

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ
โดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดสามเฟส
Study on Reactive Power Generation
Using Three-phase Cascade Multilevel Inverter



โดย
ธีรพงษ์ ทองแก้ว
นรินทร์ สนประเสริฐ
ศักครินทร์ หวังปัด
อิทธิพล อธิธา

วันที่
๑๖/๑๑/๒๕๔๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62549
วัน,เดือน,ปี...19 ส.ย. 2549

b..... 11626070
i.....

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การศึกษาการสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ
โดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดสามเฟส
Study on Reactive Power Generation
Using Three-phase Cascade Multilevel Inverter**

นาย ธีรพงษ์ ทองแก้ว 45010353
นาย นรินทร์ สมนประเสริฐ 45010377
นาย ศักครินทร์ หวังปัด 45010756
นาย อธิพิศ อธิธา 45010976

อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร. สุัทฒน์ กิตติรัตน์สัจจา
ดร. สมกพ ผลไม้

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548


ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการรบกวนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

ชนิดคาบตามเฟส

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย ชีรพงษ์ ทองแก้ว
 2. นาย นรินทร์ สนประเสริฐ
 3. นาย ศักตรินทร์ หวังปัด
 4. นาย อธิพิณ อธิธา

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพัฒน์ กิตติรัตนสัจจา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. สมภพ ผลไม้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับ ชนิดคาสเคดสามเฟส

นายธีรพงษ์ ทองแก้ว	45010353
นายนรินทร์ สนประเสริฐ	45010377
นายศักดรินทร์ หวังปัด	45010756
นายอิทธิพล อธิธา	45010976
ผศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา	อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.สมภาพ ผลไม้	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาการสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดนี้ประกอบไปด้วยอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ โดยในแต่ละบริดจ์นั้นจะมีการเชื่อมต่อกับแรงดันตรงซึ่งมาจากตัวเก็บประจุที่แยกออกจากกัน และมีการนำแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากวงจรมาต่ออนุกรมกัน อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดนี้สามารถสร้างแรงดันออกมาให้มีลักษณะสัญญาณไซน์แบบขั้นบันได โดยมุมที่ใช้ในการสวิตช์ของแต่ละระดับสามารถนั้นหาได้โดยใช้วิธีพื้นที่เท่ากัน โดยทำการคำนวณมุมนี้ในโปรแกรม MATLAB

อินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับแบบสามเฟสนั้นจะทำการต่ออินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ 3 ชุดในแต่ละเฟส ดังนั้นในการศึกษาเรื่องนี้จึงใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ทั้งหมด 9 ชุด ในช่วงแรกของการศึกษานั้นจะเริ่มต้นด้วยการจำลองการทำงานและการควบคุมในโปรแกรม แล้วจึงสร้างชุดอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคดขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดลอง

Study on Reactive Power Generation Using Three-phase Cascade Multilevel Inverter

Theeraphong Thongkaew	45010353
Narin Sonprasert	45010377
Sakdarint Wingpat	45010756
Ehittipol Ehitita	45010976
Asst.Prof.Dr. Supat Kittiratsutcha	Advisor
Dr. Sompob Polmai	Advisor

ABSTRACT

This project presents the study on reactive power generation using three-phase cascade multilevel inverter. The cascade multilevel inverter consists of a number of H-bridge inverter having output voltage connected in series. Each bridge dc voltage is supported by its own dc capacitor. The cascade multilevel inverter is capable to generate out voltage in step-wise sinusoidal waveform. The switching angles of each level are calculated by equal area method in MATLAB.

Three-phase 7-level cascade multilevel inverter is constructed using three H-bridge inverters for each phase, so this project uses nine H-bridge inverters in experiment. In the first period, the operation and control of cascade multilevel inverter is evaluated in simulation program and then the model of three-phase 7-level cascade multilevel inverter is constructed for experiment.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณท่านทั้งหลายที่มีส่วนทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ได้ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนที่เกี่ยวกับโครงการ

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ของคณะผู้จัดทำ

ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. สมภพ ผลไม้และ ผศ.ดร. สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา ที่ได้ให้คำแนะนำทั้งทางทฤษฎีและการทดลองและยังสนับสนุนอุปกรณ์อื่นๆ อีกทั้งยังคงติดตามผลการทำงานอยู่ตลอด ทำให้ทางกลุ่มมีความตั้งใจที่จะทำงานให้สำเร็จ

ขอขอบคุณ บุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่คอยให้ความร่วมมือในทุกๆ เรื่องไม่ว่าจะเป็นการยืมอุปกรณ์หรือการให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณ พี่ๆ นักศึกษาปริญญาโท ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องที่เกี่ยวกับโครงการนี้

และที่สำคัญขอขอบคุณสมาชิกในกลุ่มทุกท่านที่ช่วยกันทำงานและยังอยู่คอยเป็นกำลังใจให้กันและกันอยู่เสมอมา จึงทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้จัดทำ

นาย ชีรพงษ์ ทองแก้ว
นาย นรินทร์ สนประเสริฐ
นาย ศักดิ์รินทร์ หวังปัด
นาย อธิพิล อธิธา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญรูปภาพ	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของตัวประกอบกำลังไฟฟ้า.....	4
2.1.1 ตัวประกอบกำลังไฟฟาล้าหลัง (Lagging power factor).....	4
2.1.2 ตัวประกอบกำลังไฟฟ้านำหน้า (Leading power factor).....	4
2.2 ส่วนประกอบของซูดอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด.....	5
2.3 การสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด.....	5
2.4 การคำนวณมุมในการนำกระแสเพื่อไปสร้างอินเวอร์เตอร์ หลายระดับชนิดคาสเคดโดยวิธีพื้นที่เท่ากัน (Equal Area).....	7
2.5 การทำงานของ Full-Bridge IGBT ที่ระดับแรงดันช่วงต่างๆ.....	8
2.6 การศึกษาคุณภาพของสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์ ชนิดคาสเคด 7 ระดับ.....	10
2.6.1 ค่าฮาร์มอนิกส์แต่ละค่าความผิดเพี้ยนของกระแส และแรงดันฮาร์มอนิกส์.....	11
2.6.2 ค่าประสิทธิภาพ (RMS).....	11
2.6.3 ค่า Total Harmonic Distortion (THD).....	11
2.7 แนวทางการชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟโดยใช้อินเวอร์เตอร์ หลายระดับชนิดคาสเคด 7 ระดับ.....	12
2.8 หลักการชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	18
3.1 การทดลองวงจรขับ IGBT.....	18
3.2 การคำนวณและการจำลองวงจรโดยใช้โปรแกรม PSCAD.....	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและผลการจำลองวงจรในโปรแกรม PSCAD.....	26
4.1 การทดลองวงจรขับ IGBT.....	26
4.2 การคำนวณและการจำลองวงจรโดยใช้โปรแกรม PSCAD.....	28
4.2.1 ระบบที่จะทำการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ.....	37
4.3 ผลการทดลองเมื่อภาวะไฟฟ้ามียาค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	
เท่ากับ 900 VAR, 0.8 p.f. Lagging.....	40
4.4 ผลการทดลองเมื่อภาวะไฟฟ้ามียาค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	
เท่ากับ 1200 VAR, 0.8 p.f. Lagging.....	42
4.5 ผลการทดลองเมื่อภาวะไฟฟ้ามียาค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	
เท่ากับ 1500 VAR, 0.8 p.f. Lagging.....	44
4.6 ผลการทดลองเมื่อภาวะไฟฟ้ามียาค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	
เท่ากับ 2400 VAR, 0.8 p.f. Lagging.....	46
4.7 ผลการทดลองเมื่อภาวะไฟฟ้ามียาค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	
เท่ากับ 3000 VAR, 0.8 p.f. Lagging.....	48
บทที่ 5 การสร้างแรงดันจากชุดอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ.....	50
5.1 วงจรควบคุม (Control Circuit).....	50
5.1.1 EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory).....	50
5.1.2 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D Converter).....	53
5.1.3 วงจรนับ (counter).....	53
5.1.4 วงจรประวิงเวลา (dead time).....	55
5.1.5 วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer).....	56
5.2 วงจรกำลัง (Power Circuit).....	56
5.2.1 วงจรขับเกท.....	56
5.2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ.....	58
บทที่ 6 ผลการทดลองจากชุดสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ.....	59
6.1 ลำดับขั้นตอนการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ.....	59
6.2 การสร้างแรงดันจากอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
6.3 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....	74
6.4 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 0.95.....	75
6.5 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 0.9.....	76
6.6 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 0.85.....	77
6.7 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 0.8.....	78
6.8 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 0.75.....	79
6.9 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 0.7.....	80
 บทที่ 7 วิจัยและบทสรุป.....	 82

ภาคผนวก
กิตติกรรมประกาศ
เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงสามเหลี่ยมไฟฟ้ากำลัง.....	1
2.1 แสดงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟ.....	4
2.2 แสดงส่วนประกอบของชุดอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคดแต่ละชั้น.....	5
2.3 แสดงวงจรการต่อและรูปสัญญาณของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด.....	6
2.4 แสดงแนวทางการคำนวณมุมในการนำกระแสโดยวิธีพื้นที่เท่ากัน.....	7
2.5 แสดงลักษณะการทำงานของ IGBT ที่แรงดันช่วงบวก.....	8
2.6 แสดงลักษณะการทำงานของ IGBT ที่แรงดันช่วงศูนย์.....	9
2.7 แสดงลักษณะการทำงานของ IGBT ที่แรงดันช่วงลบ.....	10
2.8 แสดงรูปสัญญาณแรงดันจากอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ.....	10
2.9 แสดงวงจรการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า.....	12
2.10 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นแหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ.....	14
2.11 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นแหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเฟส A.....	14
2.12 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นแหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเฟส B.....	15
2.13 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นแหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเฟส C.....	15
2.14 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นโวลติจรีแอกทีฟ.....	16
2.15 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นโวลติจรีแอกทีฟเฟส A.....	16
2.16 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นโวลติจรีแอกทีฟเฟส B.....	17
2.17 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นโวลติจรีแอกทีฟเฟส C.....	17
3.1 แสดงการจำลองวงจรขับ IGBT.....	19
3.2 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับสามเฟสในโปรแกรม PSCAD.....	20
3.3 แสดงตัวกำเนิดสัญญาณทริกเกททั้งสามเฟส.....	21
3.4 แสดงเมทริกซ์ในการสร้างสัญญาณขนาด 6X1440 จำนวน 16 ชุด.....	23
3.5 แสดงมุมเริ่มต้นในการสร้างแรงดันของชั้นที่ 1 ของเฟส A.....	24
3.6 แสดงมุมเริ่มต้นในการสร้างแรงดันของชั้นที่ 1 ของเฟส B.....	24

รูปที่	หน้า
3.7 แสดงมุมเริ่มต้นในการสร้างแรงดันของชั้นที่ 1 ของเฟส C.....	25
4.1 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ใช้เป็นอินพุทของ Optocoupler.....	26
4.2 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณพัลส์อินพุทและสัญญาณที่ใช้ในการขับ IGBT.....	27
4.3 แสดงสัญญาณเอาต์พุท G1 ที่นำไปใช้ในการขับ IGBT.....	27
4.4 แสดงสัญญาณเอาต์พุท G2 ที่นำไปใช้ในการขับ IGBT.....	28
4.5 แสดงสัญญาณทริกเกทในการสร้างแรงดัน 1 เฟส.....	29
4.6 แสดงค่าแรงดันเอาต์พุทในช่วงสัญญาณทริกเกทต่าง ๆ.....	29
4.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทสำหรับแรงดัน 1 เฟส.....	29
4.8 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ค่า $M.I. = 0.3, m_a = 21$	31
4.9 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส A ที่ค่า $M.I. = 0.3, m_a = 21$	31
4.10 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส B ที่ค่า $M.I. = 0.3, m_a = 21$	32
4.11 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส C ที่ค่า $M.I. = 0.3, m_a = 21$	32
4.12 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ค่า $M.I. = 0.6, m_a = 51$	33
4.13 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส A ที่ค่า $M.I. = 0.6, m_a = 51$	33
4.14 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส B ที่ค่า $M.I. = 0.6, m_a = 51$	34
4.15 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส C ที่ค่า $M.I. = 0.6, m_a = 51$	34
4.16 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ค่า $M.I. = 1.0, m_a = 91$	35
4.17 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส A ที่ค่า $M.I. = 1.0, m_a = 91$	35
4.18 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส B ที่ค่า $M.I. = 1.0, m_a = 91$	36
4.19 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส C ที่ค่า $M.I. = 1.0, m_a = 91$	36
4.20 แสดงแหล่งจ่ายสามเฟสของระบบ.....	38
4.21 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของเฟส A.....	40
4.22 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของเฟส B.....	40
4.23 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของเฟส C.....	41
4.24 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของระบบสามเฟส.....	41
4.25 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของเฟส A.....	42
4.26 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของเฟส B.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
4.27 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส C.....	43
4.28 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของระบบสามเฟส.....	43
4.29 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส A.....	44
4.30 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส B.....	44
4.31 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส C.....	45
4.32 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของระบบสามเฟส.....	45
4.33 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส A.....	46
4.34 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส B.....	46
4.35 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส C.....	47
4.36 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของระบบสามเฟส.....	47
4.37 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส A.....	48
4.38 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส B.....	48
4.39 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส C.....	49
4.40 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของระบบสามเฟส.....	49
5.1 แสดงวงจรของ EPROM.....	50
5.2 แสดงข้อมูลในช่วงเวลาในการทริกเกทที่แต่ละค่าของ Modulation Index.....	51
5.3 แสดงวงจรแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล.....	53
5.4 แสดงการต่อวงจรนับและPLLบนบอร์ด CPLD.....	54
5.5 แสดงลักษณะของสัญญาณบนบอร์ด CPLD.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
5.6	แสดงการต่อวงจรประวิงเวลา.....55
5.7	แสดงวงจรบัฟเฟอร์.....56
5.8	แสดงวงจรขับเกทที่ประกอบด้วย 6N137 และ IR2110 และวงจร Protection.....57
5.9	แสดงสัญญาณขับเกทที่ต่อกับฟูลบริดจ์ IGBT.....57
5.10	แสดงวงจรของอินเวอร์เตอร์และการสร้างแรงดันกระแสตรง ให้กับฟูลบริดจ์ IGBT.....58
6.1	แสดงวงจรซีแอดเดรสและเอาต์พุตของ EPROM.....59
6.2	แสดงช่วงสัญญาณ Dead time ของ S1 และ S2.....60
6.3	แสดงสัญญาณขณะก่อนและหลังเข้าสู่วงจรบัฟเฟอร์.....61
6.4	แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุมการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์.....62
6.5	แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรถ่ายการสวิตช์แรงดันของอินเวอร์เตอร์.....63
6.6	แสดงแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ ที่ค่า Modulation Index เท่ากับ 1.0.....64
6.7	แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นล่างของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....65
6.8	แสดงแรงดันชั้นล่างของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....65
6.9	แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นกลางของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.066
6.10	แสดงแรงดันชั้นกลางของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....66
6.11	แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นบนของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....67
6.12	แสดงแรงดันชั้นบนของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....67
6.13	แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นล่างของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....68
6.14	แสดงแรงดันชั้นล่างของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....68
6.15	แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นกลางของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....69
6.16	แสดงแรงดันชั้นกลางของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....69
6.17	แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นบนของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.070
6.18	แสดงแรงดันชั้นบนของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....70
6.19	แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นล่างของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
6.20 แสดงแรงดันชั้นล่างของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....	71
6.21 แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นกลางของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....	72
6.22 แสดงแรงดันชั้นกลางของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....	72
6.23 แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นบนของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....	73
6.24 แสดงแรงดันชั้นบนของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0.....	73
6.25 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 1.0.....	74
6.26 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 1.0.....	74
6.27 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 0.95.....	75
6.28 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 0.95.....	75
6.29 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 0.9.....	76
6.30 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 0.9.....	76
6.31 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 0.85.....	77
6.32 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 0.85.....	77
6.33 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 0.8.....	78
6.34 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 0.8.....	78
6.35 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 0.75.....	79
6.36 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 0.75.....	79
6.37 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 0.7.....	80
6.38 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 0.7.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางแสดงค่าแรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ที่แต่ละค่า Modulation Index จากการจำลองใน PSCAD.....	30
4.2 แสดงค่าฮาร์มอนิกอันดับต่ำต่างๆและค่า THD ของแรงดันเอาต์พุตที่แต่ละค่า Modulation Index จากการ Simulation ในโปรแกรม PSCAD.....	37
4.3 แสดงผลการทดลองการชดเชยกำลังไฟฟ้าย้อนกลับให้กับระบบ ที่ภาระไฟฟ้า 0.8 p.f lagging.....	39
5.1 แสดงการเก็บข้อมูลของ EPROM.....	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

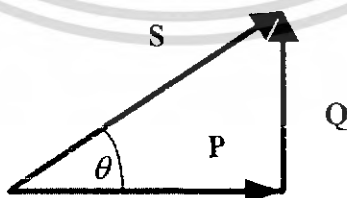
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในโลกยุคปัจจุบันพลังงานไฟฟ้านับว่าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะโลกของเราในวันนี้จะยิ่งเจริญเติบโตขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นทำให้มีความต้องการไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วยเราจึงจะต้องรู้จักใช้พลังงานอย่างประหยัดนั่นคือต้องมีการใช้ไฟฟ้าให้คุ้มค่ามากที่สุดดังนั้นการแก้ไขปัญหาการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นมากซึ่งที่มาของความสูญเสียมีสาเหตุประการหนึ่งจากภาวะไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับตัวระบบมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามืดต่ำ เนื่องจากภาวะไฟฟ้านั้นมีความต้องการทั้งกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟและภาวะไฟฟ้าทางภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าตามหลัง (Lagging Power Factor) ดังนั้นกระแสของภาวะไฟฟ้ารวมจะมีค่ามากขึ้นกว่ากระแสของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่นำไปใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่างๆ และกระแสส่วนที่เหลือคือกระแสไฟฟ้าในแกนจินตภาพหรือกระแสรีแอกทีฟ ซึ่งจะเป็นกระแสส่วนที่สูญเปล่า

$$\cos \theta = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1.1)$$



รูปที่ 1.1 แสดงสามเหลี่ยมไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 1.1 หากต้องการให้มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ดีขึ้น ต้องทำให้ค่า $\cos\theta$ มีค่าใกล้เคียง 1 หรือนั่นก็คือพยายามลดค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q) ในระบบลงให้มีค่าน้อยที่สุด

แต่ในความเป็นจริงค่า P และ Q จะเป็นค่าเฉพาะอยู่ในภาวะไฟฟ้าแต่ละตัวและโดยเฉพาะค่า Q ที่ต้องการจะลดลงนั้นมีความสำคัญเกี่ยวกับการที่จะสร้างสนามแม่เหล็กหรือสะสมพลังงานและอื่นๆ เพราะฉะนั้นค่า Q จะลดที่ตัวภาวะไฟฟ้าโดยตรงไม่ได้ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟแทนการจ่ายจากกริดไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่นการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าไปกับระบบ โดยตัวเก็บประจุจะเป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟให้แก่ภาวะไฟฟ้าที่มีตัวประกอบกำลังล่าช้าหลังเท่านั้น ต่อมาจะกล่าวถึงการจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้ Synchronous Generator แต่กรณีนี้ต้องใช้กำลังทางกลเข้ามาหมุนแกนโรเตอร์ของ Generator เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก จะใช้กับระบบที่มีขนาดใหญ่ และ ต่อมามีการนำอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาช่วย เช่น ใช้หม้อแปลงกับอุปกรณ์สวิตชิงเพื่อสร้างแรงดันโดยวิธี PWM และนำไปเชื่อมต่อกับระบบโดยมีตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวเชื่อมต่อเพื่อสร้างกระแสไฟฟารีแอกทีฟจ่ายให้แก่ระบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ส่วนที่ 1 : ศึกษาจากการ Simulation ในโปรแกรม MATLAB (m – file) และ PSCAD

1.2.1 เพื่อศึกษาส่วนประกอบและหลักการสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด

1.2.2 เพื่อศึกษาการคำนวณมุมทริกเกทเพื่อไปสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด โดยใช้วิธีพื้นที่เท่ากัน

1.2.3 เพื่อศึกษาการทำงานของ Full-Bridge IGBT เมื่อมีสัญญาณไปทริกที่ระดับแรงดันต่างๆ

1.2.4 เพื่อศึกษาลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดที่แรงดันค่าต่างๆ และศึกษาถึงคุณภาพของสัญญาณที่สร้าง

- ค่าประสิทธิผล (RMS)

- ค่าฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) และค่า Total Harmonics Distortion (THD)

1.2.5 เพื่อศึกษาหลักการและแนวทางการชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ

1.2.6 เพื่อศึกษาองค์ประกอบและขอบเขตการชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า

1.2.7 เพื่อศึกษาการจำลองวงจรการสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด เพื่อกำลังไฟฟารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้าที่ค่าภาวะไฟฟ้าค่าต่างๆ

ส่วนที่ 2 : ศึกษาการสร้างวงจรที่เป็นส่วนประกอบในชุดอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 3 เฟสโดยจะประกอบไปด้วย วงจร Protection วงจร ชุดขับมุมทริกเกท

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

ขอบเขตการวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงหลักการของการสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยใช้ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด ซึ่งขั้นตอนการเริ่มโครงการจะศึกษาการสร้างแรงดันของ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดจากโปรแกรม MATLAB ซึ่งใช้ในการคำนวณมุมทริกเกท และทำการส่งค่ามุมที่คำนวณได้ไปเก็บและนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการชดเชย กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในโปรแกรม PSCAD เพื่อไปชดเชยให้กับภาระไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบ กำลังไฟฟ้าต่ำในวงจรที่ได้จำลองขึ้น เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงวาระบบที่ได้จำลองขึ้นนี้มี ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ดีขึ้น และศึกษาการสร้างแรงดันจากอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับโดยการนำข้อมูลจากโปรแกรม MATLAB มาเก็บในหน่วยความจำ EPROM และนำมา สร้างแรงดันไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้ เพื่อการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชนิด 3 เฟส

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

สำหรับวิธีการศึกษาในขั้นต่อไป คือการศึกษาการสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยใช้ อินเวอร์เตอร์ หลายระดับชนิดคาสเคดเพื่อสร้างแรงดันแทนหม้อแปลง ซึ่งแรงดันจะสร้างจาก พูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีค่าแรงดันกระแสตรงต่ออยู่เพื่อสร้างแรงดันกระแสสลับออกมาและนำ ค่าแรงดันของแต่ละชั้นมาคาสเคดกันเพื่อสร้างแรงดันให้มีค่าที่สูงได้ รวมทั้งให้แรงดันมีลักษณะ ที่คล้ายแรงดันไซน์และมีตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวเชื่อมต่อเข้ากับระบบเช่นกัน โดยมีหลักการคือให้ อินเวอร์เตอร์เป็นตัวสร้างแรงดันไฟฟ้าและเมื่อเกิดความต่างศักย์ระหว่างแรงดันของระบบที่ต่อ อยู่และแรงดันของอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสส่วน จินตภาพขึ้นมา ซึ่งทำให้เกิดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าไปชดเชยและทำให้กระแสของการไฟฟ้าจะมี เฉพาะส่วนจริงหรือกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเท่านั้น ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบจึงมีค่า ใกล้เคียงหนึ่ง และวิธีการนี้สามารถใช้ชดเชยกำลังไฟฟ้าแอกทีฟได้ทั้งแบบตัวประกอบกำลัง ล้า หลังหรือนำหน้า

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- เพื่อแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบของโรงงานอุตสาหกรรมให้ดีขึ้นได้
- สามารถทำให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพลดลดการทำงาน
- ช่วยลด Harmonics ที่เกิดขึ้นในระบบ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดนั้น ประเด็นสำคัญที่จะทำการศึกษาคือการสร้างแรงดันจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดซึ่ง มีหลักการคือการนำฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์หลายๆชั้นมาสร้างแรงดันกระแสสลับตามค่าแรงดัน กระแสตรงที่ต่ออยู่และนำค่าแรงดันของแต่ละชั้นมาต่อกันแบบคาสเคด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้อง ทำความเข้าใจเกี่ยวกับส่วนประกอบและหลักการสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด รวมถึงหลักการในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งในที่นี้เราจะศึกษาเฉพาะทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ก่อน

2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

2.1.1 ตัวประกอบกำลังไฟฟาล้าหลัง (Lagging power factor)

เป็นผลมาจากตัวเหนี่ยวนำคือแรงดันนำหน้ากระแสหรือที่เรียกว่าตัวประกอบ กำลังไฟฟาล้าหลัง(Lagging power factor) หากผลของตัวเหนี่ยวนำมีค่ามากเท่าไรยิ่งทำให้ มุมระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสห่างมากขึ้นจะส่งผลให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบ ต่ำลง (Q) เป็นบวกดังรูปที่ 2.1

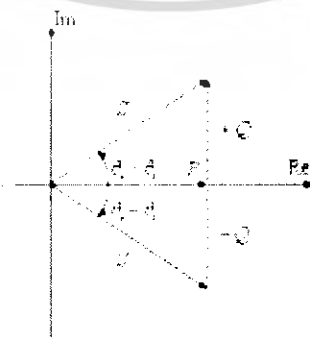
2.1.2 ตัวประกอบกำลังไฟฟานำหน้า (Leading power factor)

เป็นผลมาจากตัวเก็บประจุคือแรงดันจะตามหลังกระแสหรือที่เรียกว่าตัวประกอบ กำลังไฟฟานำหน้า (Leading power factor) หากผลของตัวเก็บประจุมากยิ่งทำให้มุมระหว่าง สัญญาณแรงดันและกระแสห่างกันมากขึ้นจึงทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบต่ำลง (Q) เป็นลบดังรูปที่ 2.1

ถ้า Q เป็นบวกแสดงว่าโหลดเป็นโหมตอินดักทีฟซึ่งมีตัวประกอบกำลังล้าหลัง

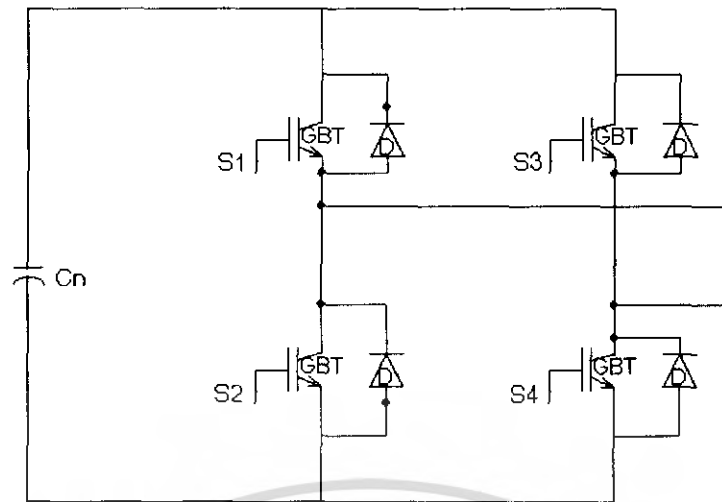
ถ้า Q เป็นลบแสดงว่าโหลดเป็นโหมตคาปาซิทีฟซึ่งมีตัวประกอบกำลังนำหน้า

ถ้า Q เป็นศูนย์แสดงว่าโหลดเป็นโหมตความต้านทานซึ่งมีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1



รูปที่ 2.1 แสดงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของชุดอินเวอร์เตอร์ชนิดкаскасค์แต่ละชั้น

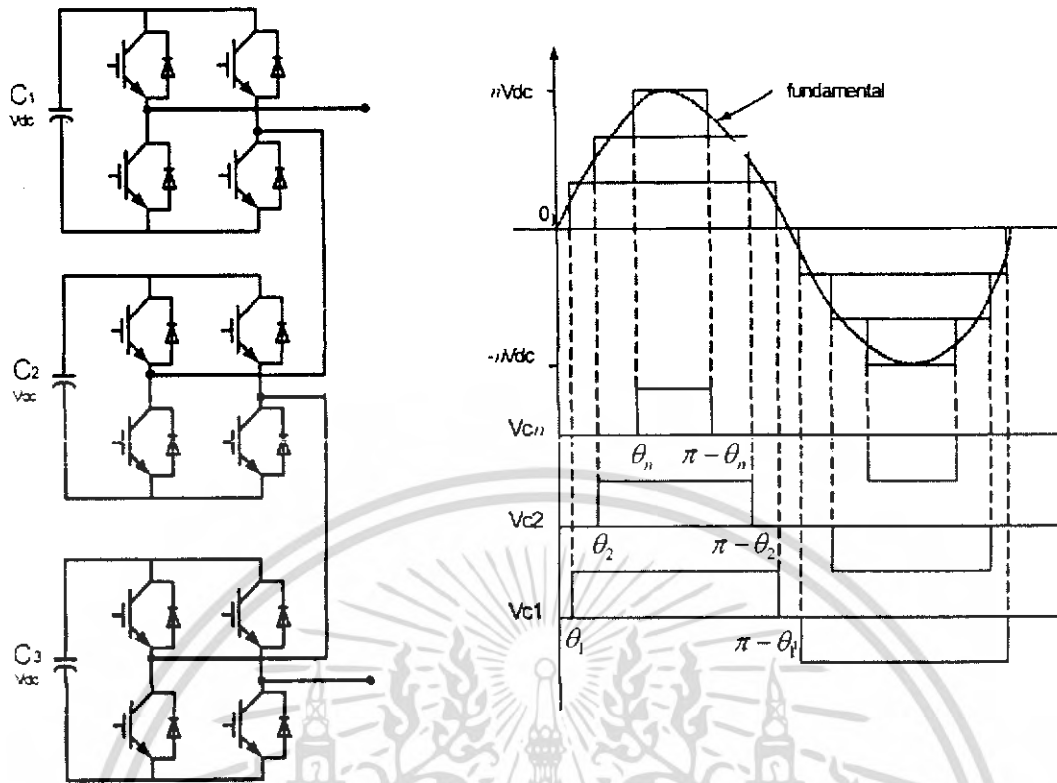
2.2 ส่วนประกอบของชุดอินเวอร์เตอร์ชนิดкаскасค์

1. เกท (IGBT) แต่ละชั้นจะประกอบด้วย IGBT ทั้งหมด 4 ตัวต่อกันลักษณะฟูลบริดจ์ดังรูปที่ 2.2
2. ตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุจะมีหน้าที่เก็บค่าแรงดันกระแสตรงที่ดักคร่อม IGBT แต่ละข้าง และตัวเก็บประจุในแต่ละชั้นของแรงดันจะต่อแยกจากกันอย่างอิสระ
3. สายสัญญาณทริกเกท IGBT แต่ละชั้นจะมีสัญญาณมาที่ IGBT ทั้ง 4 ตัว ซึ่งต่อที่ขา G ของ IGBT ทั้ง 4 ตัว
4. ขาเอ๊าท์พุท จะต่ออยู่ตรงกลางของ IGBT แต่ละข้างทั้ง 2 ข้าง

2.3 การสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดкаскасค์

การสร้างแรงดันจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดкаскасค์คือการนำค่าแรงดันกระแสตรงที่ดักคร่อมอยู่ในแต่ละชั้นมารวมกันแบบคาสคาส์ที่มีมุมค่าต่างๆ ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าเมื่อถึง θ_1 จะมีสัญญาณส่งไปที่อินเวอร์เตอร์ชั้นที่ 1 ให้มีแรงดันกระแสตรงเท่ากับ V_{c1} ออกมาที่ขาเอ๊าท์พุท และเมื่อถึง θ_2 ก็จะมีสัญญาณส่งไปที่อินเวอร์เตอร์ชั้นที่ 2 ให้มีแรงดันกระแสตรงเท่ากับ V_{c2} ออกมาที่ขาเอ๊าท์พุท ซึ่งตอนนี้จะมีแรงดันรวมเท่ากับ $V_{c1} + V_{c2}$ จนถึงชั้นที่ n ก็จะมีเหมือนกับชั้นที่ 1 และ 2 ที่มีมุม θ_n ก็จะมีแรงดันรวมที่ขาเอ๊าท์พุทของอินเวอร์เตอร์ชนิดкаскасค์ n ระดับ เท่ากับ $V_{c1} + V_{c2} + \dots + V_{cn}$ หรือเท่ากับ $n V_{dc}$

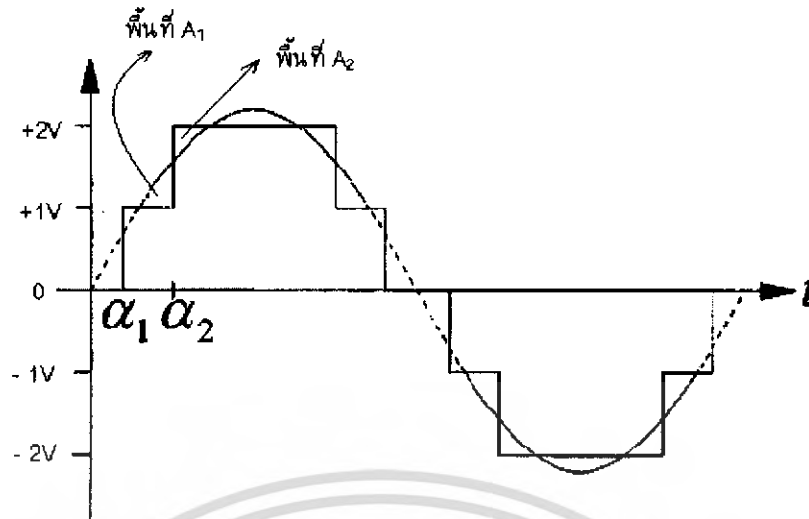
สำหรับแรงดันฝั่งลบ ก็จะมีลักษณะการทำงาน เหมือนกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ต่างกันตรงสัญญาณที่ส่งมาขั้วเกทแต่ละชั้น กล่าวคือที่มีมุม $\pi + \theta_i$ จะมีสัญญาณส่งไปที่



รูปที่ 2.3 แสดงวงจรการต่อและรูปสัญญาณของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด

อินเวอร์เตอร์ชั้นที่ 1 ให้มีแรงดันกระแสตรงเท่ากับ $-V_{c1}$ ออกมาที่ขาเอาต์พุตและเมื่อถึง $\pi + \theta_2$ ก็จะมีสัญญาณส่งไปที่ อินเวอร์เตอร์ชั้นที่ 2 ให้มีแรงดันกระแสตรงเท่ากับ $-V_{c2}$ ออกมาที่ขาเอาต์พุตซึ่งตอนนี้จะมีแรงดันรวมเท่ากับ $-(V_{c1} + V_{c2})$ จนถึงชั้นที่ n ก็จะเหมือนกับชั้นที่ 1 และ 2 ที่มุม $\pi + \theta_n$ ก็จะมีแรงดันรวมที่ขาเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด n ระดับเท่ากับ $-(V_{c1} + V_{c2} + \dots + V_{cn})$ หรือเท่ากับ $-nV_{dc}$ ดังรูปที่ 2.3 เพราะฉะนั้นการคำนวณระดับของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดจะเป็นด้านบวก n ระดับและด้านลบ n ระดับและที่แรงดันศูนย์อีกระดับ

$$\text{จำนวนระดับ} = (2n) + 1 \text{ โดยที่ } n \text{ คือจำนวนชั้น}$$



รูปที่ 2.4 แสดงแนวทางการคำนวณมุมในการนำกระแสโดยวิธีพื้นที่เท่ากัน

2.4 การคำนวณมุมในการนำกระแสเพื่อไปสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด โดยวิธีพื้นที่เท่ากัน (Equal Area)

วิธีการคำนวณโดยใช้วิธีพื้นที่เท่ากันมีแนวทางการออกแบบจากการต้องการให้พื้นที่ใต้กราฟของอินเวอร์เตอร์เท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณไซน์ในอุดมคติ

$$\text{Area 1} = \text{Area 2}$$

$$\text{Area 1} - \text{Area 2} = 0$$

$$\int_{\theta_B}^{\theta_n} (ma \sin \theta - B) - \int_{\theta_n}^{\theta_A} (A - ma \sin \theta) d\theta = 0$$

$$-ma \cos \theta_n + ma \cos \theta_B - B\theta_n + B\theta_B - A\theta_A + A\theta_n - ma \cos \theta_A + ma \cos \theta_n = 0$$

$$\theta_n = \frac{A\theta_A - B\theta_B + ma \cos \theta_A - ma \cos \theta_B}{A - B} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.1) จะสามารถแทน θ_A และ θ_B ได้ดังนี้

$$\theta_A = \sin^{-1} A / ma \quad (2.2)$$

$$\theta_B = \sin^{-1} B / ma$$

จากสมการที่ (2.2) จะสามารถแทน A และ B ได้ดังนี้

$$A = \frac{n}{M} \quad (2.3)$$

$$B = \frac{n-1}{M}$$

โดยที่ M คือ จำนวนชั้นของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด

ma คือ มอดูละชั้นอินเดกซ์

A คือ ระดับแรงดันที่ชั้น n

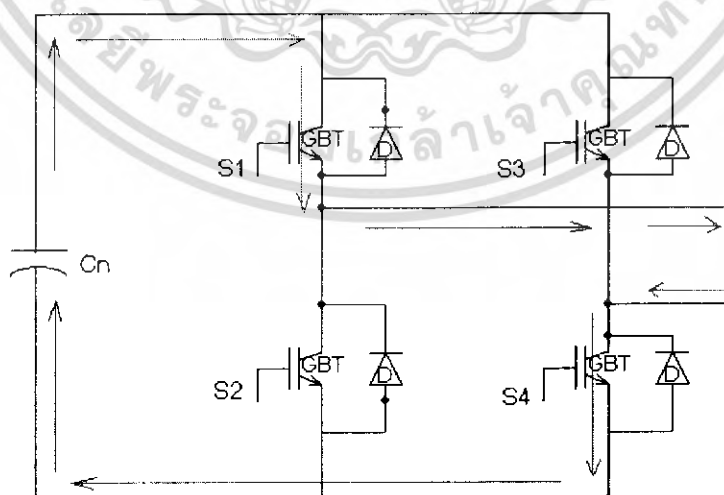
B คือ ระดับแรงดันที่ชั้น $n-1$

$n = 1, 2, 3, \dots, n$

2.5 การทำงานของ Full-Bridge IGBT ที่ระดับแรงดันช่วงต่าง ๆ

การทำงานของอินเวอร์เตอร์จะแบ่งช่วงระดับแรงดันของอินเวอร์เตอร์เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรงดันเป็นบวก ช่วงแรงดันเป็นศูนย์ และช่วงแรงดันเป็นลบ

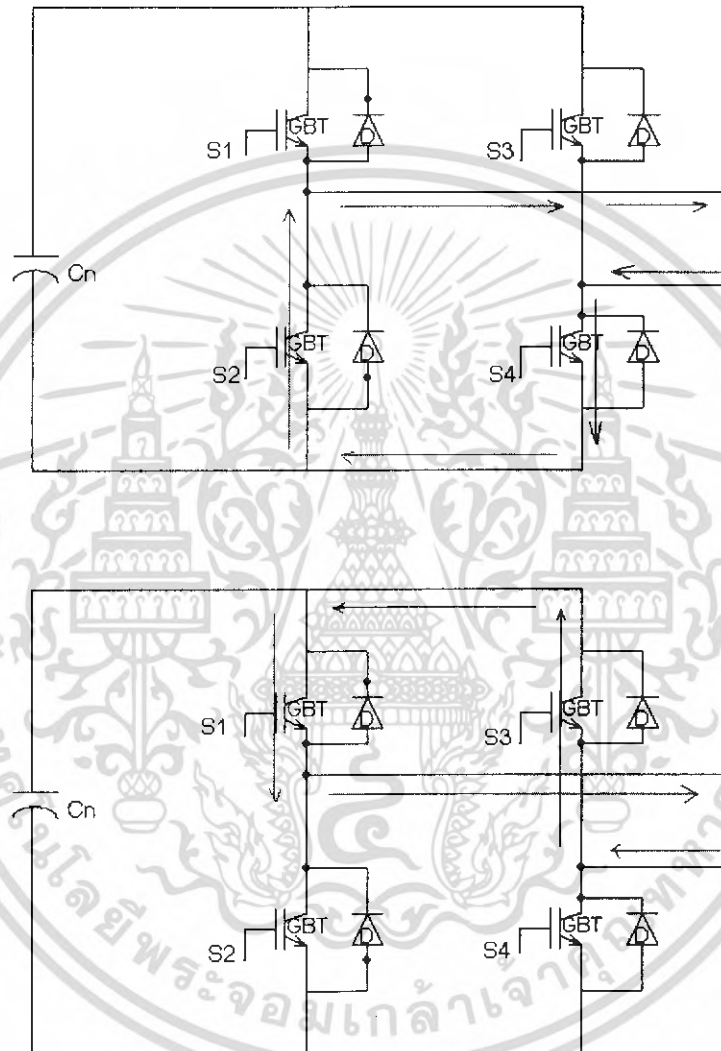
2.5.1 ช่วงแรงดันเป็นบวก การทำงานในช่วงนี้ S1, S4 จะปิดวงจรและ S2, S3 จะเปิดวงจร ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตเป็นบวกจากตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการทำงานของ IGBT ที่แรงดันช่วงบวก

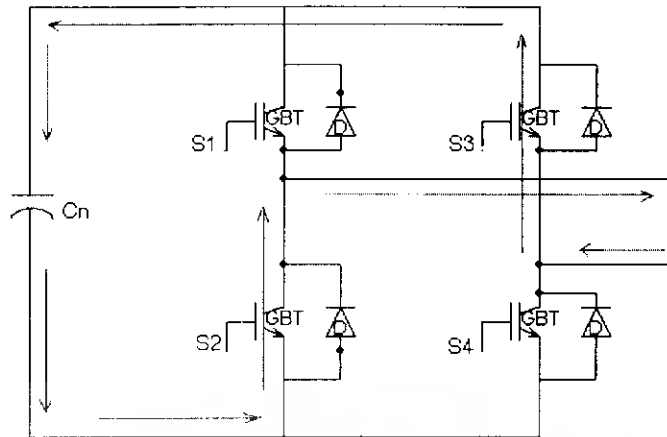
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ช่วงแรงดันเป็นศูนย์ การทำงานในช่วงนี้ S2, S4 จะปิดวงจรและ S1, S3 จะเปิดวงจรหรือในอีกลักษณะหนึ่งคือให้ S2, S4 จะเปิดวงจรและ S1, S3 จะปิดวงจร ทำให้เกิดแรงดันเอาท์พุทเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการทำงานของ IGBT ที่แรงดันช่วงศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



