4.6 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพิดับบลิวเอ็มของเทคนิค CRPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การจำลองและผลการจำลองความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกซ์ของแรงดันสาย(%THDv)

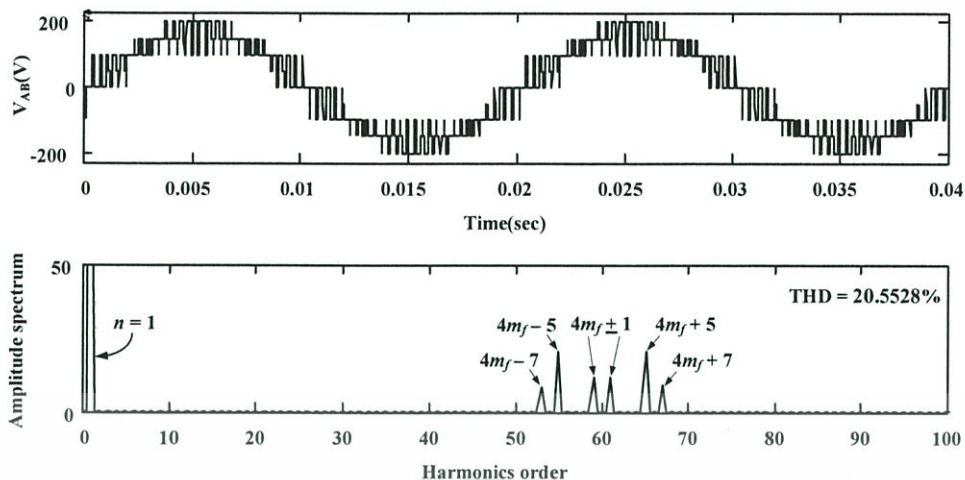
การจำลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง 3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มคือ เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์(PSPWM) เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์(IPDPWM) และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่(CRPWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยในหัวข้อนี้คือความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกซ์ของแรงดันสายซึ่งได้พิจารณาผลสเปกตรัมของฮาร์มอนิกซ์ของแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย(Line voltage) โดยในการจำลองได้กำหนดให้ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์เป็นค่าคงที่

ผลของสัญญาณที่ได้จากการจำลองของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ด้วยเทคนิค PSPWM แสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งทำงานที่พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ $m_f = 15$, $f_m = 50$ Hz, $f_{cr} = 750$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz ซึ่งผลการจำลองที่ได้แสดงแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} และสเปกตรัมฮาร์มอนิกซ์ของแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB/M-file โดยพิจารณาถึงฮาร์มอนิกซ์อันดับที่ 100th ที่ค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ค่าต่างๆ

ผลของสัญญาณที่ได้จากการจำลองของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ด้วยเทคนิค IPDPWM แสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งทำงานที่พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ $m_f = 60$, $f_m = 50$ Hz, $f_{cr} = 3000$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz ซึ่งผลการจำลองที่ได้แสดงแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} และสเปกตรัมฮาร์มอนิกซ์ของแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB/M-file โดยพิจารณาถึงฮาร์มอนิกซ์อันดับที่ 100th ที่ค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ค่าต่างๆ

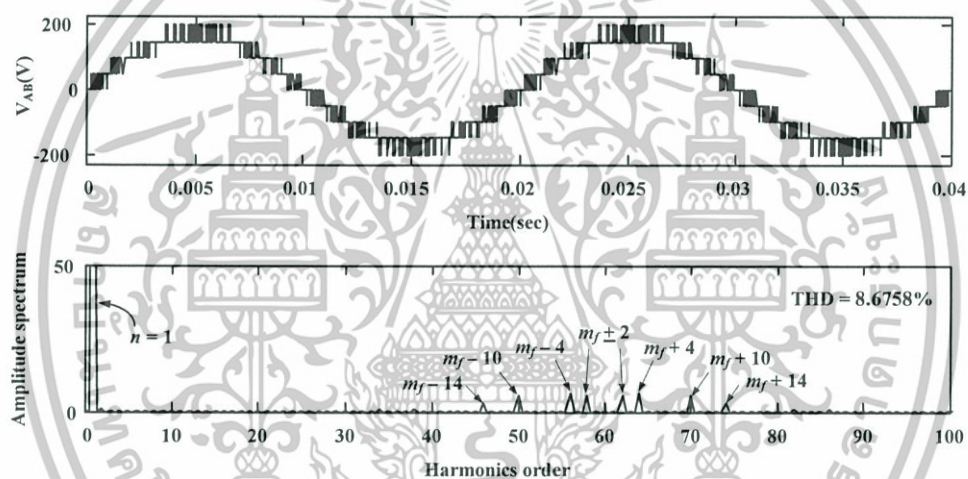
ผลของสัญญาณที่ได้จากการจำลองของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ด้วยเทคนิค CRPWM แสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งทำงานที่พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ $m_f = 15$, $f_m = 50$ Hz, $f_{cr} = 750$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz ซึ่งผลการจำลองที่ได้แสดงแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} และสเปกตรัมฮาร์มอนิกซ์ของแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB/M-file โดยพิจารณาถึงฮาร์มอนิกซ์อันดับที่ 100th ที่ค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ค่าต่างๆ ซึ่งผลการคำนวณ %THDv จากสเปกตรัมของฮาร์มอนิกซ์ของแรงดันด้านขาออก V_{AB} ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบต่างๆ ที่ค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ค่าต่างๆ ด้วยโปรแกรม MATLAB/M-file โดยพิจารณาถึงฮาร์มอนิกซ์อันดับที่ 100th ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และนำข้อมูลทั้งหมดไปพล็อตเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.10

ในรูปที่ 4.10 แสดงกราฟสรุปผลของ % THDv โดยแกนตั้งเป็น%THD ส่วนแกนนอนเป็นมอดดูเลชันอินเด็กซ์ ซึ่งจากกราฟเห็นได้ว่าเทคนิค CRPWM ให้ผล %THDv ดีเท่ากับเทคนิค IPDPWM ตลอดย่านการมอดดูเลต และมีผล % THDv ดีกว่าเทคนิค PSPWM



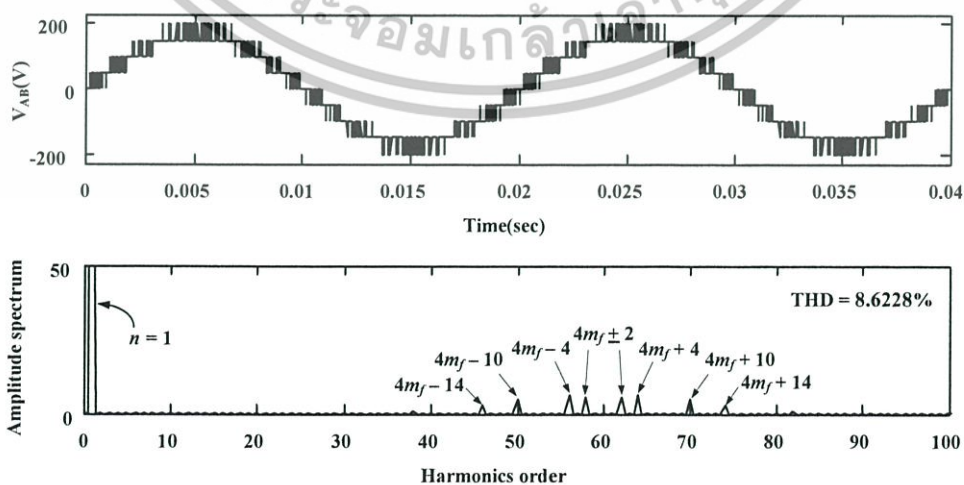
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกของเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 1$

$$(m_f = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกของเทคนิค IPDPWM ที่ $m_a = 1$

$$(m_f = 60, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 3000 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$

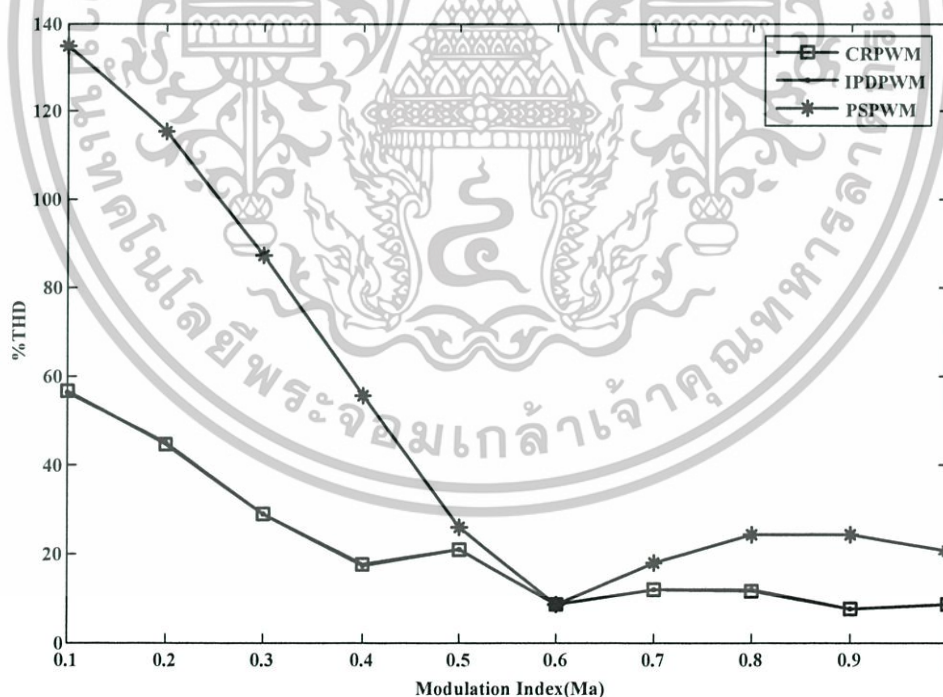


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกของเทคนิค CRPWM ที่ $m_a = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน ($m_f = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz}$ และ $f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz}$) มาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุป %THD_v ของแรงดันด้านขาออก V_{AB} ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค SPWM ชนิดต่างๆ

Ma	%THD _v ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค SPWM ชนิดต่างๆ		
	CRPWM	IPDPWM	PSPWM
0.1	56.7223	56.444	134.677
0.2	44.6731	44.9128	115.5052
0.3	28.8345	28.9804	87.2229
0.4	17.4508	17.366	55.5378
0.5	20.8131	20.8413	26.0547
0.6	8.4613	8.4334	8.4833
0.7	12.0122	12.022	17.7813
0.8	11.6758	11.7122	24.1384
0.9	7.4278	7.4414	24.0762
1.0	8.6228	8.6758	20.5528



รูปที่ 4.10 กราฟสรุป %THD_v ของแรงดันด้านขาออก V_{AB} ที่ได้จากการจำลองด้วย SPWM ชนิดต่างๆที่ ค่า $0.1 \leq m_a \leq 1.0$ พิจารณาถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 100th

4.4 การจำลองและผลการจำลองในส่วนของการรักษาสมมูลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงก์ปาซิเตอร์

การจำลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง 3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มคือ เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM) เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (IPDPWM) และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงก์ปาซิเตอร์ โดยในหัวข้อนี้คือการรักษาสมมูลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ ซึ่งต้องใช้แรงดันจากตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ในการสร้างระดับแรงดันต่างๆ โดยในช่วงก่อนการสร้างแรงดันด้านขาออก ได้ใช้แหล่งจ่าย DC สร้างแรงดันให้กับตัวเก็บประจุฟลายอิงก์แต่ละตัว ผ่านทางอุปกรณ์ช่วยในโปรแกรมคือ ไทเมอร์เบรกเกอร์ลอจิก (Timer breaker logic) ทำการตั้งเวลาการเปิดวงจร (Open circuit) ล่วงหน้า เมื่อระดับแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ถึงค่าที่ตั้งไว้ ก็ให้เปิดวงจร โดยทำการกำหนดแรงดันดีซีลิงค์เท่ากับ 200 โวลต์ และแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ เท่ากับ 150 โวลต์, 100 โวลต์ และ 50 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองได้พิจารณา 2 ส่วน คือ กระแสและแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ของแต่ละเทคนิคพีดับบลิวเอ็มต่างๆ และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานของแต่ละเทคนิคพีดับบลิวเอ็มด้วย

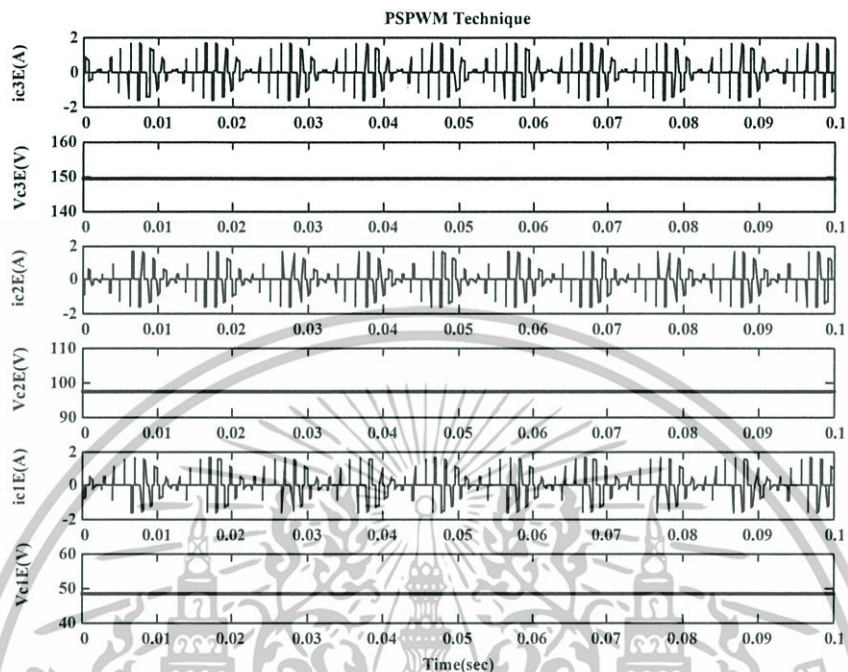
รูปที่ 4.11 - 4.12 และรูปที่ 4.19 แสดงผลการจำลองของเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$ โดยรูปที่ 4.11 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ (C_1, C_2, C_3) และรูปที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ (C_1, C_2, C_3) และรูปที่ 4.19 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}), แรงดันสายเทียบกับจุดนิวตรอน (V_{An}), แรงดันสายเทียบกับดีซีลิงค์ด้านลบ (V_{A0}) และกระแสสาย (I_L)

รูปที่ 4.13 - 4.14 และรูปที่ 4.20 แสดงผลการจำลองของเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$ โดยรูปที่ 4.13 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ (C_1, C_2, C_3) และรูปที่ 4.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ (C_1, C_2, C_3) และรูปที่ 4.20 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}), แรงดันสายเทียบกับจุดนิวตรอน (V_{An}), แรงดันสายเทียบกับดีซีลิงค์ด้านลบ (V_{A0}) และกระแสสาย (I_L)

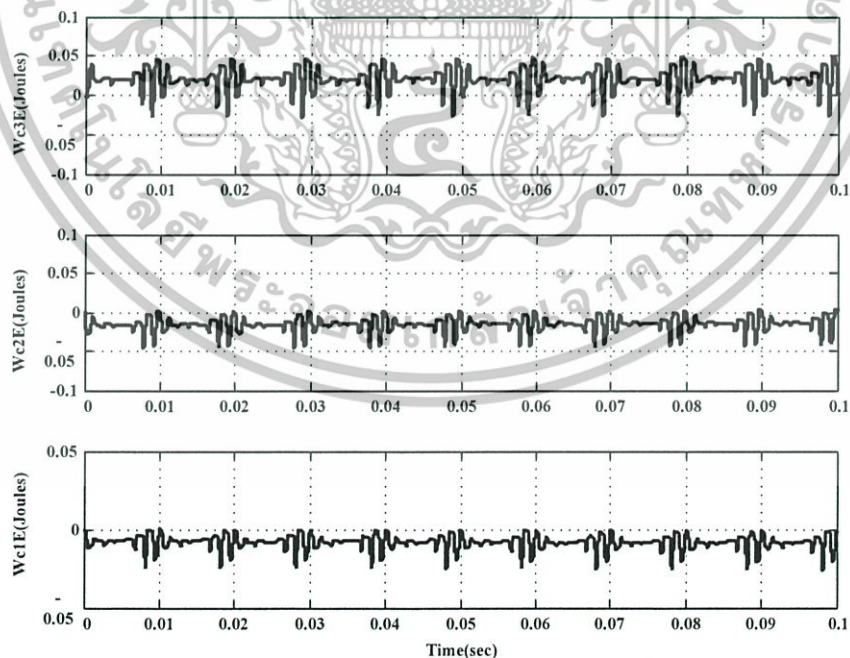
รูปที่ 4.15 - 4.16 และรูปที่ 4.21 แสดงผลการจำลองของเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$ โดยรูปที่ 4.15 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ (C_1, C_2, C_3) และรูปที่ 4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ (C_1, C_2, C_3) และรูปที่ 4.21 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}), แรงดันสายเทียบกับจุดนิวตรอน (V_{An}), แรงดันสายเทียบกับดีซีลิงค์ด้านลบ (V_{A0}) และกระแสสาย (I_L)

รูปที่ 4.17 - 4.18 และรูปที่ 4.22 แสดงผลการจำลองของเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$ โดยรูปที่ 4.17 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงก์ (C_1, C_2, C_3) และรูปที่ 4.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงก์

(C_1, C_2, C_3) และ รูปที่ 4.22 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}), แรงดันสายเทียบกับจุดนิว-
ทรอน (V_{An}), แรงดันสายเทียบกับดีซีลิงค์ด้านลบ (V_{A0}) และกระแสสาย (I_L)

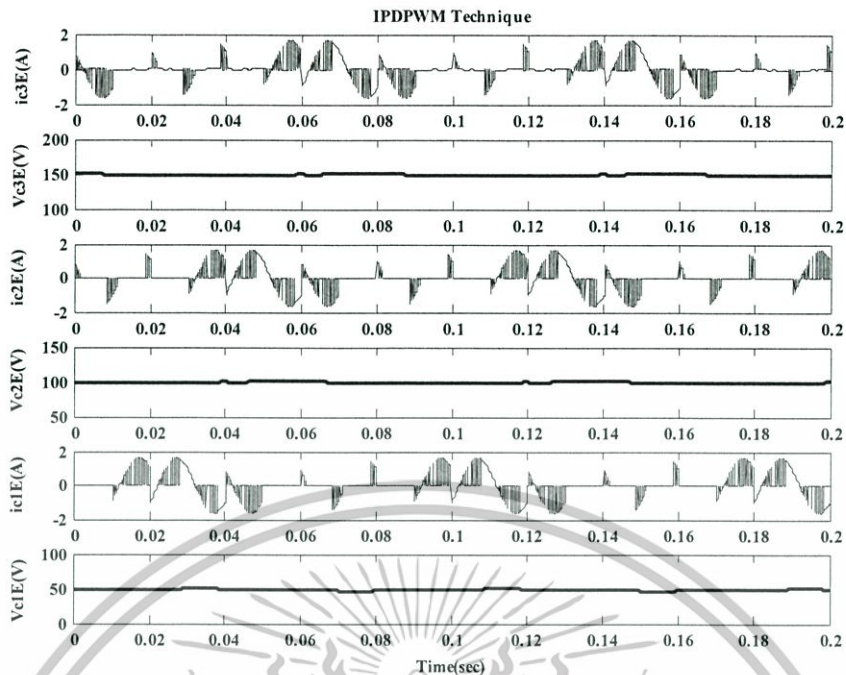


รูปที่ 4.11 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลอง
ด้วยเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$

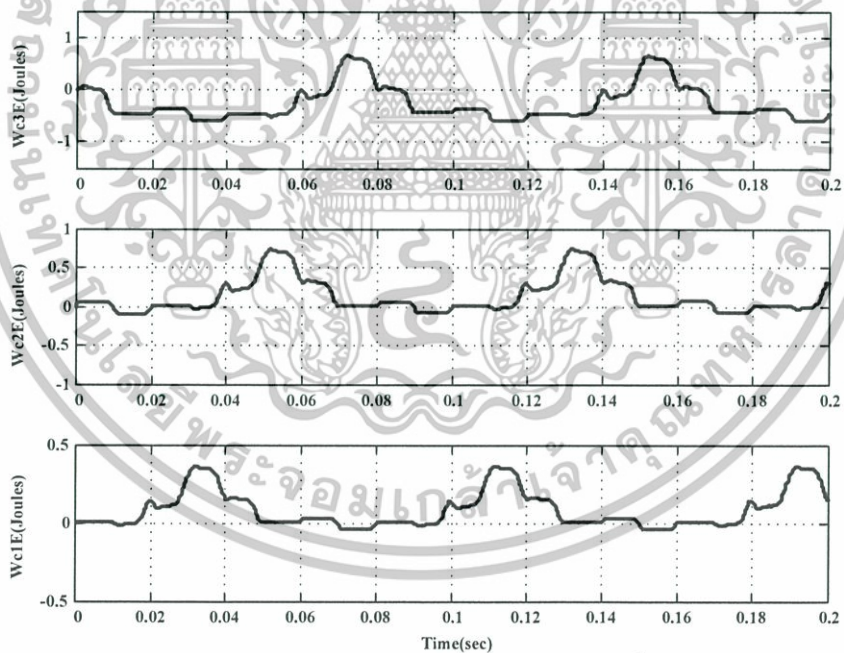


รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการ
จำลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

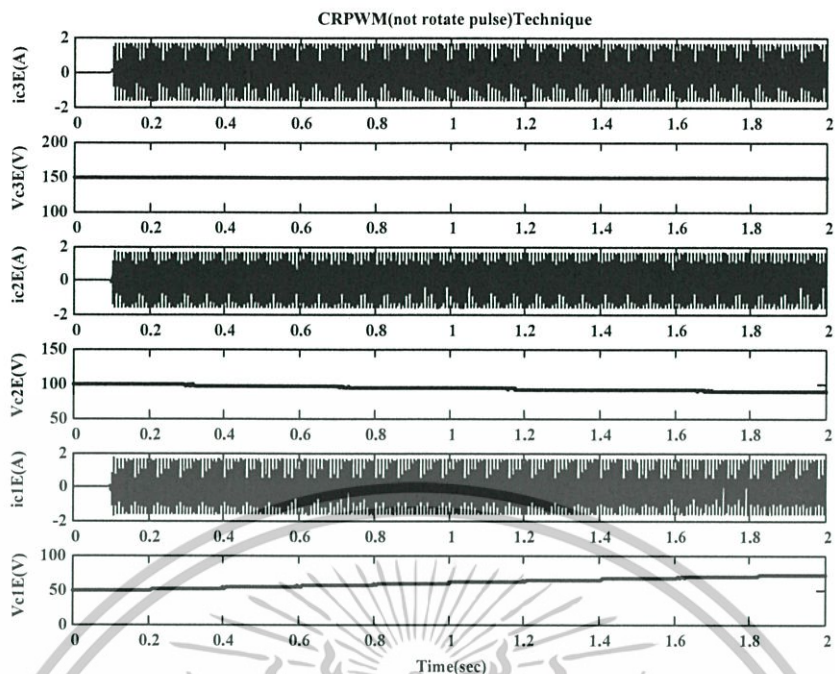


รูปที่ 4.13 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค IPD PWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$

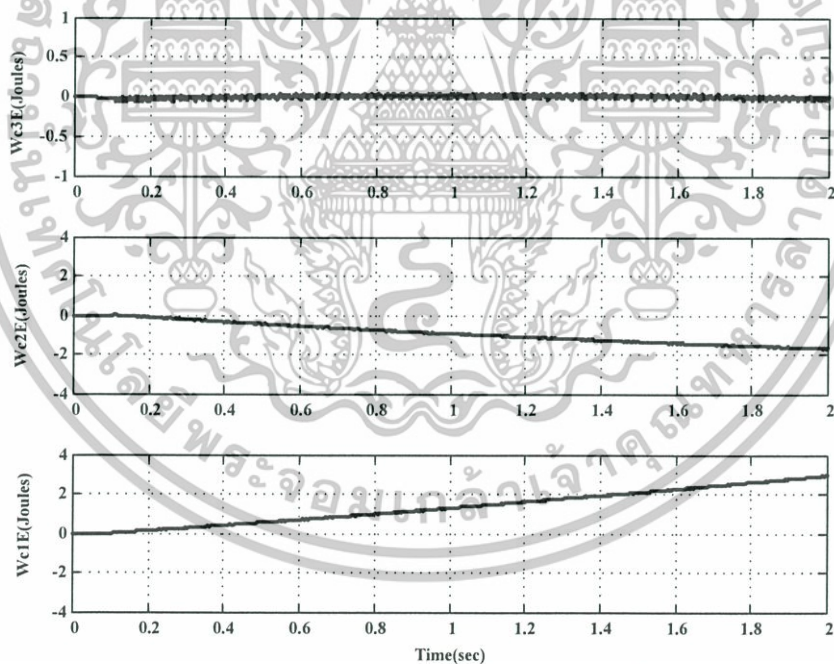


รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค IPD PWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$

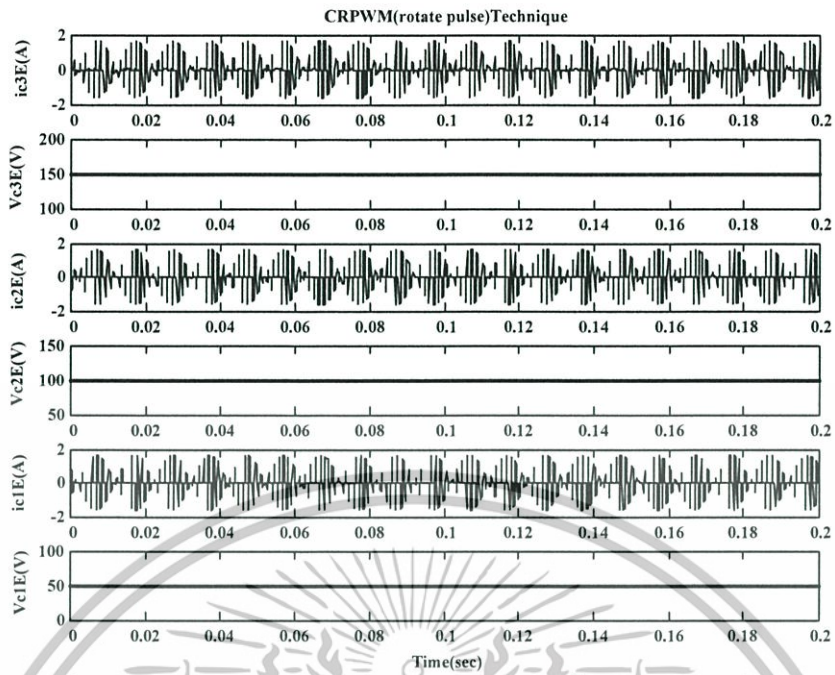
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



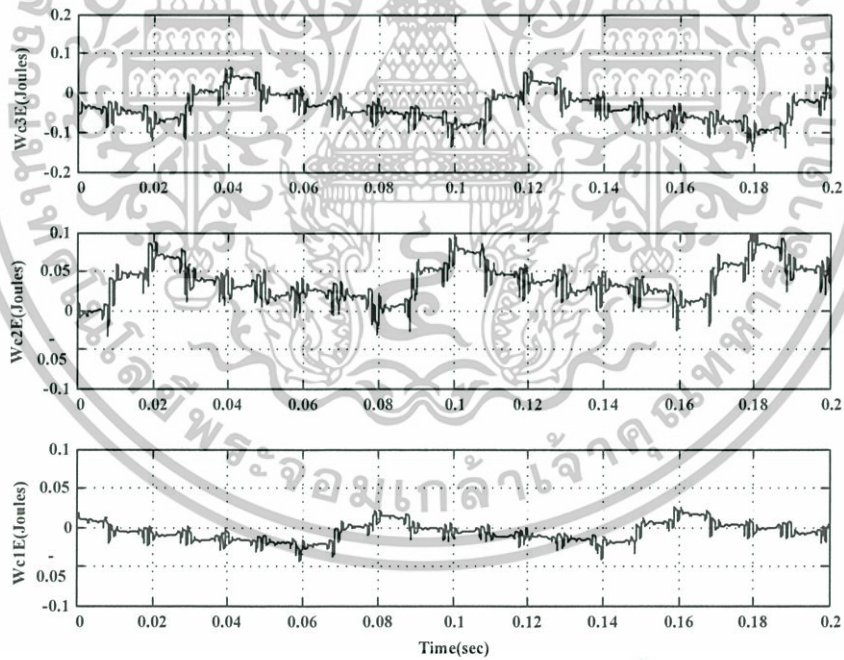
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$



