



ปีการศึกษา 2542

การออกแบบฮาร์โมนิกส์ฟิลเตอร์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า

Harmonic Filter Designs for Improved Power Quality



โดย  
นายชษฐ์ เมฆทวีกุล  
นายธีรพัฒน์ ปิยะโหตะระ  
นายนาวิน สุจินพรัหม  
นายนิติ สุภาวิวรรณ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.จงรักษ์ บุญเลี้ยง

เลขหม.....  
เลขทะเบียน..... 36973  
วัน, เดือน, ปี 30 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบฮาร์ดแวร์โมดูลไฟลิตเตอร์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

- 
1. นายเชษฐ เมฆทวิกุล
  2. นายธีรพัฒน์ ปิยะโหตระระ
  3. นายนาวิน สุจินพรัหม
  4. นายนิติ ศุภวิวรรณ

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.จกรักษ์ บุญเสียง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบฮาร์ดแวร์โมดูลฟิลเตอร์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า

นายเชษฐ เมฆทวีกุล  
 นายธีรพัฒน์ ปิยะโหตระระ  
 นายนาวิน สุจินพรัหม  
 นายนิติ สุภวิวรรธน์  
 ผศ.จรงค์ษ์ บุญเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2542

### บทคัดย่อ

เนื่องจากแนวโน้มการใช้อุปกรณ์ออนไลน์เพิ่มขึ้นในปัจจุบันทำให้เกิดฮาร์ดแวร์โมดูลในระบบไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ปรินญาณิพนธ์ฉบับนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอวิธีการกำจัดฮาร์ดแวร์โมดูลของระบบไฟฟ้าโดยใช้วงจรกรองฮาร์ดแวร์โมดูลชนิดแอกทีฟฟิลเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพมากในปัจจุบัน แอกทีฟฟิลเตอร์มีระบบการทำงานที่ค่อนข้างซับซ้อน โดยการรับสัญญาณไฟฟ้าจากระบบเข้ามาคำนวณในวงจรเพื่อสร้างสัญญาณใหม่มาควบคุมการทำงานของไอจีบีที และนำสัญญาณที่ได้ี้คกลับเข้าไปในระบบเพื่อชดเชยฮาร์ดแวร์โมดูลในระบบ เพื่อให้สัญญาณไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่ได้จากการชดเชยกระแสฮาร์ดแวร์โมดูล มีรูปสัญญาณที่ดีขึ้นเพื่อการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ

## Harmonic Filter Designs for Improved Power Quality

Mr. Chej Mektawckul

Mr. Teerapat Piyahotara

Mr. Nawin Sujinnapram

Mr. Niti Supawiwat

Asst.Prof. Chongrag Boonseng      Advisor  
1999

### Abstract

Because the trends of using non-linear devices have much been increasing influencing more harmonics are generated to electrical system. This thesis presented how to compensate harmonic current in electrical system by using filter called "Active filter" which is currently popular and modern. According to the feature of this system, it has quite complicate and complex procedures. The way to compensate harmonics,occurring in the system,can be done by receiving signal from the system for calculating in filter's system in order to create a new signal which is for controlling IGBT's performance and the new signal from IGBT will be injected backward to the electrical system to compensate harmonic current.Therefore,after compensating harmonic current,the source's signal form will be improved and have more efficiency.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูป.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ประโยชน์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	4
บทที่ 3 โครงสร้างและการทำงานของวงจร.....	9
3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบ.....	9
3.1.1 วงจรคำนวณกระแสคสช.....	9
3.1.2 วงจรสร้างสัญญาณขั้วเกท.....	10
3.1.3 วงจรสร้างสัญญาณเคดไทม์.....	11
3.1.4 วงจรแยกกราวด์และวงจรขั้วเกท.....	12
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	19
4.1 การทดลองโดยใช้โหมดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น.....	19
4.1.1 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 20 V.....	20
4.1.2 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 50 V.....	22
4.1.3 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 110 V.....	24
4.1.4 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 220 V.....	26
4.2 การทดลองโดยใช้โหมดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น.....	28
4.2.1 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 30 V.....	29
4.2.2 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 50 V.....	31
4.2.3 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 110 V.....	33
4.2.4 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 160 V.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์.....	37
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	37
5.1.1 โหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสบแบบครึ่งคลื่น.....	37
5.1.2 โหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสบแบบเต็มคลื่น.....	38
5.2 ปัญหาของการดำเนินงาน.....	39
5.3 แนวทางการพัฒนา.....	39

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	การรวมของแรงดันรูปคลื่น 50 Hz กับ 250 Hz ทำให้รูปคลื่นผิดเพี้ยน.....1 ไปจากรูปคลื่นไซน์
รูปที่ 2.1	ไคอะแกรมเส้นเดียวของแอกทีฟฟิลเตอร์แบบจีดกระแสกลับ.....5
รูปที่ 2.2	ไคอะแกรมลูปเปิด(Open loop)ที่ใช้คำนวณสร้างกระแสชดเชย..... 6
รูปที่ 2.3	ไคอะแกรมลูปปิด(Close loop)ที่ใช้คำนวณกระแสชดเชย.....7
รูปที่ 2.4	ระบบที่มีการปรับปรุงคุณภาพของระบบ โดยใช้แอกทีฟฟิลเตอร์.....8
รูปที่ 3.1	โครงสร้างและส่วนประกอบของวงจร.....9
รูปที่ 3.2	วงจรคูณ.....9
รูปที่ 3.3	ภาพถ่ายวงจรคำนวณกระแสชดเชย..... 10
รูปที่ 3.4(a)	บล็อกไคอะแกรมของส่วนควบคุมกระแส.....10
รูปที่ 3.4(b)	วงจรฮีสเตอร์รีซิส.....10
รูปที่ 3.4(c)	วงจรเปรียบเทียบกระแส..... 10
รูปที่ 3.5	ภาพถ่ายวงจรสร้างสัญญาณเคค ไทม์.....11
รูปที่ 3.6	ภาพถ่ายวงจรแยกกราวด์และวงจรขั้วเกท..... 12
รูปที่ 3.7	ส่วนของวงจรกำลัง..... 13
รูปที่ 3.8	สัญญาณการทำงานของไอจีบีที.....14
รูปที่ 3.9	ภาพถ่ายวงจรกำลัง.....14
รูปที่ 3.10	วงจรแยกกราวด์และวงจรขั้วเกท..... 15
รูปที่ 3.11	วงจรสร้างสัญญาณเคค ไทม์..... 16
รูปที่ 3.12	วงจรคำนวณกระแสชดเชย..... 17
รูปที่ 3.13	บล็อกไคอะแกรมการทำงานโดยรวม..... 18
รูปที่ 4.1	วงจรที่ใช้ในการทดลอง โหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น..... 19
รูปที่ 4.2	กระแสชดเชยของโหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น..... 19
รูปที่ 4.3(a)	กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 20 V. .... 20
รูปที่ 4.3(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา..... 20 ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 20 V. โดยมี%THD=44.19%
รูปที่ 4.3(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา..... 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 20 V. โดยมี%THD=44.20%	
รูปที่ 4.4(a)	กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 20 V. ....	21
รูปที่ 4.4(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	21
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 20 V. โดยมี%THD=2.25%	
รูปที่ 4.4(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	21
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 20 V. โดยมี%THD=35.74%	
รูปที่ 4.5(a)	กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 50 V. ....	22
รูปที่ 4.5(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	22
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=44.12%	
รูปที่ 4.5(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	22
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=44.13%	
รูปที่ 4.6(a)	กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 50 V. ....	23
รูปที่ 4.6(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	23
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=8.20%	
รูปที่ 4.6(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	23
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=37.63%	
รูปที่ 4.7(a)	กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 110 V. ....	24
รูปที่ 4.7(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	24
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=43.84%	
รูปที่ 4.7(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	24
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=44.20%	
รูปที่ 4.8(a)	กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 110 V. ....	25
รูปที่ 4.8(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	25
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=10.17%	
รูปที่ 4.8(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	25
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=43.21%	
รูปที่ 4.9(a)	กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 220 V. ....	26
รูปที่ 4.9(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	26
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 220 V. โดยมี%THD=43.99%	
รูปที่ 4.9(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 220 V. โดยมี%THD=44.00%	
รูปที่ 4.10(a)	กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 220 V. ....	27
รูปที่ 4.10(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	27
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 220 V. โดยมี%THD=10.83%	
รูปที่ 4.10(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	27
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 220 V. โดยมี%THD=53.54%	
รูปที่ 4.11	วงจรที่ใช้ในการทดลองโหลดแบบตัวจักรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น.....	28
รูปที่ 4.12	กระแสชดเชยของโหลดแบบตัวจักรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น.....	28
รูปที่ 4.13(a)	กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 30 V. ....	29
รูปที่ 4.13(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	29
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 30 V. โดยมี%THD=104.76%	
รูปที่ 4.13(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	29
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 30 V. โดยมี%THD=104.78%	
รูปที่ 4.14(a)	กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 30 V. ....	30
รูปที่ 4.14(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	30
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 30 V. โดยมี%THD=10.57%	
รูปที่ 4.14(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	30
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 30 V. โดยมี%THD=15.44%	
รูปที่ 4.15(a)	กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 50 V. ....	31
รูปที่ 4.15(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	31
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=108.07%	
รูปที่ 4.15(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	31
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=108.10%	
รูปที่ 4.16(a)	กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 50 V. ....	32
รูปที่ 4.16(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	32
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=13.74%	
รูปที่ 4.16(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	32
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=17.05%	
รูปที่ 4.17(a)	กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 110 V. ....	33
รูปที่ 4.17(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=108.79%	
รูปที่ 4.17(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	33
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=108.82%	
รูปที่ 4.18(a)	กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 110 V. ....	34
รูปที่ 4.18(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	34
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=20.27%	
รูปที่ 4.18(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	34
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=22.08%	
รูปที่ 4.19(a)	กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 160 V. ....	35
รูปที่ 4.19(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	35
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 160 V. โดยมี%THD=132.21%	
รูปที่ 4.19(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณา.....	35
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 160 V. โดยมี%THD=132.30%	
รูปที่ 4.20(a)	กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 160 V. ....	36
รูปที่ 4.20(b)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	36
	ถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 160 V. โดยมี%THD=19.84%	
รูปที่ 4.20(c)	ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณา.....	36
	ถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 160 V. โดยมี%THD=22.76%	

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 การทำงานของ ไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์.....	13
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าของ %THD ที่ระดับแรงดันต่างๆของ โหลดแบบตัวจัด.....	37
เรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าของ %THD ที่ระดับแรงดันต่างๆของ โหลดแบบตัวจัด.....	38
เรียงกระแสแบบเต็มคลื่น	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยเริ่มจะหันมาให้ความสำคัญกับปัญหาฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นกันบ้างแล้วซึ่งแตกต่างจากในต่างประเทศที่ได้ให้ความสนใจและศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับปัญหาฮาร์โมนิกส์กันมาก่อนหน้านี้แล้ว

ฮาร์โมนิกส์ คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล(50 Hz) ปัญหาก็คือว่า สัญญาณที่มีความถี่สูงนี้จะเข้าไปรวมกับสัญญาณที่มีความถี่มูลฐานทำให้รูปคลื่นที่ควรจะเป็นรูปไซน์(sine wave)ต้องผิดเพี้ยนไปและทำให้ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ต่ำลงด้วย(ดังรูปที่ 1.1)



รูปที่ 1.1 การรวมของแรงดันรูปคลื่น 50 Hz กับ 250 Hz ทำให้รูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์เกิดจากอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น(Nonlinear Load)เช่น อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆหรืออาจจะมาจากด้านระบบไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้า(เพราะประเทศไทยเรายังไม่มีมาตรการป้องกันและกำจัดฮาร์โมนิกส์เหมือนประเทศต่างๆที่เจริญก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมทั่วไป)

ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อระบบต่างๆเช่น ทำให้เกิดการสูญเสีย(Loss)ในหม้อแปลงไฟฟ้า,มอเตอร์,แหล่งจ่ายไฟฟ้าฉุกเฉินหรือแม้แต่สายไฟฟ้า ซึ่งหากการออกแบบไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากฮาร์โมนิกส์ด้วยแล้ว อาจจะทำให้เกิดการสูญเสียขั้นรุนแรงหรือลุกไหม้ได้ และโดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Crossing) หรือรีเลย์บางประเภทที่ต้องสนองค่าTHD(V)ได้ไม่เกิน 5 % ก็อาจจะทำให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดและอาจตัดวงจร จนไม่สามารถทำงานในสภาพที่เกิดฮาร์โมนิกส์สูงๆได้ นอกจากนี้ ฮาร์โมนิกส์ยังส่งผลกระทบต่อระบบจ่ายไฟฟ้า, การป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง, การรบกวนต่อระบบสื่อสารตลอดถึงการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเป็นต้น โดยรายละเอียดเกี่ยวกับฮาร์โมนิกส์จะแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

การแก้ปัญหของการเกิดฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่สำคัญๆมีอยู่ 2 วิธีคือ พาสซีฟ แอลซีฟิเตอร์(Passive LC Filter)และแอคทีฟฟิเตอร์(Active Filter)ซึ่งวงจรแอคทีฟฟิเตอร์จัดเป็นวิธีที่ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ถ้าหากได้รับการออกแบบและติดตั้งอย่างถูกวิธี ทั้งนี้เพราะสาเหตุดังนี้

1. การติดตั้งแอคทีฟฟิเตอร์นอกจากจะสามารถกำจัดกระแสฮาร์โมนิกส์ได้สูงถึง 80-90 % แล้ว ยังสามารถปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ดีได้ในเวลาเดียวกันด้วย

2. สามารถติดตั้งแอคทีฟฟิเตอร์ที่จุดเมนของระบบเพียงจุดเดียวทำให้การควบคุมเป็นไปอย่างอัตโนมัติ การดูแลรักษาทำได้ง่าย แทนที่จะติดตั้งตามจุดย่อยต่างๆในแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งมักมีหลายจุดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

3. การใช้แอคทีฟฟิเตอร์จะไม่มีข้อจำกัดกระแสโหลดหรือกระแสฮาร์โมนิกส์ว่ามากหรือน้อยเพียงใด กล่าวคือ ถ้ากระแสฮาร์โมนิกส์มากหลายร้อยหลายพันแอมป์ ก็จะสามารถออกแบบแอคทีฟฟิเตอร์ที่สามารถรับกระแสดังกล่าวได้(ขึ้นกับขนาดหม้อแปลงและโหลด) ด้วยเหตุนี้จึงสามารถรักษาระดับคุณภาพของระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดันค่อนข้างคงที่มาก เมื่อเทียบกับการแก้ไขปัญหฮาร์โมนิกส์ด้วยวิธีอื่นๆ

4. สามารถออกแบบติดตั้งได้ทั้งทางด้านแรงต่ำและด้านแรงสูง อีกทั้งมีข้อจำกัดน้อยมากกับโหลดในระบบ

วงจรแอคทีฟฟิเตอร์ที่นำมาปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆได้ดังนี้

1. วงจรแอคทีฟฟิเตอร์แบบฉีดกระแสฮาร์โมนิกส์(Harmonic Current Injection)
2. วงจรแอคทีฟฟิเตอร์แบบปริเรกกูเลเตอร์(Preregulator)

แต่เนื่องจากในปัจจุบันนี้ ประเทศไทยเรายังไม่สามารถผลิตแอคทีฟฟิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพเพียงพอขึ้นใช้งานเองภายในประเทศได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำเข้าอุปกรณ์ประเภทนี้จากบริษัทผู้ผลิตในต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก ดังนั้นทางกลุ่มจึงได้มีความคิดที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์แอคทีฟฟิเตอร์เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์แอคทีฟฟิเตอร์

ที่มีประสิทธิภาพดีและราคาถูกขึ้นใช้งานเองภายในประเทศ เพื่อที่จะได้เป็นการทดแทนการนำเข้าของสินค้าจากต่างประเทศต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อทำการศึกษาถึงพื้นฐานการทำงานของแอกทีฟฟิลเตอร์และทำการสร้างชุดต้นแบบของแอกทีฟฟิลเตอร์ขนาด 500 โวลต์-แอมป์ 1 เฟส

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงการทำงานและผลกระทบของแอกทีฟฟิลเตอร์ในการกรองสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบ 1 เฟสเรกติไฟเออร์(Single phase rectifier)

## 1.3 ประโยชน์

1.3.1 เพื่อเป็นแนวทางไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์แอกทีฟฟิลเตอร์ราคาถูกเพื่อการใช้งานเองภายในประเทศและทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศต่อไปในอนาคต

1.3.2 ได้เรียนรู้การทำงานของวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์



## บทที่ 2

### ทฤษฎีพื้นฐาน

กระแสของระบบ (Line current) ตามสภาวะปกติจะมีลักษณะของรูปคลื่นเป็น รูปคลื่นไซน์ (sine curve) แต่เนื่องจากคุณลักษณะของโหลด(Load characteristic)ที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่าย จะมีผลทำให้รูปคลื่น ไซน์ของกระแสของระบบเปลี่ยนแปลงหรือผิดเพี้ยนไปจากเดิม ซึ่งรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนนี้ จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของโหลดและในกรณีที่ยังไม่มีการชดเชยกระแสโดยวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์(Active Filter) กระแสของระบบที่ผิดเพี้ยนไป จะประกอบไปด้วยพจน์ต่างๆ ดังสมการ (2.1)

$$i_L(t) = i_o(t) + i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (2.1)$$

โดย  $i_L(t)$  คือ กระแสโหลด (Load Current)

$i_o(t)$  คือ องค์ประกอบกระแสตรง (DC Component )

$i_p(t)$  คือ กระแสที่อินเฟสกับแรงดันของแหล่งจ่ายหรือกระแสแอกทีฟ (Active Current)

$i_q(t)$  คือ กระแสรีแอกทีฟ ( Reactive Current )

$i_h(t)$  คือ กระแสฮาร์โมนิกส์ ( Harmonic Current )

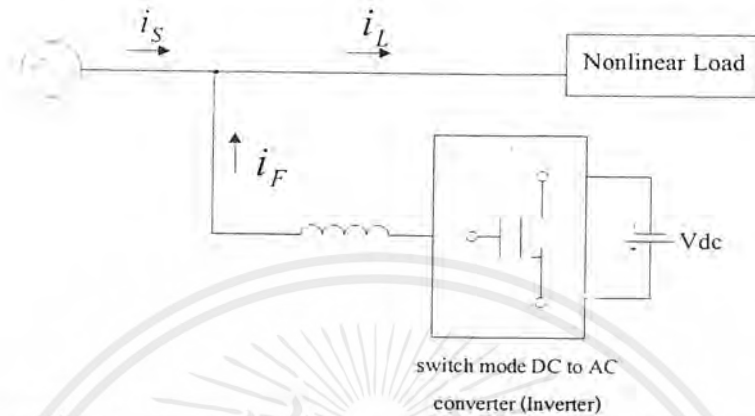
ซึ่งในสมการ(2.1)นี้จะเห็นว่า กระแสของโหลดหรือกระแสของระบบในขณะนี้จะขึ้นผลรวมของกระแสในลักษณะต่างๆประกอบด้วย ส่วนประกอบของกระแสตรง กระแสอินเฟสหรือกระแสแอกทีฟ กระแสรีแอกทีฟ และกระแสฮาร์โมนิกส์ และยังสามารพิจารณาพจน์ต่างๆในสมการ(2.1)ให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้นเพื่อง่ายต่อความเข้าใจ ดังแสดงใน สมการ(2.2)

$$i_h(t) = I_o + I_p \cos \omega t + I_q \sin \omega t + \sum_{j=1}^{\infty} I_{2j} \cos(2j\omega t + \phi_{2j}) + \sum_{k=1}^{\infty} I_{2k+1} \cos[(2k+1)\omega t + \phi_{2k+1}] \quad (2.2)$$

โดยที่ผลรวมซิกมาเร่( $\Sigma$ )ของพจน์ที่หนึ่งและพจน์ที่สอง จะแสดงถึงฮาร์โมนิกส์ลำดับคู่และฮาร์โมนิกส์ลำดับคี่ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของสมการในรูปแบบนี้เป็นลักษณะของสมการของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไหลโดยทั่วไป อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติส่วนประกอบของกระแสตรงในกระแสไหลนั้นตามปกติค่านี้นี้จะมีค่าน้อยมากหรือไม่เลย



รูปที่ 2.1 ไลอะแกรมเส้นเดียวของแอกทีฟฟิลเตอร์แบบฉีดกระแสกลับ

ในระบบโดยทั่วไปในส่วนประกอบต่างๆของกระแสไหลจะมีเพียงส่วนประกอบเพียงหนึ่งเดียวที่แหล่งจ่าย(Main)ในรูปที่ 2.1 ควรจะจ่ายให้แก่ภาระคือ กระแสอินเฟสหรือกระแสแอกทีฟ ซึ่งนั่นหมายความว่า แหล่งจ่ายต้องการจะจ่ายเพียงแค่กระแสแอกทีฟให้แก่ภาระเท่านั้น ซึ่งกระแสแอกทีฟก็คือ  $i_p(t) [I_p \cos(\omega t)]$  เพราะฉะนั้นจากเหตุผลข้างต้น กระแสที่นอกเหนือจากกระแสแอกทีฟนั่นก็คือ ส่วนประกอบของกระแสตรง, กระแสรีแอกทีฟและกระแสฮาร์โมนิกส์ต่างๆ จะถูกขจัดเซชจากแหล่งจ่ายอื่น ซึ่งนั่นก็คือวงจรขจัดเซชกระแสหรือวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์นั่นเอง ดังนั้นวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์จะจ่ายกระแสที่นอกเหนือจากกระแสแอกทีฟให้แก่โหลดแทนแหล่งจ่าย(Main)

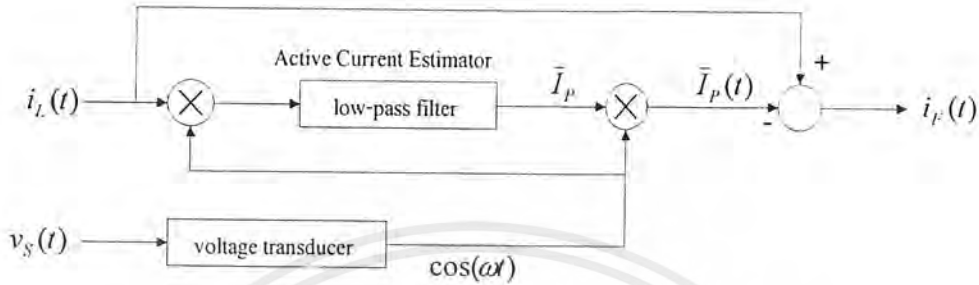
กระแสจากวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ที่ฉีดกลับเข้าสู่ระบบนี้จะเรียกว่า กระแสชดเชย( $I_F$ ) ซึ่งกระแสชดเชยนี้จะไม่มีส่วนประกอบของกระแสอินเฟสอยู่เลยจะมีเพียงแค่ส่วนประกอบของกระแสตรง กระแสรีแอกทีฟและกระแสฮาร์โมนิกส์ต่างๆอยู่เท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนโดยการลบพจน์ของกระแสแอกทีฟออกจากกระแสไหลในสมการ(2.2) แสดงได้ในสมการ(2.3)

$$i_f(t) = i_L(t) - i_p(t) = i_L(t) - I_p \cos \omega t \quad (2.3)$$

จากสมการ(2.3) ค่าของ  $I_p$  จะเป็นค่าของขนาดของกระแสแอกทีฟ ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการประมาณค่าออกมาและ  $\cos(\omega t)$  จะเป็นแรงดันอ้างอิงแทนด้วยคลื่นแรงดันรูปไซน์ที่มีขนาดหนึ่งหน่วยและมีเฟสเดียวกัน(In-phase)กับเฟสของแรงดันแหล่งจ่าย(Main)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการที่จะให้ได้มาซึ่งค่า  $i_p$  โดยการประมาณค่านั้นสามารถแสดงให้เห็นได้ในวงจรตามรูปที่(2.2)



รูปที่ 2.2 โค้ดอะแกรมลูปเปิด(Open loop)ที่ใช้คำนวณสร้างกระแสชดเชย

ในรูปที่ 2.2 ส่วนของวงจรส่วนแรก จะนำอินพุตสองส่วนมาทำการคูณกันซึ่งอินพุตทั้งสองส่วนคือ  $i_L(t)$  และ  $\cos(\omega t)$  ตามลำดับ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังสมการ(2.4)

$$\begin{aligned}
 i_L(t) \cos \omega t &= I_O \cos \omega t + \frac{I_p}{2} (1 + \cos 2\omega t) + \frac{I_q}{2} \sin \omega t \\
 &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_{2k+1}}{2} \{ \cos[(2k+2)\omega t + \phi_{2k+1}] + \cos[2k\omega t + \phi_{2k+1}] \} \\
 &+ \sum_{j=1}^{\infty} \frac{I_{2j}}{2} \{ \cos[(2j+1)\omega t + \phi_{2j}] + \cos[2j\omega t + \phi_{2j}] \}
 \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อผ่านวงจรคูณแล้วผลลัพธ์ที่ได้ ค่าของส่วนประกอบของกระแสตรงจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และผลลัพธ์ของวงจรคูณในสมการ(2.4) จะผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน(Low pass filter) ซึ่งตั้งความถี่คัตออฟ(Cut off frequency)ไว้ค่าหนึ่งซึ่งวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะกรองความถี่ทั้งหมดและจะเหลือเพียงแต่ค่าของส่วนประกอบของกระแสตรงในเอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งค่าของส่วนประกอบของกระแสตรงตอนนี้จะมีค่าเป็น  $\bar{I}_p$  ซึ่งเป็นค่าประมาณของขนาดของกระแส  $i_p(t)$  และค่าที่ได้จะถูกนำไปคูณกับแรงดันอ้างอิง( $\cos(\omega t)$ )อีกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นเฟสเดียวกันกับแรงดันของแหล่งจ่าย คือกระแสอินเฟสของแหล่งจ่ายนั่นเอง และกระแสไหลลุดจะถูกลบด้วยกระแสอินเฟสนี้ ซึ่งในที่สุดผลลัพธ์ที่ได้คือ กระแสชดเชย

สำหรับวิธีการหาค่ากระแสอินเฟสดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งในรูปวงจรรูปที่ 2.2 จะเป็นวงจรแบบลูปเปิด(open loop) ซึ่งในวงจรแบบลูปเปิดนี้ จะทำให้เกิดปัญหาต่างๆดังนี้

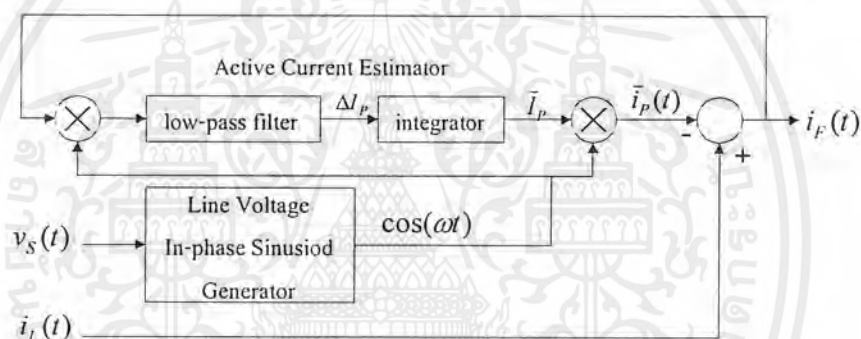
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ขนาดแอมพลิจูดของแรงดันอ้างอิง ( $\cos(\omega t)$ ), ค่าแฟกเตอร์การคูณ (scaling factor) ของวงจรรคูณ, และอัตราขยายของวงจรรวมที่ต่ำผ่าน (low-pass filter gain) จะมีผลกระทบต่อค่าของกระแสแอกทีฟที่ที่ประมาณ ทำให้เกิดความผิดพลาด (error) ขึ้น

2. ค่าของการเลื่อนเฟส (phase shift) เพียงเล็กน้อยของแรงดันอ้างอิงจะมีผลต่อความเที่ยงตรงของวงจร

3. ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันแหล่งจ่ายจะมีผลทำให้สัญญาณแรงดันอ้างอิงในวงจรผิดเพี้ยนไปทำให้ความเที่ยงตรงลดลง

เนื่องจากปัญหาทั้ง 3 ประการดังกล่าว จะทำให้ความแม่นยำในการประมาณค่า  $I_p(t)$  ลดน้อยลง ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงเป็น ไลอะแกรมแบบลูปปิด (Close Loop) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ไลอะแกรมแบบลูปปิด (Close Loop) ที่ใช้คำนวณกระแสชดเชย

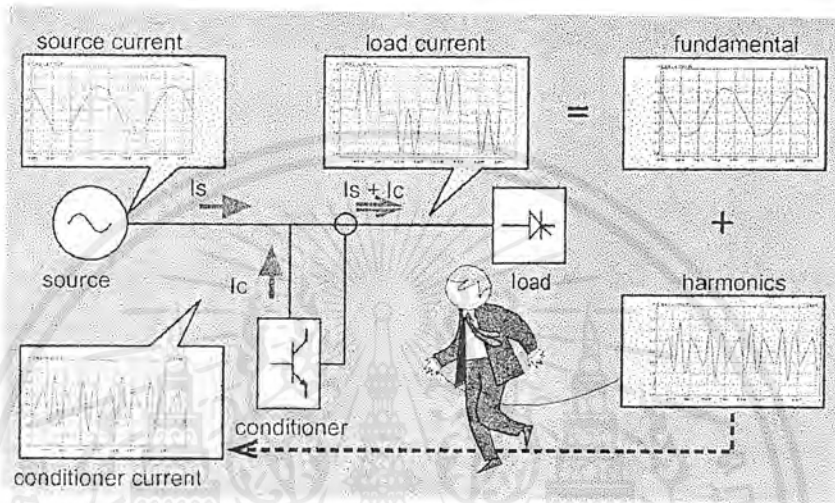
จากรูปที่ 2.3 เป็นการปรับปรุงให้มีลูปป้อนกลับ (Feedback Loop) ของ  $I_p(t)$  และบล็อกอินทิเกรตเตอร์ (Integrator Block) เพื่อตรวจสอบว่าวงจรเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) หรือยัง โดยถ้า  $\Delta I_p$  ก่อนเข้าบล็อกอินทิเกรตเป็นศูนย์เมื่อไรแสดงว่าวงจรได้เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว ทำให้ค่า  $I_p(t)$  ที่ประมาณได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นค่าของ  $I_p(t)$  จากไลอะแกรมแบบลูปปิดจะสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับไลอะแกรมแบบลูปเปิดได้คือ

1. ขนาดแอมพลิจูดของแรงดันอ้างอิง ( $\cos(\omega t)$ ), สเกลแฟกเตอร์ (Scaling Factor) ของการคูณ และค่าขยาย (Gain) ของวงจรรวมที่ต่ำผ่าน จะไม่มีผลต่อขนาด  $I_p(t)$

2. ในไลอะแกรมแบบลูปปิดจะมี Line Voltage In-phase Sinusoid Generator เป็นตัวสร้างแรงดันอ้างอิงหรือ ค่าแรงดันอ้างอิงทางด้านเอาต์พุตที่สามารถปรับเปลี่ยนตามความถี่ของแรงดันอินพุตได้ในช่วงกว้าง

นอกจากนั้นการประมาณค่าของกระแสแอกที่ฟยังสามารถใช้วัดประสิทธิภาพของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้อีกด้วย

กระแสชดเชย  $I_F(t)$  ที่ได้จะถูกนำไปสร้างสัญญาณที่จะใช้เป็นสัญญาณขับให้อินเวอร์เตอร์เพื่อทำหน้าที่สวิตซ์ซึ่งส่วนกระแสชดเชยกลับคืนสู่ระบบดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบที่มีการปรับปรุงคุณภาพของระบบโดยใช้แอกที่ฟฟิลเตอร์

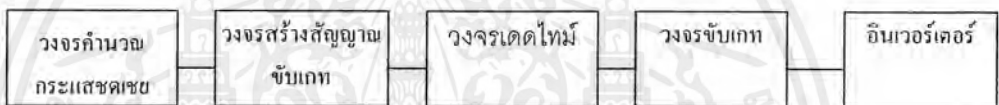
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### โครงสร้างและการทำงานของวงจร

#### 3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบ

ในการคิดกระแสชดเชยกลับคืนสู่ระบบของแอกทีฟฟิลเตอร์จะใช้ชุดอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกระแสชดเชยนั้นกลับคืนสู่ระบบ โดยสัญญาณกระแสที่ต้องการชดเชยจะถูกนำมาสร้างสัญญาณสวิตซ์ให้กับชุดอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสคืนสู่ระบบต่อไป โดยได้แสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมไว้ในรูปที่ 3.1

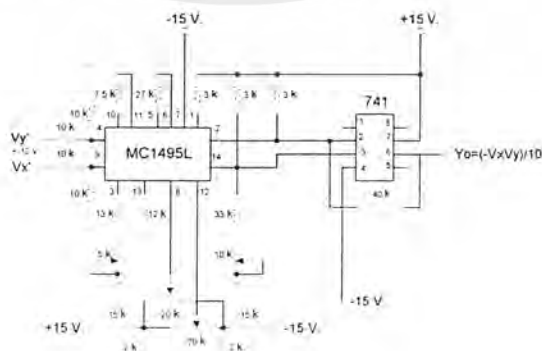


รูปที่ 3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของวงจร

#### 3.1.1 วงจรคำนวณกระแสชดเชย

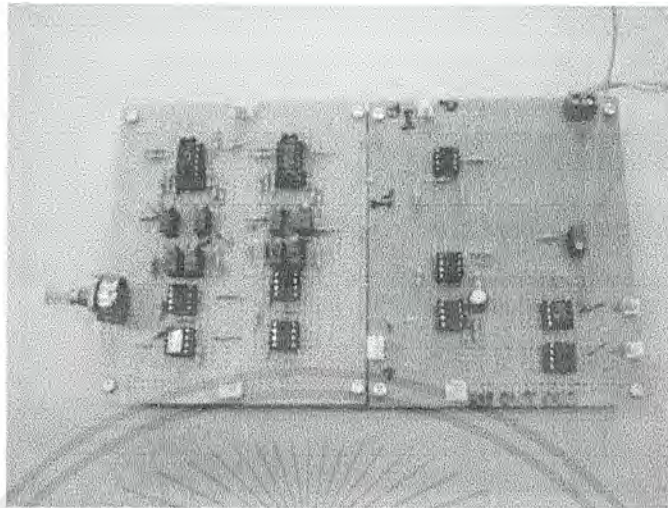
วงจรนี้จัดเป็นหัวใจหลักในการทำงานเพราะเป็นวงจรที่จะนำใช้ในการหากระแสชดเชยเพื่อคิดกลับคืนสู่ระบบดังแสดงไว้ตามรูปที่ 3. 12 โดยมีส่วนสำคัญของวงจรมีดังนี้

- วงจรคูณในการทำงานนี้จะอาศัยไอซี MC1495L เป็นตัวคูณ โดยไอซี MC1495L เป็นที่จะต้องมีการปรับค่าเริ่มต้นของไอซี โดยมีวิธีการปรับค่าเริ่มต้นก่อนใช้งานดังที่แสดงไว้ในดาต้าชีท (Data sheet) ในภาคผนวก ข.