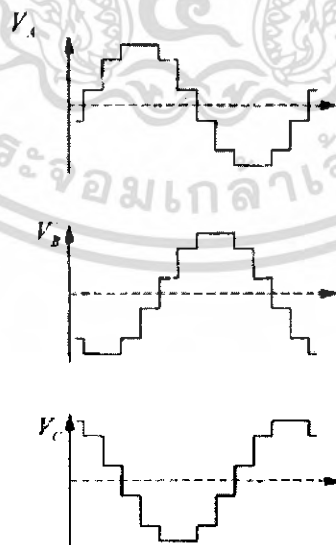
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการทำงานของ IGBT ที่แรงดันช่วงลบ

2.5.3 ช่วงแรงดันเป็นลบ การทำงานในช่วงนี้ S2, S3 จะปิดวงจรและ S1, S4 จะเปิดวงจร ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตเป็นลบจากตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.7

2.6 การศึกษาคุณภาพของสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ

เมื่อได้คำนวณสัญญาณทริก IGBT ระดับแรงดันค่าต่างๆโดยวิธีพื้นที่เท่ากันแล้ว จึงนำมาสร้างสัญญาณทริก IGBT ไปขับ Full-Bridge IGBT แต่ละชั้นเพื่อให้เกิดแรงดันจากอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับดังรูปที่ 2.8 เมื่อได้สัญญาณดังกล่าวแล้วก็นำสัญญาณดังกล่าวไปวิเคราะห์หาค่าต่างๆเช่น ค่า RMS, ค่าฮาร์มอนิกส์ และค่า THD

การศึกษาคุณภาพของสัญญาณ



รูปที่ 2.8 แสดงรูปสัญญาณแรงดันจากอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 ค่าฮาร์มอนิกส์และค่าความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์

การใช้งานอุปกรณ์ประเภทเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์นั้นทำให้เกิดมลภาวะฮาร์มอนิกส์ (Harmonics Pollution) ในระบบไฟฟ้า สิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นมานั้นมาจากการใช้งานอุปกรณ์ประเภทสวิตชิง

การที่จะอธิบายว่ารูปคลื่นมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่เท่าใดปนอยู่และฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับนั้นมีปริมาณหรือขนาดมากน้อยแค่ไหน สามารถอธิบายได้โดยอนุกรมฟูเรียร์

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right] \quad (2.4)$$

เมื่อ $v(t)$ คือ ฟังก์ชันของรูปคลื่นรายรอบใดๆ

a_0 คือ ค่าเฉลี่ยของ $v(t)$

n คือ เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (อันดับฮาร์มอนิกส์)

a_n คือ สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์

b_n คือ สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์

T คือ คาบเวลาของรูปคลื่น

2.6.2 ค่าประสิทธิภาพ (RMS)

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.5)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.6)$$

2.6.3 ค่า Total Harmonics Distortion (THD)

ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแส (Percentage of Total Harmonic Distortion of Current, THD, (%))

ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสหรือที่เรียกว่า THD_i (%) นั้นคือ ดัชนีซึ่งใช้ในการบ่งชี้ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตที่แตกต่างจากองค์ประกอบของกระแสที่ความถี่มูลฐานซึ่งองค์ประกอบความผิดเพี้ยนของกระแส

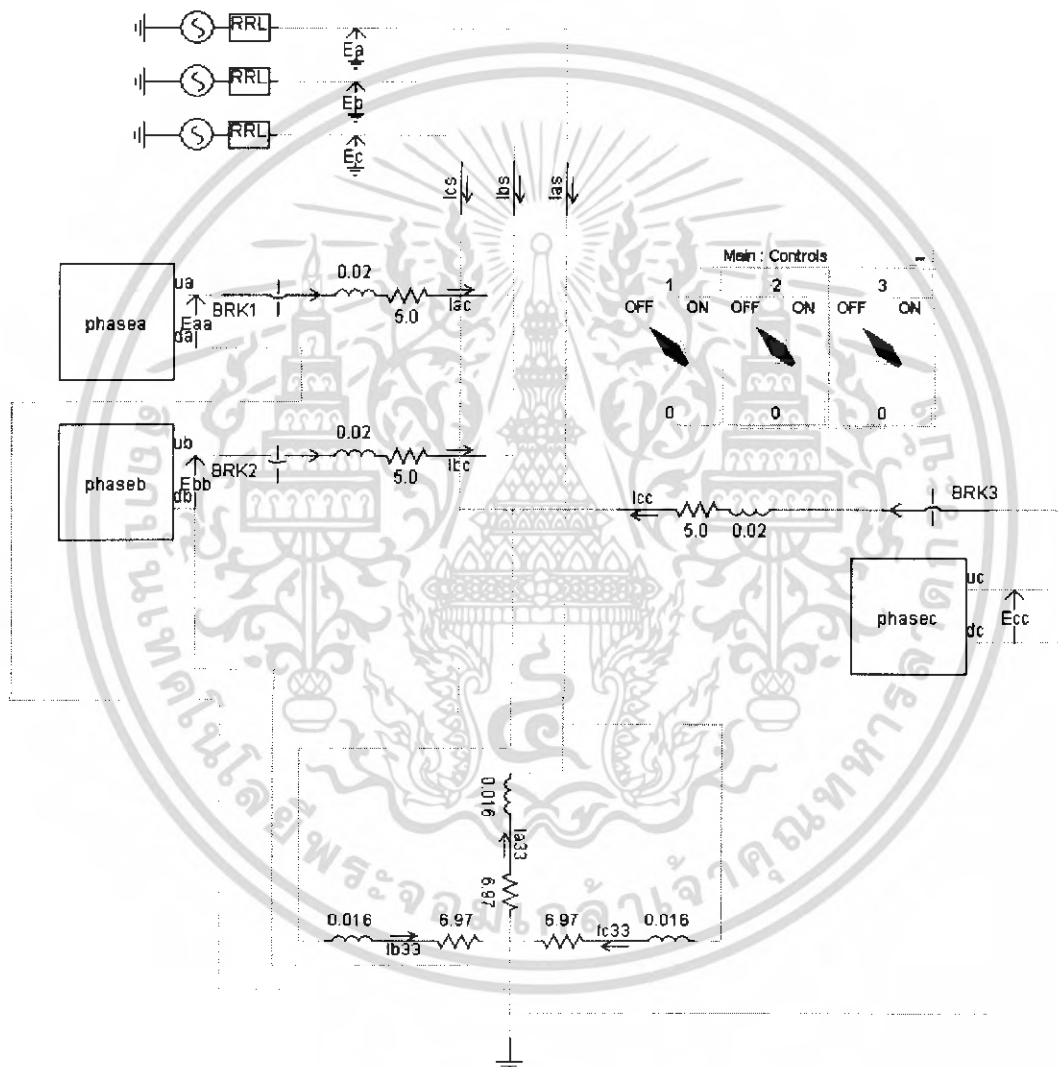
$$i_{dis}(t) = i_s(t) - i_{s1}(t) = \sum_{h \neq 1} i_{sh}(t) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเทอมของค่า rms สามารถเขียนได้เป็น

$$I_{dis} = \left[I_s^2 - I_{s1}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left(\sum_{h \neq 1} I_{sh}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

2.7 แนวทางการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับ ชนิดคาสเคด 7 ระดับ



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.9 เมื่อภาระไฟฟ้าในระบบมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าน้อยกว่ากระแสไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า (i_L) จะแสดงได้ดังสมการนี้

$$i_L = i_{Lp} + i_{Lq} \quad (2.9)$$

โดยที่ i_{Lp} คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ
 i_{Lq} คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟารีแอกทีฟ

เมื่อเราใช้กฎ KCL ที่จุดเชื่อมต่อระหว่าง V_c กับ V_s จะได้สมการดังนี้

$$i_L = i_s + i_c \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 จะได้ค่า i_s ดังสมการที่ 2.11

$$i_s = i_L - i_c \quad (2.11)$$

i_c ที่จะชดเชยเข้าระบบจะมีเฟสต่างกับเฟสแรงดันของระบบอยู่ 90 องศา เปรียบเสมือน i_c อยู่ในแกนของกระแสจินตภาพหรือกระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (i_{Lq}) หรือ $i_c = i_{Lp}$ และจากสมการที่ 2.9 แทนในสมการ 2.11 จะได้

$$i_s = (i_{Lp} + j i_{Lq}) - j i_{Lq} \quad (2.12)$$

$$i_s = i_{Lp} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 กระแสไฟฟ้าของระบบก็จะมีเฉพาะกระแสไฟฟ้าส่วนจริงที่มีเฟสตรงกับแรงดันไฟฟ้าของระบบ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามูลฐาน (Fundamental Power Factor หรือ Displacement Power Factor) จะมีค่าเท่ากับ 1 (Unity Power Factor)

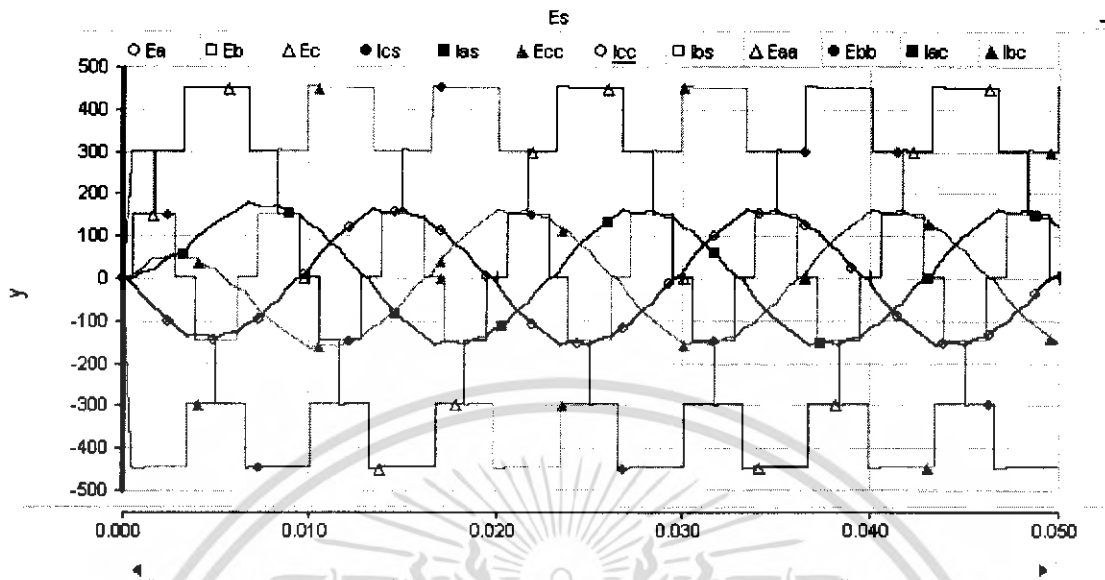
2.8 หลักการชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ

ทิศของกระแสไหลจาก V_c ไปยัง V_s และมี L_s เป็นตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ (Interfacing Inductor) ระหว่าง V_c กับ V_s มีกรณีศึกษา แบ่งเป็น 2 กรณีคือ

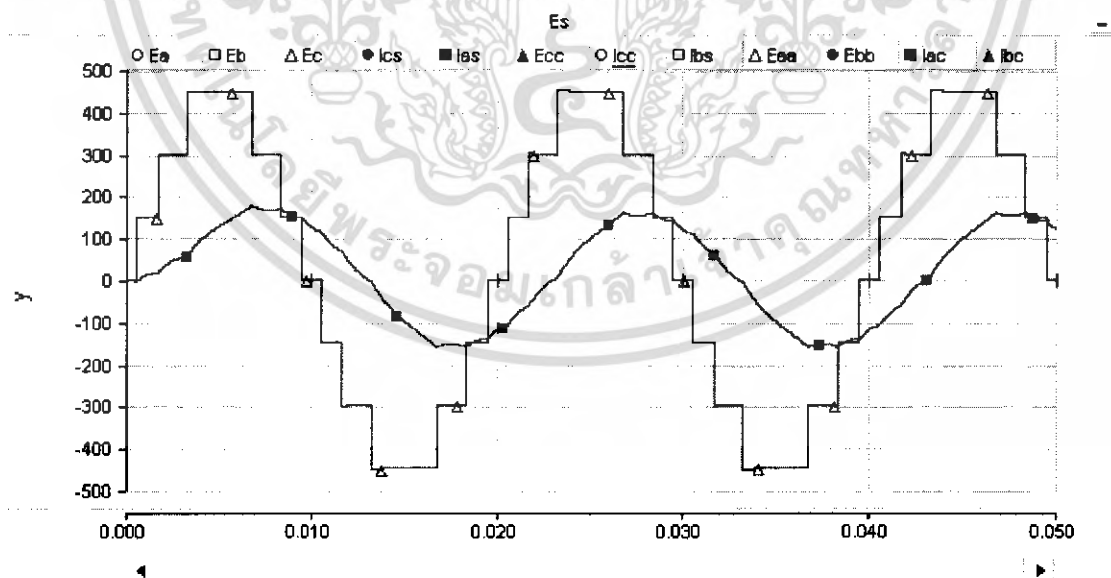
กรณีที่ 1 $V_c > V_s$ จากกราฟจะเห็นว่า V_c จะนำ i_c เป็นมุม 90 องศาและ V_c กำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายเพราะฉะนั้น V_c เสมือนว่าตัวเองกระทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ซึ่งสามารถนำไปชดเชยให้แก่โหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.10 ถึงรูปที่ 2.13

กรณีที่ 2 $V_c < V_s$ จากกราฟจะเห็นว่า V_c จะนำ i_s เป็นมุม 90 องศาและ V_c กำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายเพราะฉะนั้น V_c เสมือนว่าตัวเองกระทำตัวเป็นโหลดกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ซึ่งสามารถนำไปชดเชยให้แก่โหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.14 ถึงรูปที่ 2.17

กรณีอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าร์แอคทีฟ

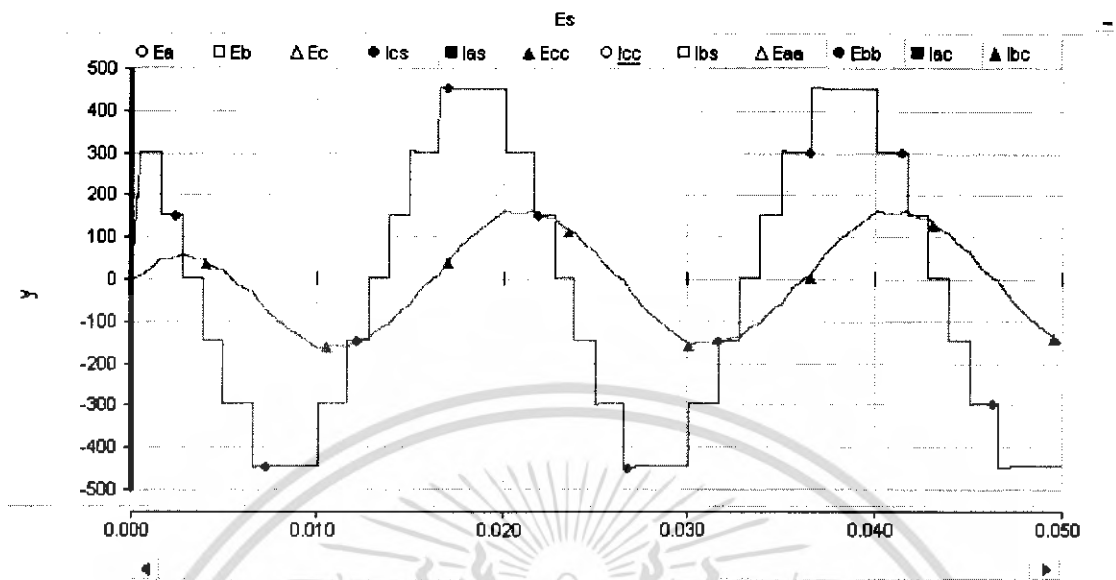


รูปที่ 2.10 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าร์แอคทีฟ

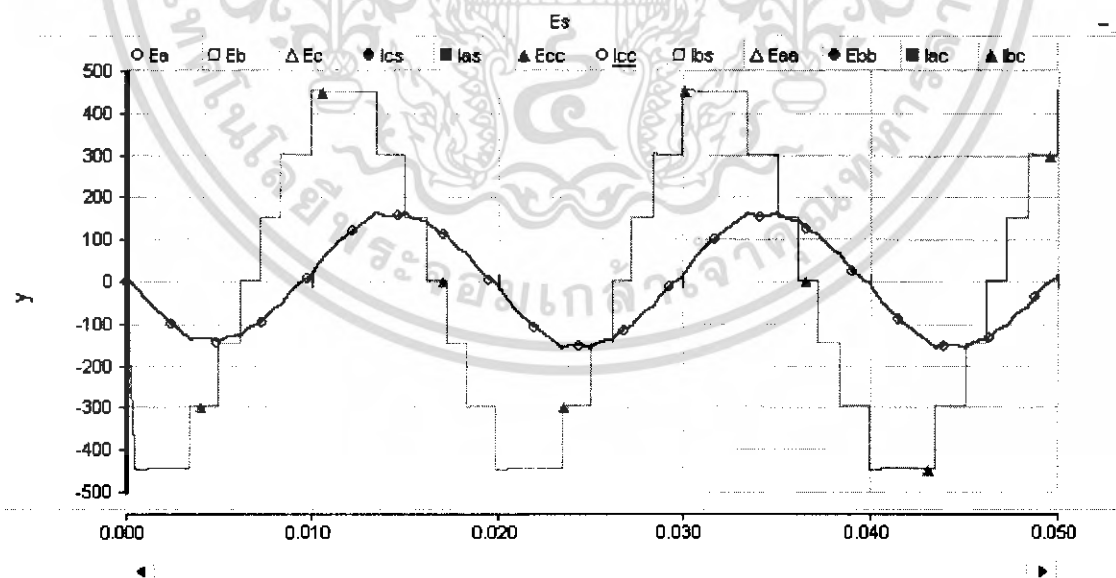


รูปที่ 2.11 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าร์แอคทีฟเฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



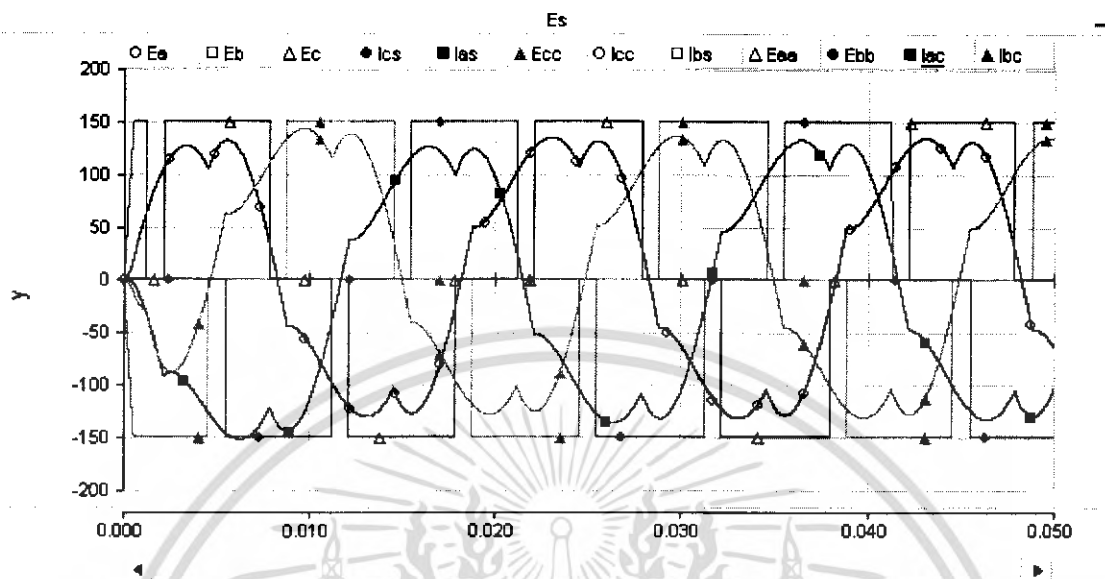
รูปที่ 2.12 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเฟส B



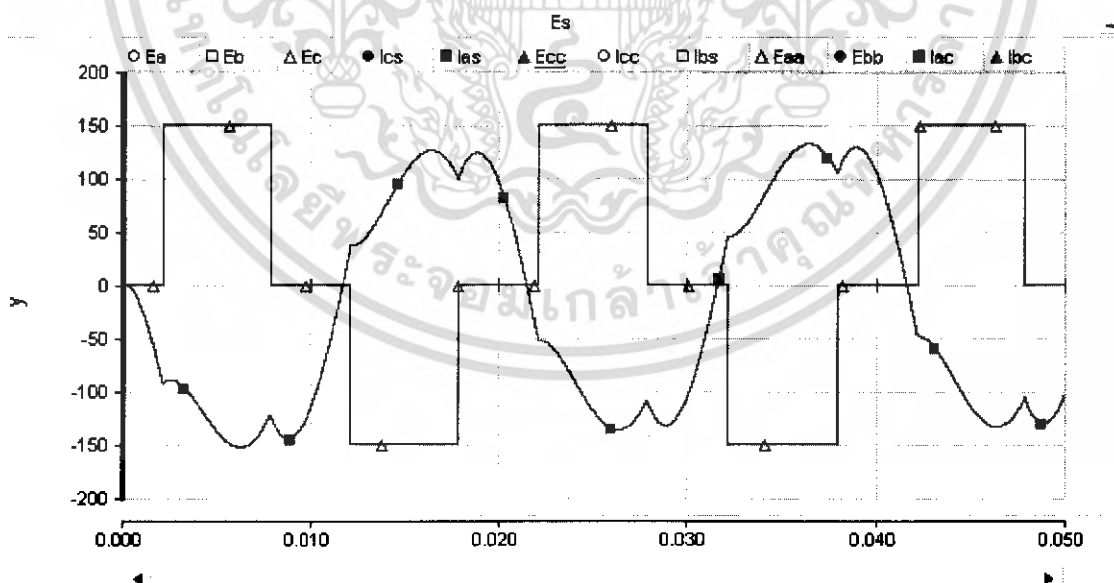
รูปที่ 2.13 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นโหลดรีแอคทีฟ



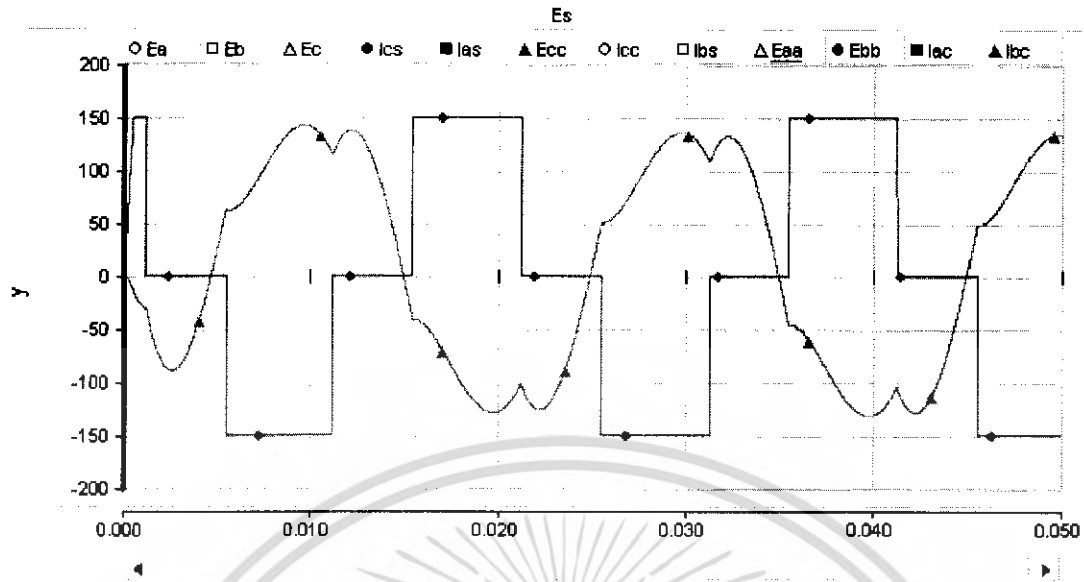
รูปที่ 2.14 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นโหลดรีแอคทีฟ



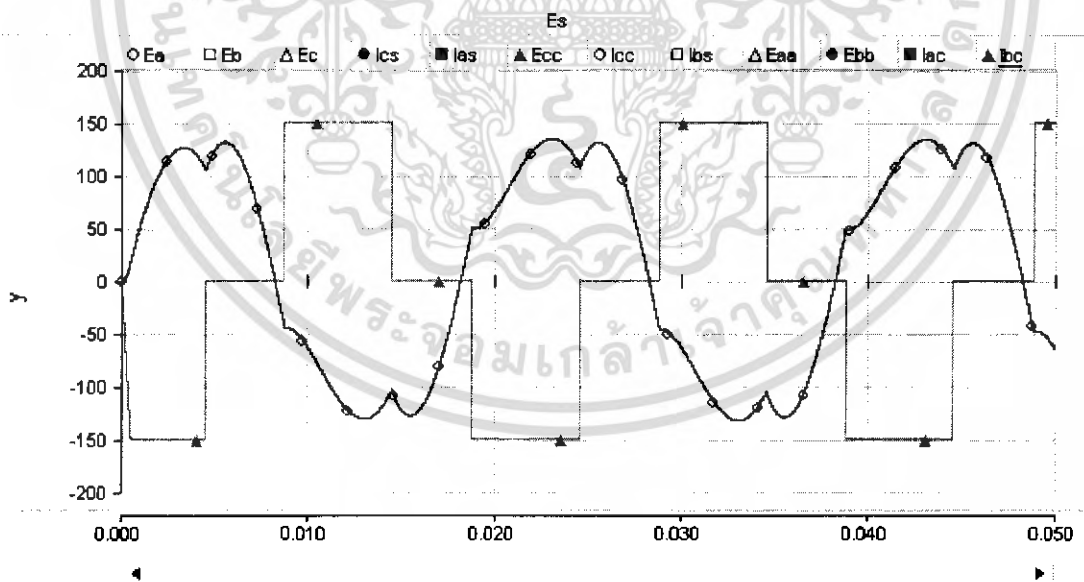
รูปที่ 2.15 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นโหลดรีแอคทีฟเฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.16 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นโวลต์รีแอคทีฟเฟสB



รูปที่ 2.17 แสดงรูปสัญญาณขณะอินเวอร์เตอร์กระทำตัวเป็นโวลต์รีแอคทีฟเฟสC

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

สำหรับการออกแบบการทดลองขั้นต้นนี้ ได้แบ่งให้มีการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การทดลองวงจรขับ IGBT
2. การคำนวณและการจำลองวงจรโดยใช้โปรแกรม PSCAD

3.1 การทดลองวงจรขับ IGBT

ชุดวงจรขับ IGBT นั้นจะเป็นตัวสั่งให้ IGBT ทำงานในระดับแรงดันอินพุตต่างๆ โดยในการออกแบบวงจรมันจะใช้ IC 6N137 และ IR2110 ในการสร้างสัญญาณขับเกท ซึ่ง IC 6N137 จะเป็น Optocoupler ทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณให้กับ IR2110 เพื่อสร้างเป็นสัญญาณขับออกมา โดย IR2110 จะสามารถสร้างสัญญาณที่ใช้ในการขับเกท IGBT ได้สองตัว คือ G1 E1 และ G2 E2 ดังนั้นในวงจรแบบฟูลบริดจ์ 1 วงจรจึงใช้ชุด Driver จำนวน 2 ชุดในการขับสองกึ่งของ IGBT เพราะฉะนั้นในการสร้างกำลังไฟฟาร์แอดคทีฟในระบบสามเฟส จึงต้องใช้ชุดขับเกททั้งหมด 18 ชุดด้วยกัน

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. IC 6N137 Optocoupler
2. IC IR2110
3. Digital Oscilloscope
4. DC Generator
5. Pulse Generator

3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรทดลองตามรูปที่ 3.1 โดยใช้ IC 6N137 ทั้งหมด 3 ตัวเพื่อรับสัญญาณที่เป็นแรงดันในลักษณะพัลส์สองตัวและรับสัญญาณจากวงจร Protection หนึ่งตัว โดยสัญญาณที่ได้มาจากวงจร Protection นี้เองที่จะต่อเข้ากับขา SD ของ IR2110 เพื่อสั่งให้ระบบหยุดการทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น

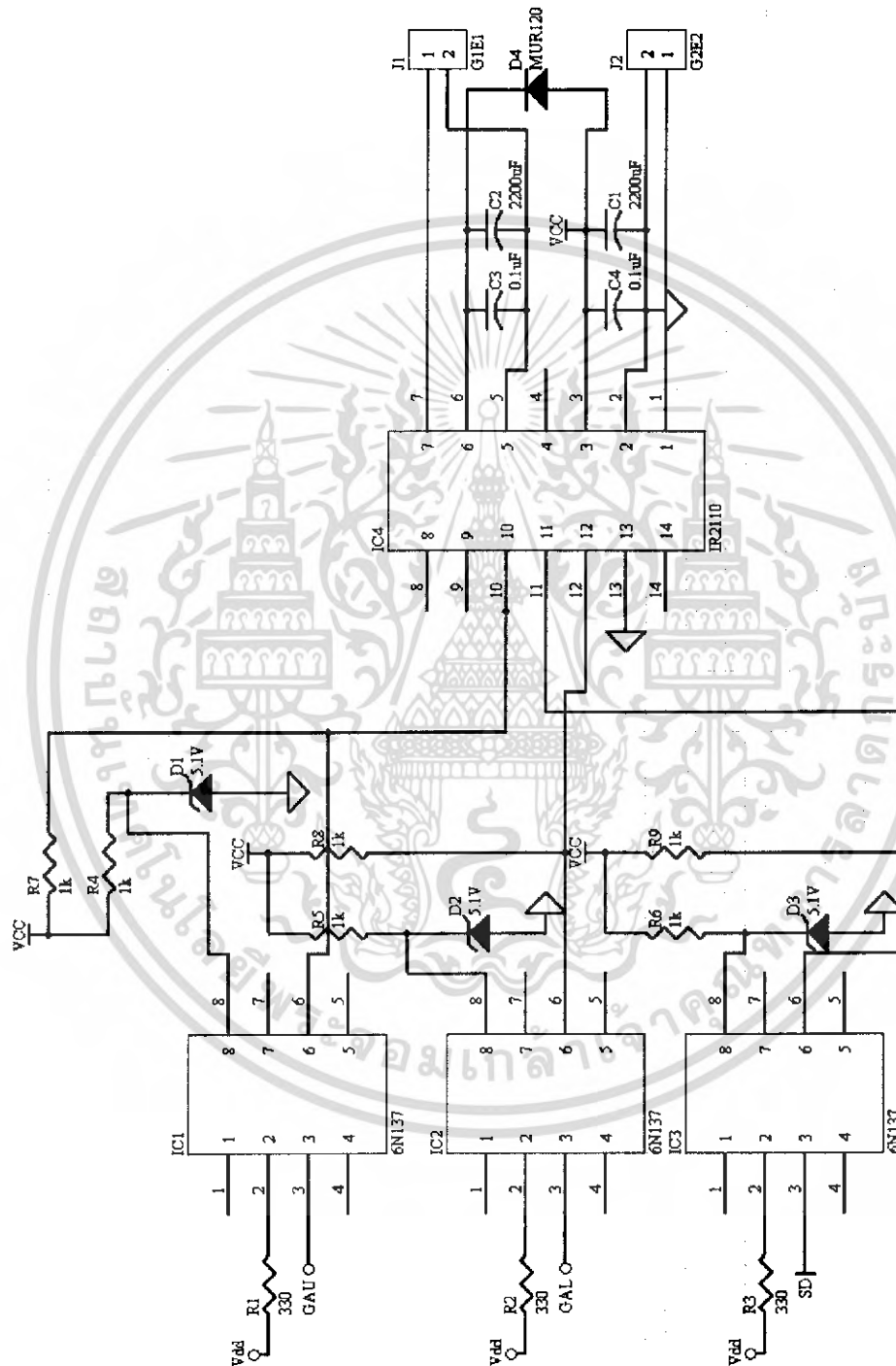
2. ป้อนแรงดันตรง +5 โวลต์ให้ที่ขา 2 ของ IC 6N137 และป้อนแรงดันไฟ +15 โวลต์เข้าที่ขา 8 และ ขา 9 ของ IR2110

3. ทดลองจ่ายแรงดันพัลส์ซึ่งมีขนาด -5 และ +5 โวลต์ให้กับ IC 6N137 โดยที่อีกตัวหนึ่งที่ต้องรับสัญญาณจากวงจร Protection ให้ต่อลงกราวด์ไว้เพื่อให้สัญญาณที่ป้อนเข้าเป็น 0 ไม่ให้มีผลในการตัดการทำงานของ IR2110

4. เมื่อทำการจ่ายแรงดันพัลส์แล้ว จึงทำการวัดสัญญาณที่ได้มาจาก IR2110 คือ G1, E1 และ G2, E2 ที่ตำแหน่งขาที่ระบุไว้ในรูปที่ 3.1 ซึ่งยังไม่เกี่ยวข้องกับสัญญาณ SD โดย IC 6N137 จะทำงานเมื่อมีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างขา 2 และขา 3 Optocoupler จะทำงานส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณไปให้กับ IR2110 ที่ขา HIN และ LIN ดังนั้นเราจึงวัดสัญญาณทางด้านเอาต์พุตออกมาเป็นแรงดันพัลส์ขนาด +15 โวลต์ เพื่อนำสัญญาณนี้ไปขับ IGBT



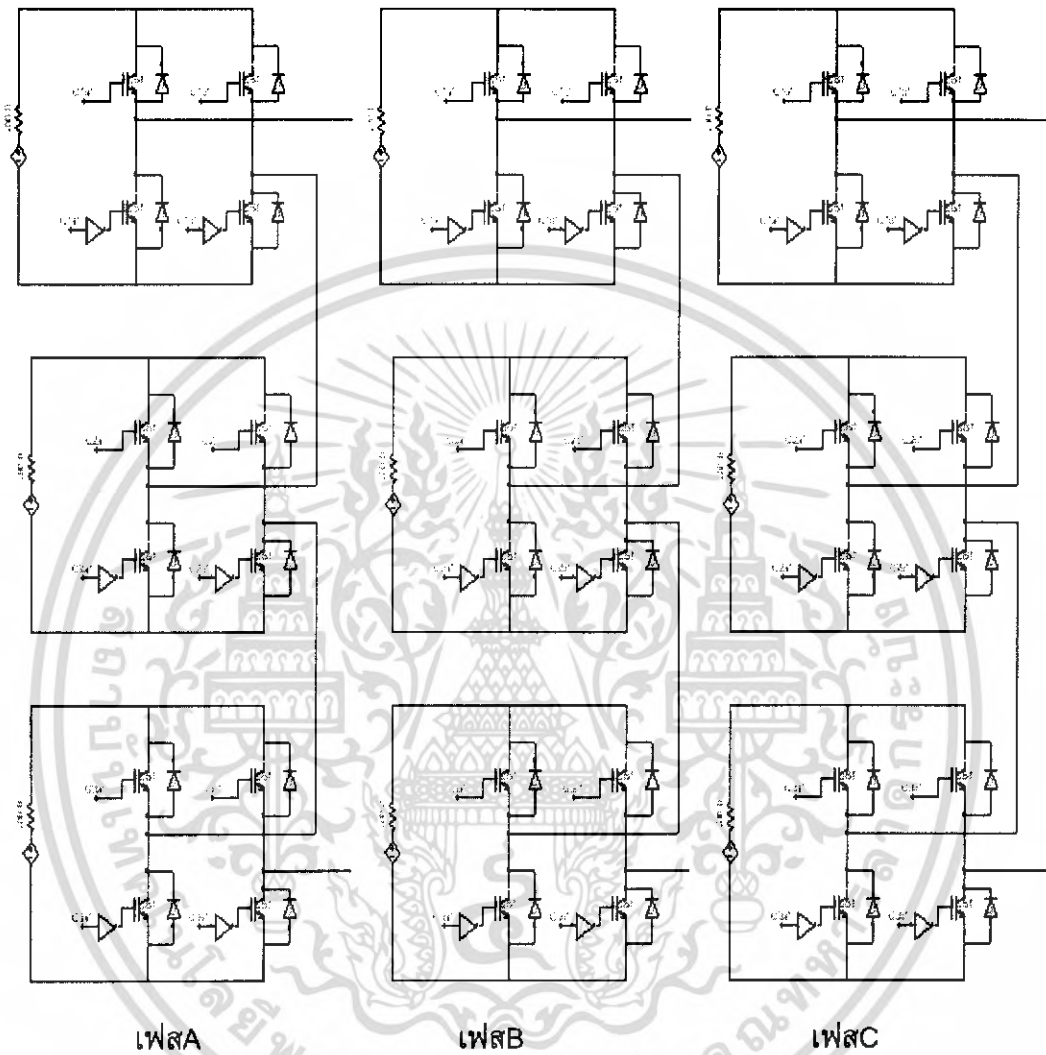
รูปที่ 3.1 แสดงการจำลองวงจรขับ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การคำนวณและการจำลองวงจรโดยใช้โปรแกรม PSCAD

3.2.1 วงจรสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์

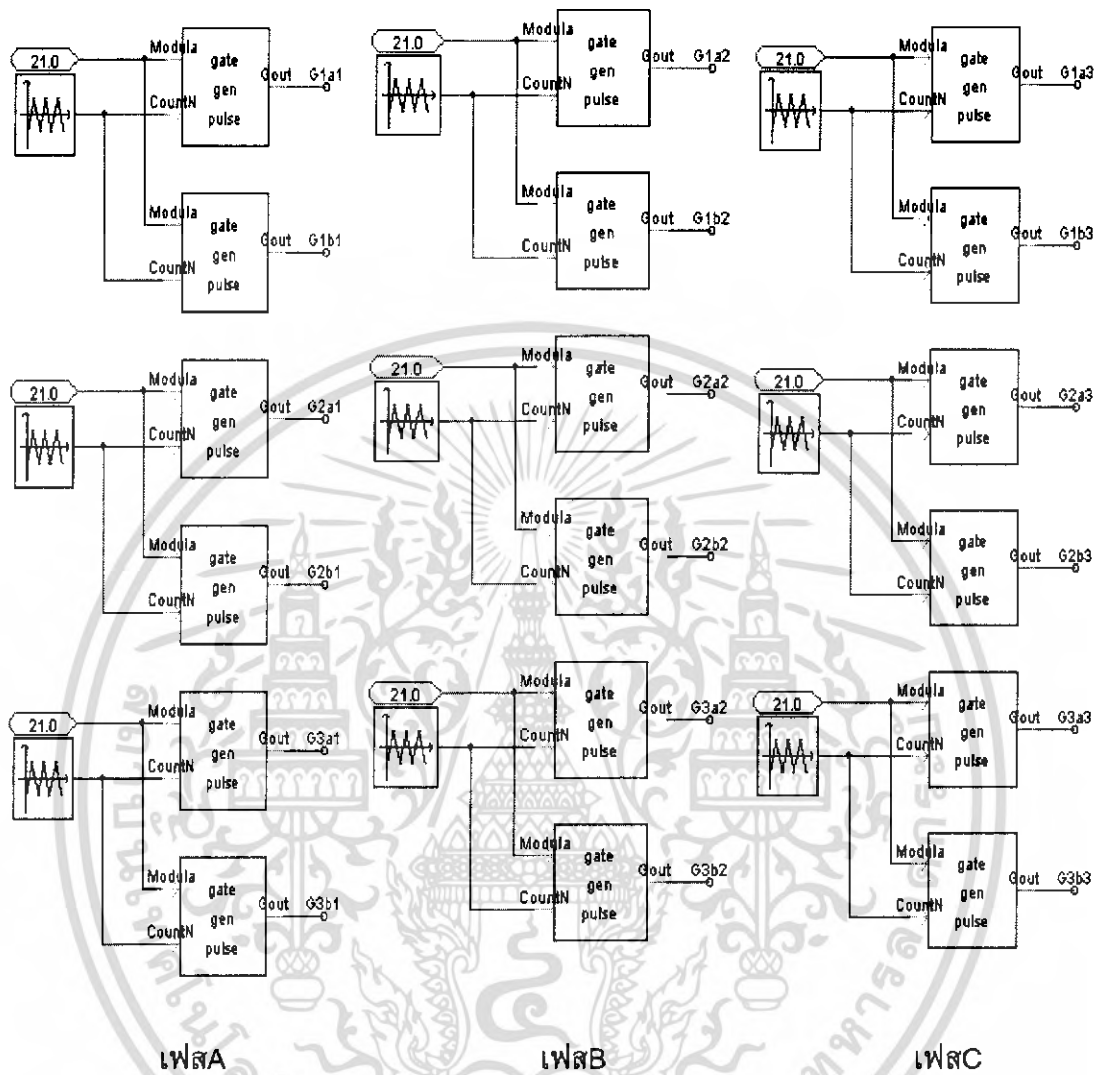
3.2.1.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับสามเฟส



รูปที่ 3.2 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับสามเฟสในโปรแกรม PSCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