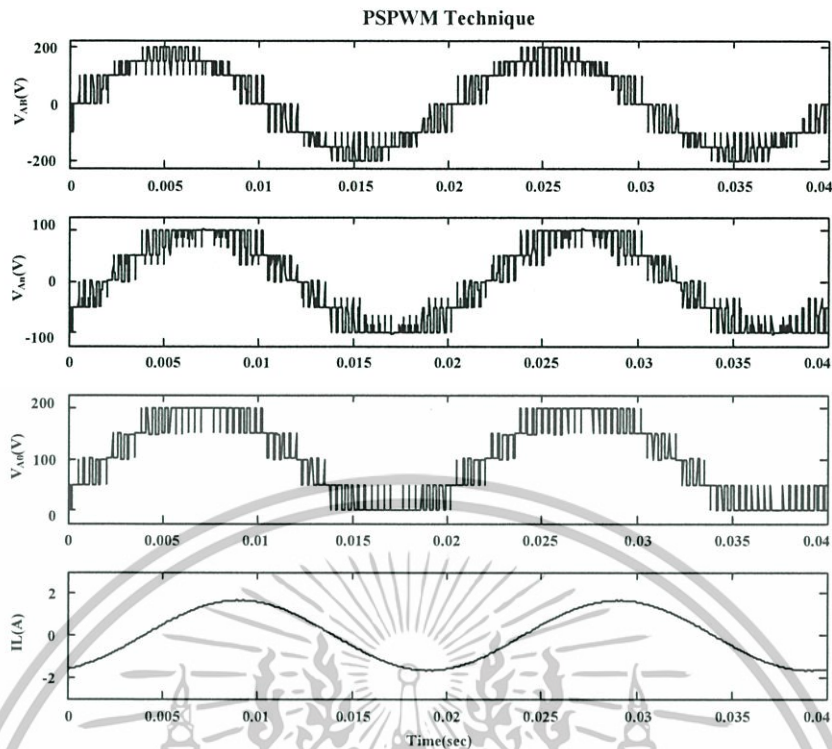
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$



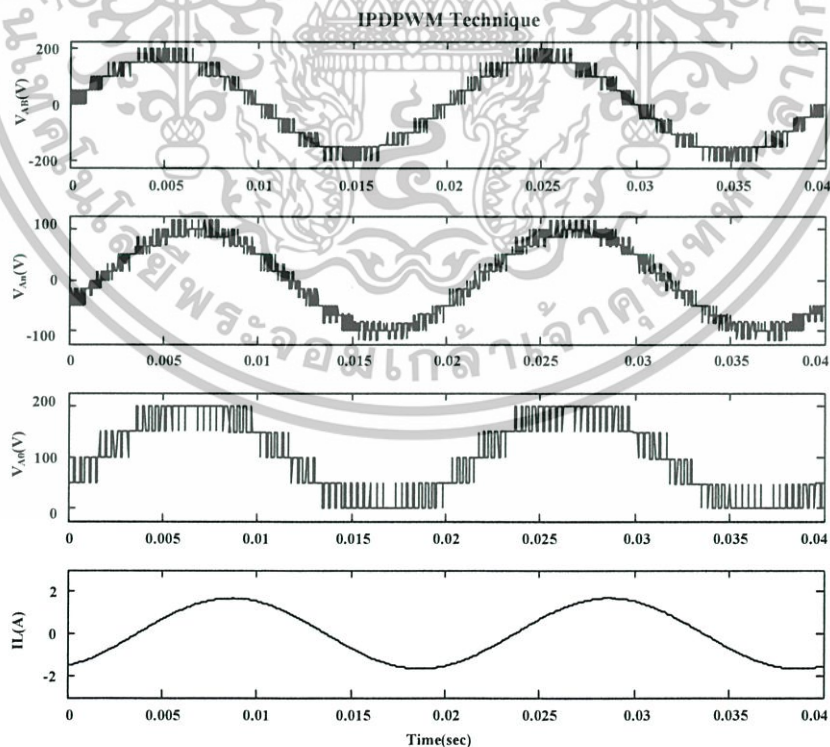
รูปที่ 4.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$

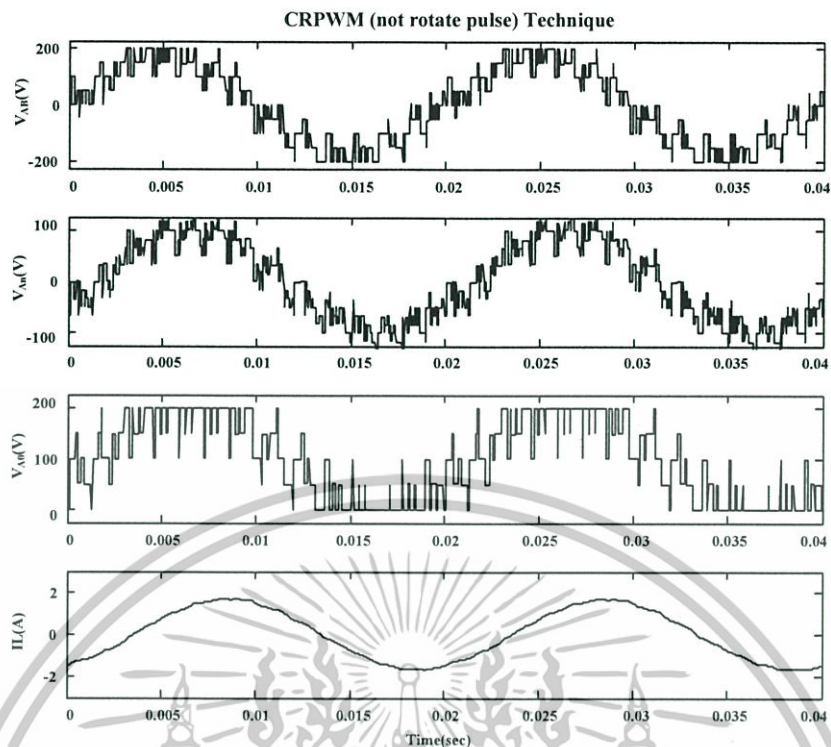


รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}) ,แรงดันสายเทียบกับจุดนิวตรอน(V_{An}) ,แรงดันสายเทียบกับดีซีลิงค์ด้านลบ(V_{A0}) และกระแสสาย(I_1) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$

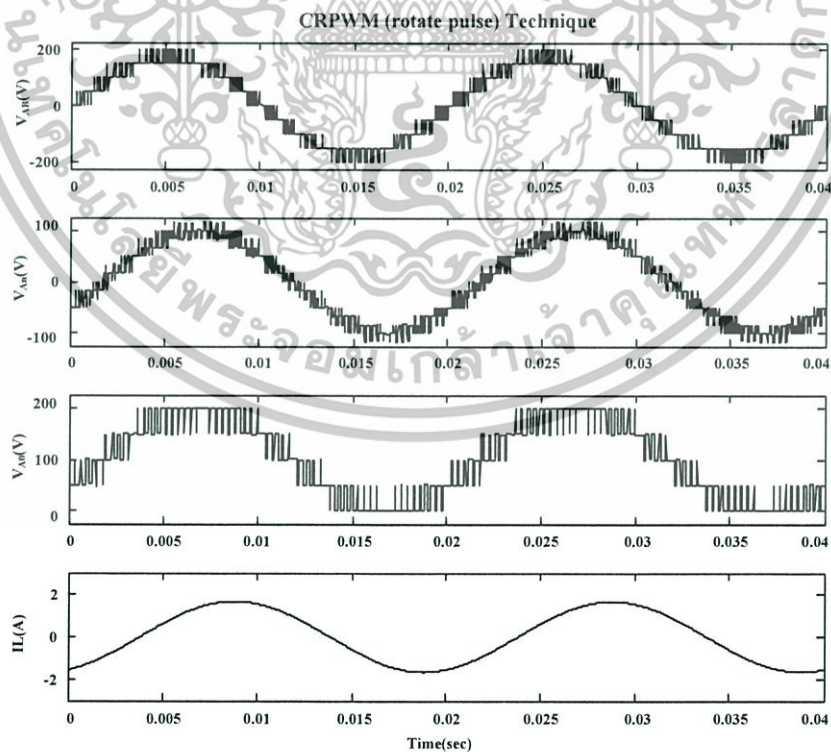


รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}) ,แรงดันสายเทียบกับจุดนิวตรอน(V_{An}) ,แรงดันสายเทียบกับดีซีลิงค์ด้านลบ(V_{A0}) และกระแสสาย(I_1) ที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนด้วยเทคนิค IPDPWM(with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}), แรงดันสายเทียบกับจุดนิวตรอน (V_{An}), แรงดันสายเทียบกับดีซีลิงค์ด้านลบ (V_{A0}) และกระแสสาย (I_L) ที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$



รูปที่ 4.22 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}), แรงดันสายเทียบกับจุดนิวตรอน (V_{An}), แรงดันสายเทียบกับดีซีลิงค์ด้านลบ (V_{A0}) และกระแสสาย (I_L) ที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$ ถ้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สรุปผลการจำลอง

จากการจำลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง 3 เทคนิคพิดับบลิวเอ็มคือ เทคนิคพิดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM) เทคนิคพิดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (IPDPWM) และเทคนิคพิดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยมีหัวข้อทำการศึกษเปรียบเทียบ คือความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันสาย (%THD) และความสามารถในการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ สามารถสรุปผลการจำลองได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปและเปรียบเทียบผลการจำลอง

หัวข้อเปรียบเทียบ	PSPWM	IPDPWM (with pulse rotation)	CRPWM (with pulse rotation)
ลักษณะการทำงานของสวิตช์แต่ละตัว	จำนวนครั้งการสวิตช์เท่ากัน ใน 1 คาบของแรงดันสาย (≈ 15)	จำนวนครั้งการสวิตช์ไม่เท่ากัน ใน 1 คาบแต่เท่ากัน ใน 4 คาบของแรงดันสาย (≈ 15)	จำนวนครั้งการสวิตช์เท่ากัน ใน 1 คาบของแรงดันสาย (≈ 15)
การสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์	รักษาได้	รักษาได้	รักษาได้
การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์	ต่ำ ($< 0.1J$)	สูง ($\approx 1.0J$)	ต่ำ ($< 0.1J$)
ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันสาย (%THDv)	สูงกว่า IPDPWM	ต่ำ	เท่ากับ IPDPWM

จากผลการจำลองเทคนิค PSPWM สามารถรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ดีที่สุดเพราะมีการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ต่ำ แต่มีความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์สูงของแรงดันด้านขาออก ส่วนเทคนิค IPDPWM (with pulse rotation) มีไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ต่ำของแรงดันด้านขาออก และยังสามารถรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ แต่ยังพบการเปลี่ยนของระดับพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์อยู่สูง ส่วนเทคนิค CRPWM (without pulse rotation) ไม่สามารถรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ และเทคนิค CRPWM (with pulse rotation) สามารถรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้และให้ผลความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออก ดีเช่นเดียวกับเทคนิค IPDPWM แต่ยังมี การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์อยู่ โดยระดับการเปลี่ยนแปลงนี้ยังน้อยกว่าเทคนิค IPDPWM กว่า 10 เท่า

จากทั้งหมดที่กล่าวมานั้น สรุปได้ว่าเทคนิค CRPWM ให้ผลความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกดีเช่นเดียวกับเทคนิค IPDPWM ตลอดย่านการมีอคติส่วนในเรื่องการรักษาสมดุลพลังงานต้องใช้เทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกิด (rotate pulse technique) เข้ามาช่วยจึงจะสามารถรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้



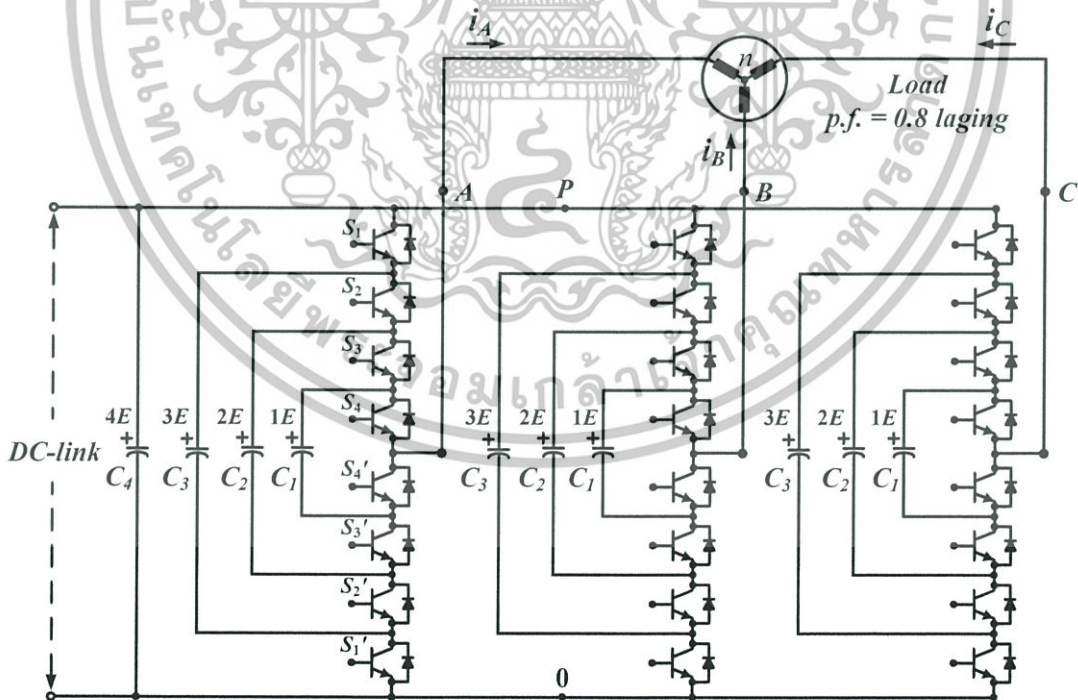
บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

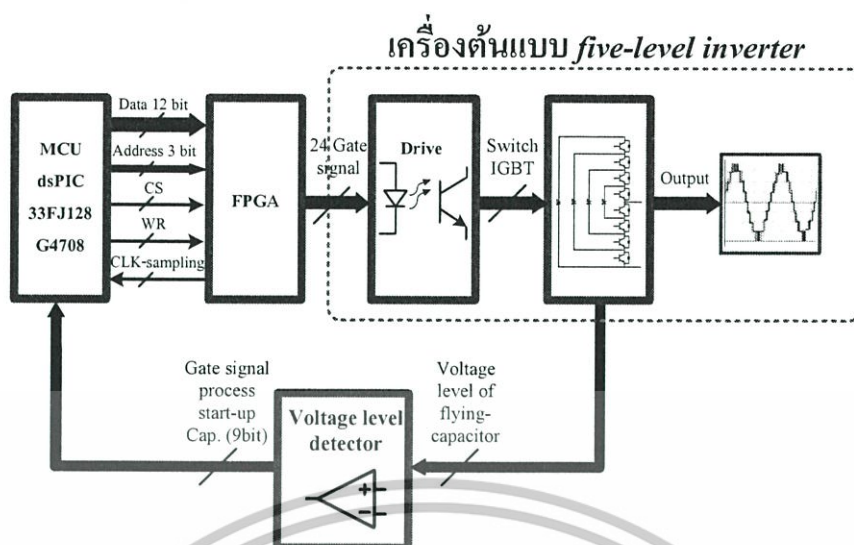
5.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นขั้นตอนการทดลองและได้นำผลของสัญญาณเกตที่ได้ทำการออกแบบจาก FPGA มาทดลองกับเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง 3 เทคนิคที่ดับบลิวเอ็มคือ เทคนิคที่ดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM) เทคนิคที่ดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (IPDPWM) และเทคนิคที่ดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) โดยหัวข้อทำการศึกษา คือ คุณภาพของแรงดันด้านขาออก และความสามารถในการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์

ในการทดลองแต่ละหัวข้อได้ใช้วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ดังรูปที่ 5.1 โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.1 และในตารางที่ 5.2 แสดงรายละเอียดอุปกรณ์ของเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง โดยในรูปที่ 5.2 เป็นบล็อกไดอะแกรมการทำงานของสวิตช์กำลังโดยรวม



รูปที่ 5.1 วงจรกำลังเครื่องต้นแบบ 3 เฟสของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์



รูปที่ 5.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานโดยรวม

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ในการทดลอง	เทคนิค PSPWM	เทคนิค IPD PWM	เทคนิค CRPWM
ความถี่ด้านขาออก (f_m)	50 Hz	50 Hz	50 Hz
ความถี่แคเรียร์ (f_{cr})	750 Hz	3000 Hz	750 Hz
อัตราส่วนระหว่าง f_{cr}/f_m (m_f)	15	60	15
ความถี่ของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง ($f_{sw,dev}$)	750 Hz	750 Hz	750 Hz
ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ($f_{sw,inv}$)	3000 Hz	3000 Hz	3000 Hz

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดอุปกรณ์เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

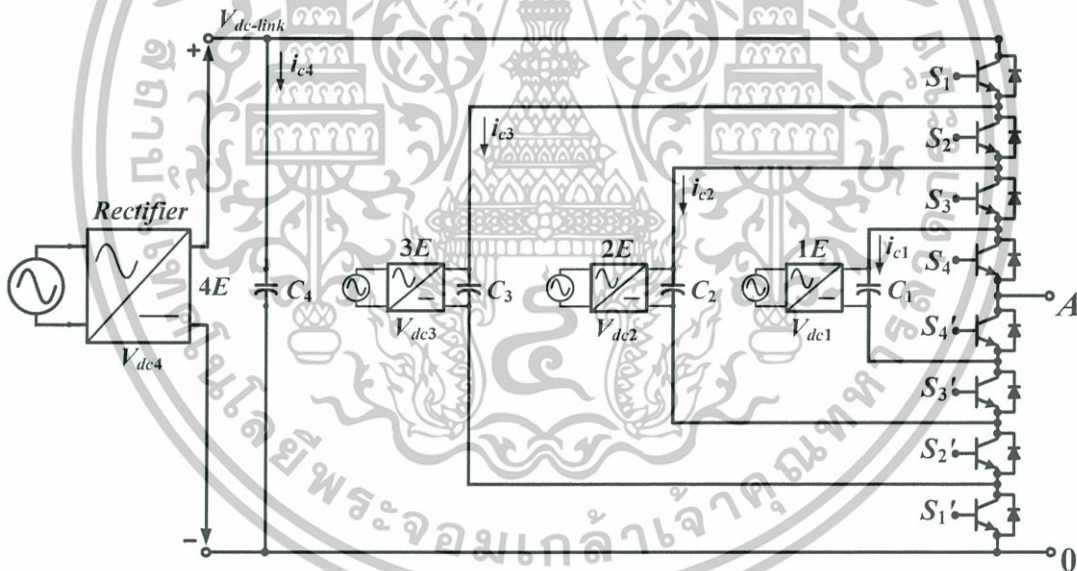
บอร์ด ET-dsPIC33WEB V1.0 (ETT)	dsPIC33FJ128GP708
บอร์ด FPGA (Altera)	ACEX1K EP1K50TC144-3
ขนาดตัวเก็บประจุที่ดิสชาร์จ	2200 μF 450 VDC
ขนาดตัวเก็บประจุฟลายอิงค์	2200 μF 450 VDC
แรงดันดิสชาร์จ	200 V
พิกัดของ IGBT	G20N60B3D (600 V, 40A)
R-load	หลอดไฟ 15 หลอด/100W (3 เฟสต่อแบบ Y)
RL-load	หลอดไฟ 15 หลอด/100W และบัลลาสแกนเหล็ก 36 ตัว/ขนาด 40W (3 เฟสต่อแบบ Y)
เพาเวอร์แฟกเตอร์ (PF)	0.8 lagging

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดลองและผลการทดลองความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันสาย

(%THD_v)

การทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง 3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มคือ เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM) เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (IPDPWM) และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ โดยในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาเรื่องความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย(%THD_v) โดยในการทดลองได้กำหนดให้ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์เป็นค่าคงที่ ดังรูปที่ 5.3 โดยการทดลองในสภาวะไม่มีโหลด(No Load) ซึ่งผลการทดลองของแรงดันด้านขาออกระหว่างสายที่ได้ นำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์สเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น ด้วยโปรแกรม MATLAB/M-file โดยในการคำนวณ % THD_v ได้คำนวณถึงอันดับที่ 100th และนำมาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง 3 เทคนิคข้างต้น โดยตั้งแต่ค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ (m_u) 0.1-1.0 ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.3 วงจรกำลัง 1 เฟสที่ใช้ทดลองผลของสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์และเปอร์เซ็นต์ THD_v ของแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB}

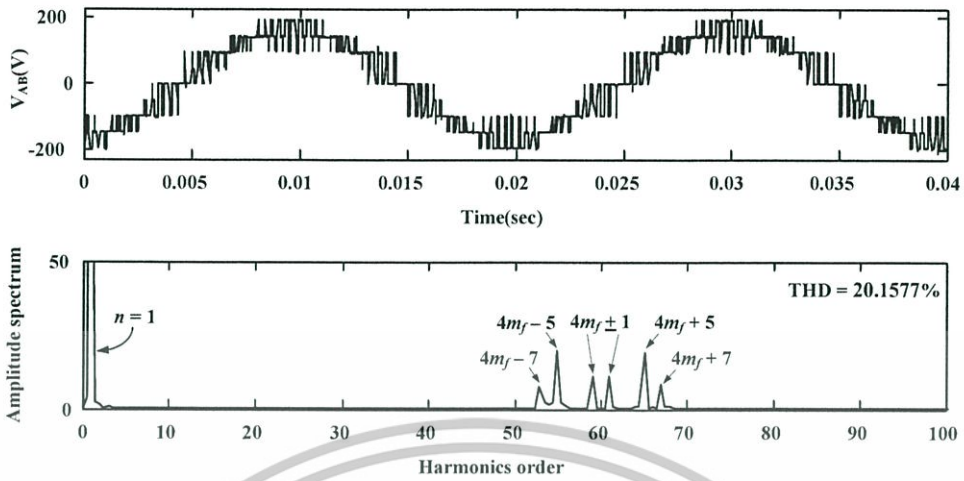
ผลของสัญญาณที่ได้จากการทดลองของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ด้วยเทคนิค PSPWM แสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งทำงานที่พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ $m_f = 15$, $f_m = 50$ Hz, $f_{cr} = 750$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} และสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB/M-file โดยพิจารณาถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 100th ที่ค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ค่าต่างๆ

ผลของสัญญาณที่ได้จากการทดลองของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ด้วยเทคนิค IPDPWM แสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งทำงานที่พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ $m_f = 60$, $f_m = 50$ Hz, $f_{cr} = 3000$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} และสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB/M-file โดยพิจารณาถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 100th ที่ค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ค่าต่างๆ

ผลของสัญญาณที่ได้จากการทดลองของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ด้วยเทคนิค CRPWM แสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งทำงานที่พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ $m_f = 15$, $f_m = 50$ Hz, $f_{cr} = 750$ Hz และ $f_{sw,dev} = 750$ Hz ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} และสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกระหว่างสาย V_{AB} ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB/M-file โดยพิจารณาถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 100th ที่ค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ค่าต่างๆ ซึ่งผลการคำนวณ %THDv จากสเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออก V_{AB} ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิคที่ดับเบิลเอ็มแบบต่างๆ ที่ค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ค่าต่างๆ ด้วยโปรแกรม MATLAB/M-file โดยพิจารณาถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 100th ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 และนำข้อมูลทั้งหมดไปพล็อตเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.7

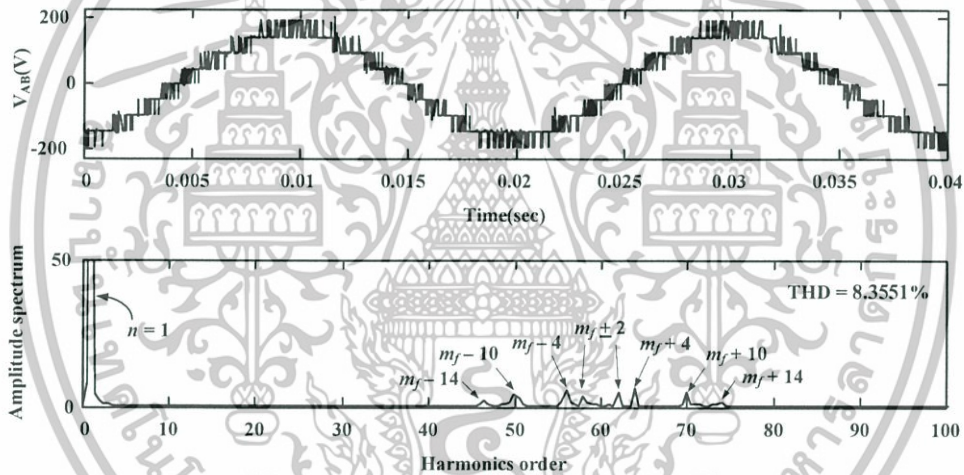
ในรูปที่ 5.7 แสดงกราฟสรุปผลของ % THDv โดยแกนตั้งเป็น %THD ส่วนแกนนอนเป็นมอดดูเลชันอินเด็กซ์ ซึ่งจากกราฟเห็นได้ว่าเทคนิค CRPWM ให้ผลความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออก(%THDv) ดีเท่ากับเทคนิค IPDPWM ตลอดย่านการมอดดูเลต และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ผลที่ได้ก็เกือบเท่ากันตลอดย่านการมอดดูเลตของเทคนิคต่างๆ

ผลการทดลองความผิดเพี้ยนของแรงดันสายในค่ามอดดูเลตอินเด็กซ์อื่นๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.2



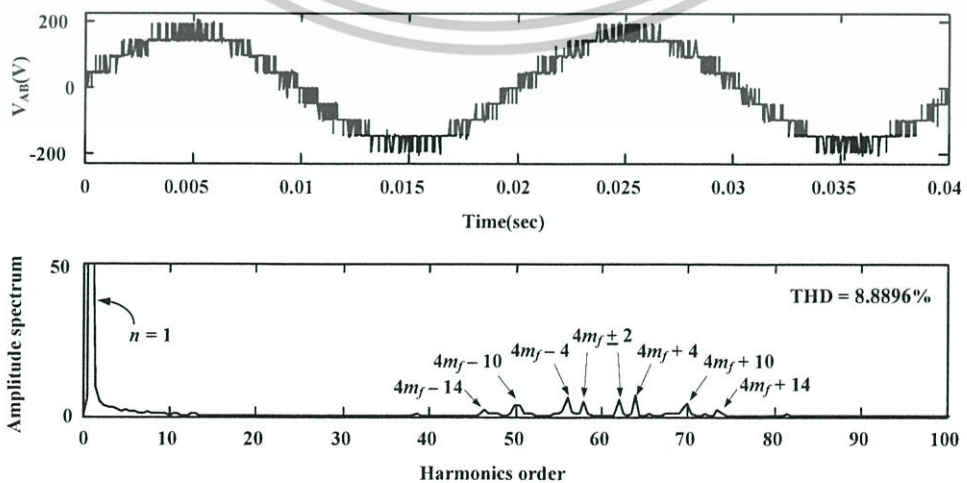
รูปที่ 5.4 รูปคลื่นแรงดันค่านำออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 1.0$

$$(m_f = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



รูปที่ 5.5 รูปคลื่นแรงดันค่านำออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค IPDPWM ที่ $m_a = 1.0$

$$(m_f = 60, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 3000 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$