รูปที่ 3.2 วงจรคูณ

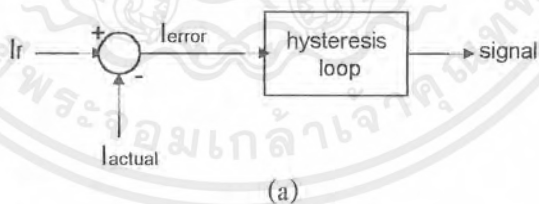
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



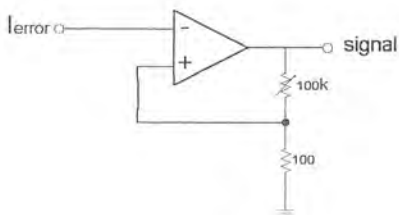
รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายวงจรคำนวณกระแสชดเชย

3.1.2 วงจรสร้างสัญญาณขั้วเกท

เมื่อได้สัญญาณของกระแสชดเชยจากส่วนควบคุมของวงจรแอกทีฟเฟลเตอร์แล้ว สัญญาณของกระแสชดเชยนั้นจะถูกนำมาสร้างสัญญาณขั้วเพื่อใช้ในการขับเกทของ ไอจีบีที (IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สวิตชิงของชุดอินเวอร์เตอร์ เพื่อสวิตชิงชดเชยคืนสู่ระบบ โดยในปริยญาณิพนธ์นี้ อาศัยหลักการของอินเวอร์เตอร์ชนิดควบคุมกระแส โดยกระแสฝั่งขาออกของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าคงที่ตามสัญญาณอ้างอิงเข้ารูปที่ 3.3 แสดงวงจรฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis)

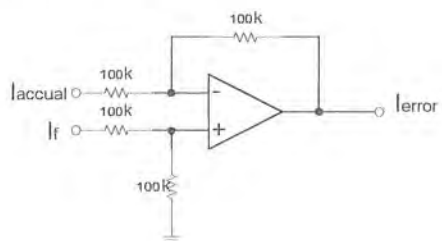


รูปที่ 3.4(a) บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมกระแส



(b)

รูปที่ 3.4(b) วงจรฮิสเตอร์รีซิส



(c)

รูปที่ 3.4(c) วงจรเปรียบเทียบกระแส

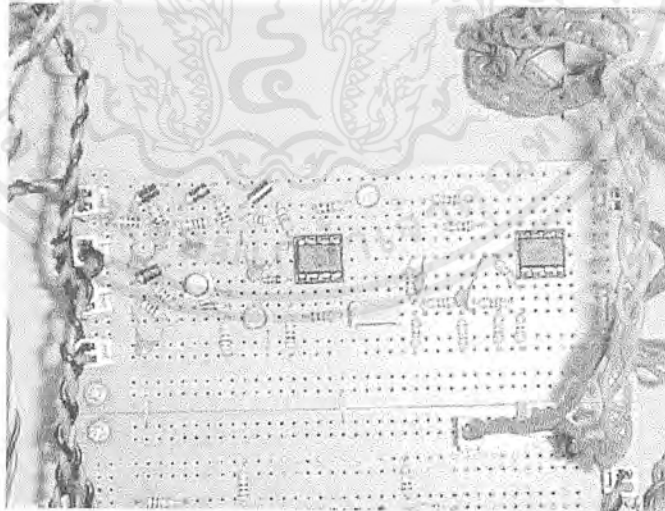
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจร จะมีการป้อนกลับของกระแสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ ( Actual current ) มาลบกับกระแสขาเข้าที่ได้จากชุดคำนวณกระแสขาเข้า สัญญาณที่ได้ออกมาจะผ่านเข้าชุดฮีสเตอร์รีซิส เพื่อสร้างสัญญาณที่จะนำไปขับเกทของไอจีบีที

### 3.1.3 วงจรสร้างสัญญาณเดดไทม์ ( Dead Time )

ลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ไอจีบีทีทั้ง 4 ตัวจะทำงานเป็นจังหวะ ในการทำงานลักษณะนี้ อาจมีช่วงที่ไอจีบีทีที่อยู่บน (Branch) เดียวกันทำงานพร้อมกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการช็อตบน Branch ที่ความเสียหายให้วงจรได้ ดังนั้นจึงต้องสร้างวงจรเพื่อป้องกันการเสียหายจากกรณีนี้

วงจรเดดไทม์ที่ใช้ในปริณูณานิพนธ์นี้เลือกใช้ไอซีเบอร์ LM 393 จำนวน 2 ตัว เป็นตัวสร้างสัญญาณเดดไทม์ โดยที่ไอซีตัวแรกจะรับสัญญาณจากชุดฮีสเตอร์รีซิสเข้ามา 1 สัญญาณ เพื่อสร้างสัญญาณออกทางด้านเอาต์พุต 2 สัญญาณที่กลับเฟสกัน ส่วนไอซีตัวที่ 2 จะเป็นตัวสร้างให้สัญญาณทั้ง 2 ที่ได้จากการผ่านไอซีตัวแรกมาแล้วสามารถปรับรูปคลื่นให้เหมือนกันได้ โดยการปรับความต้านทานปรับค่าได้ จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวช่วยขยายสัญญาณ โดยวงจรได้แสดงไว้ในรูปที่ 3. 11 วงจรสร้างสัญญาณเดดไทม์



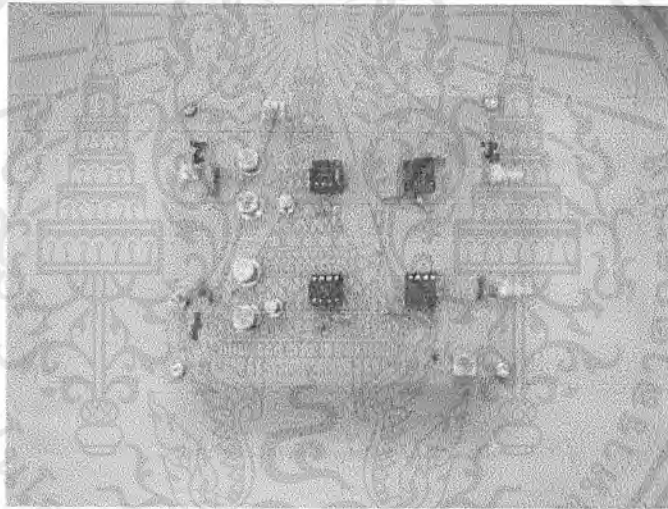
รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายวงจรสร้างสัญญาณเดดไทม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 วงจรแยกกราวด์และวงจรขับเกท

เมื่อได้สัญญาณขับเกทที่มีเดคไทม์แล้ว จะนำมาผ่านวงจรแยกกราวด์ก่อนเข้าสู่วงจรขับ เพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนต่างๆ จากส่วนกำเนิดสัญญาณไม่ให้ไปรบกวนวงจรในส่วนการขับ อุปกรณ์สวิตซิ่ง ซึ่งในปริยญาณิพนธ์นี้เลือกใช้ไอซี Photocoupler เบอร์ 6N136 ของ SHARP

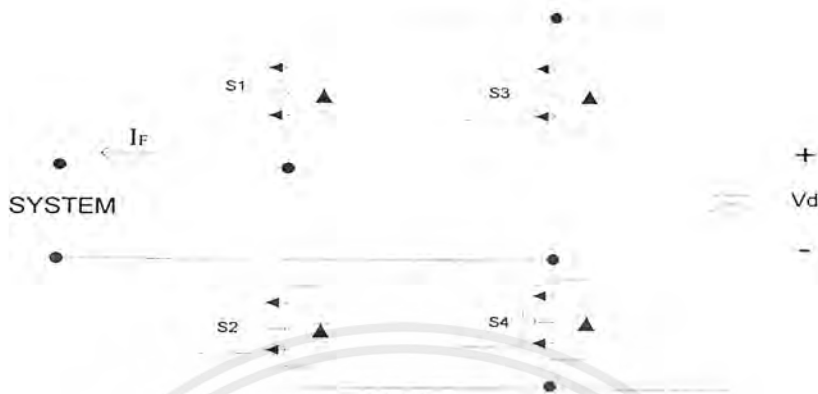
หลังจากสัญญาณผ่านส่วนแยกกราวด์เรียบร้อยแล้ว สัญญาณจะถูกป้อนให้กับวงจรขับเกทเพื่อขยายสัญญาณก่อนจะนำไปขับอุปกรณ์สวิตซิ่งต่อไป รูปที่ 3.10 เป็นรูปที่แสดงวงจรแยกกราวด์และ ส่วนของวงจรขับเกท โดยจะเห็นว่าส่วนของชุดขับเกทกับส่วนสร้างสัญญาณจะถูกแยกกราวด์ออกจากกัน เอาท์พุทที่ได้จะเป็นสัญญาณพีคบัลลิวเอ็ม  $\pm 15$  โวลต์ ที่จะนำไปใช้ขับเกทของไอจีบีทีใน ส่วนของวงจรกำลังต่อไป



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายวงจรแยกกราวด์และวงจรขับเกท

### 3.1.5 วงจรกำลัง (Power Circuit)

ในส่วนของวงจรกำลังนี้ จะใช้ไอจีบีที เบอร์ MGP20N60 ของ MOTOROLA เป็นอุปกรณ์สวิตซิ่งของอินเวอร์เตอร์ โดยการทำงานของอินเวอร์เตอร์นี้จะรับสัญญาณขับเกทจากวงจรเดคไทม์ มาสั่งให้ไอจีบีทีแต่ละตัวทำงาน โดยรูปของวงจรกำลังแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ส่วนของวงจรกำลัง

จากรูปที่ 3.7  $I_F$  คือกระแสชดเชย และ  $V_d$  คือขนาดแรงดันที่ใช้ในวงจรกำลังนี้ โดยมีการทำงานของไอจีบีทีแต่ละตัวจะมีการทำงานตามตารางที่ 3.1 มีรูปสัญญาณที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.8

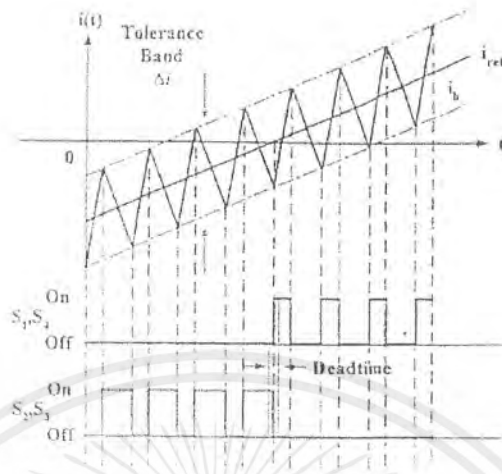
สัญญาณอ้างอิง ( $I_{ref}$ )	กระแสป้อนกลับ ( $I_b$ )	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
$I_{ref} > 0$	$I_b > I_{ref} + 1/2 \Delta I$	Off	Off	Off	Off
	$I_b < I_{ref} + 1/2 \Delta I$	On	Off	Off	On
$I_{ref} < 0$	$I_b > I_{ref} + 1/2 \Delta I$	Off	On	On	Off
	$I_b < I_{ref} + 1/2 \Delta I$	Off	Off	Off	Off

ตารางที่ 3.1 การทำงานของไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์

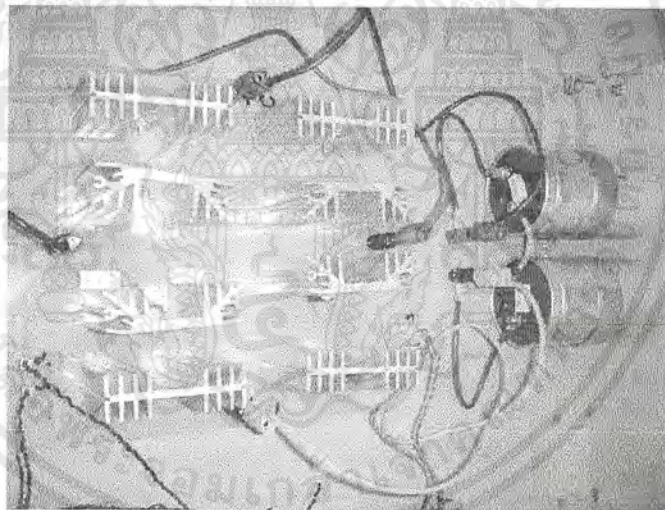
โดยที่  $\Delta I$  คือ ค่าขอบเขตของฮิสเตอร์รีซิส ที่ได้ออกแบบไว้

$I_{ref}$  คือ ค่าของกระแสชดเชยที่ได้จากวงจรสร้างกระแสชดเชย  $I_F$

$I_b$  คือ ค่าของกระแสป้อนกลับจากกระแสชดเชยที่สวิตช์ซึ่งออกจากอินเวอร์เตอร์

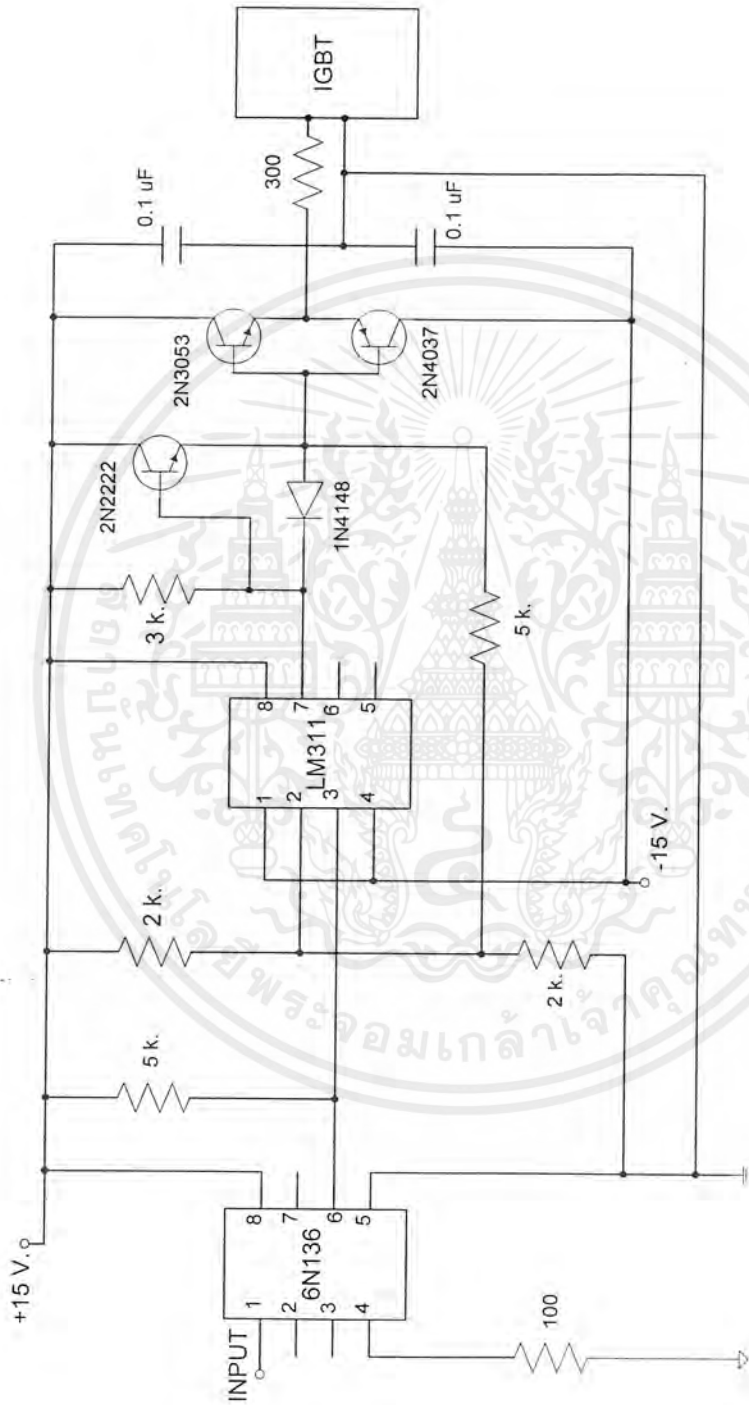


รูปที่ 3.8 ตัวยุทธการทํางานของไอซีบีที



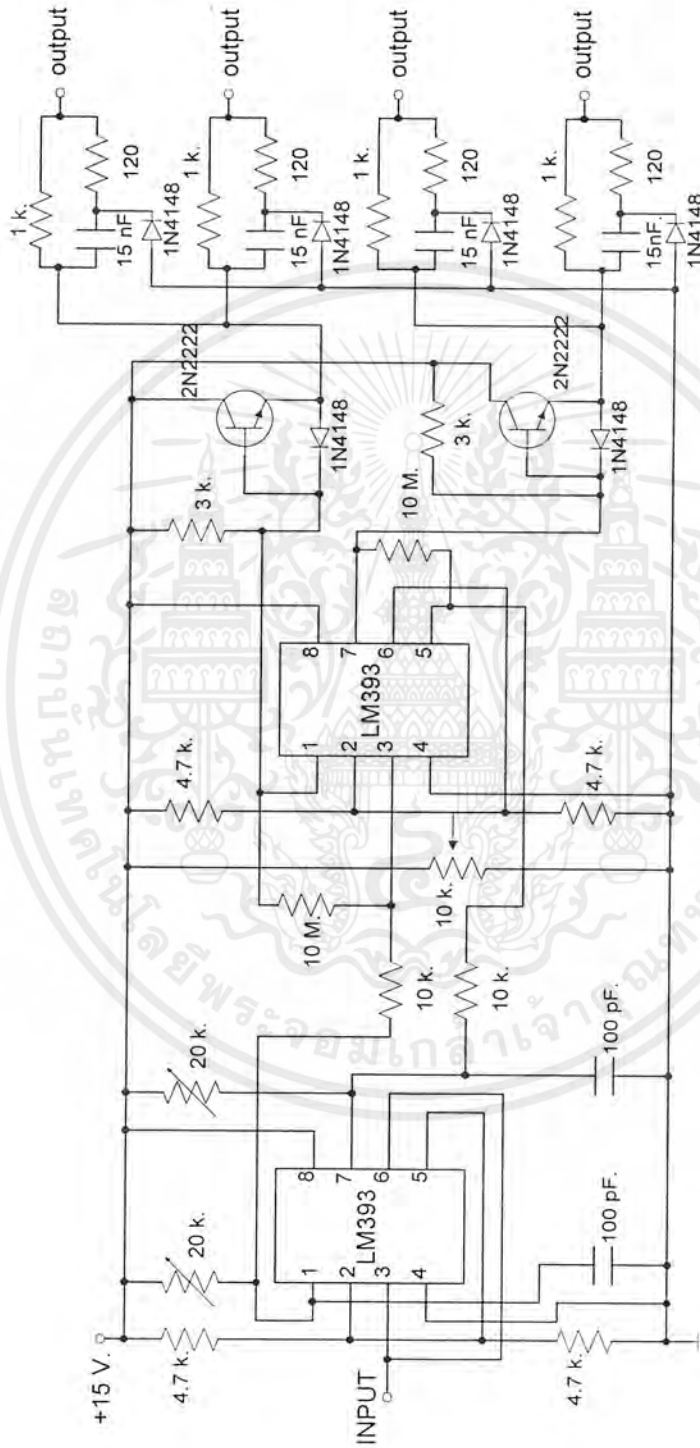
รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายวงจรกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



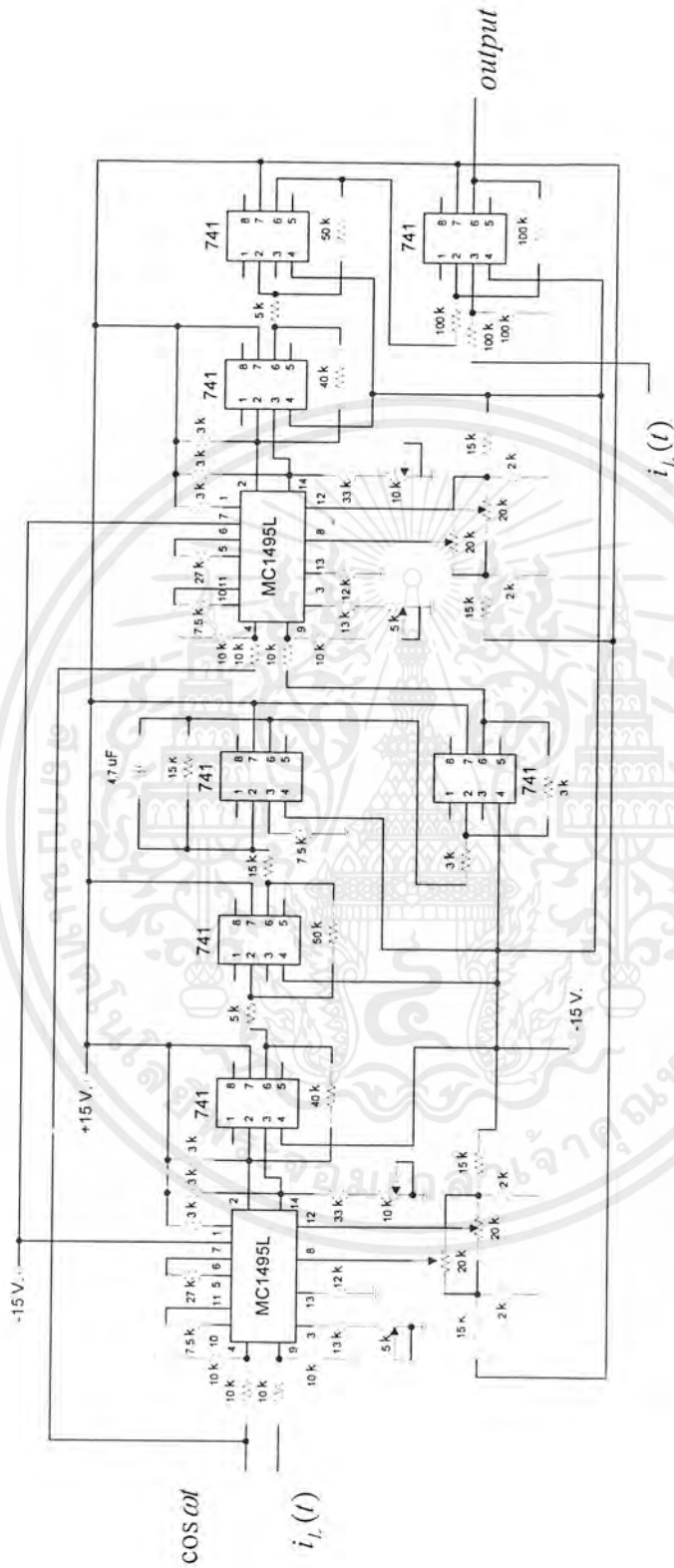
รูปที่ 3.10 วงจรแยกกราวด์และวางรขั้วเกท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



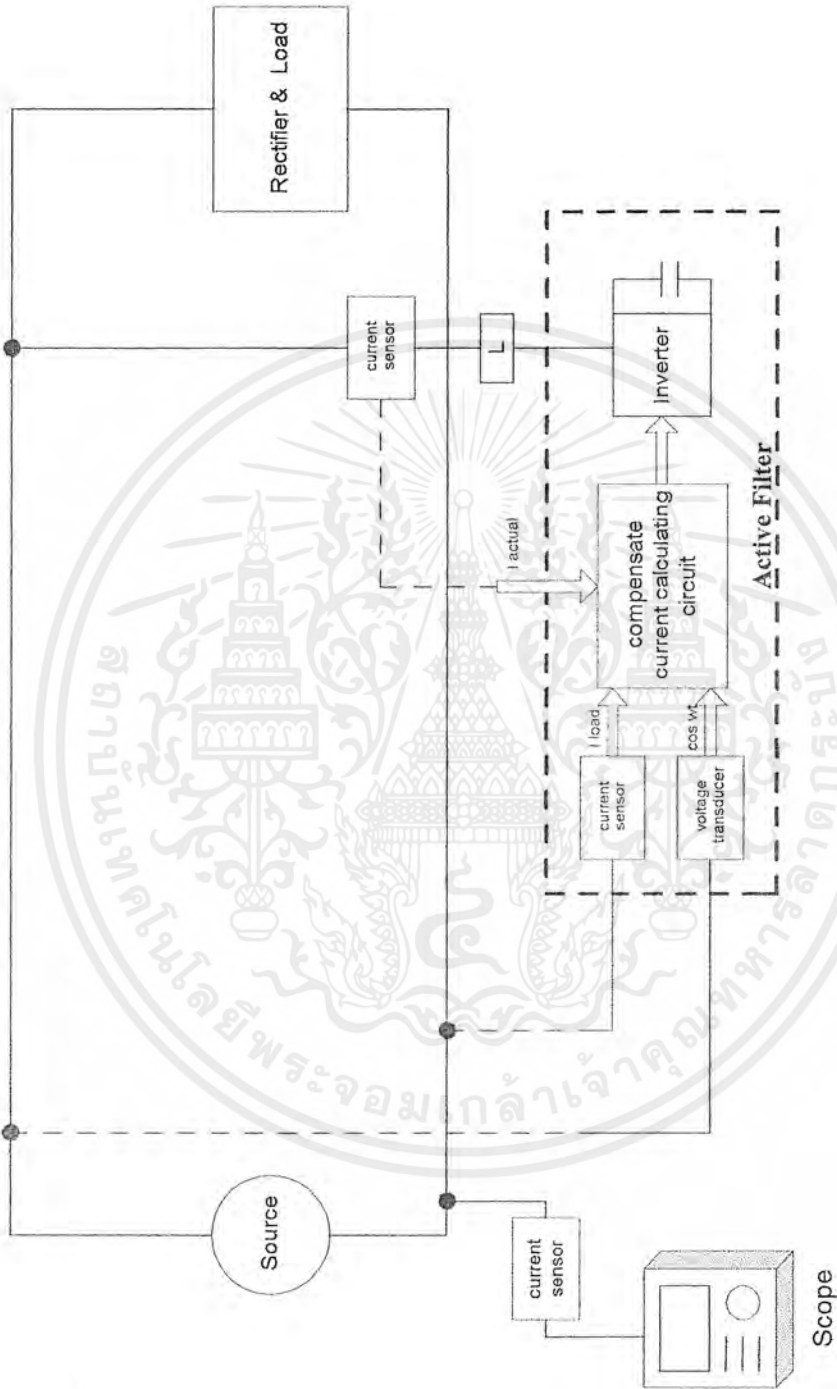
รูปที่ 3.11 วงจรสร้างสัญญาณเดคไทม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 วงจรก้านวมกระแสสเตชเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเป็นเอกสารอื่นอย่างใดจนถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



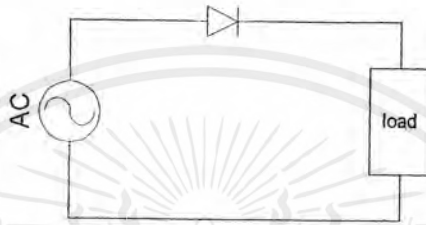
รูปที่ 3.13 บด็อกไดอะแกรมการทำงานโดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

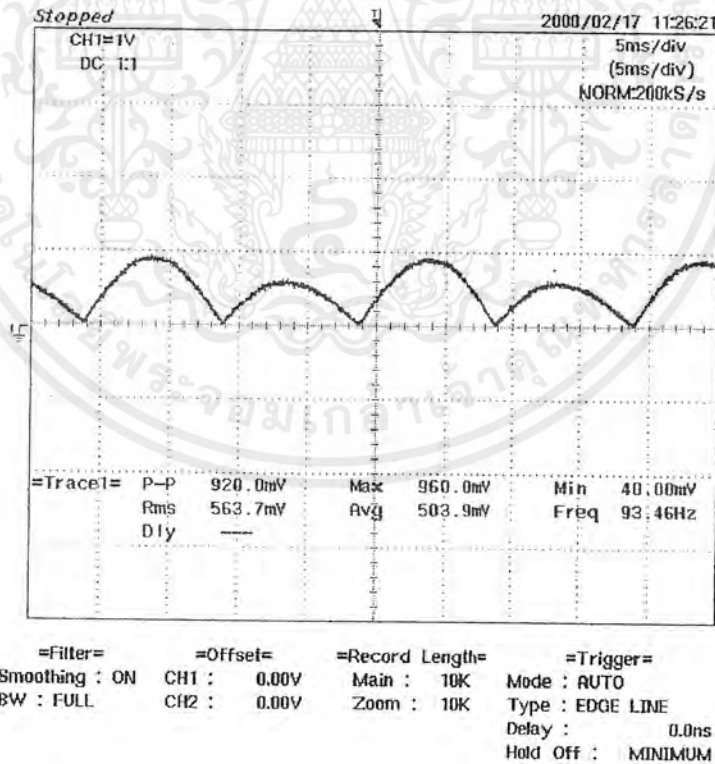
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองโดยใช้โหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น(Half bridge rectifier)



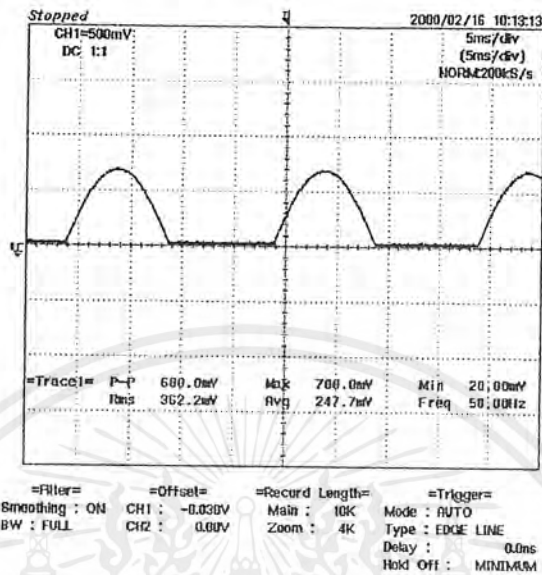
รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ในการทดลอง โหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น



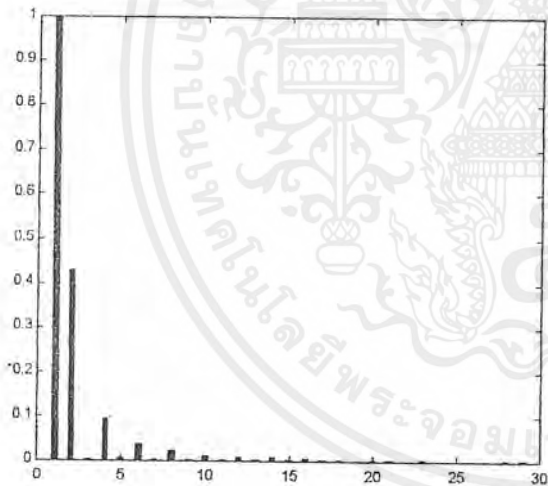
รูปที่ 4.2 กระแสขดเซซของโหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

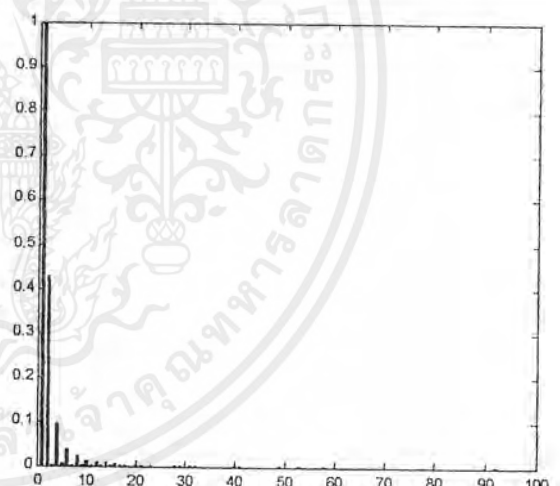
## 4.1.1 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 20 V.