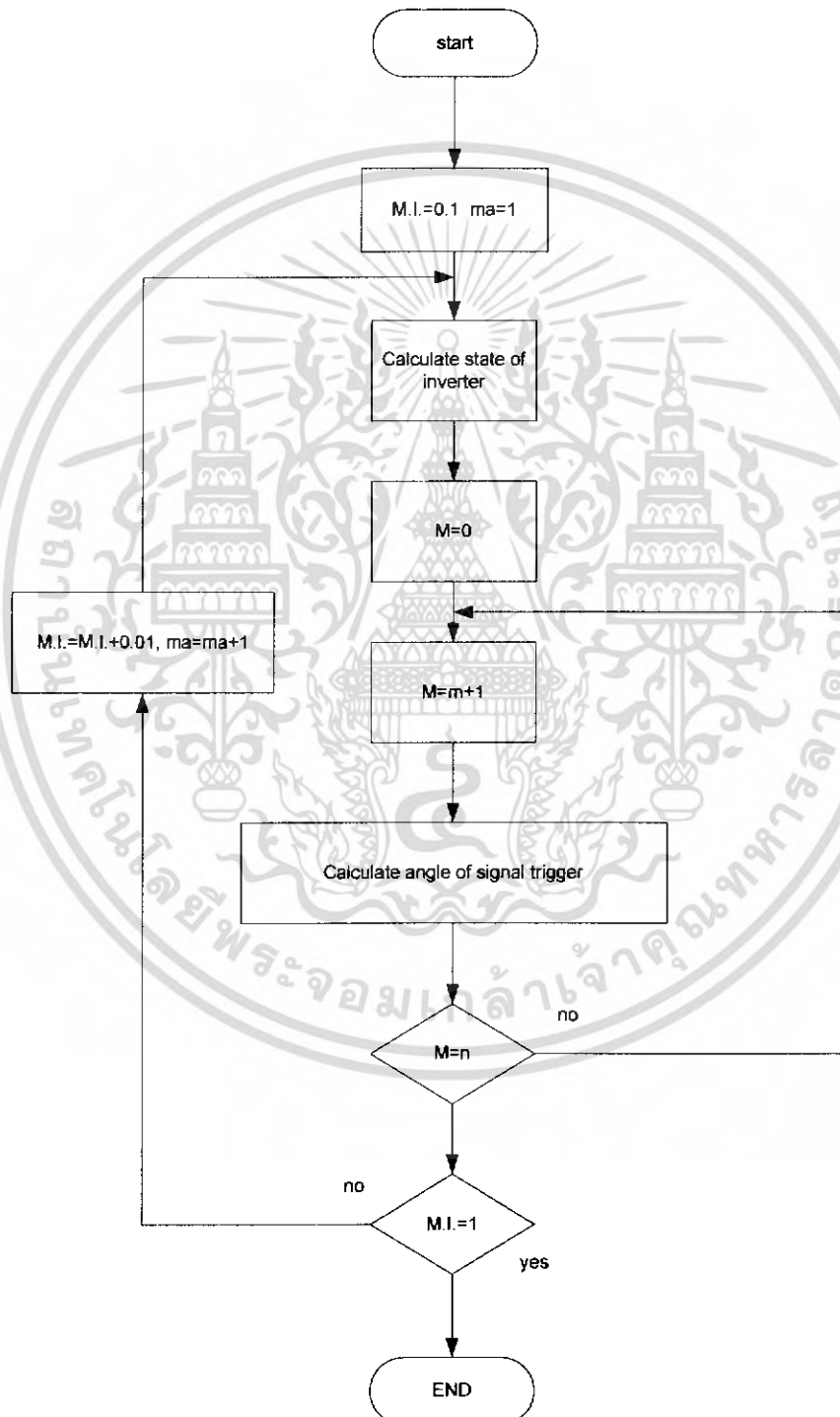
3.2.1.2 ตัวกำเนิดสัญญาณทริกเกทและการสร้างแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 แสดงตัวกำเนิดสัญญาณทริกเกททั้งสามเฟส

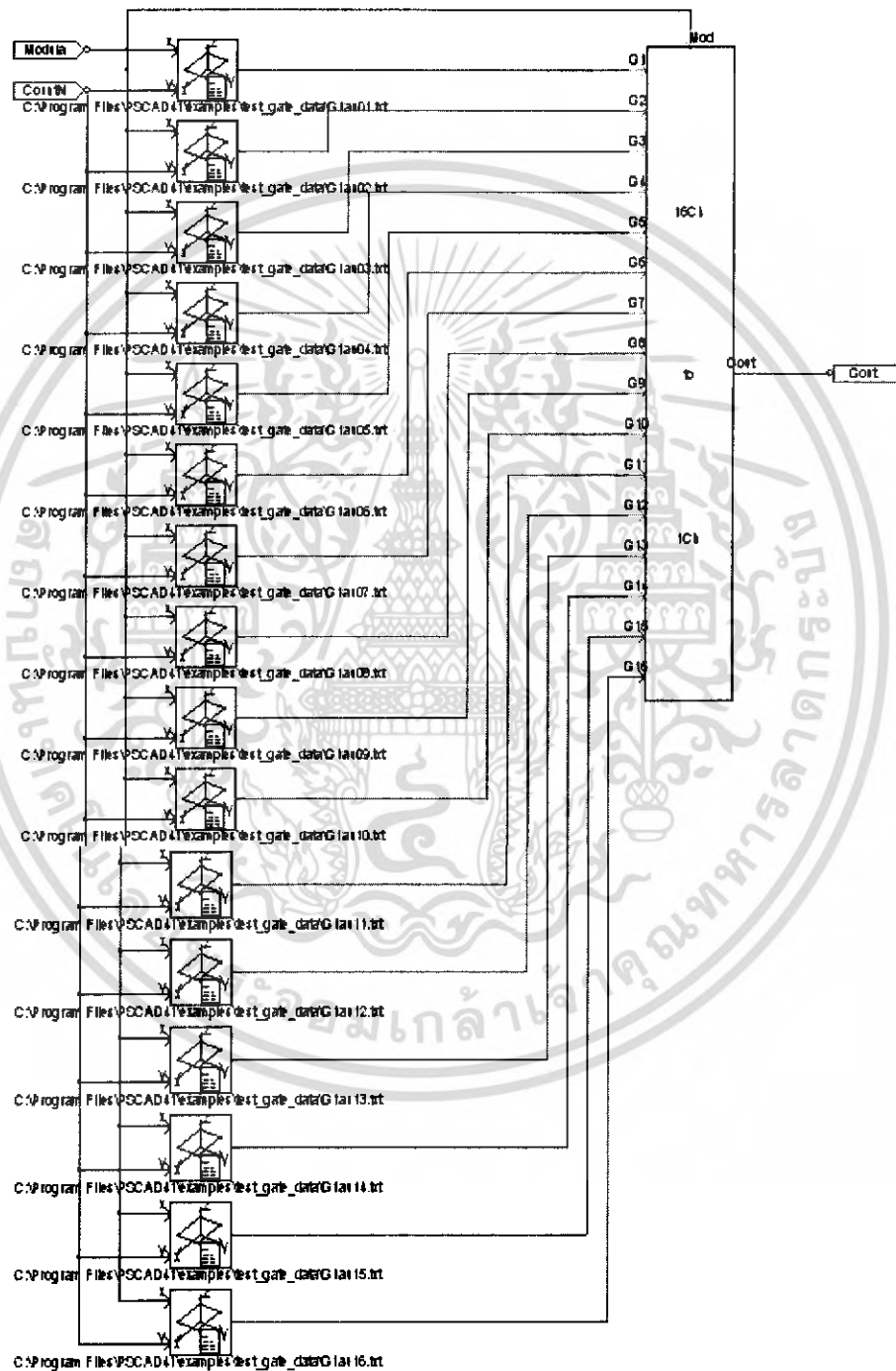
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ามุมที่จะนำมาใช้สร้างสัญญาณทริกเกทที่ระดับแรงดันต่างๆที่ได้มาจากการคำนวณในโปรแกรม MATLAB โดยวิธีพื้นที่เท่ากันและเก็บค่าลงใน workspace หลังจากนั้นนำไปใช้เป็นข้อมูลการจำลองการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์โดยการสร้างสัญญาณทริกเกทจะมีไฟล์ชาร์ทการแสดงดังนี้



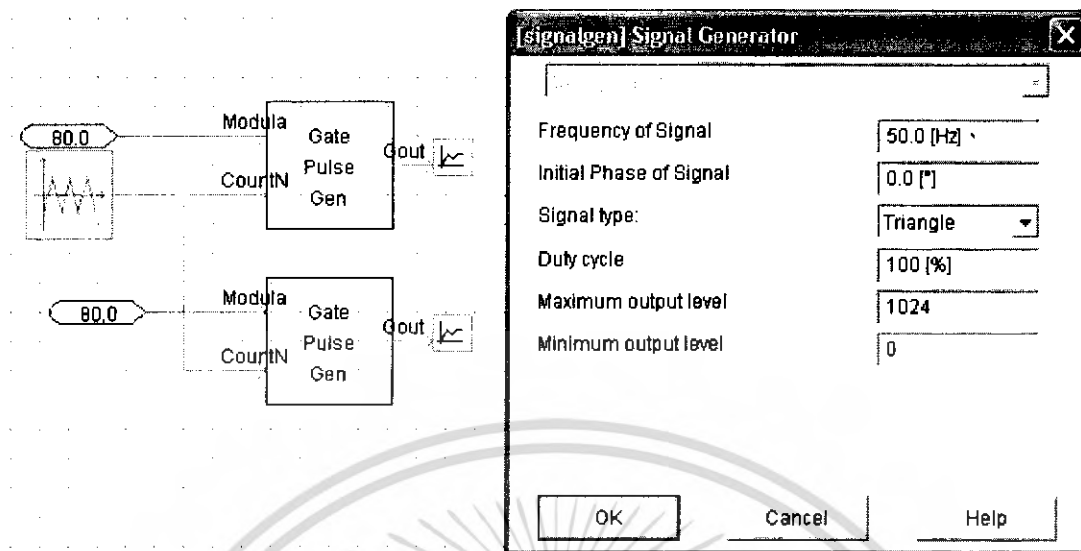
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงแปลงค่ามุมเป็นช่วงเวลาจาก 1 ถึง 1024 แล้วจะได้ค่าของสัญญาณที่จะนำไปสร้างแรงดันที่ค่าต่างๆ(ตามค่า Modulation Index จาก 0.1 ถึง 1 แปลงเป็นตัวเลขจาก 1 ถึง 91 ตามลำดับ) ซึ่งจะได้เมทริกซ์ขนาด 91x1024 เพื่อใช้ในการสร้างแรงดัน แต่ถ้าจะจำลองในโปรแกรม PSCAD ต้องแบ่งออกเป็นขนาด 6x1024 จำนวน 16 ชุดโดยชุดสุดท้ายมีขนาด 1x1024

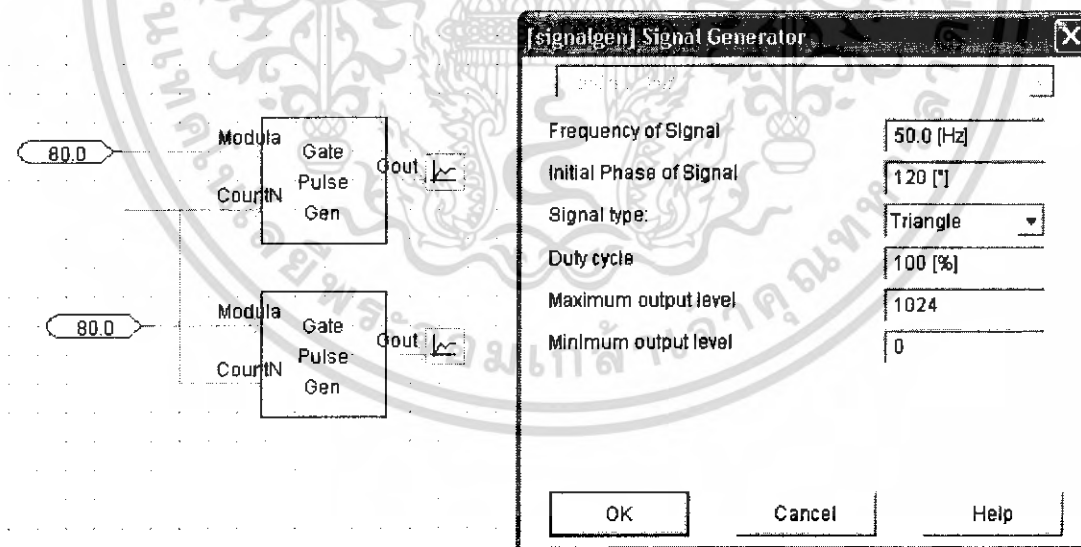


รูปที่ 3.4 แสดงเมทริกซ์ในการสร้างสัญญาณขนาด 6X1024 จำนวน 16 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

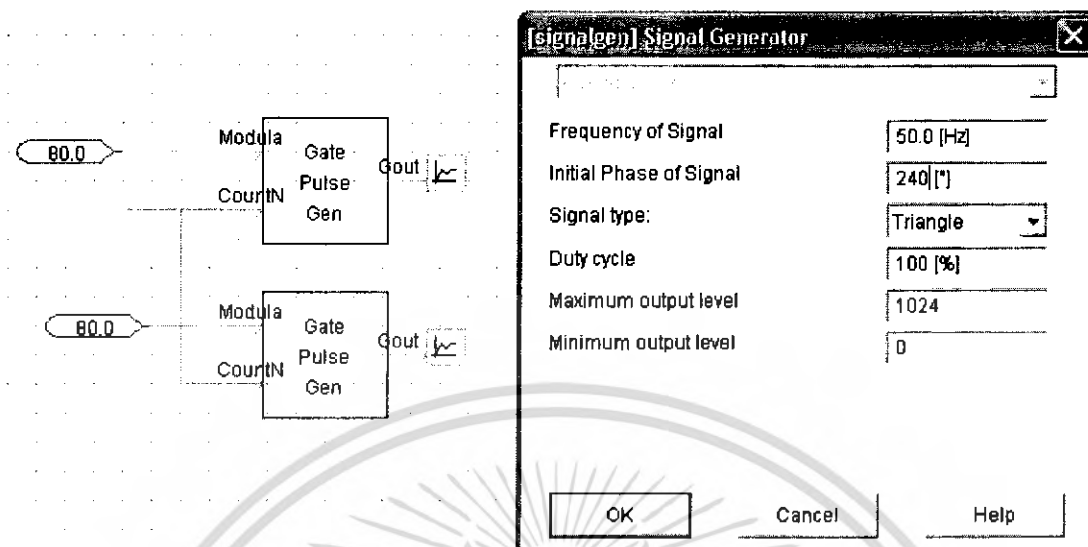


รูปที่ 3.5 แสดงมุมมองเริ่มต้นในการสร้างแรงดันของชั้นที่ 1 ของเฟส A



รูปที่ 3.6 แสดงมุมมองเริ่มต้นในการสร้างแรงดันของชั้นที่ 1 ของเฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงมุมมองเริ่มต้นในการสร้างแรงดันของชั้นที่ 1 ของเฟส C

โดยเมทริกซ์ของมุมทริกเกทในการสร้างสัญญาณแรงดันเหมือนกันทั้งสามเฟสเพียงแต่ให้มุมในการเริ่มสร้างต่างกันเฟสละ 120 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

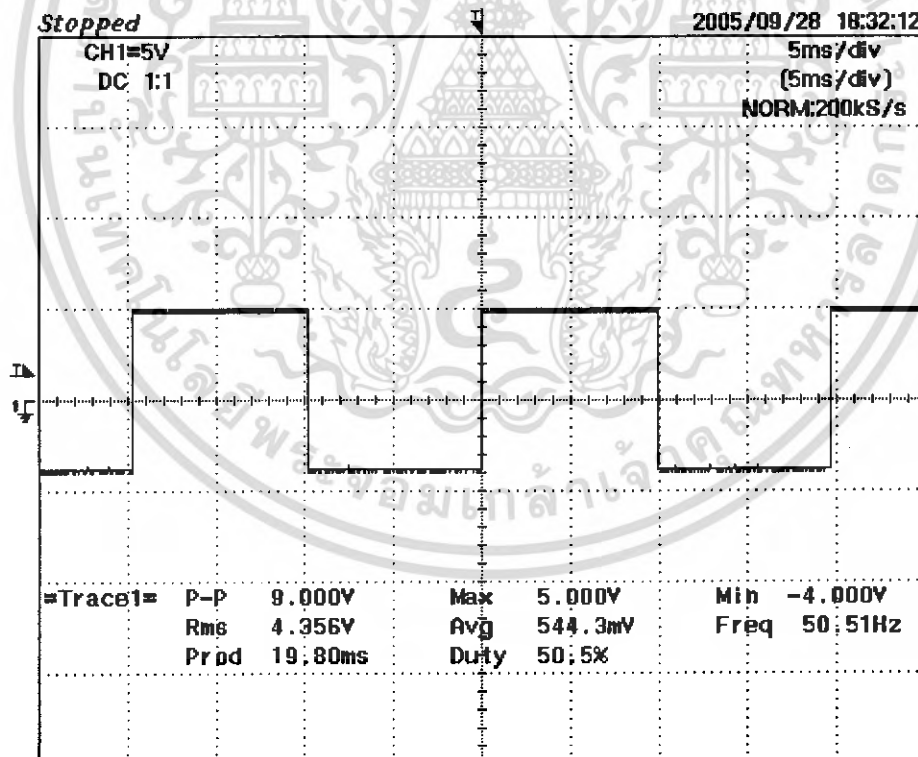
บทที่ 4

ผลการทดลองและผลการจำลองวงจรในโปรแกรม PSCAD

4.1 ผลการทดลองวงจรขับ IGBT

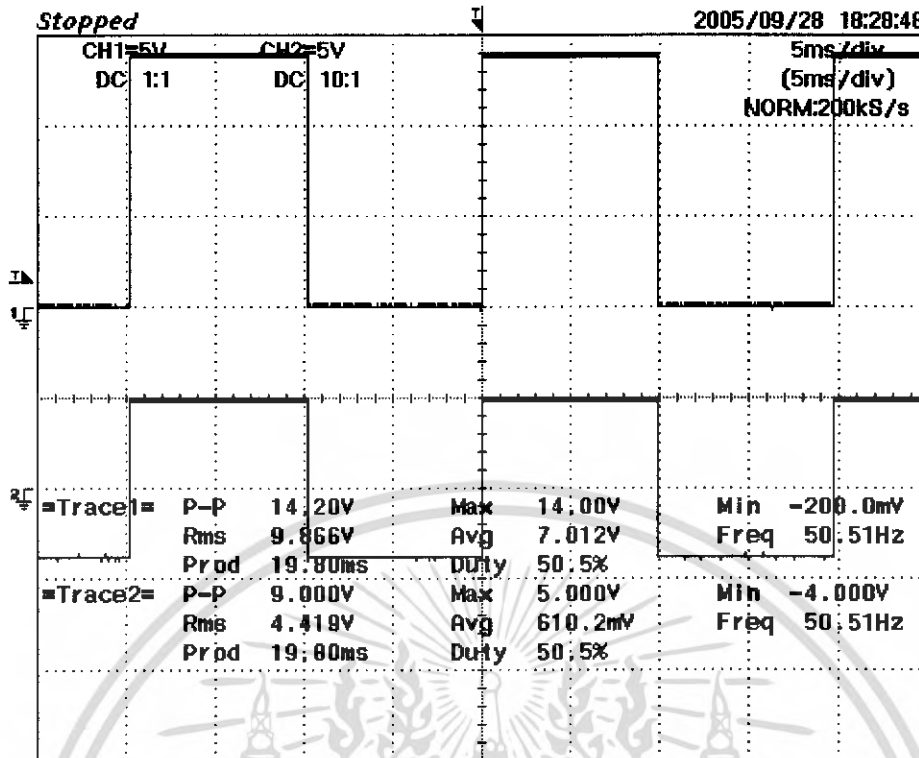
สำหรับการทำงานของชุดขับ IGBT นี้ จะทำงานร่วมกับกับวงจร Protection และ สัญญาณพัลส์ที่สร้างมาจากบอร์ด CPLD รวมไปถึงการควบคุมให้ IGBT ทำงานที่มุมทริกต่าง ๆ ด้วย สำหรับผลการทดลองนั้นพบว่า เมื่อทำการป้อนแรงดันพัลส์ขนาด +5 โวลต์ให้กับ Optocoupler ทั้งสองตัวในขณะที่ไม่ให้มีสัญญาณ SD เข้ามา เมื่อเกิดความต่างศักย์ขึ้น ตัว Optocoupler จะทำงานส่งถ่ายสัญญาณไปให้กับ IR2110 เพื่อที่จะสร้างสัญญาณเอาท์พุทใน ลักษณะเป็นพัลส์ขนาด +15 โวลต์ สามารถนำไปใช้ในการขับเกทของ IGBT ได้สองตัวหรือ 1 กิ่ง คือ G1, E1 และ G2, E2 ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 และ 4.4

รูปสัญญาณที่ได้จากการทดลอง

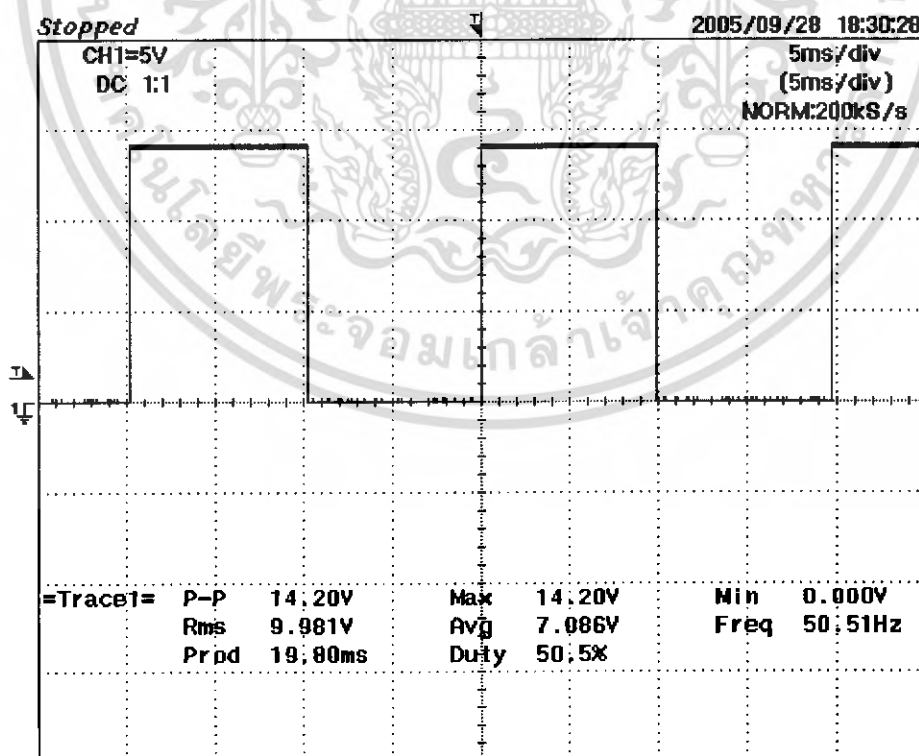


รูปที่ 4.1 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ใช้เป็นอินพุทของ Optocoupler

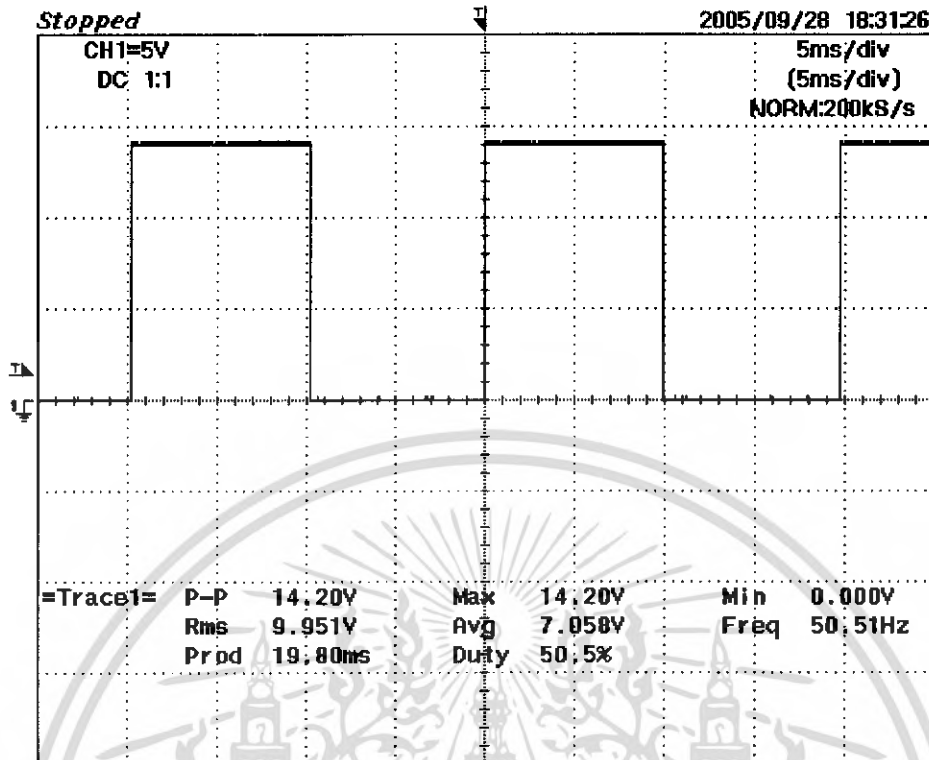
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณพัลส์อินพุตและสัญญาณที่ใช้ในการขับ IGBT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณแอมป์พุท G1 ที่นำไปใช้ในการขับ IGBT ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

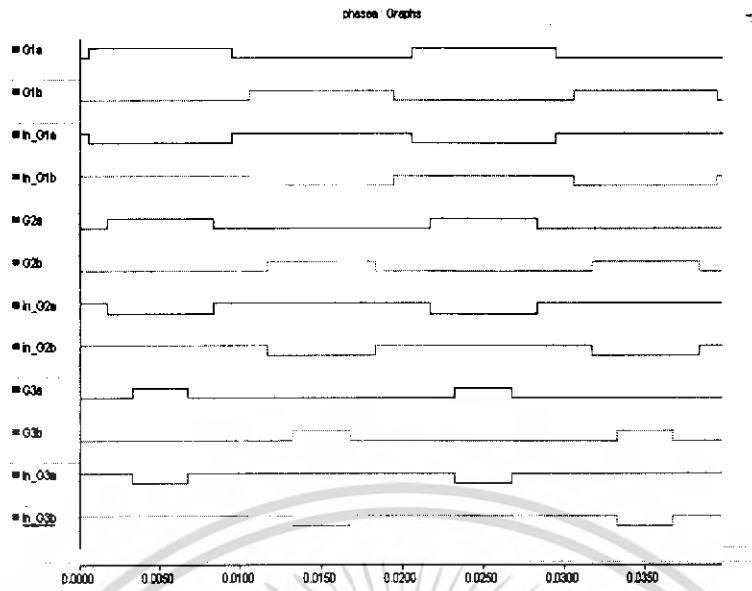


รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณเอาต์พุต G2 ที่นำไปใช้ในการขับ IGBT

4.2 การคำนวณและการจำลองวงจรโดยใช้โปรแกรม PSCAD

ในการศึกษานี้จะเป็นการจำลองการชดเชยกำลังไฟฟัรียแอกทีฟในระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่สร้างแรงดันขึ้นตามค่า Modulation Index เพื่อนำไปสู่การชดเชยกำลังไฟฟัรียแอกทีฟ ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

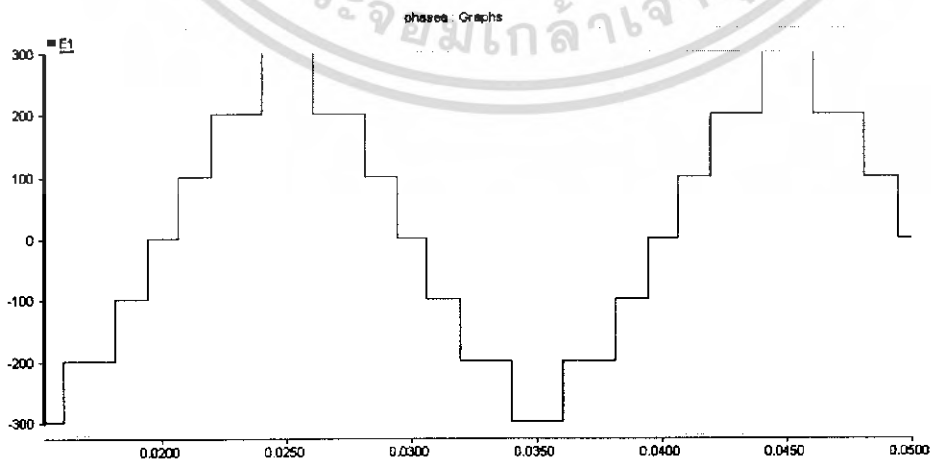
กรณีเฟส A, B และ C ซึ่งได้ผลเหมือนกันเพราะเนื่องจากใช้มุมสร้างสัญญาณทริกเกทเดียวกันเพียงแต่มีมุมที่เริ่มต้นในการสร้างต่างกันเฟสละ 120 องศา



รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณทริกเกทในการสร้างแรงดัน 1 เฟส

state	G1		G2				G3				output each state			Output		
	G1a	G1b	in G1a	in G1b	G2a	G2b	in G2a	in G2b	G3a	G3b	in G3a	in G3b	G1		G2	G3
1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	V	0	0	V
2	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	V	V	0	2V
3	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	V	V	V	3V
4	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	V	V	0	2V
5	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	V	0	0	V
6	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
7	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	(-V)	0	0	(-V)
8	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	(-V)	(-V)	0	(-2V)
9	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	(-V)	(-V)	(-V)	(-3V)
10	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	(-V)	(-V)	0	(-2V)
11	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	(-V)	0	0	(-V)
12	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
13	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	V	0	0	V
14	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	V	V	0	2V

รูปที่ 4.6 แสดงค่าแรงดันเอาต์พุตในช่วงสัญญาณทริกเกทต่างๆ



รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตสำหรับแรงดัน 1 เฟส

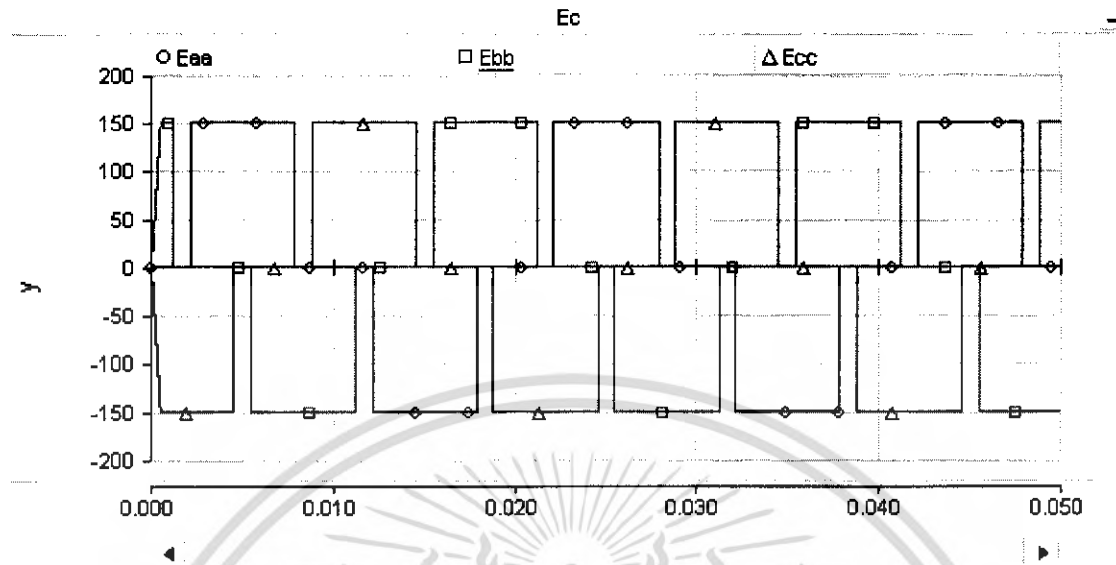
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าแรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ที่แต่ละค่า Modulation Index จากการจำลองใน PSCAD

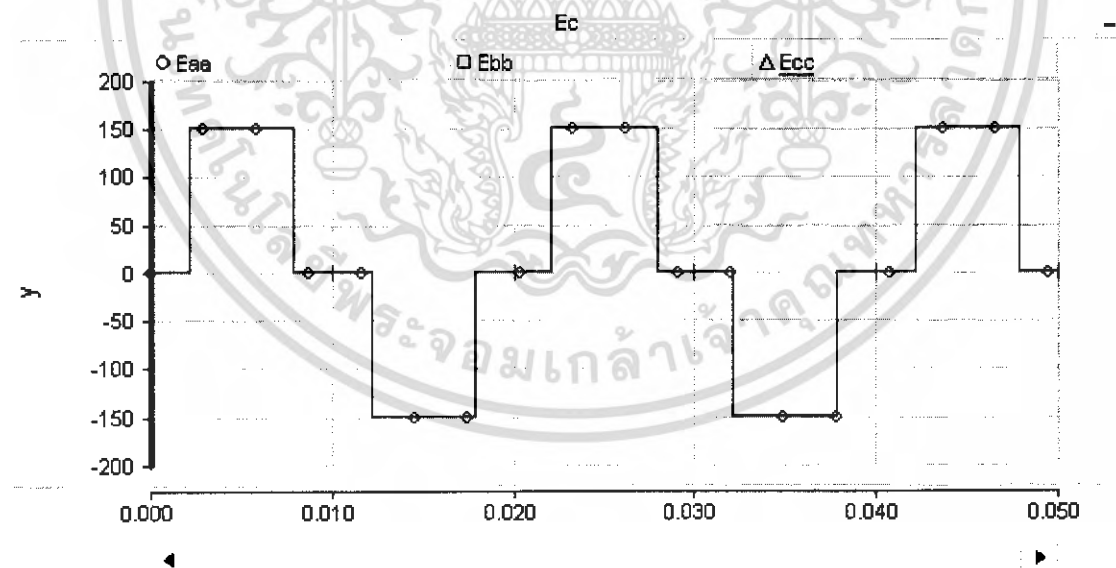
ma	M.I.	Vc(rms)
1	0.10	63.75
6	0.15	78.18
11	0.20	90.36
16	0.25	101.05
21	0.30	111.01
26	0.35	121.38
31	0.40	136.60
36	0.45	152.55
41	0.50	167.78
46	0.55	182.91
51	0.60	197.12
56	0.65	210.68
61	0.70	225.13
66	0.75	240.82
71	0.80	256.56
76	0.85	272.09
81	0.90	287.44
86	0.95	301.95
91	1.00	316.50

หลังจากนั้นได้จำลองการสร้างแรงดันสามเฟสที่มุมทริกเกทต่างๆตามที่คำนวณไว้แล้ว
ได้แรงดันเอาต์พุตออกมาดังรูป ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

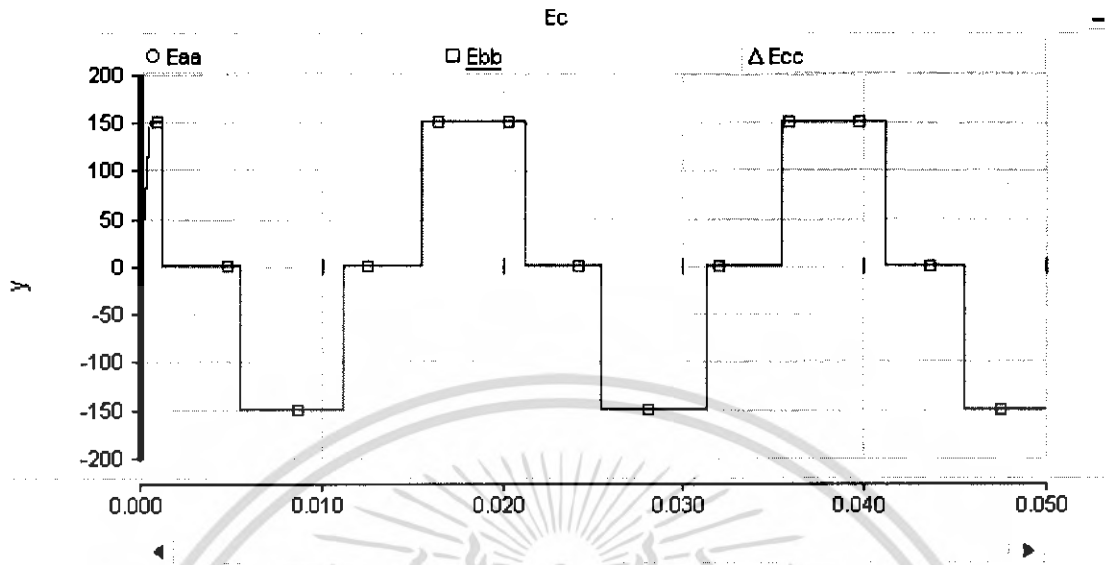


รูปที่ 4.8 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ค่า $M.I. = 0.3, ma = 21$

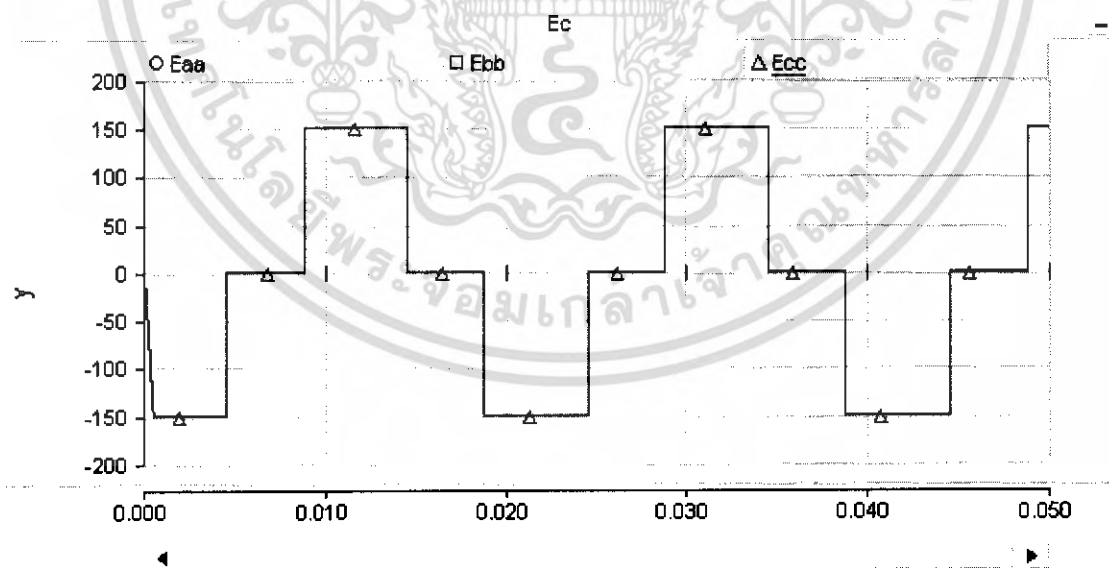


รูปที่ 4.9 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส A ที่ค่า $M.I. = 0.3, ma = 21$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

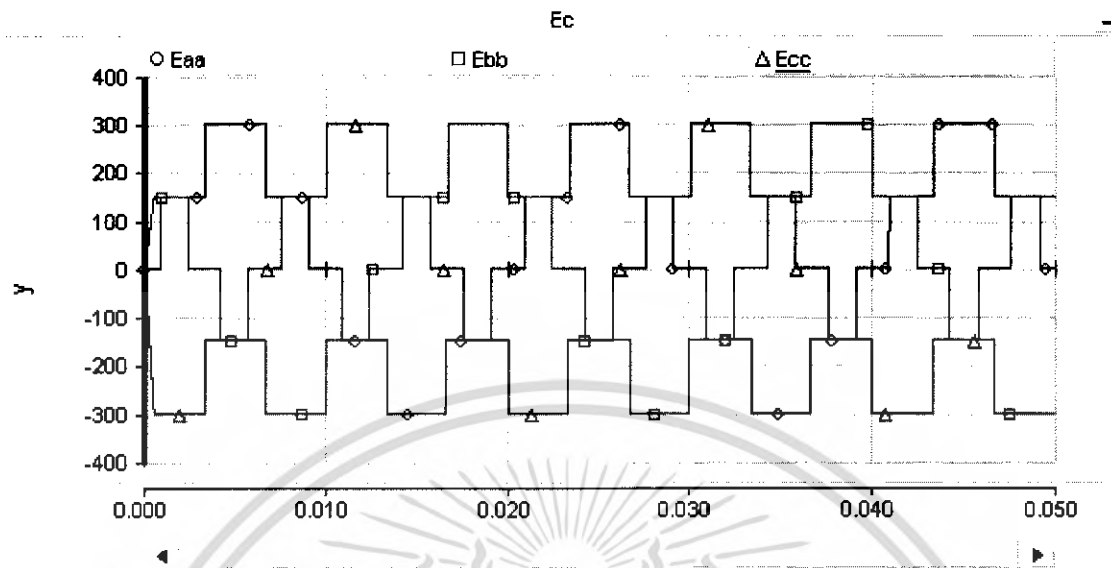


รูปที่ 4.10 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส B ที่ค่า $M.I.= 0.3$, $ma = 21$

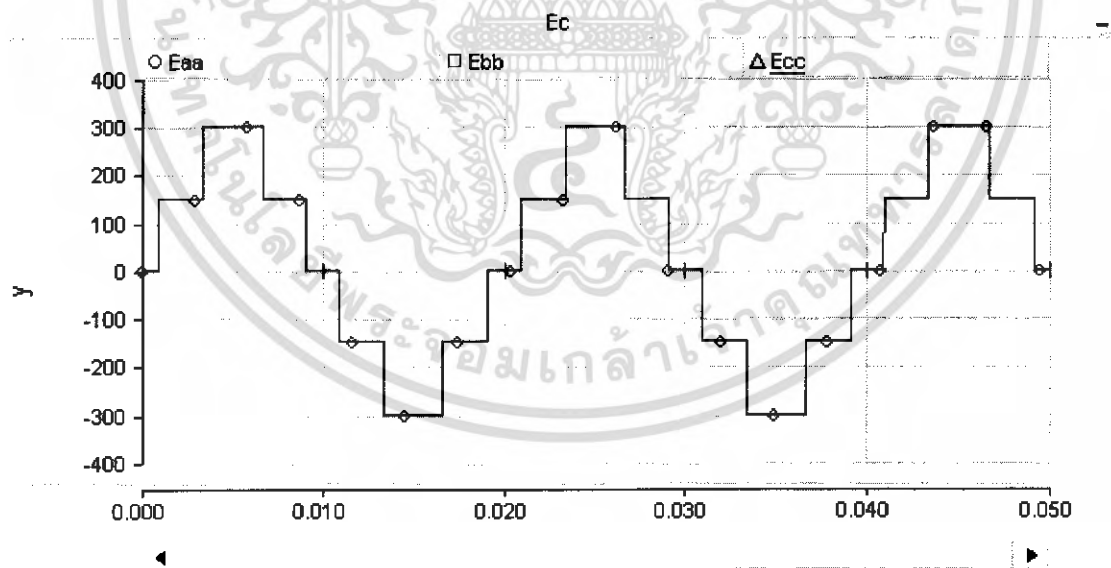


รูปที่ 4.11 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส C ที่ค่า $M.I.= 0.3$, $ma = 21$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