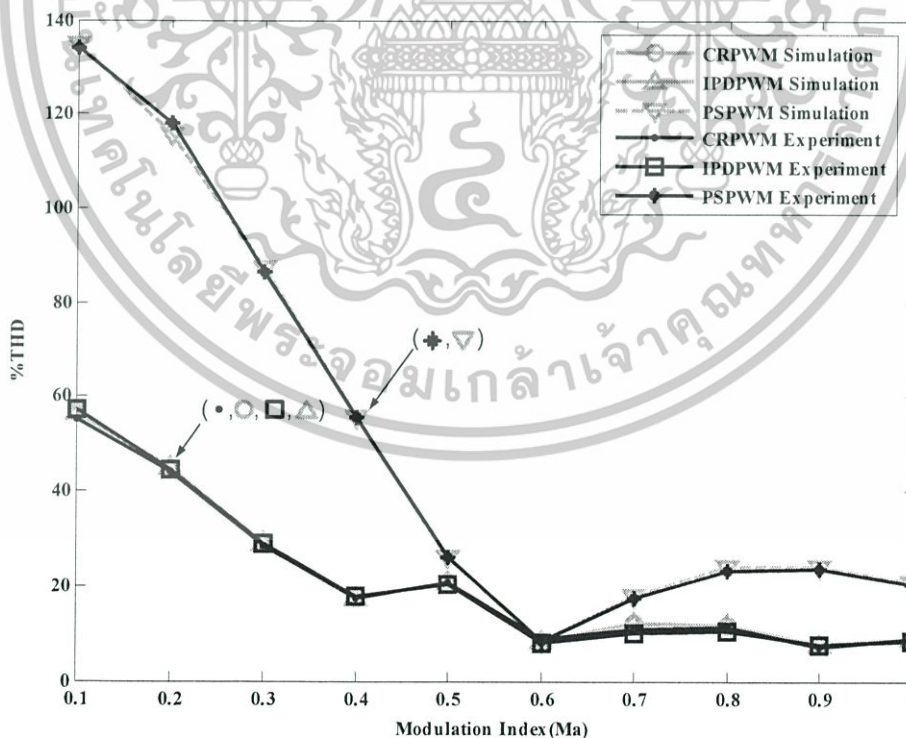


เอกสารรูปที่ 5.6 รูปคลื่นแรงดันค่านำออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค CRPWM ที่ $m_a = 1.0$ ไม่ว่าการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(m_f = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$

ตารางที่ 5.3 ตารางสรุป %THD_v ของแรงดันด้านขาออก V_{AB} ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค SPWM ชนิดต่างๆ

Ma	%THD _v ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค SPWM ชนิดต่างๆ		
	CRPWM	IPDPWM	PSPWM
0.1	55.1547	57.2681	133.8983
0.2	44.2828	44.7487	117.9903
0.3	28.4163	28.9214	86.5073
0.4	17.4029	17.8119	55.5912
0.5	20.5889	20.4889	26.2199
0.6	8.6407	7.9967	8.2587
0.7	11.0837	9.9396	17.4308
0.8	11.2529	10.5212	23.3102
0.9	7.2917	7.4069	23.6515
1.0	8.8896	8.3551	20.1577

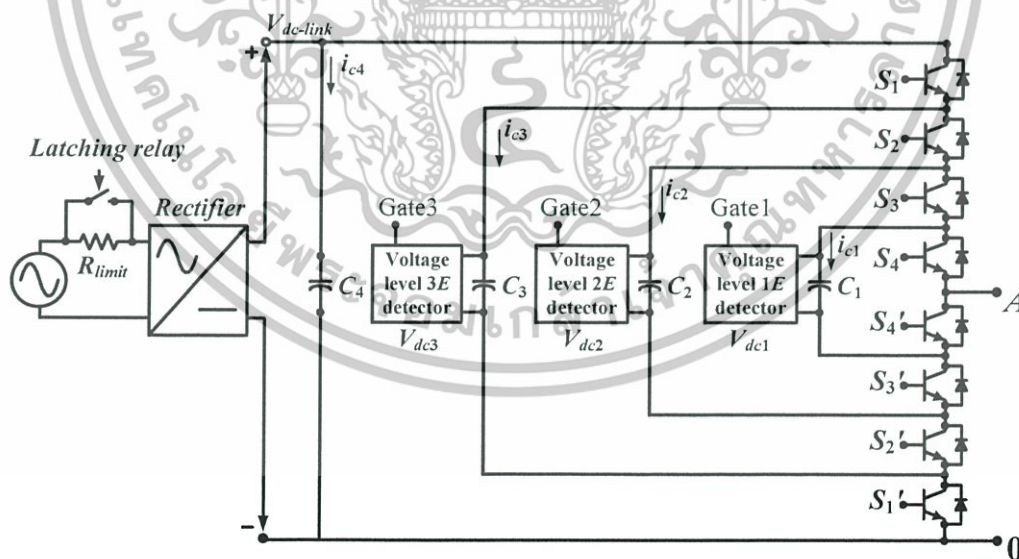


รูปที่ 5.7 กราฟสรุป %THD_v ของแรงดันด้านขาออก V_{AB} ที่ได้จากการทดลองด้วย SPWM ชนิดต่างๆ ที่ ค่า $0.1 \leq m_a \leq 1.0$ พิจารณาถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 100th

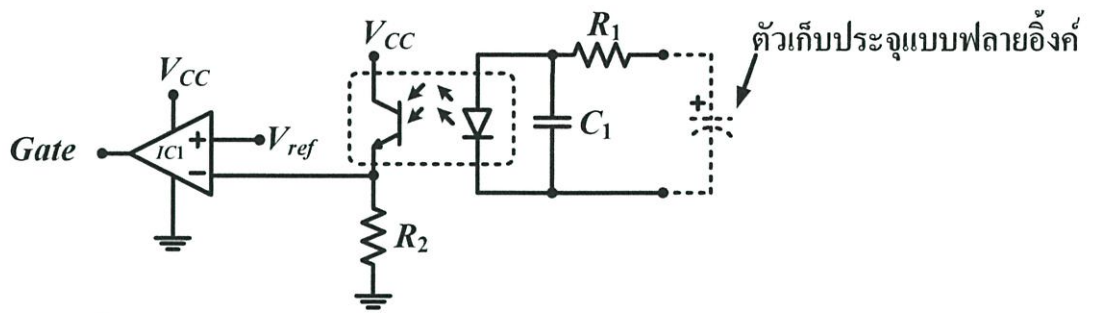
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดลองและผลการทดลองในเรื่องการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุ ฟลายอิงค์ในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงค์คาปาซิเตอร์

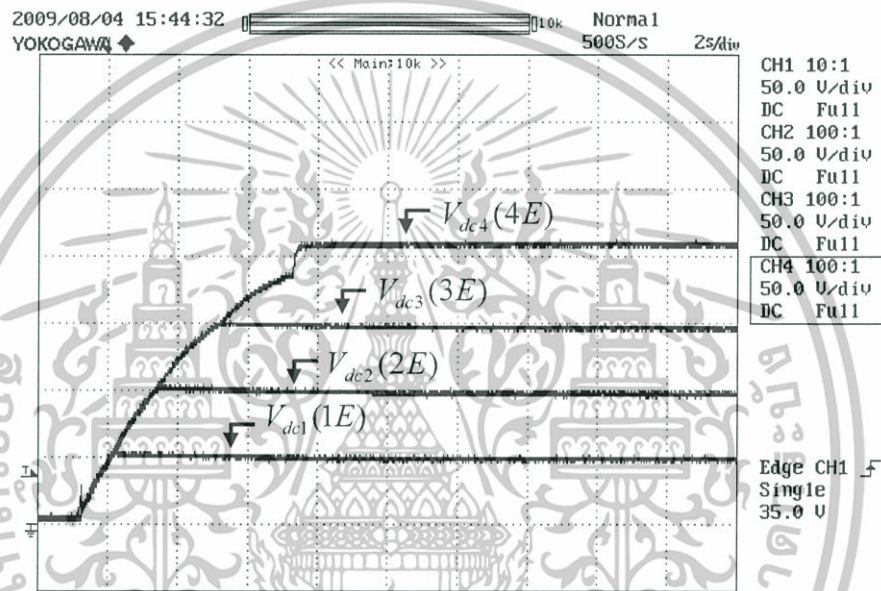
การทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง 3 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มคือ เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM) เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (IPDPWM) และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ โดยในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาเรื่องการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงค์คาปาซิเตอร์ ซึ่งวงจรที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 5.8 ได้เพิ่มวงจรตรวจจับระดับแรงดัน (Voltage detector) ตามรูปที่ 5.9 เพื่อตรวจจับระดับแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ ขณะทำการ Start-up ระดับแรงดันให้กับตัวเก็บประจุฟลายอิงค์แต่ละตัว [3] ซึ่งในรูปที่ 5.10 จะเป็นผลของระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวของเฟส A ในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงค์คาปาซิเตอร์ ที่เกิดจากเทคนิคการ Start-up[3] ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจะใช้เวลาประมาณ 3 วินาที เป็นผลมาจากการเลือกค่า R_{limit} กระแสขณะอัดประจุแรงดัน (Start-up) ไว้ที่ 100 A ทางด้านแหล่งจ่าย AC รูปที่ 5.8 ประกอบ (ค่า R_{limit} ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสม) จึงได้ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวตามต้องการ ($V_{C4} = 200$ V, $V_{C3} = 150$ V, $V_{C2} = 100$ V, $V_{C1} = 50$ V)



รูปที่ 5.8 วงจรกำลัง 1 เฟสที่ใช้ทดลองในการรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงค์คาปาซิเตอร์

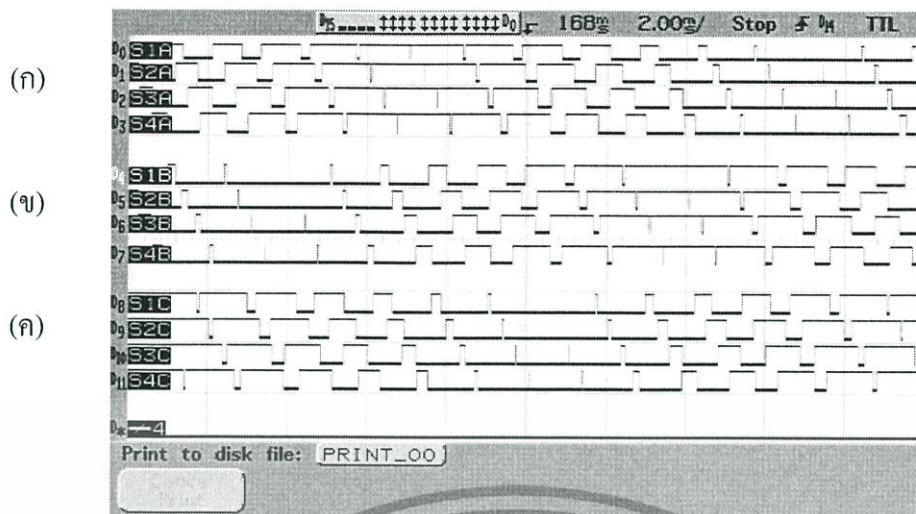


รูปที่ 5.9 วงจร 1 โมดูลของวงจรตรวจจับระดับแรงดัน (Voltage detector) ที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์



รูปที่ 5.10 ผลของระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์แต่ละตัวของเฟส A ที่เกิดจากเทคนิคการ Start-up

รูปที่ 5.11 - 5.14 แสดงสัญญาณเกิดของเทคนิคต่างๆ โดยรูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณเกิดที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 1$ และรูปที่ 5.12 แสดงสัญญาณเกิดที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค IPDPWM (rotate pulse) ที่ $m_a = 1$ และรูปที่ 5.13 สัญญาณเกิดที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (not rotate pulse) ที่ $m_a = 1$ และรูปที่ 5.14 สัญญาณเกิดที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (rotate pulse) ที่ $m_a = 1$

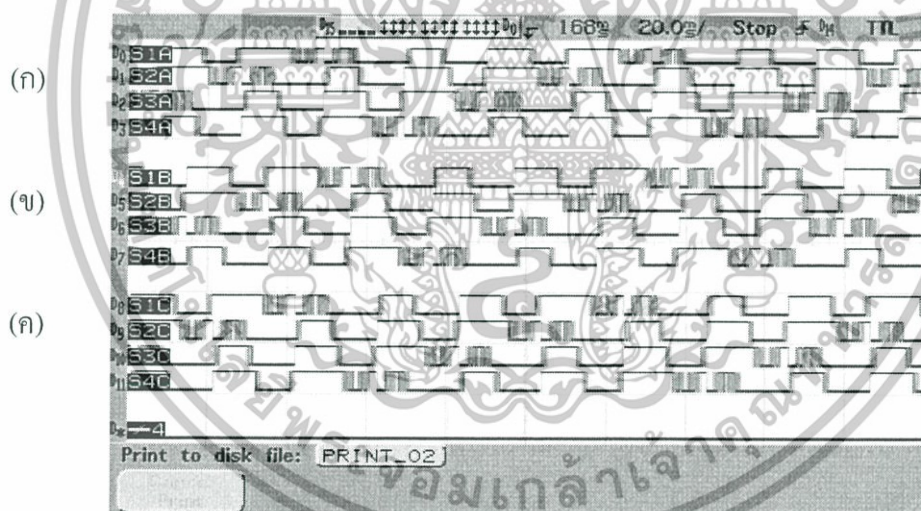


รูปที่ 5.11 สัญญาณเกิดที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 1$

(ก) สัญญาณเกิด $S_{1A} - S_{4A}$ (4 เส้นบน) (2.00ms/div, Digital analyzer)

(ข) สัญญาณเกิด $S_{1B} - S_{4B}$ (4 เส้นกลาง) (2.00ms/div, Digital analyzer)

(ค) สัญญาณเกิด $S_{1C} - S_{4C}$ (4 เส้นล่าง) (2.00ms/div, Digital analyzer)

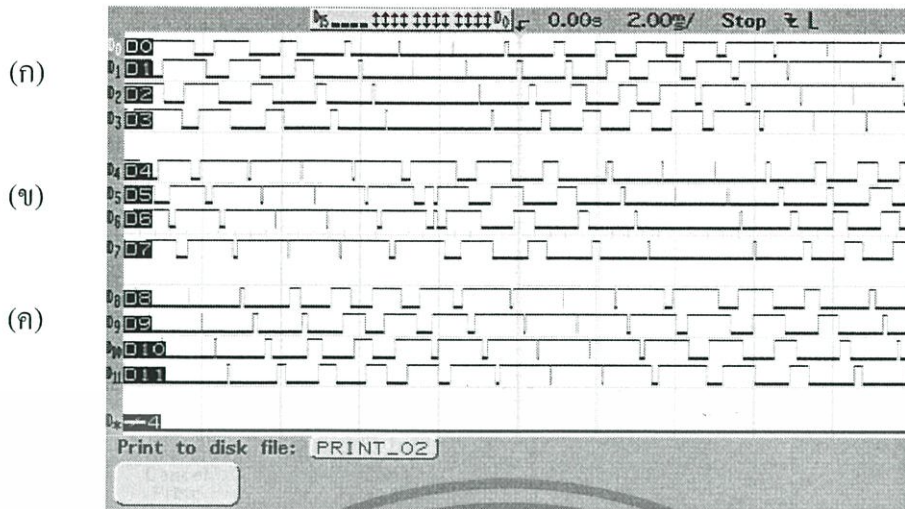


รูปที่ 5.12 สัญญาณเกิดที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ $m_a = 1$

(ก) สัญญาณเกิด $S_{1A} - S_{4A}$ (4 เส้นบน) (2.00ms/div, Digital analyzer)

(ข) สัญญาณเกิด $S_{1B} - S_{4B}$ (4 เส้นกลาง) (2.00ms/div, Digital analyzer)

(ค) สัญญาณเกิด $S_{1C} - S_{4C}$ (4 เส้นล่าง) (2.00ms/div, Digital analyzer)

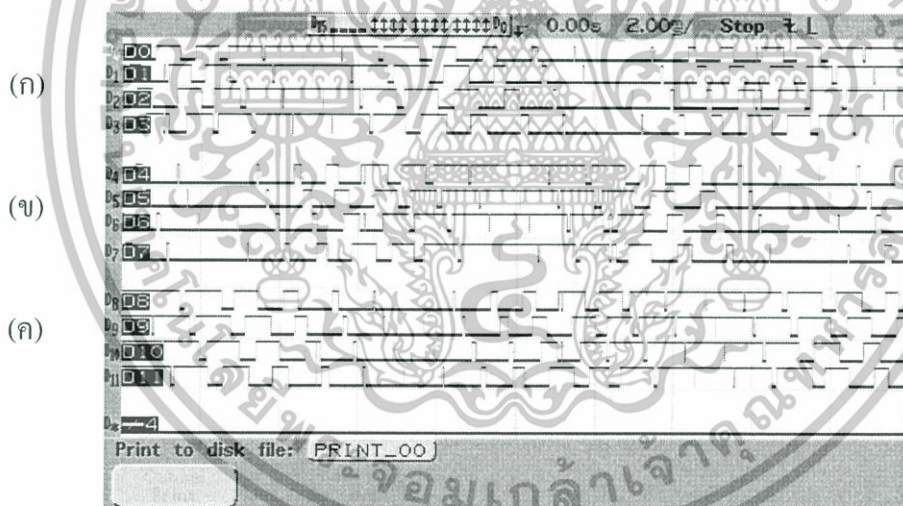


รูปที่ 5.13 สัญญาณเกิดที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ $m_a = 1$

(ก) สัญญาณเกิด $S_{1A} - S_{4A}$ (4 เส้นบน)(2.00ms/div, Digital analyzer)

(ข) สัญญาณเกิด $S_{1B} - S_{4B}$ (4 เส้นกลาง)(2.00ms/div, Digital analyzer)

(ค) สัญญาณเกิด $S_{1C} - S_{4C}$ (4 เส้นล่าง)(2.00ms/div, Digital analyzer)

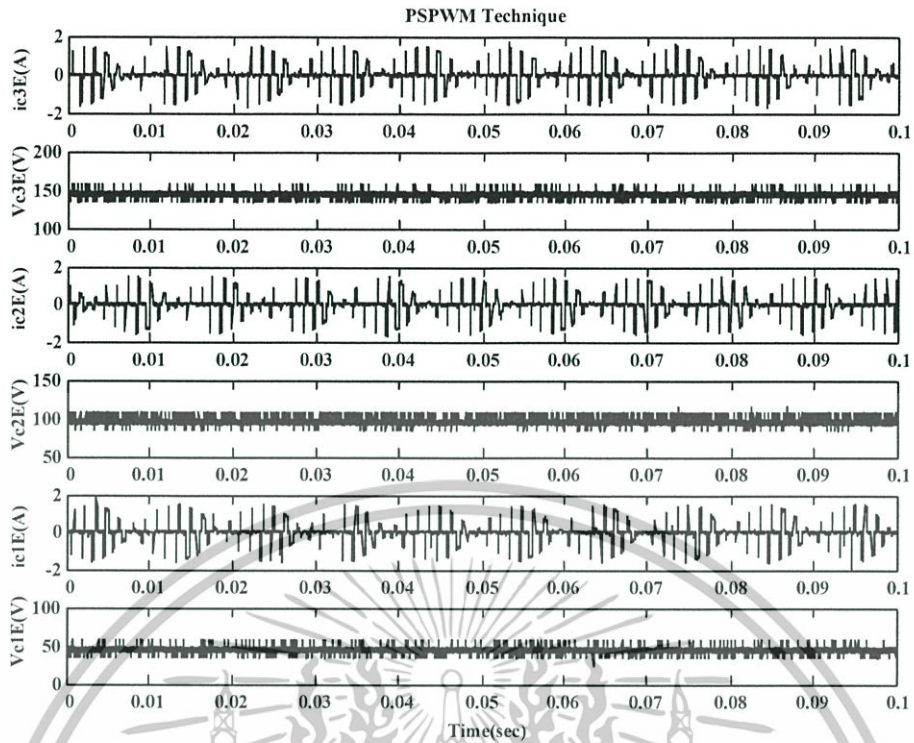


รูปที่ 5.14 สัญญาณเกิดที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ $m_a = 1$

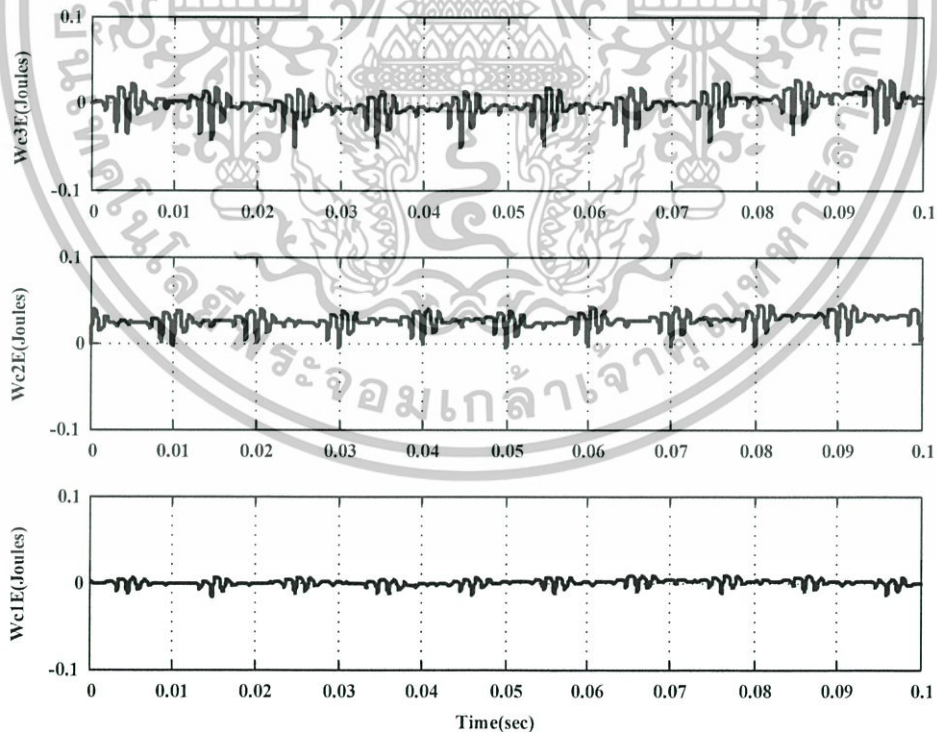
(ก) สัญญาณเกิด $S_{1A} - S_{4A}$ (4 เส้นบน)(2.00ms/div, Digital analyzer)

(ข) สัญญาณเกิด $S_{1B} - S_{4B}$ (4 เส้นกลาง)(2.00ms/div, Digital analyzer)

(ค) สัญญาณเกิด $S_{1C} - S_{4C}$ (4 เส้นล่าง)(2.00ms/div, Digital analyzer)