(a)



(b)



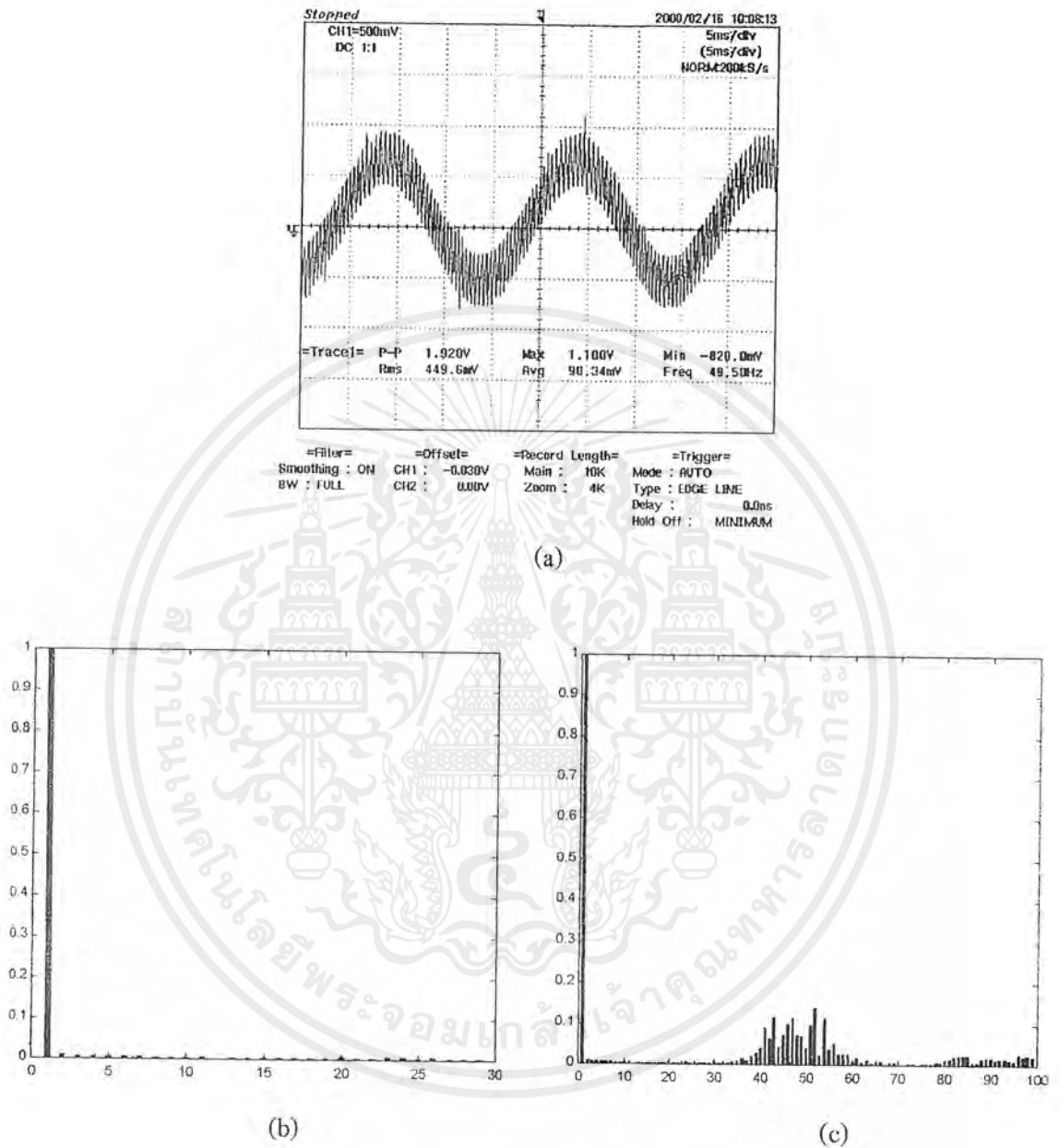
(c)

รูปที่ 4.3(a) กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 20 V.

รูปที่ 4.3(b) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 20 V. โดยมี%THD=44.19%

รูปที่ 4.3(c) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 20 V. โดยมี%THD=44.20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



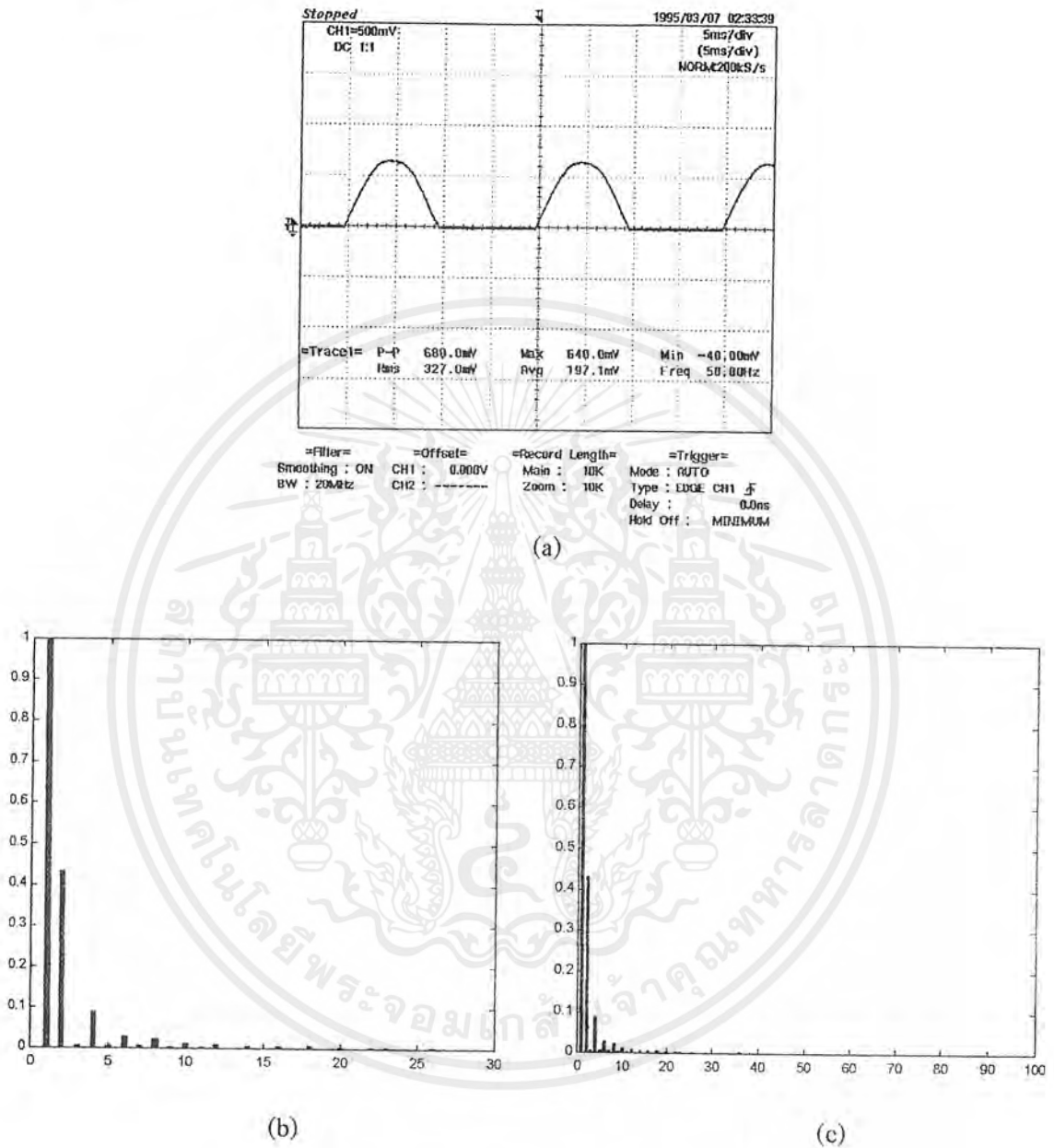
รูปที่ 4.4(a) กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 20 V.

รูปที่ 4.4(b) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 20 V. โดยมี%THD=2.25%

รูปที่ 4.4(c) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 20 V. โดยมี%THD=35.74%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.2 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 50 V.

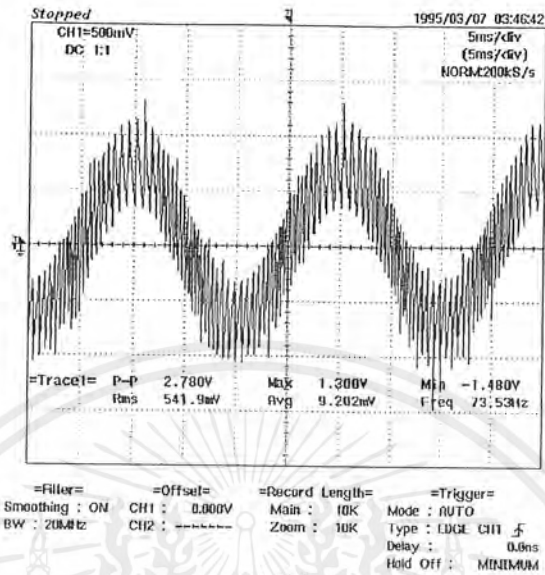


รูปที่ 4.5(a) กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 50 V.

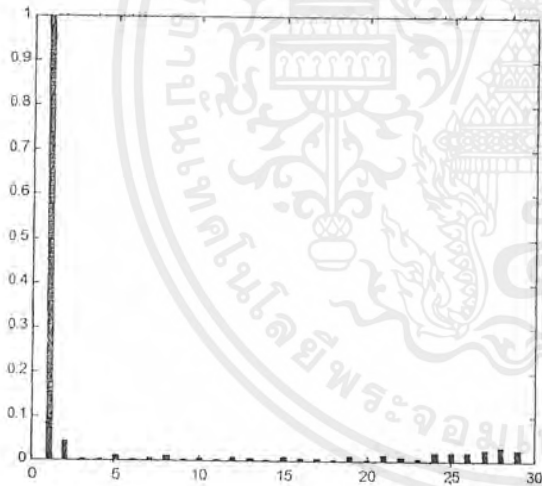
รูปที่ 4.5(b) ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=44.12%

รูปที่ 4.5(c) ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=44.13%

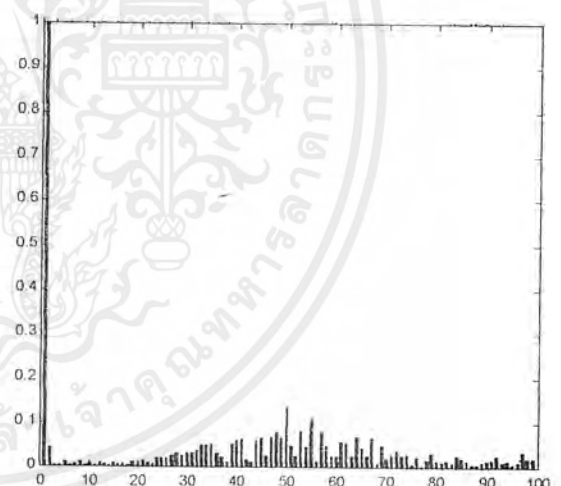
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



(c)

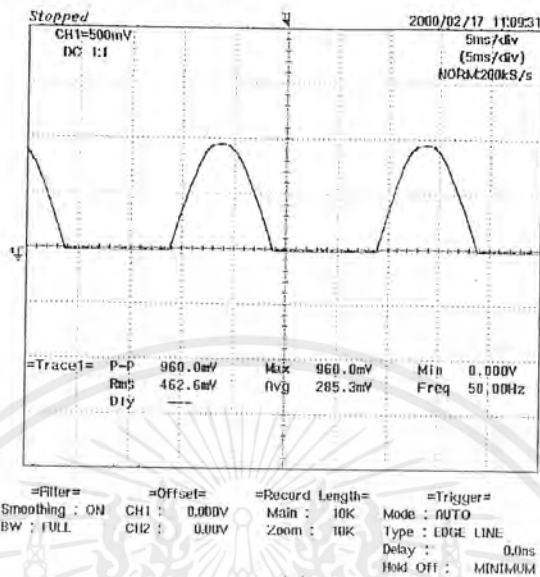
รูปที่ 4.6(a) กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 50 V.

รูปที่ 4.6(b) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=8.20%

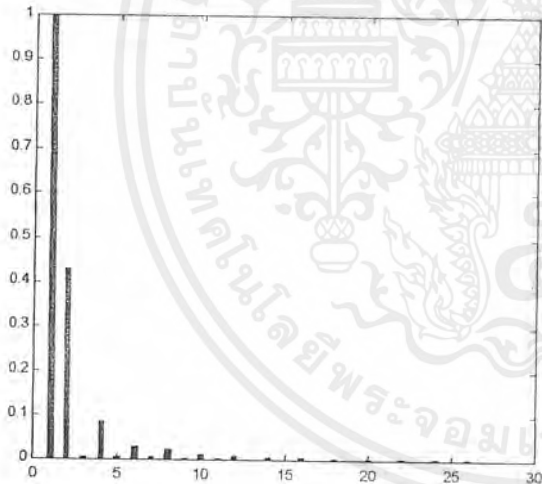
รูปที่ 4.6(c) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=37.63%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

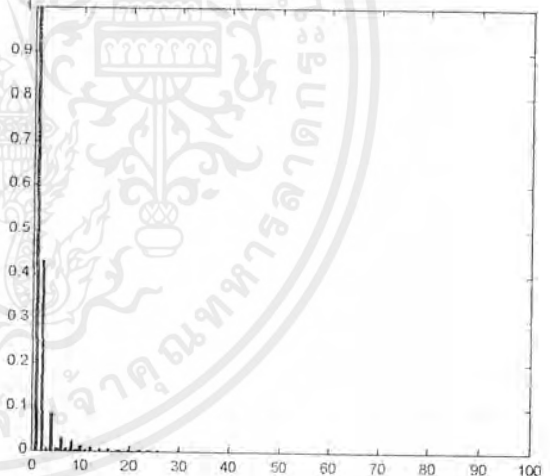
### 4.1.3 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 110 V.



(a)



(b)



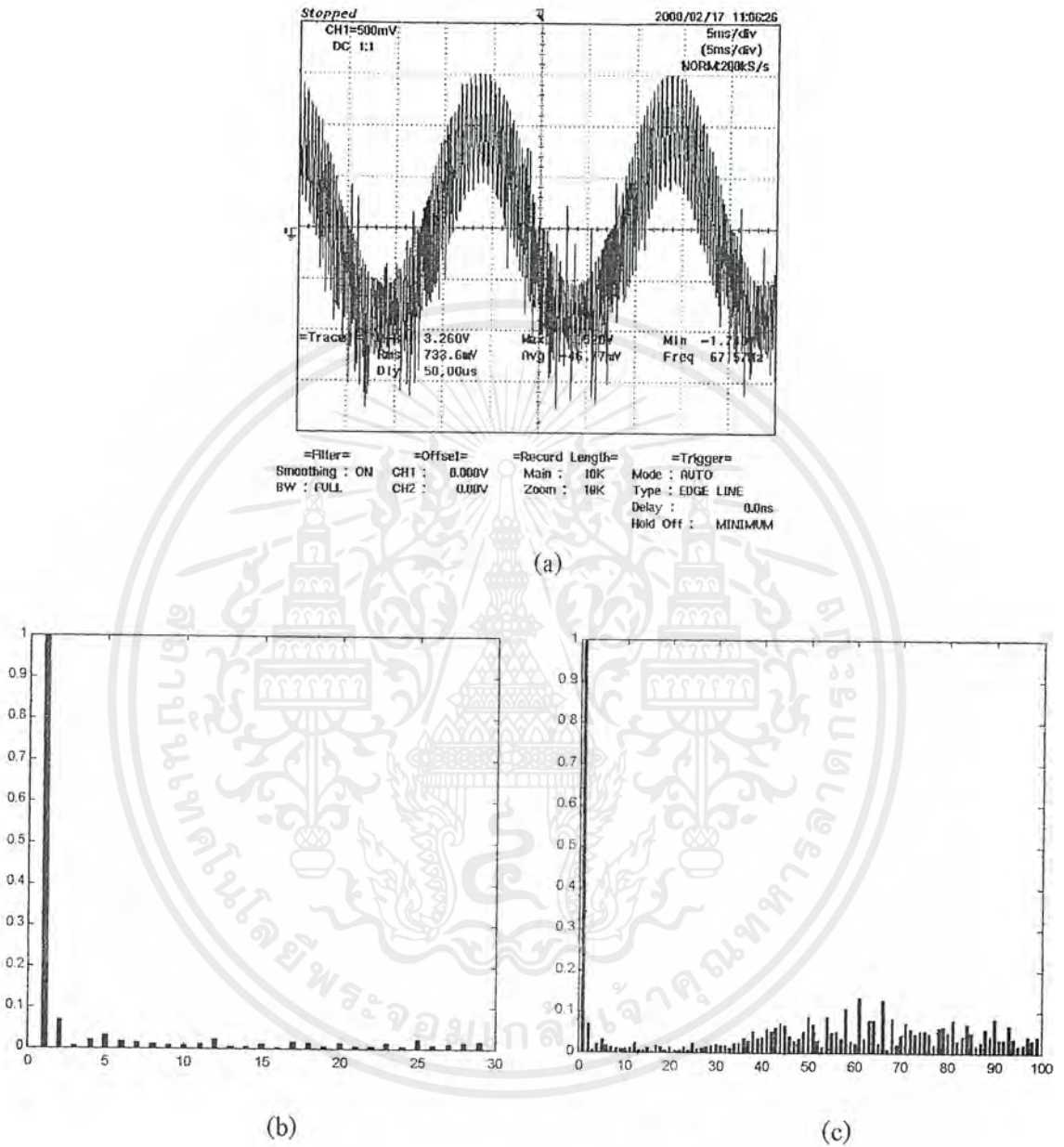
(c)

รูปที่ 4.7(a) กระจายของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 110 V.

รูปที่ 4.7(b) ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆของกระจายของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=43.84%

รูปที่ 4.7(c) ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆของกระจายของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=44.20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



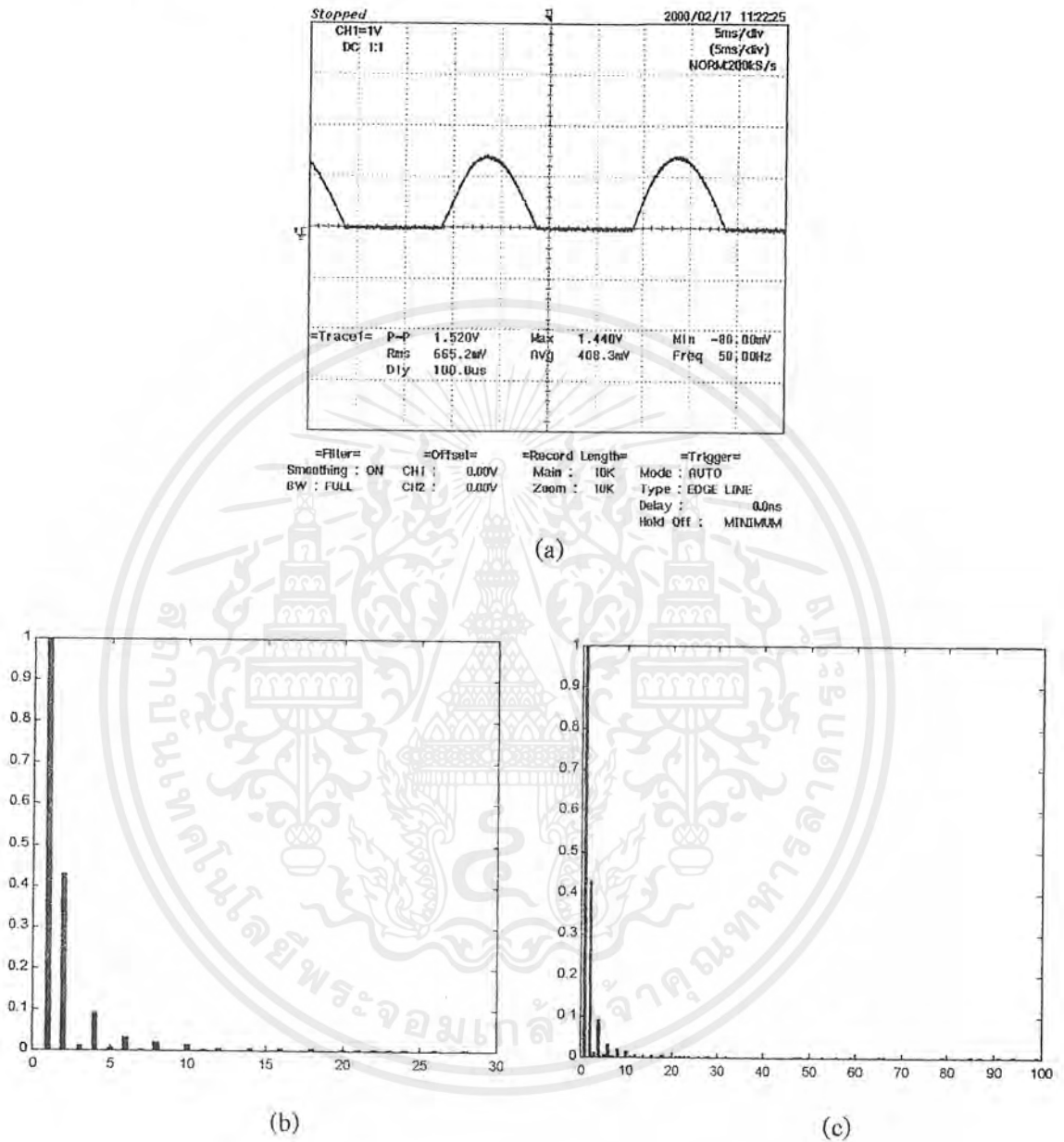
รูปที่ 4.8(a) กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 110 V.

รูปที่ 4.8(b) ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=10.17%

รูปที่ 4.8(c) ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=43.21%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 220 V.

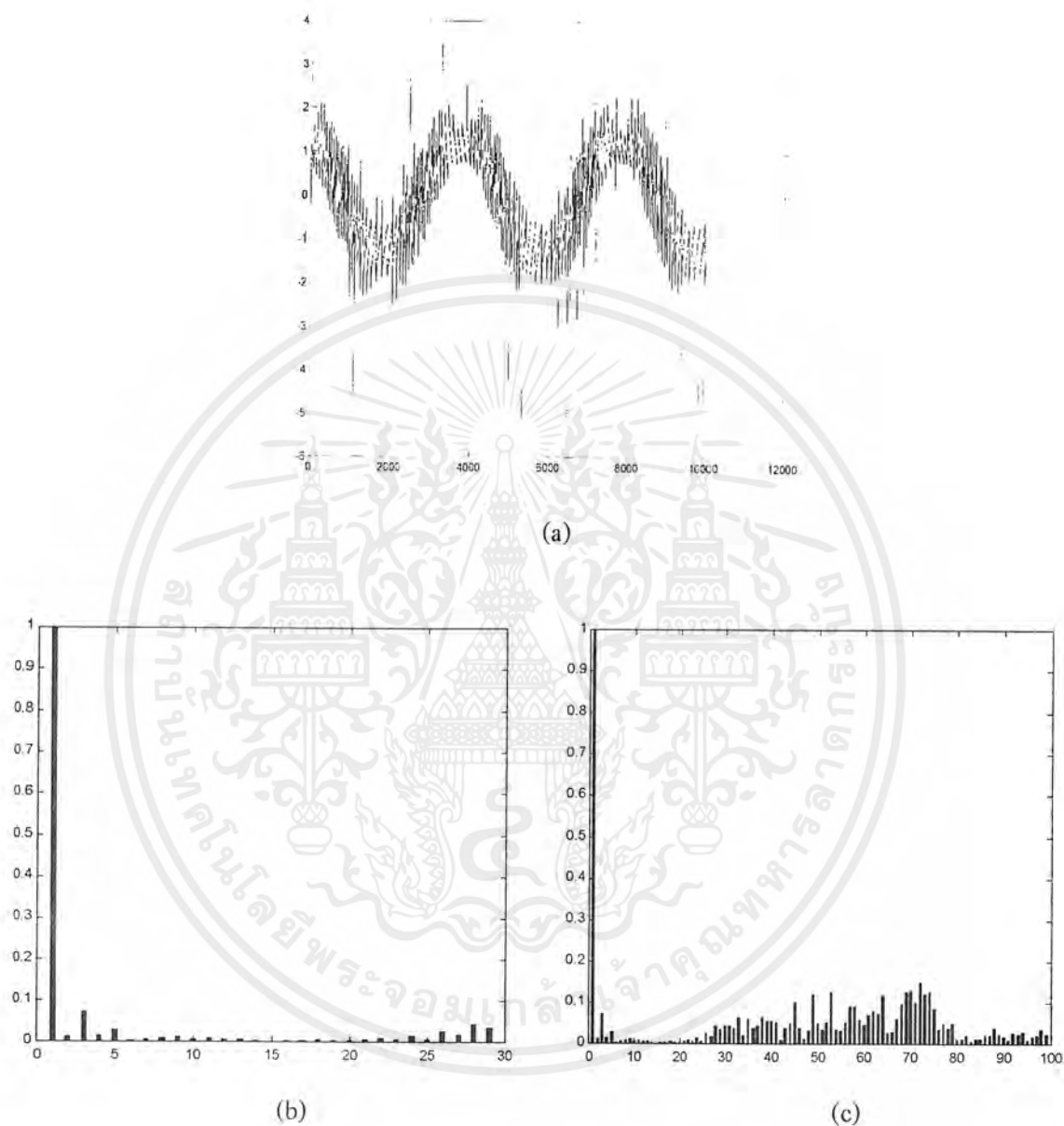


รูปที่ 4.9(a) กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 220 V.

รูปที่ 4.9(b) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 220 V. โดยมี%THD=43.99%

รูปที่ 4.9(c) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 220 V. โดยมี%THD=44.00%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



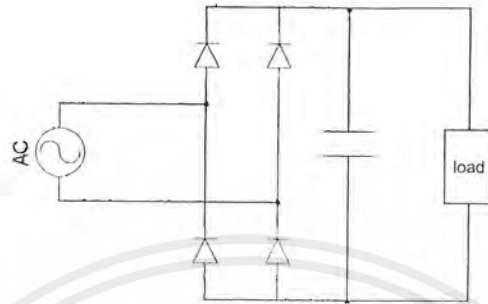
รูปที่ 4.10(a) กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 220 V.

รูปที่ 4.10(b) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชย โดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 220 V. โดยมี%THD=10.83%

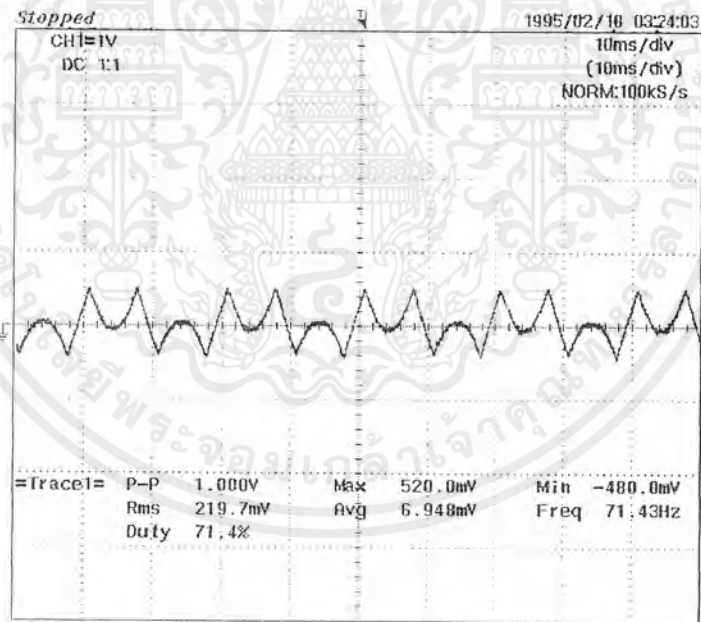
รูปที่ 4.10(c) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชย โดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 220 V. โดยมี%THD=53.54%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองโดยใช้โหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น(Full bridge rectifier)



รูปที่ 4.11 วงจรที่ใช้ในการทดลอง โหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

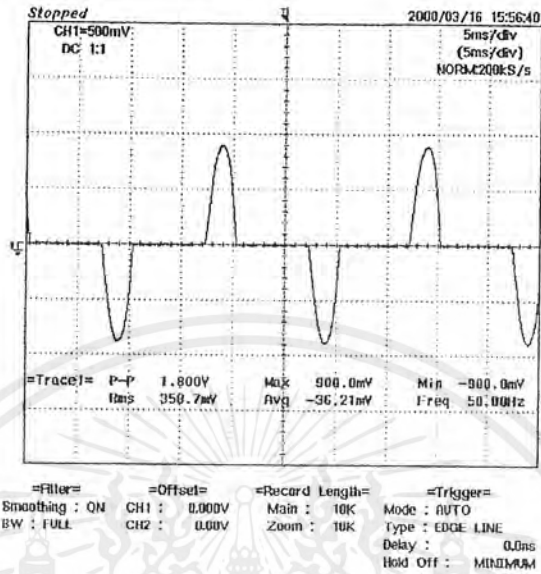


=Filter=	=Offset=	=Record Length=	=Trigger=
Smoothing : ON	CH1 : 0.12V	Main : 10K	Mode : AUTO
BW : FULL	CH2 : 0.00V	Zoom : 500	Type : EDGE LINE
			Delay : 0.0ns
			Hold Off : 0.2us

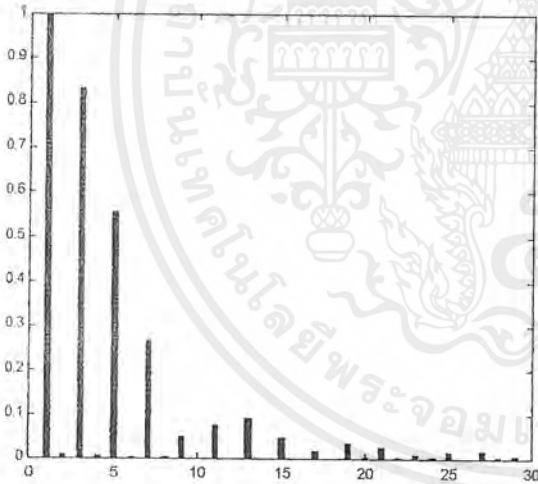
รูปที่ 4.12 กระแสชดเชยของ โหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

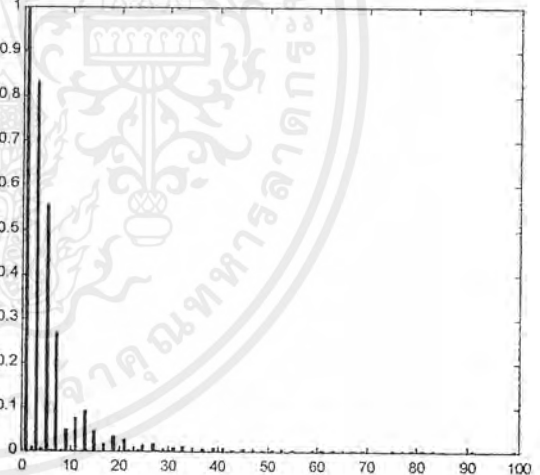
4.2.1 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 30 V.



(a)



(b)



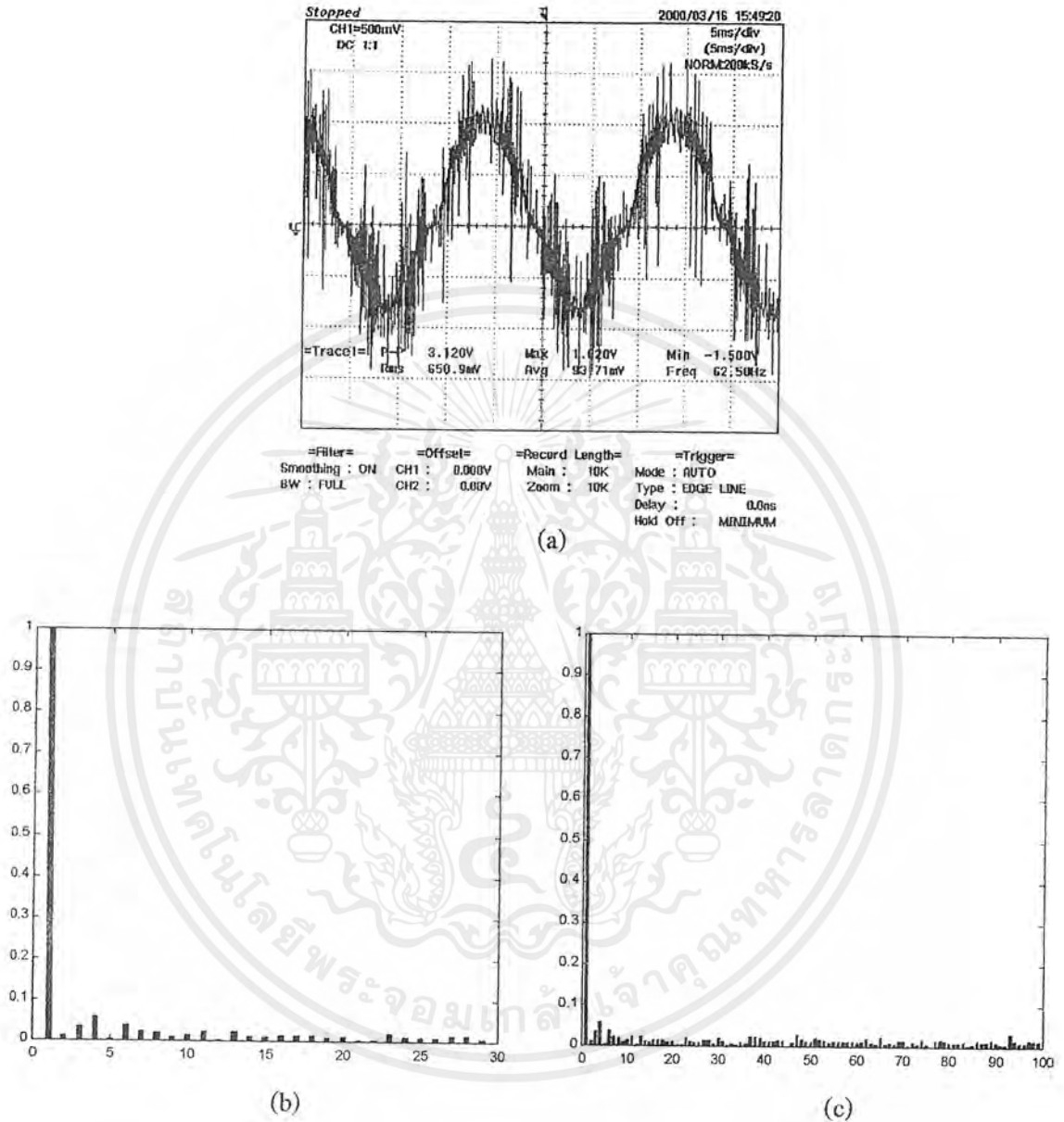
(c)

รูปที่ 4.13(a) กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 30 V.