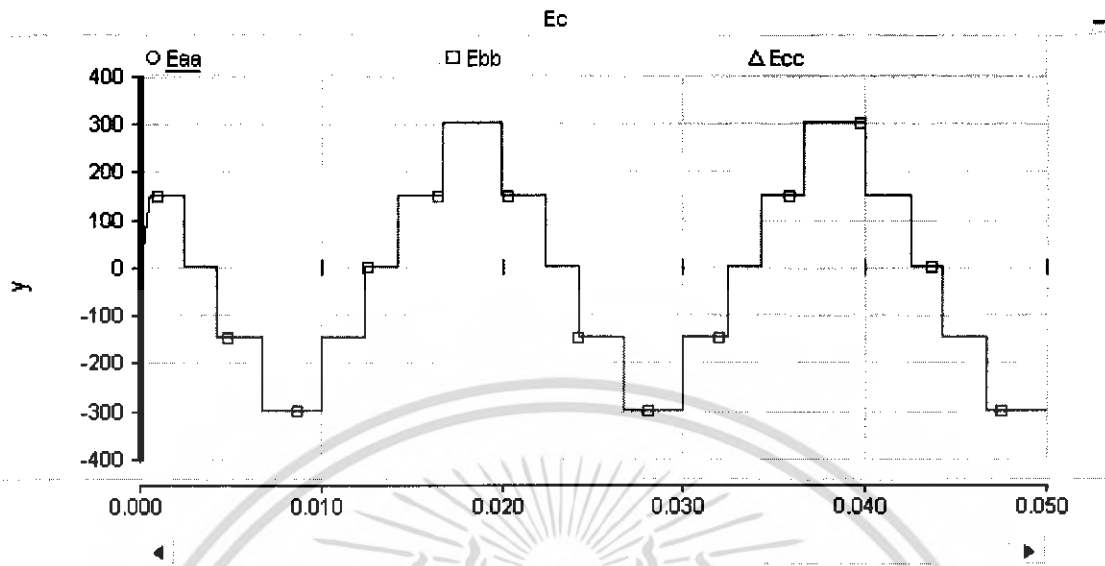


รูปที่ 4.12 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ค่า $M.I. = 0.6$, $ma = 51$

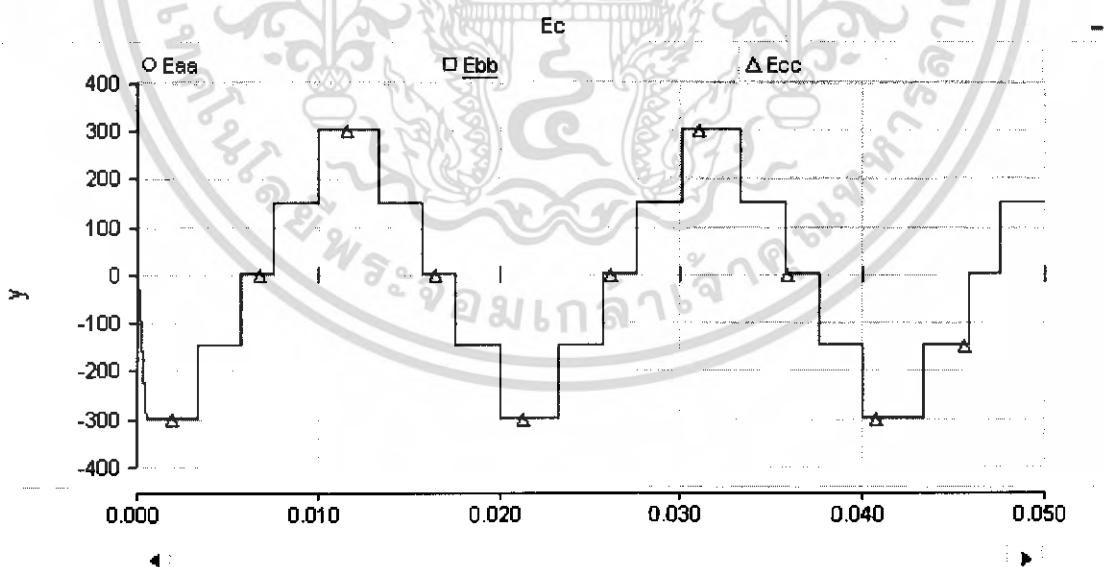


รูปที่ 4.13 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส A ที่ค่า $M.I. = 0.6$, $ma = 51$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

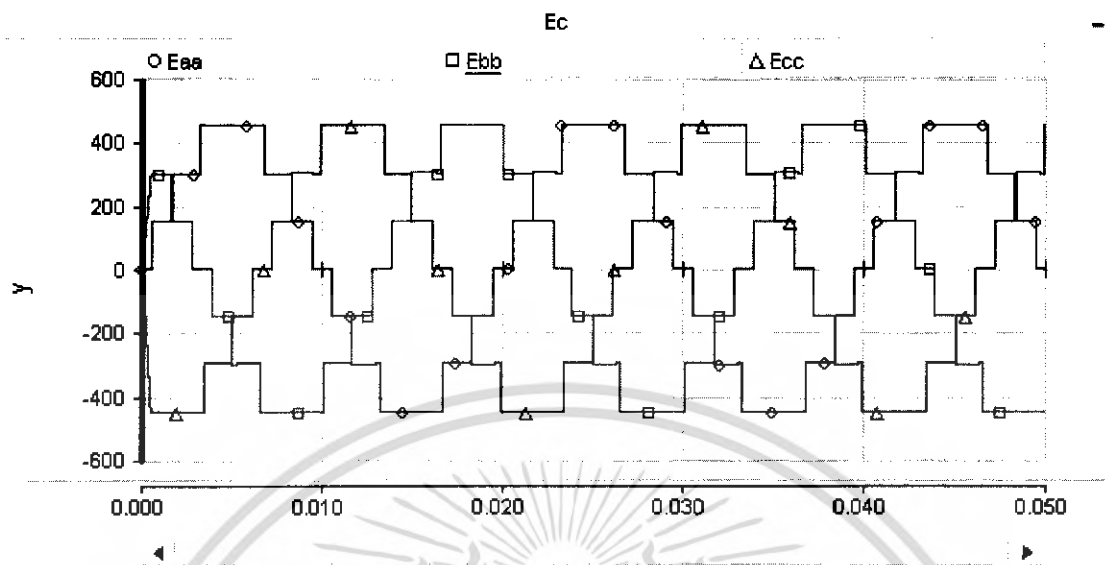


รูปที่ 4.14 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส B ที่ค่า $M.I. = 0.6$, $ma = 51$

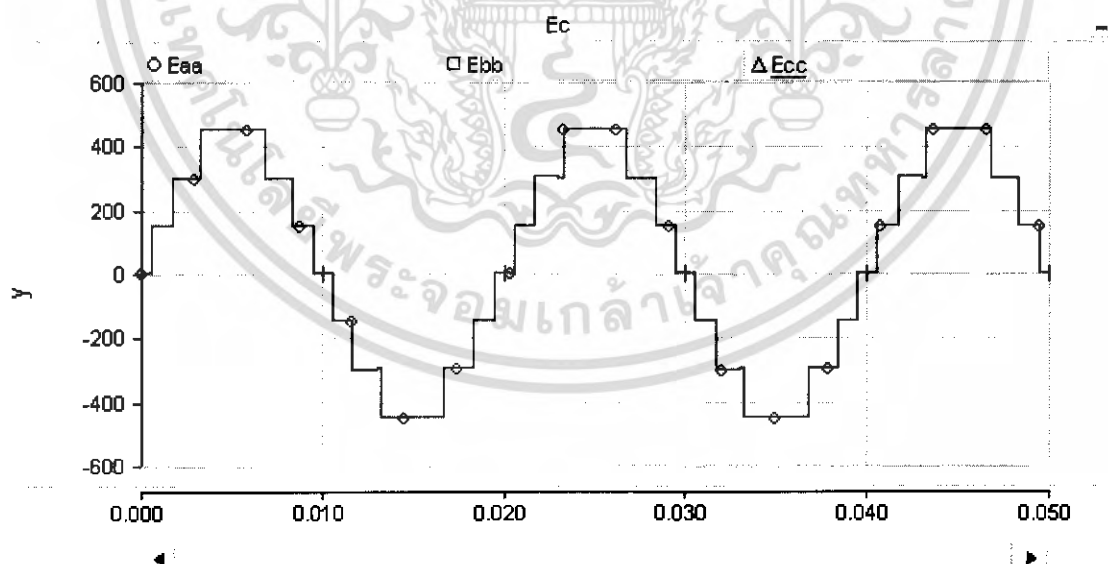


รูปที่ 4.15 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส C ที่ค่า $M.I. = 0.6$, $ma = 51$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

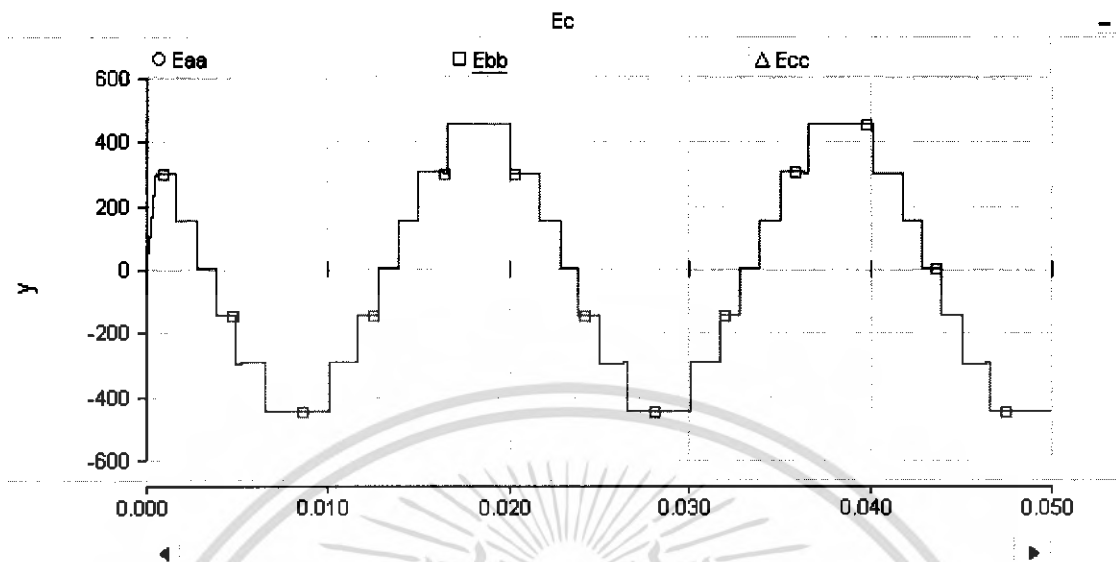


รูปที่ 4.16 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ค่า $M.I. = 1.0$, $ma = 91$

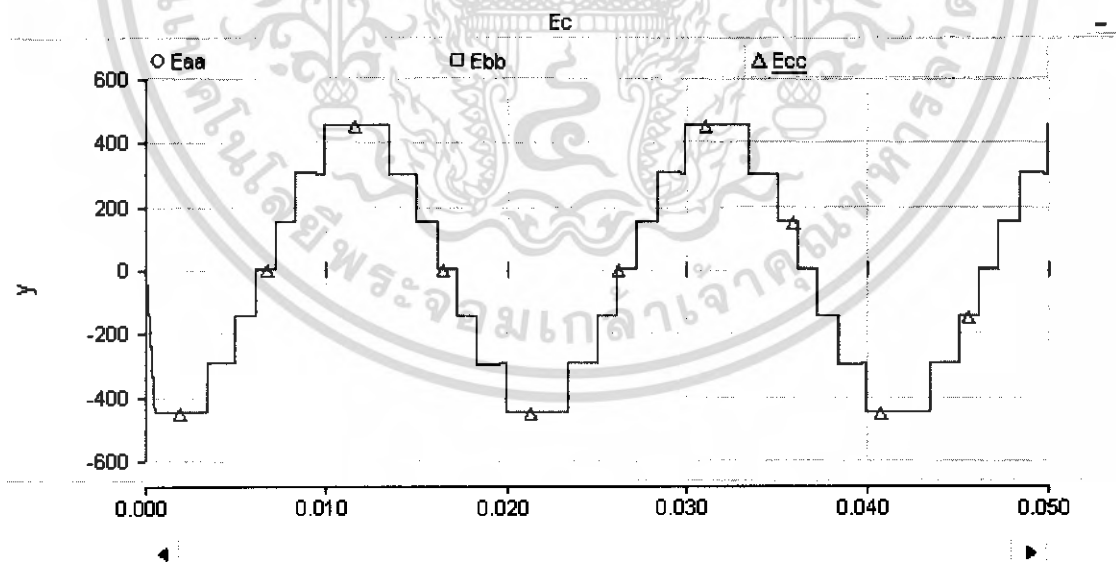


รูปที่ 4.17 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส A ที่ค่า $M.I. = 1.0$, $ma = 91$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส B ที่ค่า M.I.= 1.0, ma = 91



รูปที่ 4.19 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของเฟส C ที่ค่า M.I.= 1.0, ma = 91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

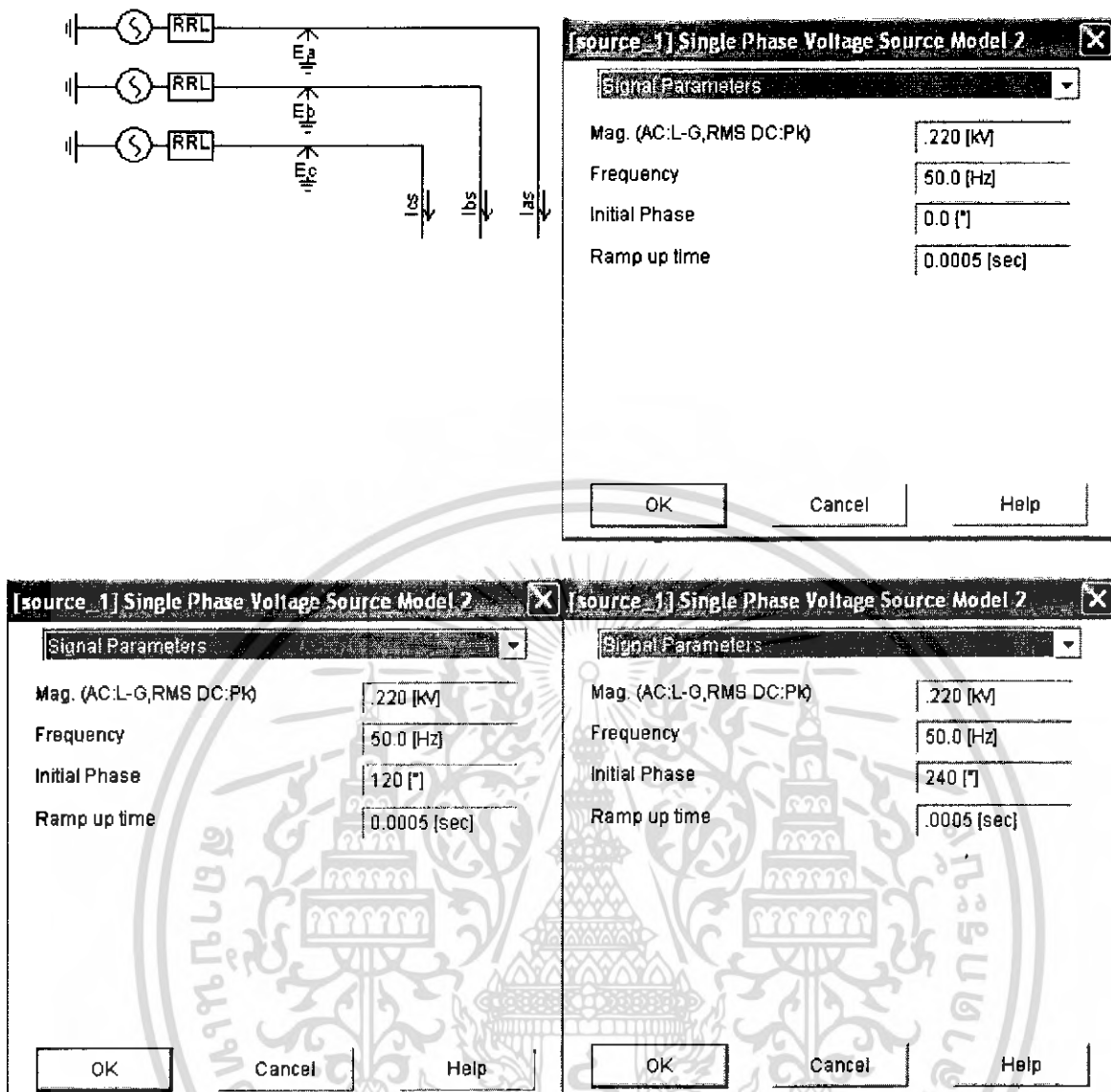
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าฮาร์โมนิกอันดับต่ำต่างๆและค่า THD ของแรงดันเอาต์พุตที่แต่ละค่า Modulation Index จากการจำลองในโปรแกรม PSCAD

M.I.	h1	h3	h5	h7	h9	h11	h13	h15	h17	h19	h21	THD (%)
0.10	40.05	35.35	26.95	16.57	6.27	2.08	7.25	8.83	7.30	3.79	0.25	128.34
0.15	58.93	43.97	20.87	0.37	11.96	11.88	4.16	4.23	7.83	5.32	0.36	91.79
0.20	76.08	43.77	3.52	16.95	11.41	4.09	10.38	3.45	5.75	6.42	0.48	68.00
0.25	92.09	34.99	15.48	16.54	6.79	11.30	3.36	8.69	1.49	7.05	0.31	50.91
0.30	105.88	19.09	26.43	0.48	14.51	5.75	7.81	7.32	3.00	7.00	0.46	38.10
0.35	117.97	2.34	22.35	17.71	2.34	9.59	9.97	2.34	5.83	7.10	2.33	35.55
0.40	132.36	0.287	6.34	29.37	0.28	6.81	18.12	0.28	9.70	11.33	0.29	32.19
0.45	148.02	4.765	10.41	35.74	1.02	16.58	11.66	3.46	9.121	3.91	5.15	32.13
0.50	163.92	10.49	22.12	32.60	5.93	10.75	6.68	11.89	0.56	12.83	0.58	30.03
0.55	180.45	15.01	25.12	18.24	20.17	0.30	15.82	2.91	7.72	0.03	12.03	26.51
0.60	196.40	15.31	18.39	1.10	27.44	5.38	4.49	12.93	5.57	7.19	0.37	22.44
0.65	211.47	10.31	4.92	13.88	17.69	20.63	1.00	4.32	9.99	4.21	9.76	18.57
0.70	226.36	4.09	3.24	11.07	1.41	22.00	11.13	2.23	0.22	10.66	4.57	16.94
0.75	241.87	3.26	0.35	1.17	17.13	23.12	11.21	15.68	9.53	10.11	0.01	17.89
0.80	257.80	4.97	6.67	13.57	25.09	16.48	9.25	21.31	1.16	0.52	4.58	17.50
0.85	273.80	7.57	13.15	20.74	21.58	3.04	13.17	13.36	16.09	7.56	4.59	17.16
0.90	290.08	9.66	16.34	18.11	8.20	13.56	16.33	8.02	17.74	6.24	6.82	15.59
0.95	305.60	9.63	13.19	8.07	7.07	19.75	6.04	15.85	8.15	15.47	0.84	13.64
1.00	321.01	5.70	4.30	3.83	13.26	9.73	11.13	15.87	14.56	6.75	10.80	11.78

4.2.1 ระบบที่จะทำการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

4.2.1.1 แหล่งจ่ายของระบบ

ใช้ AC SOURCE สามเฟสโดยจำลองที่ระดับแรงดัน 220 โวลต์ (rms แรงดันเฟส) ที่ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 4.20 แสดงแหล่งจ่ายสามเฟสของระบบ

4.2.1.2 ภาวะไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับระบบ

ในการจำลองวงจรก็จะกำหนดภาวะไฟฟ้าที่มีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟค่าต่าง ๆ และค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟซึ่งมาจากกระแสแอกทีฟที่ภาวะไฟฟ้าต้องการ ซึ่งทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ระบบจึงจำเป็นที่จะต้องมีการใส่ไฟฟ้รีแอกทีฟเข้ามาชดเชยแทนการจ่ายจากระบบเพื่อให้มีระบบมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นซึ่งค่ากระแสแอกทีฟที่เกิดขึ้นนี้สามารถคำนวณได้จาก

$$I_m = \frac{Q}{V_s} \tag{4.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_m คือกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟ

Q คือกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

V_s คือแรงดันไฟฟ้าของระบบ

ศึกษาจำลองสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อชดเชยแทนการจ่ายจากระบบ ทำให้ระบบไฟฟ้าจ่ายโหลดเฉพาะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ส่งผลให้ระบบมีค่าประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1 (Unity power factor) การศึกษาจำลองการชดเชยโหลดเฟสเดียวสูงสุด 3.333 kVAR

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบที่ภาระไฟฟ้า

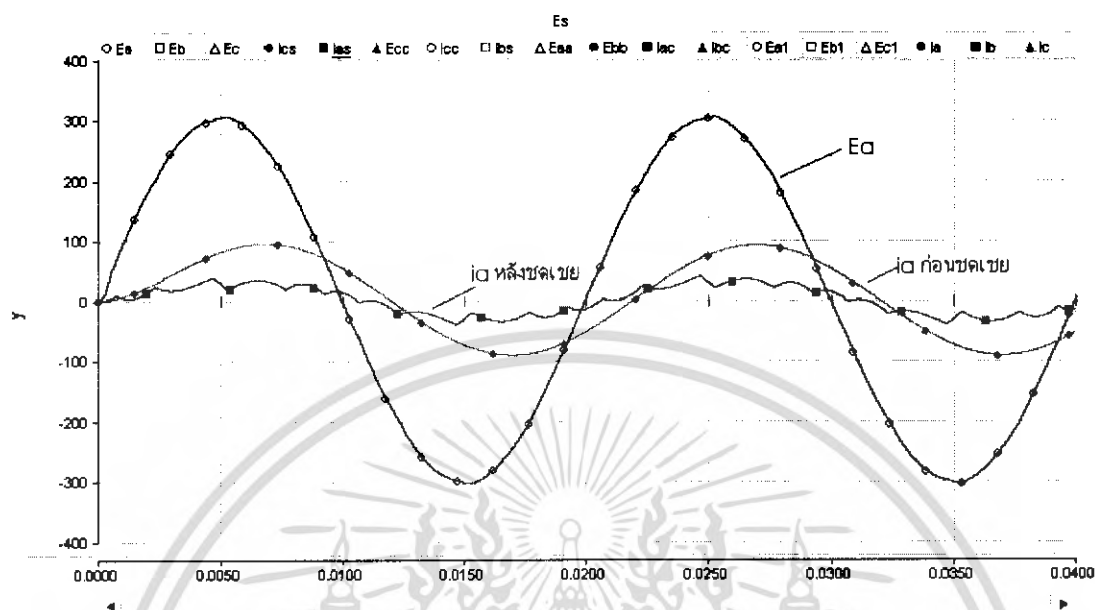
0.8 p.f lagging

S(kVA)	P(kW)	Q(kVAR)	$I_m(\text{rms})$	ma	%THD(las)
Phase A					
1.50	1.20	0.90	4.09	67	18.35
2.00	1.60	1.20	5.45	70	16.96
2.50	2.00	1.50	6.81	73	16.15
4.00	3.20	2.40	10.90	81	11.69
5.00	4.00	3.00	13.63	86	8.06
5.56	4.44	3.33	15.15	91	5.166
Phase B					
1.50	1.20	1.20	4.09	67	18.38
2.00	1.60	1.60	5.45	70	16.97
2.50	2.00	2.00	6.81	73	16.13
4.00	3.20	3.20	10.90	81	11.68
5.00	4.00	4.00	13.63	86	8.04
5.56	4.44	3.33	15.15	91	5.159
Phase C					
1.50	1.20	1.20	4.09	67	18.36
2.00	1.60	1.60	5.45	70	16.98
2.50	2.00	2.00	6.81	73	16.15
4.00	3.20	3.20	10.90	81	11.71
5.00	4.00	4.00	13.63	86	8.07
5.56	4.44	3.33	15.15	91	5.167

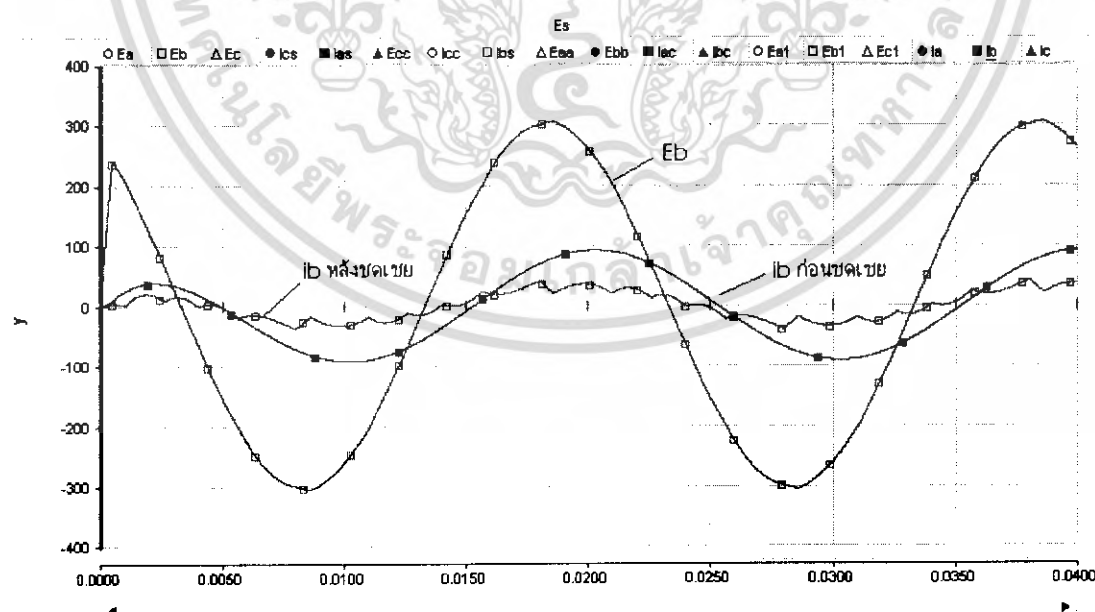
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองเมื่อภาระไฟฟ้ามีค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ 900 VAR, 0.8 p.f.

Lagging $I_m = 4.09$ A $m_a = 67$



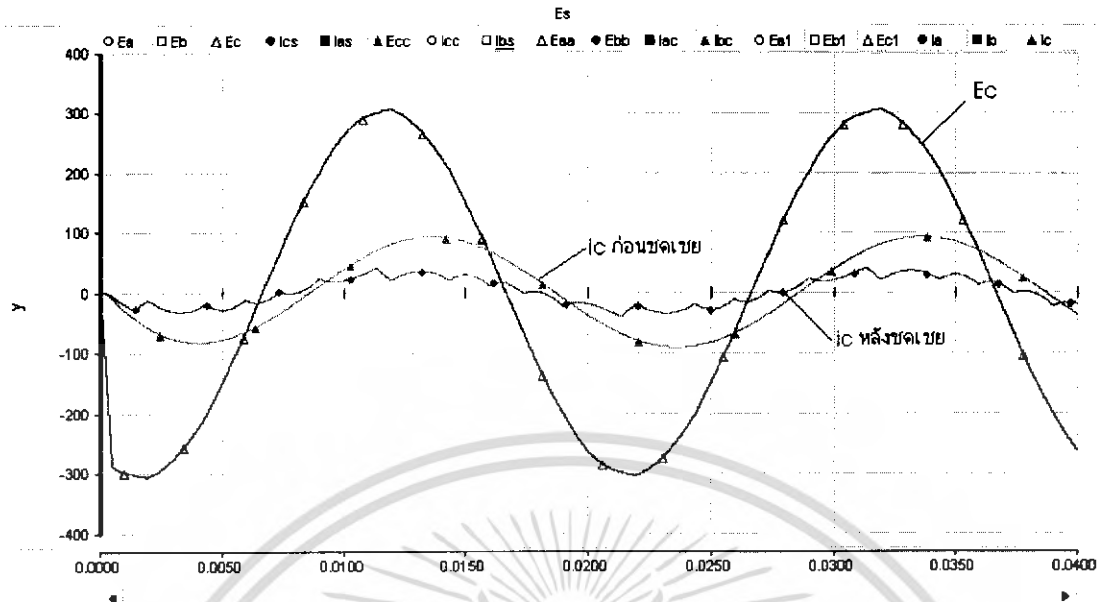
รูปที่ 4.21 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน
และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเฟส A
(เพื่อความชัดเจน จึงได้มีการขยายสัญญาณกระแส)



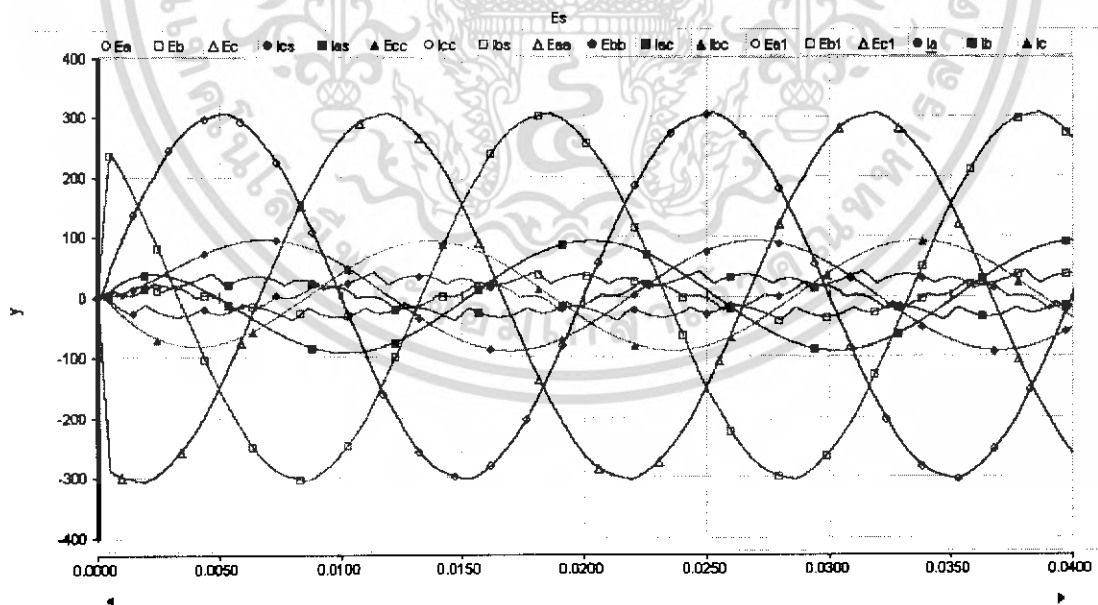
รูปที่ 4.22 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน

และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของเฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน
และหลังการขดเซยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของเฟส C
(เพื่อความชัดเจน จึงได้มีการขยายสัญญาณกระแส)

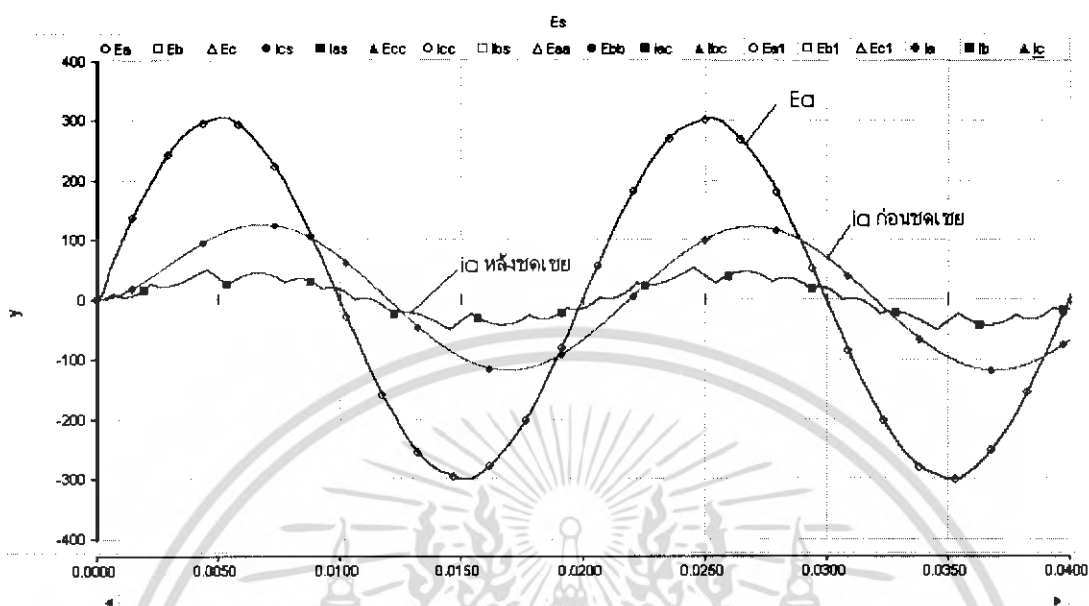


รูปที่ 4.24 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง
การขดเซยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของระบบสามเฟส

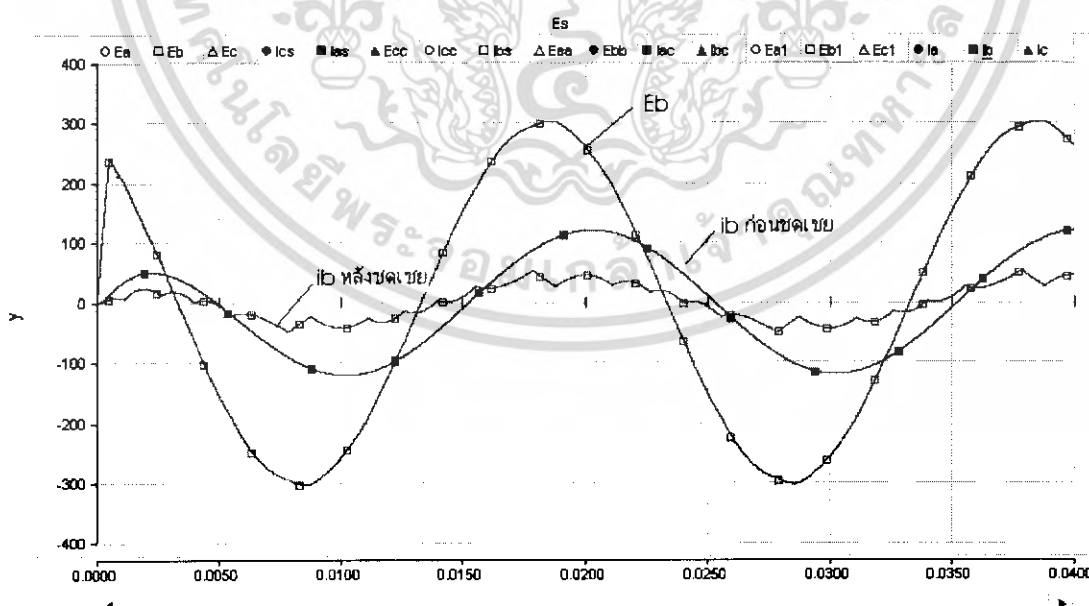
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลองเมื่อภาระไฟฟ้ามีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเท่ากับ 1200 VAR, 0.8 p.f.

Lagging $I_m = 5.45 \text{ A}$ $m_a = 70$

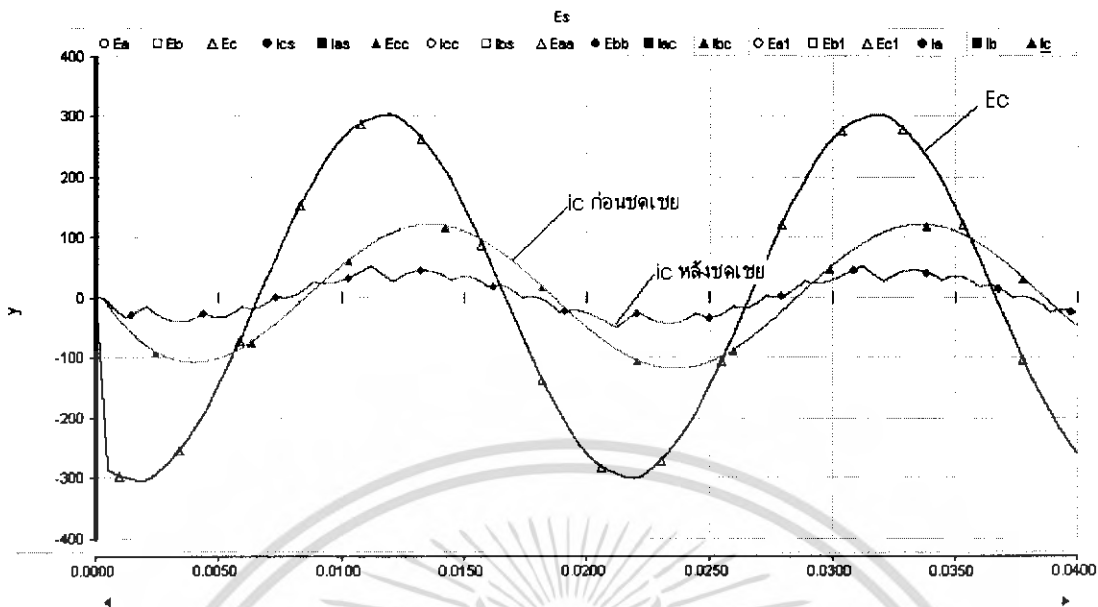


รูปที่ 4.25 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน
และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส A
(เพื่อความชัดเจน จึงได้มีการขยายสัญญาณกระแส)

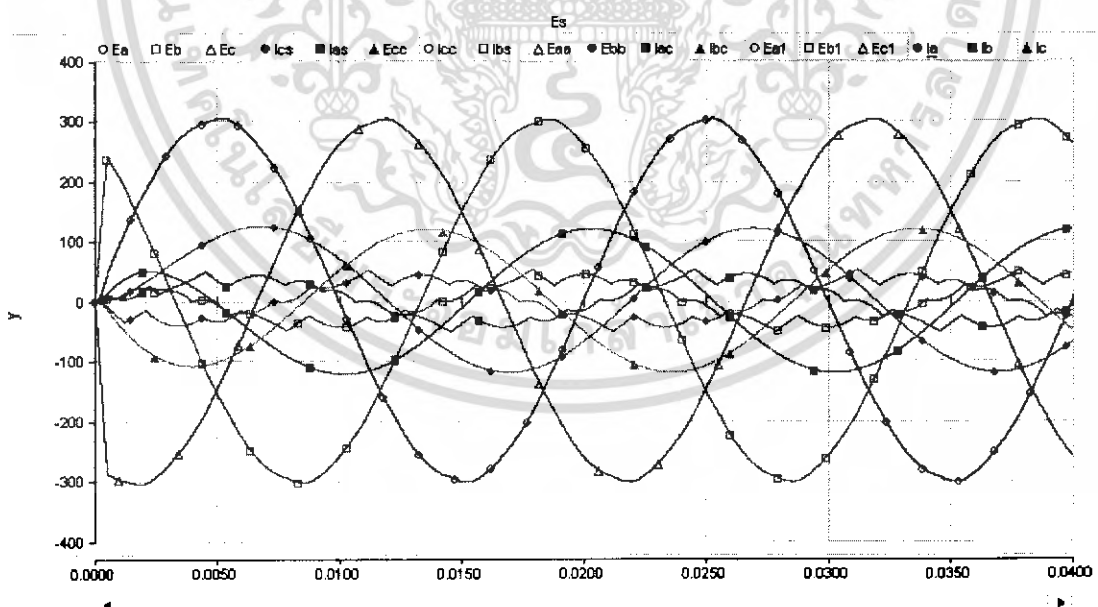


รูปที่ 4.26 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน
และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน และหลังการขดเซย์กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของเฟส C (เพื่อความชัดเจน จึงได้มีการขยายสัญญาณกระแส)

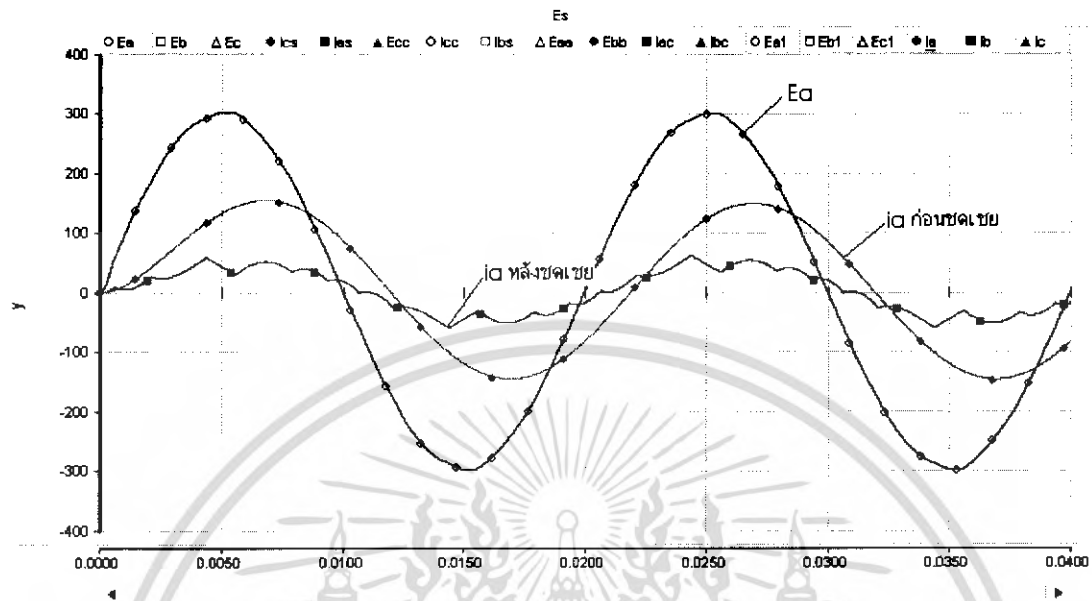


รูปที่ 4.28 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การขดเซย์กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของระบบสามเฟส

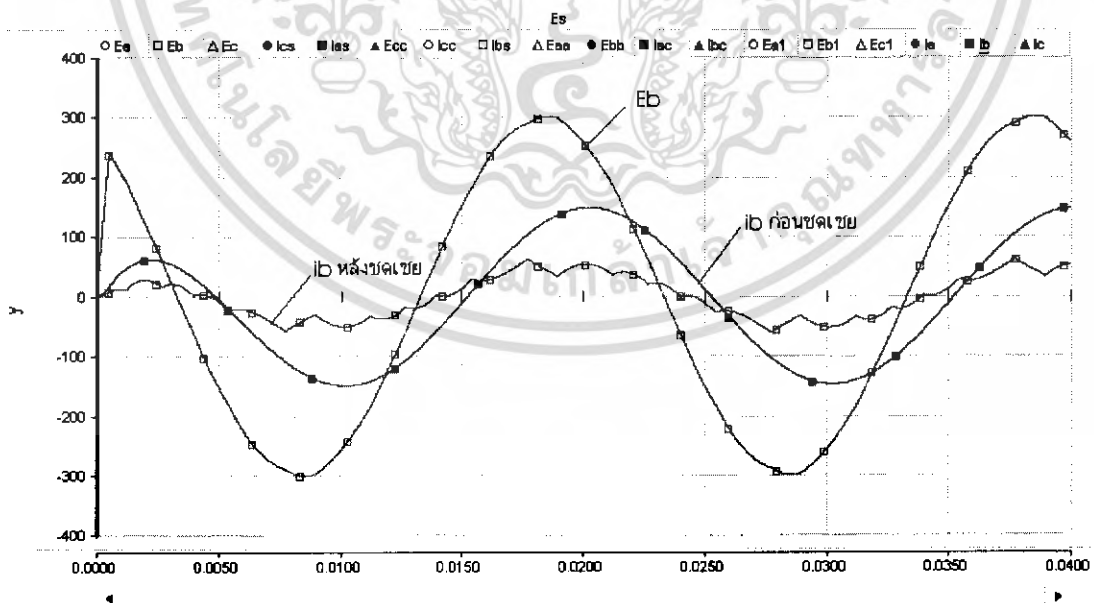
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดลองเมื่อภาระไฟฟ้ามีค่ากำลังไฟฟ้านอกที่เท่ากับ 1500 VAR, 0.8 p.f.

Lagging $I_m = 6.81 \text{ A}$ $m_a = 73$

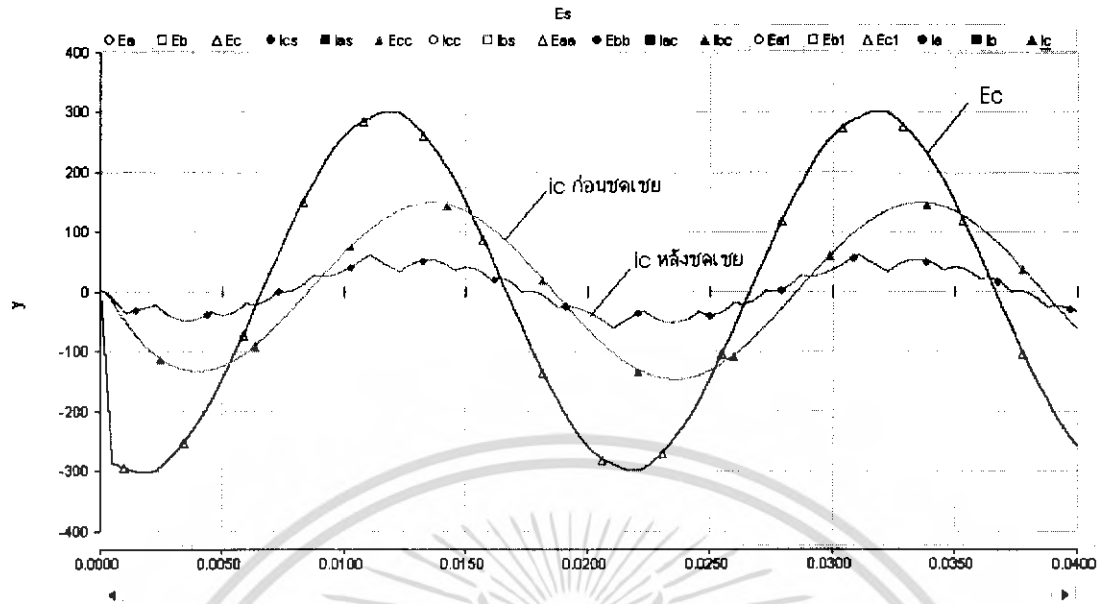


รูปที่ 4.29 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน
และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้านอกที่พของเฟส A
(เพื่อความชัดเจน จึงได้มีการขยายสัญญาณกระแส)

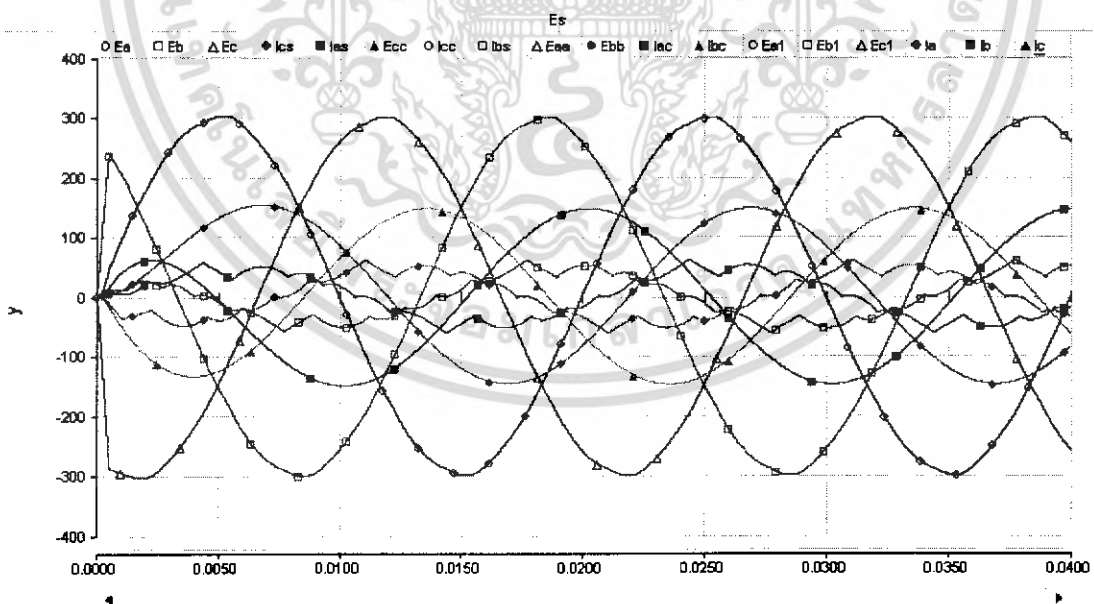


รูปที่ 4.30 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน
และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้านอกที่พของเฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน
และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของเฟส C
(เพื่อความชัดเจน จึงได้มีการขยายสัญญาณกระแส)

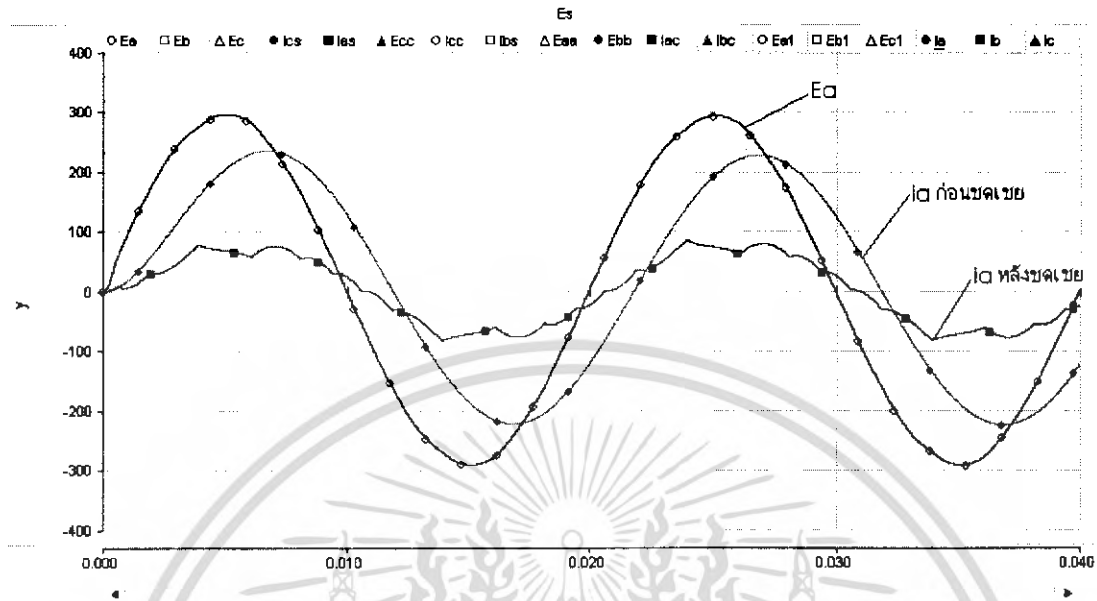


รูปที่ 4.32 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง
การชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของระบบสามเฟส

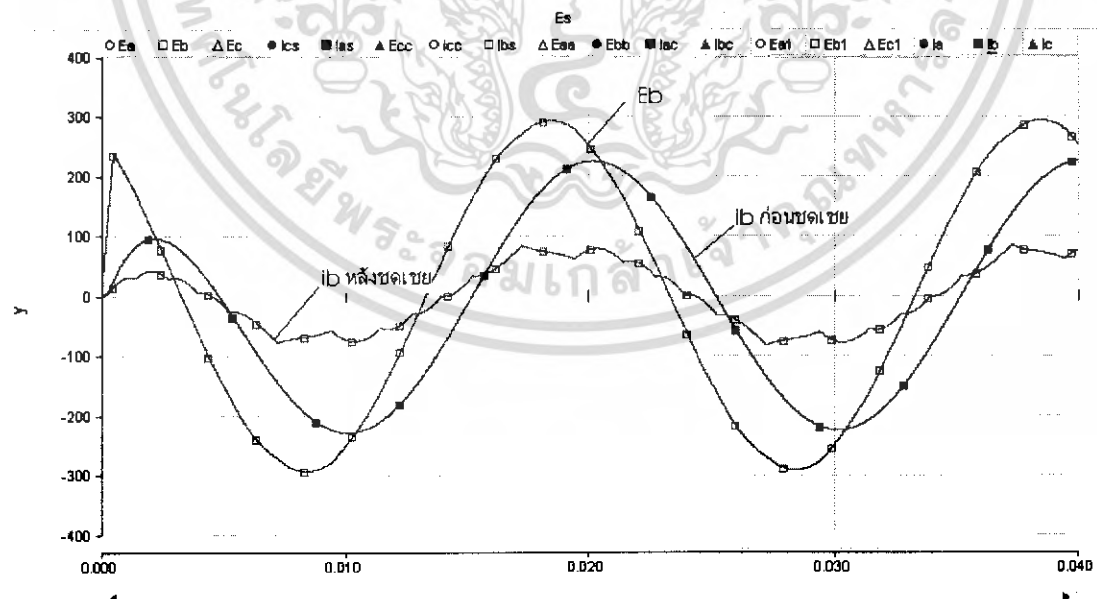
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการทดลองเมื่อภาระไฟฟ้ามีค่ากำลังไฟฟ้านอกทีฟเท่ากับ 2400 VAR, 0.8 p.f.

Lagging $I_m = 10.90$ A $m_a = 81$

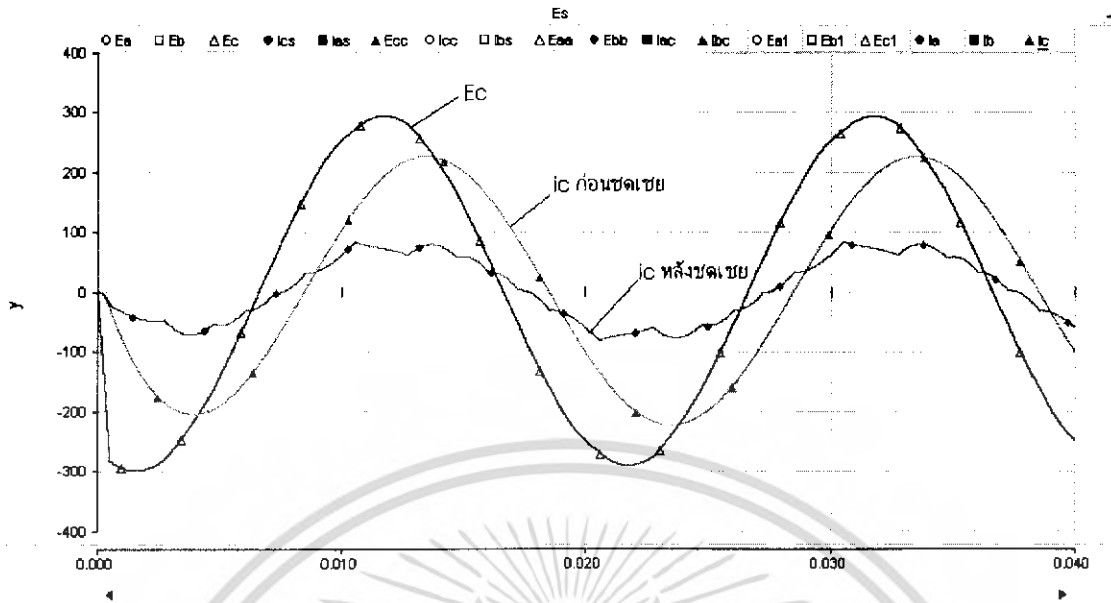


รูปที่ 4.33 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน
และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้านอกทีฟของเฟส A
(เพื่อความชัดเจน จึงได้มีการขยายสัญญาณกระแส)

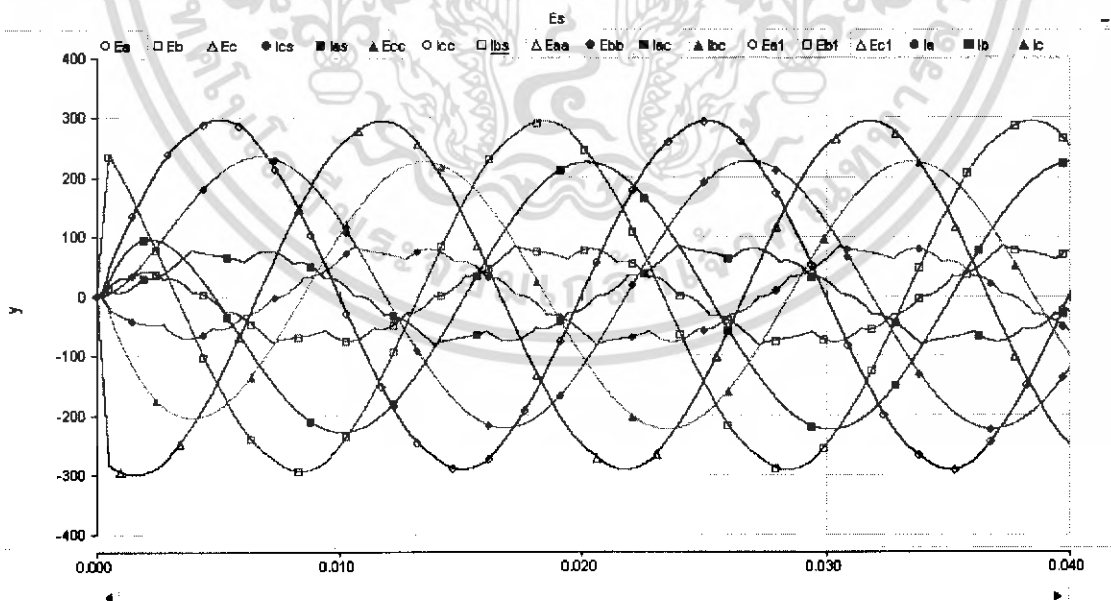


รูปที่ 4.34 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน
และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้านอกทีฟของเฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอดที่ฟของเฟส C (เพื่อความชัดเจน จึงได้มีการขยายสัญญาณกระแส)

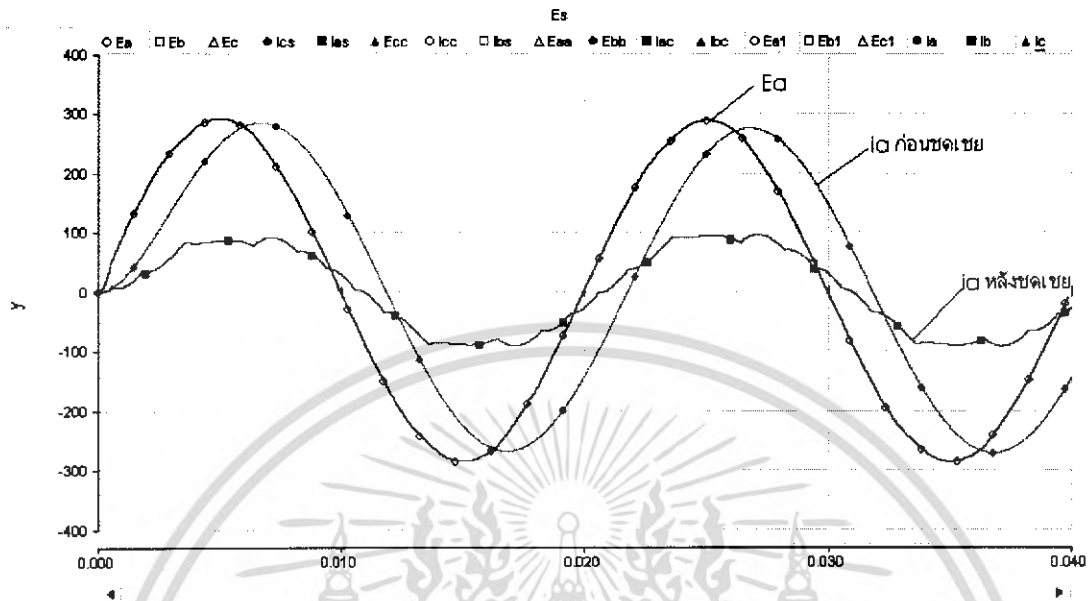


รูปที่ 4.36 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลัง การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอดที่ฟของระบบสามเฟส

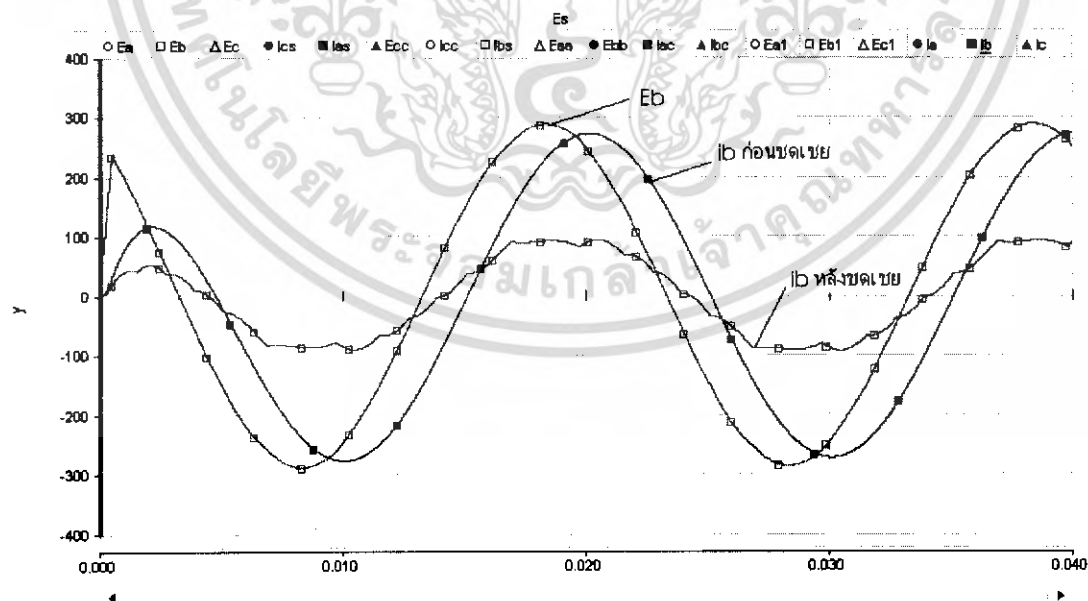
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการทดลองเมื่อภาระไฟฟ้ามีค่ากำลังไฟฟ้านอกที่เท่ากับ 3000 VAR, 0.8 p.f.

Lagging $I_m = 13.63 \text{ A}$ $m_a = 86$

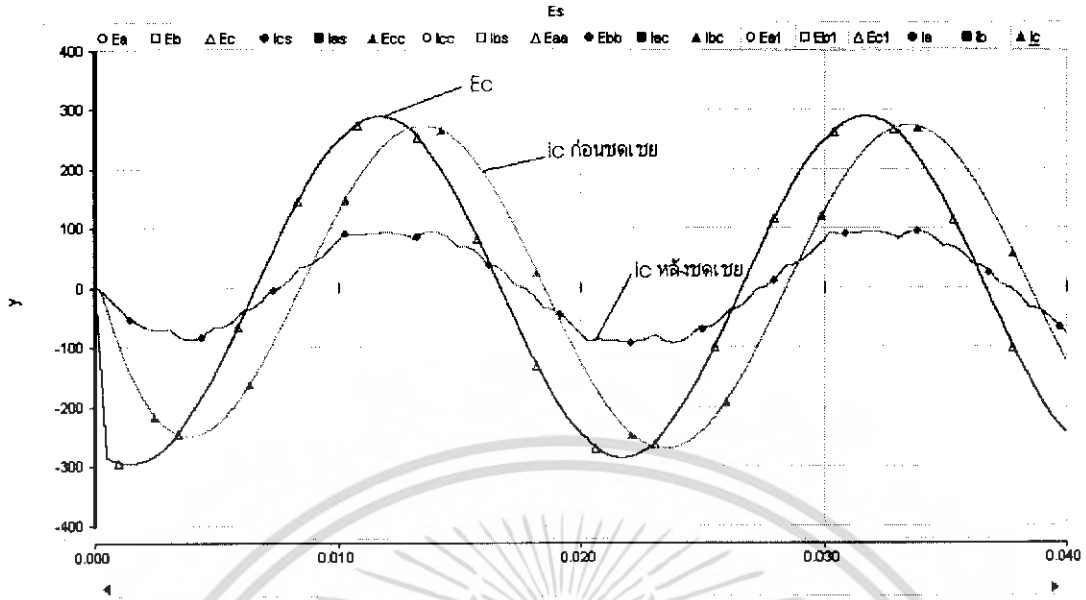


รูปที่ 4.37 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้านอกที่ของเฟส A (เพื่อความชัดเจน จึงได้มีการขยายสัญญาณกระแส)

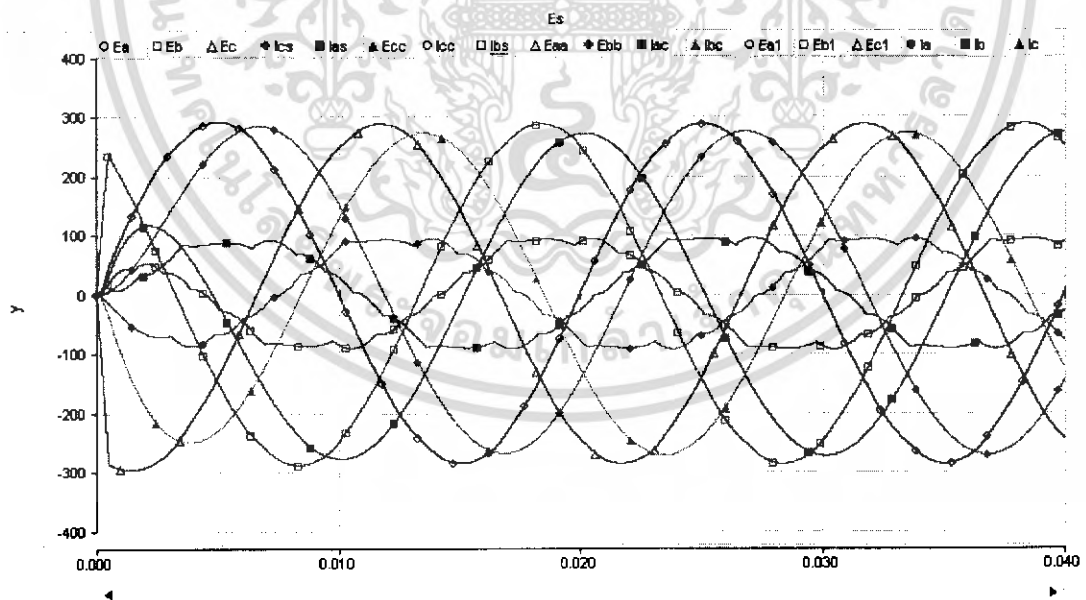


รูปที่ 4.38 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อน และหลังการชดเชยกำลังไฟฟ้านอกที่ของเฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลังการขดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของเฟส C (เพื่อความชัดเจน จึงได้มีการขยายสัญญาณกระแส)



รูปที่ 4.40 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนและหลังการขดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟของระบบสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การสร้างแรงดันจากชุดอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ

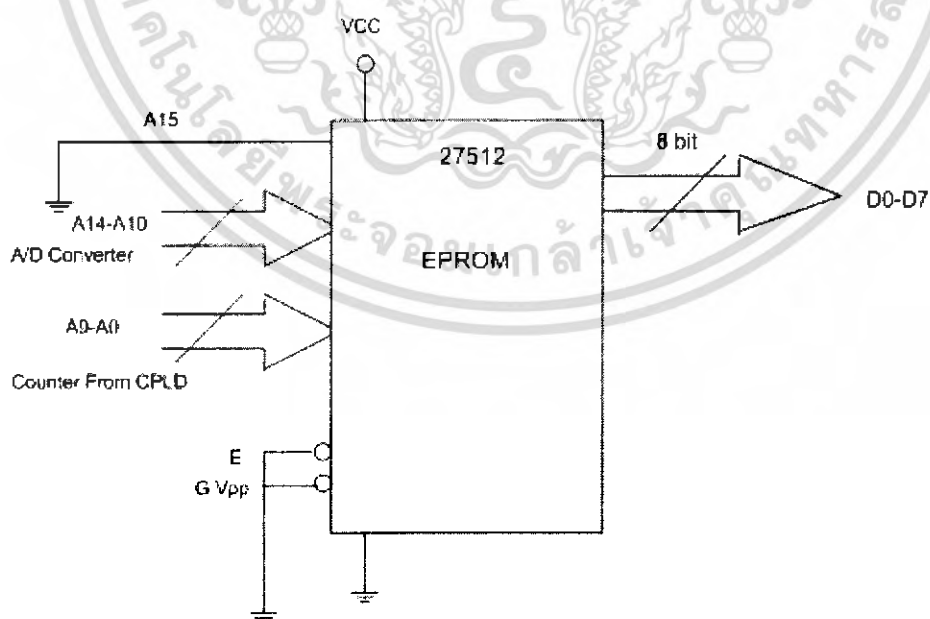
สำหรับการสร้างแรงดันจากชุดอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ จะมีส่วนของวงจรคล้ายกับการจำลองการสร้างในโปรแกรม PSCAD ซึ่งชุดอินเวอร์เตอร์จะมีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนของวงจรควบคุม ประกอบด้วย ตัวเก็บสัญญาณทริกเกท ตัวควบคุมเฟสแรงดัน ตัวควบคุมการปรับขนาดแรงดัน วงจรประวิงเวลา และส่วนที่สองคือ ส่วนของวงจรกำลัง ประกอบด้วย ชุดอินเวอร์เตอร์และชุดสร้างแรงดันกระแสตรงที่จะต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์แต่ละชั้น

5.1 วงจรควบคุม (Control Circuit)

5.1.1 EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory)

EPROM เป็นหน่วยความจำชนิดหนึ่งที่สามารถโปรแกรมได้โดยใช้อุปกรณ์ที่สร้างพัลส์ที่มีความต่างศักย์สูงสร้างสัญญาณข้อมูลและสร้างแอดเดรสให้กับ EPROM ข้อมูลนี้จะคงอยู่จนกว่าจะป้อนแสงอัลตราไวโอเล็ตความเข้มสูง ลงบนหน้าต่างควอตซ์ของไอซี ข้อมูลเหล่านี้จะถูกลบหายไปบนค่าแต่ละบิตใน EPROM

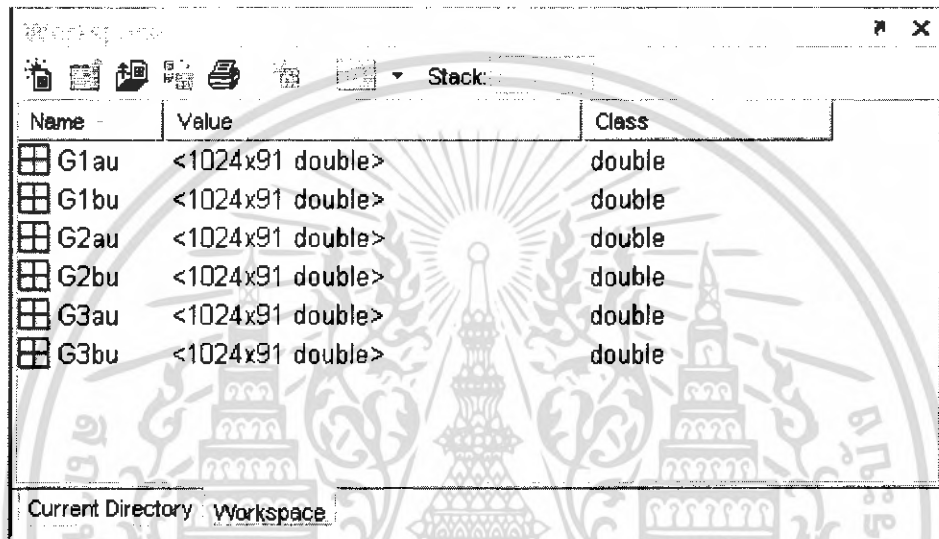
สำหรับ EPROM ที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลในการทดลองคือเบอร์ 27512 มีแอดเดรสของไอซี หน่วยความจำทั้งหมด 16 บิต ได้แก่ A0-A15 และส่วนของข้อมูลอีก 8 บิต ได้แก่ D0-D7 แสดงวงจรของ EPROM ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรของ EPROM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลใน EPROM เป็นข้อมูลที่นำค่าจากการคำนวณช่วงเวลาในการทริกเกตในโปรแกรม MATLAB ซึ่งก็คือสัญญาณ S1 และสัญญาณ S3 ของทั้ง 3 ชั้น ที่แต่ละค่าของ Modulation Index และนำสัญญาณทั้ง 6 สัญญาณที่ช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งแสดงเป็นค่าตัวเลขฐาน 2 (Binary) มาแปลงเป็นค่าตัวเลขฐาน 16 (Hexa Decimal) ที่แต่ละค่า Modulation Index เพื่อมาใช้เขียนลง EPROM โดยในตารางที่ 5.1 จะแสดงการเก็บข้อมูลใน EPROM เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของ IGBT ต่อไป



Name	Value	Class
G1au	<1024x91 double>	double
G1bu	<1024x91 double>	double
G2au	<1024x91 double>	double
G2bu	<1024x91 double>	double
G3au	<1024x91 double>	double
G3bu	<1024x91 double>	double

Current Directory: Workspace

รูปที่ 5.2 แสดงข้อมูลในช่วงเวลาในการทริกเกตที่แต่ละค่าของ Modulation Index

ตารางที่ 5.1 แสดงการเก็บข้อมูลของ EPROM

ADDRESS		DATA
A14-A10	A9-A0	
(ma=60)		
00000	0000000000	XX
00000	0000000001	XX
00000	0000000010	XX
...	...	XX
00000	1111111111	XX
(ma=61)		
00001	0000000000	XX
00001	0000000001	XX
00001	0000000010	XX
...	...	XX
00001	1111111111	XX
(ma=91)		
11111	0000000000	XX
11111	0000000001	XX
11111	0000000010	XX
...	...	XX
11111	1111111111	XX

XX คือ ค่าของข้อมูลที่เก็บใน EPROM ซึ่งเก็บข้อมูลเป็นตัวเลขฐาน 16

จากตารางที่ 5.1 แสดงค่าการเก็บข้อมูลใน EPROM ของแต่ละแอดเดรสและแต่ละแอดเดรสมี 16 บิต จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือค่าของ Modulation Index ประกอบด้วยบิตที่ 10-14 และอีกส่วนคือ ค่าของช่วงเวลา ประกอบด้วยบิตที่ 0-9

ค่าของ Modulation Index จะมีทั้งหมด 5 บิต (ทั้งหมด 32 ค่า จาก 00000 ถึง 11111 ดังนั้นการใช้งานของ EPROM จะเลือกใช้ที่ค่า Modulation Index เท่ากับ 0.69 ถึง 1.0 หรือค่า ma ตั้งแต่ 60 ถึง 91 ประกอบด้วยตารางที่ 4.1 จะสร้างแรงดันในช่วง 220 ถึง 318 โวลต์ เพราะฉะนั้นจะศึกษาการชดเชยได้เฉพาะภาวะไฟฟ้าที่เป็นอินดักทีฟ (R-L) เท่านั้น สำหรับค่าของช่วงเวลาจะได้จากโปรแกรมที่เขียนในโปรแกรม MATLAB โดยเปลี่ยนค่าของเวลา 1 คาบ จากมุม 0 ถึง 2 π เป็นค่าตัวเลขจาก 0 ถึง 1023 รวมทั้งสิ้น 1024 ค่า

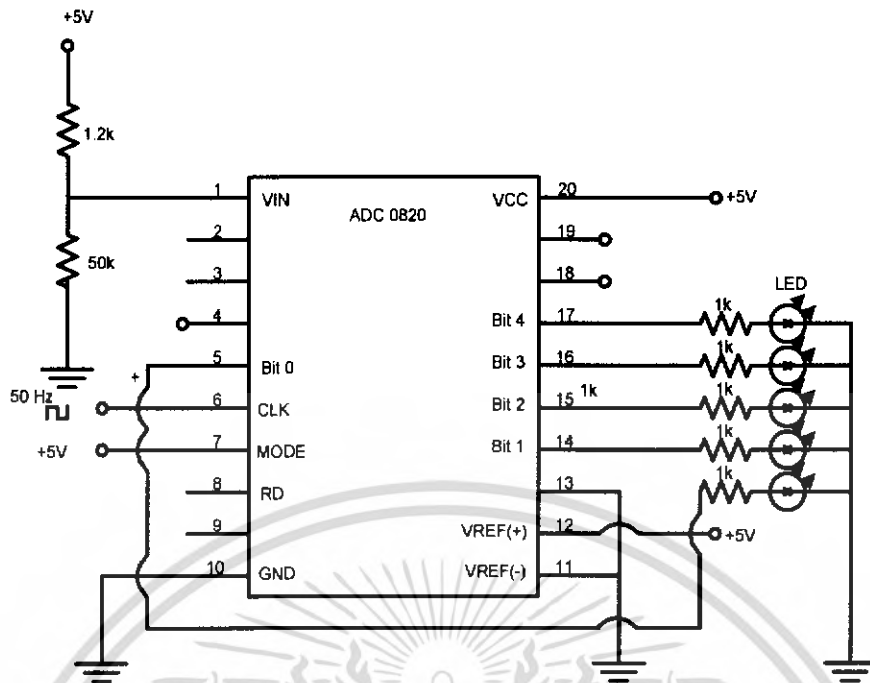
เพราะฉะนั้นค่าที่จะมาซีแอดเดรสของ EPROM จะมี 2 ส่วนคือ

บิตที่ 10-14 จะได้มาจากวงจรแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D Converter)

ใช้ในการป้อนเพื่อปรับค่า Modulation Index หรือปรับค่าแรงดัน

บิตที่ 0-9 จะได้มาจากวงจรมัลติเพล็กซ์ CPLD ใช้เพื่อชี้ค่าช่วงเวลาในการสร้างแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



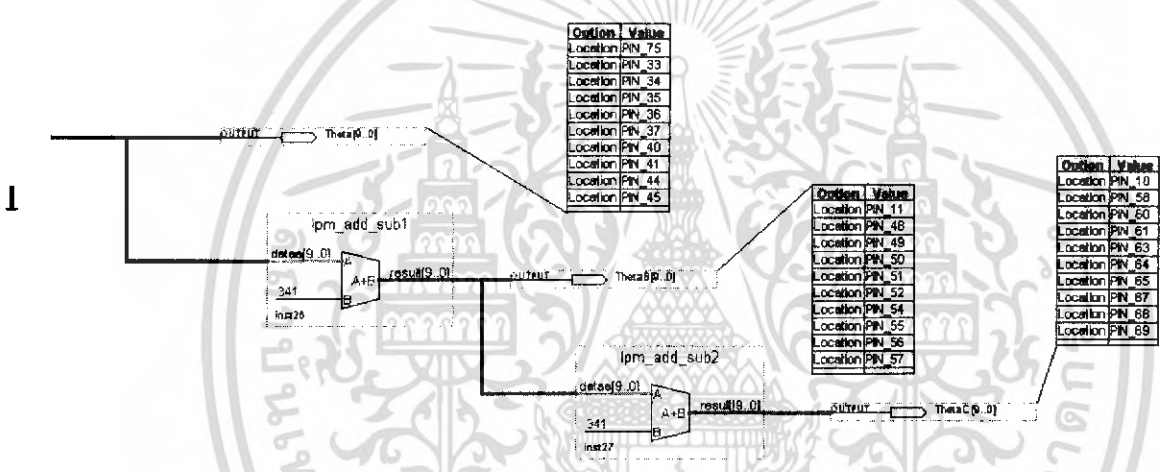
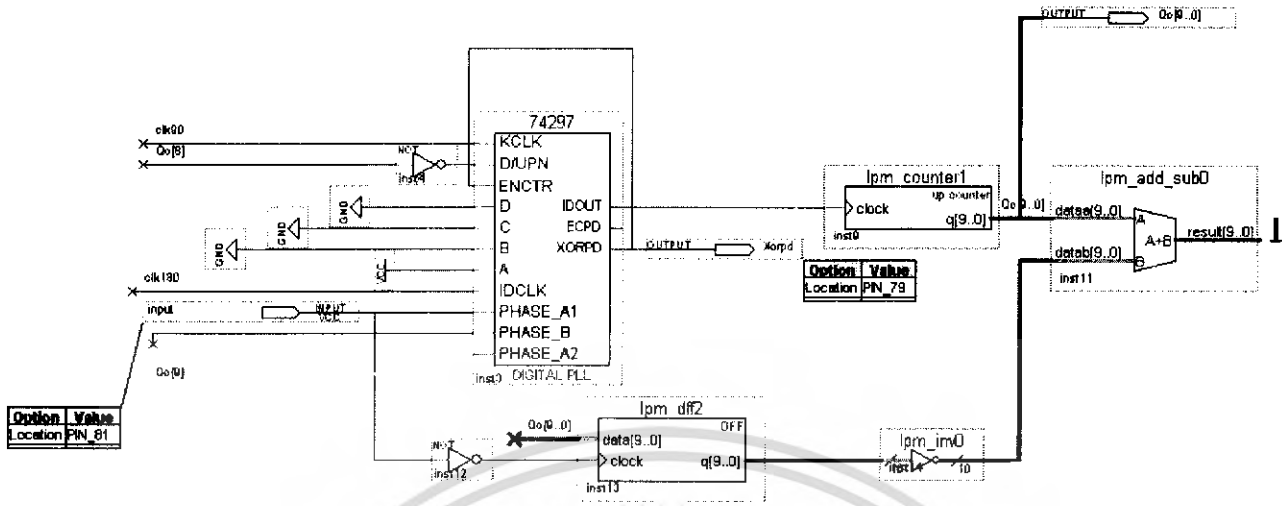
รูปที่ 5.3 แสดงวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

5.1.2 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D Converter)

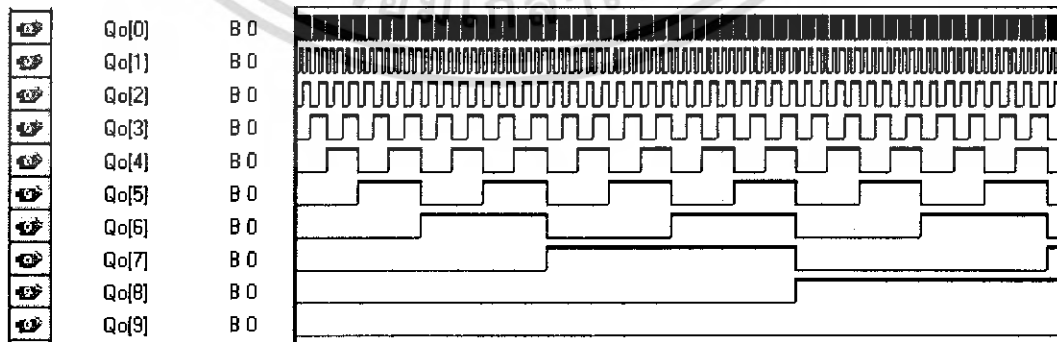
วงจร A/D Converter เป็นวงจรที่เปลี่ยนค่าสัญญาณอินพุตที่เป็นค่าแอนะล็อกซึ่งเป็นค่าที่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเพื่อให้ค่าของเอาต์พุตที่ออกเป็นค่าดิจิทัลมีวงจรดังรูปที่ 5.3 ในการทดลองจะเป็น A/D ขนาด 8 บิต และขาของอินพุตที่ป้อนเข้า EPROM เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงที่ปรับค่าแรงดันจากตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อให้ค่าเอาต์พุตที่เป็นดิจิทัลออกมาตามต้องการ ซึ่งในการใช้งานในวงจรซีแอดเดรสของ EPROM ในการใช้งานจริงมีทั้งหมด 5 บิต (A10-A14) คือจาก 00000 ถึง 11111 รวม 32 ค่า

5.1.3 วงจรนับ (Counter) ที่ช่วงเวลาให้กับ EPROM

เป็นวงจรที่ใช้งานเพื่อนับค่าสำหรับซีแอดเดรสจำนวน 10 บิต ของ EPROM (A0-A9) และได้มีการเพิ่มวงจร phase lock loop เข้าไปเพื่อใช้สำหรับการ synchronize กับแรงดันที่สร้างจากชุดอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.4 แสดงการต่อวงจรนับและPLLบนบอร์ด CPLD