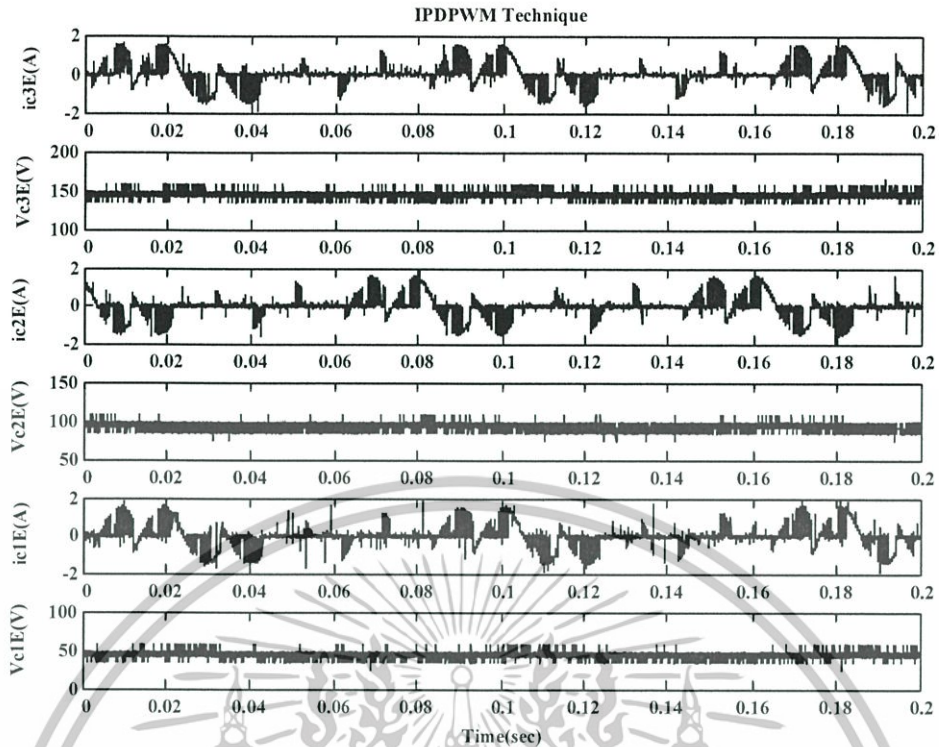


รูปที่ 5.15 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$

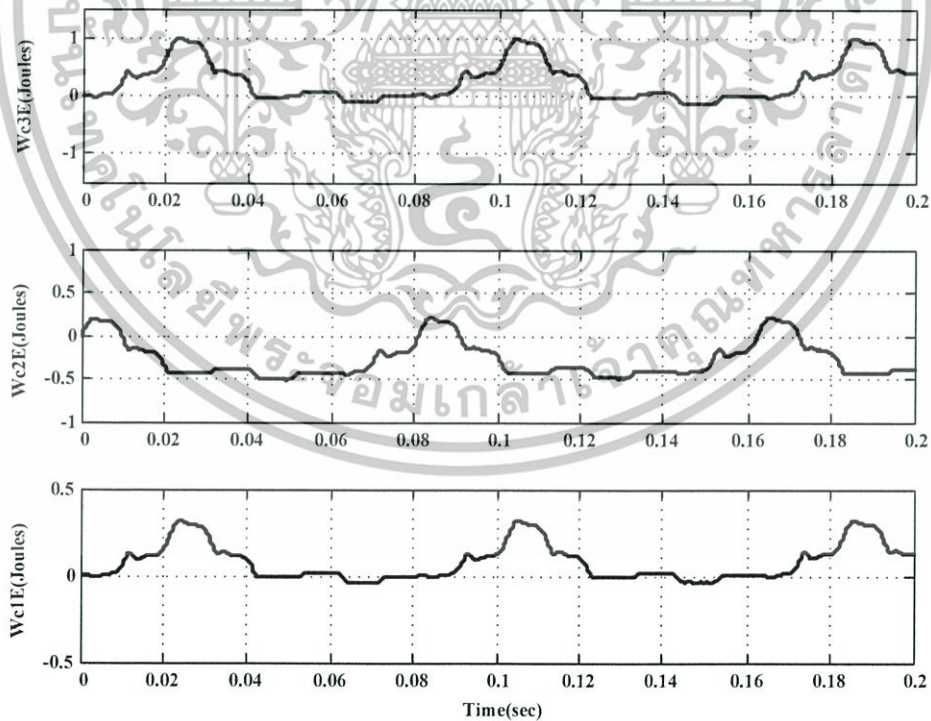


รูปที่ 5.16 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

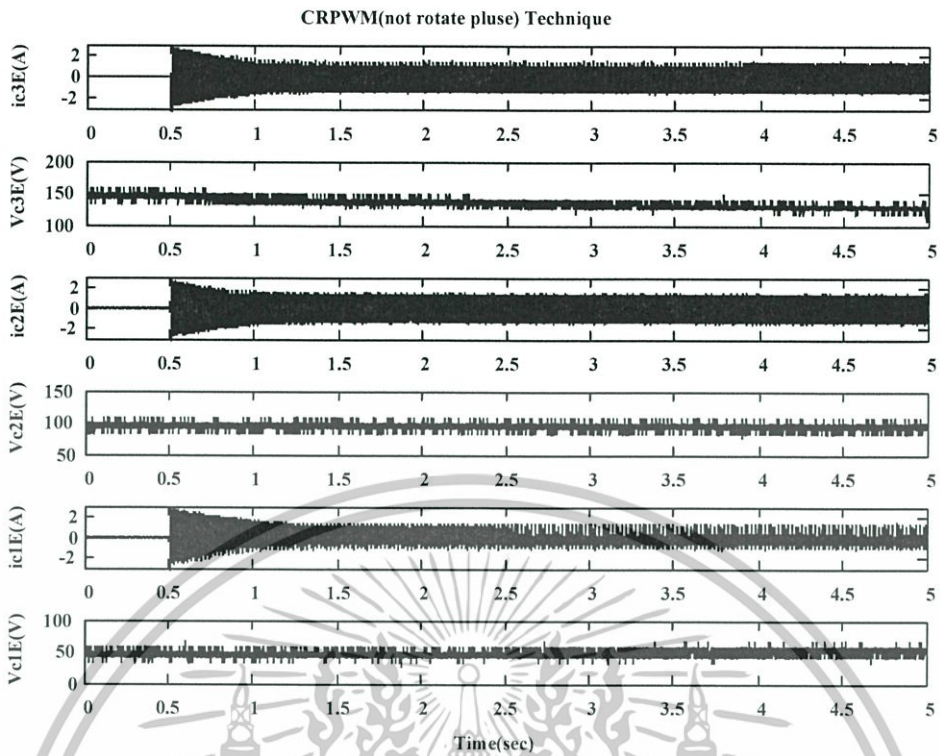


รูปที่ 5.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$

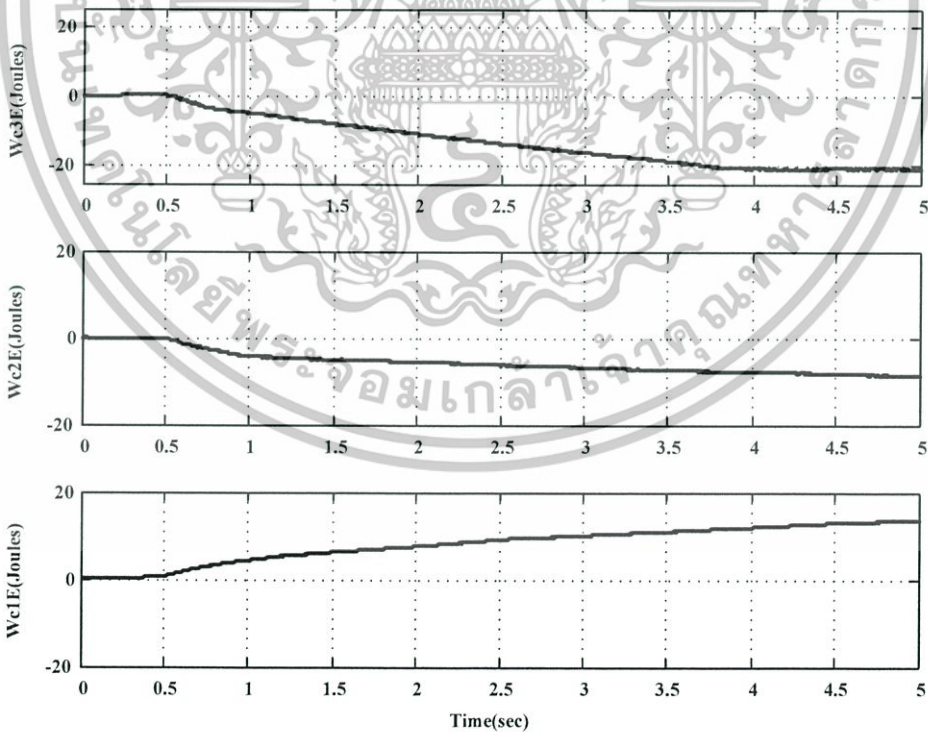


รูปที่ 5.18 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

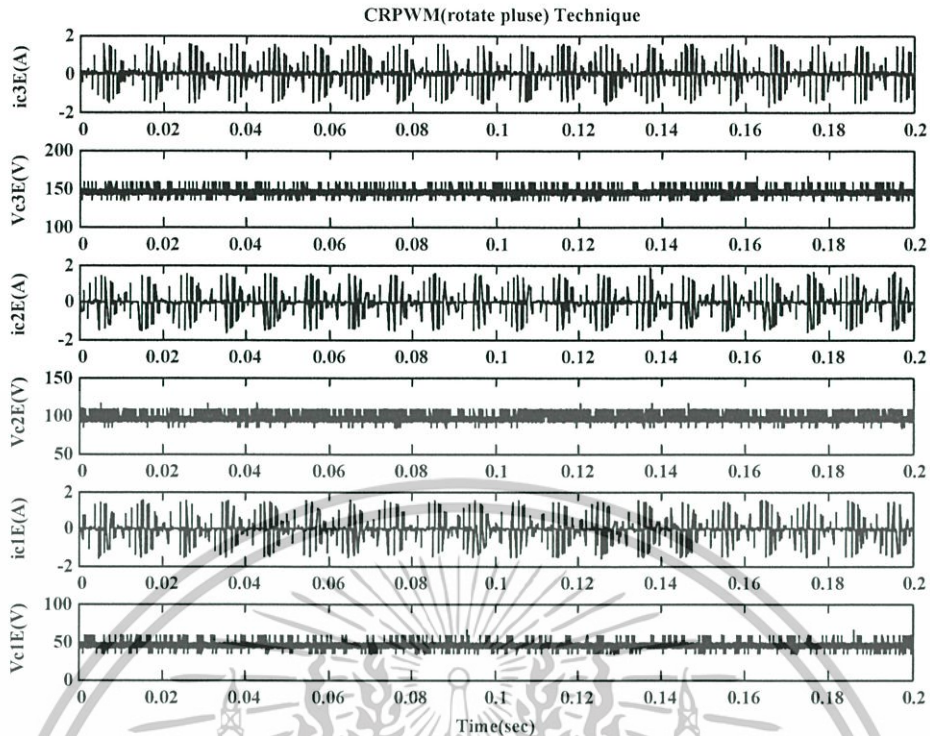


รูปที่ 5.19 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$

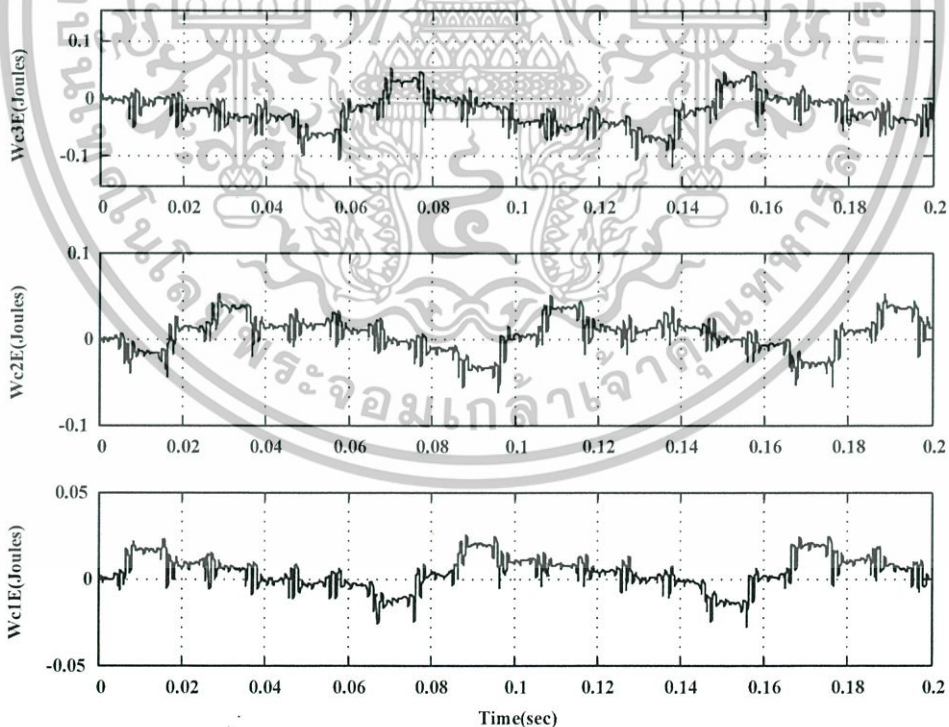


รูปที่ 5.20 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

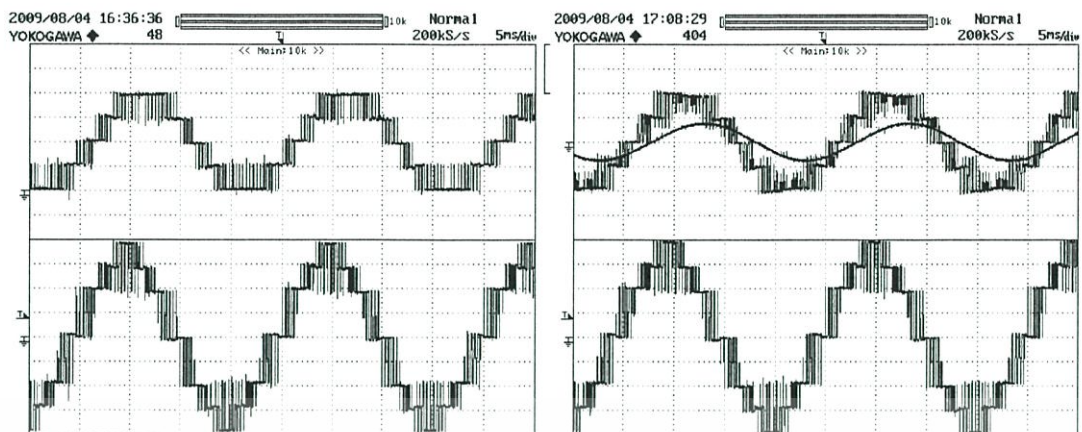


รูปที่ 5.21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$



รูปที่ 5.22 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์(C_1, C_2, C_3) ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สภาวะ RL-Load, PF 0.8

 V_{A0} (เส้นบน) 50V/div V_{AB} (เส้นล่าง) 50V/div

(ข) สภาวะ RL-Load, PF 0.8

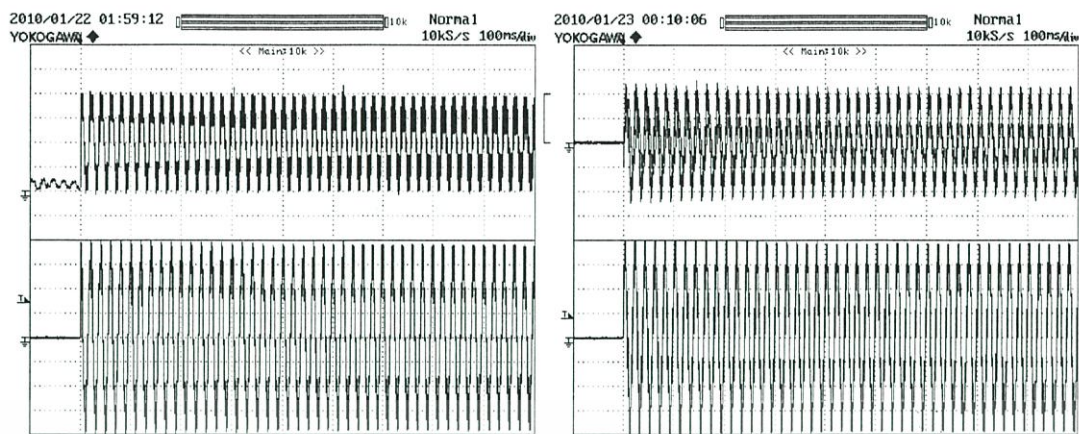
 V_{An} (เส้นบน) 50V/div i_A (เส้นบน) 2A/div V_{AB} (เส้นล่าง) 50V/divรูปที่ 5.23 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก ที่ได้จากเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 1.0$ 

(ก) สภาวะ RL-Load, PF 0.8

 V_{A0} (เส้นบน) 50V/div V_{AB} (เส้นล่าง) 50V/div

(ข) สภาวะ RL-Load, PF 0.8

 V_{An} (เส้นบน) 50V/div i_A (เส้นบน) 2A/div V_{AB} (เส้นล่าง) 50V/divรูปที่ 5.24 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก ที่ได้จากเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ $m_a = 1.0$



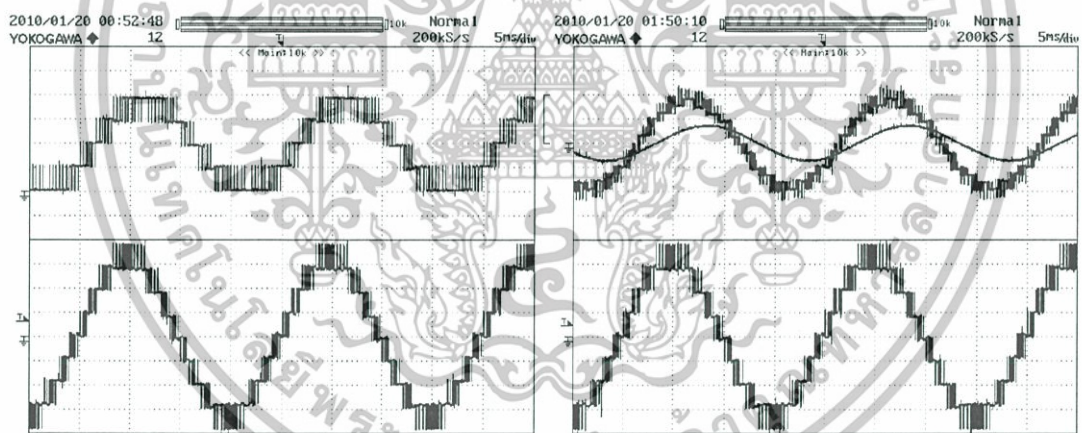
(ก) สภาวะ RL-Load, PF 0.8

 V_{A0} (เส้นบน) 50V/div V_{AB} (เส้นล่าง) 50V/div

(ข) สภาวะ RL-Load, PF 0.8

 V_{An} (เส้นบน) 50V/div i_A (เส้นบน) 2A/div V_{AB} (เส้นล่าง) 50V/div

รูปที่ 5.25 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก ที่ได้จากเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ $m_a = 1.0$



(ก) สภาวะ RL-Load, PF 0.8

 V_{A0} (เส้นบน) 50V/div V_{AB} (เส้นล่าง) 50V/div

(ข) สภาวะ RL-Load, PF 0.8

 V_{An} (เส้นบน) 50V/div i_A (เส้นบน) 2A/div V_{AB} (เส้นล่าง) 50V/div

รูปที่ 5.26 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออก ที่ได้จากเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ $m_a = 1.0$

รูปที่ 5.15 – 5.16 และรูปที่ 5.23 แสดงผลการจำลองของเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$ โดยรูปที่ 5.15 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) และรูป 5.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) และรูปที่ 5.23(ก) แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}), แรงดันไลน์เทียบกับดิซีลิงค์ด้านลบ (V_{A0}) และรูปที่ 5.23 (ข) แสดงแรงดันไลน์เทียบกับจุดนิวทรอน (V_{An}) กับกระแสไลน์ (IL) และแรงดันด้านขาออก (V_{AB})

รูปที่ 5.17 – 5.18 และรูปที่ 5.24 แสดงผลการจำลองของเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$ โดยรูปที่ 5.17 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) และรูป 5.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) และรูปที่ 5.24(ก) แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}), แรงดันไลน์เทียบกับดิซีลิงค์ด้านลบ (V_{A0}) และรูปที่ 5.24(ข) แสดงแรงดันไลน์เทียบกับจุดนิวทรอน (V_{An}) กับกระแสไลน์ (IL) และแรงดันด้านขาออก (V_{AB})

รูปที่ 5.19 – 5.20 และรูปที่ 5.25 แสดงผลการจำลองของเทคนิค CRPWM (without rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$ โดยรูปที่ 5.19 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) และรูป 5.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) และรูปที่ 5.25(ก) แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}), แรงดันไลน์เทียบกับดิซีลิงค์ด้านลบ (V_{A0}) และรูปที่ 5.25(ข) แสดงแรงดันไลน์เทียบกับจุดนิวทรอน (V_{An}) กับกระแสไลน์ (IL) และแรงดันด้านขาออก (V_{AB})

รูปที่ 5.21 – 5.22 และรูปที่ 5.26 แสดงผลการจำลองของเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$ โดยรูปที่ 5.21 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) และรูป 5.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3) และรูปที่ 5.26(ก) แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านขาออก (V_{AB}), แรงดันไลน์เทียบกับดิซีลิงค์ด้านลบ (V_{A0}) และรูปที่ 5.26(ข) แสดงแรงดันไลน์เทียบกับจุดนิวทรอน (V_{An}) กับกระแสไลน์ (IL) และแรงดันด้านขาออก (V_{AB})

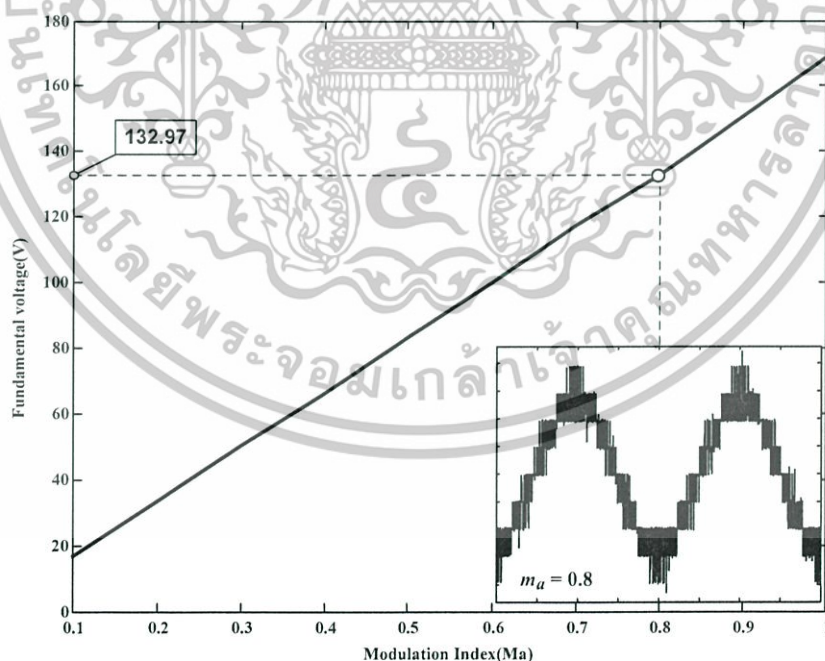
จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดลองด้านการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ สามารถสรุปได้ว่าเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) สามารถรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุได้ดีเช่นเดียวกับเทคนิค PSPWM และยังให้ผลความผิดเพี้ยนของแรงดันด้านขาออกดีเช่นเดียวกับเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse)

ผลการทดลองการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ที่ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ (PF) อื่นๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.1

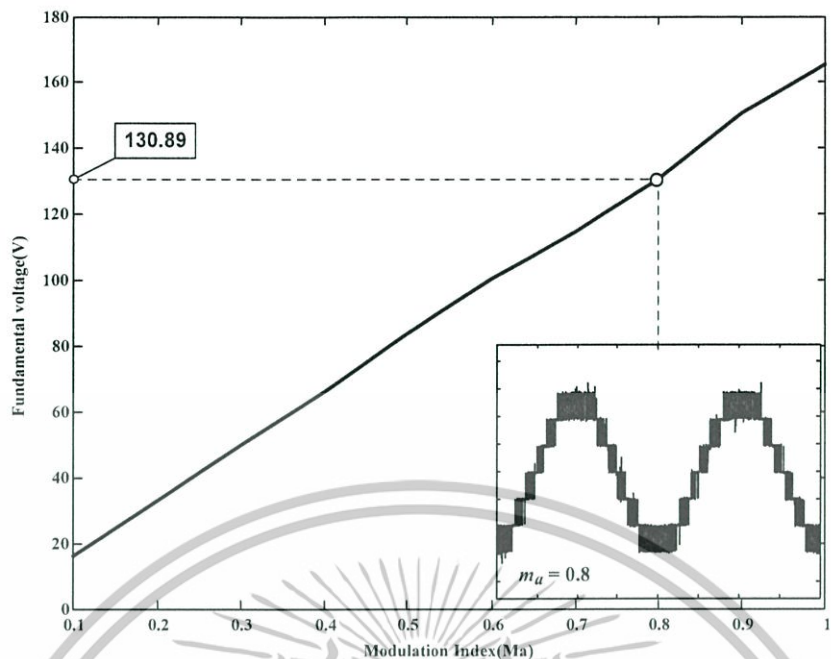
5.4 การเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Fundamental voltage และ modulation index ของเทคนิคพีดับเอ็ม 3 เทคนิค

การเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Fundamental voltage และ modulation index ของเทคนิคพีดับเอ็ม 3 เทคนิค คือ เทคนิคพีดับเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM) เทคนิคพีดับเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (IPDPWM) และเทคนิคพีดับเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ (CRPWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ โดยในรูปที่ 5.27 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Fundamental voltage และ modulation index ของเทคนิค PSPWM ซึ่งแสดงตัวอย่างรูปคลื่นที่ $m_a = 0.8$ โดยได้ Fundamental voltage เท่ากับ 132.97 โวลต์ และรูปที่ 5.28 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Fundamental voltage และ modulation index ของเทคนิค IPDPWM ซึ่งแสดงตัวอย่างรูปคลื่นที่ $m_a = 0.8$ โดยได้ Fundamental voltage เท่ากับ 130.89 โวลต์ และรูปที่ 5.29 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Fundamental voltage และ modulation index ของเทคนิค CRPWM ซึ่งแสดงตัวอย่างรูปคลื่นที่ $m_a = 0.8$ โดยได้ Fundamental voltage เท่ากับ 135.94 โวลต์

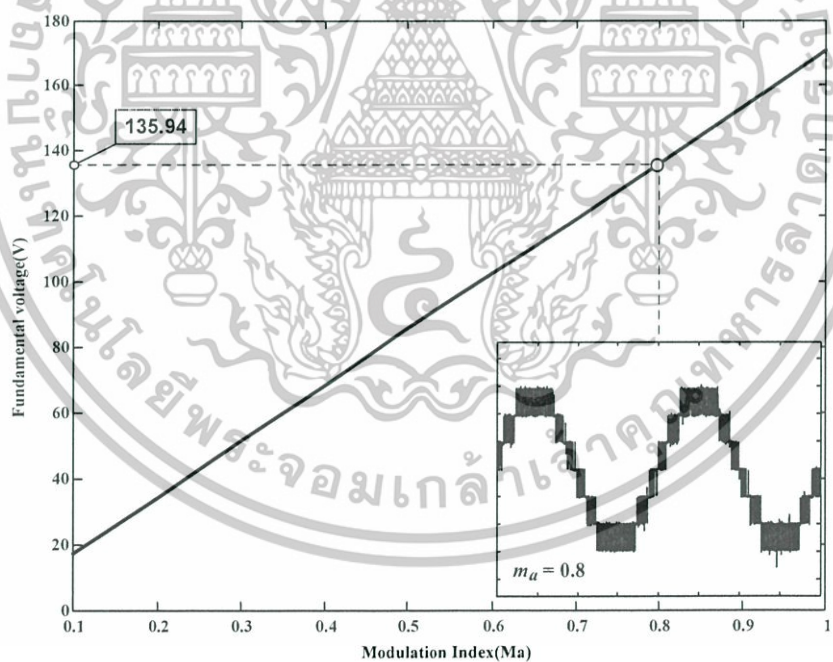
จากทั้ง 3 เทคนิค สังเกตได้ว่าเทคนิค CRPWM ให้ Fundamental voltage มากที่สุด ที่มีอดดูเลตชันอินเด็กซ์เดียวกัน แสดงว่าเทคนิค CRPWM สามารถรักษาสมมูลพลังงานได้และยังให้ Fundamental voltage มากที่สุดด้วย



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fundamental voltage และ modulation index ของเทคนิค PSPWM



รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fundamental voltage และ modulation index ของเทคนิค IPDPWM



รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fundamental voltage และ modulation index ของเทคนิค CRPWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

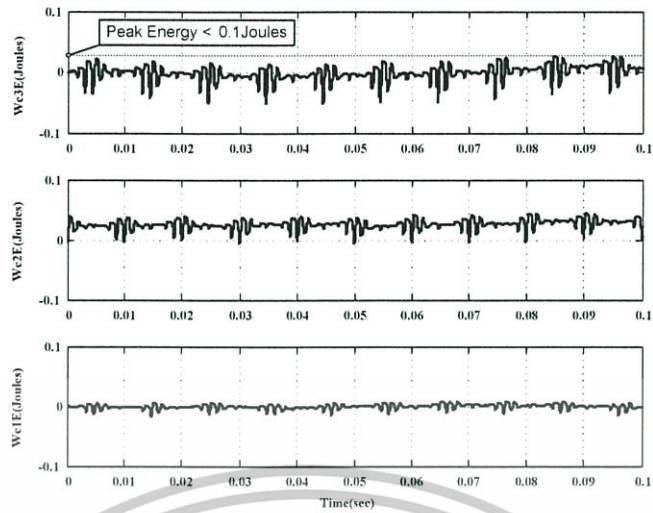
6.1 สรุปผลการวิจัย

เทคนิคการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ศึกษาเปรียบเทียบในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นเทคนิคการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบมัลติเลเวล ไซนูซoidalคอลพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมนำมาสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มกัน โดยทั่วไป ซึ่งใช้งานในวงจรขับแบบ 2 ระดับ โดยที่เทคนิคดังกล่าวก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มให้กับมัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ได้ โดยจำนวนสัญญาณแคเรียร์จะขึ้นอยู่กับระดับของแรงดันที่ต้องการสร้าง และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มที่เลือกใช้ กล่าวคือถ้าระดับของแรงดันที่ต้องการสร้างมีค่ามาก จำนวนของสัญญาณแคเรียร์ก็จะมีค่ามาก แต่ถ้าระดับของแรงดันที่ต้องการสร้างมีค่าน้อยจำนวนของสัญญาณแคเรียร์ก็จะมีค่าน้อยเช่นเดียวกัน

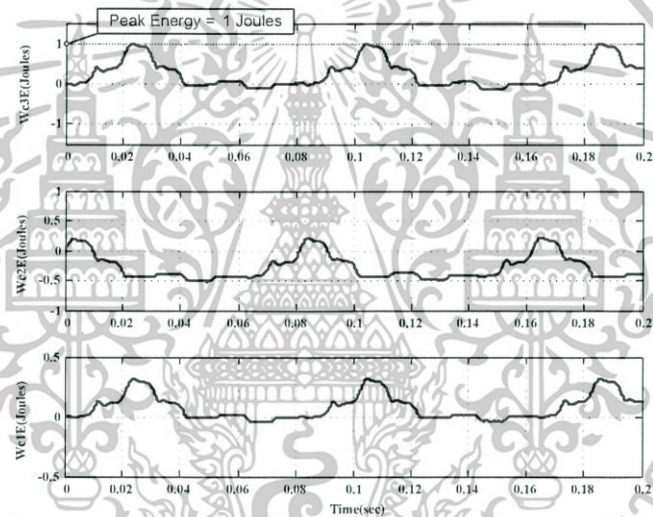
วิทยานิพนธ์นี้เลือกศึกษาวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบ 3 เฟส ทำให้จำนวนสวิทช์กำลังมีมากถึง 24 ตัว จึงเป็นอุปสรรคในการที่จะหาวิธีการควบคุมการทำงานของสัญญาณเกตทั้ง 24 สัญญาณ โดยเทคนิคการมอดูเลตได้ใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่(CRPWM) ซึ่งจากผลการจำลองแสดงถึงข้อจำกัดต่างๆของเทคนิคการมอดูเลตนี้ได้แก่ความยุ่งยากในการสร้างวงจรจริง และการที่ไม่สามารถรักษาระดับพลังงานของตัวเก็บประจุไว้ได้ในกรณีที่ตัวประกอบกำลังของโหลดไม่เท่ากับหนึ่ง ข้อจำกัดแรกนั้นสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ FPGA ส่วนข้อจำกัดหลังนั้นสามารถแก้ไขได้โดยใช้การหมุนวนสัญญาณเกต

สัญญาณเกตที่ทำการสร้างและศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้มีด้วยกัน 3 แบบ คือ คือ เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์(Phase-shifted Pulse Width Modulation ; PSPWM) เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์(Level-shifted Pulse Width Modulation ; IPDPWM) และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบจัดเรียงแคเรียร์ใหม่(Carrier - redistribution Pulse Width Modulation ; CRPWM) โดยที่วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อให้ได้เทคนิคพีดับบลิวเอ็มที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยสามารถรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ และยังให้คุณภาพแรงดันไฟฟ้าคืออีกด้วย