รูปที่ 4.13(b) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 30 V. โดยมี%THD=104.76%

รูปที่ 4.13(c) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 30 V. โดยมี%THD=104.78%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



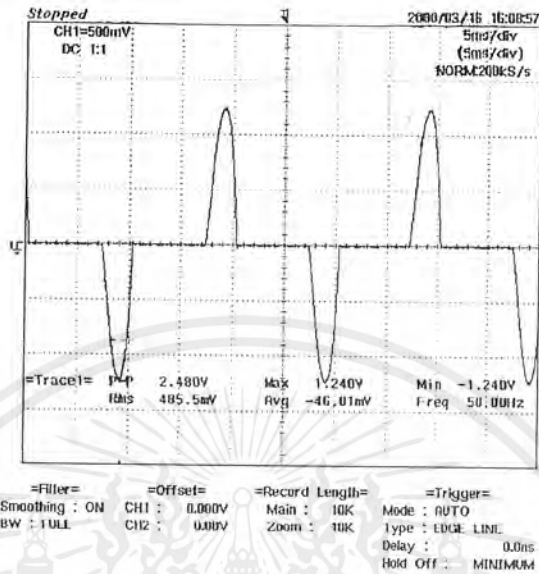
รูปที่ 4.14(a) กระแสของระบบหลังชดเชยที่ระดับแรงดัน 30 V.

รูปที่ 4.14(b) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 30 V. โดยมี%THD=10.57%

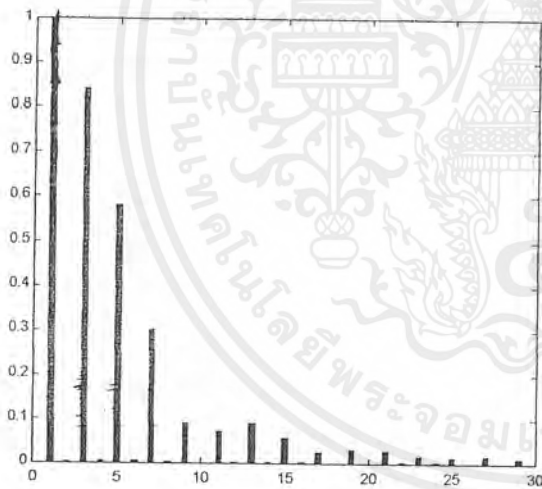
รูปที่ 4.14(c) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 30 V. โดยมี%THD=15.44%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

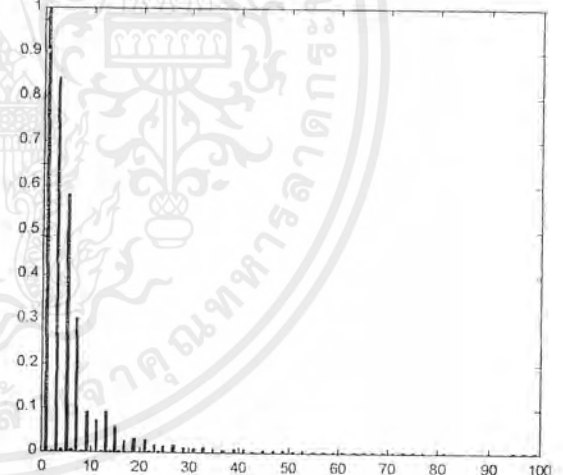
## 4.2.2 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 50 V.



(a)



(b)



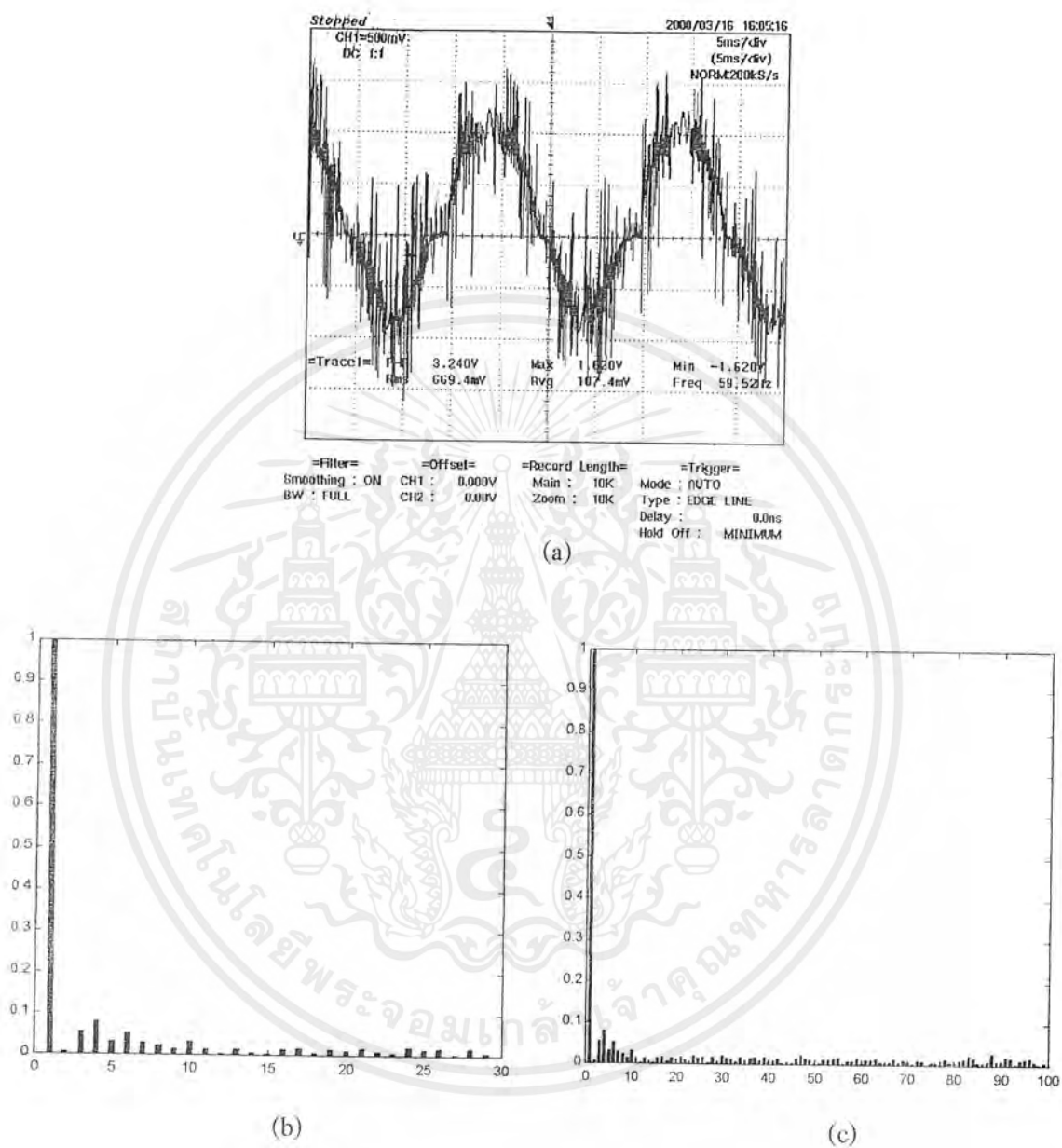
(c)

รูปที่ 4.15(a) กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 50 V.

รูปที่ 4.15(b) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=108.07%

รูปที่ 4.15(c) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=108.10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



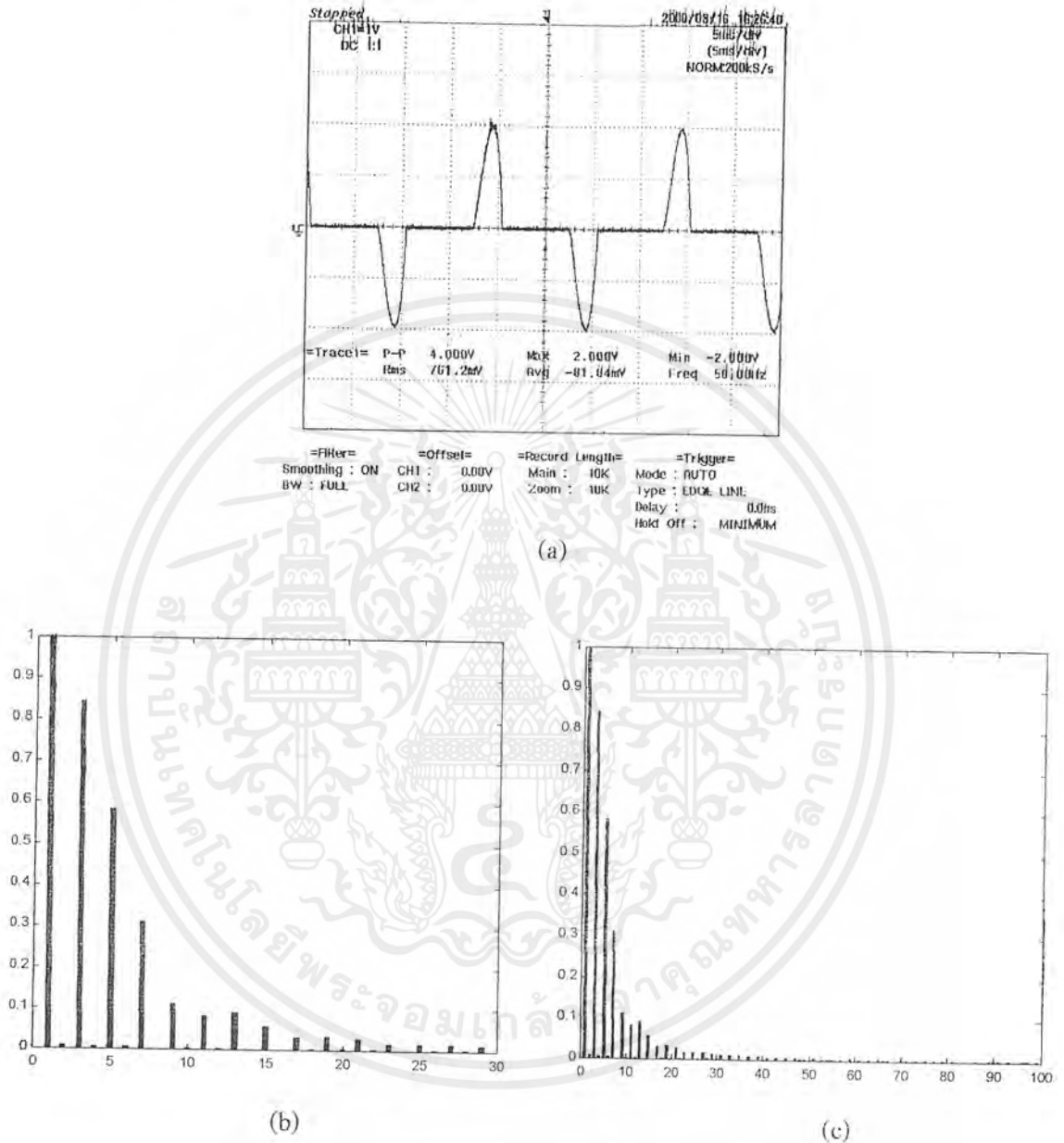
รูปที่ 4.16(a) กระแสของระบบหลังขดขยที่ระดับแรงดัน 50 V.

รูปที่ 4.16(b) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังขดขย โดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=13.74%

รูปที่ 4.16(c) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังขดขย โดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 50 V. โดยมี%THD=17.05%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 110 V.

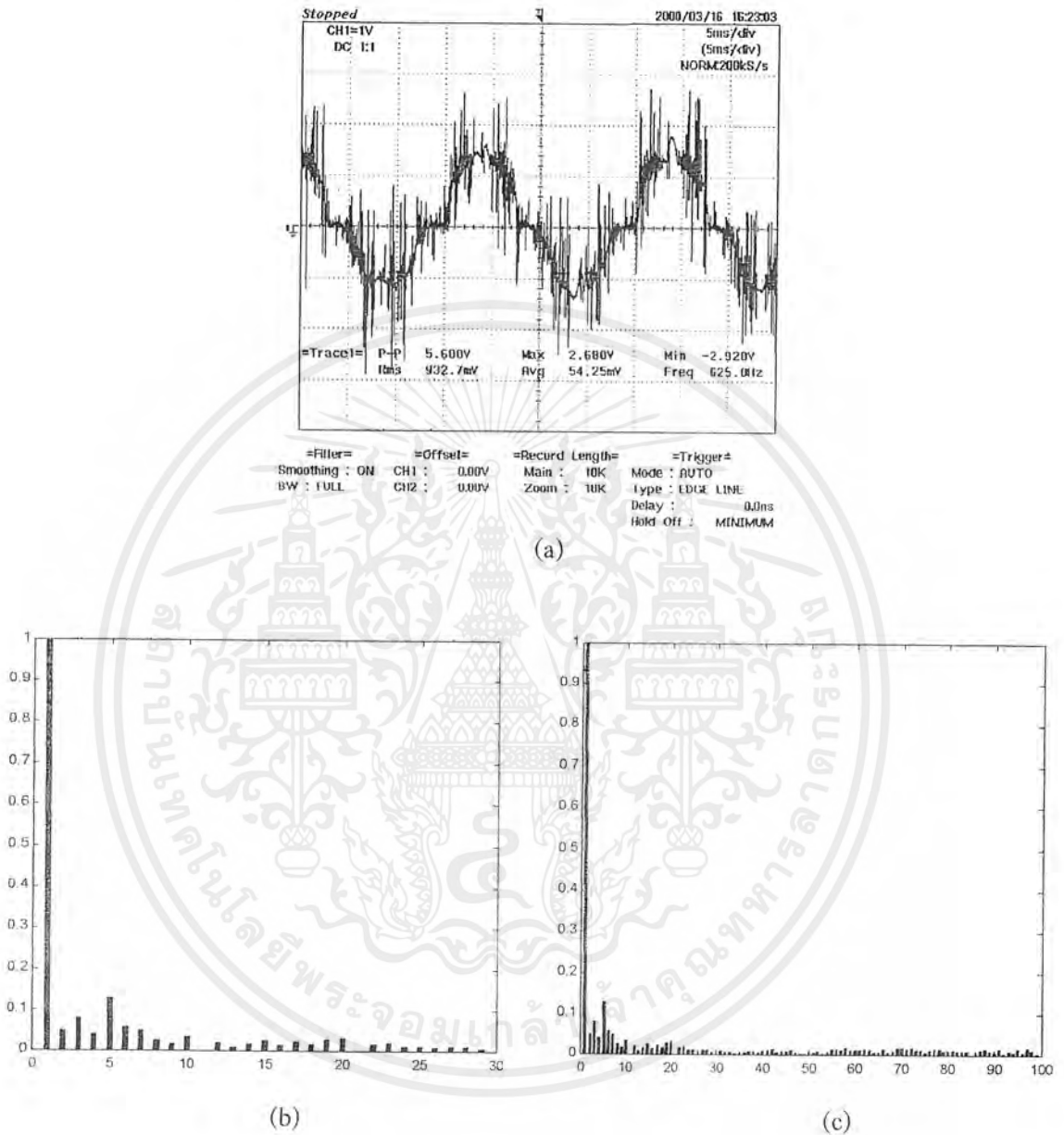


รูปที่ 4.17(a) กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 110 V.

รูปที่ 4.17(b) ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=108.79%

รูปที่ 4.17(c) ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=108.82%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



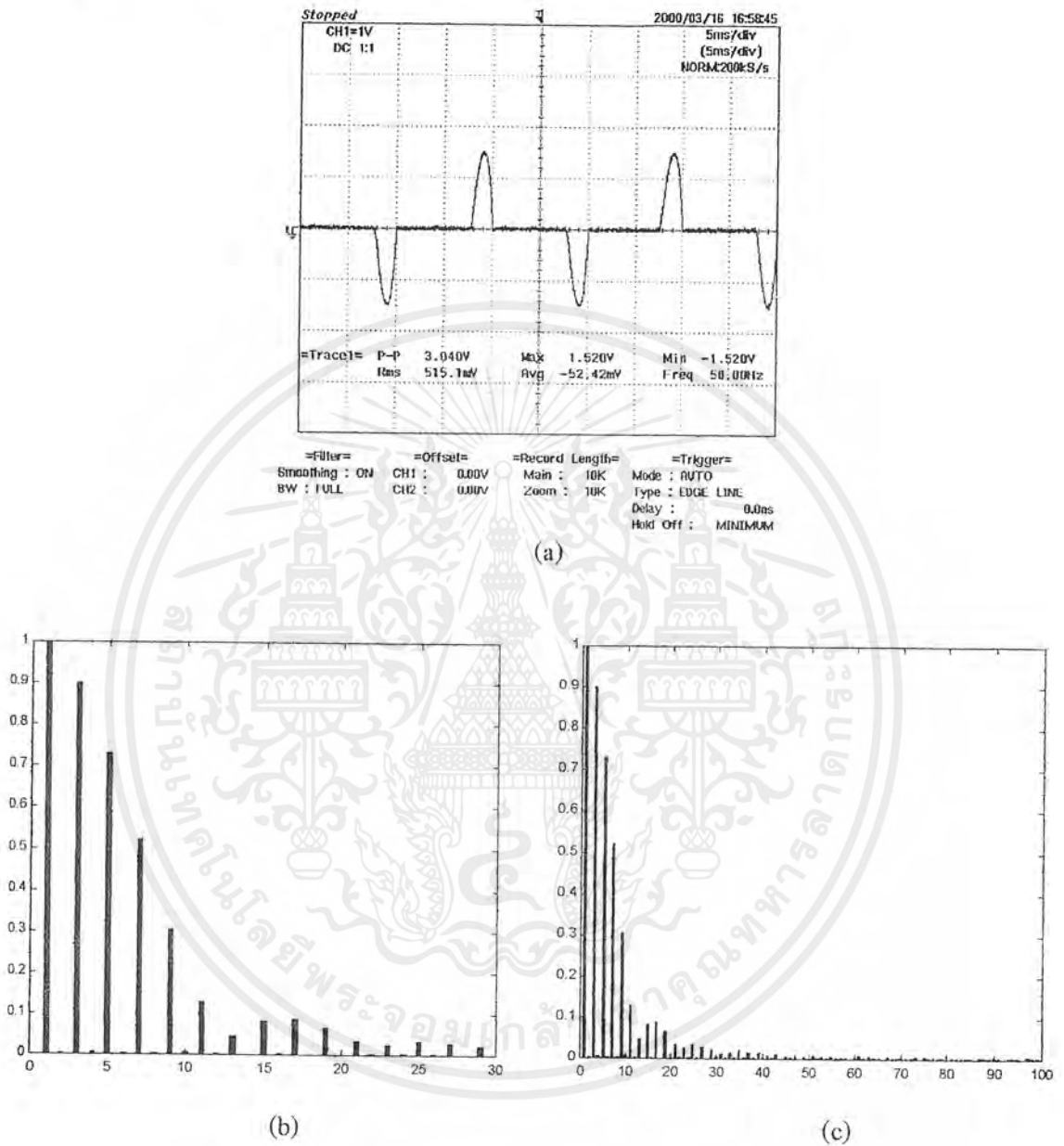
รูปที่ 4.18(a) กระแสของระบบหลังขดเซย์ที่ระดับแรงดัน 110 V.

รูปที่ 4.18(b) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังขดเซย์โดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=20.27%

รูปที่ 4.18(c) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังขดเซย์โดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 110 V. โดยมี%THD=22.08%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.4 ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 160 V.

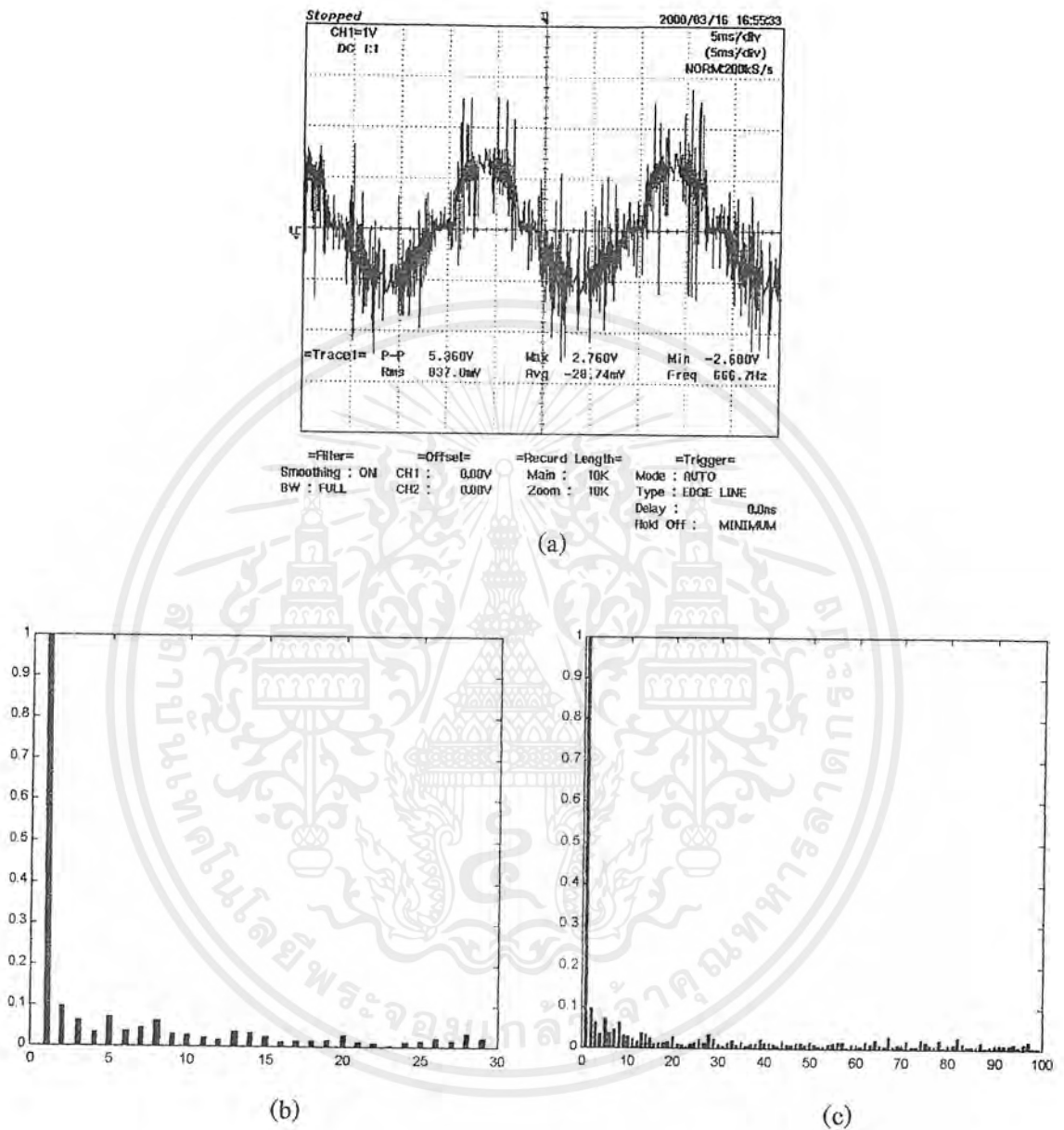


รูปที่ 4.19(a) กระแสของระบบก่อนชดเชยที่ระดับแรงดัน 160 V.

รูปที่ 4.19(b) ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 160 V. โดยมี%THD=132.21%

รูปที่ 4.19(c) ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆของกระแสของระบบก่อนชดเชยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 160 V. โดยมี%THD=132.30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20(a) กระแสของระบบหลังซดเซยที่ระดับแรงดัน 160 V.

รูปที่ 4.20(b) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังซดเซยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 30 ที่ระดับแรงดัน 160 V. โดยมี%THD=19.84%

รูปที่ 4.20(c) ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆของกระแสของระบบหลังซดเซยโดยพิจารณาถึงลำดับที่ 100 ที่ระดับแรงดัน 160 V. โดยมี%THD=22.76%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิเคราะห์

#### 5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากบทที่ 4 โหลดที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดคือ โหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น และโหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

##### 5.1.1 โหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

จากผลการทดลองในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1 พบว่ากระแสของระบบก่อนได้รับการฉีดกระแสชดเชย จะมีฮาร์โมนิกส์คู้่มาก แต่ภายหลังได้รับการฉีดกระแสชดเชยแล้ว ผลที่ได้คือ ฮาร์โมนิกส์คู้จะลดลงไป ส่วนรูปคลื่นกระแสก็มีความเป็นรูปไซน์ แต่จะมีความหนาของเนื้อคลื่น ซึ่งเป็นผลมาจากขอบเขตของฮิสเตอร์รีซิสมีช่วงกว้าง เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การผิดเพี้ยนรวมของฮาร์โมนิกส์ (% Total Harmonic Distortion ) ของรูปคลื่นกระแสก่อนฉีดและหลังฉีดกระแสชดเชย พบว่า %THD ที่ได้ของกระแสภายหลังได้รับการฉีดกระแสชดเชยจะมีค่าลดลงมาก เมื่อพิจารณาถึงแค่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 30 แต่เมื่อพิจารณาในลำดับที่สูงๆขึ้นไป พบว่า%THD ที่ได้จะมีค่ามาก เนื่องจากผลของขอบเขตของฮิสเตอร์รีซิสมีช่วงกว้าง จึงส่งผลให้ฮาร์โมนิกส์ที่ลำดับสูงๆมีค่ามาก ซึ่งในตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบ %THD ณ ระดับแรงดันต่างๆ

ระดับแรงดัน (โวลต์)	%THD ก่อนชดเชย (%)	%THD หลังชดเชย (%)	%THD หลังชดเชย (%) (พิจารณาถึงลำดับสูงๆ)
20	44.19	2.25	34.81
50	44.12	8.2	37.63
110	43.84	10.17	38.03
220	43.99	10.83	39.14

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าของ %THD ที่ระดับแรงดันต่างๆของโหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

จากตาราง 5.1 พบว่าที่ระดับแรงดันสูงขึ้น ค่าของ%THDจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนระดับแรงดันให้สูงขึ้น จะมีสัญญาณจากภายนอกเข้ารบกวนระบบ ส่งผลทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาด

#### 5.1.2 โหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

จากผลการทดลองในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.2 พบว่ากระแสของระบบก่อนได้รับการฉีดกระแสชดเชย จะมีฮาร์โมนิกส์ที่อยู่มาก โดยเฉพาะฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3,5,7,11,13 และ 15 แต่ภายหลังได้รับการฉีดกระแสชดเชยแล้ว ผลที่ได้ฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวจะลดลงไป ส่วนรูปคลื่นกระแสก็มีความเป็นรูปไซน์มากขึ้น แต่ไม่ดีขึ้นเนื่องการรบกวนของสัญญาณภายนอก ส่งผลทำให้การทำงานของวงจรเกิดความผิดพลาดประกอบกับวงจรที่จัดทำขึ้นยังมีประสิทธิภาพต่ำอยู่ เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การผิดเพี้ยนรวมของฮาร์โมนิกส์ ของรูปคลื่นกระแสก่อนฉีดและหลังฉีดกระแสชดเชย พบว่า %THD ที่ได้ของกระแสภายหลังได้รับการฉีดกระแสชดเชยจะมีค่าลดลงมาก เมื่อพิจารณาถึงค่าฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 30 และเมื่อพิจารณาในลำดับที่สูงขึ้นไป พบว่า%THD ที่ได้ไม่ค่อยแตกต่างจากพิจารณาที่ลำดับต่ำนัก ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์ต้นแบบของแอกทีฟฟิลเตอร์นี้ ได้รับการออกแบบมายังไม่ดีนัก ในตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบ %THD ณ. ระดับแรงดันต่างๆ

ระดับแรงดัน (โวลต์)	%THD ก่อนชดเชย (%)	%THD หลังชดเชย (%)	%THD หลังชดเชย (%) (พิจารณาถึงลำดับสูงๆ)
30	104.76	10.57	12.49
50	108.07	13.74	14.99
110	108.94	20.27	20.55
160	132.21	19.84	20.73

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าของ %THD ที่ระดับแรงดันต่างๆของโหลดแบบตัวจัดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีจากเอกสารอ้างอิงของต่างประเทศแล้ว พบว่าได้ผลน่าพอใจในระดับหนึ่ง กล่าวคือ อุปกรณ์ต้นแบบนี้สามารถชดเชยฮาร์โมนิกส์ได้ แต่ยังคงได้รับการพัฒนาในส่วนของคุณสมบัติให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เพื่อให้อุปกรณ์ต้นแบบนี้สามารถชดเชยฮาร์โมนิกส์ได้อย่างเต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ปัญหาของการดำเนินงาน

5.2.1 วงจรคูล์ที่ใช้มีความจำเป็นจะต้องปรับค่าเริ่มต้นก่อนการใช้งานเพื่อให้ได้ผลการทำงานของ ไอซี MC1495L ที่เที่ยงตรงและแม่นยำมากขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับค่าเริ่มต้นที่มีคุณภาพไม่ดีเพียงพอ เช่น ในการปรับค่าเริ่มต้นของไอซีจะต้องการใช้ค่าแรงดันกระแสตรง  $\pm 10V_{dc}$  แต่แหล่งจ่ายที่ใช้ทำการปรับค่าเริ่มต้น ไม่สามารถจ่ายแรงดันกระแสตรงที่มีค่าเท่ากับ  $\pm 10V_{dc}$  ได้พอดี จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนของการปรับค่าเริ่มต้นเกิดขึ้น หรือการปรับค่าเริ่มต้นต้องการใช้คลื่นแรงดันรูปไซน์ที่มีขนาด 1.0 kHz 5 V<sub>pp</sub> แต่จะไม่สามารถปรับค่าที่ต้องการใช้นี้ได้ตรงตามความต้องการเนื่องจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณที่ใช้ไม่สามารถให้ค่าที่แม่นยำได้ อันเนื่องมาจากผลของการปรับค่าเริ่มต้นก่อนการใช้งานของไอซี MC1495L ที่กล่าวมานี้ ทำให้ผลลัพธ์ที่เกิดจากการทำงานของวงจรเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น และยังส่งผลทำให้ระบบควบคุมเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้ก็ยังคงมีค่าไม่มากนัก

5.2.2 ความผิดพลาดในการตรวจจับสัญญาณ ( Current Sensor & Voltage Transducer ) กล่าวคือ ในส่วนของการตรวจจับสัญญาณกระแสและแรงดัน เพื่อนำมาสร้างกระแสชดเชย ได้ใช้ตัวต้านทานเป็นตัวตรวจจับสัญญาณ ทำให้สัญญาณที่ได้ไม่ดีนัก เพราะสัญญาณรบกวนจากภายนอกเข้ามารบกวนส่วนของวงจรได้ง่าย ส่งผลให้สัญญาณที่ได้มาจากวงจรสร้างกระแสชดเชยเกิดความผิดพลาดขึ้น

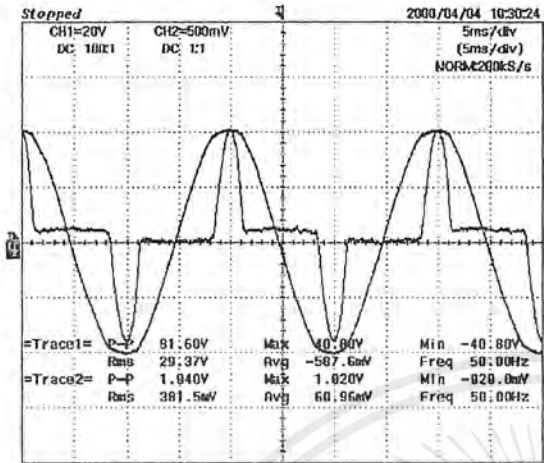
## 5.3 แนวทางการพัฒนา

พิกัดกำลังของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมานี้ยังมีพิกัดกำลังต่ำอยู่ อาจจะพัฒนาให้วงจรมีพิกัดที่สูงขึ้น รวมถึงการออกแบบเพิ่มเติม เพื่อให้วงจรสามารถชดเชยกระแสอาร์โมนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น หรืออาจพัฒนาขึ้นไปเป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟสเพื่อพัฒนาไปสู่การนำไปใช้งานจริงในระบบอุตสาหกรรม



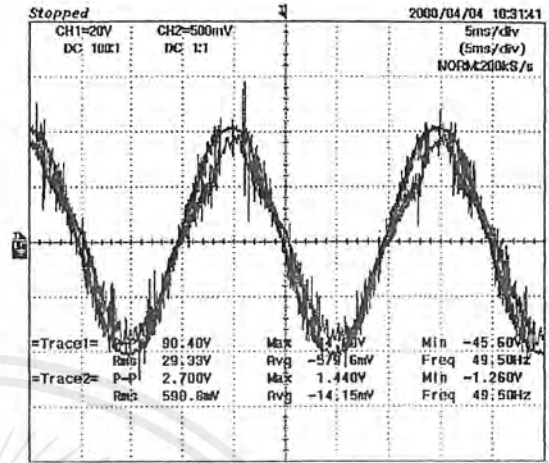
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เพาเวอร์แฟกเตอร์ของระบบ



=Filter= Smoothing : ON CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : AUTO  
 BW : FULL CH2 : 0.000V Zoom : 20K Type : EDGE CH1  $\neq$   
 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

(a) ก่อนฉีดกระแสชดเชย



=Filter= Smoothing : ON CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : AUTO  
 BW : FULL CH2 : 0.000V Zoom : 20K Type : EDGE CH1  $\neq$   
 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

(b) หลังฉีดกระแสชดเชย

จากรูป (a) เป็นรูปที่เปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสของระบบก่อนชดเชยกับรูปคลื่นของแรงดัน พบว่ากระแสจะมีรูปผิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์ ซึ่งเป็นผลมาจากอนไลน์เนียร์โหลด ทำให้คุณภาพของระบบและเพาเวอร์แฟกเตอร์ไม่ค่อยดีนัก แต่เมื่อพิจารณารูป (b) พบว่าหลังจากฉีดกระแสชดเชยเข้าระบบแล้ว รูปคลื่นกระแสมีลักษณะใกล้เคียงความเป็นไซน์ และส่งผลทำให้กระแสกับแรงดันอินเฟสกัน เพาเวอร์แฟกเตอร์ของระบบจะดีขึ้นด้วย



## ภาคผนวก ข.

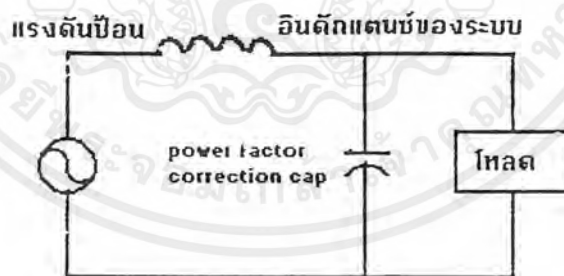
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์โมนิกส์