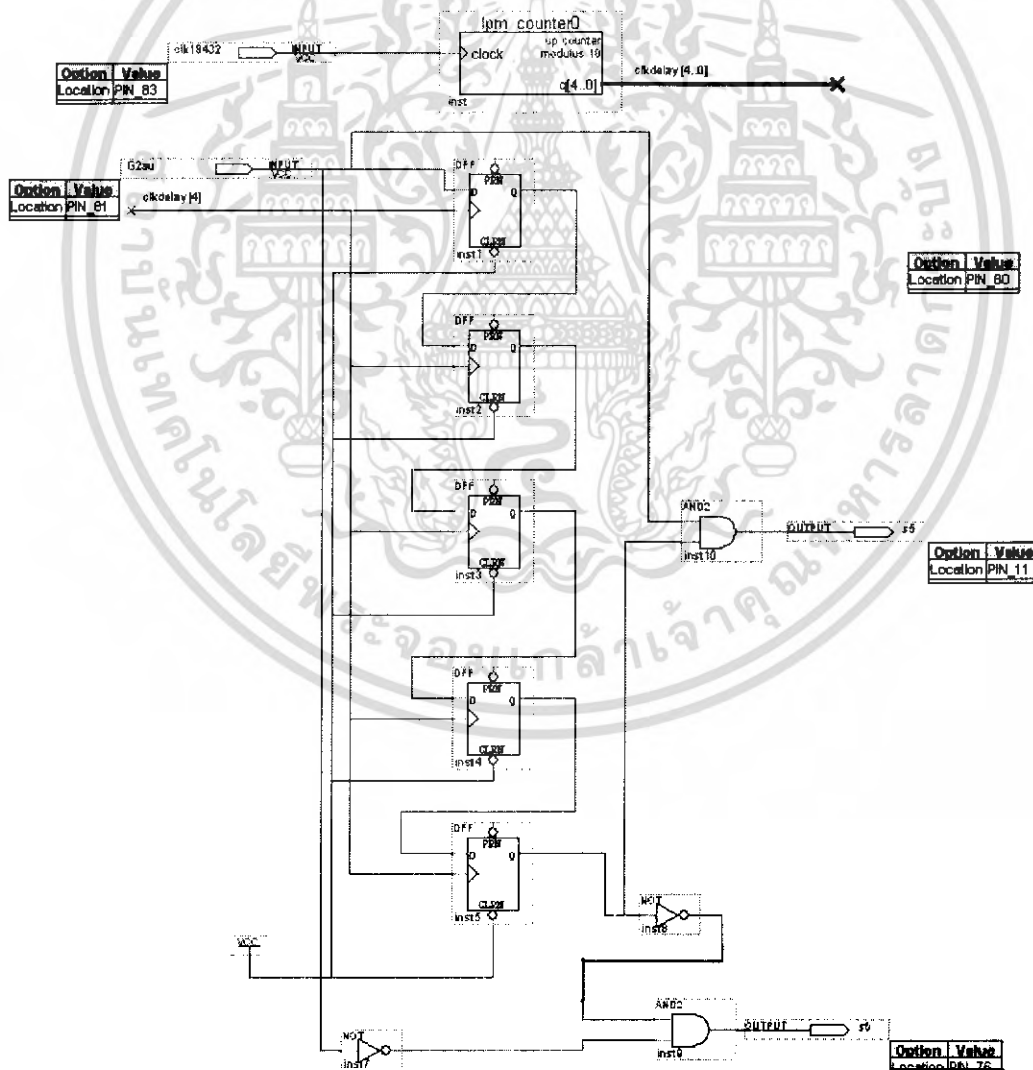
รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะของสัญญาณบนบอร์ด CPLD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 วงจรประวิงเวลา (Dead time)

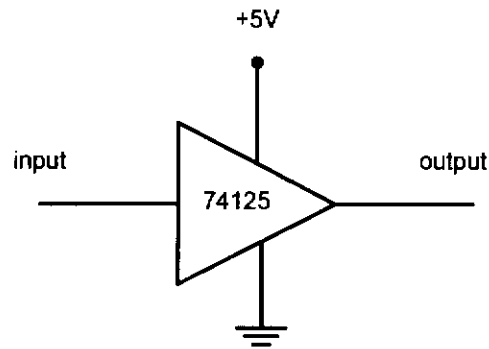
เมื่อมีอินพุตป้อนให้กับแอดเดรสของ EPROM ครบทั้ง 16 บิตก็จะมีสัญญาณที่ออกจาก EPROM และจะนำสัญญาณเหล่านี้ไปสร้างสัญญาณ S1, S2, S3 และ S4 ซึ่งจากการวิเคราะห์ การสร้างแรงดันแต่ละขั้นที่แต่ละช่วงเวลาจะพบว่าที่เวลาใดๆ สัญญาณ S1 กับ S2 และ S3 กับ S4 จะทำงานพร้อมกันไม่ได้เพราะจะเกิดการลัดวงจรที่ตัวเก็บประจุ เพราะฉะนั้นช่วงที่มีความเสี่ยงมากคือช่วงที่สัญญาณสั่งให้สวิตช์แต่ละคู่เปลี่ยนแปลงสถานะการทำงาน ซึ่งอาจมีช่วงเวลา ที่สวิตช์เกิดการปิดวงจรทั้งคู่อาจทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น

ดังนั้นจึงต้องสร้างวงจรประวิงเวลาให้กับสัญญาณแต่ละคู่เพื่อให้ช่วงของสัญญาณไม่มีสถานะที่ปิดวงจรพร้อมกัน โดยเฉพาะในช่วงของการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณ กล่าวคือ สวิตช์ที่ตัวที่ปิดวงจรอยู่ต้องรอให้สวิตช์อีกตัวที่ปิดวงจรอยู่เปิดวงจรออกเสียก่อนแล้วจึงค่อยปิด วงจร ช่วงเวลานี้เรียกว่าช่วงประวิงเวลาหรือ Dead time โดยสำหรับการทดลองจะใช้ช่วงประวิง เวลาเท่ากับ 4 μ s



รูปที่ 5.6 แสดงการต่อวงจรประวิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงวงจรบัฟเฟอร์

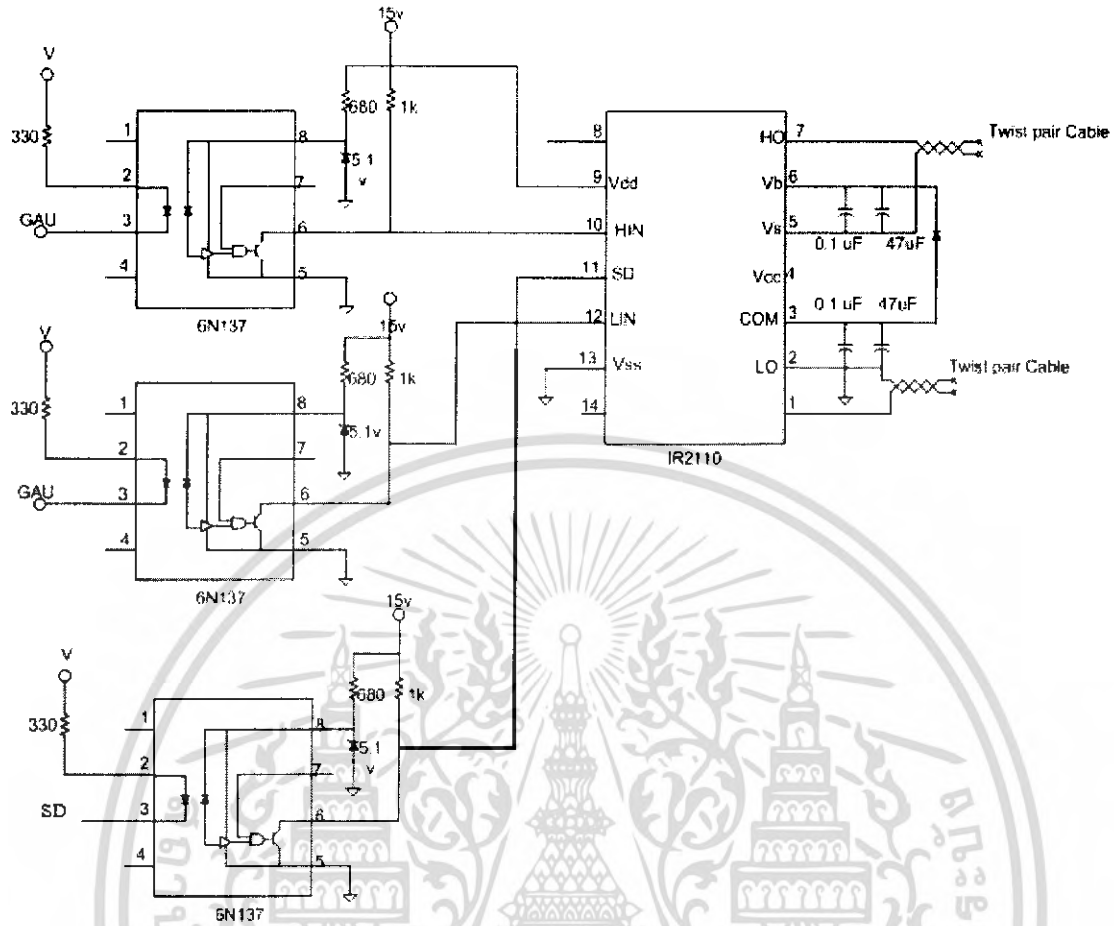
5.1.5 วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer)

เมื่อได้สัญญาณที่จะนำไปเข้าวงจรขับเกทซึ่งได้ผ่านวงจรประวิงเวลามาแล้ว ได้สัญญาณ S1-S4 ของแต่ละชั้นในแต่ละเฟสออกมาจากบอร์ด CPLD ต้องนำสัญญาณที่สร้างนี้เข้าวงจรบัฟเฟอร์เพื่อให้สัญญาณที่จะไปเข้าวงจรขับเกทมีรูปสัญญาณเป็น 0 และ +5 โวลต์ เนื่องจากบางครั้งสัญญาณที่ออกมาจากบอร์ด CPLD จะมีค่าไม่ถึง +5 โวลต์ เพราะฉะนั้นวงจรนี้จึงเป็นวงจรยกระดับแรงดันให้ได้ตามต้องการ ซึ่งมีวงจรดังรูปที่ 5.7

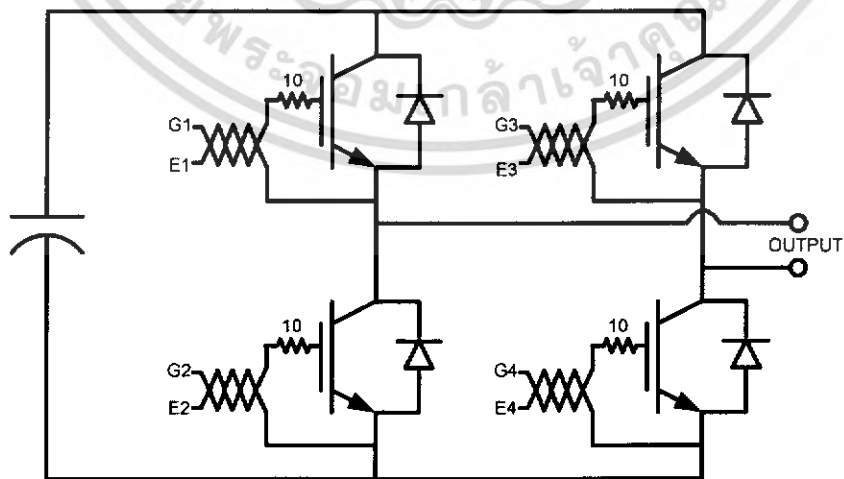
5.2 วงจรกำลัง (Power Circuit)

5.2.1 วงจรขับเกท

วงจรขับเกทเป็นวงจรที่จะสร้างสัญญาณเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของ IGBT ตามค่าสัญญาณที่สร้างจากบอร์ด CPLD ซึ่งสัญญาณที่ออกจากวงจรขับเกทจะมีขนาดของแรงดัน 0 และ +15 โวลต์ วงจรขับเกทมีวงจรดังรูปที่ 5.8 ซึ่งจะประกอบด้วยไอซี 6N137 จะเป็นตัวแยกกราวด์ของวงจรควบคุมกับวงจรกำลังโดยด้านวงจรควบคุมจะมีแรงดัน 5 โวลต์ และด้านวงจรกำลังจะมีแรงดัน 15 โวลต์ และ IR2110 จะเป็นตัวสร้างสัญญาณที่จะไปทริก IGBT โดยการทำงานของ IR2110 หนึ่งตัว จะใช้สร้างสัญญาณให้แก่ IGBT กิ่งเดียวกันของฟูลบริดจ์ ซึ่ง IGBT ทั้ง 2 ตัวจะต่อคร่อมแรงดันกระแสตรงอยู่ดังรูปที่ 5.9 จะได้ว่า G1 และ G2 จะสร้างจาก IR2110 ตัวเดียวกัน และ G3 และ G4 ก็สร้างจาก IR2110 ตัวเดียวกัน โดยสำหรับชุดทดลองอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับแบบสามเฟสนี้ จะใช้วงจรขับเกททั้งหมด 18 วงจร แบ่งเป็นเฟสละ 6 วงจร ซึ่งในแต่ละวงจรก็จะมีวงจรรอง Protection เพื่อป้องกันกระแสเกินรวมอยู่ด้วย



รูปที่ 5.8 แสดงวงจรขับเคลื่อนที่ประกอบด้วย 6N137 และ IR2110 และวงจร Protection

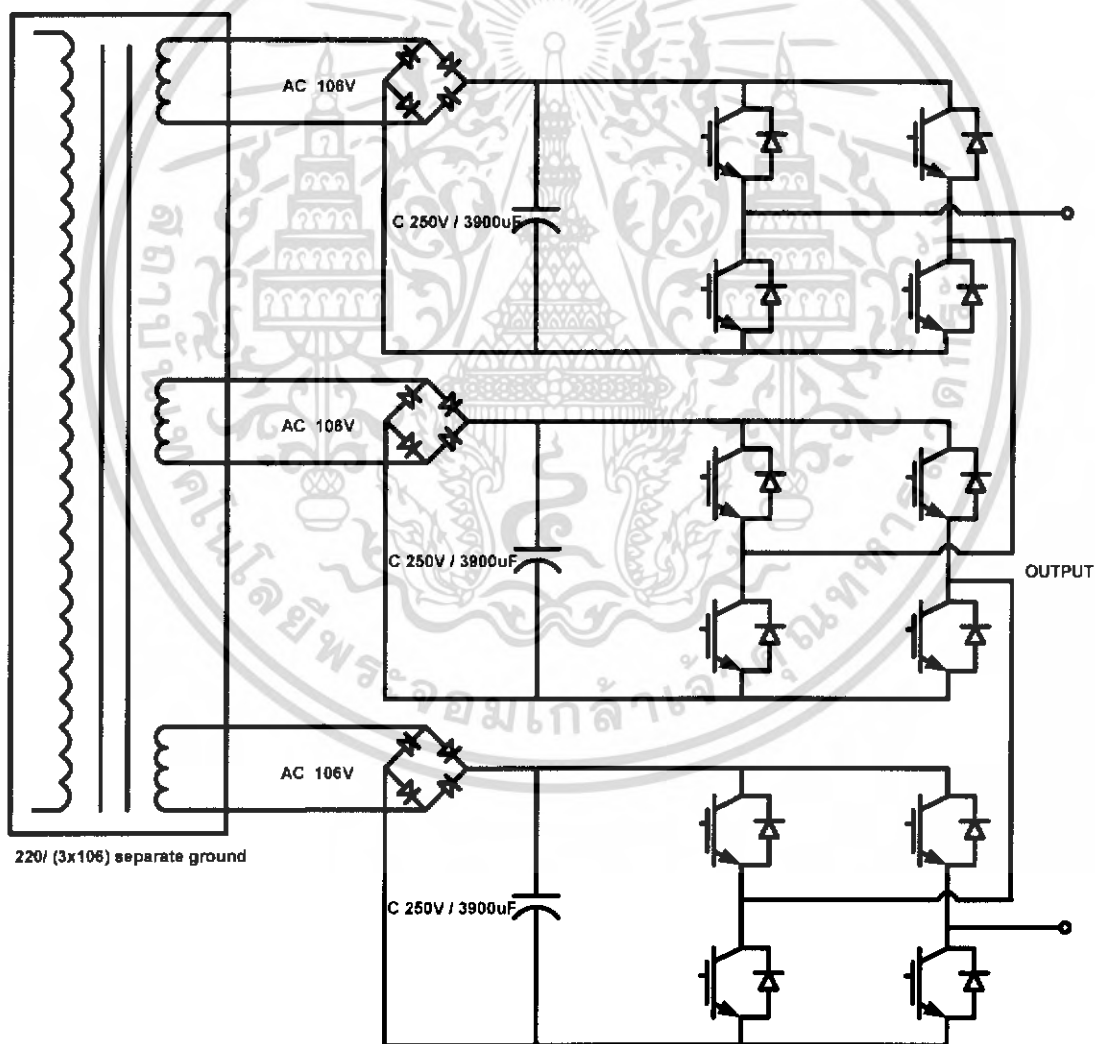


รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณขับเคลื่อนที่ต่อกับฟูลบริดจ์ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ

อินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับเป็นวงจรการสร้างแรงดันกระแสสลับจากค่าแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้กับวงจรฟูลบริดจ์ โดยวงจรฟูลบริดจ์ในแต่ละชั้นของแต่ละเฟสจะนำค่าแรงดันของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์มาคาสเคดกันเพื่อให้แรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับมีลักษณะสัญญาณใกล้เคียงสัญญาณไซน์ โดยแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์แต่ละชั้นนั้นจะได้มาจากการนำแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์จ่ายเข้าหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิมีแรงดัน 106 โวลต์จำนวน 3 ชุดต่อหนึ่งเฟส แยกกราวด์เข้าวงจรบริดจ์เรกติไฟร์เป็นแรงดันกระแสตรง 150 โวลต์และต่อกรอมเข้ากับตัวเก็บประจุขนาด 3900 μ F 250 โวลต์ และต่อฟูลบริดจ์ IGBT ทั้ง 3 ชั้น ฉะนั้นในระบบสามเฟสจึงต้องใช้ชุดสร้างแรงดันกระแสตรงทั้งหมด 3 ชุดจ่ายให้แต่ละเฟส



รูปที่ 5.10 แสดงวงจรของอินเวอร์เตอร์และการสร้างแรงดันกระแสตรงให้กับฟูลบริดจ์ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

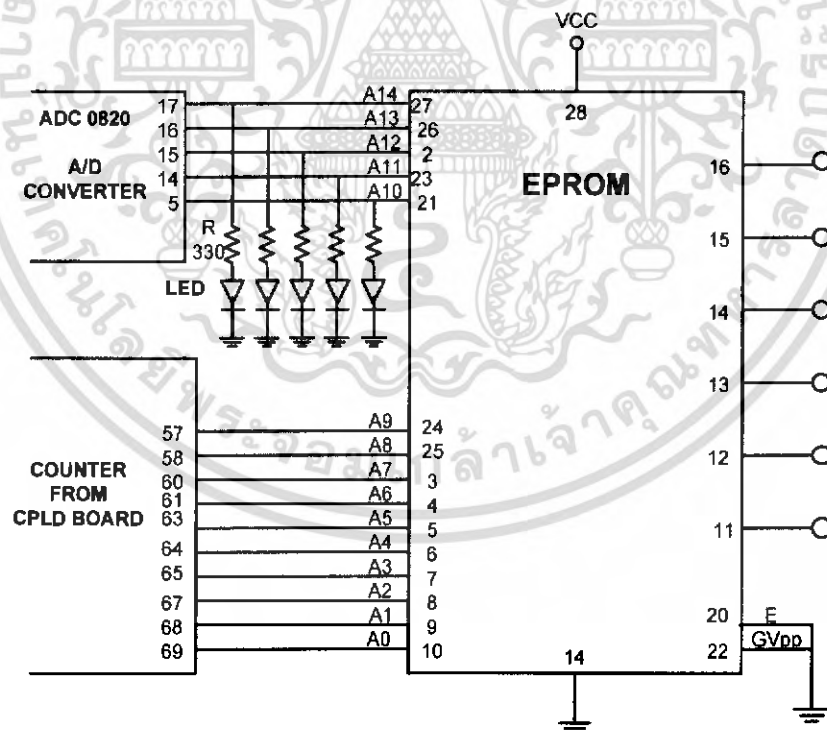
บทที่ 6

ผลการทดลองจากชุดสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ

6.1 ลำดับขั้นตอนการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ

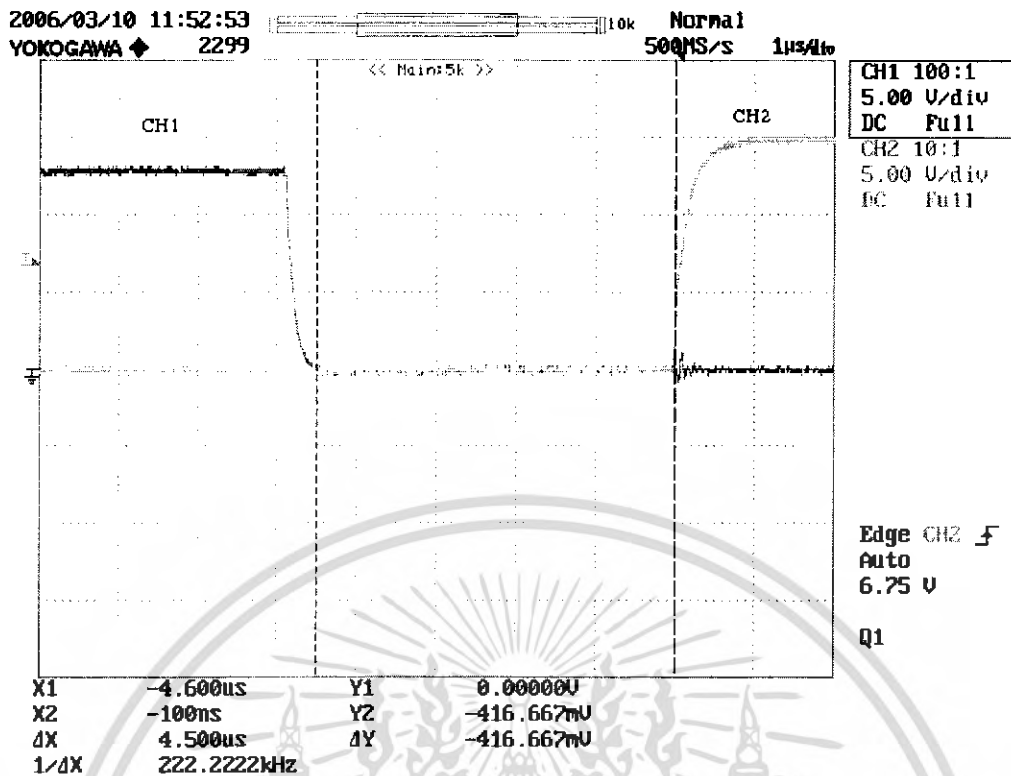
1) ป้อนอินพุตจากวงจร A/D Converter การปรับค่าอินพุตเป็นการปรับขนาดของแรงดันที่สร้างขึ้นจากอินเวอร์เตอร์โดยป้อนค่าให้กับ EPROM ทั้งหมด 5 บิต คือแอดเดรสที่ A10 ถึง A14 ก็คือจะสร้างแรงดันได้ทั้งหมด 32 ค่า ซึ่งจะแสดงได้โดยหลอด LED 5 หลอด ขณะเดียวกันตัวชี้ซึ่งเวลาจะชี้แอดเดรสอีก 10 บิต คือ A0 ถึง A9 ซึ่งสร้างมาจากวงจรนับบนบอร์ด CPLD และแสดงการป้อนอินพุตแก่ EPROM ทั้ง 16 บิต ได้ดังรูปที่ 6.1 โดยเป็นการปรับค่าอินพุตของทั้งสามเฟส

2) เมื่อป้อนอินพุตที่แอดเดรสให้แก่ EPROM แล้วจะมีสัญญาณเอาต์พุตออกมาจาก EPROM ทั้งสิ้น 6 สัญญาณในแต่ละเฟสคือ สัญญาณ S1 และ S3 ในแต่ละชั้น เพราะฉะนั้นในระบบสามเฟสจึงมีสัญญาณออกมาทั้งสิ้น 18 สัญญาณ โดยแต่ละเฟสนั้นจะมุ่มต่างกัน 120 องศา



รูปที่ 6.1 แสดงวงจรที่แอดเดรสและเอาต์พุตของ EPROM

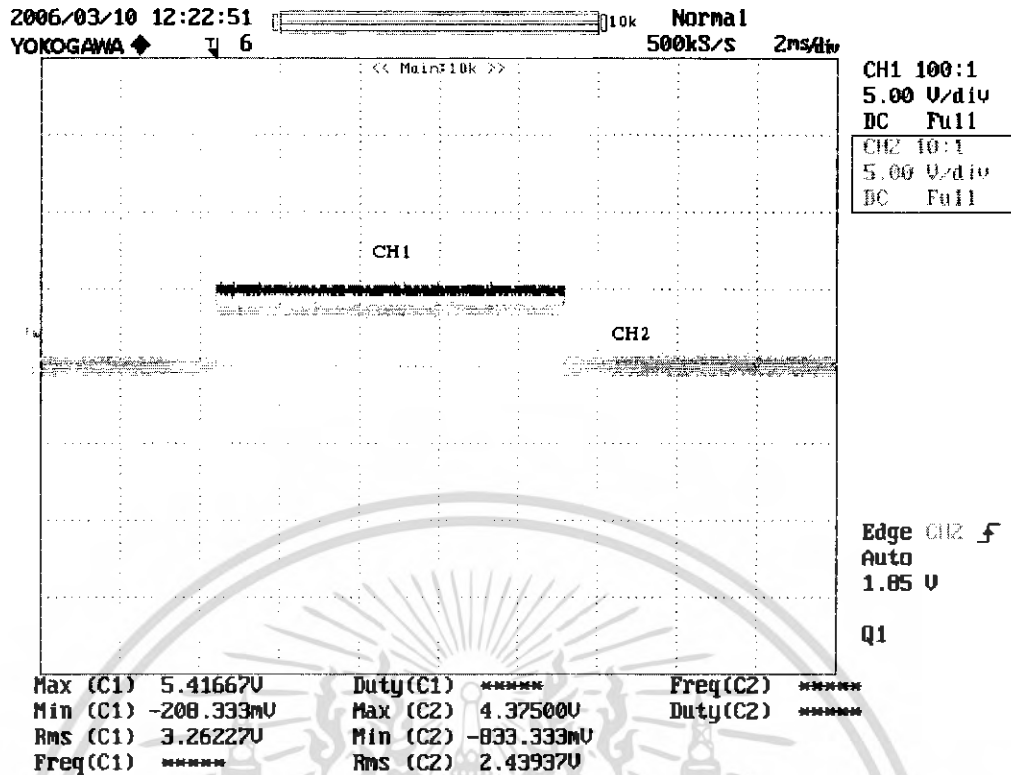
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 แสดงช่วงสัญญาณ Dead time ของ S1 และ S2

3) เมื่อสัญญาณ S1 และ S3 ออกจาก EPROM ก็ต้องนำสัญญาณทั้งสองเข้าสู่วงจรประวิงเวลาหรือ Dead time และจะได้สัญญาณ S2 และ S4 ออกมาจากวงจรนี้ด้วย ซึ่งสัญญาณ S2 ก็จะมีรูปสัญญาณตรงข้ามกับสัญญาณของ S1 และสัญญาณ S4 ก็จะมีรูปสัญญาณตรงข้ามกับสัญญาณ S3 ซึ่งสัญญาณแต่ละคู่ก็จะมีช่วงประวิงเวลาประมาณ 4µs และมีช่วงประวิงเวลาคงทั้งสามเฟส โดยช่วงสัญญาณ Dead time ของ S1 และ S2 แสดงดังรูปที่ 6.2

4) เมื่อได้สัญญาณที่ผ่านวงจรประวิงเวลาแล้วจะมีสัญญาณทั้งหมด 12 สัญญาณในแต่ละเฟส ดังนั้นรวมทั้งสามเฟสแล้วจะมีสัญญาณออกมา 36 สัญญาณ คือ S1, S2, S3 และ S4 ในแต่ละชั้นของแต่ละเฟสที่ออกจากบอร์ด CPLD และหลังจากนั้นจะนำสัญญาณทั้งหมดเข้าวงจรบัฟเฟอร์ทำให้สัญญาณมีระดับแรงดันเป็น +5 โวลต์และ 0 โวลต์ ซึ่งมีรูปสัญญาณทั้งก่อนและหลังเข้าวงจรบัฟเฟอร์แสดงดังรูปที่ 6.3 แล้วจึงส่งสัญญาณต่อไปยังวงจรขับเกทต่อไป



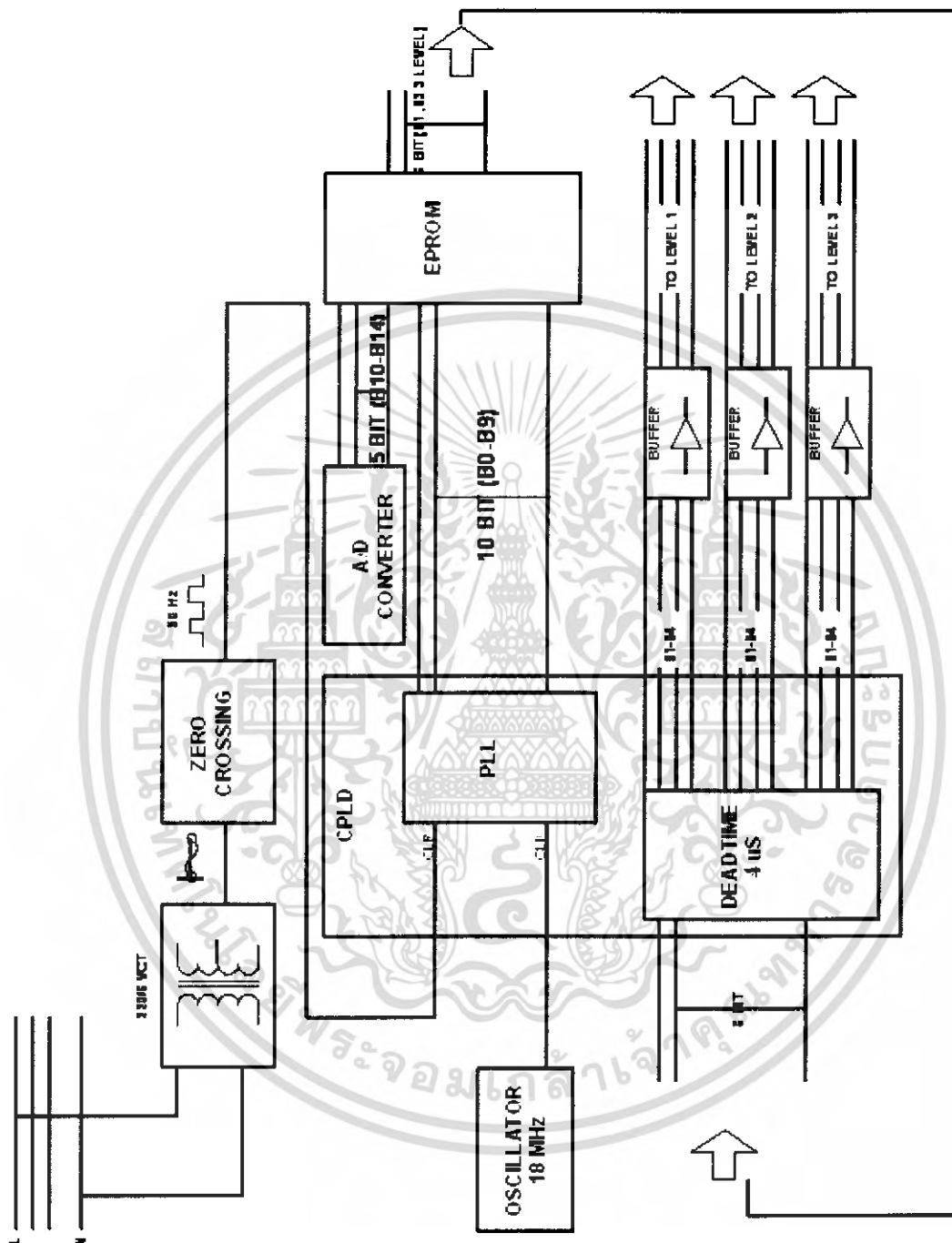
รูปที่ 6.3 แสดงสัญญาณขณะก่อนและหลังเข้าสู่วงจรมอเตอร์

CH2 เป็นสัญญาณก่อนเข้าวงจรมอเตอร์

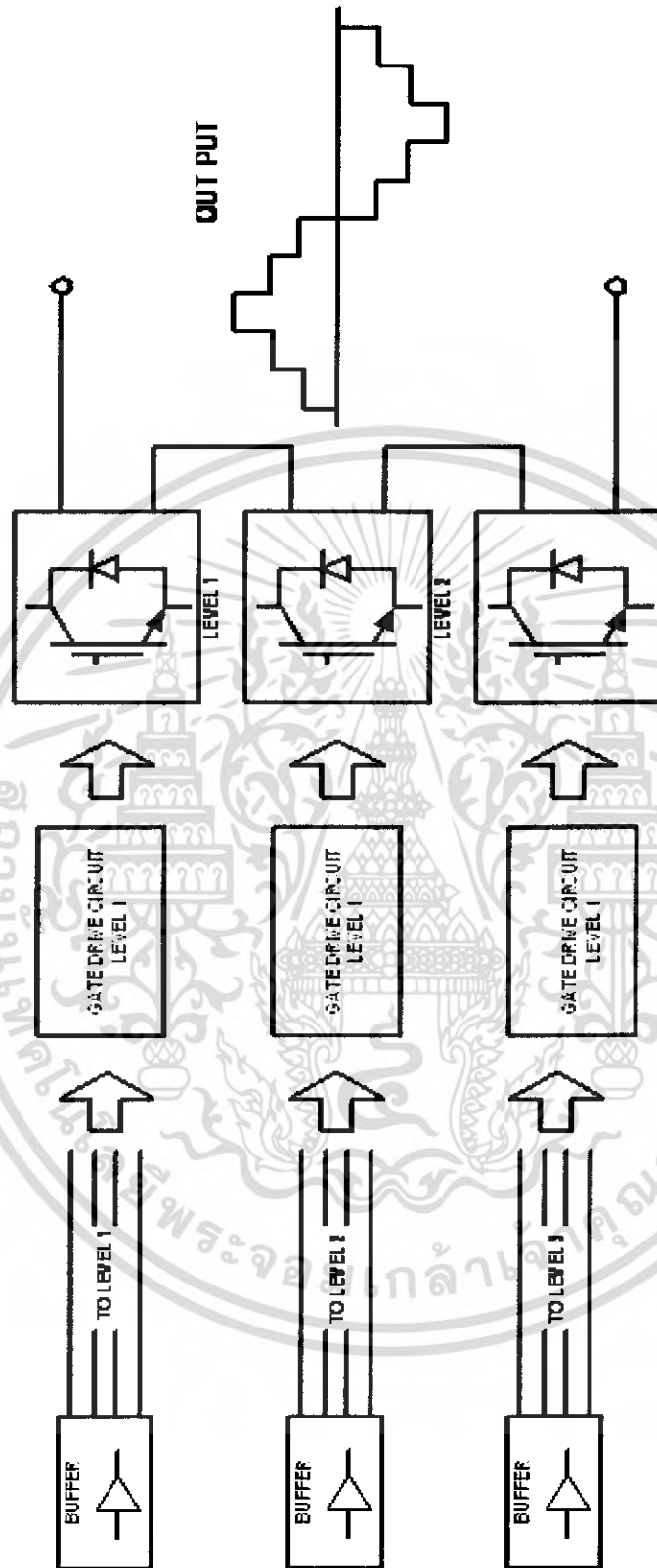
CH1 เป็นสัญญาณหลังเข้าวงจรมอเตอร์

5) วงจรขับเกทจะเป็นวงจรสร้างแรงดัน 15 โวลต์ เพื่อไปทริก IGBT ตามสัญญาณแรงดัน 5 โวลต์ที่ผ่านวงจรมอเตอร์มา วงจรขับเกทจะมีวงจรการทำงานแยกเป็นแต่ละขาของฟูลบริดจ์ซึ่งจะเป็นคู่ของสัญญาณเช่น S1 กับ S2 และ S3 กับ S4 โดยสัญญาณที่ออกมาจากวงจรมอเตอร์จะออกมาสัญญาณละ 2 เส้นโดยจะต่อกับขา G และ E ของ IGBT ซึ่งในขณะที่ IGBT แต่ละตัวทำงานหรือปิดวงจรมอเตอร์ G และ E จะมีความต่างศักย์เท่ากับ 15 โวลต์และในขณะที่ IGBT แต่ละตัวเปิดวงจรมอเตอร์ทั้งสองจะมีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0 โวลต์

6) เมื่อมีสัญญาณทริกเกทให้กับขา G และ E ของ IGBT แต่ละตัวแล้ว วงจรสร้างแรงดันจากชุดอินเวอร์เตอร์แต่ละชั้นก็จะสร้างแรงดันออกมาและเมื่อมีการต่ออินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 ชั้นคาสเคดกัน ก็จะได้แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับตามต้องการ โดยที่ทุกเฟสก็จะได้แรงดันในลักษณะ 7 ระดับเช่นเดียวกัน ต่างกันตรงที่มุมเฟสนั้นจะต่างกัน 120 องศา



รูปที่ 6.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุมการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



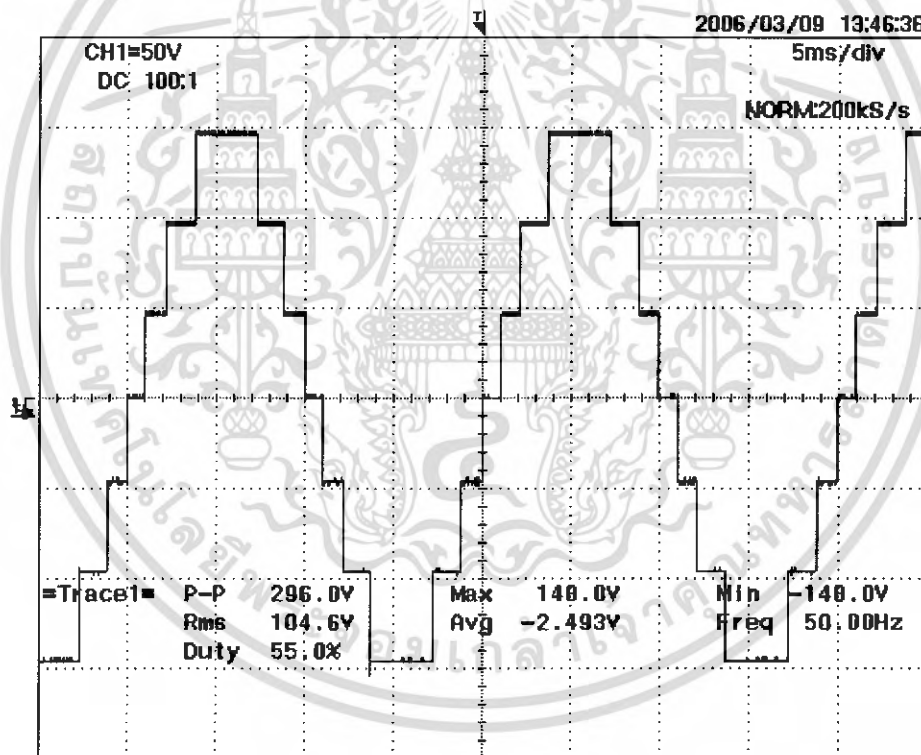
รูปที่ 6.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรกำลังการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การสร้างแรงดันจากอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ

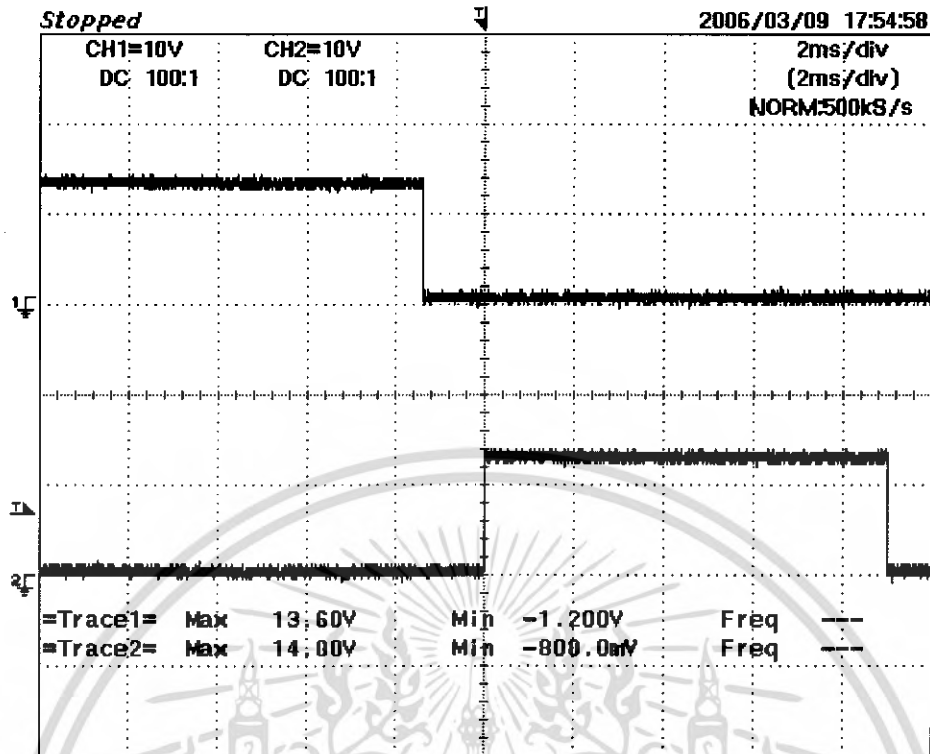
การสร้างแรงดันจากอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ ขนาดของแรงดันจะขึ้นอยู่กับค่าของอินพุทที่ได้จากการปรับจากวงจร A/D Converter ซึ่งเป็นการปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้และนำค่าอินพุทที่ได้นี้ไปสร้างขนาดแรงดันตามต้องการ การสร้างแรงดันจากชุดอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับแบบสามเฟส นั้น แต่ละเฟสจะประกอบด้วยฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 3 ชั้น นำมาต่อคาสเคดกัน เมื่อนำแรงดันมารวมกันจะได้แรงดันในลักษณะคล้ายสัญญาณไซน์ดังรูปที่ 6.6 แสดงแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับที่ค่า Modulation Index เท่ากับ 1.0 ที่หนึ่งเฟส โดยทั้งสามเฟสจะได้ลักษณะแรงดันเหมือนกันเพียงแต่มีมุมเฟสต่างกัน 120 องศา

แรงดันในรูปที่ 6.6 เกิดจากแรงดันของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 ชั้นมารวมกันและแรงดันแต่ละชั้นจะเกิดจากสัญญาณ S1 และ S3 ของแต่ละชั้นที่ได้มาจาก EPROM ซึ่งสัญญาณ S1 จะเป็นตัวควบคุมให้เกิดแรงดันช่วงบวก และสัญญาณ S3 จะเป็นตัวควบคุมให้เกิดแรงดันช่วงลบ

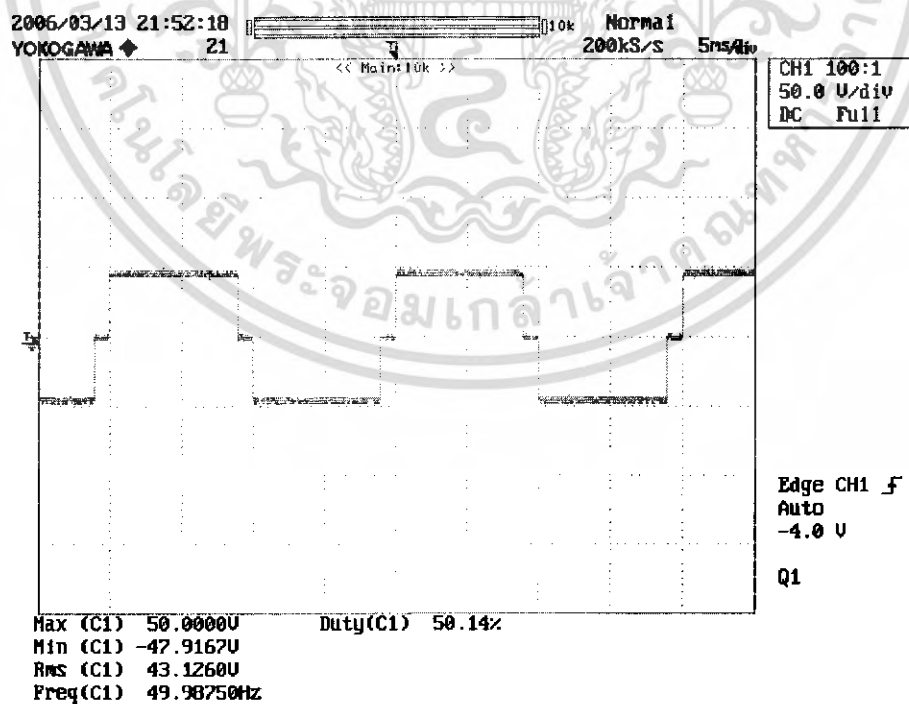


รูปที่ 6.6 แสดงแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ

ที่ค่า Modulation Index เท่ากับ 1.0

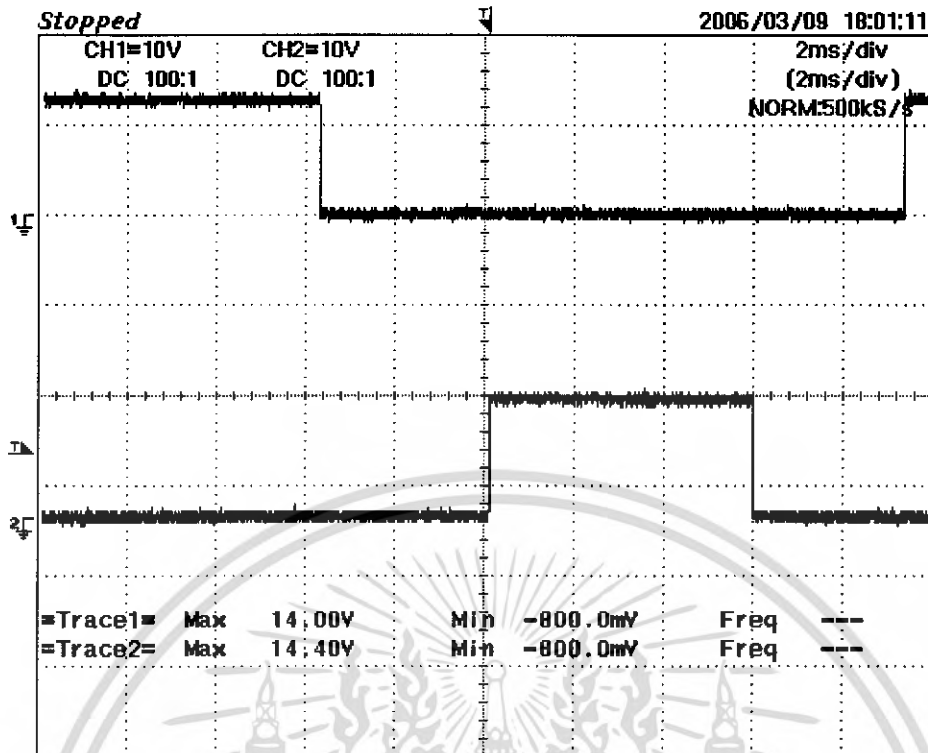


รูปที่ 6.7 แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นล่างของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

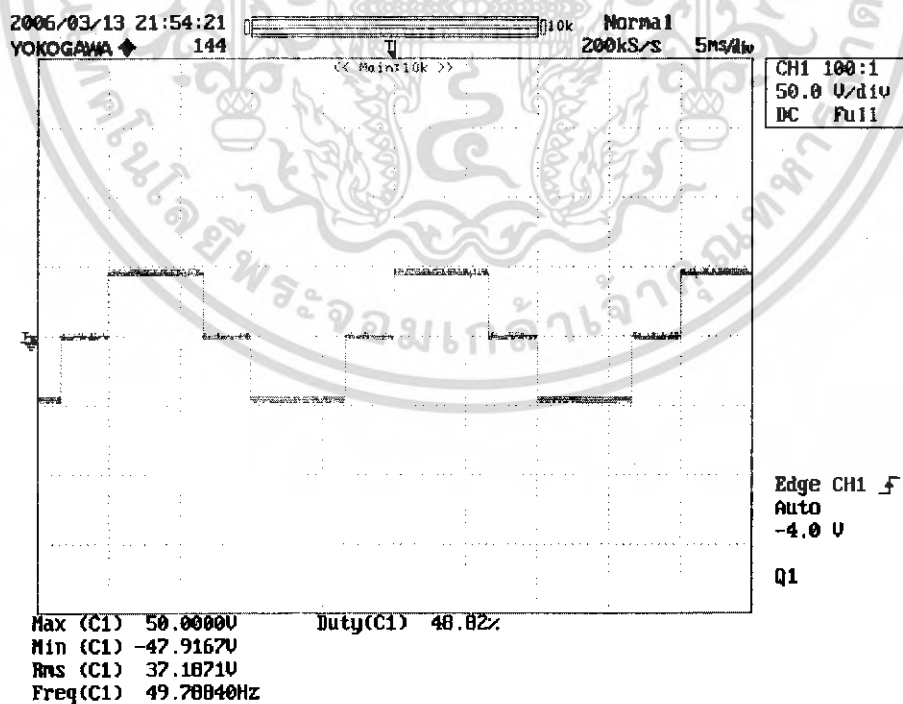


รูปที่ 6.8 แสดงแรงดันชั้นล่างของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

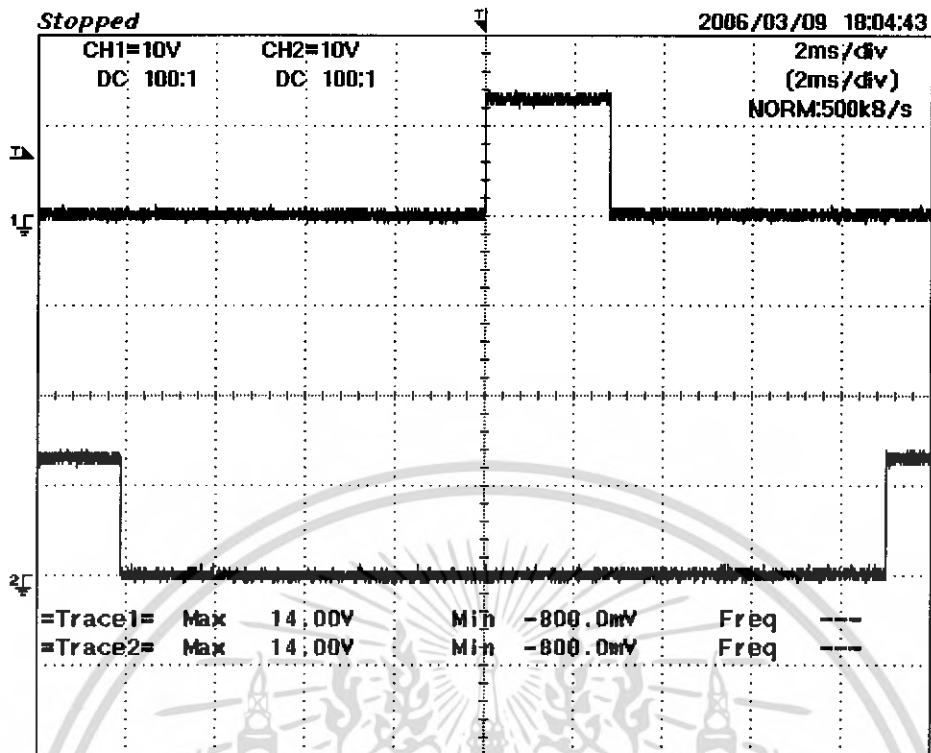


รูปที่ 6.9 แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นกลางของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

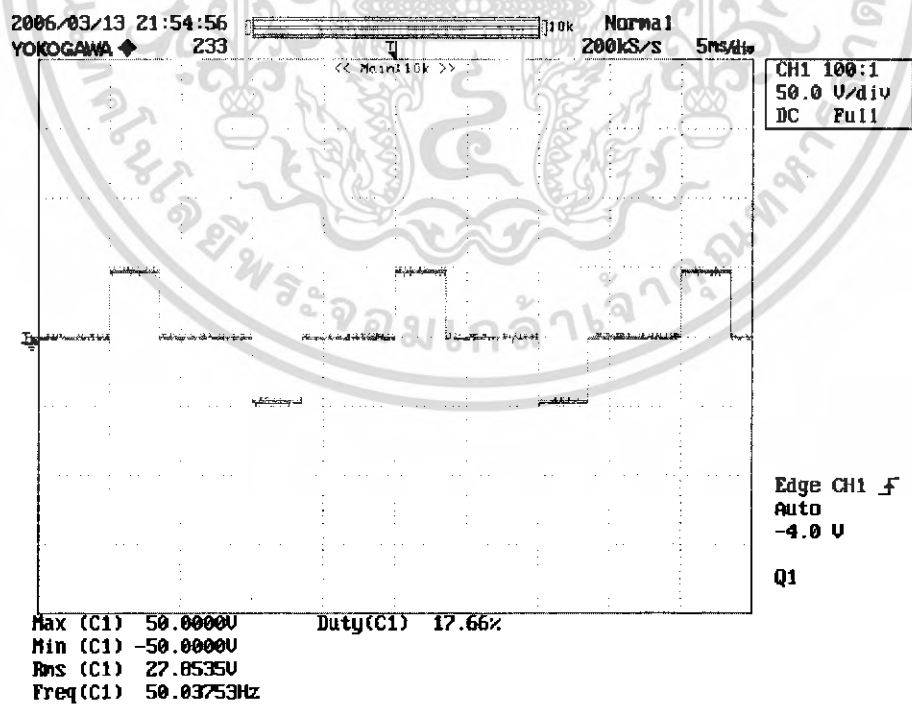


รูปที่ 6.10 แสดงแรงดันชั้นกลางของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

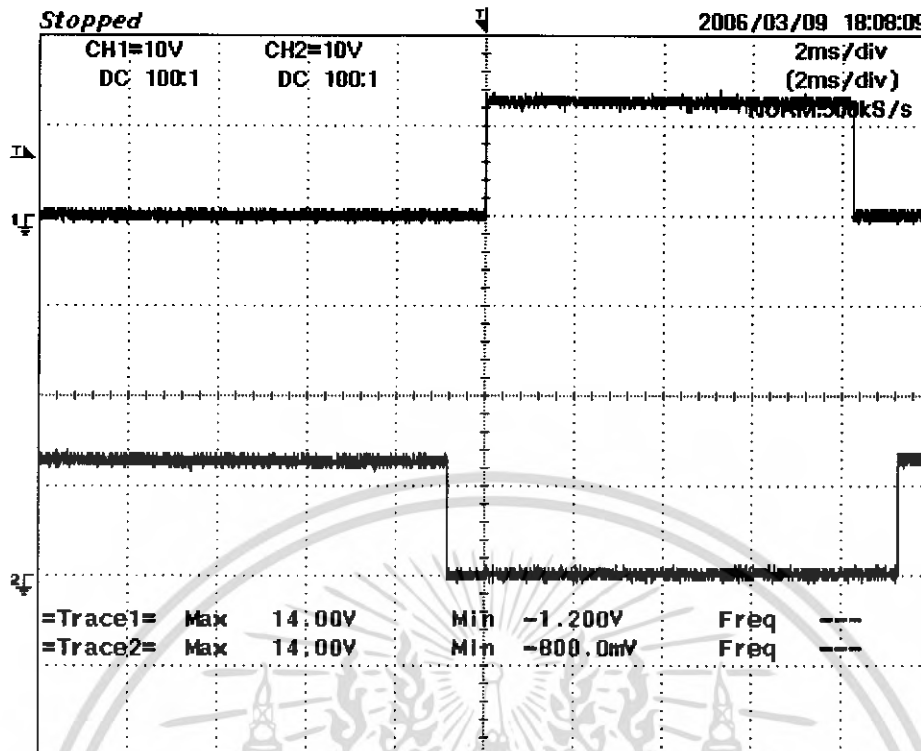


รูปที่ 6.11 แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ขับของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

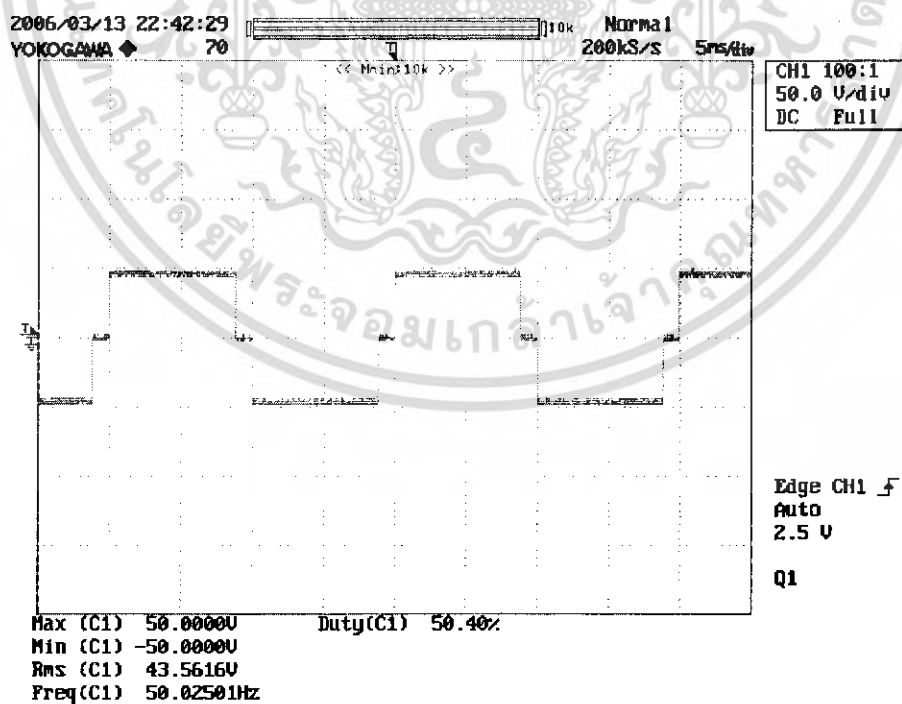


รูปที่ 6.12 แสดงแรงดันขับของเฟส A ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

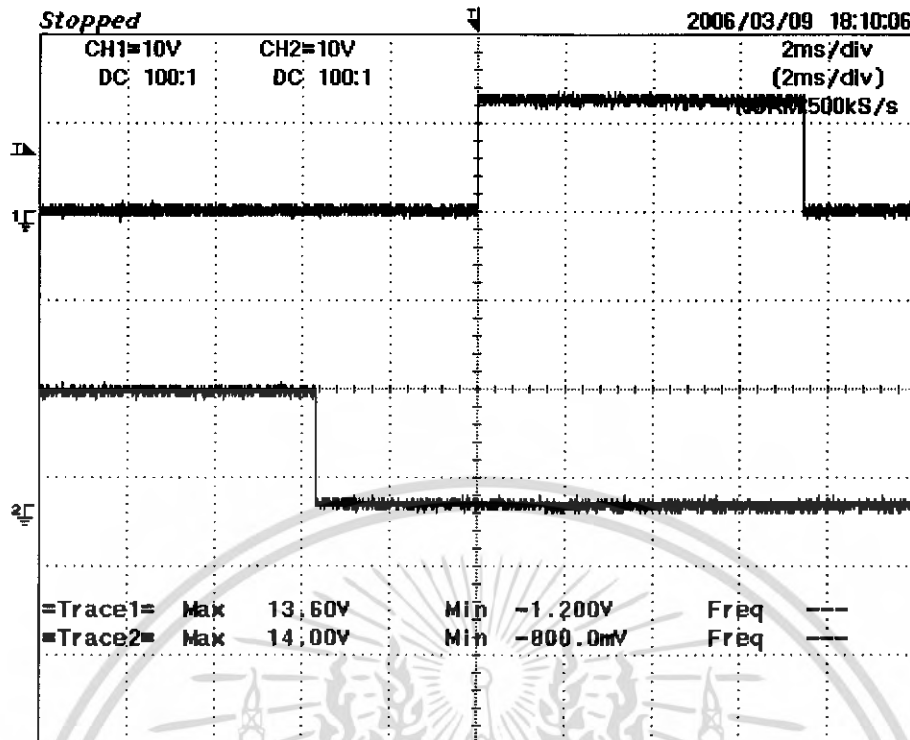


รูปที่ 6.13 แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นล่างของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

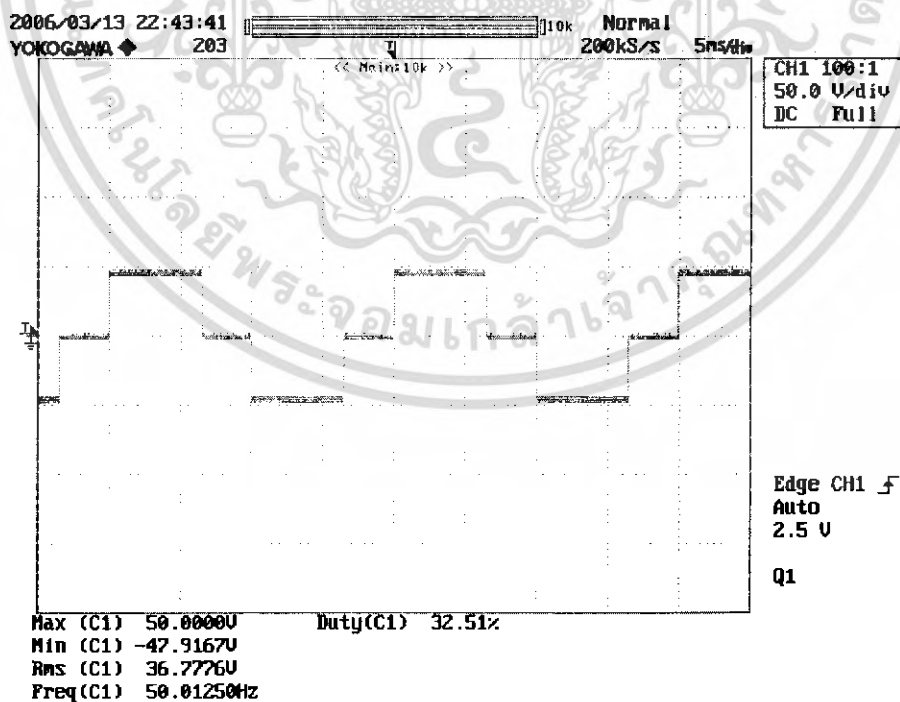


รูปที่ 6.14 แสดงแรงดันชั้นล่างของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

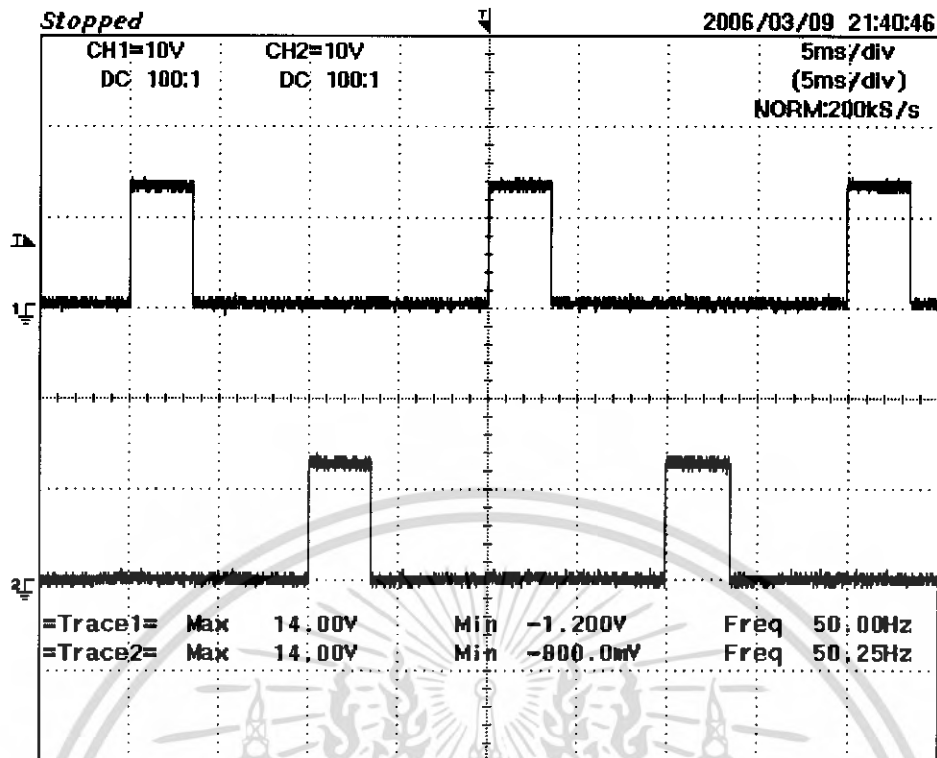


รูปที่ 6.15 แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นกลางของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

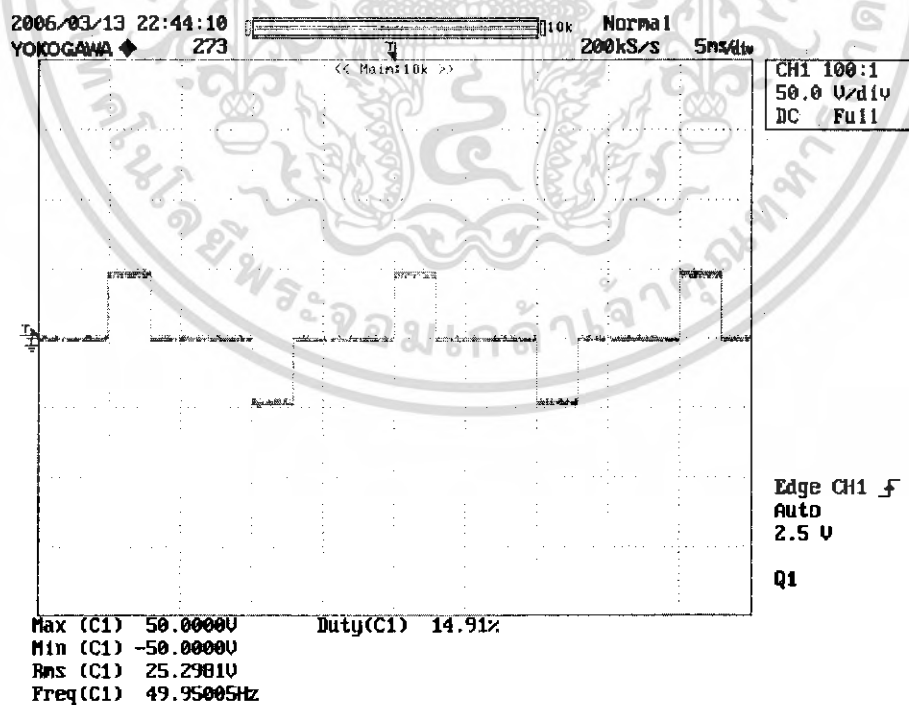


รูปที่ 6.16 แสดงแรงดันชั้นกลางของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

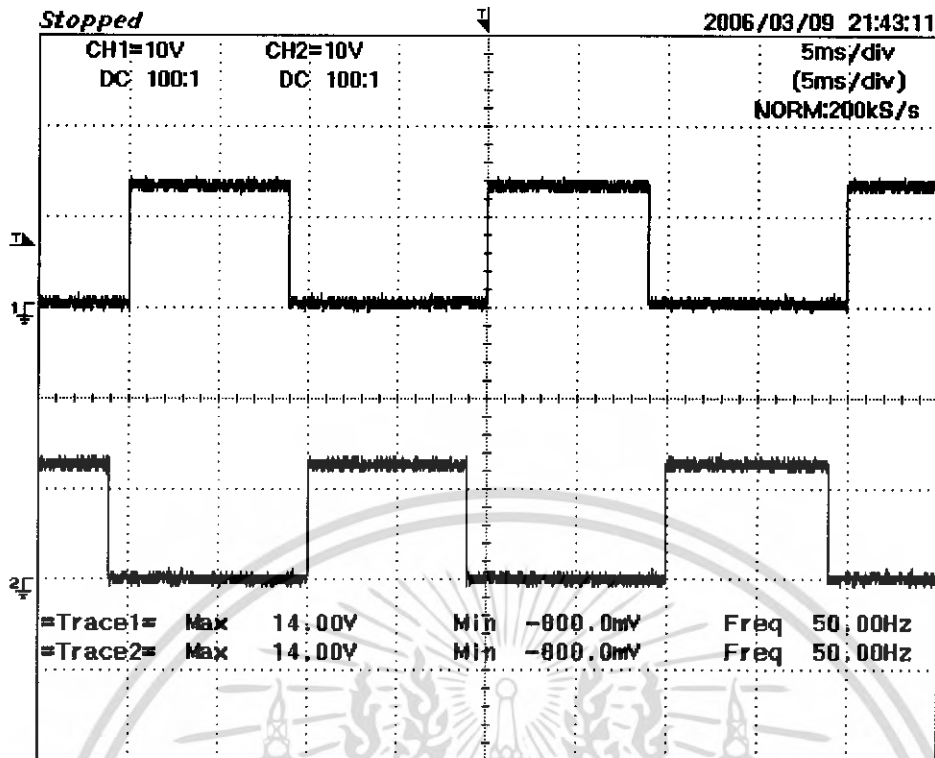


รูปที่ 6.17 แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่รับของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

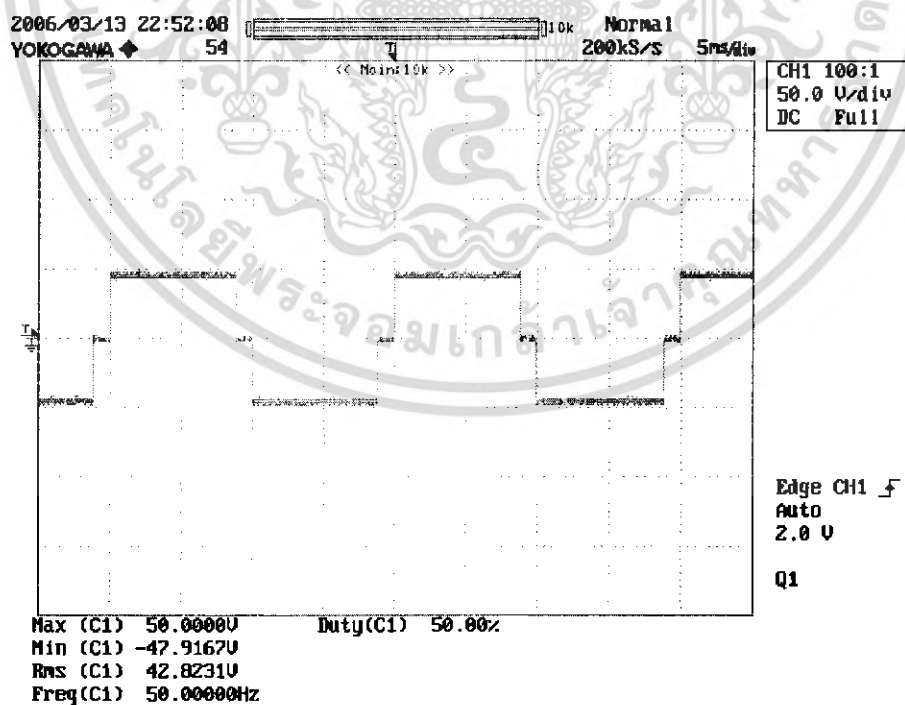


รูปที่ 6.18 แสดงแรงดันรับของเฟส B ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

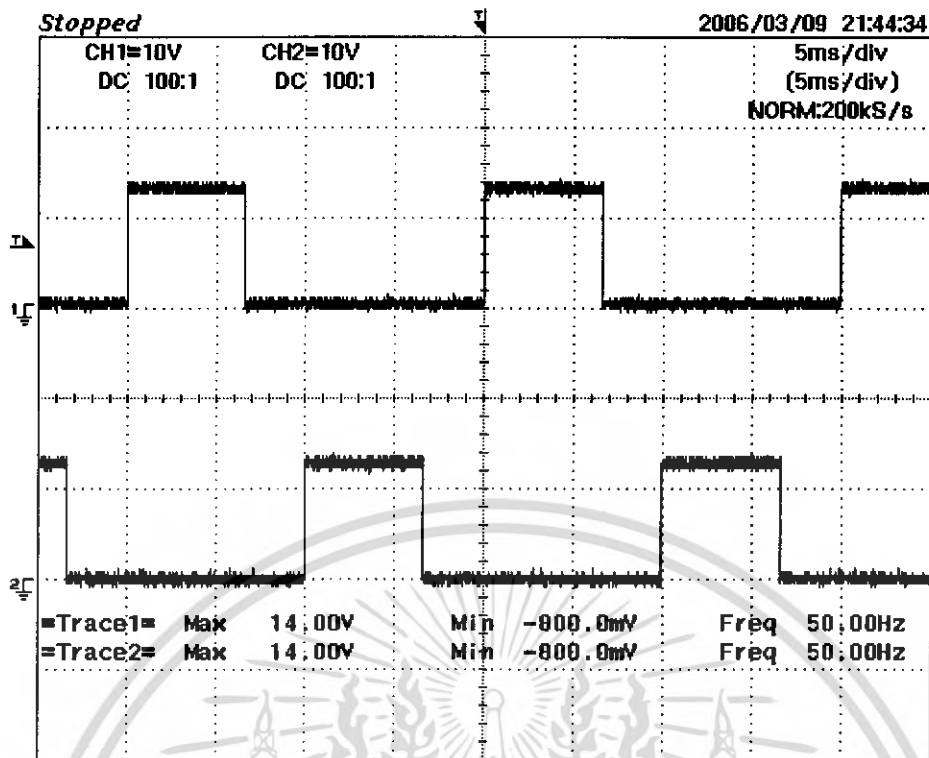


รูปที่ 6.19 แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นล่างของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

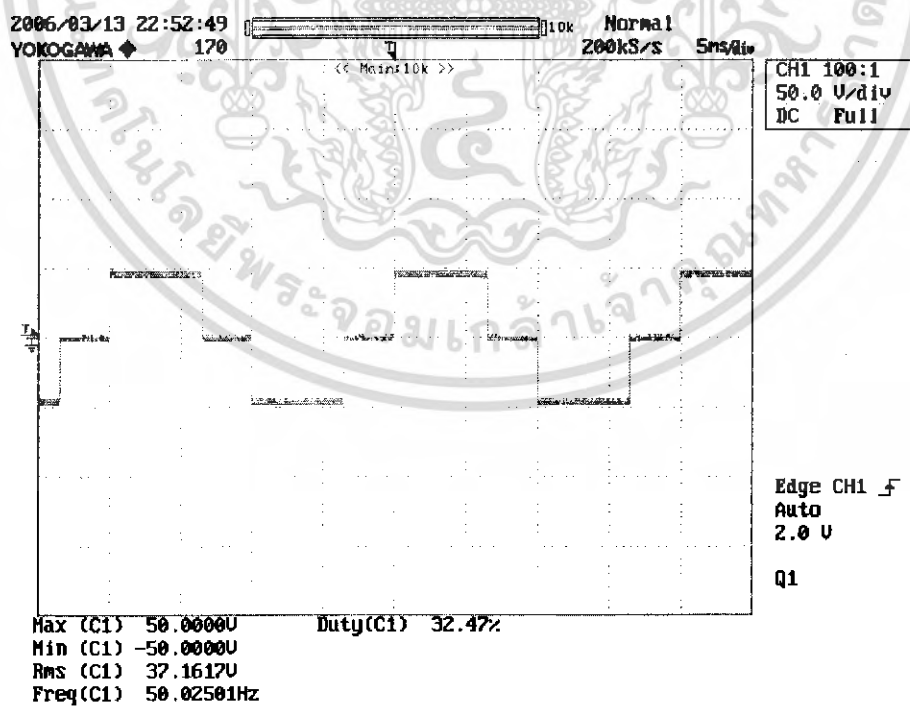


รูปที่ 6.20 แสดงแรงดันชั้นล่างของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

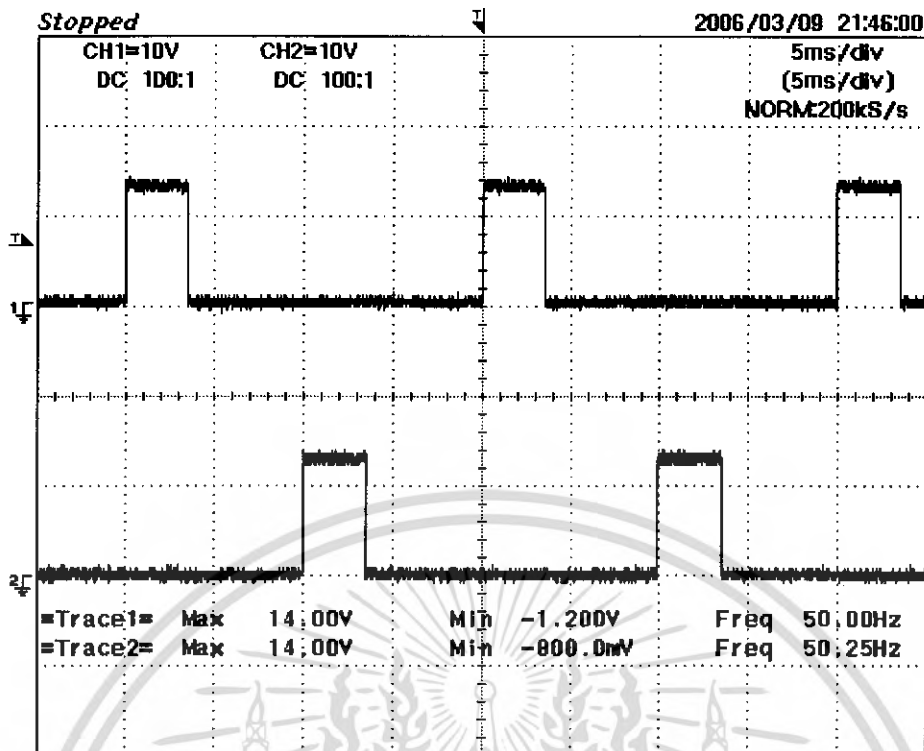


รูปที่ 6.21 แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ชั้นกลางของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

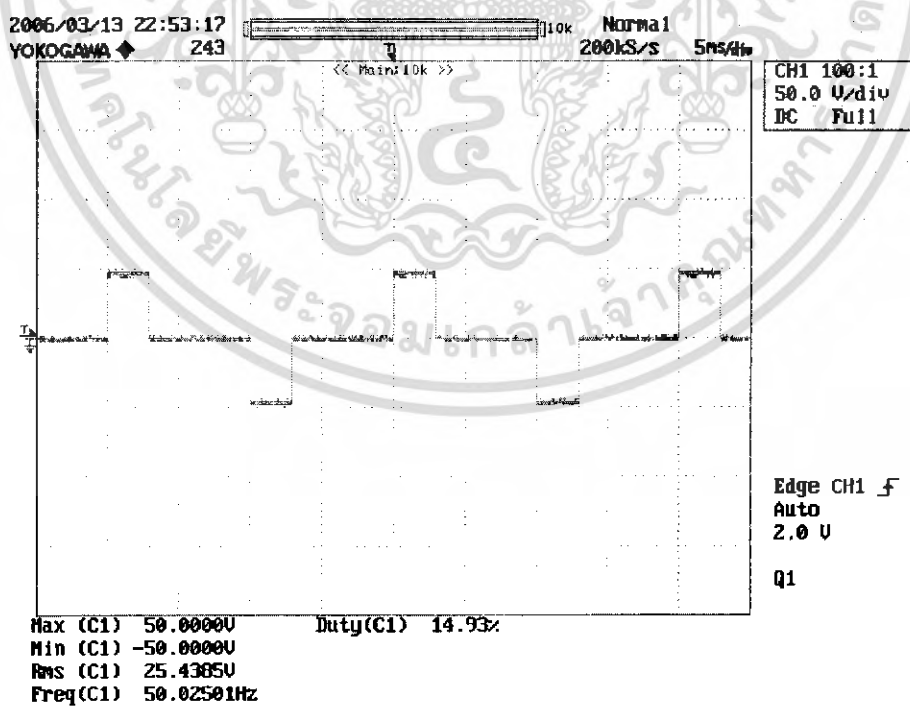


รูปที่ 6.22 แสดงแรงดันชั้นกลางของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.23 แสดงสัญญาณ S1 และ S3 ของอินเวอร์เตอร์ที่ขับบนของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

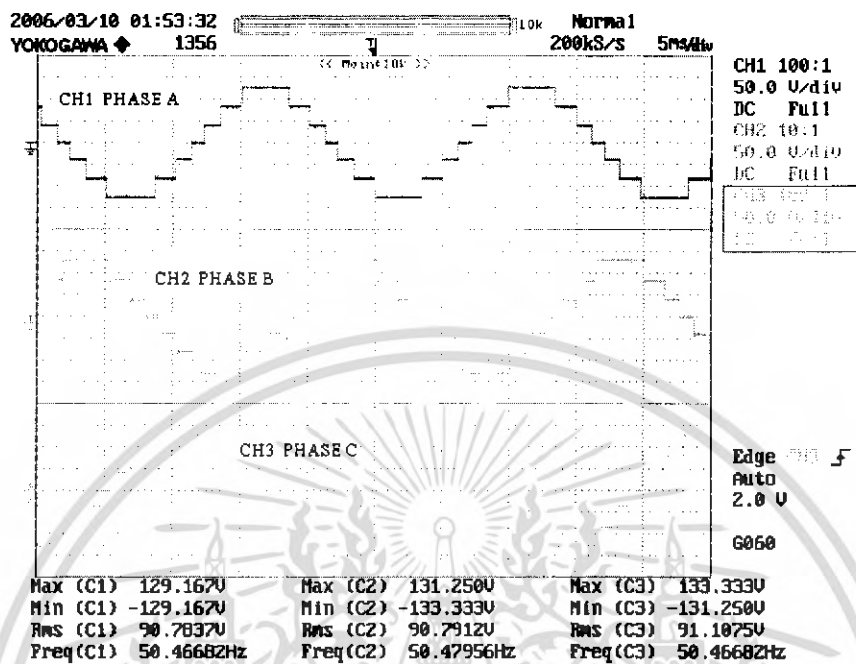


รูปที่ 6.24 แสดงแรงดันขับบนของเฟส C ที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

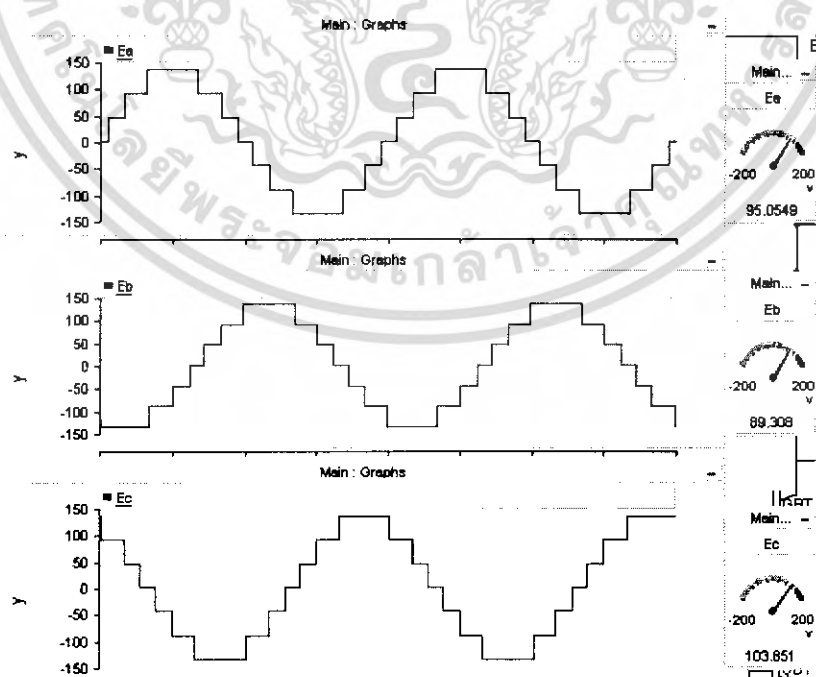
6.3 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 1.0

ผลที่ได้จากชุดสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ



รูปที่ 6.25 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 1.0

ผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม PSCAD

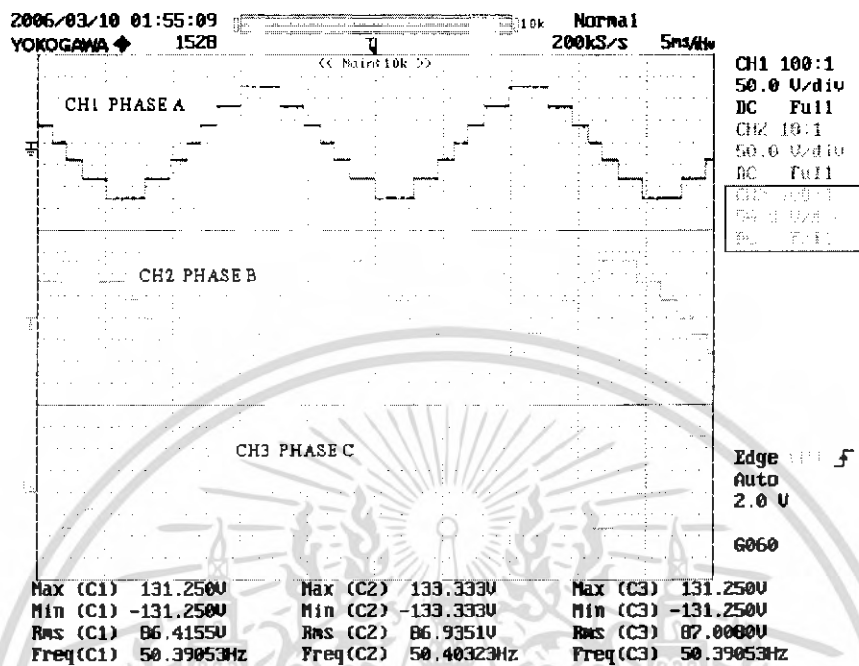


รูปที่ 6.26 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดประการใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

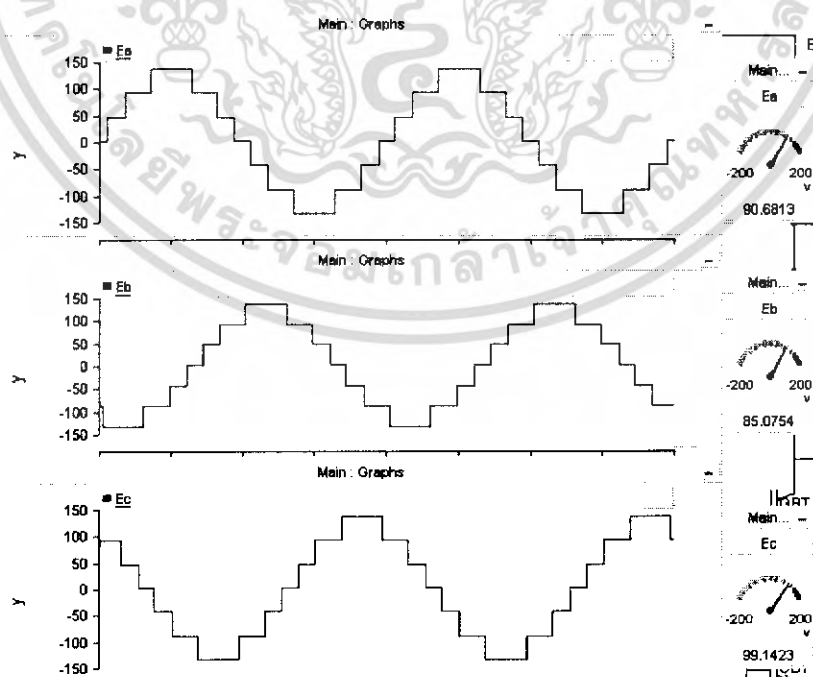
6.4 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 0.95

ผลที่ได้จากชุดสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ



รูปที่ 6.27 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 0.95

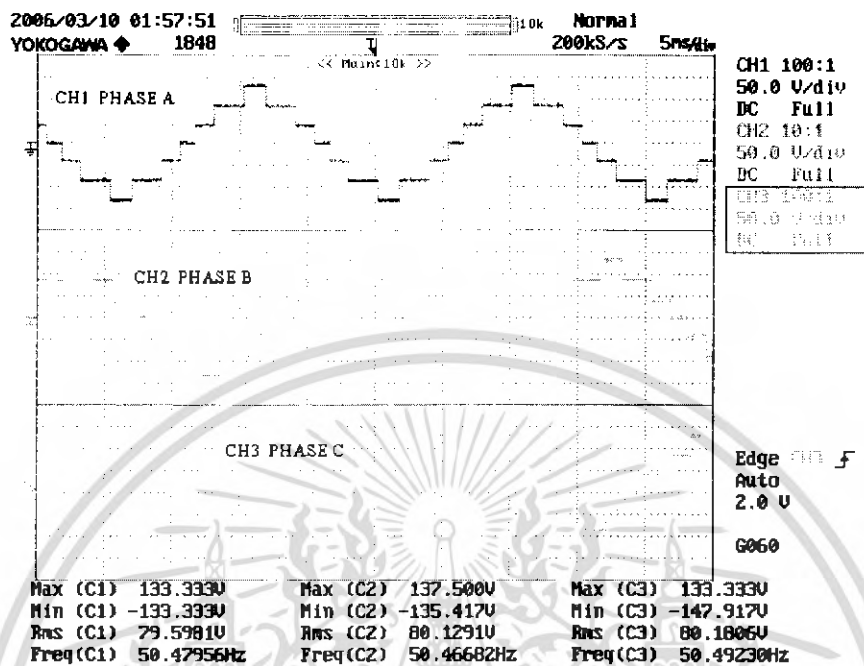
ผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม PSCAD



รูปที่ 6.28 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 0.95

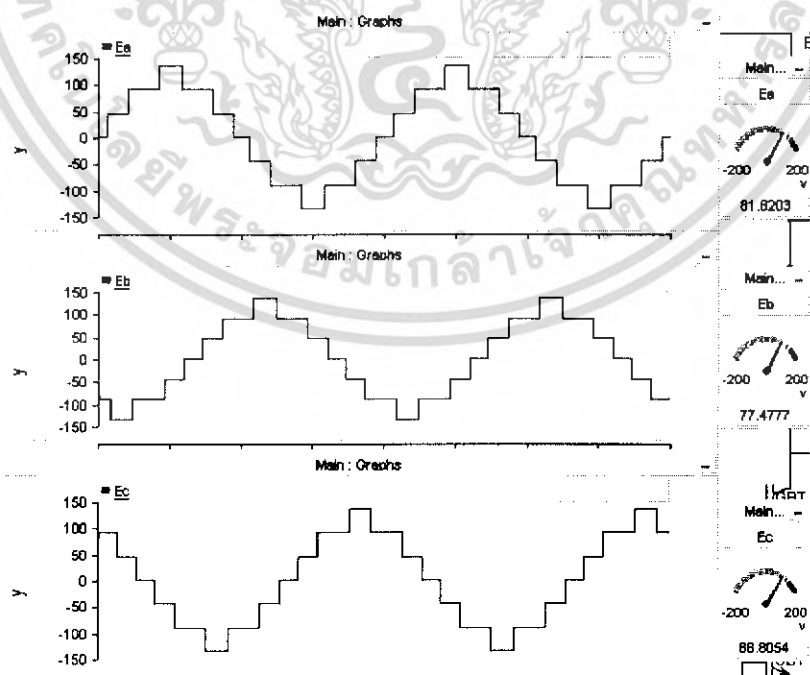
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 0.85
ผลที่ได้จากชุดสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ



รูปที่ 6.31 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 0.85

ผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม PSCAD

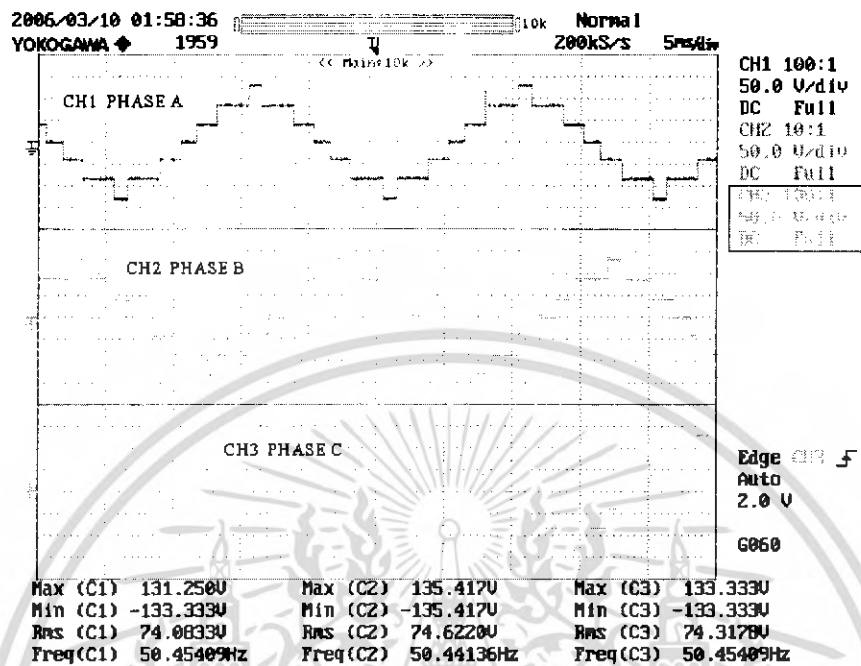


รูปที่ 6.32 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ในวงจำกัดการนำ
 ไปว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

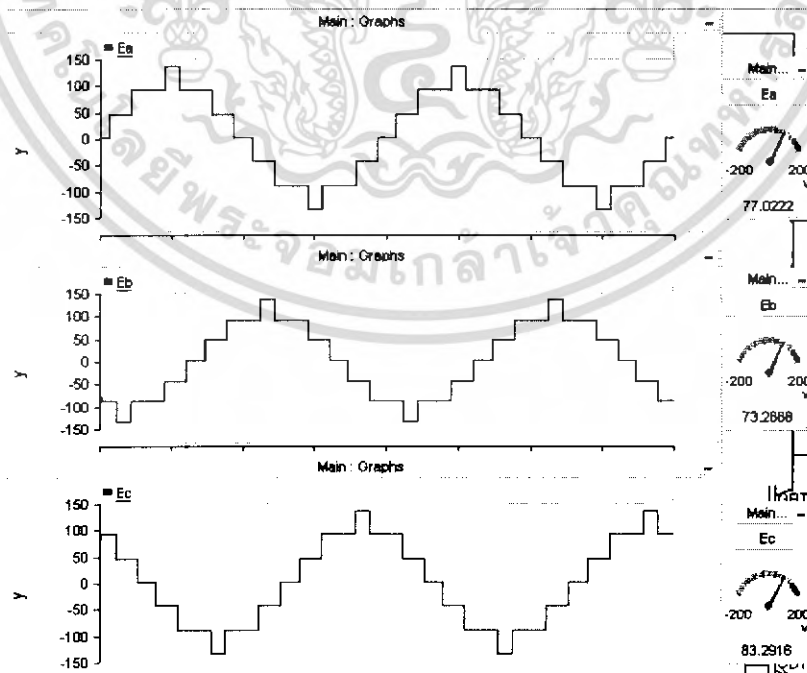
6.7 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 0.8

ผลที่ได้จากชุดสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ



รูปที่ 6.33 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 0.8

ผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม PSCAD

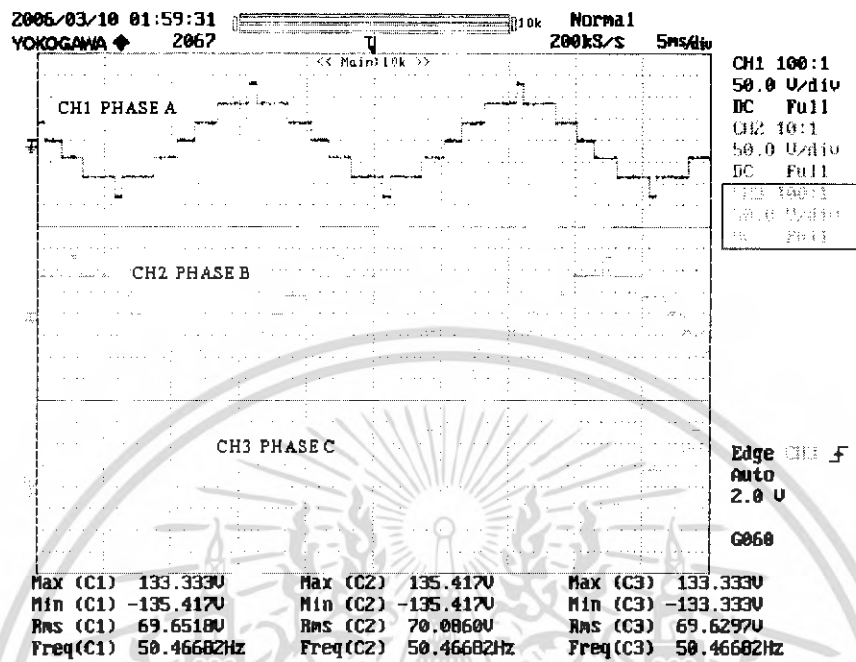


รูปที่ 6.34 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

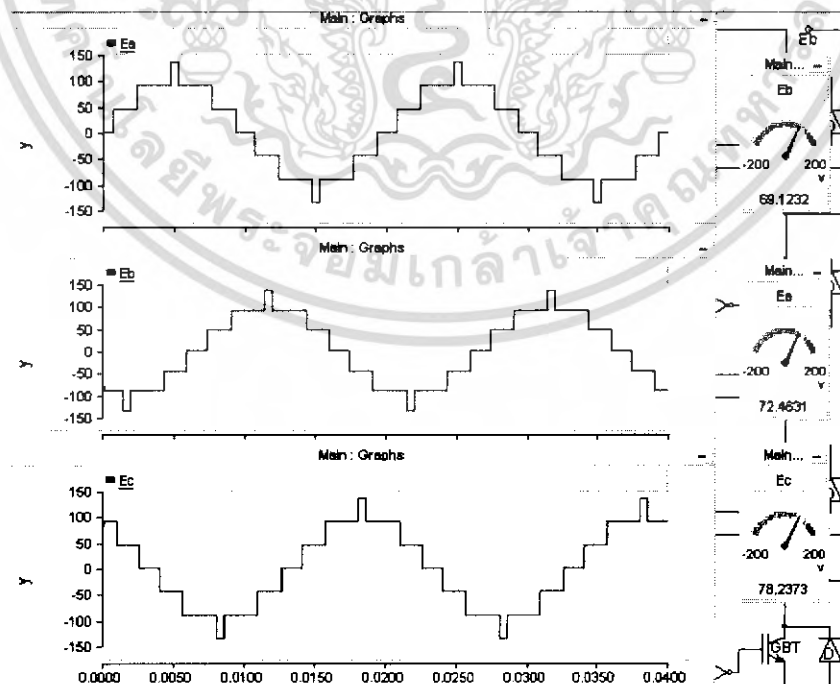
6.8 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 0.75

ผลที่ได้จากชุดสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ



รูปที่ 6.35 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 0.75

ผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม PSCAD

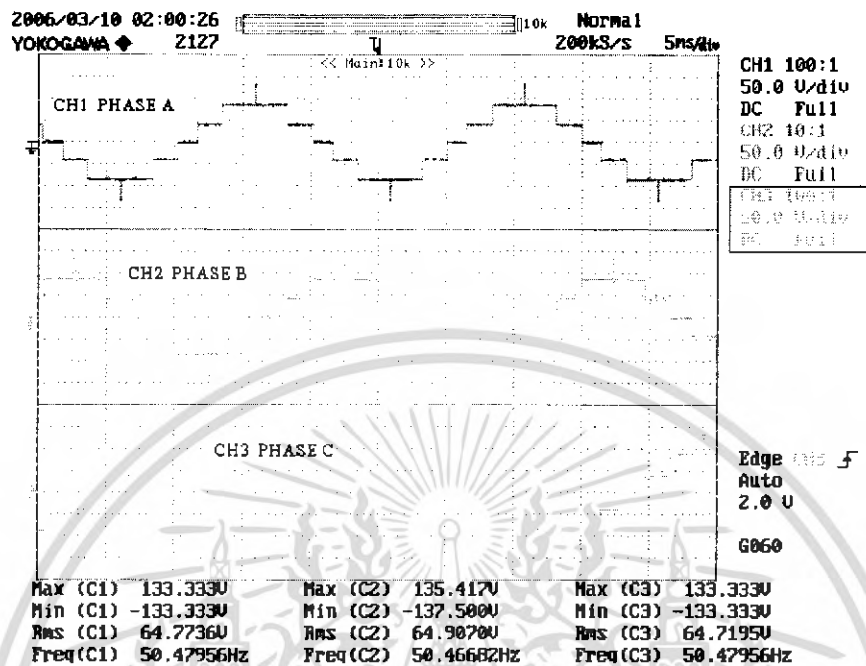


รูปที่ 6.36 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

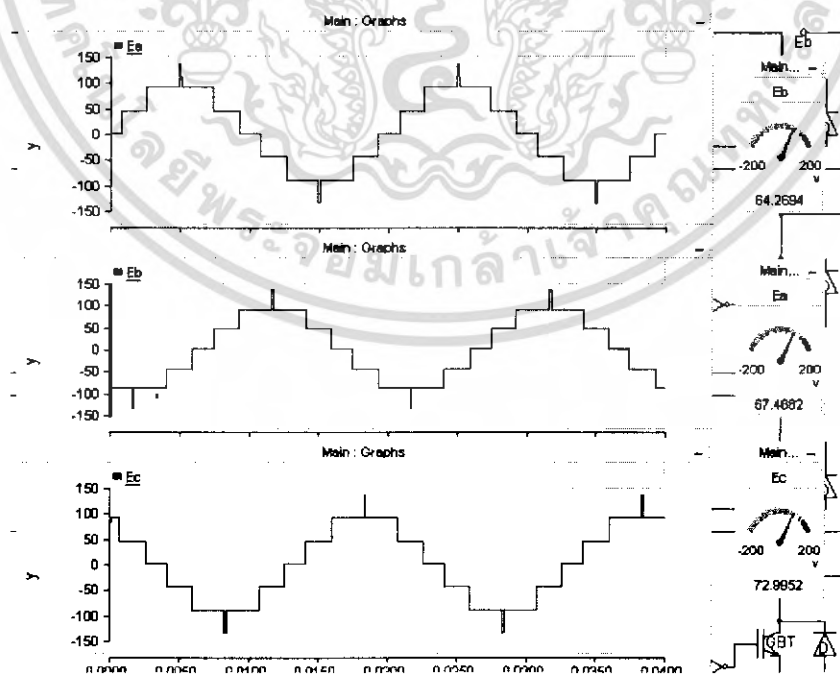
6.9 ผลการสร้างแรงดันที่ Modulation Index เท่ากับ 0.7

ผลที่ได้จากชุดสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ



รูปที่ 6.37 แสดงแรงดันที่ได้จากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ M.I. เท่ากับ 0.7

ผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม PSCAD



รูปที่ 6.38 แสดงแรงดันที่ได้จากการจำลองใน PSCAD ที่ M.I. เท่ากับ 0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผลการสร้างแรงดันที่ได้มาทั้งหมดนั้นเป็นผลจากการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับชุดอินเวอร์เตอร์เพียง 45 โวลต์เท่านั้น ซึ่งทำการเปลี่ยนค่า Modulation Index จาก 0.7 ถึง 1.0 โดยการปรับเลือกจาก A/D Converter จากรูปจะให้เห็นได้ว่า แรงดันสูงสุดที่ออกมานั้นจะเท่ากับ 135 โวลต์ นั่นคือ นำแรงดันที่ชุดอินเวอร์เตอร์สร้างได้แต่ละชั้น 45 โวลต์มาคูณกัน ซึ่งได้นำมาเปรียบเทียบกับรูปสัญญาณที่ได้มาจากการจำลองในโปรแกรม PSCAD ทั้งสามเฟส ซึ่งขนาดของแรงดันที่สร้างออกมาได้จะขึ้นอยู่กับค่า Modulation Index



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

วิจารณ์และบทสรุป

ปริญญาโทฉบับนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการออกแบบวงจรการชดเชยแรงดันกำลังไฟฟ้านิวเทคที่ให้กับระบบไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดแบบ 3 เฟส ซึ่งจะจำลองและออกแบบโดยโปรแกรม MATLAB และ PSCAD ซึ่งเราจะสามารถสร้างแรงดัน 3 เฟสจากอินเวอร์เตอร์ได้โดยการเลือกค่า Modulation Index ตั้งแต่ 61 ถึง 91 เพื่อที่จะนำไปชดเชยกำลังไฟฟ้านิวเทคที่ฟ ซึ่งสามารถที่จะทำให้แรงดันที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์ synchronize เข้าไปในระบบได้โดยใช้ phase lock loop ดังนั้นหากความถี่ในระบบมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ก็จะไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้านิวเทคที่ฟเข้าไปในระบบ

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นจากการออกแบบและการทดลองคือ

- ระดับแรงดันที่สร้างได้ในแต่ละชั้นนั้นยังมีค่าที่น้อยกว่าพิกัดที่ควรจะได้ ทำให้แรงดันเมื่อนำมาคาสเคดกันแล้วมีค่าไม่พอเพียงที่จะนำไปชดเชยกำลังไฟฟ้านิวเทคที่ฟ
- รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสเอาต์พุตของระบบยังคงมีค่าฮาร์มอนิกส์ปนอยู่
- รูปสัญญาณที่จะนำไปใช้ขับเกดยังมี noise ปนอยู่บ้างเนื่องจากคลื่นรบกวนจากภายนอก

การสร้างชุดอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับแบบ 3 เฟสเพื่อเป็นตัวสร้างแรงดันและสามารถปรับแรงดันที่ต้องการได้เพื่อใช้ในการสร้างกำลังไฟฟ้านิวเทคที่ฟที่จะเข้าไปชดเชยในระบบได้

แนวทางการพัฒนาหัวข้อปริญญาโท

ชุดสร้างแรงดันจากอินเวอร์เตอร์คาสเคด 7 ระดับชนิด 3 เฟสยังพบว่ามีค่าฮาร์มอนิกส์ปนอยู่ ดังนั้นในการปรับปรุงคือการลดค่าของฮาร์มอนิกส์ลง ซึ่งสามารถทำได้จากการเพิ่มจำนวนชั้นของอินเวอร์เตอร์ขึ้น จากเดิม 3 ชั้นจะสามารถสร้างแรงดันได้ 7 ระดับก็เปลี่ยนเป็น 4 ชั้นซึ่งจะสามารถสร้างแรงดันได้เป็น 9 ระดับหรือ 5 ชั้นซึ่งจะสามารถสร้างระดับแรงดันได้ถึง 11 ระดับ ซึ่งถ้าเรายิ่งเพิ่มระดับชั้นของชุดอินเวอร์เตอร์นี้แล้วก็จะทำให้ผลของค่าฮาร์มอนิกส์ลดลง เนื่องจากเมื่อเราทำการสร้างสัญญาณที่มากระดับขึ้นนั้น เราจะได้สัญญาณที่มีรูปร่างเข้าใกล้สัญญาณรูปไซน์มากขึ้นนั่นก็คือความผิดเพี้ยนของสัญญาณมีค่าลดลงนั่นเอง นอกจากนี้ปัญหาฮาร์มอนิกส์ที่พบแล้วเรายังพบปัญหาของการลัมของสัญญาณที่จะใช้เข้าไปขับเกทจากชุดวงจรควบคุม(CPLD)ในขณะที่เรากำลังเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่อชานานโดยใช้ตัวเก็บประจุที่ในแต่ละชั้น ซึ่งจะทำให้ระดับแรงดันที่จะสามารถสร้างได้ในแต่ละชั้นมีค่าไม่ถึงตามพิกัดที่เราทำการคำนวณไว้คือ 150 โวลต์ต่อชั้น ดังนั้นสาเหตุของการเกิดปัญหานี้ น่าจะมาจากกรวางเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้างใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

layout ของระบบที่ไม่เหมาะสมคือสายสัญญาณจากชุดวงจรควบคุมที่จะส่งไปยังชุดวงจรขับเกท นั้นมีความยาวมากและยังลอยอยู่ในอากาศทั้ง 3 เฟสทำให้เมื่อเราเพิ่มระดับแรงดันที่มากขึ้น กระแสก็จะมีค่ามากขึ้นทำให้เกิดการรบกวนสัญญาณของชุดวงจรควบคุมได้ดังนั้นแนวทางการปรับปรุงคือเราควรที่จะออกแบบสายสัญญาณใหม่จากที่เคยใช้สายตัวนำก็เปลี่ยนมาใช้การออกแบบลงบนแผ่นPCBเพื่อทำการลดการเกิดการรบกวนจากสัญญาณภายนอกและลดการสูญเสียของสัญญาณได้อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fang Zheng Peng and Jih-Sheng Lai, "**Dynamic Performance and Control of Static Var Generator Using Cascade Multilevel Inverter**", Oak Ridge National Laboratory Tennessee.
- [2] F.Z.Peng, and J.S.Lai, "**A multilevel voltage-source Inverter with separate dc sources for static var generation**".
- [3] รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics**, กรุงเทพฯ, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง, 2547
- [4] กรกฤษณ์ หาญณรงค์, กิตติศักดิ์ จินลอย และ จตุพร สุตยอด, "**การศึกษาการสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบสแตติกโดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคด**", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โปรแกรมคำนวณมุมหน้ากระแสนของอินเวอร์เตอร์แบบคาดเคส

% switching angle by equal-area criteria

clear;

mm=0;

for ma=0.1:0.01:1.00

 mm=mm+1;

 nstep=ceil(ma*3);

 vstep=0:1/3:nstep/3;

 x01=asin((1/ma)*vstep');

 x01(nstep+1)=pi/2;

 x(:,mm)=ones(3,1)*pi/1.99;

 for nn=1:nstep

 x(nn,mm)=3*(nn*x01(nn+1)/3-(nn-1)*x01(nn)/3+ma*cos(x01(nn+1))-
ma*cos(x01(nn)));

 end

end



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

x=x';
G1au=zeros(1024,91);
G1bu=zeros(1024,91);
G2au=zeros(1024,91);
G2bu=zeros(1024,91);
G3au=zeros(1024,91);
G3bu=zeros(1024,91);

mm=0;
for ma=0.1:0.01:1.00
    mm=mm+1;
    nn1=x(mm,1)*1024/(2*pi);
    nn2=x(mm,2)*1024/(2*pi);
    nn3=x(mm,3)*1024/(2*pi);
    G1au(nn1:512-nn1,mm)=1;
    G1bu(512+nn1:1024-nn1,mm)=1;
    G2au(nn2:512-nn2,mm)=1;
    G2bu(512+nn2:1024-nn2,mm)=1;
    G3au(nn3:512-nn3,mm)=1;
    G3bu(512+nn3:1024-nn3,mm)=1;
end
save table_sw_ang G1au G1bu G2au G2bu G3au G3bu

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมแปลงข้อมูลใน Workspace ของ MATLAB เพื่อแปลงเป็น text file สำหรับใช้ในการ simulation ใน PSCAD

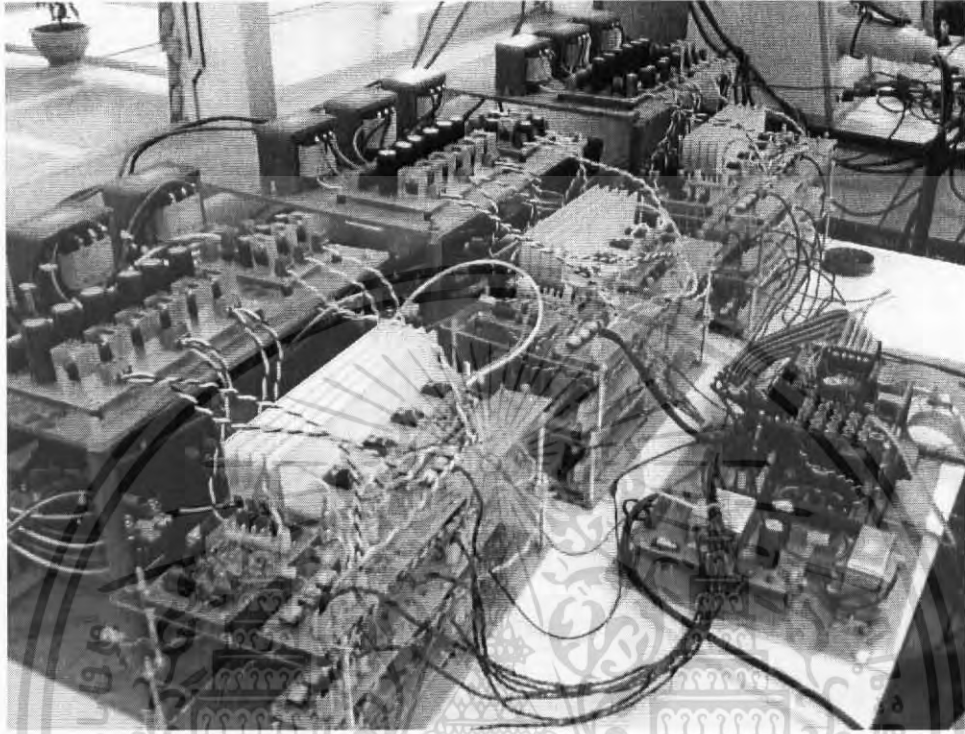
```
% switching angle table preparation
fid=fopen('G1au16.txt','w'); % change filename for each range of modulation index
fprintf(fid,'! Input data for XYZ Characteristic\n');
fprintf(fid,'! \n');
fprintf(fid,'XDATA:\n');
for i=91:91, % change data here
    fprintf(fid,'%d\n',i);
end
fprintf(fid,'YDATA:\n');
for m=1:1024,
    fprintf(fid,'%d\n',m);
end
fprintf(fid,'ZDATA:\n');
for i=91:91 % change data here
    for m=1:1024
        fprintf(fid,'%d\n',G1au(m,i)); % change variable G1au to other variable
    end
end
fprintf(fid,'ENDFILE: \n');
fprintf(fid,'!\n');
fclose(fid);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

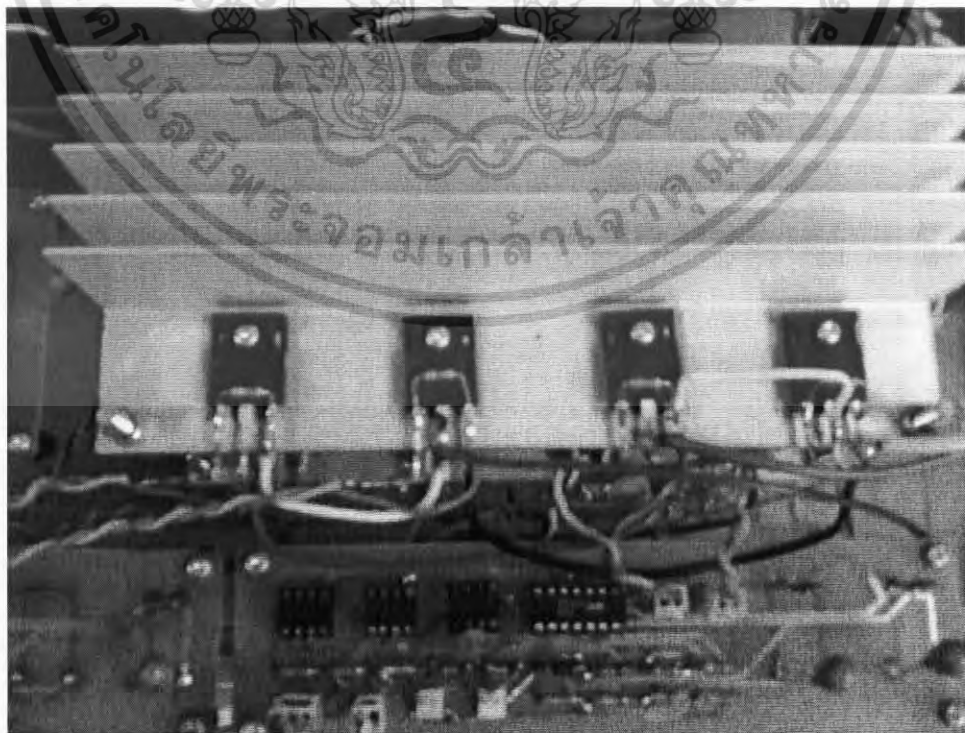
ภาคผนวก ข

วงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ชุดทดลองอินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคด 7 ระดับ แบบสามเฟส

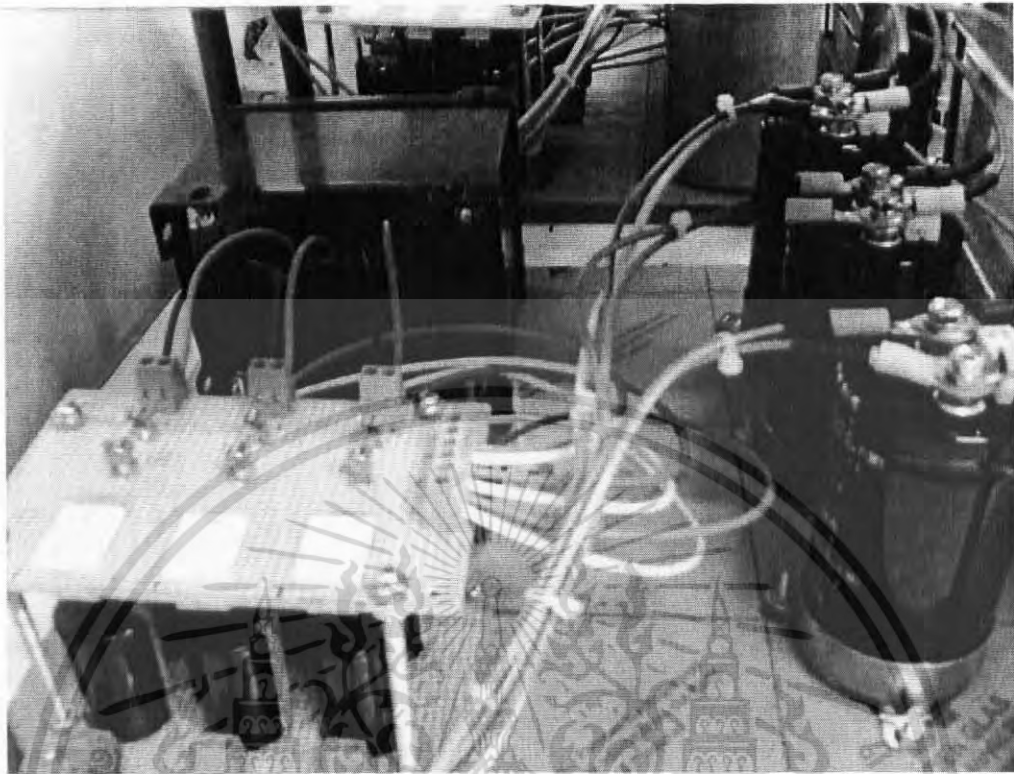


- การเชื่อมต่อของฟลูบริดจ์ IGBT ในแต่ละชั้น

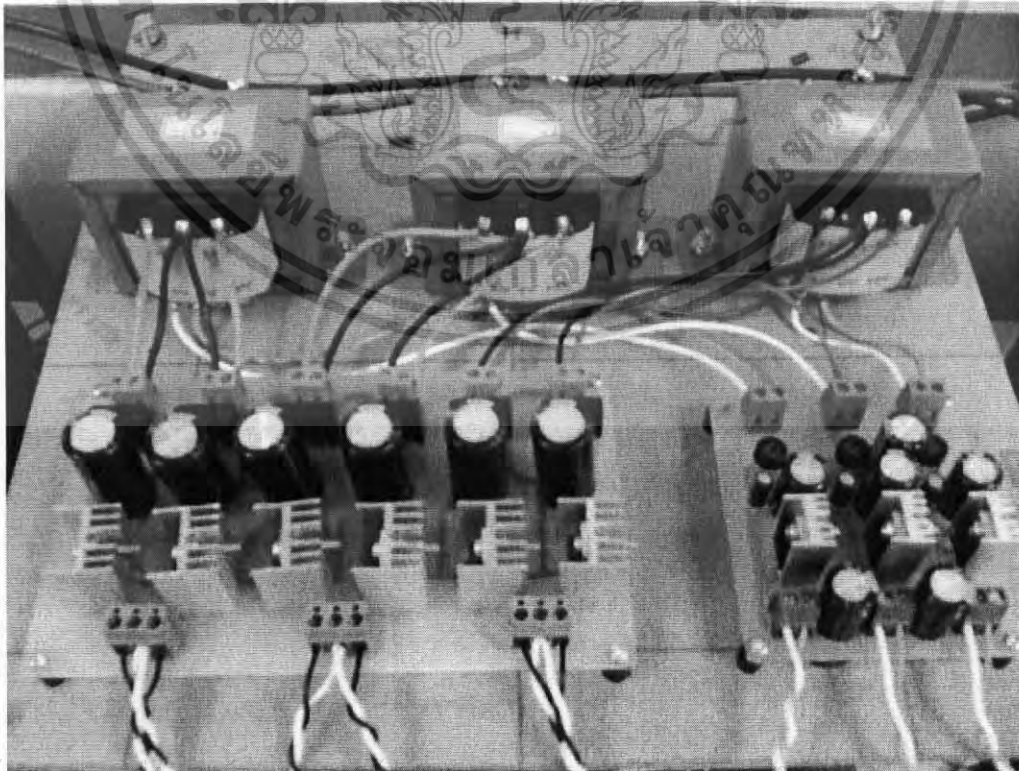


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชุดกำเนิดการเชื่อมต่อกระแสตรงของฟูลบริดจ์ IGBT

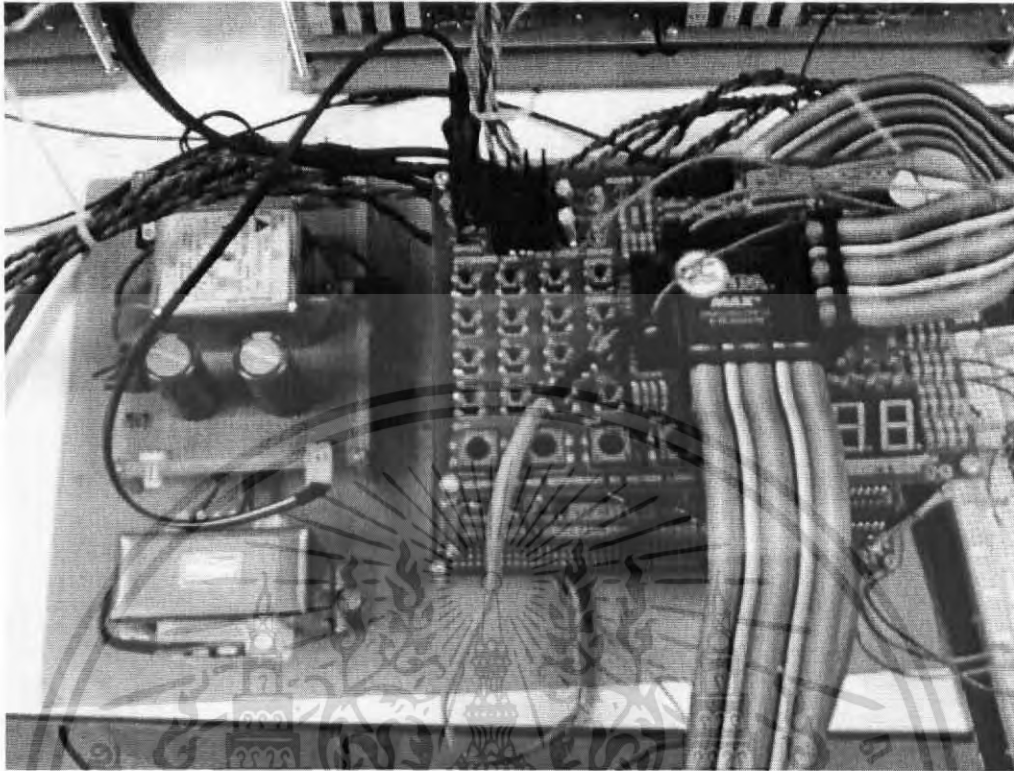


- ชุดวงจรกำลัง

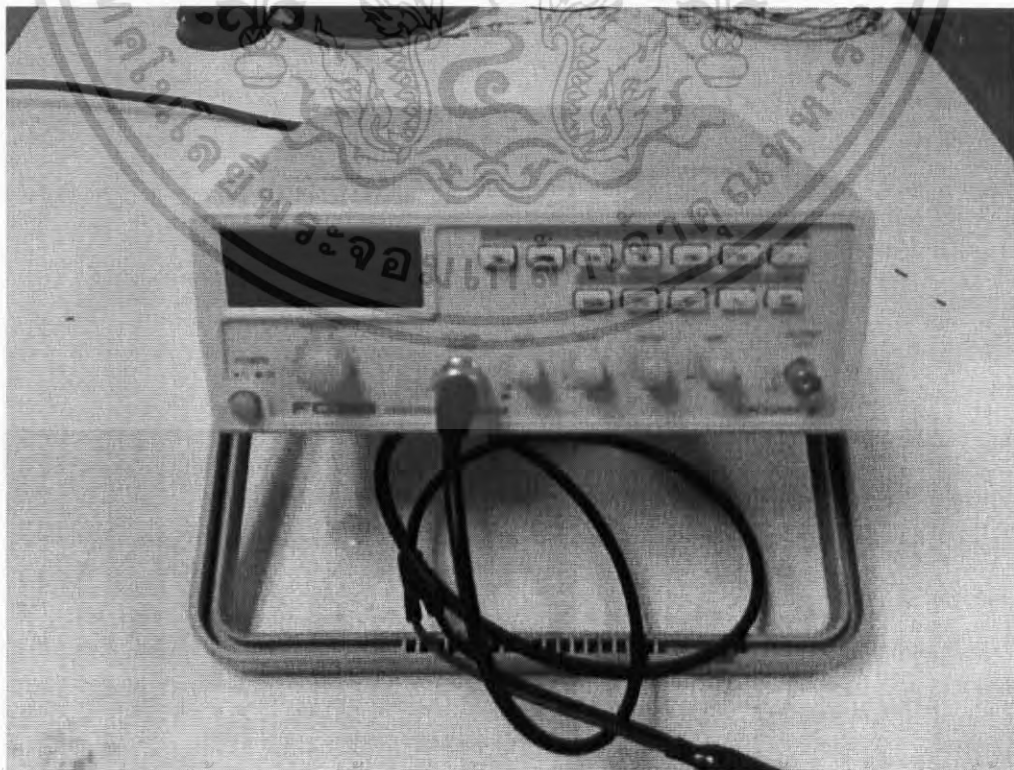


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชุดสร้างสัญญาณในการทริกเกต



- Function Generator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้