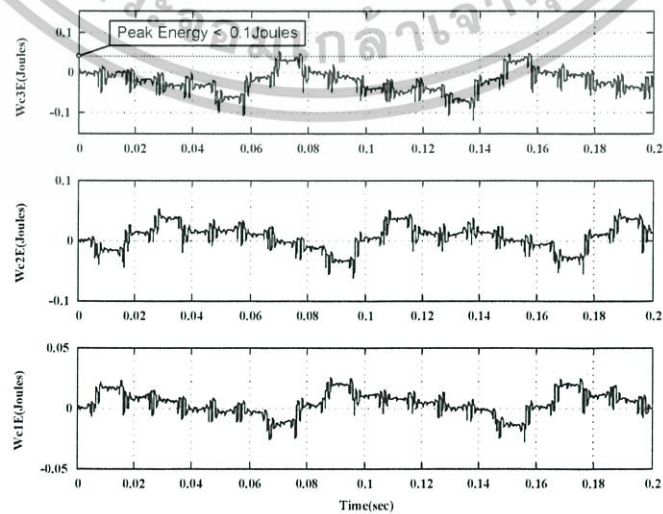
โดยหัวข้อที่ใช้ในการศึกษาและเปรียบเทียบเทคนิคการพีดับบลิวเอ็มทั้ง 3 แบบ คือคุณภาพของแรงดันด้านขาออก และความสามารถในการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ ซึ่งผลการทดลองจากหัวข้อดังกล่าวสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.1 รูปคลื่นพลังงานของเทคนิค PSPWM ที่ค่า $m_a = 1.0$



รูปที่ 6.2 รูปคลื่นพลังงานของเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$



รูปที่ 6.3 รูปคลื่นพลังงานของเทคนิค CRPWM (with rotate pulse) ที่ค่า $m_a = 1.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 ตารางสรุปและเปรียบเทียบผลการทดลอง

หัวข้อเปรียบเทียบ	PSPWM	IPD PWM (with pulse rotation)	CRPWM (with pulse rotation)
ลักษณะการทำงานของสวิตช์แต่ละตัว	จำนวนครั้งการสวิตช์เท่ากับใน 1 คาบของแรงดันสาย(≈ 15)	จำนวนครั้งการสวิตช์ไม่เท่ากับใน 1 คาบ แต่เท่ากับใน 4 คาบของแรงดันสาย(≈ 15)	จำนวนครั้งการสวิตช์เท่ากับใน 1 คาบของแรงดันสาย(≈ 15)
การสมมูลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์	รักษาได้	รักษาได้	รักษาได้
การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์	ต่ำ ($< 0.1J$)	สูง ($\approx 1.0J$)	ต่ำ ($< 0.1J$)
ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันสาย (%THDv)	สูงกว่า IPD PWM	ต่ำ	เท่ากับ IPD PWM
(%) ทรัพยากรของ FPGA ที่ใช้ในการสร้างมีอคดูเลต	27%	27%	76%

จากผลสรุปดังตารางที่ 6.1 ซึ่งสรุปมาจากผลการทดลองและรูปที่ 6.1- 6.3 สังเกตได้ว่าเทคนิค PSPWM สามารถรักษาสมมูลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ดีที่สุดเพราะมีการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ต่ำ แต่มีความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์สูงของแรงดันด้านขาออก ส่วนเทคนิค IPD PWM (with pulse rotation) มีความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ต่ำของแรงดันด้านขาออก และยังสามารถรักษาสมมูลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ แต่ยังพบการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์อยู่สูง ส่วนเทคนิค CRPWM (with pulse rotation) สามารถรักษาสมมูลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้และให้ผลความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกดีเช่นเดียวกับเทคนิค IPD PWM แต่ยังมีเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์อยู่ โดยระดับการเปลี่ยนแปลงนี้ยังน้อยกว่าเทคนิค IPD PWM(with pulse rotation) กว่า 10 เท่า

ในเรื่องการสร้างสัญญาณแคเรียร์เทคนิค CRPWM มีการสร้างยากกว่าเทคนิค PSPWM และ IPDPWM และยังใช้ resource มากกว่าทั้ง 2 เทคนิคด้วยเพราะเนื่องจากวงจรมีความซับซ้อนมากกว่า 2 เทคนิคดังกล่าวทำให้ต้องใช้จำนวน resource เป็นจำนวนมาก

จากทั้งหมดที่กล่าวมานั้น สรุปได้ว่าเทคนิค CRPWM ให้ผลความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันด้านขาออกดีเช่นเดียวกับเทคนิค IPDPWM ตลอดย่านการมีอคดูเลต ส่วนในเรื่องการรักษาสมดุลพลังงานต้องใช้เทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกต (rotate pulse technique) เข้ามาช่วยจึงจะสามารถรักษาพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้

6.2 อุปสรรคและข้อเสนอแนะ

6.2.1 อุปสรรค

ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์มีส่วนประกอบสำคัญคือตัวเก็บประจุและมีจำนวนมาก ซึ่งมีปัญหาและอุปสรรคหลักในการทดสอบอินเวอร์เตอร์ประเภทนี้คือการสร้างระดับแรงดันในช่วงเริ่มต้นหรือช่วง Start-up ให้กับตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบวงจรตรวจจับระดับแรงดัน (Voltage detector) ที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ในช่วง Start-up ซึ่งวงจรดังกล่าวตรวจสอบระดับแรงดันได้ แต่ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับหนึ่ง ส่งผลให้การสร้างแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์เกิดความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย และยังส่งผลโดยตรงต่อแรงดันทางด้านขาออกผิดเพี้ยนอยู่เล็กน้อย

6.2.2 แนวทางแก้ไข

ควรเลือกใช้วงจรตรวจสอบระดับแรงดันที่มีความเที่ยงตรงสูง หรือใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านช่องทางโมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC) เพื่อให้ได้ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ตรงตามที่ต้องการ และเนื่องจากตัวเก็บประจุฟลายอิงค์เป็นตัวเก็บประจุที่แยกกราวด์อิสระต่อกัน (Isolate ground) ทำให้จำเป็นต้องใช้ช่องทางโมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC) จำนวนถึง 10 ช่อง ซึ่งใช้เวลามากในการออกแบบควบคุม

6.2.3 แนวทางการศึกษาในอนาคต

หากใช้อุปกรณ์ประมวล DSP (Digital signal processing) แทนไมโครคอนโทรลเลอร์ (dsPIC) แล้วจะสามารถนำวงจรฟลายอิงคาปาซิเตอร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สามารถนำวงจรมัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์มาลิ้งค์เข้ากับระบบการไฟฟ้าได้เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานด้านการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติหรือนำมาใช้เป็นเครื่องสร้างแรงดันไฟตกชั่วขณะได้

2. นำไปประยุกต์เป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ (ซึ่งมีคุณสมบัติของ RL และ Back EMF) และประเมินประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับดังกล่าวเพื่อการประยุกต์ใช้งานใน AC Drive ต่อไป เนื่องจากคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้นให้แรงดันเอาต์พุตที่มีความผิดเพี้ยนต่ำ จึงทำให้สามารถใช้งานวงจรที่มีขนาดเล็กลงได้ นอกจากนี้แรงดันเอาต์พุตยังมี $\frac{dv}{dt}$ ที่ต่ำทำให้กระแสรั่วไหลบน โครงของมอเตอร์เหนี่ยวนำลดลง มีผลทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์ยาวนานขึ้นและลดการบำรุงรักษาให้น้อยลง

3. นำไปประยุกต์เป็นวงจรกรองแบบแอคทีฟกำลัง

4. เป็นตัวจ่ายกำลังรีแอคทีฟให้กับภาระทางไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังและทำให้สมดุล กระแสในไลน์ เพราะให้คุณภาพของรูปคลื่นเอาต์พุตที่มีคุณภาพดีมีความเป็นไซน์



บรรณานุกรม

- [1] Feng Peng, Rodriguez, and J. Sheng Lai, “**Multilevel Inverter: A survey of Topologies, Controls, and Application**”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 4, August 2002
- [2] Bin Wu, “**High Power Converter and AC Drive**”, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., 2006, pp.127-136.
- [3] สถิตย์พร เกตุสกุล, “การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเทคนิคที่ดับบลิวเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนเฟสและเลื่อนระดับสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2550
- [4] Dae-Wook Kang, Byoung-Kuk Lee, Jae-Hyun Jeon, Tae-Jim Kim and Dong-Seok Hyun, “**A Symmetric Carrier Technique of CRPWM for Voltage Balance Method of Flying-Capacitor Multilevel Inverter**”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, No. 3, June 2005
- [5] Leon M. Tolbert, Fang Z. Peng, “**Multilevel Converter as a Utility Interface for Renewable Energy Systems**”, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, pp. 1271-1274, 2000.
- [6] Martina Calais, Vassilios G. Agelidis and Mike Meinhardt, “**Multilevel Converters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems: An Overview**”, Proceedings of the IEEE ISIE, vol. 1, pp. 224-229, July 1998.
- [7] ศิวะพัทธ์ คุ้มมะณี, “การพัฒนาอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณเกิดด้วย FPGA สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2550



ภาคผนวก

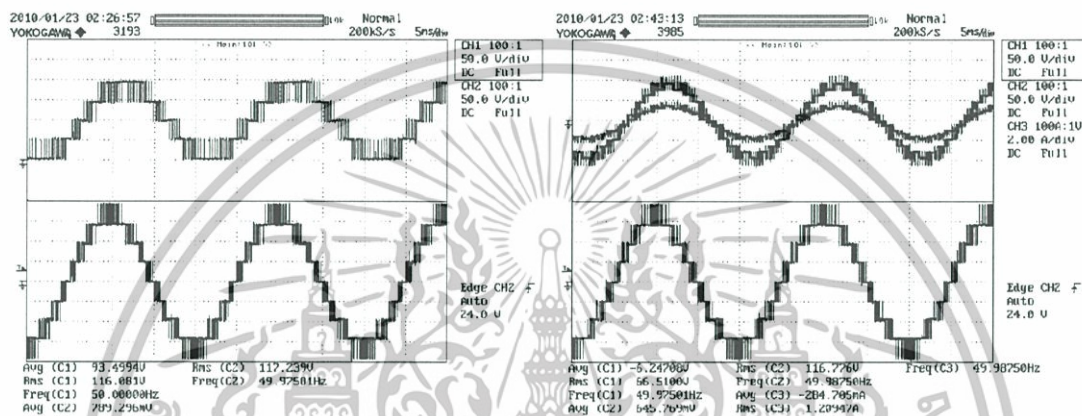
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

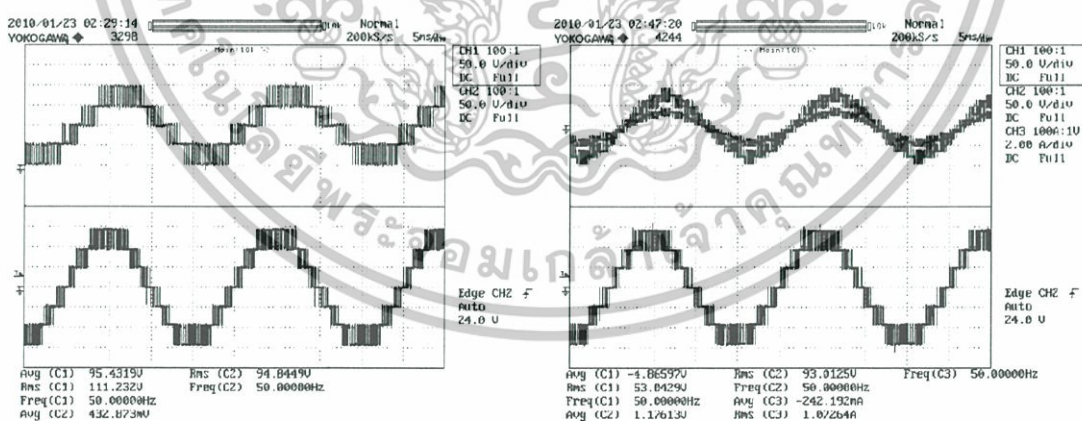
ก.1 การทดสอบสมรรถนะการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุใน FCMLI ที่สภาวะการจ่ายโหลด 4 ลักษณะด้วยเทคนิค CRPWM ที่ใช้ Rotate pulse (ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุใน FCMLI จะเกิดจากเทคนิคการ Start-up)

ก.1.1 เพาเวอร์แฟคเตอร์ (PF) = 1 (โหลดไฟขนาด 100 W จำนวน 5 โหลด/เฟส ต่อเป็น 3 เฟส แบบ Y)



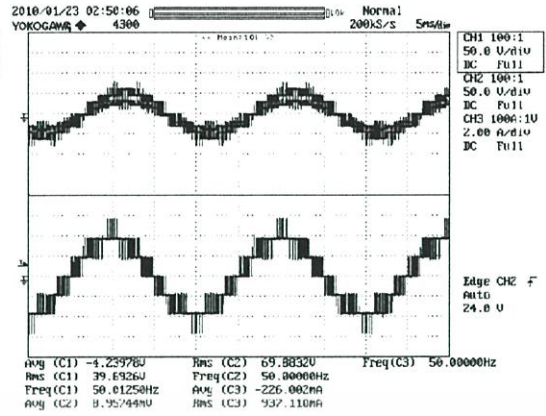
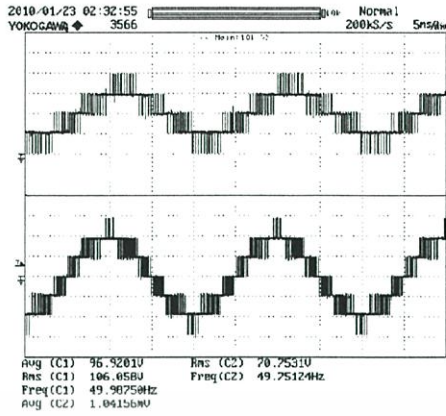
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.1 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 1$



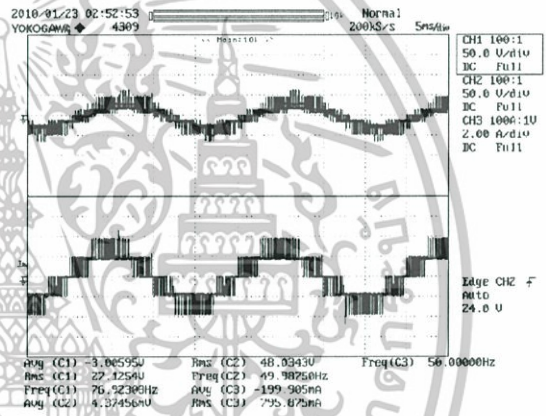
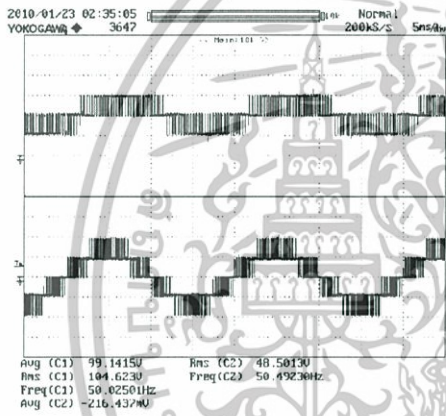
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.2 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.8$



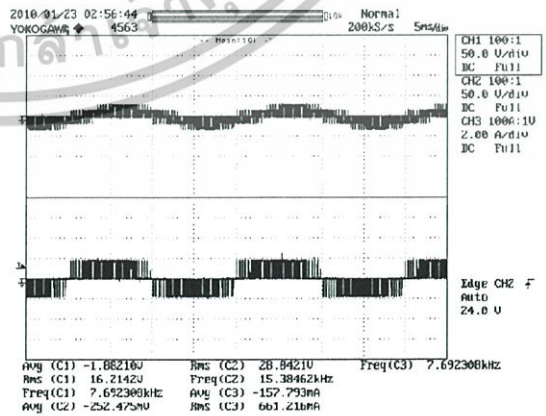
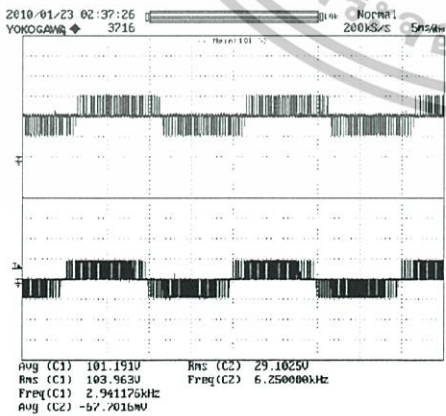
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.3 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.6$



(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.4 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.4$

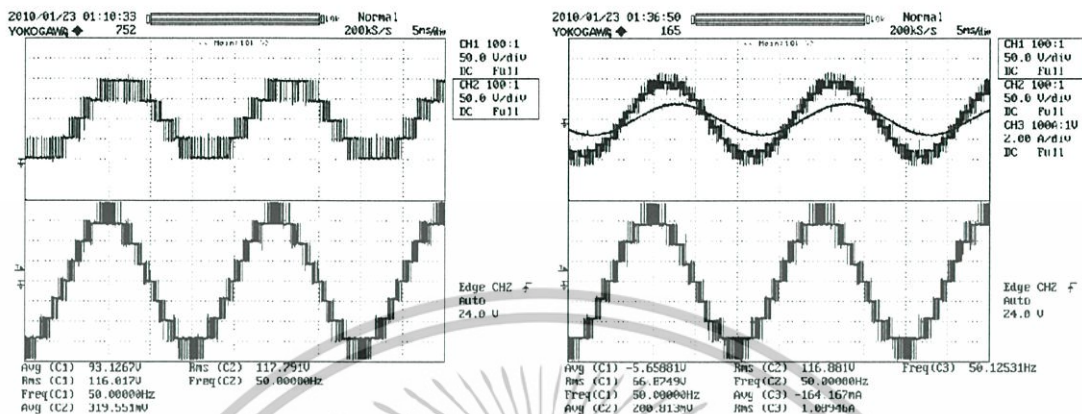


(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.5 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.2$

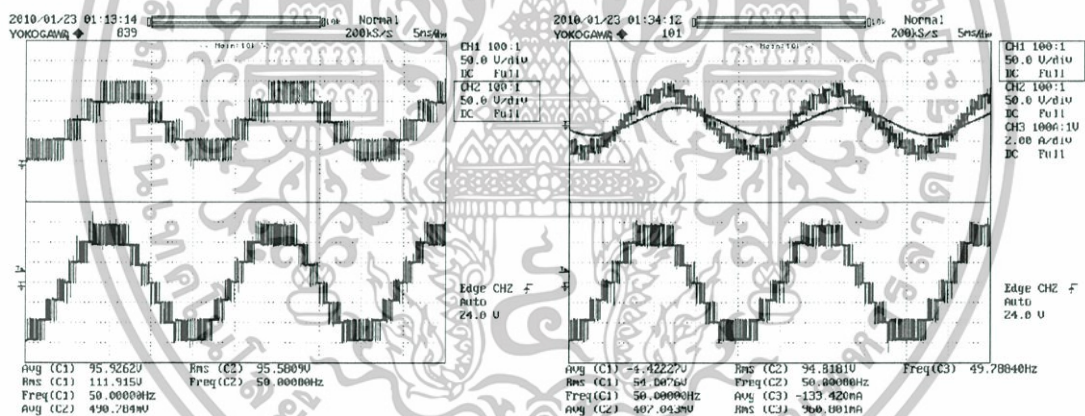
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.2 เพาเวอร์แฟคเตอร์ (PF) = 0.9 (โหลดไฟขนาด 100 W จำนวน 5 หลอด ต่ออนุกรม
กับบัลลาสต์แกนเหล็ก 40 W จำนวน 18 ตัว/เฟส ต่อเป็น 3 เฟส แบบ Y)



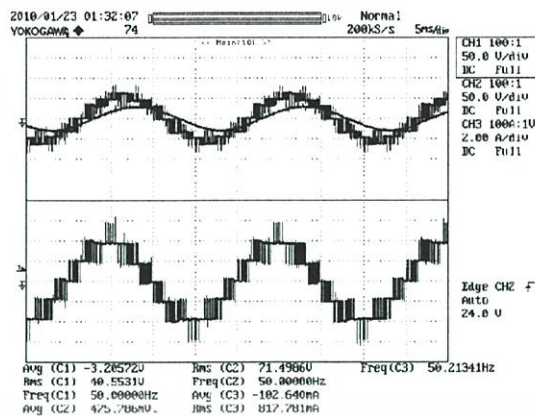
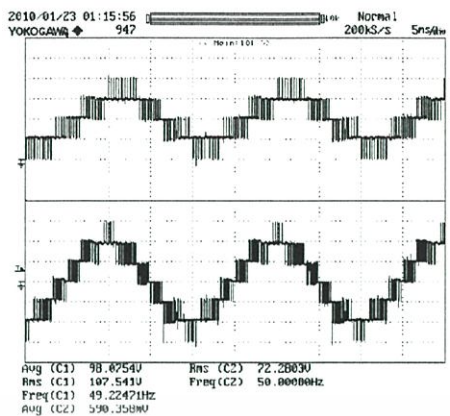
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.6 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 1$



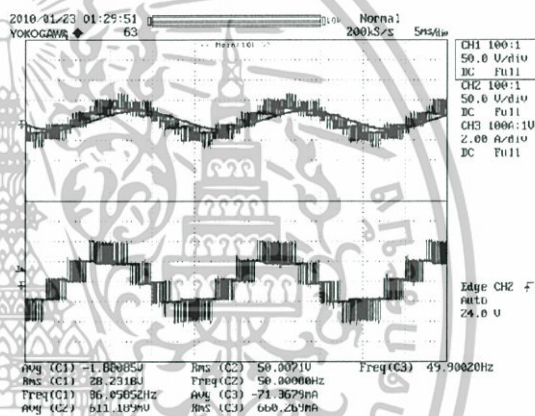
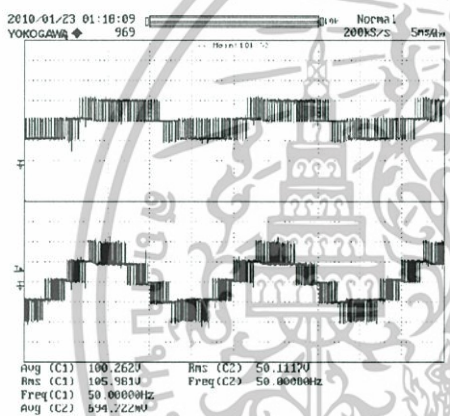
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.7 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.8$



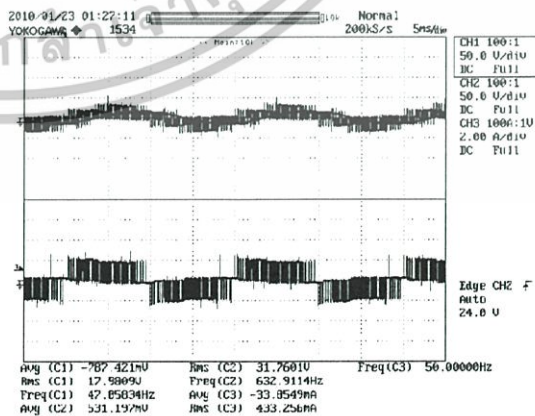
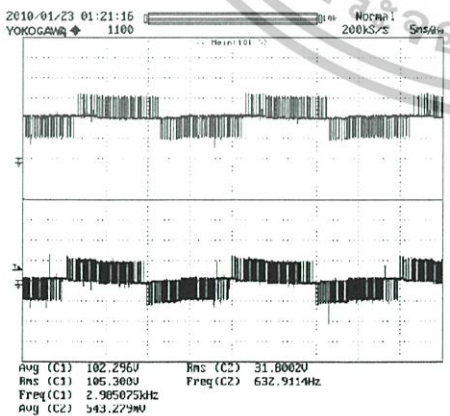
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ 8 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.6$



(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ 9 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.4$

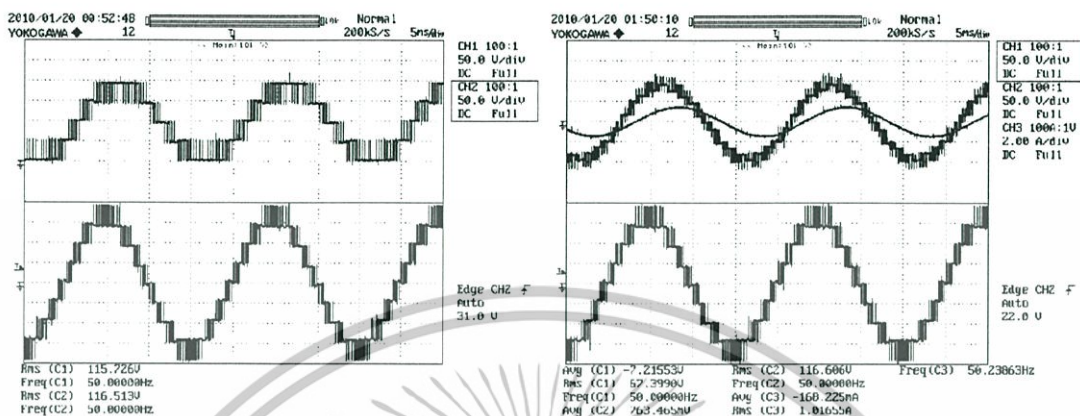


(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ 10 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.2$

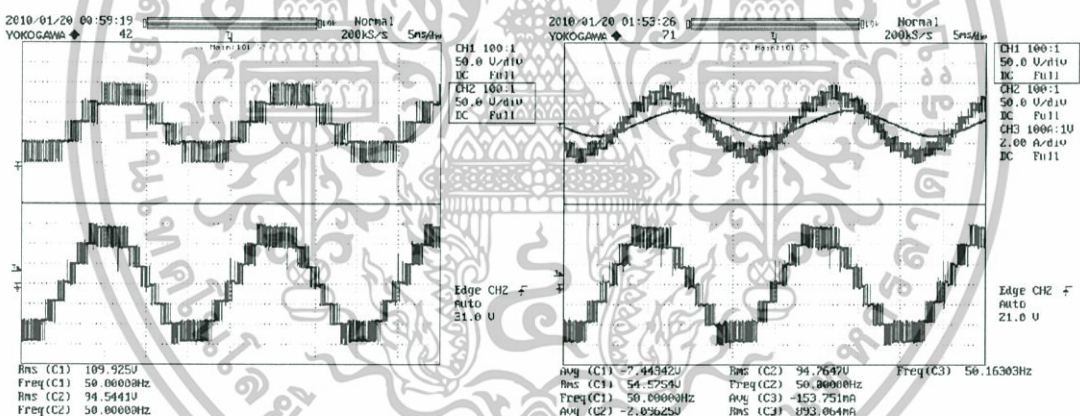
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.3 เพาเวอร์แฟคเตอร์ (PF) = 0.8 (โหลดไฟขนาด 100 W จำนวน 5 หลอด ต่ออนุกรม
กับบัลลาสต์แกนเหล็ก 40 W จำนวน 12 ตัว/เฟส ต่อเป็น 3 เฟส แบบ Y)



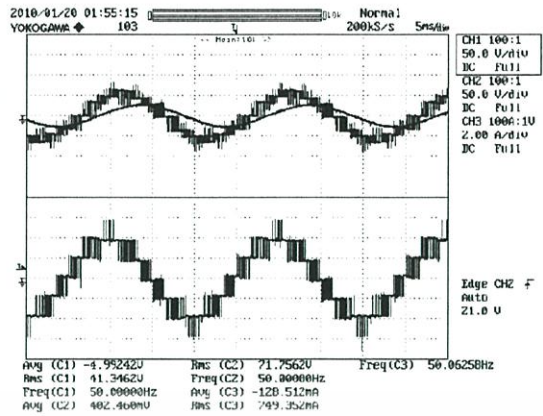
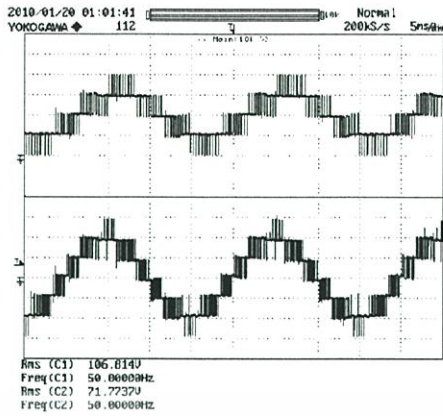
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.11 รูปคลื่นของแรงดันค่านอกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 1$