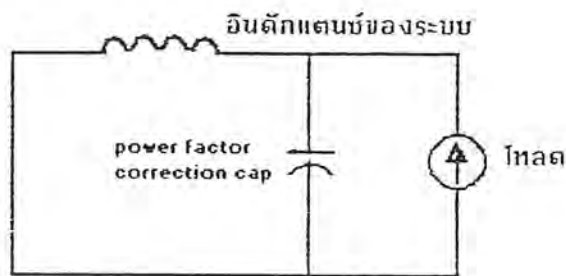
### 1. ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic)

ฮาร์โมนิกส์ คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่มูลฐานคือ 50 Hz ฮาร์โมนิกส์คือ 100 , 200 Hz เป็นต้น ความถี่มูลฐานเรียกว่า ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 ส่วน ฮาร์โมนิกส์ลำดับอื่นๆ ก็หาได้จากการเอาเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่มูลฐาน การวัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์สามารถทำได้หลายวิธีที่แตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากจะใช้วัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion: THD) ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ กันปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลและเครื่องมือวัดฮาร์โมนิกส์ทั้งหลาย จะแสดงผลของความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมและความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์แต่ละส่วนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน

เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ถูกป้อนด้วยแรงดันหลักมูลบริสุทธิ์โดยแหล่งจ่าย ซึ่งไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ จะมีผลทำให้รูปร่างของกระแสมีความแตกต่างไปจากแรงดันที่ป้อนให้ ความเพี้ยนของกระแสจะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจ่าย เมื่ออิมพีแดนซ์ของระบบถูกเพิ่มเข้ามา ความเพี้ยนของกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวอิมพีแดนซ์นี้จะมีผลทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันดังแสดงในรูปที่ 1 ด้วยเหตุนี้ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นหรือตัวผลิตฮาร์โมนิกส์จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์ ด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบที่เหมาะสมดังในรูปที่ 2



รูปที่ 1 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่หลักมูล



รูปที่ 2 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโพลต์ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ ดังนั้นสามารถให้ค่านิยามศัพท์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

### 2. กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Current)

ฮาร์โมนิกส์ที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Devices) ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์โมนิกส์ อย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เชิงเส้นมีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์โมนิกส์ ต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อยแต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแปลงผัน (Converter) ได้ขยายตัวอย่างมากเป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกส์ขึ้นอย่างมาก

### 3. แรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonic voltage)

เกิดจากการที่กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลผ่านค่า รีแอกแตนซ์ (Reactance) ของระบบ (รีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายของสายส่ง หรือรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์และแรงดันให้ดีขึ้น) ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดัน อันเนื่องมาจากรีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง

กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$V_n = I_n Z_n$$

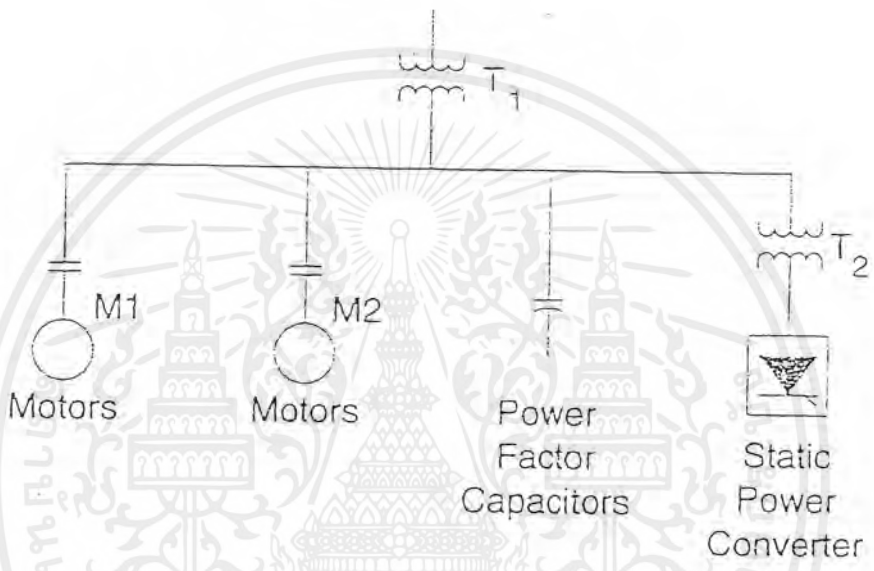
เมื่อ

$$V_n = \text{แรงดันฮาร์โมนิกส์}$$

$$I_n = \text{กระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบ}$$

$$Z_n = \text{ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ}$$

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้คาปาซิเตอร์ต่อขนานเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์โมนิกส์ในระบบจำหน่าย คาปาซิเตอร์มิได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิกส์แต่จากการต่อวงจรในระดับที่มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขรีโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonance) ระหว่างคาปาซิเตอร์และรีแอคแตนซ์ของระบบดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การต่อคาปาซิเตอร์ขนานเข้าไปในระบบ

เมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งกระจายกระแสฮาร์โมนิกส์ ถ้ารีโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ กระแสนี้จะรวมกับกระแสฮาร์โมนิกส์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดัน มีค่ามาก (Distortion Factor)

4. ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor) DF

ตัวประกอบฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Factor) HF

ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ทั้งหมด (Total Harmonic Distortion) THD

ความหมายทั้งสามตัวนั้นมาตรฐานของ IEEE ได้ให้ความหมายไว้เหมือนกัน กล่าวคือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลัก

มูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEEE 519-1992

Harmonic voltage และ Harmonic current

$$DF_v = HF_v = THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \times 100\% \\ = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$DF_i = HF_i = THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \times 100\% \\ = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\%$$

IEC 555-1:1992

$$HD_v = THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{\sum_{n=11}^{\infty} V_n^2}} \times 100\%$$

$$HD_i = THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{\sum_{n=11}^{\infty} I_n^2}} \times 100\%$$

สำหรับมาตรฐาน IEC ได้ให้ความหมายทั้งสามตัว ว่ามันคือความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Distortion), HD กล่าวคือ บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบค่า rms ของปริมาณทั้งหมด

#### 5. ลำดับฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Order)

ลำดับฮาร์โมนิกส์ คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกส์ และความถี่หลักมูล เช่น เมื่อเอ่ยถึงฮาร์โมนิกส์ที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50 Hz จะได้ความถี่ของฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เป็น 150 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. ตัวประกอบกำลัง (Power Factor )

หมายถึงอัตราส่วนของกำลังงานจริง (W หรือ kW) ต่อกำลังงานปรากฏ (VAหรือ kVA) อย่างไรก็ตามหากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีลักษณะรูปคลื่นไซน์เราอาจพูดถึงตัวประกอบกำลังในเทอมค่าโคไซน์ (cosine) ของมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสก็ได้

PF คืออัตราส่วนกำลังงานจริงต่อกำลังงานปรากฏ

Displacement Power Factor (DPF) คือ อัตราส่วนของกำลังงานจริงจากรูปคลื่นความถี่หลักมูลต่อกำลังปรากฏจากรูปคลื่นความถี่หลักมูล หรืออาจกล่าวได้ว่า DPF คือค่าโคไซน์ของมุมเฟสของแรงดันความถี่หลักมูลกับกระแสความถี่หลักมูล

$$DPF = \frac{\text{Active Power}}{\text{Apparent Power(Fund)}}$$

$$\text{Total PF} = \frac{\text{Active Power}}{\text{Apparent Power(total)}}$$

เมื่อ

พิกัดกำลังงานจริง (Active Power) = ผลคูณของ rmsแรงดันกับ rmsกระแสที่ inphaseกัน (Watt)

พิกัดกำลังงานที่ปรากฏ (Apparent Power) = ผลคูณของ rmsแรงดันกับ rmsของกระแส (Volt-amp)

พิกัดกำลังที่ปรากฏ (Fund) ได้จาก rmsของแรงดันคูณกับ rmsของกระแสของFundamental

พิกัดกำลังที่ปรากฏ (Total) ได้จากการรวมเอาฮาร์โมนิกส์มาด้วยเช่น

$$V_1 \times \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 + \dots}$$

## ประเภทของฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดันไฟฟ้า อาจแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

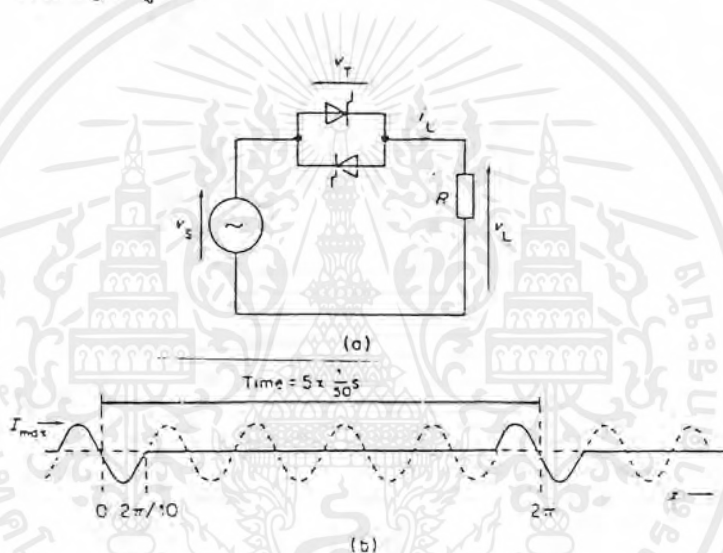
### 1. ฮาร์โมนิกส์ ( Harmonic )

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล เช่น รูปคลื่นสี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.2 จะมีฮาร์โมนิกส์ปนอยู่มากตั้งแต่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2,3,4 หรือรูปคลื่นในรูปที่ 2.3และ 2.4 จะมีเฉพาะฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ปนอยู่นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. อินเทอร์ฮาร์โมนิกส์ (Interharmonic)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล อินเทอร์ฮาร์โมนิกส์นี้ส่วนมากจะพบในกระแสเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc furnace) เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็ก โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหลอม กระแสการหลอมอาร์คจะยังไม่เสถียร ทำให้คาบของกระแสไม่แน่นอน กล่าวคือ ความถี่ 50 Hz คาบจะกินเวลา 20 มิลลิวินาที แต่กระแสอาร์คจะมีคาบเวลาไม่เป็น 20 มิลลิวินาทีทุกคาบ ทำให้เกิด Interharmonic ขึ้น นอกจากนี้ก็จะพบ Interharmonic ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle Control หรือ Burst firing ดังรูป 4



รูปที่ 4 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่าน โหลดแบบ Integral Cycle Control

ถ้าให้  $N$  คือจำนวน cycle ที่ ON และ  $M$  คือจำนวน cycle ที่ pattern ของรูปคลื่นกลับมาซ้ำเดิม จะคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกส์ ลำดับต่างๆ ได้ดังนี้

$$I_n = -I_{\max} \frac{2M \sin((N/M)n\pi)}{\pi (M^2 - N^2)}$$

จากกระแสฮาร์โมนิกส์ที่วิเคราะห์ออกมาจะพบว่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่ลำดับเป็นเลขลงตัวของความถี่หลักมูล 50 Hz จะเป็นศูนย์ แต่กระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่หรือมีลำดับไม่เป็นเลขลงตัวของความถี่หลักมูลจะมีค่า ดังเช่น ฮาร์โมนิกส์ความถี่ 10 Hz จะมีลำดับเป็น 1/5 ของความถี่หลักมูล เราจึงเรียกฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ว่า อินเทอร์ฮาร์โมนิกส์

## 3. ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายถึง ฮาร์โมนิกส์ที่สร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า (แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือกลับกัน โดยใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอด, SCR เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแส) ในสถานะการทำงานปกติ ลำดับของฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะสามารถหาได้จาก

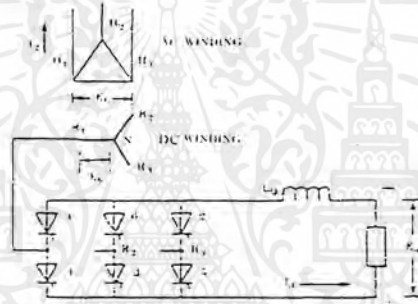
$$n = kp \pm 1$$

เมื่อ

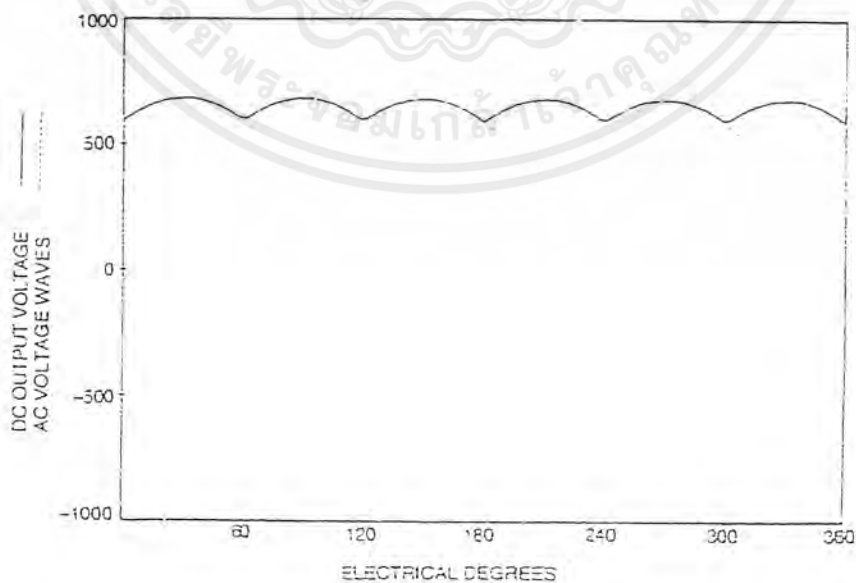
$n$  = ลำดับของฮาร์โมนิกส์

$k$  = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (1,2,3...)

$p$  = จำนวนพัลส์ (pulse number) ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

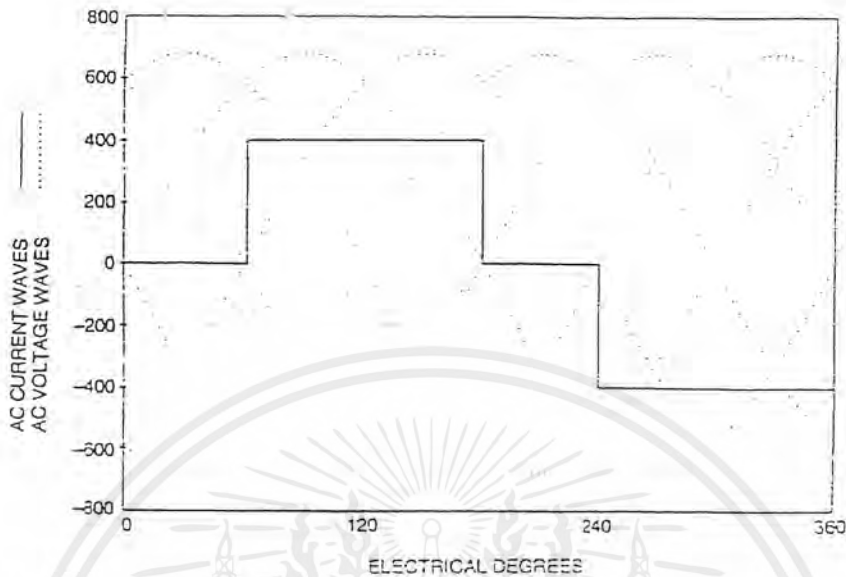


รูปที่ 5 (ก) วงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส



รูปที่ 5 (ข) รูปคลื่นของแรงดันขาออก (ในอุดมคติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 (ค) รูปคลื่นของกระแสทางด้าน AC (เป็นรูปคลื่นในอุดมคติ)

รูปที่ 5 (ก) แสดงวงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส ใช้ SCR จำนวน 6 ตัว ทำหน้าที่เป็น สวิตช์ตัดต่อกระแส ดังนั้นใน 1 cycle ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะเกิดกระแสไหลผ่าน SCR ในลักษณะกระแสพัลส์จำนวน 6 ครั้ง จึงมีค่า P1 เป็น 6 ในรูปที่ 2.9 (ข) แสดงรูปคลื่นของแรงดันขาออกจะเป็นแรงดันตรงที่มีความพริ้ว(Ripple) ซ้ำอยู่ ความพริ้วนี้มีการเปลี่ยนแปลง 6 cycle ใน 1 cycle ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความพริ้วความพริ้ว 6 cycle จะส่งผลถึงฮาร์โมนิกส์ของกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับด้วย รูปที่ 2.9 (ค) แสดงรูปคลื่นของกระแสทางด้านกระแสสลับจากรูปคลื่นนี้เมื่อแตกออกเป็นอนุกรมฟูริเยร์ได้ดังนี้

$$i = i_1 \sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) + \dots$$

จะพบว่ากระแสฮาร์โมนิกส์จะมีเฉพาะลำดับที่  $6k+1$  หรือ 5,7,11,13,17,19... เท่านั้น เราเรียกกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเหล่านี้ว่า ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ

#### 6. ฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonic)

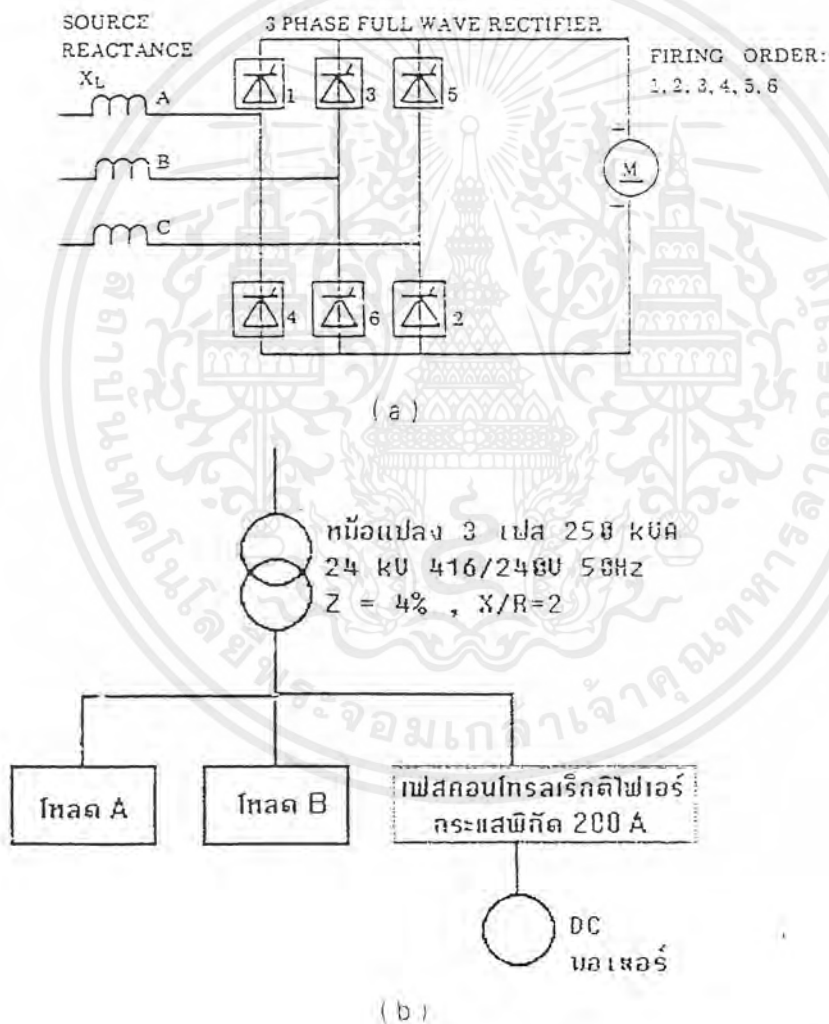
หมายถึง ฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามสมการ  $n = kp + 1$  เช่น เครื่องแปลงผันไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ซึ่งควรจะมีเฉพาะฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะที่มีลำดับ 11,13,23,25,35,37 ดังนั้นถ้ามีฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเป็น 5,7,17,19 ปนมาด้วย ฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7. ฮาร์โมนิกลำดับที่สามหารลงตัว (Triplen Harmonic)

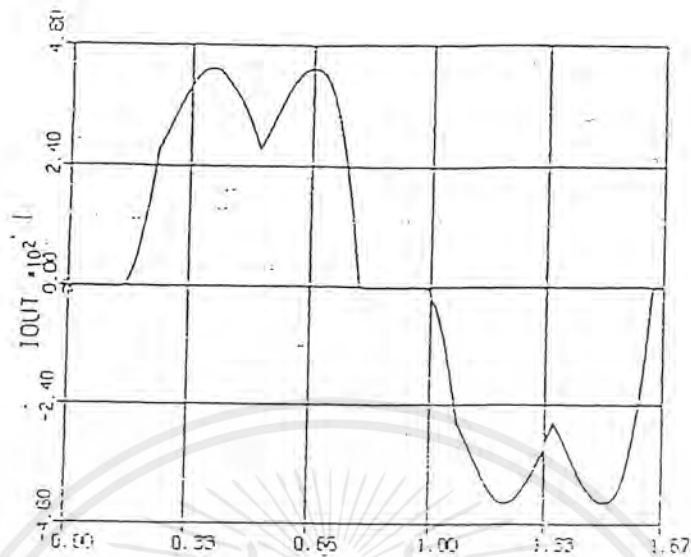
หมายถึง ฮาร์โมนิกที่มีลำดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว ได้แก่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3, 6, 9 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับ(sequence)เป็นศูนย์ ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิกกลุ่มนี้จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวทรัล ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าได้เช่น สายนิวทรัลร้อนจนฉนวนเสียหายเกิดการลัดวงจร เป็นต้น

ในการคำนวณค่าปริมาณต่างๆของวงจรเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์(Phase Control Rectifiers) ดังรูป



รูปที่ 6 (a) แสดงรูปวงจรเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์และ (b) ซิงเกิลไลน์ไดอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 แสดงรูปคลื่นของกระแสของวงจรเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์

ให้ระบบจ่ายไฟโหลด A และ B เป็นโหลดเชิงเส้น (linear load) และสามารถหา %THD กระแสและแรงดันที่จุด PCC ได้ดังนี้

กระแสฮาร์โมนิกจะมาจากคอนโทรลเรกติไฟเออร์ ปริมาณกระแสที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ เป็นดังนี้

Fundamental	100%
5-TH Harmonic	20%
7-TH Harmonic	14.2%
11-TH Harmonic	9.1%
13-TH Harmonic	7.7%

เพราะฉะนั้น

$$I_1 = 100\% \times 200 = 200A$$

$$I_5 = 20\% \times 200 = 40A$$

$$I_7 = 14.2\% \times 200 = 28.4A$$

$$I_{11} = 9.1\% \times 200 = 18.2A$$

$$I_{13} = 7.7\% \times 200 = 15.4A$$

ดังนั้น

$$\%THD(I) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## แหล่งกำเนิดและผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

### แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่มากมาย อุปกรณ์ที่ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์มีดังต่อไปนี้

#### 1. หม้อแปลง (Transformer)

ในสถานะอยู่ตัวปกติ (Normal Steady State) หม้อแปลงไม่ทำให้เกิดการเพี้ยน (Distortion) แก่ขั้ววงจร แต่ขณะสถานะชั่วคราว (Transient) หรือขณะหม้อแปลงทำงานเกินขอบเขตปกติ จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้น กรณีหม้อแปลงไม่มีโหลด แรงดันปฐมภูมิรูปคลื่นไซน์ของหม้อแปลง จะสร้างฟลักซ์รูปคลื่นไซน์ แต่กระแสปฐมภูมิจะไม่เป็นรูปไซน์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะฟลักซ์ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็ก (Magnetizing Current)

#### 2. เครื่องจักรไฟฟ้า (Electric Machinery)

เครื่องจักรไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายหม้อแปลง นั่นคือในสถานะอยู่ตัวมันไม่ทำให้เกิดการเพี้ยน แก่ขั้ววงจร แต่ในสถานะชั่วคราวหรือขณะเครื่องจักรทำงานเกินขอบเขตจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้น เครื่องจักรไฟฟ้าจะผลิตกระแสฮาร์โมนิกส์ในฟังก์ชันของความเร็วกับจำนวนร่องของอาร์เมเจอร์ การออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้าที่ดีจะต้องทำให้ระดับกระแสฮาร์โมนิกส์มีค่าน้อยที่สุดในทางปฏิบัติ กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับสามจะได้รับการสกัดกั้น (Block) โดยการต่อกับหม้อแปลงแบบเดลต้า

#### 3. อุปกรณ์อาร์ก (Arc Equipment)

อุปกรณ์มีมากมายหลายชนิดซึ่งรวมถึงเตาอาร์กขนาดใหญ่และเครื่องเชื่อม อุปกรณ์ทั้งสองทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์และไฟกระพริบ นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อาร์กอื่นๆซึ่งทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์ได้แก่ แสงสว่างอาร์ก ที่ใช้กับถนนและลานจอดรถ การเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์เนื่องจากอุปกรณ์อาร์กมีขนาดเท่ากับ 10% ของกระแสฟลักซ์ ในอุปกรณ์บางชนิด อาจมีค่าถึง 30% ถ้าวัดแรงดันขาออก (Output Voltage) ของเตาอาร์กจะพบว่าแรงดันฮาร์โมนิกส์เปลี่ยนแปลงอย่างมากและมีค่าไม่แน่นอน ตัวอย่างเช่น

-ขณะเริ่มหลอม (Meltdown) แรงดันฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 มีขนาด 8% เมื่อเทียบกับแรงดันหลักมูล (Fundamental Voltage)

-เมื่อสิ้นสุดการหลอม (End of Meltdown) แรงดันฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 มีขนาด 6%

-ขณะถลุงแร่ (Refining) แรงดันฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 มีขนาด 2.5%

#### 4. หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent)

หลอดฟลูออเรสเซนต์นิยมใช้มากในบ้านเรือนและในอุตสาหกรรมบางชนิด จึงถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่สำคัญ การปล่อยประจุ (Discharge) ในหลอดฟลูออเรสเซนต์ถือว่าเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบไม่เชิงเส้นอย่างมาก (Highly Non-linear) ซึ่งทำให้เกิด กระแสฮาร์โมนิกอันดับคี่ ( Odd-Ordered Harmonic Current)

#### 5. เครื่องแปลงผัน (Convertor)

เครื่องแปลงผันใช้กันอย่างกว้างขวางตั้งแต่ในบ้านจนถึงในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การที่เครื่องอุปกรณ์นี้ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องมาจากมันมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงเครื่องแปลงผันขนาดเล็กจะเป็นหนึ่งเฟส โดยใช้อุปกรณ์จำพวก

- เครื่องรับโทรทัศน์
- คอมพิวเตอร์
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในบ้าน

เครื่องแปลงผันสามเฟสที่ใช้กันทั่วไปจะทำหน้าที่เปลี่ยน กำลังไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

นี้

กรณี AC/DC ใช้เป็นแหล่งจ่ายให้แก่มอเตอร์กระแสตรง แบตเตอรี่ หรือ กระบวนการเคมี (Chemical process)

กรณี AC/DC/AC ใช้กับมอเตอร์ซิงโครไนส์หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ การที่ต้องเปลี่ยนจาก DC เป็น AC อีกครั้งเพื่อทำให้มอเตอร์สามารถจ่ายกำลังที่ความถี่มากกว่า 50 Hz เครื่องแปลงผันสามารถแบ่งแยกได้ตามจำนวนพัลส์ เช่น 3 , 6 , 12 , 18 , 24 และมากกว่านี้ จำนวนพัลส์จะบอกถึงจำนวนอุปกรณ์ปิด-เปิดวงจร ที่ใช้โซลิดสเตต (Solid State Switching Devices) ซึ่งโดยปกติใช้ไทรสเตอร์ควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากมุมจุดชนวนของมันควบคุมได้ง่าย งานทั่วไปนิยมใช้ 6 พัลส์ หรือ 12 พัลส์ ถ้าหากงานที่ต้องการกำลังต่ำจะใช้ 3 พัลส์ งานที่ต้องการกำลังสูงจะใช้ 18 พัลส์หรือมากกว่านี้

สำหรับเครื่องแปลงผันสามารถหาอันดับและขนาดฮาร์โมนิกได้ตามสมการ

$$n = kq \pm 1$$

โดยที่

- $n$  = อันดับฮาร์โมนิก
- $k$  = เลขจำนวนเต็มบวก
- $q$  = จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผัน

และ  $I_n = I_1 / n$

โดยที่

- $I_n$  = กระแสฮาร์โมนิกอันดับ  $n$
- $I_1$  = กระแสความถี่หลักมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$n$  = อันดับฮาร์โมนิกส์

### ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์

แรงดันฮาร์โมนิกส์มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังดังนี้

- ทำให้เกิดการขยายระดับฮาร์โมนิกส์ เนื่องจากผลของรีโซแนนซ์อนุกรมและขนาน
- ทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้า การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และการใช้กำลังไฟฟ้า มีประสิทธิภาพลดลง

ถึง

- ทำให้จำนวนของอุปกรณ์เสื่อมสภาพ เป็นผลให้อายุใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง
- ทำให้โรงจักรทำงานผิดพลาด (Plant Maloperation)

ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อระบบอื่นและอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีดังนี้

#### 1. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อการเกิดรีโซแนนซ์

คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ในระบบอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการรีโซแนนซ์เฉพาะแห่ง ซึ่งจะเป็นเหตุให้คาปาซิเตอร์ได้รับกระแสที่มากเกินไป ซึ่งเป็นเหตุให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้

##### 1.1 รีโซแนนซ์ขนาน

ผลของรีโซแนนซ์ขนาน คือการเกิดอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงขึ้นกับแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่รีโซแนนซ์ โดยส่วนมากแล้วจะพิจารณาแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์เป็นแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นผลของรีโซแนนซ์ขนาน คือ จะเพิ่มฮาร์โมนิกส์โวลต์เตจและจะเกิดกระแสไหลในแต่ละสาขาของวงจรรีโซแนนซ์มีค่าสูง ดังในรูปที่ 1 แสดงการเกิดรีโซแนนซ์ขึ้นที่จุด PCC ( Point of Common Coupling) ซึ่งรีโซแนนซ์เกิดขึ้นได้หลายแบบ คือ

1.1.1 รีโซแนนซ์ขนานระหว่างแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์กับคาปาซิเตอร์ที่บัสบาร์เดียวกัน โดยสมมติให้อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายเป็นอินดักเตนซ์ล้วนๆ จะได้

$$f_p = f \sqrt{\frac{S_s}{S_c}}$$

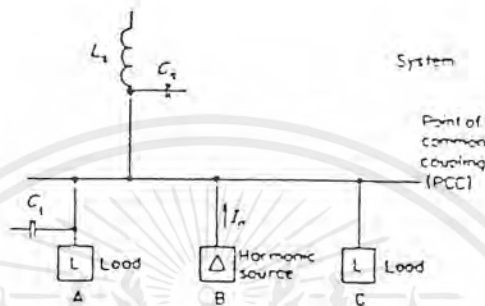
เมื่อ

$f$	:	ความถี่หลักมูล
$f_p$	:	ความถี่รีโซแนนซ์ขนาน
$S_s$	:	พิกัดกำลังลัดวงจรของแหล่งจ่าย ( Var )
$S_c$	:	พิกัดของคาปาซิเตอร์ ( Var )

##### 1.1.2 รีโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักเตนซ์ของระบบกับคาปาซิเตนซ์ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.3 รีโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักแตนซ์ของระบบกับโหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์ ในการที่จะตรวจสอบว่าเกิดรีโซแนนซ์ขนานขึ้นหรือไม่ สามารถทำได้โดยการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ในโหลดที่ต่ออยู่ในระบบแต่ละจุด และวัดโวลต์เตจฮาร์มอนิกส์ที่บัสบาร์แล้วทำการวิเคราะห์สถานะที่เกิดขึ้น



รูปที่ 1 รีโซแนนซ์ขนานที่จุด PCC

### 1.2 รีโซแนนซ์อนุกรม

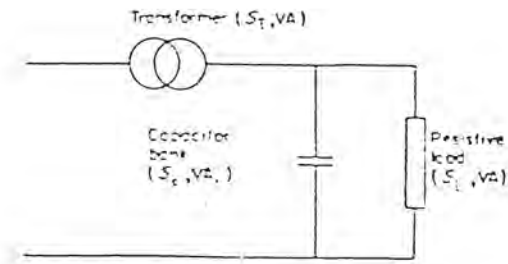
พิจารณารูปที่ 2 เมื่อความถี่มีค่าสูงมากๆ อาจทำให้โหลดถูกตัดออกจากระบบได้เช่นเดียวกับการเกิดรีโซแนนซ์แบบอนุกรม ระหว่างหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ความถี่รีโซแนนซ์ หาได้จาก

$$f_s = f \sqrt{\left( \frac{S_i}{S_c - Z_i} \right) - (S_i^2 - S_c^2)}$$

โดยที่

- $f_s$  : ความถี่รีโซแนนซ์แบบอนุกรม
- $S_i$  : พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า
- $Z_i$  : เปอร์ยูนิติอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า
- $S_c$  : พิกัดของโหลด ( ความต้านทาน )

ผลที่จะเกิดขึ้นจากรีโซแนนซ์อนุกรม คือ กระแสคาปาซิเตอร์จะมีค่าสูง , ฮาร์มอนิกส์โวลต์เตจจะมีค่าน้อย



รูปที่ 2 วงจรรีโซแนนซ์อนุกรม

## 2. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบสายส่ง

เมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลในระบบสายส่ง ทำให้เกิดผลเสียหลัก 2 ประการ

2.1. ทำให้กำลังสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลมาจากค่าอาร์เอ็มเอสของรูปคลื่น

กระแส ตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n$$

โดยที่

$P_L$	=	กำลังสูญเสียในระบบ
$I_n$	=	กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ n (ค่าอาร์เอ็มเอส)
$R_n$	=	ความต้านทานระบบที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

2.2. ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ช่วงจร โดยเป็นผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในวงจร กรณีระบบไม่มั่นคง ( Weak System ) คือ ระบบมีอิมพีแดนซ์สูงและมีระดับฟอลต์ต่ำ ( Low Fault Level ) ทำให้เกิดแรงดันตกมากเป็นผลให้เกิดการเพี้ยนของแรงดันซึ่งผิดกับระบบมั่นคง ( Stiff System ) ที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำและมีระดับฟอลต์สูง

แรงดันตกคร่อมนี้มีผลต่อเคเบิลทำให้เกิดความเครียดไดอิเล็กตริก ( Dielectric Strees ) สูงกว่าปกติ เป็นผลให้อายุการใช้งานของเคเบิลสั้นลงและทำให้เกิดฟอลต์ได้ง่าย

## 3. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อหม้อแปลง

ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อหม้อแปลง มี 3 ประการดังนี้

3.1 กระแสฮาร์โมนิกส์ ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ ฟลักซ์ ( Stray flux loss ) มีค่าเพิ่มขึ้น

3.2 แรงดันฮาร์โมนิกส์ทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสวน(Eddy Current loss)และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส(Hysteresis loss)เพิ่มขึ้น โดยถ้าแหล่งจ่าย จ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้หม้อแปลง กำลังสูญเสียแกนเหล็กของหม้อแปลงจะเป็นไปตามสมการ

$$P_{CORE} = (k_1 f + k_2 f^2) V^2$$

โดยที่

$P_{CORE}$	=	กำลังสูญเสียแกนเหล็ก
$K_1 f$	=	กำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส
$K_2 f^2$	=	กำลังสูญเสียกระแสวนในแกนเหล็ก
$V$	=	แรงดันรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่าย

3.3 ทำให้เกิดรีโซแนนซ์ ( ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ ) ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ของสาย ( Line Capacitor )

จะเห็นว่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดจากกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ซึ่งขึ้นกับความถี่ โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม ดังนั้นที่ฮาร์โมนิกส์สูงจะทำให้เกิดความร้อนแก่หม้อแปลงมากกว่าฮาร์โมนิกส์ต่ำๆ อย่างไรก็ตามผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อหม้อแปลงยังไม่มีมาตรฐานกำหนด

#### 4. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพื่อขึ้นเป็นผลให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ นอกจากนี้ฮาร์โมนิกส์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักรด้วย

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ( Nonsinusoidal Supply ) จะสร้างคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์ ( Flux Density Wave ) รบกวนอย่างมาก เมื่อเทียบกับกรณีมีแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ ( Sinusoidal Supply ) ฮาร์โมนิกส์จะทำให้เกิดฟลักซ์ผลลัพท์กระจายในช่องอากาศ ( Air Gap ) และทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า คอกกิง ( Cogging ) คือการที่ไม่สามารถเดินเครื่องได้ หรือเกิดครอว์ลิง ( Crawling ) คือการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าซิงโครนัส ซึ่งยังไม่มีมาตรฐานกำหนดแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับมอเตอร์

#### 5. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อสวิตช์เกียร์

กระแสฮาร์โมนิกส์จะเพิ่มความร้อนและกำลังสูญเสียให้แก่สวิตช์เกียร์ ส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ในรูปคลื่นกระแส มีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแส(Current Interruption

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Capability) ของสวิตช์เกียร์ เป็นผลให้การทำการตัด ( Making Interruption ) ยากมาก เซอร์กิตเบรกเกอร์จะไม่สามารถตัดกระแสเมื่อมีฮาร์โมนิกส์ ทั้งนี้เนื่องจากขดลวดเป่าดับอาร์ก (Blowout Coils) ซึ่งทำหน้าที่ช่วยให้อาร์กเข้าไปในอาร์กชุต ( Arc-Chute ) เพื่อทำการตัดทำงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ เป็นผลให้อาร์กไม่ขาดทำให้เบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้ปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ตัดกระแส เช่น โหลดเบรกสวิตช์ ตัวปิด-เปิดวงจร เป็นต้น แต่เบรกเกอร์สูญญากาศ จะมีความไวน้อยต่อกระแสฮาร์โมนิกส์

ปัจจุบันยังไม่มามีมาตรฐานทางอุตสาหกรรมในการกำหนดระดับของฮาร์โมนิกส์ที่สวิตช์เกียร์สามารถตัดได้ เนื่องจากการทดสอบตัดวงจรจะทำให้ความถี่พิกัดของแหล่งจ่ายไฟ

#### 6. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อคาปาซิเตอร์แบงค์

ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) กับคาปาซิเตอร์อย่างมาก การเพิ่มขึ้นของแรงดันทำให้เกิดกำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์เป็นไปตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=1}^{\infty} C \omega_n V_n \tan \delta$$

โดยที่

$P_L$	=	กำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์
$\tan \delta$	=	$R/(1/\omega C)$ แฟกเตอร์การสูญเสีย ( Loss Factor )
$\omega_n$	=	$2\pi f_n$
$V_n$	=	แรงดันอาร์เอ็มเอสฮาร์โมนิกส์อันดับ n

มากกว่านั้นในกำลังงานรีแอกทีฟ ( Reactive power ) ก็ยังมีฮาร์โมนิกส์รวมอยู่ด้วย ดังเช่น

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n$$

ผลของรีโซแนนซ์อนุกรมและขนานที่ตัวเก็บประจุเป็นสาเหตุของสัปดาห์และกระแสที่มากเกินไป ช่วยให้มีความสูญเสียและความร้อนสูงขึ้น ทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวเก็บประจุได้

#### 7. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลัง

ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อรีเลย์สามารถสรุปได้ดังนี้

- ฮาร์โมนิกส์ทำให้รีเลย์มีแนวโน้มที่จะทำงานช้าลงหรือทำงานด้วยค่าเริ่ม (Pickup values) ที่สูงขึ้นแทนที่จะทำงานอย่างรวดเร็วหรือทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำๆ

- ฮาร์โมนิกส์ทำให้รีเลย์สถิตย์แบบความถี่ต่ำ ( Static under frequency relay ) มีความไว  
กว่าปกติทำให้การทรูปผิดพลาด

- ฮาร์โมนิกส์ทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน ( Overcurrent and overvoltage relay )  
เปลี่ยนลักษณะการทำงาน ( Operating characteristics )

- ฮาร์โมนิกส์ทำให้แรงบิดทำงาน ( Operating torque ) ของรีเลย์กลับทิศทาง

- ฮาร์โมนิกส์ทำให้อิมพีแดนซ์รีเลย์ชนิดกานสมดุล ( Balanced beam impedance relay )  
วัดระยะที่เกิดฟอลต์ผิดพลาดมากเกินไป ( Over reach ) หรือน้อยเกินไป ( Under reach )

- ฮาร์โมนิกส์ทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่างข้าง ( Differential relay )

โดยทั่วไประดับฮาร์โมนิกส์ที่ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดจะสูงกว่าอุปกรณ์อื่นๆ ซิดจำกัด  
ของฮาร์โมนิกส์ ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จึงจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับรีเลย์

#### 8. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า

มิเตอร์และเครื่องวัดต่างๆ ก่อนการใช้ต้องทำการปรับแต่ง ( Calibration ) ที่กระแสไฟฟ้าสลับ  
รูปคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูล ดังนั้นถ้านำมิเตอร์มาใช้กับระบบที่มีฮาร์โมนิกส์ค่าที่วัดได้จะผิด  
พลาด หรือกรณีเกิดรีโซแนนซ์ในระบบมีผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ค่าสูงในวงจรทำให้มิเตอร์  
ประเภทจานเหนี่ยวนำ ( Induction Disk ) เช่น มิเตอร์ วัดค-ชั่วโมง ( Watt-hour Meter ) ทำงานผิด  
พลาดเนื่องจากการเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์โดยทั่วไปการเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์มากกว่า 20% จะมีผล  
ต่อมิเตอร์

#### 9. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้า

- เครื่องรับโทรทัศน์ ฮาร์โมนิกส์จะมีผลต่อแรงดันยอด ( Peak Voltage ) ทำให้ขนาดและ  
ความสว่างของภาพเปลี่ยนไป

- หลอดฟลูออโรสเซนส์และหลอดเมอร์คิวไรท์ การทำงานของหลอดชนิดนี้ต้องมีบัล  
ลาสต์ บางครั้งมีคาปาซิเตอร์ด้วย จึงอาจเกิดรีโซแนนซ์กับอินดักเตนซ์ของบัลลาสต์และวงจร ทำ  
ให้หลอดเกิดความร้อนสูงจนเกิดความเสียหาย

- คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะไวต่อความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์อย่างมาก ทุกบริษัทมีซิด  
จำกัดฮาร์โมนิกส์ค่าหนึ่งที่เครื่องสามารถทนได้ ซึ่งขึ้นกับการออกแบบของแต่ละบริษัทถ้าระบบไฟ  
ฟ้ามีฮาร์โมนิกส์มากกว่าซิดจำกัดนี้ จะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์เสียหายได้

#### 10. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์โมนิกส์จะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน ( Noise ) ในระบบสื่อสาร ทำให้คุณภาพของการส่ง  
สัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ ( Low Level Noise ) เช่น ในระบบโทรศัพท์อาจก่อให้เกิด  
ความรำคาญ ฮาร์โมนิกส์จะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ได้ยินเสียงเบากว่าปกติหรือมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสี่ยงรบกวน แต่ที่ระดับสูง ( High Level ) ฮาร์โมนิกส์ทำให้คุณภาพการส่งลดลงและอาจเกิดการสูญเสียของข่าวสาร หรือ ระบบสื่อสารถึงกับใช้การไม่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

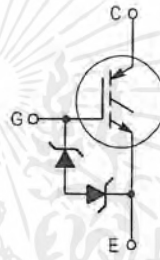
*Designer's™ Data Sheet*  
**Insulated Gate Bipolar Transistor**  
**N-Channel Enhancement-Mode Silicon Gate**

**MGP20N60U**

This Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) uses an advanced termination scheme to provide an enhanced and reliable high voltage-blocking capability. It also provides low on-voltage which results in efficient operation at high current.

- Industry Standard TO-220 Package
- High Speed  $E_{off}$ : 63  $\mu$ J/A typical at 125°C
- Low On-Voltage – 1.7 V typical at 10 A, 125°C
- Robust High Voltage Termination
- ESD Protection Gate-Emitter Zener Diodes

IGBT IN TO-220  
20 A @ 90°C  
31 A @ 25°C  
600 VOLTS  
VERY LOW  
ON-VOLTAGE



CASE 221A-09  
STYLE 9  
TO-220AB

**MAXIMUM RATINGS** ( $T_J = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CES}$	600	Vdc
Collector-Gate Voltage ( $R_{GE} = 1.0 \text{ M}\Omega$ )	$V_{CGR}$	600	Vdc
Gate-Emitter Voltage — Continuous	$V_{GE}$	$\pm 20$	Vdc
Collector Current — Continuous @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ — Continuous @ $T_C = 90^\circ\text{C}$ — Repetitive Pulsed Current (1)	$I_{C25}$ $I_{C90}$ $I_{CM}$	31 20 62	Adc Apk
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	PD	112 0.89	Watts W/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to 150	°C
Thermal Resistance — Junction to Case — IGBT — Junction to Ambient	$R_{\theta JC}$ $R_{\theta JA}$	1.12 65	°C/W
Maximum Lead Temperature for Soldering Purposes, 1/8" from case for 5 seconds	$T_L$	260	°C
Mounting Torque, 6-32 or M3 screw		10 lbf·in (1.13 N·m)	

(1) Pulse width is limited by maximum junction temperature. Repetitive rating.

**Designer's Data for "Worst Case" Conditions** — The Designer's Data Sheet permits the design of most circuits entirely from the information presented. SOA Limit curves — representing boundaries on device characteristics — are given to facilitate "worst case" design.

Designer's is a trademark of Motorola, Inc.

REV 1

## MGP20N60U

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T<sub>J</sub> = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>					
Collector-to-Emitter Breakdown Voltage (V <sub>GE</sub> = 0 Vdc, I <sub>C</sub> = 25 μAdc) Temperature Coefficient (Positive)	V <sub>(BR)CES</sub>	600 —	— 870	— —	Vdc mV/°C
Emitter-to-Collector Breakdown Voltage (V <sub>GE</sub> = 0 Vdc, I <sub>EC</sub> = 100 mAdc)	V <sub>(BR)ECS</sub>	15	—	—	Vdc
Zero Gate Voltage Collector Current (V <sub>CE</sub> = 600 Vdc, V <sub>GE</sub> = 0 Vdc) (V <sub>CE</sub> = 600 Vdc, V <sub>GE</sub> = 0 Vdc, T <sub>J</sub> = 125°C)	I <sub>CES</sub>	— —	— —	10 200	μAdc
Gate-Body Leakage Current (V <sub>GE</sub> = ± 20 Vdc, V <sub>CE</sub> = 0 Vdc)	I <sub>GES</sub>	—	—	50	μAdc

### ON CHARACTERISTICS (1)

Collector-to-Emitter On-State Voltage (V <sub>GE</sub> = 15 Vdc, I <sub>C</sub> = 5.0 Adc) (V <sub>GE</sub> = 15 Vdc, I <sub>C</sub> = 5.0 Adc, T <sub>J</sub> = 125°C) (V <sub>GE</sub> = 15 Vdc, I <sub>C</sub> = 10 Adc)	V <sub>CE(on)</sub>	— — —	1.4 1.3 1.7	1.7 — 2.0	Vdc
Gate Threshold Voltage (V <sub>CE</sub> = V <sub>GE</sub> , I <sub>C</sub> = 1.0 mAdc) Threshold Temperature Coefficient (Negative)	V <sub>GE(th)</sub>	3.0 —	5.0 10	7.0 —	Vdc mV/°C
Forward Transconductance (V <sub>CE</sub> = 10 Vdc, I <sub>C</sub> = 10 Adc)	g <sub>fe</sub>	—	7.0	—	Mhos

### DYNAMIC CHARACTERISTICS

Input Capacitance	(V <sub>CE</sub> = 25 Vdc, V <sub>GE</sub> = 0 Vdc, f = 1.0 MHz)	C <sub>ies</sub>	—	1060	—	pF
Output Capacitance		C <sub>oes</sub>	—	99	—	
Transfer Capacitance		C <sub>res</sub>	—	15	—	

### SWITCHING CHARACTERISTICS (1)

Turn-On Delay Time	(V <sub>CC</sub> = 360 Vdc, I <sub>C</sub> = 10 Adc, V <sub>GE</sub> = 15 Vdc, L = 300 μH, R <sub>G</sub> = 20 Ω) Energy losses include "tail"	t <sub>d(on)</sub>	—	43	—	ns
Rise Time		t <sub>r</sub>	—	45	—	
Turn-Off Delay Time		t <sub>d(off)</sub>	—	144	—	
Fall Time		t <sub>f</sub>	—	175	—	
Turn-Off Switching Loss		E <sub>off</sub>	—	340	—	
Turn-On Delay Time	(V <sub>CC</sub> = 360 Vdc, I <sub>C</sub> = 10 Adc, V <sub>GE</sub> = 15 Vdc, L = 300 μH, R <sub>G</sub> = 20 Ω, T <sub>J</sub> = 125°C) Energy losses include "tail"	t <sub>d(on)</sub>	—	43	—	ns
Rise Time		t <sub>r</sub>	—	56	—	
Turn-Off Delay Time		t <sub>d(off)</sub>	—	235	—	
Fall Time		t <sub>f</sub>	—	220	—	
Turn-Off Switching Loss		E <sub>off</sub>	—	625	—	
Gate Charge	(V <sub>CC</sub> = 360 Vdc, I <sub>C</sub> = 10 Adc, V <sub>GE</sub> = 15 Vdc)	Q <sub>T</sub>	—	57	—	nC
		Q <sub>1</sub>	—	12	—	
		Q <sub>2</sub>	—	25	—	

### INTERNAL PACKAGE INDUCTANCE

Internal Emitter Inductance (Measured from the emitter lead 0.25" from package to emitter bond pad)	L <sub>E</sub>	—	7.5	—	nH
--	----------------	---	-----	---	----

(1) Pulse Test: Pulse Width ≤ 300 μs, Duty Cycle ≤ 2%.

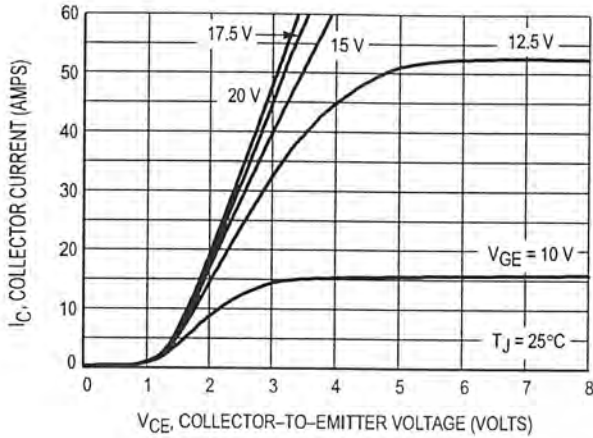


Figure 1. Output Characteristics

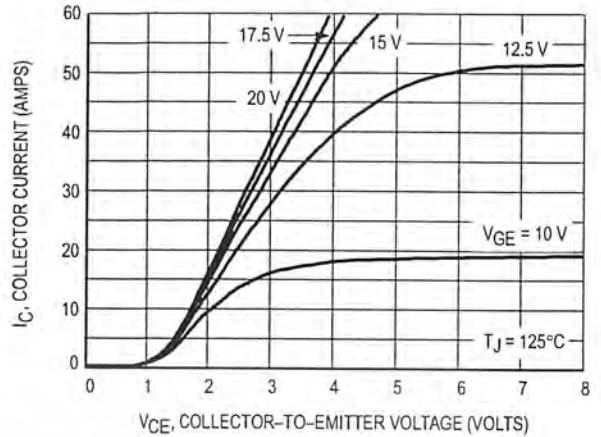


Figure 2. Output Characteristics

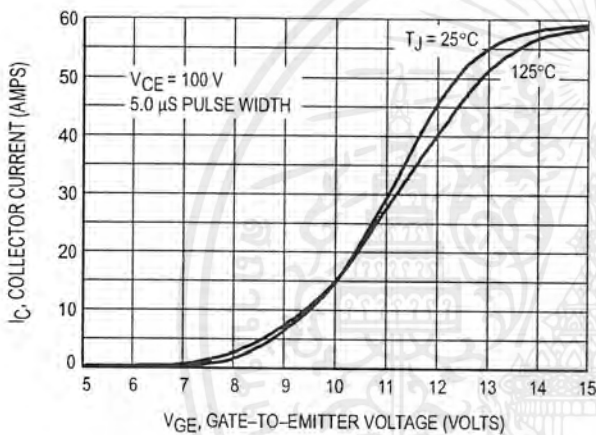


Figure 3. Transfer Characteristics

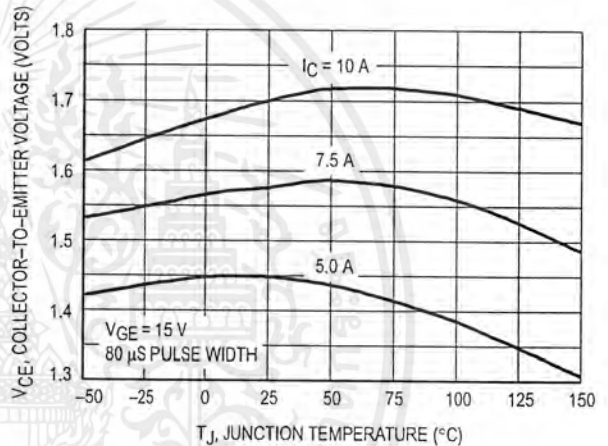


Figure 4. Collector-To-Emitter Saturation Voltage versus Junction Temperature

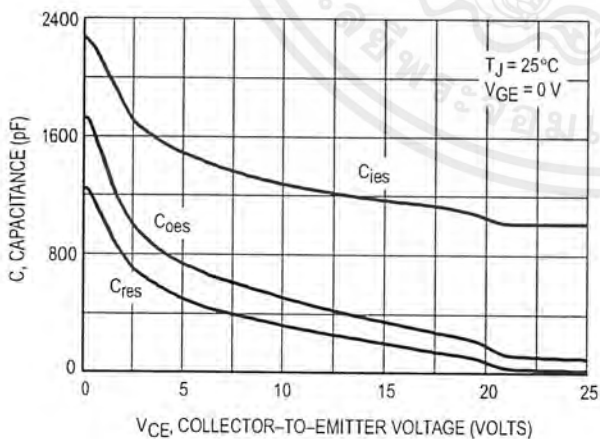


Figure 5. Capacitance Variation

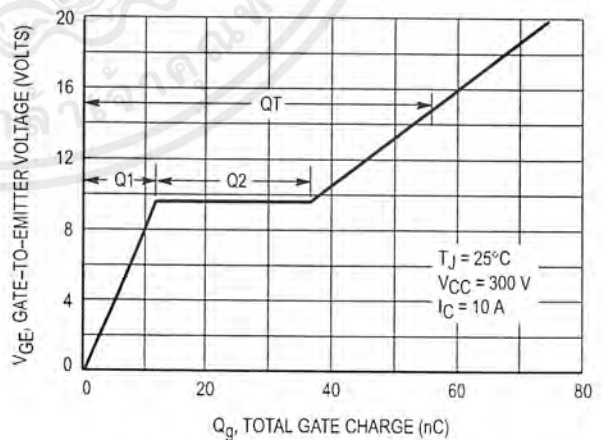


Figure 6. Gate-To-Emitter Voltage versus Total Charge

**MGP20N60U**

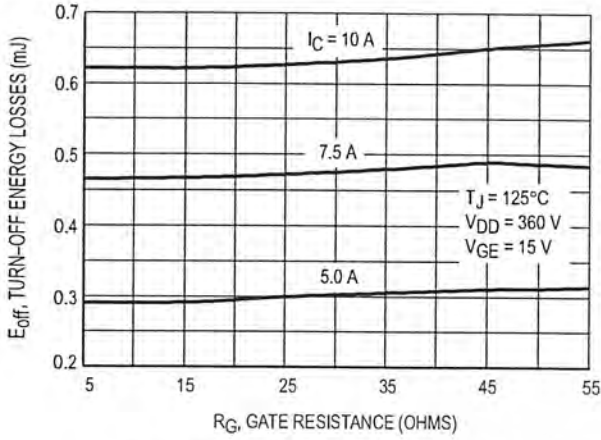


Figure 7. Turn-Off Energy Losses versus Gate Resistance

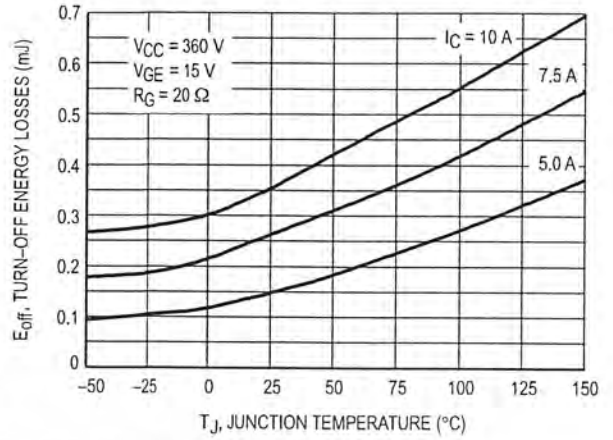


Figure 8. Turn-Off Energy Losses versus Junction Temperature

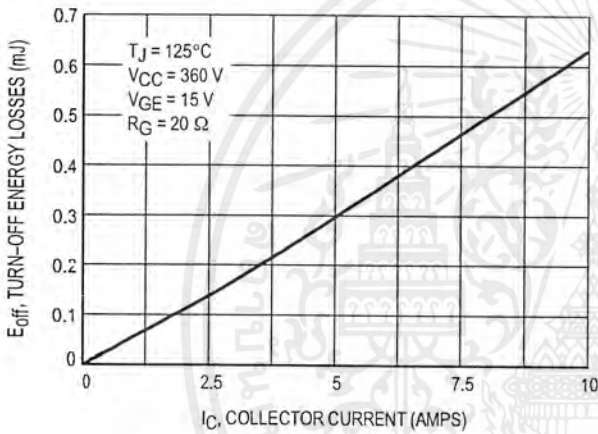


Figure 9. Turn-Off Energy Losses versus Collector Current

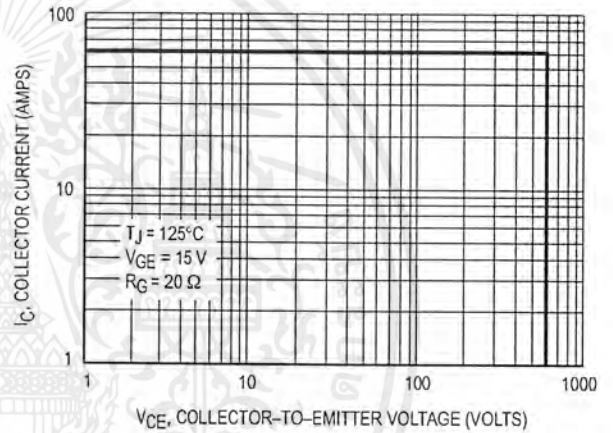
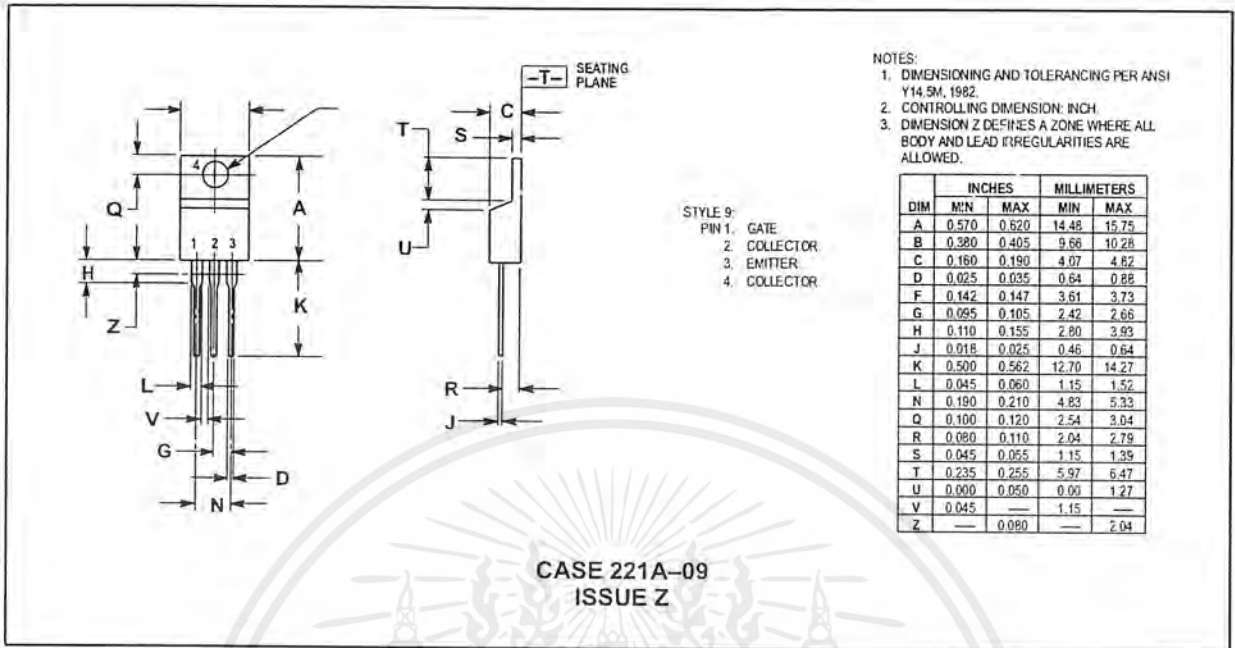


Figure 10. Reverse Biased Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS



Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

Mfax is a trademark of Motorola, Inc.

How to reach us:

USA/ EUROPE/ Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;  
 P.O. Box 5405, Denver, Colorado 80217. 1-303-675-2140 or 1-800-441-2447

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.: SPD, Strategic Planning Office, 141,  
 4-32-1 Nishi-Gotanda, Shagawa-ku, Tokyo, Japan. 03-5487-8488

Customer Focus Center: 1-800-521-6274

Mfax™: RMFAXD@email.sps.mot.com - TOUCHTONE 1-602-244-6609  
 Motorola Fax Back System - US & Canada ONLY 1-800-774-1848  
 - http://sps.motorola.com/mfax/

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.: 8B Tai Ping Industrial Park,  
 51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298

HOME PAGE: <http://motorola.com/sps/>



MGP20N60U/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SWITCHMODE™ Power Rectifiers

... designed for use in switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes, these state-of-the-art devices have the following features:

- Ultrafast 35 and 60 Nanosecond Recovery Time
- 175°C Operating Junction Temperature
- High Voltage Capability to 600 Volts
- Low Forward Drop
- Low Leakage Specified @ 150°C Case Temperature
- Current Derating Specified @ Both Case and Ambient Temperatures
- Epoxy Meets UL94, V<sub>O</sub> @ 1/8"
- High Temperature Glass Passivated Junction

### Mechanical Characteristics:

- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 4.3 grams (approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds
- Shipped 30 units per plastic tube
- Marking: U3020, U3040, U3060



**MUR3020PT**  
**MUR3040PT\***  
**MUR3060PT\***

\*Motorola Preferred Devices

**ULTRAFAST RECTIFIERS**  
**30 AMPERES**  
**200-400-600 VOLTS**



CASE 340D-02, Style 2  
TO-218AC

### MAXIMUM RATINGS, PER LEG

Rating	Symbol	MUR3020PT	MUR3040PT	MUR3060PT	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V <sub>RRM</sub> V <sub>RWM</sub> V <sub>R</sub>	200	400	600	Volts
Average Rectified Forward Current (Rated V <sub>R</sub> ) Per Leg Per Device	I <sub>F(AV)</sub>	15 @ T <sub>C</sub> = 150°C 30 @ T <sub>C</sub> = 150°C		15 @ T <sub>C</sub> = 30 @ 145°C	Amps
Peak Rectified Forward Current, Per Leg (Rated V <sub>R</sub> , Square Wave, 20 kHz, T <sub>C</sub> = 150°C)	I <sub>FRM</sub>	30 @ T <sub>C</sub> = 150°C		30 @ T <sub>C</sub> = 145°C	Amps
Nonrepetitive Peak Surge Current (Surge applied at rated load conditions, halfwave, single phase, 60 Hz) Per Leg	I <sub>FSM</sub>	200		150	Amps
Operating Junction and Storage Temperature	T <sub>J</sub> , T <sub>stg</sub>		-65 to +175		°C

### THERMAL CHARACTERISTICS PER DIODE LEG

Maximum Thermal Resistance — Junction to Case — Junction to Ambient	R <sub>θJC</sub> R <sub>θJA</sub>		1.5 40	°C/W
--	--------------------------------------	--	-----------	------

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS PER DIODE LEG

Maximum Instantaneous Forward Voltage (1) (I <sub>F</sub> = 15 Amp, T <sub>C</sub> = 150°C) (I <sub>F</sub> = 15 Amp, T <sub>C</sub> = 25°C)	V <sub>F</sub>	0.85 1.05	1.12 1.25	1.2 1.5	Volts
Maximum Instantaneous Reverse Current (1) (Rated DC Voltage, T <sub>J</sub> = 150°C) (Rated DC Voltage, T <sub>J</sub> = 25°C)	i <sub>R</sub>		500 10	1000 10	μA
Maximum Reverse Recovery Time (I <sub>F</sub> = 1.0 Amp, di/dt = 50 Amps/μs)	t <sub>rr</sub>	35		60	ns

(1) Pulse Test: Pulse Width = 300 μs, Duty Cycle ≤ 2.0%.