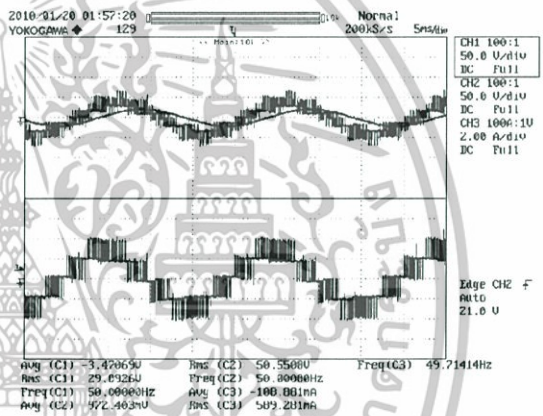
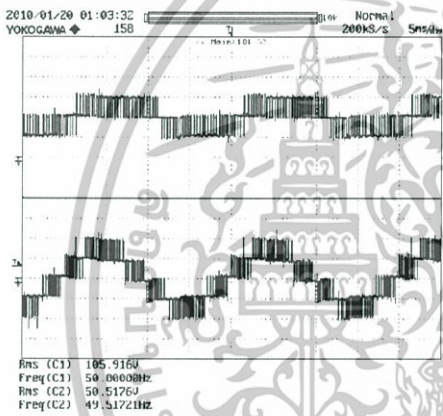
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.12 รูปคลื่นของแรงดันค่านอกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.8$



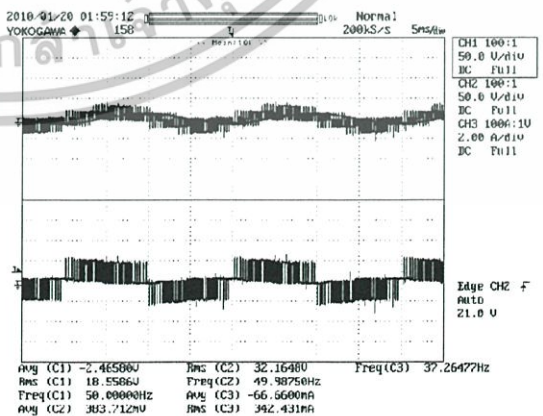
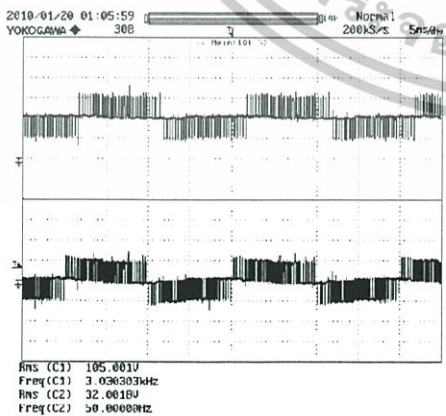
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.13 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.6$



(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.14 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.4$

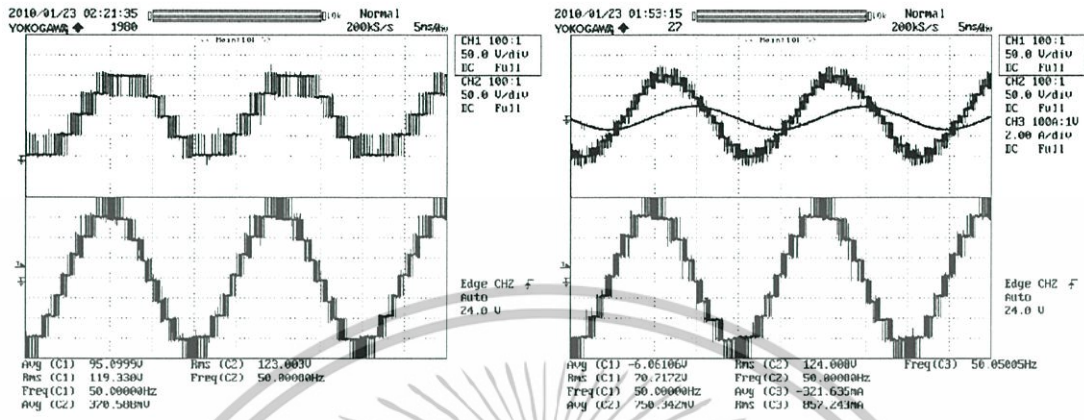


(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.15 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.2$

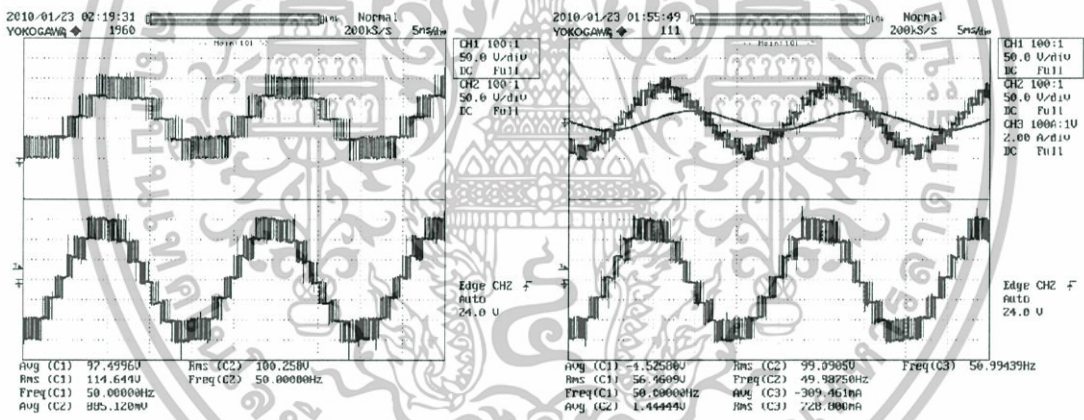
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.4 เพาเวอร์แฟกเตอร์ (PF) = 0.3 (โหลดไฟขนาด 100 W จำนวน 5 หลอด ต่ออนุกรม กับบัลลาสต์แกนเหล็ก 40 W จำนวน 6 ตัว/เฟส ต่อเป็น 3 เฟส แบบ Y)



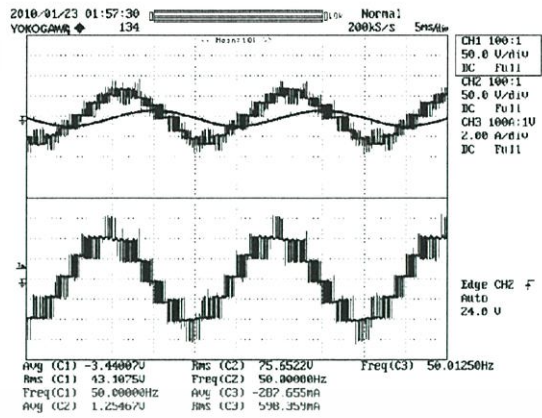
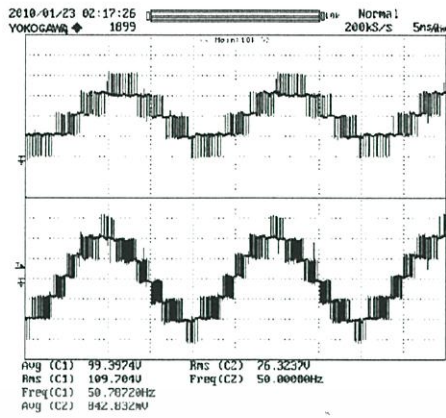
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.16 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 1$



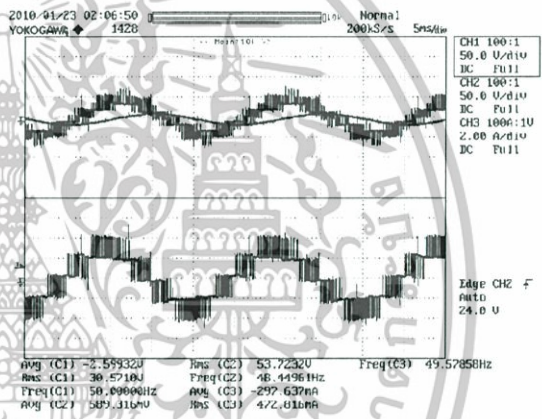
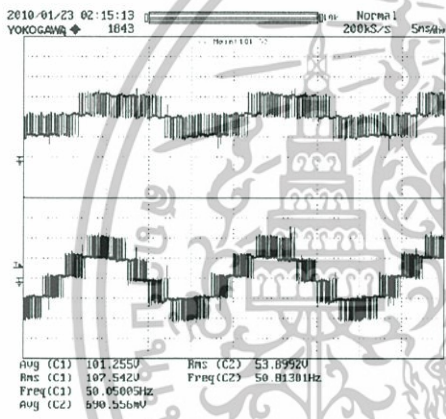
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.17 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.8$



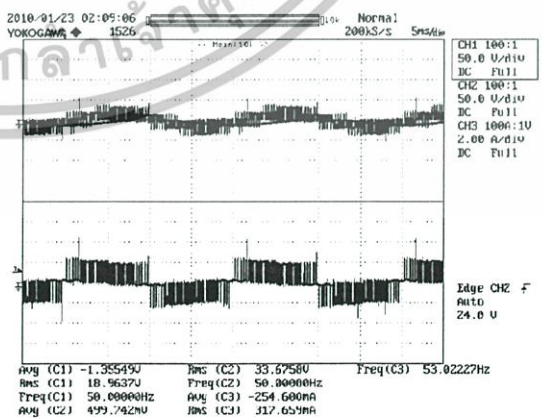
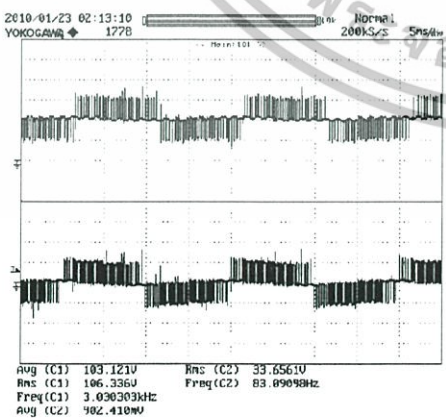
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.18 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.6$



(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.19 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.4$



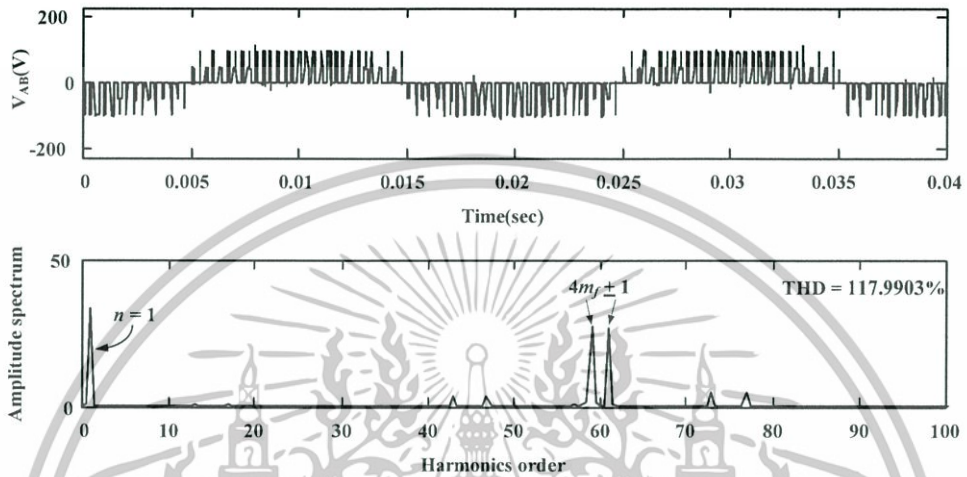
(ก) รูปคลื่น V_{A0} (เส้นบน) และ V_{AB} (เส้นล่าง) (ข) แรงดัน V_{AN} และกระแส i_A (เส้นบน)

รูปที่ ก.20 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกและกระแสที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

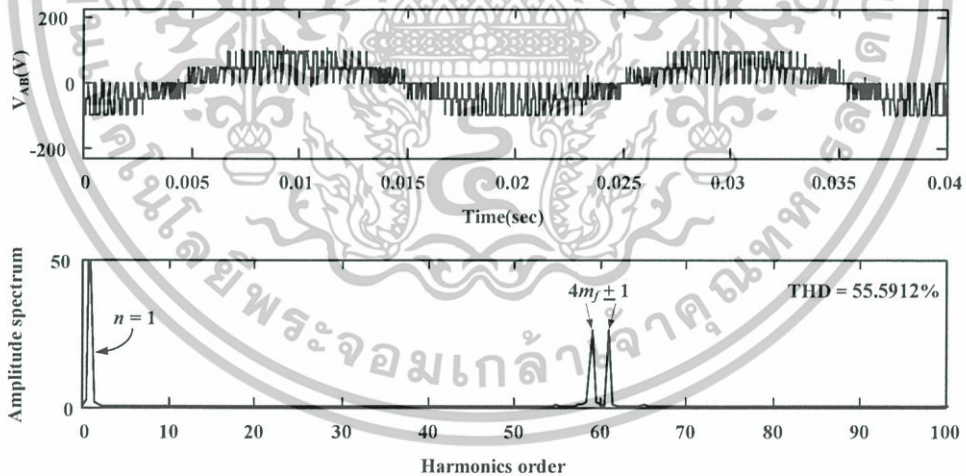
ก.2 ผลการทดลองความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันสาย(%THDv)โดยพิจารณาถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 100th (ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุใน FCMLI คงที่)

ก.2.1 ทดสอบด้วยเทคนิค PSPWM



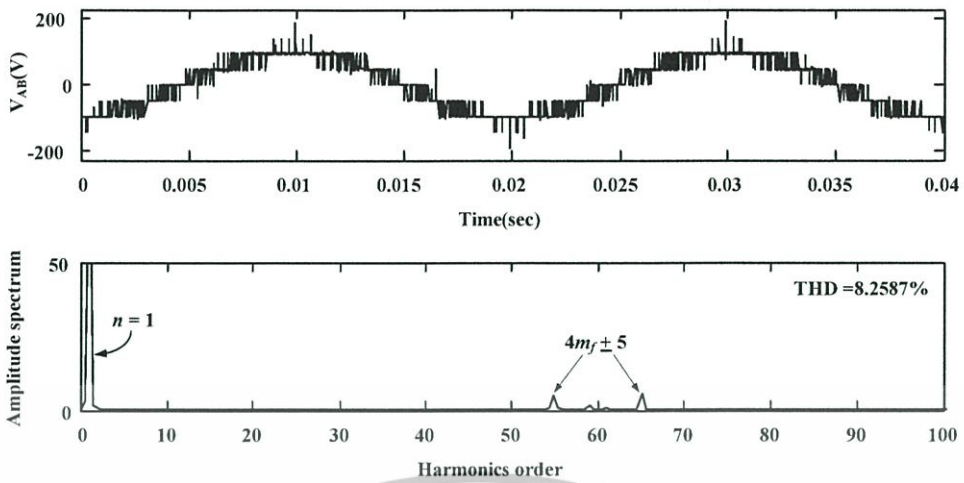
รูปที่ ก.21 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 0.2$

$$(m_f = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



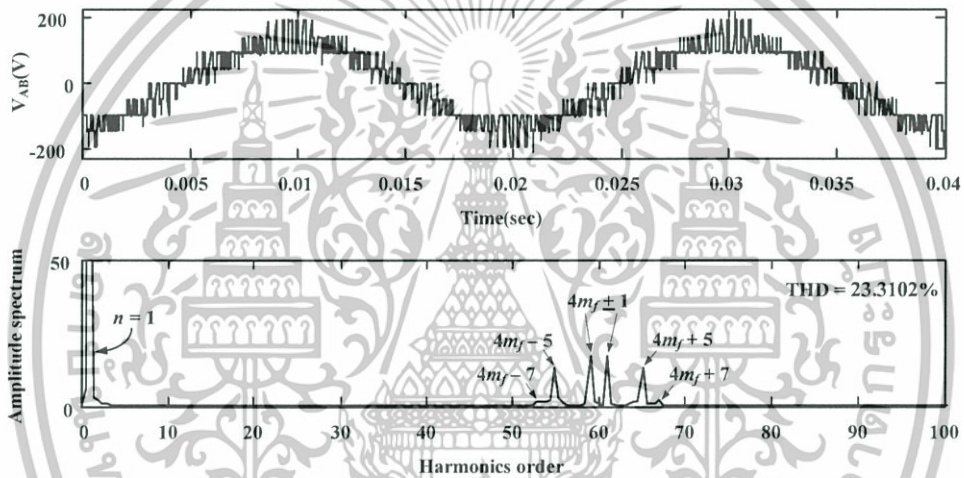
รูปที่ ก.22 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 0.4$

$$(m_f = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



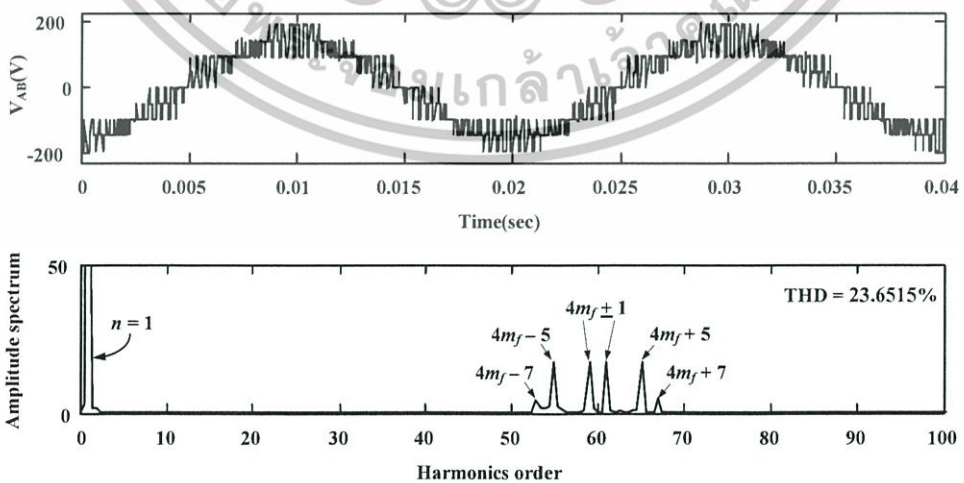
รูปที่ ก.23 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 0.6$

$$(m_f = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



รูปที่ ก.24 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 0.8$

$$(m_f = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$

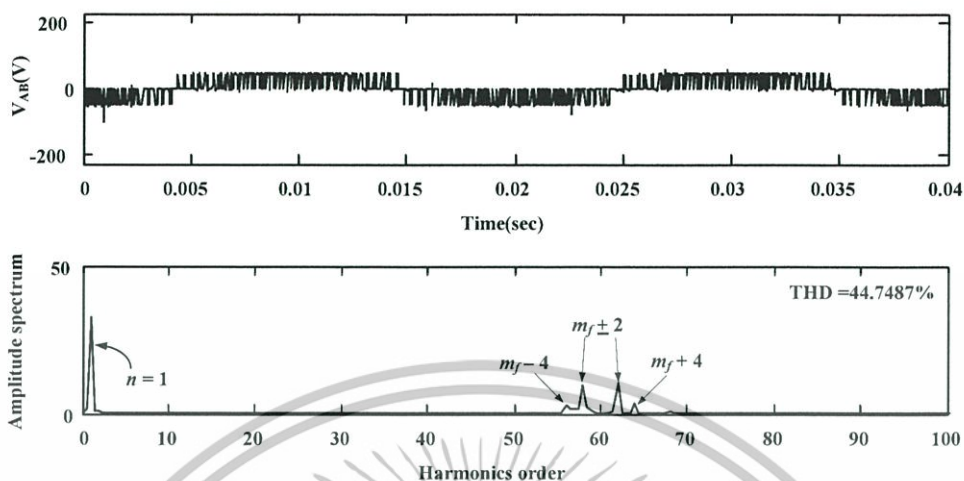


รูปที่ ก.25 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 0.9$

$$(m_f = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$

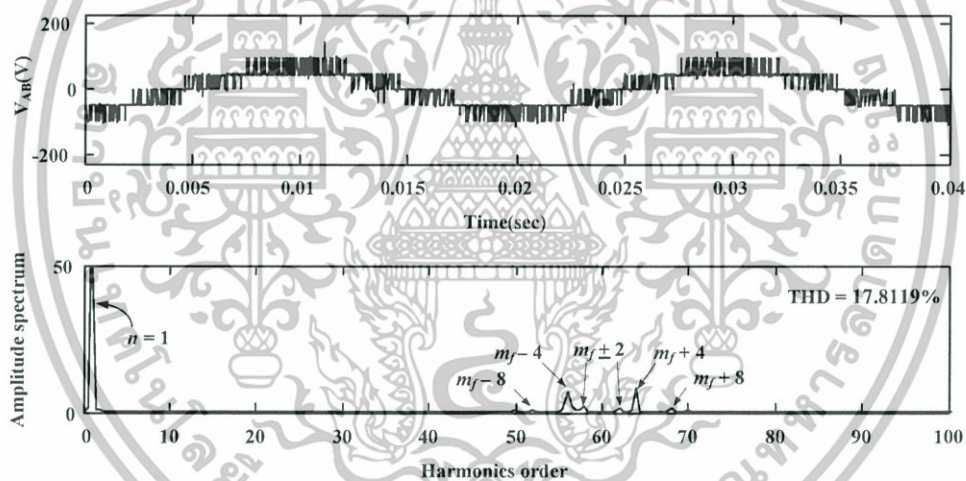
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.2 ทดสอบด้วยเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse)



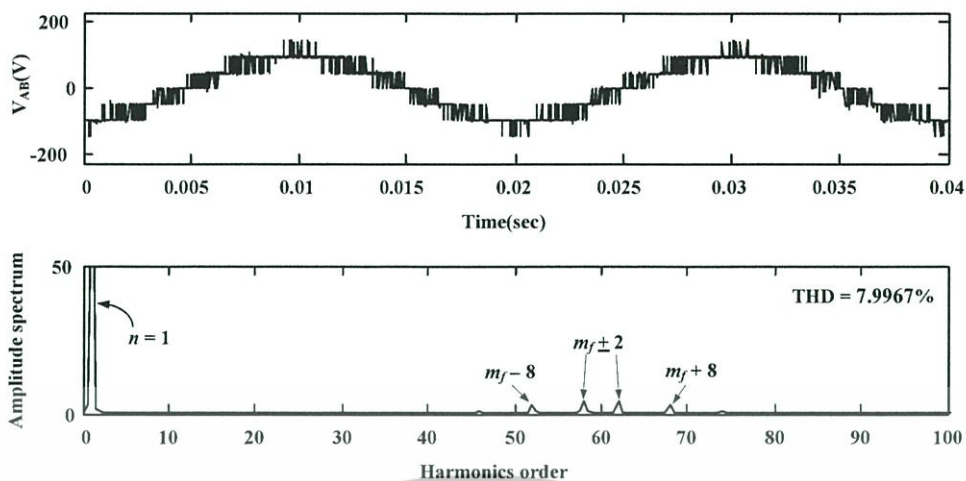
รูปที่ ก.26 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค IPDPWM ที่ $m_a = 0.2$

$$(m_f = 60, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 3000 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



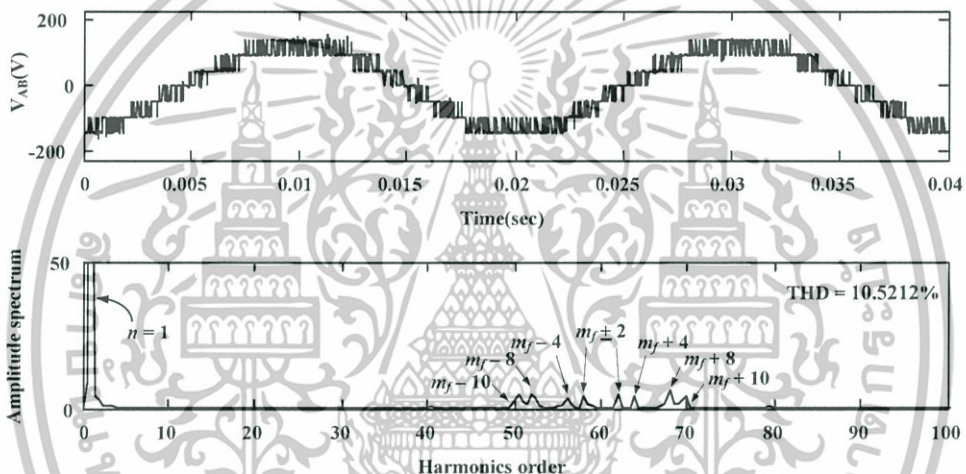
รูปที่ ก.27 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค IPDPWM ที่ $m_a = 0.4$

$$(m_f = 60, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 3000 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



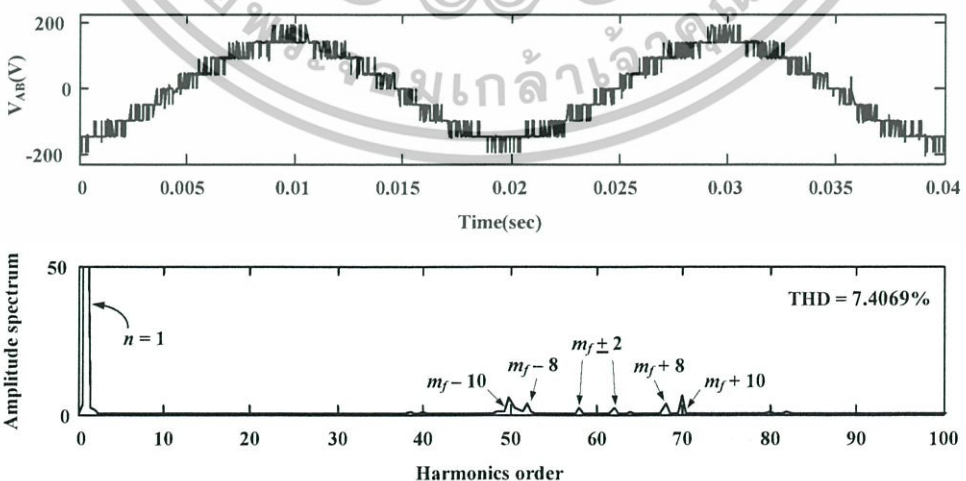
รูปที่ ก.28 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกของเทคนิค IPDPWM ที่ $m_a = 0.6$

$$(m_f = 60, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 3000\text{Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



รูปที่ ก.29 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกของเทคนิค IPDPWM ที่ $m_a = 0.8$

$$(m_f = 60, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 3000\text{Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$

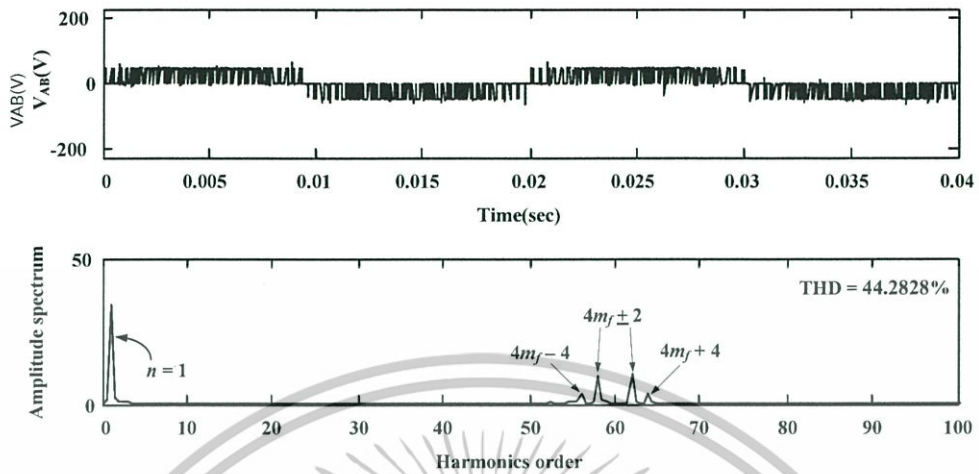


รูปที่ ก.30 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกของเทคนิค IPDPWM ที่ $m_a = 0.9$

$$(m_f = 60, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 3000\text{Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$

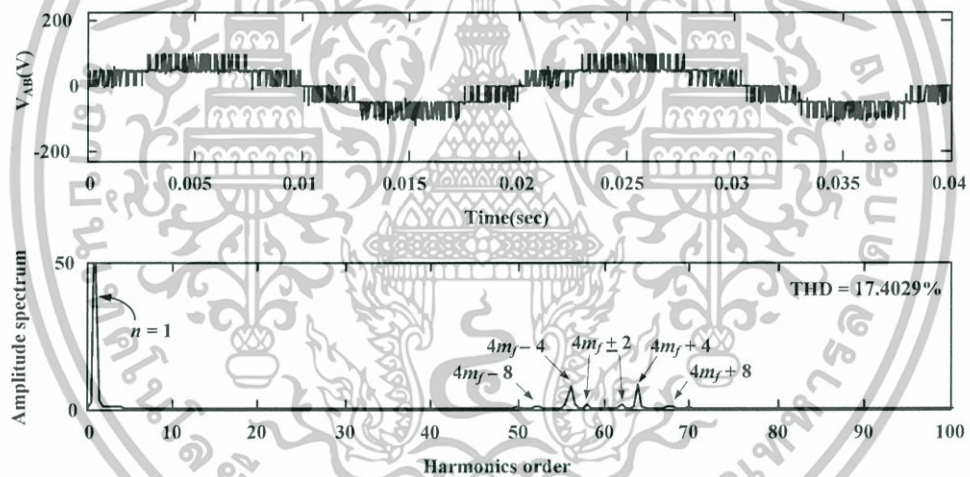
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.3 ทดสอบด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse)



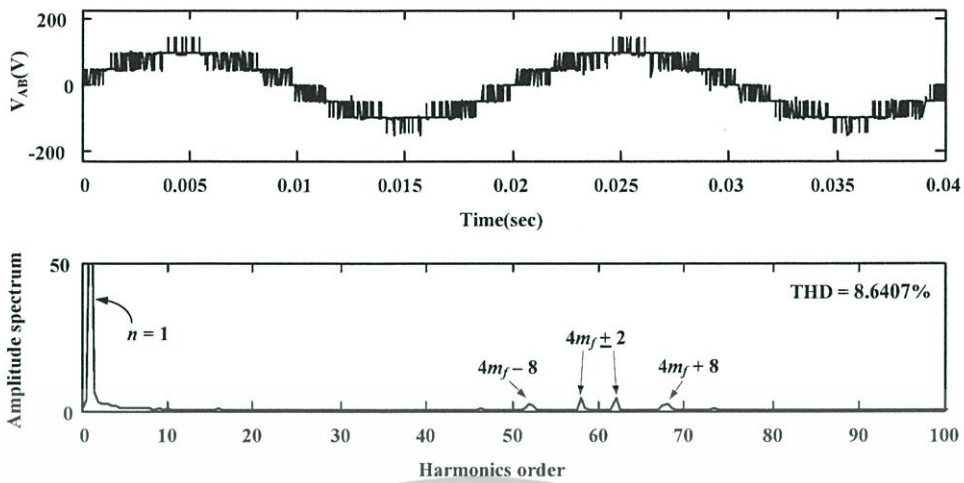
รูปที่ ก.31 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค CRPWM ที่ $m_a = 0.2$

$$(m_f = 15 \quad f_m = 50 \text{ Hz} \quad f_{cr} = 750 \text{ Hz} \quad \text{และ} \quad f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



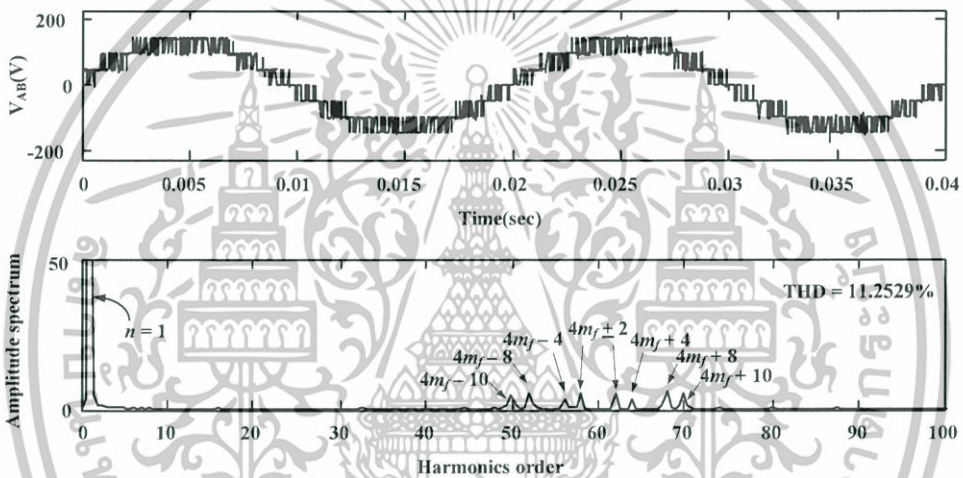
รูปที่ ก.32 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค CRPWM ที่ $m_a = 0.4$

$$(m_f = 15 \quad f_m = 50 \text{ Hz} \quad f_{cr} = 750 \text{ Hz} \quad \text{และ} \quad f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



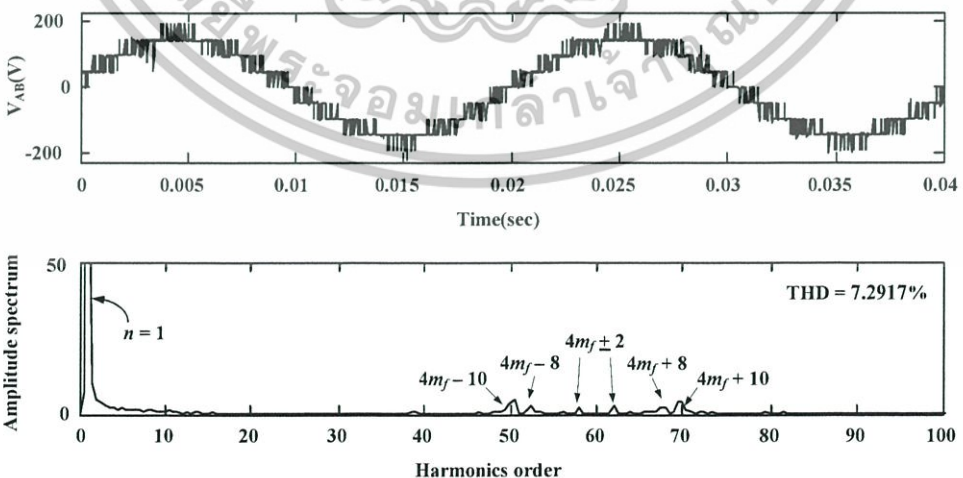
รูปที่ ก.33 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค CRPWM ที่ $m_a = 0.6$

$$(m_j = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



รูปที่ ก.34 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค CRPWM ที่ $m_a = 0.8$

$$(m_j = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$



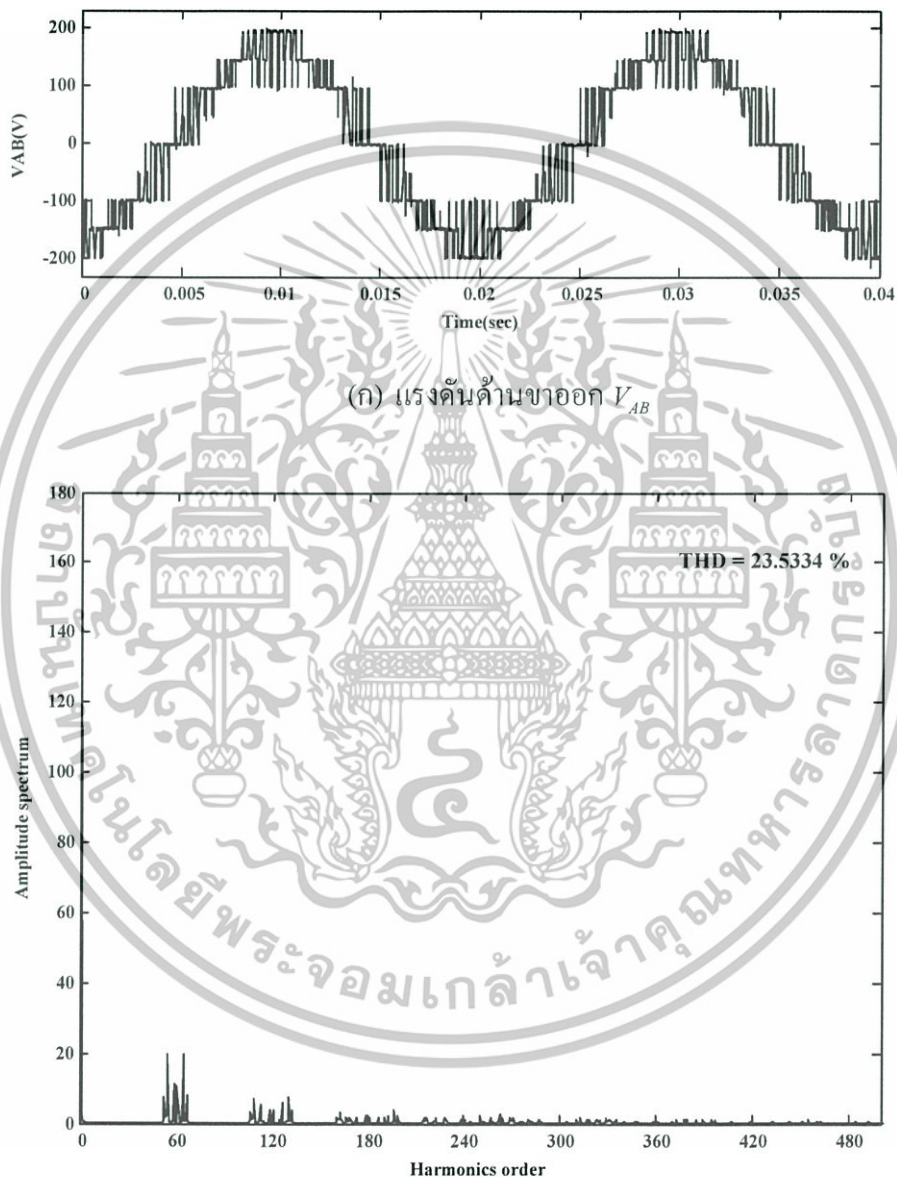
รูปที่ ก.35 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของเทคนิค CRPWM ที่ $m_a = 0.9$

$$(m_j = 15, f_m = 50 \text{ Hz}, f_{cr} = 750 \text{ Hz} \text{ และ } f_{sw,dev} = 750 \text{ Hz})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

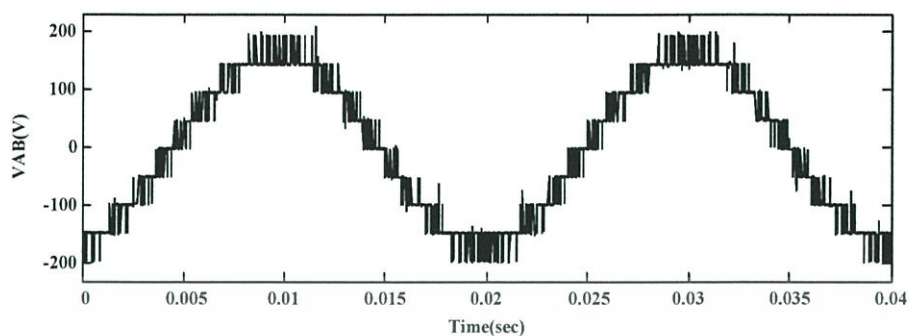
ก.3 การทดสอบ FCMLI เพื่อเปรียบเทียบความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของแรงดันสาย โดยพิจารณาถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 500th ใช้ PF = 0.8 (ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุใน FCMLI จะเกิดจากเทคนิคการ Start-up)

ก.3.1 ทดสอบด้วยเทคนิค PSPWM

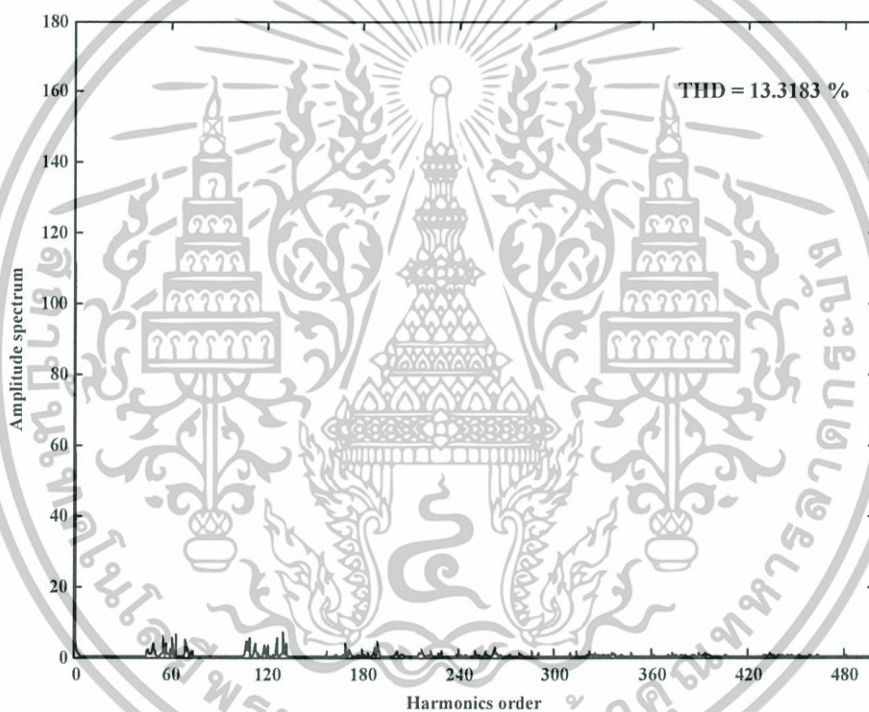


รูปที่ ก.36 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ ที่ $m_a = 1$ ด้วยเทคนิคPSPWM

ก.3.2 ทดสอบด้วยเทคนิค IPDPWM (with rotate pulse)



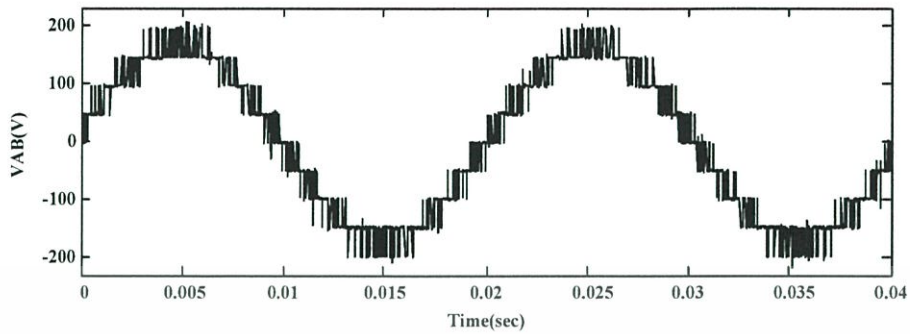
(ก) แรงดันด้านขาออก V_{AB}



(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ ของ V_{AB}

รูปที่ ก.37 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ ที่ $m_a = 1$
ด้วยเทคนิค IPDPWM (rotate pulse)

ก.3.3 ทดสอบด้วยเทคนิค CRPWM (with rotate pulse)

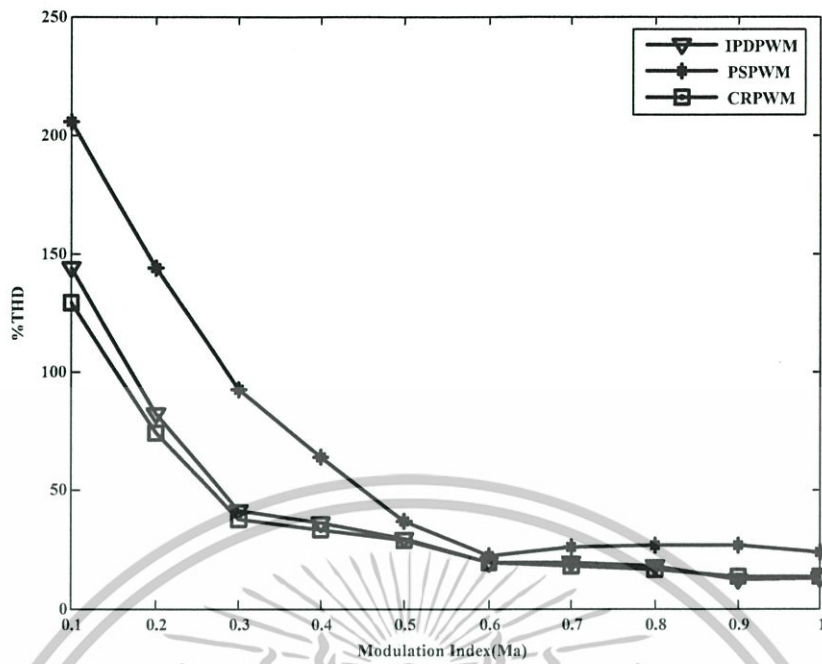


(ก) แรงดันด้านขาออก V_{AB}



(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ ของ V_{AB}

รูปที่ ก.38 รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ ที่ $m_a = 1$
ด้วยเทคนิค CRPWM (rotate pulse)

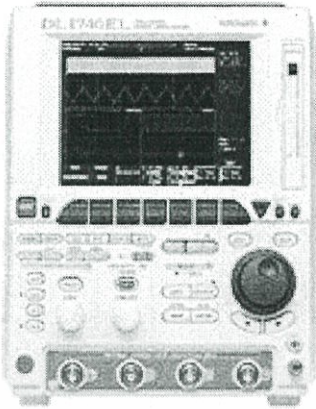




รูปที่ ก.39 กราฟสรุปการทดลอง %THDv กรณีพิจารณาถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 500th

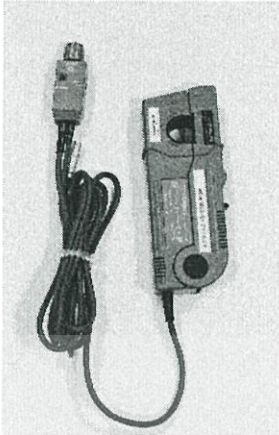





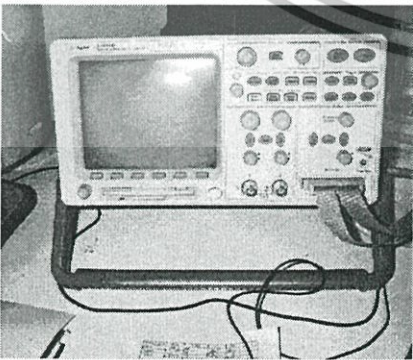
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Oscilloscope (YOKOGAWA)</p> <p>รุ่น DL1740E / (4 Channel)</p> <p>รายละเอียด 500 MHz Analog Bandwidth 2 MW/ch Max. record length 1 GS/s Max. sampling rate 400V(DC+AC peak) $\pm 1.5\%$ DC accuracy</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ Band Differential Probe</p> <p>รุ่น 700925</p> <p>รายละเอียด 100 MHz</p> <p>A probe lets you make wide-band Differential input measurements</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ Current Probe(FLUKE)</p> <p>รุ่น 80i-110s</p> <p>รายละเอียด Current ranges: 0 to 10 A dc or ac peak 0 to 100 A dc or ac peak Frequency: DC to 100kHz .(@3 db) Output signals: 10 A range: 100 mV/A 100 A range: 10 mV/A</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>ผลิตภัณฑ์ Current Probe(YOKOGAWA) รุ่น 701930 รายละเอียด Current ranges: Bandwidth: DC to 10 MHz; current measurement : Max 30/150/500A Maximum continuous input range: 150 Arms Amplitude accuracy (DC, and 45 to 66 Hz, 0 to 150 Arms): $\pm 1\%$ of rdg ± 1 mV Output voltage rate: 0.01 V/A</p>
---	---

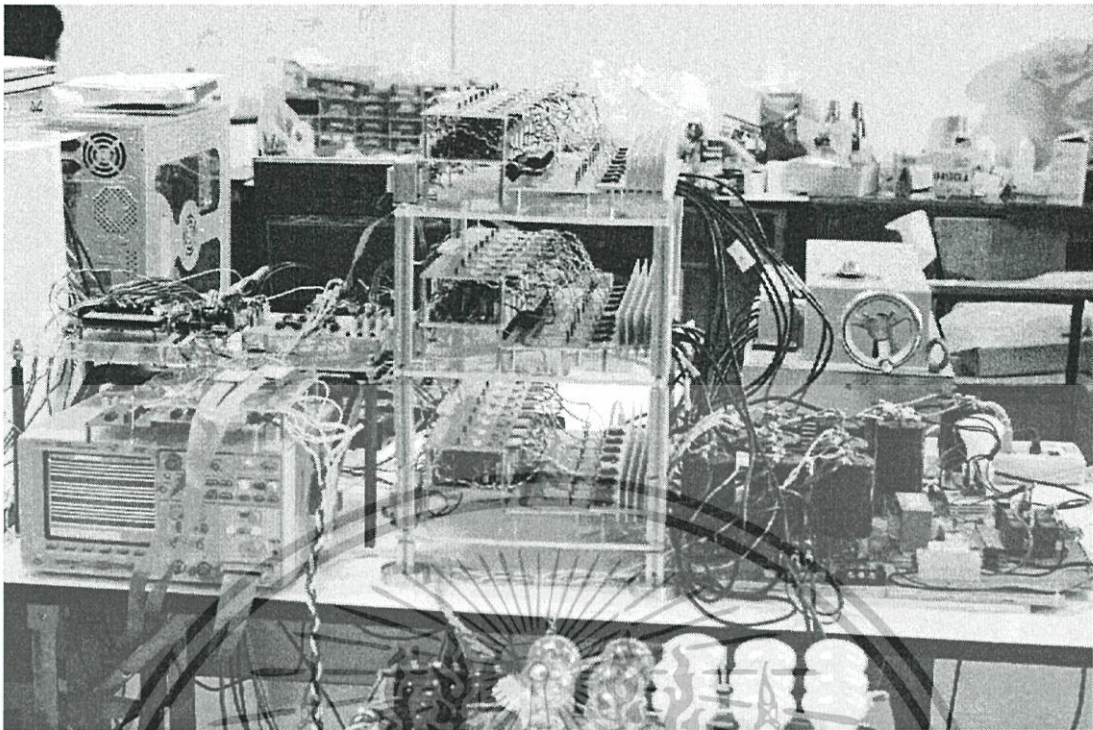
	<p>ผลิตภัณฑ์ Multi Meter(FLUKE) รุ่น 179 รายละเอียด True RMS 1kHz Accuracy = 0.09% Vac or Vdc : 0.1mV to 1000V Iac to Idc : 0 to 10A</p>
--	---

	<p>ผลิตภัณฑ์ MIXED SIGNAL OSCILLOSCOPE รุ่น 54622D รายละเอียด 100 MHz 200 MS/s 100-240 V input 300 Vrms 1.2 A 2 Ch. Analog 16 Ch Digital</p>
---	--

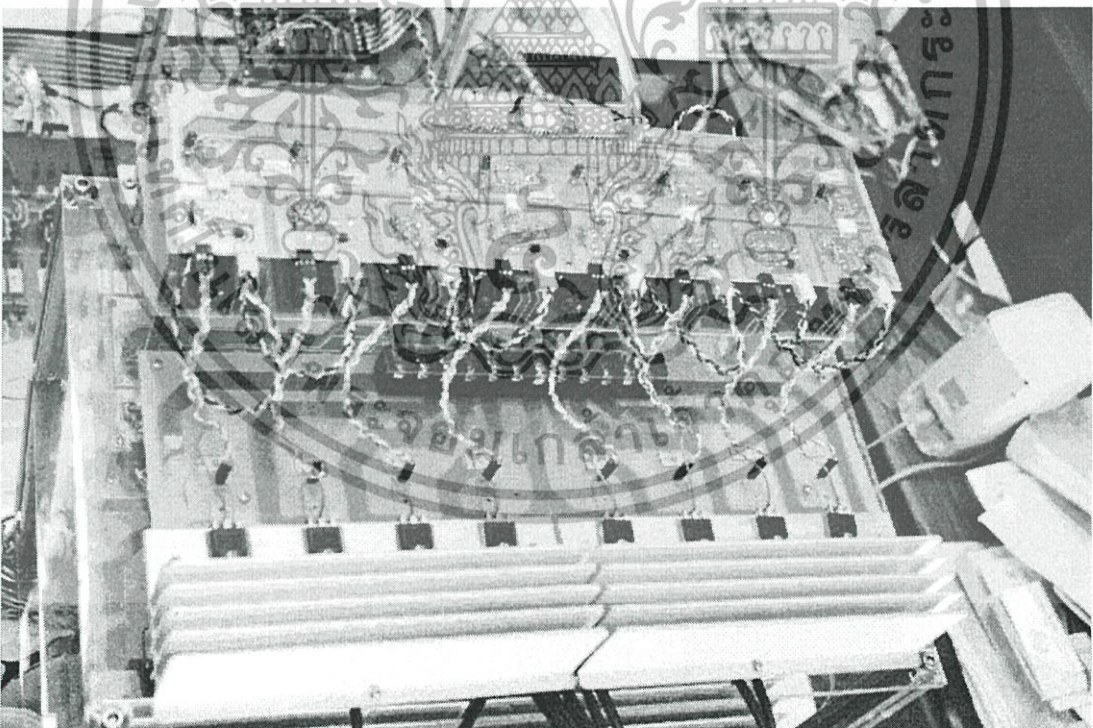
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

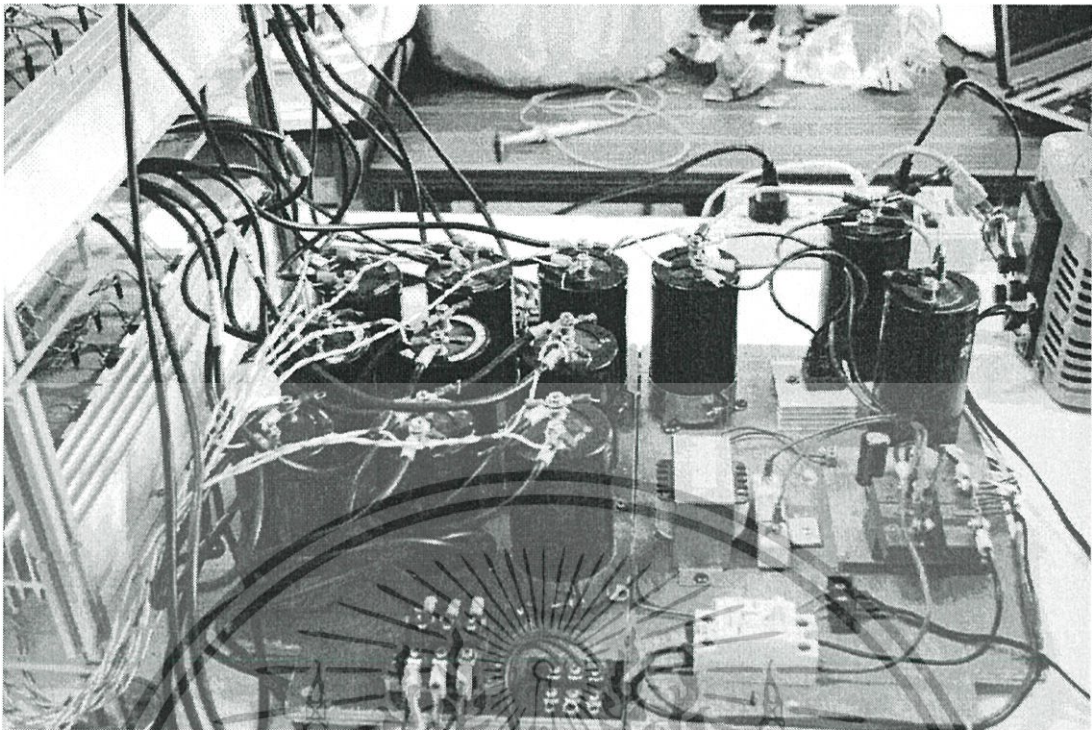


รูปที่ ค. 1 ภาพรวมของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

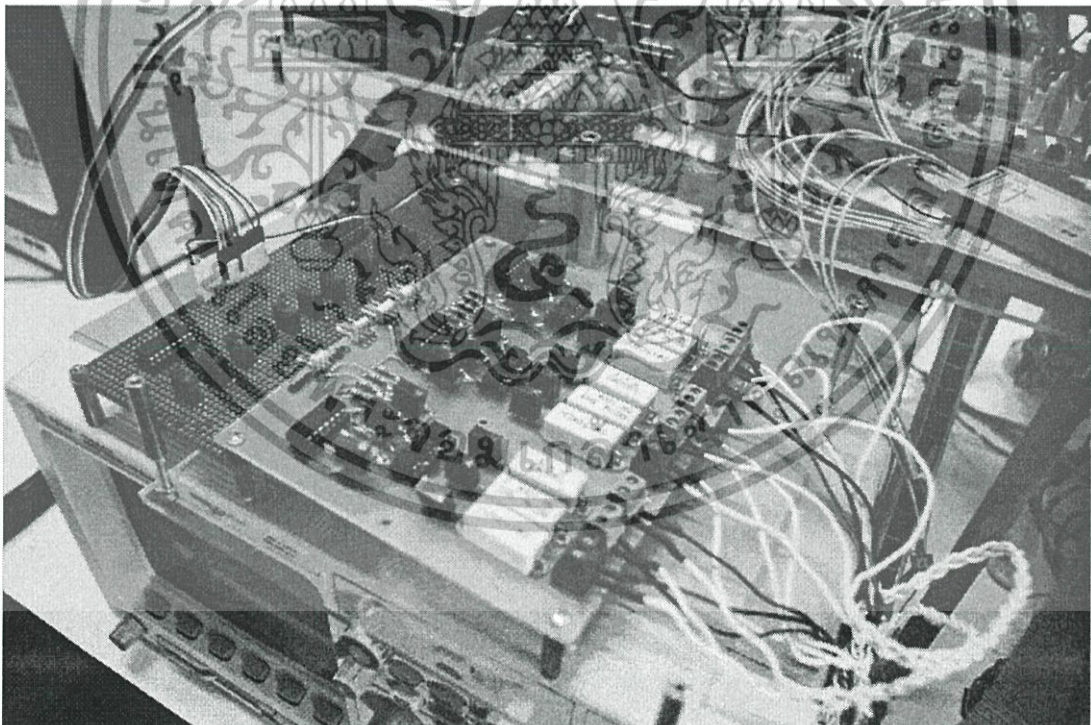


รูปที่ ค. 2 วงจรจับเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

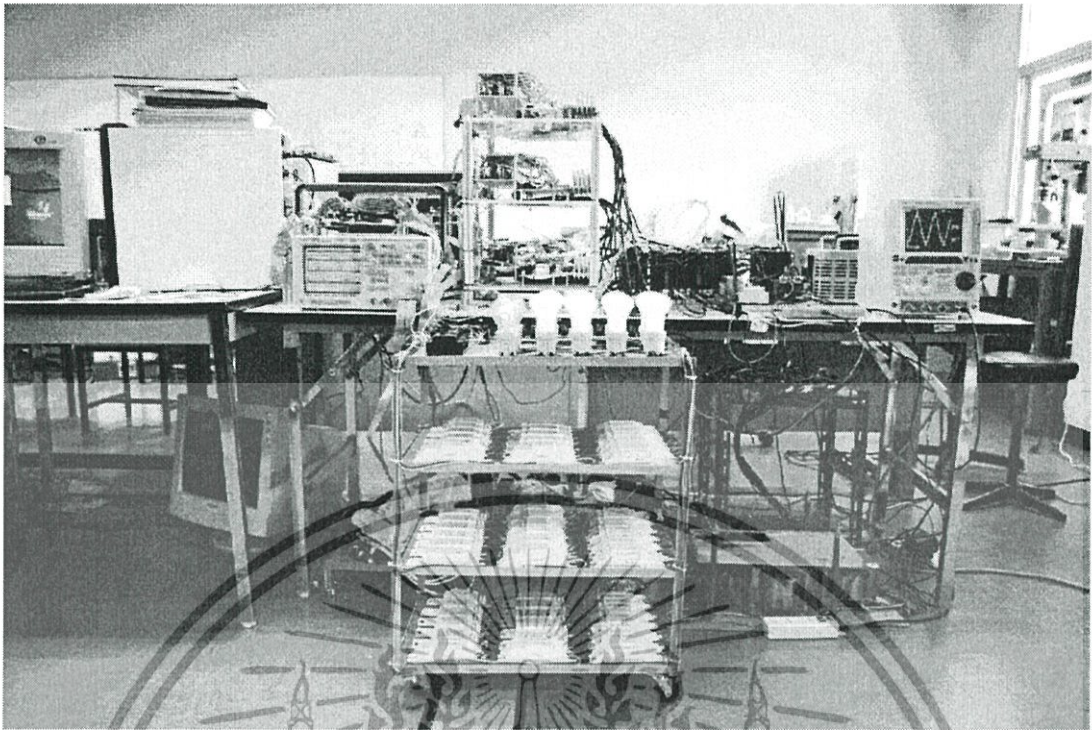


รูปที่ ค. 3 ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์



รูปที่ ค. 4 ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค. 5 โหมดที่ใช้ในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1. P. Keawworasut, S. Polmai, "Balancing of Capacitor Voltage of Flying-Capacitor Multilevel Inverter by SPWM Techniques" The 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), Royal Hill Golf and Spa, Nakhon nayok, Thailand, pp. 501-504, Oct 29-31, 2008.

การรักษาสมดุลแรงดันของคาปาซิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยการมอดูเลตแบบไซน์

Balancing of Capacitor Voltage of Flying-Capacitor Multilevel Inverter by SPWM Techniques

ไพบุณย์ แก้วรสสุต และ สมภพ ผลไม้

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถ.ลาดองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ : 0-2326-4165

E-mail: paiboonkeaw@gmail.com, kpsompob@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการรักษาสมดุลแรงดันของตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ซึ่งใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบไซน์ โดยทำการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC และเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้ระหว่างเทคนิคการมอดูเลตแบบไซน์ สามแบบคือ การมอดูเลตแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ การมอดูเลตแบบเลื่อนระดับแคเรียร์และการมอดูเลตด้วยการจัดเรียงแคเรียร์ใหม่ โดยมีหัวข้อของการเปรียบเทียบคือ การรักษาสมดุลแรงดันและการกระเพื่อมของแรงดันของตัวเก็บประจุ รวมทั้งความเพี้ยนทางฮาร์โมนิกส์ของแรงดันด้านออก

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์, การมอดูเลตแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์, การมอดูเลตแบบเลื่อนระดับ, การมอดูเลตด้วยการจัดเรียงแคเรียร์ใหม่, การรักษาสมดุลแรงดันของตัวเก็บประจุ

Abstract

This paper presents techniques for balancing of capacitor voltage of flying-capacitor multilevel inverter using sinusoidal pulsewidth modulation. Simulations were carried out using PSCAD/EMTDC and the results are compared among three modulation techniques; phase-shift PWM (PSPWM), in-phase phase disposition PWM (IPDPWM), and carrier-redistribution PWM (CRPWM). The comparison topics include balancing and fluctuation of capacitor voltage and the harmonic distortion of the output voltage.

Keywords: flying-capacitor multilevel inverter, phase-shift PWM, in-phase phase disposition PWM, carrier-redistribution PWM, flying-capacitor voltage balance.

1. คำนำ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมมากขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์วงจรขับเคลื่อนระดับถูกนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรขับเคลื่อนชนิดต่างๆ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีลักษณะเด่นหลายประการ คือ แรงดันด้านออกมีความใกล้เคียงไซน์ แรงดันตกคร่อมที่สวิตช์กำลังแต่ละตัวมีค่าต่ำ และขนาดฮาร์โมนิกส์ของแรงดันด้านออกลดลงเมื่อระดับอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น ตัวอย่างการนำไปใช้งานเช่นการประยุกต์ใช้เป็นระบบขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์หลายระดับในการควบคุมมอเตอร์ การกำจัดฮาร์โมนิกส์ในระบบและการปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ในระบบ [1]

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์มีคอมมอนดีซีลิงค์ และสามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์ในแต่ละสถานะได้ แต่อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีตัวเก็บประจุจำนวนมาก(ตัวเก็บประจุที่ไม่ถูกต่อเข้ากับคอมมอนดีซีลิงค์จะเรียกว่า ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์) ซึ่งการกำเนิดของแรงดันทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ จะเกิดจากผลรวมของระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์แต่ละตัวในสถานะการสวิตช์นั้นๆ ดังนั้นการนำอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้มาใช้งานจะต้องคำนึงถึงเรื่องการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์เป็นสิ่งสำคัญ

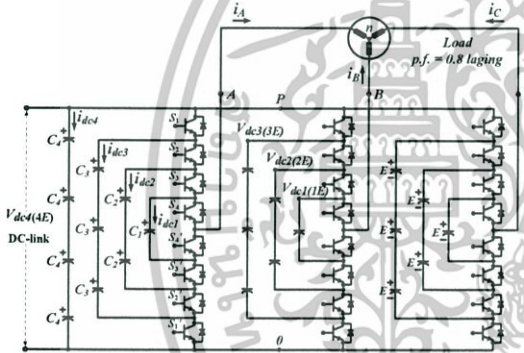
วิธีการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ยังคงเป็นปัญหาสำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ ซึ่งเทคนิคที่ดัดแปลงลิแวนต์นิยมนำมาศึกษากันมีอยู่ 2 วิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน คือ เทคนิคที่ดัดแปลงลิแวนต์ชนิดเลื่อนเฟส(PSPWM) สามารถรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ดีที่สุด[3] แต่ให้ผลทางด้านคุณภาพของแรงดันด้านขาออกในระดับปานกลาง และเทคนิคที่ดัดแปลงลิแวนต์ชนิดเลื่อนระดับ(IPDPWM) ไม่สามารถรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ แต่ให้ผลทางด้านคุณภาพของแรงดันด้านขาออกได้ดีที่สุด [3] หากพิจารณาคุณภาพของแรงดันทางขาออก เทคนิคIPDPWMจึงเหมาะแก่การนำไปใช้งานมากที่สุด แต่ต้องปรับปรุงปัญหาด้านการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ประจุหลายอ็งค์ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการนำเอาวิธีการหมุนวนสัญญาณเกด(pulse rotation) [3] มาใช้ทำให้แก้ปัญหาด้านการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุหลายอ็งค์ได้ แต่ยังมีภาระเพื่อมของระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุหลายอ็งค์อยู่สูง ในบทความนี้ได้นำเทคนิค CRPWM ซึ่งนำเสนอใน[2] มาศึกษาและประยุกต์ใช้กับอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ 5 ระดับ โดยจะศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรักษาสมดุลแรงดันของตัวเก็บประจุ รวมทั้งคุณภาพของแรงดันขาออกเปรียบเทียบกับเทคนิค IPDPWM

2. อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

รูปที่ 1 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ซึ่งแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่พิจารณาคือแรงดันที่จุด A เทียบกับจุด 0 (คิซิปส์ด้านลบ) เมื่อสวิตช์ S_{11} , S_{22} , S_{33} และ S_{44} ทำงานแรงดันของอินเวอร์เตอร์ $V_{A0} = 4E$ ในทำนองเดียวกันเมื่อ S_{11} , S_{22} และ S_{33} ทำงาน $V_{A0} = 3E$ จากตารางที่ 1 หากพิจารณาที่ $V_{A0} = 3E$ จะสามารถสร้างระดับแรงดันได้จาก 4 รูปแบบของสถานะการสวิตช์ที่ต่างกัน



รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

ตารางที่ 1 ระดับแรงดันและสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

สถานะการสวิตช์	แรงดันผลรวมของตัวเก็บประจุ	แรงดันคั่นขาออก V_{A0}	C_1	C_2	C_3	C_4
$S_{11} S_{22} S_{33} S_{44}$	$4E$	$V_{dc}(4E)$	-	N	N	N
$S_{11} S_{22} S_{33} S_{43}$	$4E - 1E$	-	-	N	N	+
$S_{11} S_{22} S_{33} S_{42}$	$4E - 2E + 1E$	$3E$	-	N	+	-
$S_{11} S_{22} S_{33} S_{41}$	$4E - 3E + 2E$	$3E$	-	+	-	N
$S_{11} S_{22} S_{32} S_{44}$	$3E$	$3E$	N	-	-	N
$S_{11} S_{22} S_{32} S_{43}$	$4E - 2E$	-	-	N	+	N
$S_{11} S_{22} S_{32} S_{42}$	$4E - 3E + 2E - 1E$	-	-	+	-	+
$S_{11} S_{22} S_{32} S_{41}$	$3E - 1E$	$2E$	N	-	N	+
$S_{11} S_{22} S_{31} S_{44}$	$4E - 3E + 1E$	$2E$	N	-	N	-
$S_{11} S_{22} S_{31} S_{43}$	$3E - 2E + 1E$	$2E$	N	-	+	-
$S_{11} S_{22} S_{31} S_{42}$	$2E$	$2E$	N	N	-	N
$S_{11} S_{22} S_{31} S_{41}$	$4E - 3E$	-	-	+	N	N
$S_{11} S_{21} S_{33} S_{44}$	$3E - 2E$	$1E$	N	N	+	N
$S_{11} S_{21} S_{33} S_{43}$	$2E - 1E$	$1E$	N	N	-	+
$S_{11} S_{21} S_{33} S_{42}$	$1E$	$1E$	N	N	-	-
$S_{11} S_{21} S_{33} S_{41}$	0	0	N	N	N	N

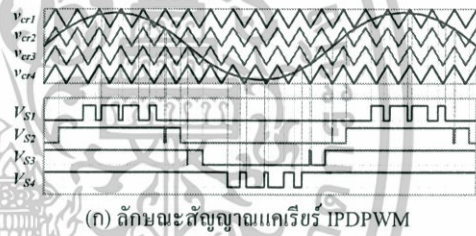
หมายเหตุ: 1 = สวิตช์ทำงาน, 0 = สวิตช์ไม่ทำงาน, N = สภาวะปกติ, +อัดประจุ, -คายประจุ

3. เทคนิค CRPWM

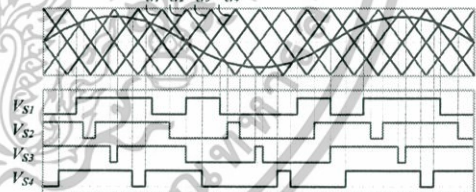
รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการจัดเรียงสัญญาณแคเรียร์ CRPWM ของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ โดยสัญญาณแคเรียร์ CRPWM นั้นประกอบไปด้วยแคเรียร์ 4 ชุด ซึ่งแต่ละชุดเกิดจากสัญญาณแคเรียร์สามเหลี่ยมที่ถูกรวมออกเป็น 4 ระดับ ซึ่งในแต่ละระดับมีการเลื่อนเฟสกันอยู่ 45 องศา และสัญญาณแคเรียร์ 1 ชุดใช้ควบคุมสวิตช์ 1 ตัว ซึ่งในรูปที่ 2 (ก) เป็นแคเรียร์ที่ 1 ใช้ควบคุมสวิตช์ S_1 , รูปที่ 2 (ข) เป็นแคเรียร์ที่ 2 ใช้ควบคุมสวิตช์ S_2 , รูปที่ 2 (ค) เป็นแคเรียร์ที่ 3 ใช้ควบคุมสวิตช์ S_3 , รูปที่ 2 (ง) เป็นแคเรียร์ที่ 4 ใช้ควบคุมสวิตช์ S_4



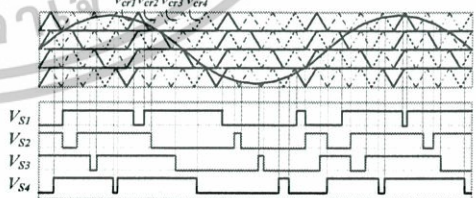
รูปที่ 2 ตัวอย่างการจัดเรียงสัญญาณแคเรียร์ CRPWM



(ก) ลักษณะสัญญาณแคเรียร์ IPDPWM



(ข) ลักษณะสัญญาณแคเรียร์ PSPWM



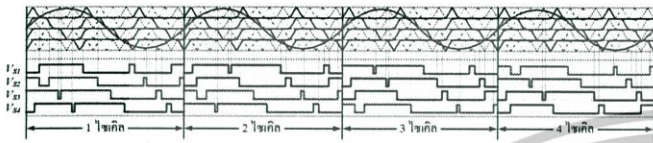
(ค) ลักษณะสัญญาณแคเรียร์ CRPWM

รูปที่ 3 การสร้างสัญญาณเกด

รูปที่ 3(ก)แสดงการสร้างสัญญาณเกดด้วยเทคนิค IPDPWM รูปที่ 3(ข)แสดงการสร้างสัญญาณเกดด้วยเทคนิคPSPWM รูปที่ 3(ค)แสดงการสร้างสัญญาณเกดด้วยเทคนิคCRPWM จากรูปเห็นได้ว่าลักษณะสัญญาณเกดของเทคนิคCRPWM คล้ายกับสัญญาณเกดของเทคนิคPSPWMซึ่งทำให้เทคนิคCRPWM น่าจะสามารถรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สมมูลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้เช่นเดียวกับเทคนิค PSPWM อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวิธี CRPWM นี้ไม่ได้คำนึงถึงการเปลี่ยนทิศของกระแสไหลใน ช่วงครึ่งคาบเวลาของแรงดันขาออก จึงทำให้การรักษาสมมูลแรงดันที่ตัวเก็บประจุยังทำให้ไม่สมบูรณ์[2] จึงได้มีการนำเสนอเทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกิดมาใช้เช่นเดียวกับเทคนิค IPDPWM รูปที่ 4 แสดงวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด(pulse rotation) โดยวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิดเป็นการสลับหมุนสัญญาณเกิดทุกๆ ไซเคิล



รูปที่ 4 วิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด (pulse rotation)

4. ผลการจำลอง

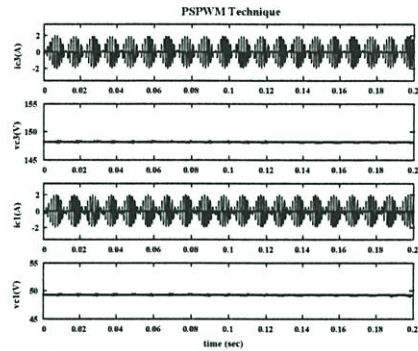
การจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงค์ขาขึ้น โดยมิเงื่อนไขในการจำลองวงจรตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขในการจำลองวงจร

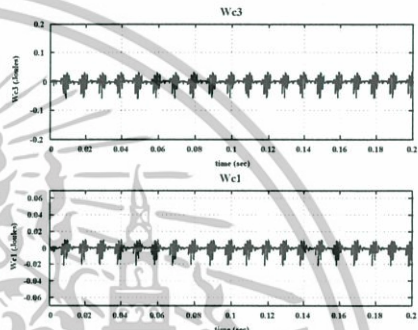
พารามิเตอร์ในการจำลอง	ค่า
แรงดันดีซีลิงค์	200 V
ความถี่ด้านขาออก	50 Hz
ความถี่แคเรียร์	750 Hz
มอดดูเลชันอินเด็ก	1
ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ (C_1, C_2, C_3)	2200 μF
โหลดความต้านทาน (R)	40 Ω
โหลดตัวเหนี่ยวนำ (L)	0.0955 H
เพาเวอร์แฟคเตอร์ (PF)	0.8 lagging

4.1 การจำลองการรักษาสมมูลระดับพลังงานที่ตัวเก็บประจุ

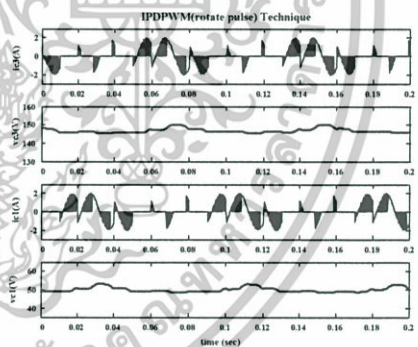
จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้พบว่าการเปลี่ยนแปลง ในด้านการสมมูลพลังงานที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ จะเกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุ C_1 และตัวเก็บประจุ C_3 มากที่สุด[3] ดังนั้นในรูปที่ 5-12 แสดงการวิเคราะห์ด้านการเปลี่ยนแปลงพลังงานของตัวเก็บประจุทั้ง 2 ตัวโดยพิจารณาค่าของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ รูปที่ 5-6 แสดงรูปคลื่นแรงดัน กระแสและการเปลี่ยนแปลงพลังงานของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค PSPWM รูปที่ 7-8 แสดงรูปคลื่นแรงดัน กระแสและการเปลี่ยนแปลงพลังงานของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค IPDPWM ที่มีวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด รูปที่ 9-10 แสดงรูปคลื่นแรงดัน กระแสและพลังงานของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค CRPWM ที่ไม่มีวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด รูปที่ 11-12 แสดงรูปคลื่นแรงดัน กระแสและการเปลี่ยนแปลงพลังงานของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค CRPWM ที่มี วิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด



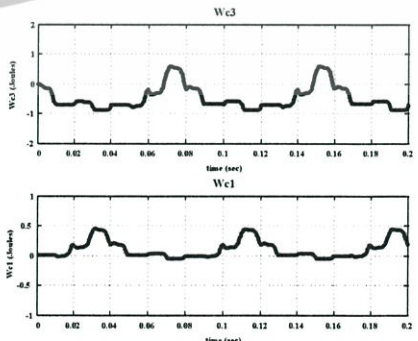
รูปที่ 5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค PSPWM



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงพลังงานของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค PSPWM



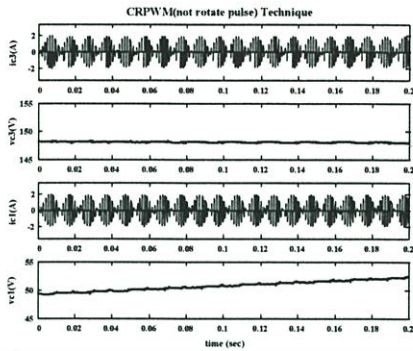
รูปที่ 7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค IPDPWM ที่มีวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด



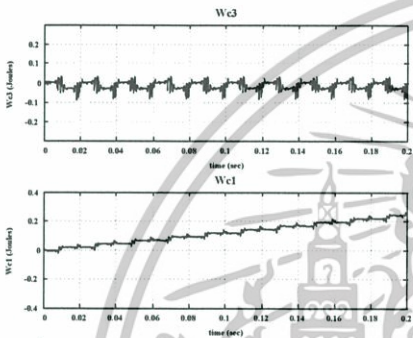
รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงพลังงานของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค IPDPWM ที่มีวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

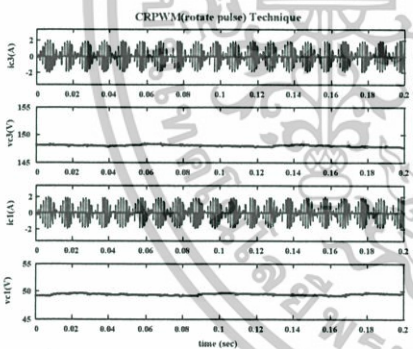
ไม่จรรโลงใจโดยสังขรณ์ สิ่งนี้ช่วยปรับปรุงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีอ้างอิง



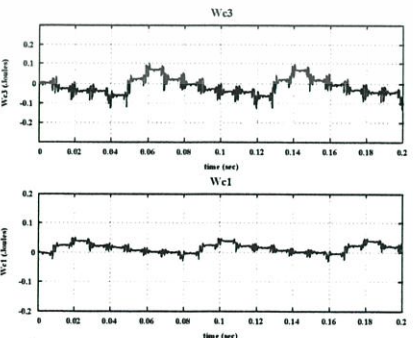
รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค CRPWM ที่ไม่มีวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงพลังงานของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค CRPWM ที่ไม่มีวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด



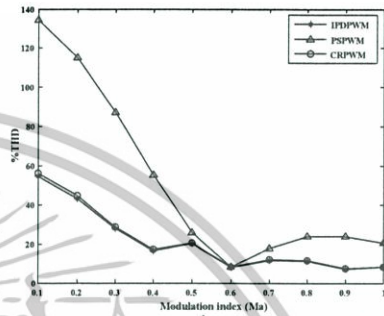
รูปที่ 11 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค CRPWM ที่มีวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด



รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงพลังงานของตัวเก็บประจุ C_1, C_3 โดยใช้เทคนิค CRPWM ที่มีวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด

4.2 การจำลองคุณภาพของแรงดันด้านออก

รูปที่ 13 เป็นการวิเคราะห์ผลทางด้านคุณภาพของแรงดันด้านขาออกที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยเทคนิคPSPWM เทคนิคIPDPWM และเทคนิคCRPWM ที่มีมอดูเลชันอินเด็กตั้งแต่ 0.1-1.0 โดยทำการจำลองที่สภาวะ No-load จากรูปเห็นได้ว่าเทคนิค CRPWM ให้ผลด้านคุณภาพของแรงดันด้านขาออกได้ดีเหมือนกับเทคนิคIPDPWM



รูปที่ 13 กราฟสรุปผล %THDv ที่มีมอดูเลชันอินเด็กซ์ที่ค่าต่างๆ

5. สรุป

จากการจำลองพบว่าเทคนิคCRPWM ที่มีวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิดสามารถรักษาสมดุลของแรงดันที่ตัวเก็บประจุได้ดีกว่าเทคนิคIPDPWM ที่มีวิธีการหมุนวนสัญญาณเกิด อย่างไรก็ตาม ยังพบลักษณะการกระเพื่อมของแรงดันที่ตัวเก็บประจุ ตามรอบการหมุนวนสัญญาณเกิดเช่นเดียวกับเทคนิคIPDPWMแต่มีการกระเพื่อมที่น้อยกว่าในแง่ของความเพี้ยนของแรงดันขาออกพบว่าเทคนิคCRPWM และเทคนิคIPDPWM ให้ค่า THDv ที่เท่ากันตลอดช่วงการมอดูเลชัน ในการศึกษานี้ต่อไปจะนำ FPGAมาใช้ในการสร้างสัญญาณเกิดตามวิธีCRPWM เพื่อทดสอบและยืนยันความถูกต้องต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Bin Wu, High-Power Converters and ac Drives, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2006, pp.127-136.
 [2] Dae-Wook Kang, Byoung-Kuk Lee, Jae-Hyun Jeon, Tae-Jin Kim, and Dong-Seok Hyun, "A Symmetric Carrier Technique of CRPWM for Voltage Balance Method of Flying-Capacitor Multilevel Inverter", Vol. 52 IEEE Transactions on industrial electronics, JUNE 3, 2005.
 [3] S. Ketsakoon, and S. Polmai, "Comparison Between Phase- and Level- shifted PWM Schemes for Flying Capacitor Multilevel Inverter", The 2007 ECTI International Conference (ECTI-CON2007), Mae Fah Luang University, Chiang rai, Thailand, May 9-12, 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นาย ไพบูลย์ แก้ววรสูตร
- วัน เดือน ปีเกิด 1 ธันวาคม 2526 ที่ จ.อุทัยธานี
- ที่อยู่ 115/ 25 หมู่ 1 ต.หนองสรวง อ.หนองฉาง จ.อุทัยธานี 61110
Tel. 086-7364430
E-mail : paiboon_keaw@hotmail.com, paiboonkeaw@gmail.com
- ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550
- สาขางานที่สนใจ
- 1.) Power Electronic
 - 2.) Multilevel Inverter
- ผลงานทางวิชาการ
1. P. Keawworasut, S. Polmai, “Balancing of Capacitor Voltage of Flying-Capacitor Multilevel Inverter by SPWM Techniques” The 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), Royal Hill Golf and Spa, Nakhon nayok, Thailand, pp. 501-504, Oct 29-31, 2008.