SWITCHMODE is a trademark of Motorola, Inc.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

Rev 4

**MUR3020PT MUR3040PT MUR3060PT**

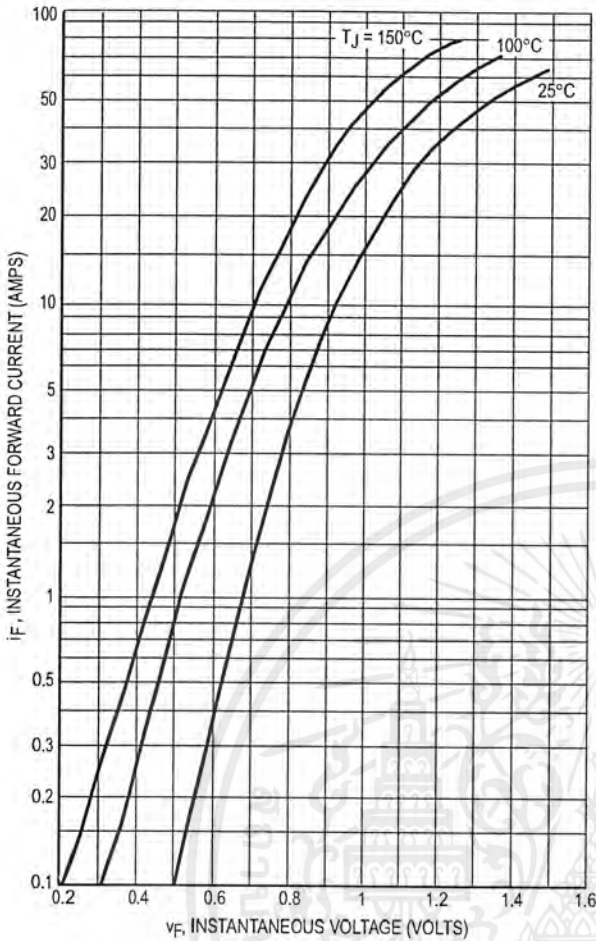


Figure 1. Typical Forward Voltage (Per Leg)

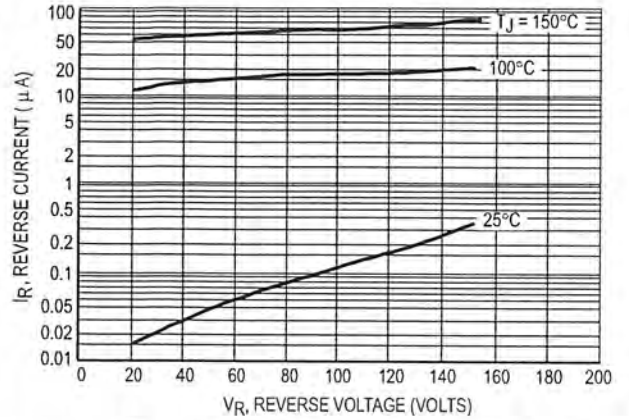


Figure 2. Typical Reverse Current (Per Leg)

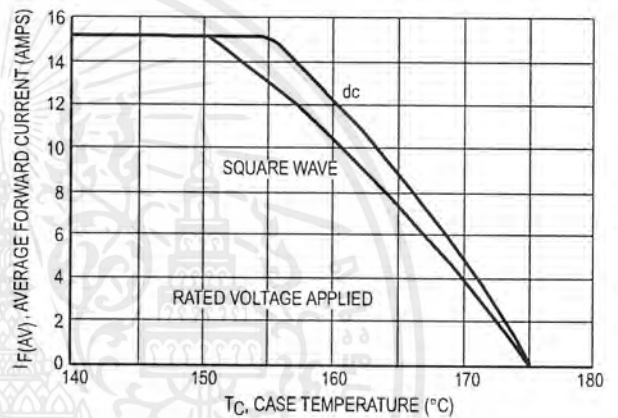


Figure 3. Current Derating, Case (Per Leg)

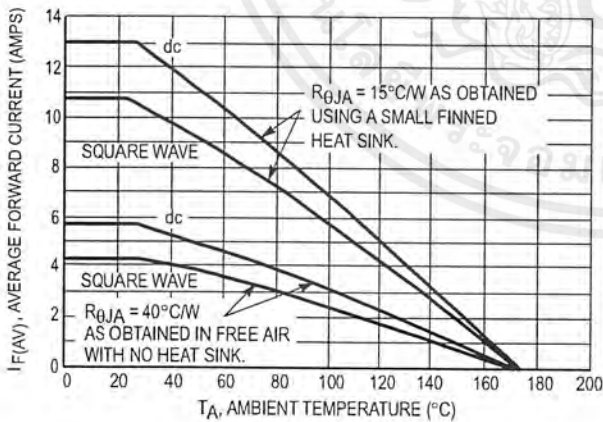


Figure 4. Current Derating, Ambient (Per Leg)

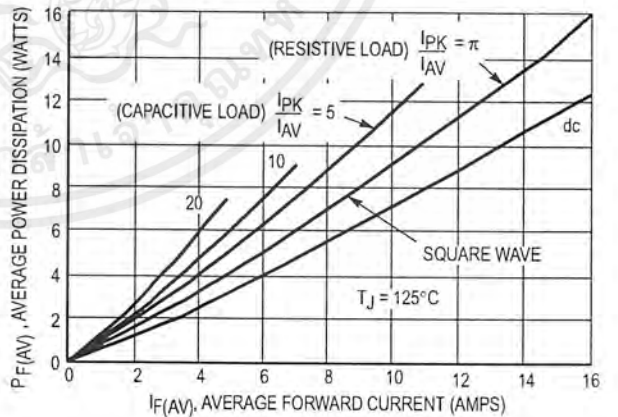


Figure 5. Power Dissipation (Per Leg)

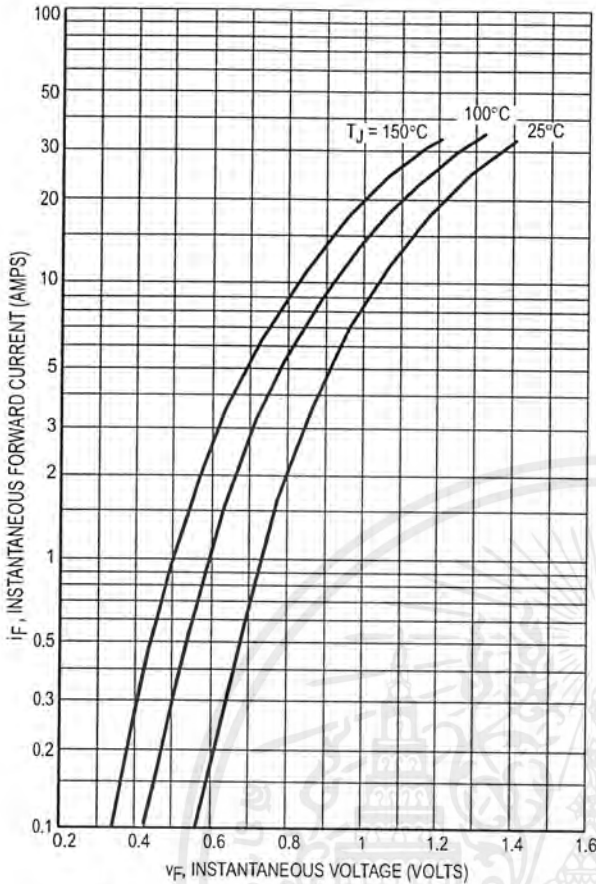


Figure 6. Typical Forward Voltage (Per Leg)

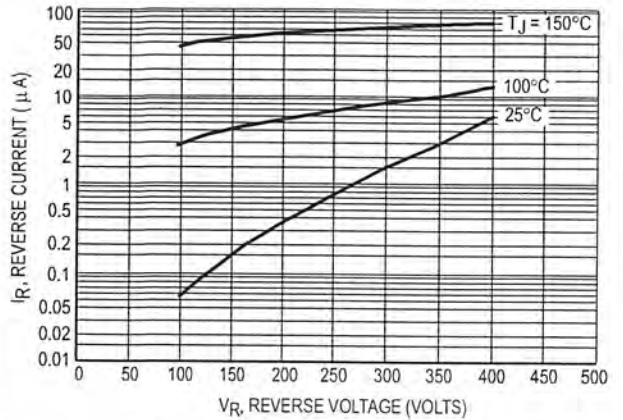


Figure 7. Typical Reverse Current (Per Leg)

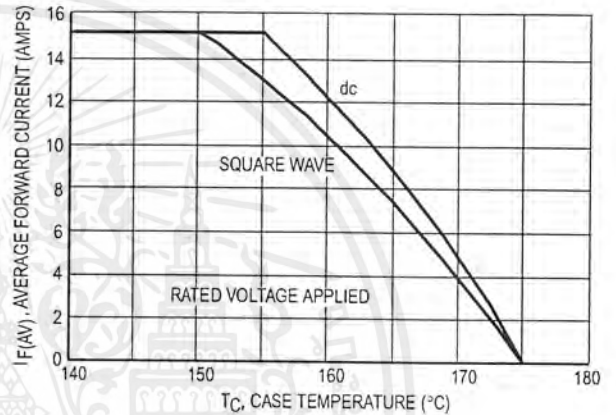


Figure 8. Current Derating, Case (Per Leg)

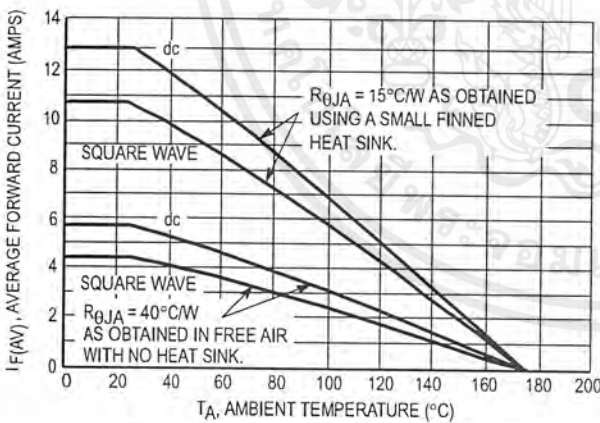


Figure 9. Current Derating, Ambient (Per Leg)

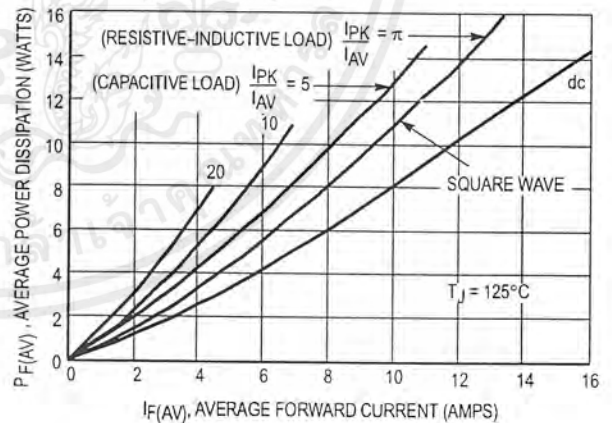
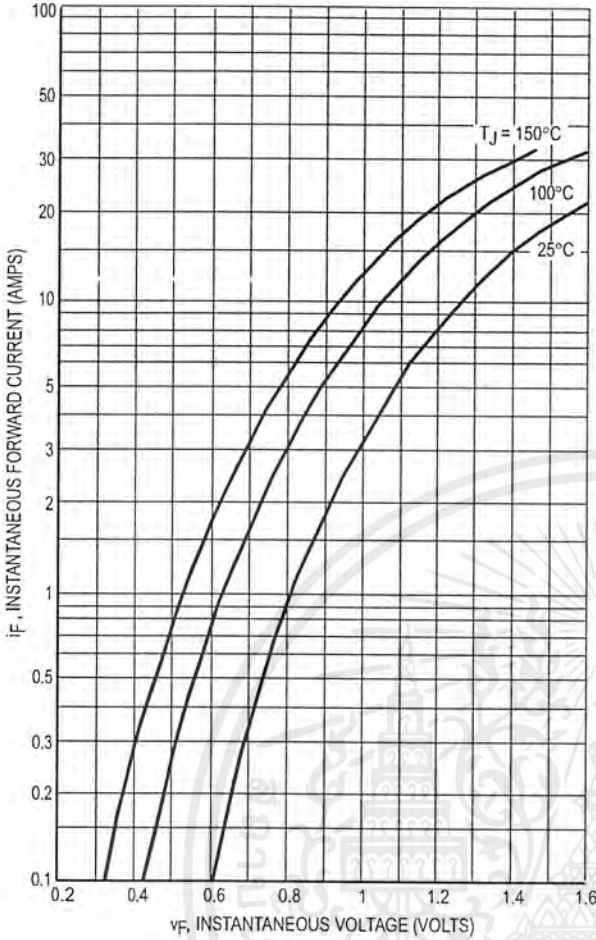
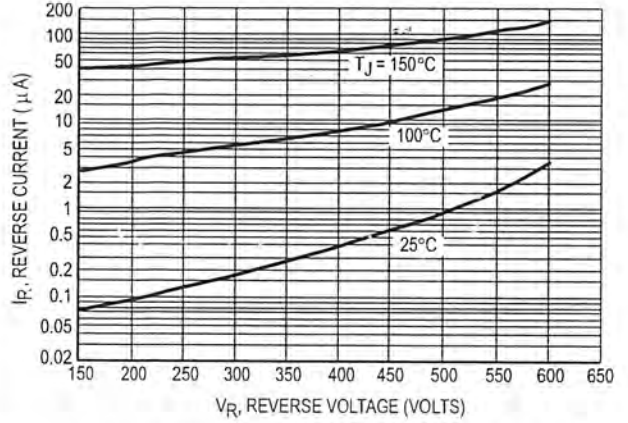


Figure 10. Power Dissipation (Per Leg)

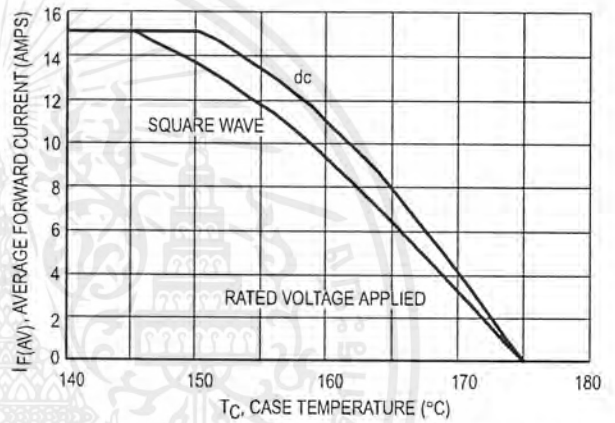
**MUR3020PT MUR3040PT MUR3060PT**



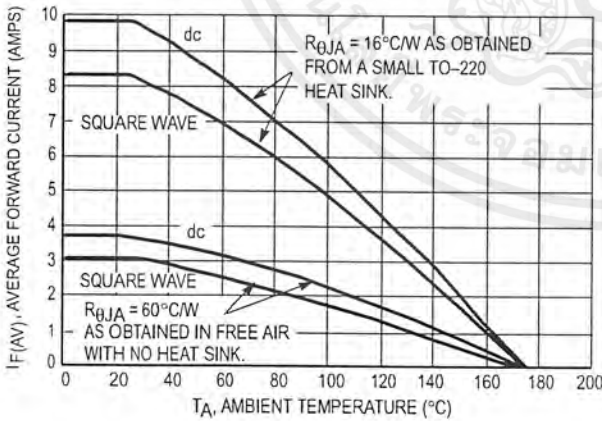
**Figure 11. Typical Forward Voltage (Per Leg)**



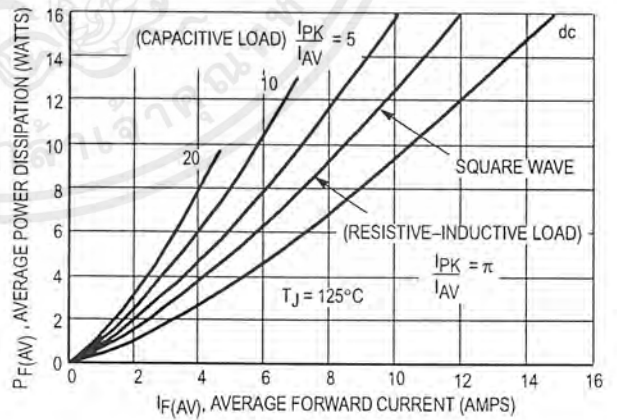
**Figure 12. Typical Reverse Current (Per Leg)**



**Figure 13. Current Derating, Case (Per Leg)**



**Figure 14. Current Derating, Ambient (Per Leg)**



**Figure 15. Power Dissipation (Per Leg)**

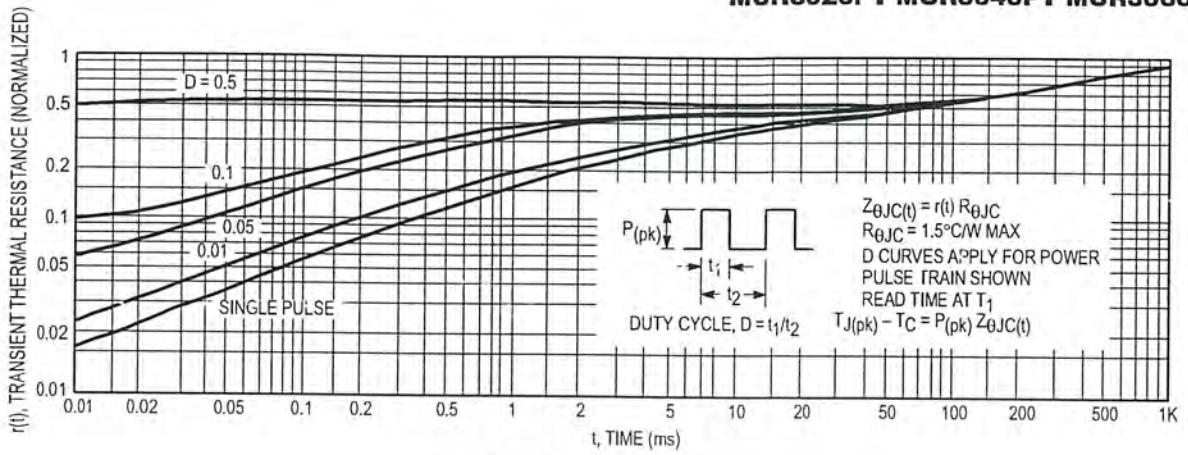


Figure 16. Thermal Response

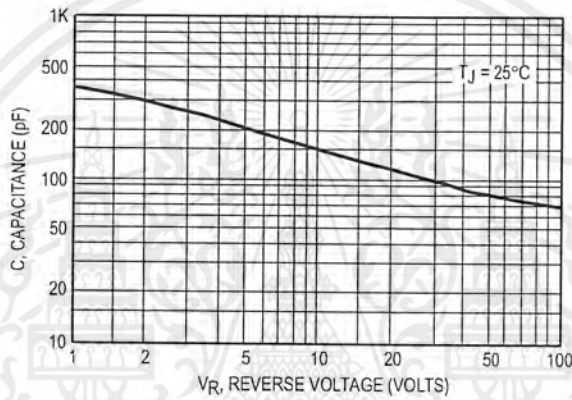
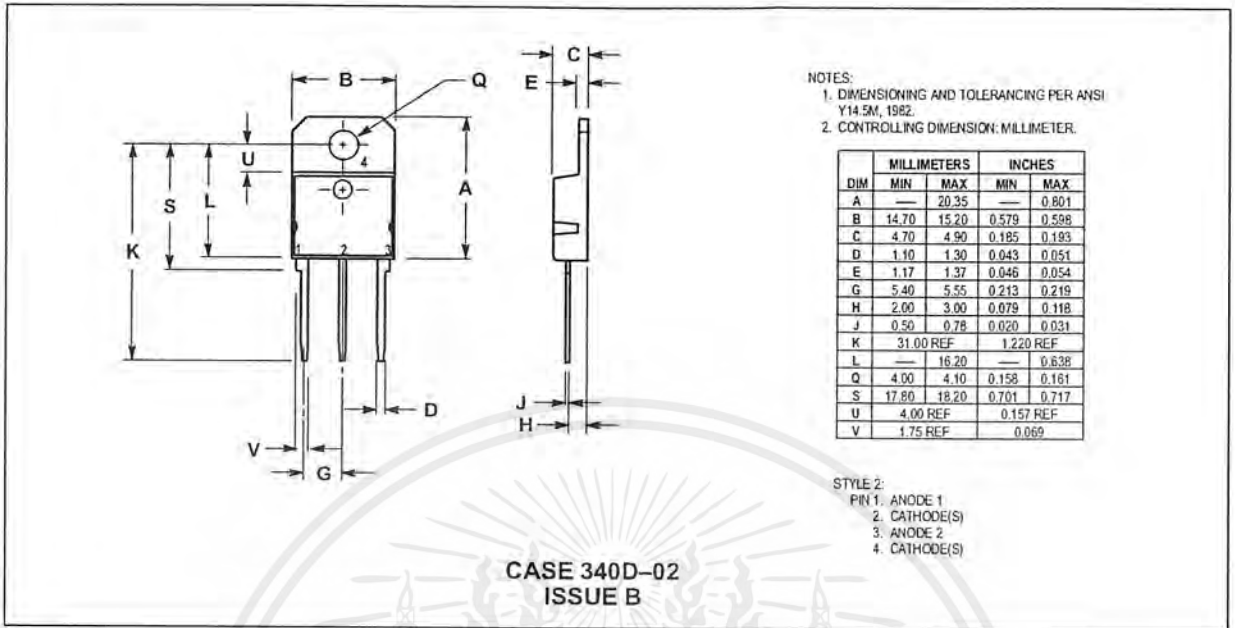


Figure 17. Typical Capacitance (Per Leg)

**MUR3020PT MUR3040PT MUR3060PT**

**OUTLINE DIMENSIONS**



Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

Mfax is a trademark of Motorola, Inc.

**How to reach us:**

**USA/EUROPE/Locations Not Listed:** Motorola Literature Distribution:  
 P.O. Box 5405, Denver, Colorado 80217. 1-303-675-2140 or 1-800-441-2447

**JAPAN:** Nippon Motorola Ltd.: SPD, Strategic Planning Office, 4-32-1,  
 Nishi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141, Japan. 81-3-5487-8488

**Customer Focus Center: 1-800-521-6274**

**Mfax™:** RMFAX0@email.sps.mot.com - TOUCHTONE 1-602-244-6609  
 Motorola Fax Back System - US & Canada ONLY 1-800-774-1848  
 - http://sps.motorola.com/mfax/

**ASIA/PACIFIC:** Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park;  
 51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298

**HOME PAGE:** http://motorola.com/sps/



Rectifier **MUR3020PT/D**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MC1495

## Wideband Linear Four-Quadrant Multiplier

The MC1495 is designed for use where the output is a linear product of two input voltages. Maximum versatility is assured by allowing the user to select the level shift method. Typical applications include: multiply, divide\*, square root\*, mean square\*, phase detector, frequency doubler, balanced modulator/demodulator, and electronic gain control.

- Wide Bandwidth
- Excellent Linearity:
  - 2% max Error on X Input, 4% max Error on Y Input Over Temperature
  - 1% max Error on X Input, 2% max Error on Y Input at + 25°C
- Adjustable Scale Factor, K
- Excellent Temperature Stability
- Wide Input Voltage Range:  $\pm 10$  V
- $\pm 15$  V Operation

\*When used with an operational amplifier.

### LINEAR FOUR-QUADRANT MULTIPLIER

#### SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA



**D SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 751A  
(SO-14)**



**P SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 646**

#### MAXIMUM RATINGS ( $T_A = + 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Applied Voltage ( $V_2-V_1, V_{14}-V_1, V_1-V_9, V_1-V_{12}, V_1-V_4,$ $V_1-V_8, V_{12}-V_7, V_9-V_7, V_8-V_7, V_4-V_7$ )	$\Delta V$	30	Vdc
Differential Input Signal	$V_{12}-V_9$ $V_4-V_8$	$\pm (6+I_3 R_X)$ $\pm (6+I_3 R_Y)$	Vdc
Maximum Bias Current	$I_3$ $I_{13}$	10 10	mA
Operating Temperature Range	$T_A$	0 to +70 -40 to +125	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

#### ORDERING INFORMATION

Device	Tested Operating Temperature Range	Package
MC1495D	$T_A = 0^\circ$ to + 70 $^\circ\text{C}$	SO-14
MC1495P		Plastic DIP
MC1495BP	$T_A = - 40^\circ$ to +125 $^\circ\text{C}$	Plastic DIP

## MC1495

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** (+V = +32 V, -V = -15 V, T<sub>A</sub> = +25°C, I<sub>3</sub> = I<sub>13</sub> = 1.0 mA, R<sub>X</sub> = R<sub>Y</sub> = 15 kΩ, R<sub>L</sub> = 11 kΩ, unless otherwise noted.)

Characteristics	Figure	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Linearity (Output Error in percent of full scale) T <sub>A</sub> = +25°C -10 < V <sub>X</sub> < +10 (V <sub>Y</sub> = ±10 V) -10 < V <sub>Y</sub> < +10 (V <sub>X</sub> = ±10 V) T <sub>A</sub> = T <sub>Low</sub> to T <sub>High</sub> -10 < V <sub>X</sub> < +10 (V <sub>Y</sub> = ±10 V) -10 < V <sub>Y</sub> < +10 (V <sub>X</sub> = ±10 V)	5	E <sub>RX</sub> E <sub>RY</sub>  E <sub>RX</sub> E <sub>RY</sub>	- -  - -	±1.0 ±2.0  ±1.5 ±3.0	±1.0 ±2.0  ±2.0 ±4.0	%
Square Mode Error (Accuracy in percent of full scale after Offset and Scale Factor adjustment) T <sub>A</sub> = +25°C T <sub>A</sub> = T <sub>Low</sub> to T <sub>High</sub>	5	ESQ	- -	±0.75 ±1.0	- -	%
Scale Factor (Adjustable) $(K = \frac{2R_L}{13R_X R_Y})$	-	K	-	0.1	-	
Input Resistance (f = 20 Hz)	7	R <sub>inX</sub> R <sub>inY</sub>	- -	30 20	- -	MΩ
Differential Output Resistance (f = 20 Hz)	8	R <sub>O</sub>	-	300	-	kΩ
Input Bias Current $I_{bx} = \frac{(I_9 + I_{12})}{2}$ , $I_{by} = \frac{(I_4 + I_8)}{2}$ T <sub>A</sub> = +25°C T <sub>A</sub> = T <sub>Low</sub> to T <sub>High</sub>	6	I <sub>bx</sub> , I <sub>by</sub>	- -	2.0 2.0	8.0 12	μA
Input Offset Current $ I_9 - I_{12} $ $ I_4 - I_8 $ T <sub>A</sub> = +25°C T <sub>A</sub> = T <sub>Low</sub> to T <sub>High</sub>	6	I <sub>ioX</sub>  ,  I <sub>ioY</sub>	- -	0.4 0.4	1.0 2.0	μA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current T <sub>A</sub> = T <sub>Low</sub> to T <sub>High</sub>	6	TC <sub>io</sub>	-	2.5	-	nA/°C
Output Offset Current $ I_{14} - I_2 $ T <sub>A</sub> = +25°C T <sub>A</sub> = T <sub>Low</sub> to T <sub>High</sub>	6	I <sub>oo</sub>	-	10 20	50 100	μA
Average Temperature Coefficient of Output Offset Current T <sub>A</sub> = T <sub>Low</sub> to T <sub>High</sub>	6	TC <sub>ioo</sub>	-	20	-	nA/°C
Frequency Response 3.0 dB Bandwidth, R <sub>L</sub> = 11 kΩ 3.0 dB Bandwidth, R <sub>L</sub> = 50 Ω (Transconductance Bandwidth) 3° Relative Phase Shift Between V <sub>X</sub> and V <sub>Y</sub> 1% Absolute Error Due to Input-Output Phase Shift	9,10	BW(3dB) TBW(3dB) φ φ	- - - -	3.0 80 750 30	- - - -	MHz MHz kHz kHz
Common Mode Input Swing (Either Input)	11	CMV	±10.5	±12	-	Vdc
Common Mode Gain (Either Input) T <sub>A</sub> = +25°C T <sub>A</sub> = T <sub>Low</sub> to T <sub>High</sub>	11	ACM	-50 -40	-60 -50	- -	dB
Common Mode Quiescent Output Voltage	12	V <sub>O1</sub> V <sub>O2</sub>	- -	21 21	- -	Vdc
Differential Output Voltage Swing Capability	9	V <sub>O</sub>	-	±14	-	V <sub>pk</sub>
Power Supply Sensitivity	12	S <sup>+</sup> S <sup>-</sup>	- -	5.0 10	- -	mV/V
Power Supply Current	12	I <sub>7</sub>	-	6.0	7.0	mA
DC Power Dissipation	12	P <sub>D</sub>	-	135	170	mW

NOTES: 1. T<sub>High</sub> = +70°C for MC1495  
= +125°C for MC1495B  
T<sub>Low</sub> = 0°C for MC1495  
= -40°C for MC1495B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MC1495

Figure 1. Multiplier Transfer Characteristic

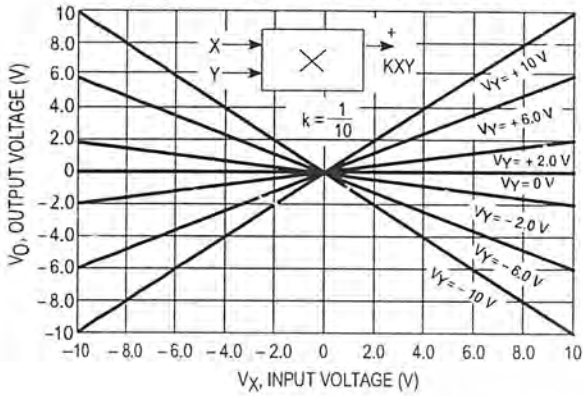


Figure 2. Transconductance Bandwidth

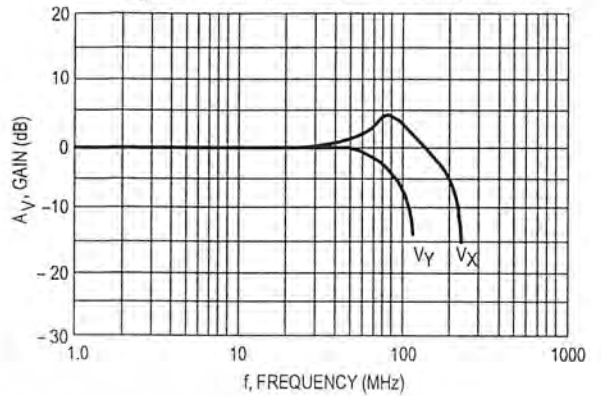
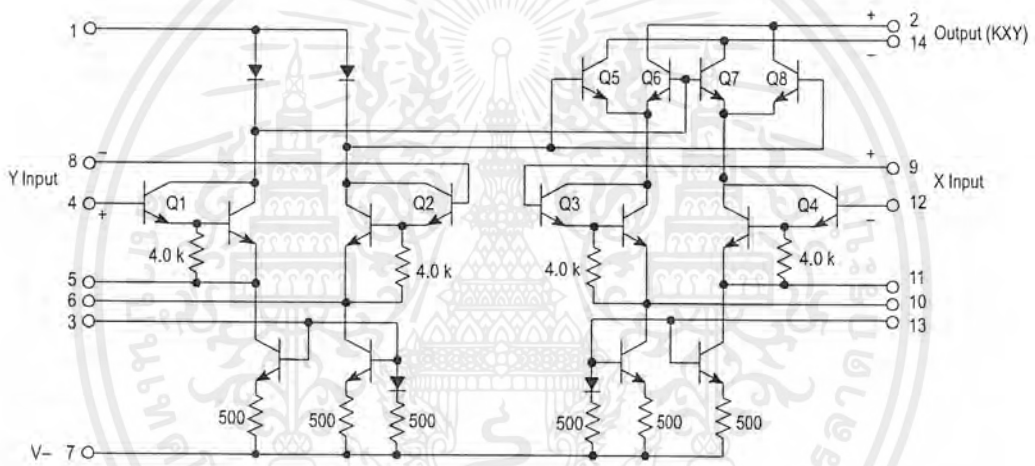
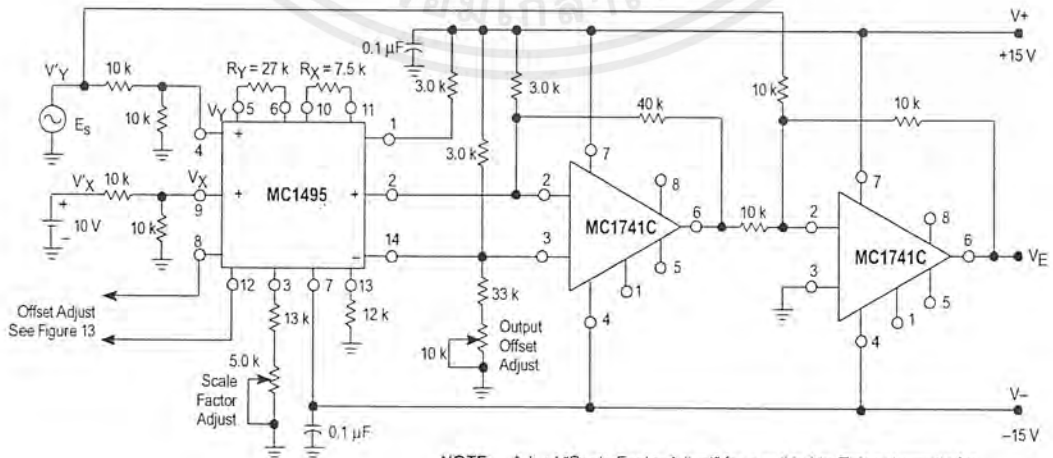


Figure 3. Circuit Schematic



This device contains 16 active transistors.

Figure 4. Linearity (Using Null Technique)



NOTE: Adjust "Scale Factor Adjust" for a null in  $V_E$ . This schematic for illustrative purposes only, not specified for test conditions.

# MC1495

Figure 5. Linearity (Using X-Y Plotter Technique)

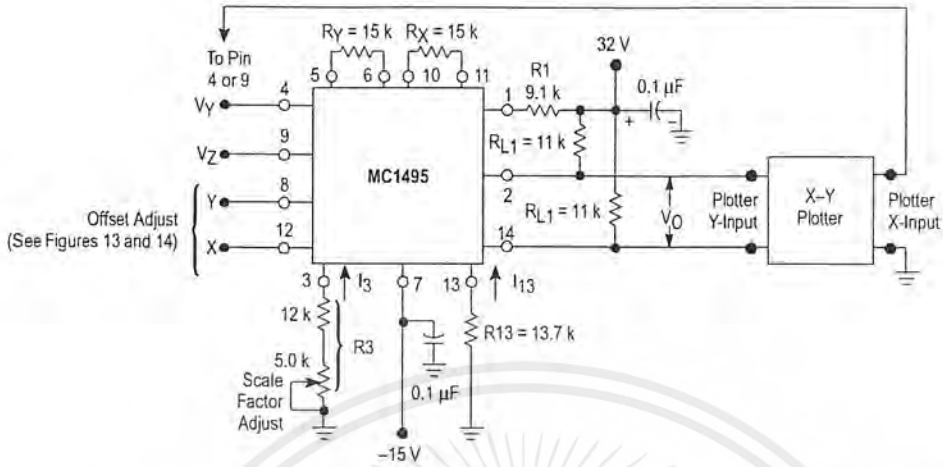


Figure 6. Input and Output Current

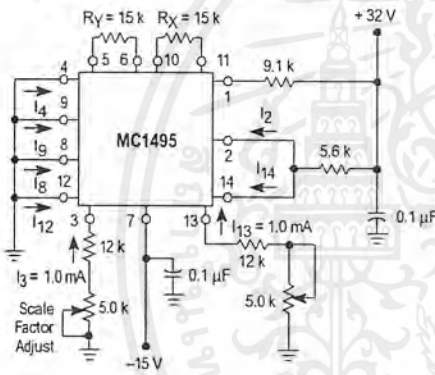
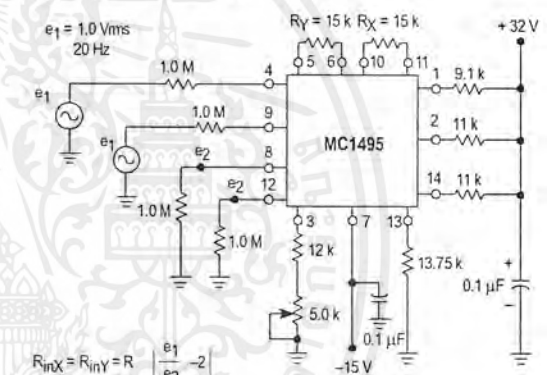
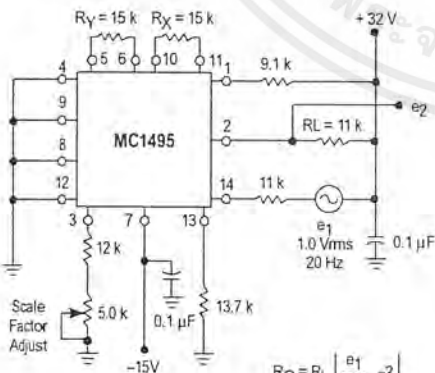


Figure 7. Input Resistance



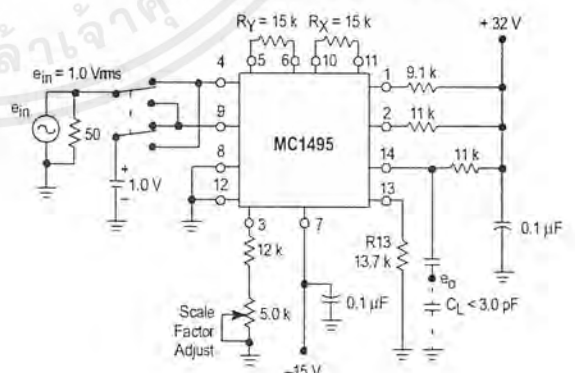
$$R_{inX} = R_{inY} = R \left| \frac{e_1}{e_2} - 2 \right|$$

Figure 8. Output Resistance



$$R_O = R_L \left| \frac{e_1}{e_2} - 2 \right|$$

Figure 9. Bandwidth ( $R_L = 11\text{ k}\Omega$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MC1495

Figure 10. Bandwidth ( $R_L = 50 \Omega$ )

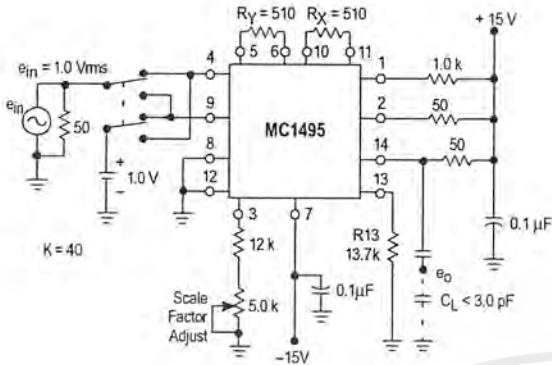


Figure 11. Common Mode Gain and Common Mode Input Swing

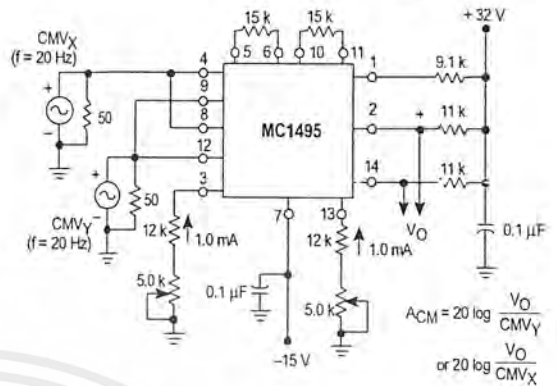


Figure 12. Power Supply Sensitivity

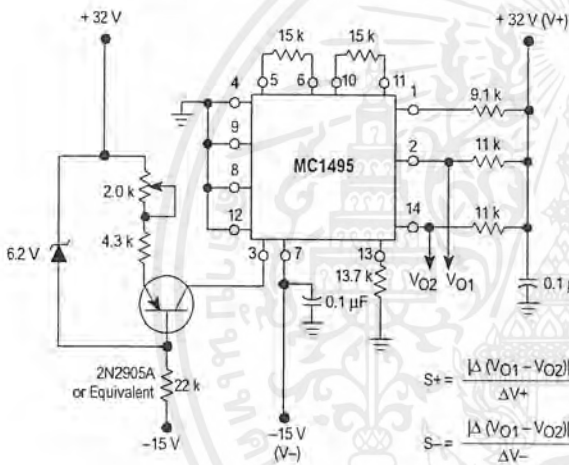


Figure 13. Offset Adjust Circuit

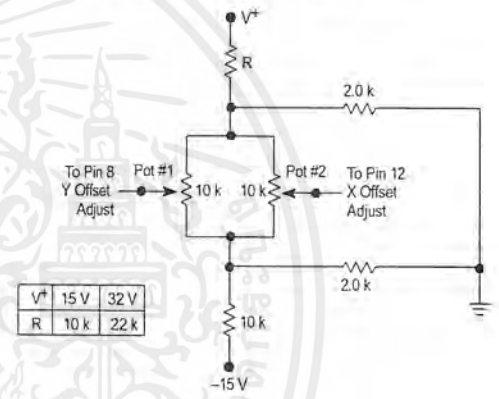
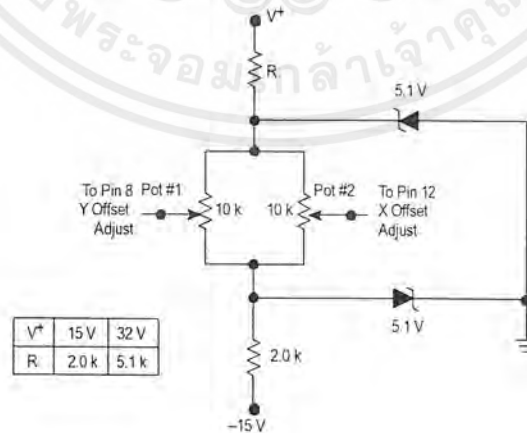


Figure 14. Offset Adjust Circuit (Alternate)



# MC1495

Figure 15. Linearity versus Temperature

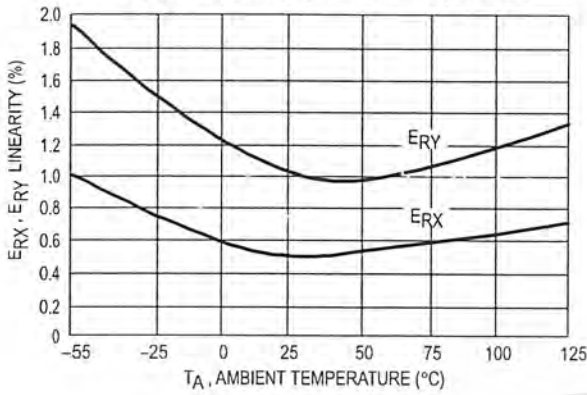


Figure 16. Scale Factor versus Temperature

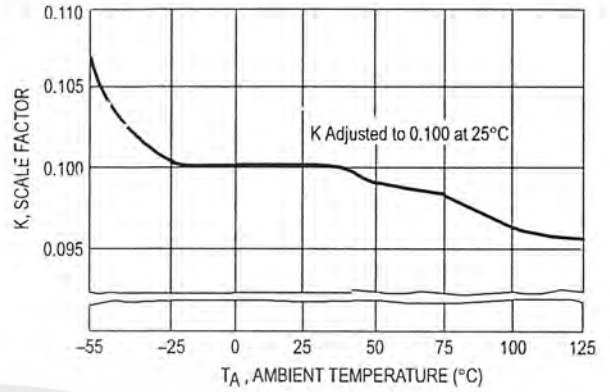


Figure 17. Error Contributed by Input Differential Amplifier

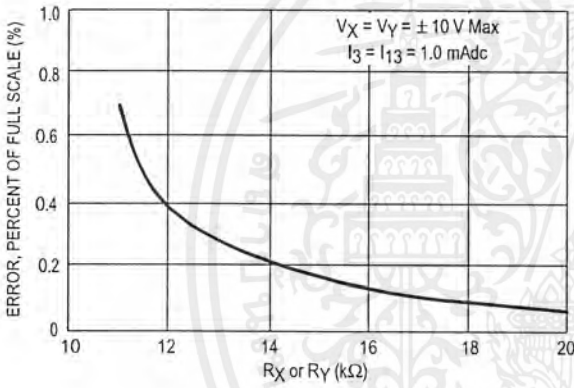


Figure 18. Error Contributed by Input Differential Amplifier

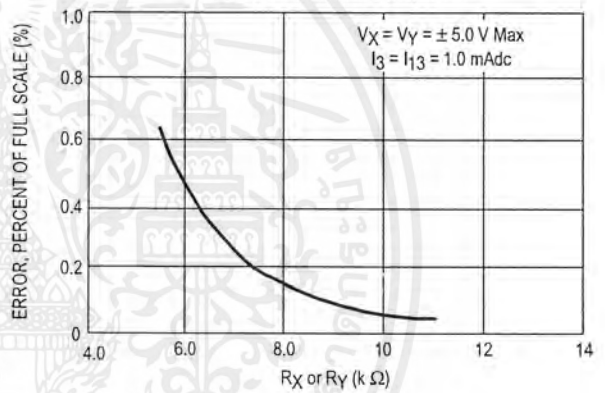
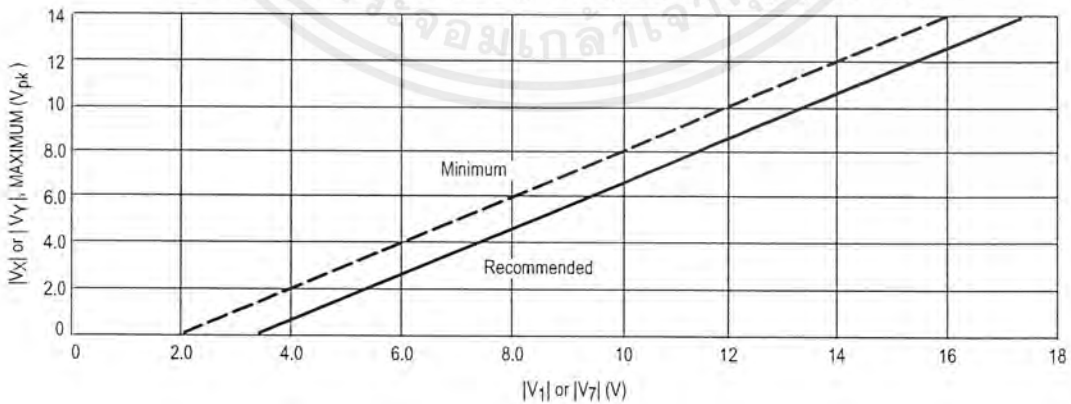
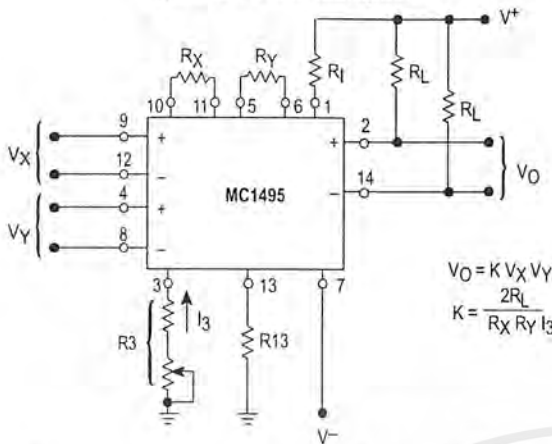


Figure 19. Maximum Allowable Input Voltage versus Voltage at Pin 1 or Pin 7



## MC1495

Figure 20. Basic Multiplier



If an operational amplifier is used for level shift, as shown in Figure 21, the output swing (of the multiplier) is greatly reduced. See Section 3 for further details.

### GENERAL DESIGN PROCEDURE

Selection of component values is best demonstrated by the following example. Assume resistive dividers are used at the X and Y-inputs to limit the maximum multiplier input to  $\pm 5.0$  V [ $V_X = V_Y(\text{max})$ ] for a  $\pm 10$  V input [ $V_X' = V_Y'(\text{max})$ ] (see Figure 21). If an overall scale factor of 1/10 is desired,

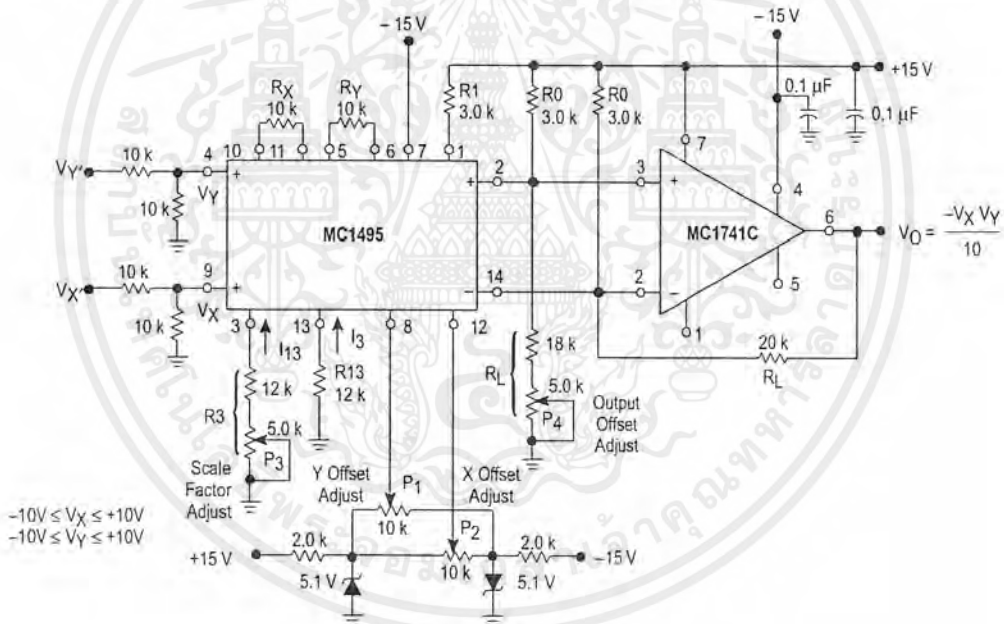
$$\text{then, } V_O = \frac{V_X' V_Y'}{10} = \frac{(2V_X)(2V_Y)}{10} = 4/10 V_X V_Y$$

Therefore,  $K = 4/10$  for the multiplier (excluding the divider network).

*Step 1.* The first step is to select current  $I_3$  and current  $I_{13}$ . There are no restrictions on the selection of either of these currents except the power dissipation of the device.  $I_3$  and  $I_{13}$  will normally be 1.0 mA or 2.0 mA. Further,  $I_3$  does not have to be equal to  $I_{13}$ , and there is normally no need to make them different. For this example, let

$$I_3 = I_{13} = 1.0 \text{ mA.}$$

Figure 21. Multiplier with Operational Amplifier Level Shift



## MC1495

Referring to Figure 21, the level shift components will be determined. When  $V_X = V_Y = 0$ , the currents  $I_2$  and  $I_{14}$  will be equal to  $I_{13}$ . In Step 3,  $R_L$  was found to be  $20\text{ k}\Omega$  and in Step 4,  $V_2$  and  $V_{14}$  were found to be approximately  $11\text{ V}$ . From this information  $R_O$  can be found easily from the following equation (neglecting the operational amplifiers bias current):

$$\frac{V_2}{R_L} + I_{13} = \frac{V^+ - V_2}{R_O}$$

$$\text{And for this example, } \frac{11\text{ V}}{20\text{ k}\Omega} + 1.0\text{ mA} = \frac{15\text{ V} - 11\text{ V}}{R_O}$$

Solving for  $R_O$ :  $R_O = 2.6\text{ k}\Omega$ , thus, select  $R_O = 3.0\text{ k}\Omega$

For  $R_O = 3.0\text{ k}\Omega$ , the voltage at Pins 2 and 14 is calculated to be:

$$V_2 = V_{14} = 10.4\text{ V.}$$

The linearity of this circuit (Figure 21) is likely to be as good or better than the circuit of Figure 5. Further improvements are possible as shown in Figure 23 where  $R_Y$  has been increased substantially to improve the Y linearity, and  $R_X$  decreased somewhat so as not to materially affect the X linearity. This avoids increasing  $R_L$  significantly in order to maintain a K of 0.1.

The versatility of the MC1495 allows the user to to optimize its performance for various input and output signal levels.

### OFFSET AND SCALE FACTOR ADJUSTMENT

#### Offset Voltages

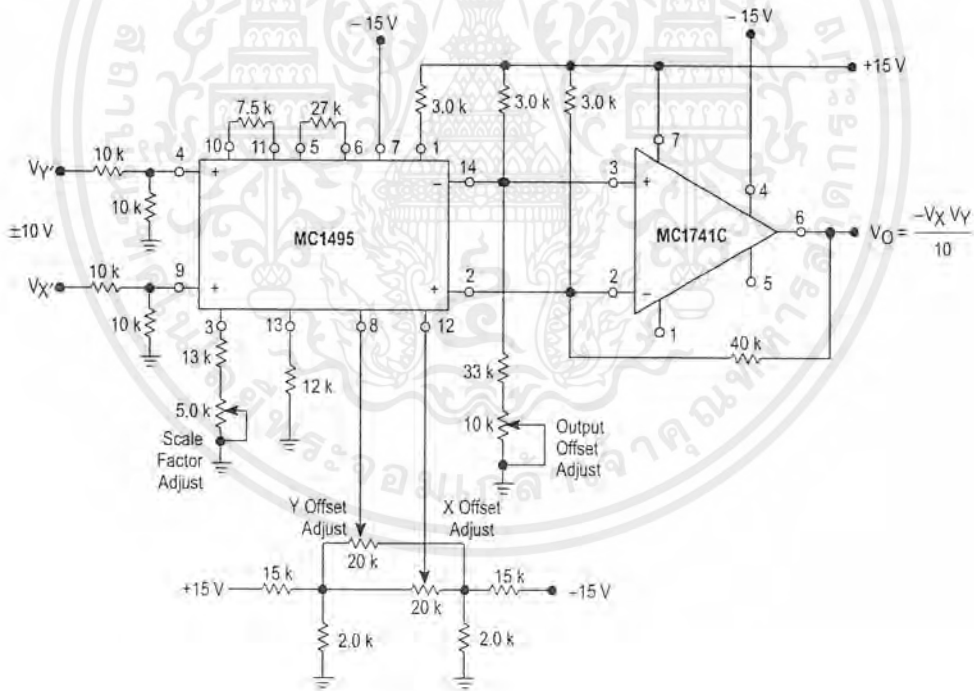
Within the monolithic multiplier (Figure 3) transistor base-emitter junctions are typically matched within  $1.0\text{ mV}$  and resistors are typically matched within  $2\%$ . Even with this careful matching, an output error can occur. This output error is comprised of X-input offset voltage, Y-input offset voltage, and output offset voltage. These errors can be adjusted to zero with the techniques shown in Figure 21. Offset terms can be shown analytically by the transfer function:

$$V_O = K[V_X \pm V_{ioX} \pm V_{X(off)}] [V_Y \pm V_{ioY} \pm V_{Y(off)}] \pm V_{OO} \quad (1)$$

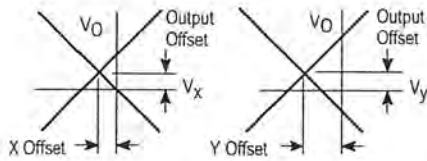
Where:

- K = scale factor
- $V_X$  = "x" input voltage
- $V_Y$  = "y" input voltage
- $V_{ioX}$  = "x" input offset voltage
- $V_{ioY}$  = "y" input offset voltage
- $V_{X(off)}$  = "x" input offset adjust voltage
- $V_{Y(off)}$  = "y" input offset adjust voltage
- $V_{OO}$  = output offset voltage.

Figure 23. Multiplier with Improved Linearity



X, Y and Output Offset Voltages



For most dc applications, all three offset adjust potentiometers ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_4$ ) will be necessary. One or more offset adjust potentiometers can be eliminated for ac applications (see Figures 28, 29, 30, 31).

If well regulated supply voltages are available, the offset adjust circuit of Figure 13 is recommended. Otherwise, the circuit of Figure 14 will greatly reduce the sensitivity to power supply changes.

**Scale Factor**

The scale factor  $K$  is set by  $P_3$  (Figure 21).  $P_3$  varies  $I_3$  which inversely controls the scale factor  $K$ . It should be noted that current  $I_3$  is one-half the current through  $R_1$ .  $R_1$  sets the bias level for  $Q_5$ ,  $Q_6$ ,  $Q_7$ , and  $Q_8$  (see Figure 3). Therefore, to be sure that these devices remain active under all conditions of input and output swing, care should be exercised in adjusting  $P_3$  over wide voltage ranges (see General Design Procedure).

**Adjustment Procedures**

The following adjustment procedure should be used to null the offsets and set the scale factor for the multiply mode of operation, (see Figure 21).

1. X-Input Offset
  - (a) Connect oscillator (1.0 kHz, 5.0 V<sub>pp</sub> sinewave) to the Y-input (Pin 4).
  - (b) Connect X-input (Pin 9) to ground.
  - (c) Adjust X offset potentiometer ( $P_2$ ) for an ac null at the output.
2. Y-Input Offset
  - (a) Connect oscillator (1.0 kHz, 5.0 V<sub>pp</sub> sinewave) to the X-input (Pin 9).
  - (b) Connect Y-input (Pin 4) to ground.
  - (c) Adjust Y offset potentiometer ( $P_1$ ) for an ac null at the output.
3. Output Offset
  - (a) Connect both X and Y-inputs to ground.
  - (b) Adjust output offset potentiometer ( $P_4$ ) until the output voltage ( $V_O$ ) is 0 Vdc.
4. Scale Factor
  - (a) Apply +10 Vdc to both the X and Y-inputs.
  - (b) Adjust  $P_3$  to achieve +10 V at the output.
5. Repeat steps 1 through 4 as necessary.

The ability to accurately adjust the MC1495 depends upon the characteristics of potentiometers  $P_1$  through  $P_4$ . Multi-turn, infinite resolution potentiometers with low temperature coefficients are recommended.

**DC APPLICATIONS**

**Multiply**

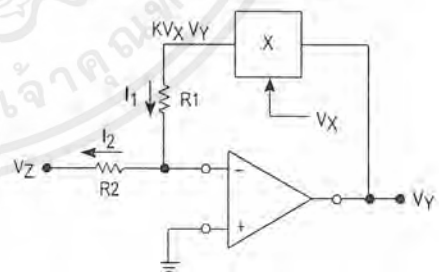
The circuit shown in Figure 21 may be used to multiply signals from dc to 100 kHz. Input levels to the actual multiplier are 5.0 V (max). With resistive voltage dividers the maximum could be very large however, for this application two-to-one dividers have been used so that the maximum input level is 10 V. The maximum output level has also been designed for 10 V (max).

**Squaring Circuit**

If the two inputs are tied together, the resultant function is squaring; that is  $V_O = KV^2$  where  $K$  is the scale factor. Note that all error terms can be eliminated with only three adjustment potentiometers, thus eliminating one of the input offset adjustments. Procedures for nulling with adjustments are given as follows:

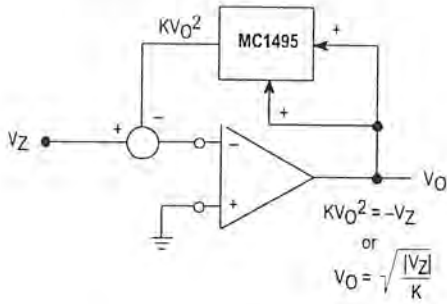
- A. AC Procedure:
  1. Connect oscillator (1.0 kHz, 15 V<sub>pp</sub>) to input.
  2. Monitor output at 2.0 kHz with tuned voltmeter and adjust  $P_3$  for desired gain. (Be sure to peak response of the voltmeter.)
  3. Tune voltmeter to 1.0 kHz and adjust  $P_1$  for a minimum output voltage.
  4. Ground input and adjust  $P_4$  (output offset) for 0 Vdc output.
  5. Repeat steps 1 through 4 as necessary.
- B. DC Procedure:
  1. Set  $V_X = V_Y = 0$  V and adjust  $P_4$  (output offset potentiometer) such that  $V_O = 0$  Vdc
  2. Set  $V_X = V_Y = 1.0$  V and adjust  $P_1$  (Y-input offset potentiometer) such that the output voltage is +0.100 V.
  3. Set  $V_X = V_Y = 10$  Vdc and adjust  $P_3$  such that the output voltage is +10 V.
  4. Set  $V_X = V_Y = -10$  Vdc. Repeat steps 1 through 3 as necessary.

Figure 24. Basic Divide Circuit



## MC1495

Figure 26. Basic Square Root Circuit



### Square Root

A special case of the divide circuit in which the two inputs to the multiplier are connected together is the square root function as indicated in Figure 26. This circuit may suffer from latch-up problems similar to those of the divide circuit. Note that only one polarity of input is allowed and diode clamping (see Figure 27) protects against accidental latch-up.

This circuit also may be adjusted in the closed-loop mode as follows:

1. Set  $V_Z$  to  $-0.01$  V and adjust  $P_4$  (output offset) for  $V_O = +0.316$  V, being careful to approach the output from the positive side to preclude the effect of the output diode clamping.
2. Set  $V_Z$  to  $-0.9$  V and adjust  $P_2$  (X adjust) for  $V_O = +3.0$  V.
3. Set  $V_Z$  to  $-10$  V and adjust  $P_3$  (scale factor adjust) for  $V_O = +10$  V.
4. Steps 1 through 3 may be repeated as necessary to achieve desired accuracy.

### AC APPLICATIONS

The applications that follow demonstrate the versatility of the monolithic multiplier. If a potted multiplier is used for these cases, the results generally would not be as good because the potted units have circuits that, although they optimize dc multiplication operation, can hinder ac applications.

Frequency doubling often is done with a diode where the fundamental plus a series of harmonics are generated. However, extensive filtering is required to obtain the desired harmonic, and the second harmonic obtained under this technique usually is small in magnitude and requires amplification.

When a multiplier is used to double frequency the second harmonic is obtained directly, except for a dc term, which can be removed with ac coupling.

$$e_o = KE^2 \cos^2 \omega t$$

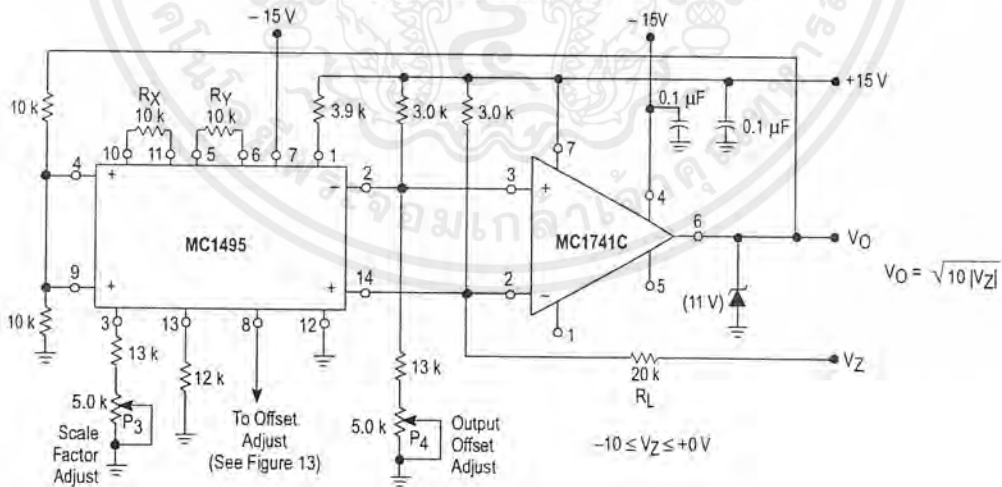
$$e_o = \frac{KE^2}{2} (1 + \cos 2\omega t).$$

A potted multiplier can be used to obtain the double frequency component, but frequency would be limited by its internal level-shift amplifier. In the monolithic units, the amplifier is omitted.

In a typical doubler circuit, conventional  $\pm 15$  V supplies are used. An input dynamic range of 5.0 V peak-to-peak is allowed. The circuit generates wave-forms that are double frequency; less than 1% distortion is encountered without filtering. The configuration has been successfully used in excess of 200 kHz; reducing the scale factor by decreasing the load resistors can further expand the bandwidth.

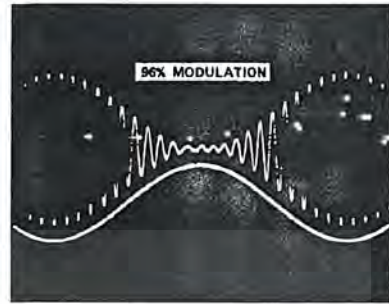
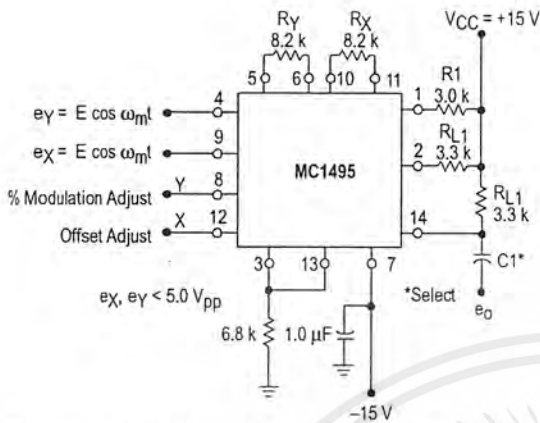
Figure 29 represents an application for the monolithic multiplier as a balanced modulator. Here, the audio input signal is 1.6 kHz and the carrier is 40 kHz.

Figure 27. Square Root Circuit



# MC1495

Figure 30. Amplitude Modulation



The signal is applied to the unit's Y-input. Since the total input range is limited to  $1.0 V_{pp}$ , a  $2.0 V$  swing, a current source of  $2.0 \text{ mA}$  and an  $R_Y$  value of  $1.0 \text{ k}\Omega$  is chosen. This takes best advantage of the dynamic range and insures linear operation in the Y-channel.

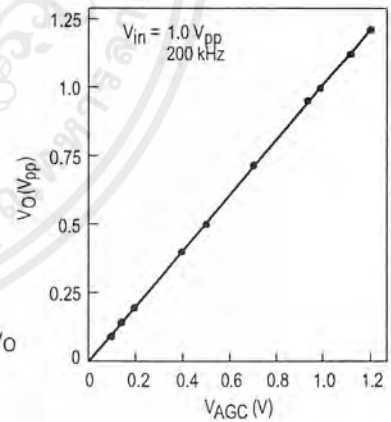
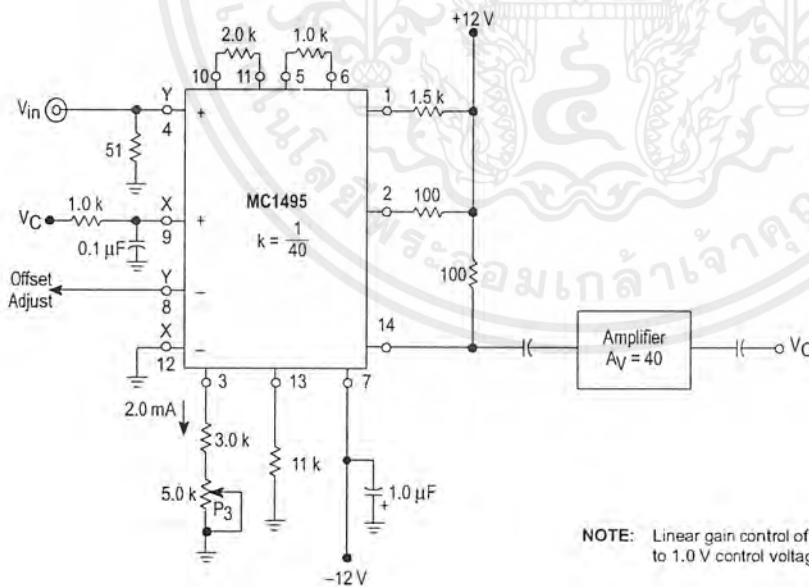
Since the X-input varies between  $0$  and  $+1.0 \text{ V}$ , the current source selected was  $1.0 \text{ mA}$ , and the  $R_X$  value chosen was  $2.0 \text{ k}\Omega$ . This also insures linear operation over the X-input dynamic range. Choosing  $R_L = 100$  assures wide bandwidth operation.

Hence, the scale factor for this configuration is:

$$K = \frac{R_L}{R_X R_Y I_3} = \frac{100}{(2 \text{ k}) (1 \text{ k}) (2 \times 10^{-3})} \text{ V}^{-1} = \frac{1}{40} \text{ V}^{-1}$$

The 2 in the numerator of the equation is missing in this scale factor expression because the output is single-ended and ac coupled.

Figure 31. Linear Gain Control



NOTE: Linear gain control of a  $1.0 V_{pp}$  signal is performed with a  $0 \text{ V}$  to  $1.0 \text{ V}$  control voltage. If  $V_C$  is  $0.5 \text{ V}$  the output will be  $0.5 V_{pp}$ .

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.จรงค์ บัญเส็ง ซึ่งกรุณาให้ความช่วยเหลือทางด้านข้อมูล สถานที่ทำงานและการให้คำปรึกษาในการจัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับนี้ ทำให้งานปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณศรายุทธ คำมูล ซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้อข้อมูลตลอดจนให้ข้อเสนอแนะช่วยเหลือในการทำงานตลอดมาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณความช่วยเหลือจากครอบครัวของผู้จัดทำสำหรับทุนทรัพย์ที่ใช้ในการทำงานต่างๆและคอยสนับสนุนให้การทำงานเป็นไปได้อย่างดียิ่ง

สุดท้ายขอขอบคุณนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ทุกคนที่คอยให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการทำงานอย่างดีเสมอมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Sebastian Tepper, Juan W. Dixon, Gustavo Venegas and Luis Moran, "A Simple Frequency-Independent Method for Calculating the Reactive and Harmonic Current in a Nonlinear Load," IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol.43, No.6, pp 647-654, December 1996.
- [2] H.L. Jou, J.C. Wu and H.Y. Chu, "New Single-Phase Active Power Filter," IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol.141, No.3, pp 129-134, May 1994.
- [3] A.Y.K. Wong, D.K.W. Cheng and Y.S. Lee, "Harmonic Compensation for Nonlinear Loads by Active Power Filter," IEEE, pp 894-899, 1999.
- [4] Mohan, Underland and Robbins, "Power Electronics", John Wiley & Sons, New York, 1993.
- [5] Robert F. Coughlin and Frederick F. Driscoll, 1987. "Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuit", แปลโดย วิโรจน์ อัสวรงค์, ชัชวาลย์ เต็มฤทธิ์วงศ์และกรชูลี ใส้สดีตย์, ประเทศไทย, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด.