

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่

POWER QUALITY ENHANCEMENT STUDY FOR MODERN POWER SYSTEM



T139912



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# POWER QUALITY ENHANCEMENT STUDY FOR MODERN POWER SYSTEM



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF BACHELOR OF ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่  
POWER QUALITY ENHANCEMENT STUDY FOR MODERN POWER SYSTEM



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว

ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่

ผู้จัดทำ

1. นาย ตริวัชร เตชะพะโลกุล
2. นาย ถิรวัดน์ ศิริวงศ์พานิช
3. นาย ทฤษฎี พรหมสิทธิ์
4. นาย ธนัชพงศ์ เดชกัณฑ์





..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว )

 ( นพว )

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาย ชมภูอินไหว )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่

นาย นายตรีวัชร เตชะพะโลกุล

นาย ถิรวัดน์ ศิริวงศ์พานิช

นาย ทฤษฎี พรหมสิทธิ์

นาย ธนัชพงศ์ เดชกัณฑ์

ผศ. ดร. เขาว์ ชมภูอินไหว

ผศ. ดร. ชาย ชมภูอินไหว

อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2557

### บทคัดย่อ

ฮาร์มอนิกเป็นหนึ่งในปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้รูปคลื่นไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ เป็นผลให้คุณภาพทางไฟฟ้าลดลง ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้ทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาด เกิดความร้อนหรือเกิดเรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง สาเหตุเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น ปริญญาโทฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกประเภทวงจร แอคทีฟฟิลเตอร์แบบฉีดกระแสฮาร์มอนิก โดยจุดประสงค์หลักของวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบฉีดกระแสฮาร์มอนิก เพื่อใช้ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก, ปรับปรุงค่าประกอบกำลังให้ดีขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรลบ วงจรคูณ วงจรขับเกท วงจรตรวจจับกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรฮีสเตอร์รีซิส วงจรเมื่อเวลา วงจรไฟเลี้ยง วงจรอินเวอร์เตอร์ โดยจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB & SIMULINK และ NI Multisim เพื่อสร้างวงจรต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# POWER QUALITY ENHANCEMENT STUDY FOR MODERN POWER SYSTEM

Triwat           Techapalokun  
Tirawat         Siriwongpanich  
Thitsadee       Promsit  
Thanutpong    Dechkuntha

Assit. Prof. Dr. Chow Chompoo-inwai Supervisor

Assit. Prof. Dr. Chai Chompoo-inwai Supervisor

## ABSTRACT

Harmonics is a problem of power quality that effect to the power system. Harmonics can do a distorted waveform from sinusoidal. Harmonics cause to mistake operating equipment, heating and resonance from a capacitor to power factor correction. Harmonics are occurred by non-linear load. The purpose of this thesis is to study design of active filter type inject compensated current to eliminate harmonic current. The active filter including subtract circuit, multiplier circuit, current detection circuit, hysteresis circuit, drive circuits, power supply circuit and inverter circuit. Simulation of the active filter operated by Matlab/similink and NI Multisim for the prototype design.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือในการให้ความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน แม้จะพบอุปสรรคในการทำงานมากมาย อย่างไรก็ตามปริญญาบัตรเล่มนี้ก็สามารถสำเร็จจุล่งมาได้ ซึ่งขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ ผศ. ดร. เซวี่ ชมภูอินไหว และ ผศ. ดร. ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการทำปริญญาบัตรมาด้วยดีตลอด ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโทและปริญญาเอก ในห้อง LAB ESIRC ทุกคน โดยเฉพาะพี่สุทธิพงศ์ บุญทากลาง ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษามาโดยตลอด ตลอดจนเพื่อนๆทั้งหลายที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำ และเป็นกำลังใจ และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณพระคุณบุพการี ผู้ซึ่งมีพระคุณอย่างยิ่งของชีวิต และทุกๆท่านผู้ซึ่งช่วยเหลืออยู่เบื้องหลังความสำเร็จของปริญญาบัตรเล่มนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ปัญหาและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิจัย	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 คำนียามฮาร์มอนิก	3
2.1.1 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม	4
2.1.2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	5
2.1.3 ผลกระทบของฮาร์มอนิก	6
2.2 วงจรที่ใช้กำจัดฮาร์มอนิก	7
2.2.1 วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter)	7
2.2.2 วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter)	10
2.3 วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบฉีดกระแสฮาร์มอนิก	11
2.3.1 หลักการเบื้องต้นของวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์	12
2.3.2 ส่วนประกอบของวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์	12
2.4 ตัวเหนี่ยวนำ	18
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ	19
2.4.2 ตัวเหนี่ยวนำในแกนต่างๆ	19
2.4.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	20
<b>บทที่ 3 การจำลองแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์</b>	<b>21</b>
3.1 จำลองแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	21
3.1.1 Diode Rectifier 1 phase	21
3.1.2 Switched mode power supply	24
3.1.3 DC Drive motor	27
3.1.4 AC Drive motor	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 จำลองแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกโดยมีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์	35
3.2.1 Diode Rectifier 1 phase	35
3.2.2 Switched mode power supply	38
3.2.3 DC Drive motor	40
3.2.4 AC Drive Motor	43
3.3 ผลสรุปที่ได้จากการจำลองแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	46
<b>บทที่ 4 การออกแบบวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และวงจรต้นแบบ</b>	<b>47</b>
4.1 การออกแบบวงจรและส่วนประกอบต่างๆ	47
4.1.1 ส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิง	48
4.1.1.1 วงจรสร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิง	48
4.1.1.2 วงจรคูณสัญญาณ	48
4.1.1.3 วงจรกรองความถี่ต่ำ	49
4.1.1.4 วงจรลบ	49
4.1.2 ส่วนที่ทำการควบคุมและสร้างกระแสชดเชย	50
4.1.2.1 วงจรฮีสเตอร์รีซิส	50
4.1.2.2 วงจรเมื่อเวลา	51
4.1.2.3 วงจรขั้วเกท	51
4.1.2.4 วงจรตรวจจับกระแส	52
4.1.2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์	52
4.1.2.6 วงจรไฟเลี้ยง	53
4.2 การออกแบบวงจรโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และวงจรจริง	53
4.2.1 วงจรโดยรวมที่ออกแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	53
4.2.2 ส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิง	54
4.2.3 วงจรคูณสัญญาณ	54
4.2.4 วงจรกรองความถี่ต่ำ	55
4.2.5 วงจรลบ	56
4.2.6 วงจรฮีสเตอร์รีซิส	56
4.2.7 วงจรเมื่อเวลา	57
4.2.8 วงจรขั้วเกท	57
4.2.9 วงจรตรวจจับกระแส	58
4.2.10 วงจรอินเวอร์เตอร์	59

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 5 ผลของการเชื่อมต่อวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์เข้าในระบบ</b>	60
5.1 ผลของแอกทีฟฟิลเตอร์ที่มีต่อโหลด R-C Rectifier	60
5.1.1 แรงดันทางด้านแหล่งจ่าย	61
5.1.2 กระแสทางด้านแหล่งจ่าย	61
5.1.3 แรงดันทางด้านโหลด	62
5.1.4 กระแสทางด้านโหลด	62
5.1.5 สัญญาณไซน์อ้างอิง	63
5.1.6 สัญญาณจากวงจรคูณ	63
5.1.7 สัญญาณจาก Low-pass Filter	64
5.1.8 สัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิง	65
5.1.9 สัญญาณจากวงจร Dead Time	66
5.1.10 สัญญาณกระแสชดเชยที่ฉีดเข้าระบบ	67
5.1.11 ผลของกระแสแหล่งจ่ายที่ผ่านการกรองด้วยแอกทีฟฟิลเตอร์	68
<b>บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	72
6.1 สรุปผลการทดลอง	72
6.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	72
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	72
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	73
<b>ภาคผนวก</b>	74
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	75
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์	80
<b>ประวัติผู้จัดทำ</b>	90

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 กราฟสัญญาณที่ความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกอันดับที่ 3, 5 และ 7	3
รูปที่ 2.2 กราฟสัญญาณที่ความถี่มูลฐานที่มีฮาร์โมนิกอันดับที่ 3, 5 และ 7	4
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของกราฟสัญญาณที่ความถี่มูลฐานที่มีฮาร์โมนิกอันดับที่ 3, 5 และ 7	4
รูปที่ 2.4 แสดงค่าและขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันขนาด 6.3-10V	9
รูปที่ 2.5 แสดงค่าและขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันขนาด 160-500V	9
รูปที่ 2.6 วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์	10
รูปที่ 2.7 วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม	11
รูปที่ 2.8 วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน	11
รูปที่ 2.9 ระบบที่ไม่มีแก้ปัญหาระบบฮาร์โมนิก	11
รูปที่ 2.10 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยว (One line diagram) ของแอคทีฟฟิลเตอร์	12
รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมแบบลูปเปิด (Open Loop) ที่ใช้คำนวณกระแสชดเชย	13
รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส	15
รูปที่ 2.13 การทำงานของวงจรฮิสเตอร์รีซิสเพื่อการควบคุมกระแส	15
รูปที่ 2.14 วงจร Hysteresis Band	16
รูปที่ 2.15 การควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซิส	16
รูปที่ 2.16 กราฟแรงดันระหว่าง V กับ I ที่มีลักษณะเป็นฮิสเตอร์รีซิสเมื่อแสดงความกว้างของลูป	17
รูปที่ 2.17 อินเวอร์เตอร์กำลัง	17
รูปที่ 3.1 วงจร Diode Rectifier 1 phase	21
รูปที่ 3.2 Diode Rectifier 1 phase	21
รูปที่ 3.3 ผลจากการจำลองแรงดันและกระแสของโหลดไดโอดเรกติไฟร์ 1 เฟส	22
รูปที่ 3.4 สเปกตรัมของแรงดันด้านแหล่งจ่าย (ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสด้านแหล่งจ่าย (ขวา)	23
รูปที่ 3.5 วงจร Switched mode power supply	24
รูปที่ 3.6 Switched mode power supply	24
รูปที่ 3.7 ผลจากการจำลองแรงดันและกระแสของแหล่งจ่ายสวิตชิง	25
รูปที่ 3.8 สเปกตรัมของแรงดันด้านแหล่งจ่าย (ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสด้านแหล่งจ่าย (ขวา)	26
รูปที่ 3.9 วงจร DC drive motor	27
รูปที่ 3.10 DC drive motor	27
รูปที่ 3.11 ผลจากการจำลองแรงดันของดีซีไดรฟ์	28
รูปที่ 3.12 ผลจากการจำลองกระแสของดีซีไดรฟ์	29
รูปที่ 3.13 สเปกตรัมของแรงดันด้านแหล่งจ่าย (ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสด้านแหล่งจ่าย (ขวา)	30
รูปที่ 3.14 วงจร AC Drive Motor	31
รูปที่ 3.15 AC Drive Motor	31
รูปที่ 3.16 ผลจากการจำลองแรงดันของเอซีไดรฟ์	32
รูปที่ 3.17 ผลจากการจำลองกระแสของเอซีไดรฟ์	33
รูปที่ 3.18 สเปกตรัมของแรงดันด้านแหล่งจ่าย (ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสด้านแหล่งจ่าย (ขวา)	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.49 สเปกตรัมของกระแสต้านแหล่งจ่าย(ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสต้านโหลด ที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ (ขวา)	45
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์	47
รูปที่ 4.2 วงจรสร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิง	48
รูปที่ 4.3 วงจรคูณสัญญาณ	48
รูปที่ 4.4 วงจรกรองความถี่ต่ำ	49
รูปที่ 4.5 วงจรลบ	49
รูปที่ 4.6 ไดอะแกรมแบบลูปเปิด (Open Loop) ที่ใช้คำนวณกระแสชดเชย	50
รูปที่ 4.7 วงจรฮีสเตอร์รีซิส	50
รูปที่ 4.8 วงจรเพื่อเวลา	51
รูปที่ 4.9 วงจรขับเกท	51
รูปที่ 4.10 วงจรตรวจจับกระแส	52
รูปที่ 4.11 วงจรอินเวอร์เตอร์	52
รูปที่ 4.12 วงจรไฟเลี้ยง	53
รูปที่ 4.13 วงจรโดยรวมที่ออกแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	53
รูปที่ 4.14 วงจรส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิงที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์	54
รูปที่ 4.15 วงจรส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิงที่สร้างขึ้น	54
รูปที่ 4.16 วงจรคูณสัญญาณที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์	54
รูปที่ 4.17 วงจรคูณสัญญาณที่สร้างขึ้น	55
รูปที่ 4.18 วงจรกรองความถี่ต่ำที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์	55
รูปที่ 4.19 วงจรกรองความถี่ต่ำที่สร้างขึ้น	55
รูปที่ 4.20 วงจรลบที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์	56
รูปที่ 4.21 วงจรลบที่สร้างขึ้น	56
รูปที่ 4.22 วงจรฮีสเตอร์รีซิสที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์	56
รูปที่ 4.23 วงจรฮีสเตอร์รีซิสที่สร้างขึ้น	57
รูปที่ 4.24 วงจรเพื่อเวลาที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์	57
รูปที่ 4.25 วงจรเพื่อเวลาที่สร้างขึ้น	57
รูปที่ 4.26 วงจรขับเกทที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์	58
รูปที่ 4.27 วงจรขับเกทที่สร้างขึ้น	58
รูปที่ 4.28 วงจรตรวจจับกระแสที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์	58
รูปที่ 4.29 วงจรตรวจจับกระแสที่สร้างขึ้น	59
รูปที่ 4.30 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์	59
รูปที่ 4.31 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น	59
รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์	60
รูปที่ 5.2 วงจรจำลองแอกทีฟฟิลเตอร์ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Matlab	60

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.3 วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์จริงที่ใช้ในการทดลอง	61
รูปที่ 5.4 ผลการจำลอง(ซ้าย)และผลทดลองจริง(ขวา)ของแรงดันแหล่งจ่าย $100V_{rms}$	61
รูปที่ 5.5 กระแสด้านแหล่งจ่ายที่ได้จากการจำลอง(บน) กระแสด้านแหล่งจ่ายที่ได้จากการทดลอง(ล่าง)	61
รูปที่ 5.6 แรงดันด้านโหลดที่ได้จากการจำลอง(บน)และแรงดันด้านโหลด ที่ได้จากการทดลอง(ล่าง)	62
รูปที่ 5.7 กระแสด้านโหลดที่ได้จากการจำลอง(บน) กระแสด้านโหลดที่ได้จากการทดลอง(ล่าง)	62
รูปที่ 5.8 สัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิงจากแหล่งจ่าย	62
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบผลจำลองกับการทดลองจริงของสัญญาณที่ได้จากวงจรคูมวงจรแรก และวงจรที่สอง	63
รูปที่ 5.10 สัญญาณจากวงจร Low-pass Filter จากการจำลอง(บน) จากการทดลอง(ล่าง)	63
รูปที่ 5.11 กระแสชดเชยอ้างอิงที่ได้จากการจำลอง(บน) กระแสชดเชยอ้างอิงที่ ได้จากการทดลอง(ล่าง)	64
รูปที่ 5.12 สัญญาณจากวงจร Dead Time	65
รูปที่ 5.13 สัญญาณแรงดัน DC-Link	65
รูปที่ 5.14 ผลการจำลองสัญญาณกระแสชดเชยที่อินเวอร์เตอร์ฉีดเข้าไปในระบบ(บน) ผลการทดลองจริงกับวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์(ล่าง)	66
รูปที่ 5.15 รูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมก่อนผ่านการกรองด้วยแอคทีฟฟิลเตอร์	67
รูปที่ 5.16 รูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมหลังผ่านการกรองด้วยแอคทีฟฟิลเตอร์ ผลของกระแสแหล่งจ่ายจากการทดลองด้วยแอคทีฟฟิลเตอร์ที่ใช้งานจริง	68
รูปที่ 5.17 รูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมก่อนผ่านการกรองด้วยแอคทีฟฟิลเตอร์	68
รูปที่ 5.18 รูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมหลังผ่านการกรองด้วยแอคทีฟฟิลเตอร์	69
รูปที่ 5.19 ผลการจำลอง(ซ้าย)และผลทดลองจริง(ขวา)ของแรงดันแหล่งจ่าย $100 V_{rms}$	70

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบพาสซีฟฟิลเตอร์และแอกทีฟฟิลเตอร์	18
ตารางที่ 3.1 เปอร์เซนต์ค่าความผิดเพี้ยนของโหลดไดโอดเรกติไฟร์ 1 เฟส	23
ตารางที่ 3.2 เปอร์เซนต์ค่าความผิดเพี้ยนของแหล่งจ่ายสวิตชิง	26
ตารางที่ 3.3 เปอร์เซนต์ค่าความผิดเพี้ยนของดีซีไดรฟ์	30
ตารางที่ 3.4 เปอร์เซนต์ค่าความผิดเพี้ยนของเอซีไดรฟ์	34
ตารางที่ 3.5 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านแหล่งจ่ายของวงจรไดโอดเรกติไฟร์	37
ตารางที่ 3.6 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านแหล่งจ่ายของวงจรแหล่งจ่ายสวิตชิง	39
ตารางที่ 3.7 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านแหล่งจ่ายของวงจรดีซีไดรฟ์	40
ตารางที่ 3.8 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านแหล่งจ่ายของวงจรเอซีไดรฟ์	45
ตารางที่ 3.9 ข้อดี-ข้อเสียของวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์	46
ตารางที่ 5.1 ฮาร์มอนิกของกระแสของโหลด RC ก่อนต่อแอกทีฟฟิลเตอร์	69
ตารางที่ 5.2 ฮาร์มอนิกของกระแสของโหลด RC หลังต่อแอกทีฟฟิลเตอร์	71
ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบเปอร์เซนต์ค่าความผิดเพี้ยน (%THD) จากการจำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์กับวงจรต้นแบบ	72

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ปัญหาและที่มา

ฮาร์มอนิกเป็นหนึ่งในปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้รูปคลื่นไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ เป็นผลให้คุณภาพทางไฟฟ้าลดลง ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้ทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดปกติหรือชำรุด สาเหตุเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Load) อุปกรณ์ประเภทสวิตชิง (Switching) เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ บาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ตัวเรียงกระแสกำลัง (Power Rectifier) ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable Speed Drive) เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นที่อยู่อาศัย สำนักงาน โรงงาน อุตสาหกรรม เป็นต้น

ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาถึงผลกระทบ และปัญหาของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง และวิธีการแก้ไข โดยจะศึกษาถึงลักษณะของฮาร์มอนิก ปริมาณฮาร์มอนิก เพื่อที่จะนำมาแก้ไข และทำการควบคุมระบบให้มีฮาร์มอนิกลดลงซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้น

ในการแก้ปัญหาเหล่านี้ ที่นิยมทั่วไปคือ การใช้ LC พาสซีฟฟิลเตอร์ในการกรองฮาร์มอนิกออกไป แต่อย่างไรก็ตาม LC พาสซีฟฟิลเตอร์ก็ยังไม่สามารถแก้ปัญหาฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ และวงจรกรองนี้ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้น แอคทีฟฟิลเตอร์จึงถูกนำมาเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหา ซึ่งแอคทีฟฟิลเตอร์ที่นำมาใช้ในปริณญาณินพนธ์เล่มนี้คือ แอคทีฟฟิลเตอร์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบขนานใช้หลักการสร้างกระแสขึ้นมาชดเชยกับกระแสฮาร์มอนิกที่โหลดไม่เป็นเชิงเส้นสร้างขึ้นมา เพื่อให้กระแสแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ที่มีเฟสตรงกับแรงดัน ทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่งและคุณภาพทางไฟฟ้าดีขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาทฤษฎี และหลักการของการแก้ปัญหากระแสฮาร์มอนิก

1.2.2 ออกแบบวงจรและจำลองการทำงาน (Simulation) ของวงจรที่ใช้ชดเชยฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.2.3 สร้างวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ต้นแบบ ที่ใช้ในการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก เพื่อแก้ไขฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

1.2.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกของวงจรต้นแบบและจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

1.3.1 ศึกษาทฤษฎี และออกแบบวงจรที่ใช้ในการที่จะแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิก และจำลองผลการทำงานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ว่าสามารถทำงานได้จริงหรือไม่ เพื่อนำไปสร้างวงจรต้นแบบ

1.3.2 สร้างวงจรต้นแบบ เพื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยชดเชยกระแสฮาร์มอนิกให้กับโหลดที่เป็นไดโอดเรกติไฟร์เออร์

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	เดือน							
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาเรื่องฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าและวิธีกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์								
2. ศึกษาวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ชนิดฉีดกระแสฮาร์มอนิก								
3. ออกแบบวงจรและจำลองการทำงานจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์								
4. ออกแบบวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ต้นแบบ								
5. ออกแบบส่วนที่ทำหน้าที่สร้างกระแสชดเชยอ้างอิง								
6. ออกแบบส่วนที่ทำการควบคุมและสร้างกระแสชดเชย								
7. สร้างวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ต้นแบบ								
8. ทดสอบการทำงานของวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ต้นแบบ								
9. วิเคราะห์ผลการทดสอบและทำการปรับปรุงแก้ไข								
10. สรุปผล และจัดทำปริญญาโท								

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิจัย

1.5.1 ได้รับความรู้เกี่ยวกับฮาร์มอนิกและการกำจัดฮาร์มอนิก

1.5.2 ทำให้ได้รู้เกี่ยวกับวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ชนิดฉีดกระแสฮาร์มอนิก

1.5.3 สามารถออกแบบจำลองการทำงานของแอกทีฟฟิลเตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

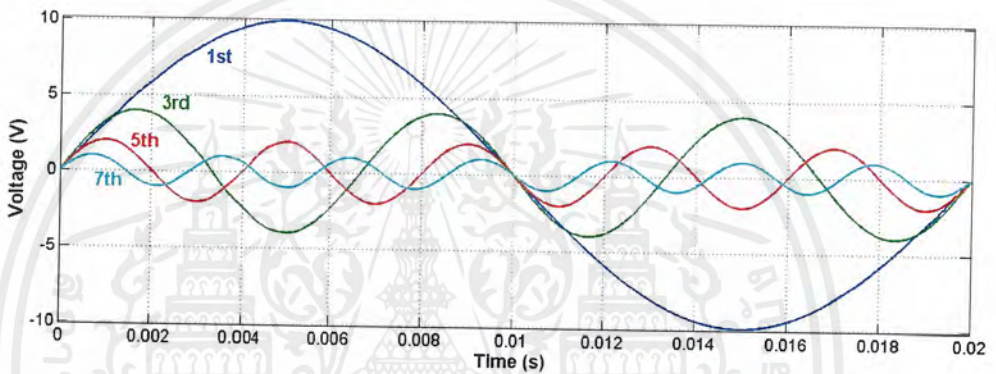
1.5.4 สามารถสร้างวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ต้นแบบเพื่อกำจัดฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

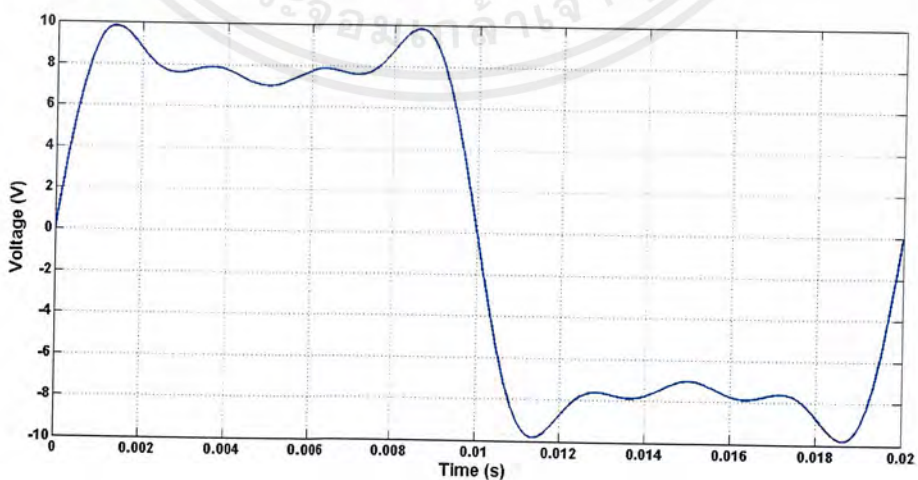
### 2.1 คำนิยามฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิก (Harmonic) คือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) ในระบบไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 50 Hz เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มีค่าความถี่เป็น 150Hz และฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250Hz ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 มีค่าความถี่เป็น 350Hz ซึ่งสามารถจำลองรูปคลื่นสัญญาณที่มีฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5 และ 7 โดยที่มีขนาด (Amplitude) เป็น 40% 20% และ 10% ของขนาดสัญญาณที่ความถี่มูลฐานตามลำดับแสดงดังรูปที่ 2.1[4]



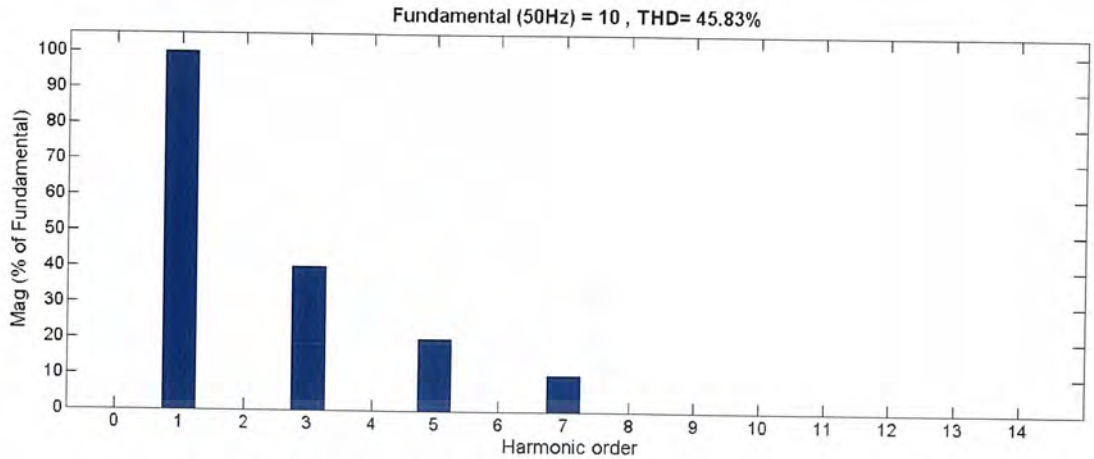
รูปที่ 2.1 กราฟสัญญาณที่ความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5 และ 7

ผลของฮาร์มอนิกเมื่อรวมกับสัญญาณความถี่มูลฐานด้วยทางขนาด (Amplitude) และมุมเฟส (Phase Angle) ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไปและมีรูปสัญญาณเพี้ยนไปจากสัญญาณคลื่นไซน์ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟสัญญาณที่ความถี่มูลฐานที่มีฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5 และ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของกราฟสัญญาณที่มีความถี่มูลฐานที่มีฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5 และ 7

ในทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ออนุกรมฟูเรียร์อธิบายคุณลักษณะของฮาร์มอนิกได้ โดยสัญญาณหรือฟังก์ชันที่เป็นคาบใดๆสามารถกระจายให้อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่มีความถี่ต่างๆเป็นฟังก์ชันคาบที่เขียนแทนด้วย  $f(t)$  ดังสมการ

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (2.1)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int f(t) dt \quad (2.2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2.3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2.4)$$

เมื่อ  $T$  คือ คาบของสัญญาณ และ  $n$  คือเลขจำนวนเต็มบวก

### 2.1.1 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม[2]

มาตรฐาน IEC-1000-3-2 ใช้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก %THD (Total Harmonic Distortion) เป็นค่าบอกระดับความเพี้ยนฮาร์มอนิก โดยเทียบจากอัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสองของส่วนประกอบฮาร์มอนิกกับค่าของส่วนประกอบความถี่มูลฐานเทียบเป็นร้อยละ ซึ่งจะแยกออกเป็น ค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมและค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Current Distortion :  $THD_i$ )

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{h(rms)}^2}}{I_{1(rms)}} \times 100\% \quad (2.5)$$

ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Voltage Distortion :  $THD_v$ )

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h(rms)}^2}}{V_{1(rms)}} \times 100\% \quad (2.6)$$

เมื่อ

$V_{h(rms)}$  คือค่าค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square: rms) ของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ h

$I_{h(rms)}$  คือค่าค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ h

$V_{1(rms)}$  คือค่าค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน

$I_{1(rms)}$  คือค่าค่ารากกำลังสองเฉลี่ย ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

### 2.1.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก[2]

ฮาร์โมนิกเกิดจากระบบไฟฟ้ากำลังต่อเข้ากับโหลดที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load) ซึ่งโหลดดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆได้ดังนี้

1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปในบ้านพัก สำนักงานส่วนใหญ่เป็นชนิด 1 เฟส เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ บาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น[5]
2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น วงจรคอนเวอร์เตอร์ วงจรเรียงกระแส ตัวโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ปรับความเร็วได้ (Adjustable Speed Drive: ASD) เป็นต้น[1]
3. อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ค เช่น เต้าหลอมแบบอาร์ค เต้าหลอมแบบเหนี่ยวนำ และเครื่องเชื่อมแบบอาร์ค เป็นต้น
4. อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงดันและกระแสเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องกลไฟฟ้า เป็นต้น

### 2.1.3 ผลกระทบของฮาร์โมนิก[2]

ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ส่วนใหญ่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ฮาร์โมนิกเหล่านี้ถือได้ว่าเป็น “มลพิษ” ในระบบไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ผลกระทบเนื่องจากฮาร์โมนิกจึงเป็นปัญหาสำคัญประการหนึ่งที่ควรตระหนัก และหาหนทางแก้ไข โดยในหัวข้อนี้ได้อธิบายถึงผลเสียที่เกิดจากฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าดังรายละเอียดต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้า กระแสฮาร์มอนิกที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่ขดลวด และกำลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กมากขึ้น จึงทำให้มอเตอร์มีความร้อนสูง อีกทั้งเกิดการสั่นสะเทือนในขณะที่มอเตอร์หมุน ส่งผลให้เกิดเสียงรบกวนขึ้น ด้วยเหตุดังกล่าวจะทำให้มอเตอร์มีอายุการใช้งานสั้นลง นอกจากนี้กระแสฮาร์มอนิกยังส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายของฟลักซ์ในช่องอากาศ ซึ่งผลดังกล่าวจะทำให้มอเตอร์เกิดการกระตุกขณะเริ่มเดินเครื่อง (Cogging) จึงทำให้การเริ่มเดินเครื่องไม่ราบเรียบเท่าที่ควร นอกจากนี้ยังส่งผลให้มอเตอร์มีการไต่ความเร็วอย่างเชื่องช้าเมื่อเริ่มเดินเครื่อง (Crawling) อีกด้วย

2. ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลงไฟฟ้า ผลเสียเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกที่ส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีหลายประการ เช่น มีความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากค่ากำลังงานสูญเสียที่ขดลวด และค่ากำลังงานสูญเสียปลิกย่อยเนื่องจากฟลักซ์ (Stray Flux Loss) มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้อาจเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ระหว่างขดลวดในหม้อแปลง และตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ในระบบ และมาตรฐานของ ANSI/IEEE ได้กำหนดให้กระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไม่ควรเกิน 5 เปอร์เซ็นต์

3. ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อสายเคเบิลกำลัง ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบสายส่ง จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) และปรากฏการณ์ความใกล้เคียง (Proximity Effect) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้มีความร้อนสูงขึ้น อาจทำให้ฉนวนของสายส่งชำรุดเสียหายได้ อีกทั้งความต้านทานในสายส่งจะมีค่ามากขึ้น จึงส่งผลให้ค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าเดิม

4. ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อตัวเก็บประจุ ระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปมีการต่อชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และเมื่อเกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าตัวเก็บประจุ จะทำให้ตัวเก็บประจุมีความร้อนสูง เนื่องจากเกิดกำลังงานสูญเสียที่ไดโอดเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้การเกิดฮาร์มอนิกอาจทำให้อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเปลี่ยนไป ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลังได้

5. ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อมิเตอร์ มิเตอร์วัดปริมาณทางไฟฟ้า เช่น วัดกระแสไฟฟ้า วัดแรงดันไฟฟ้า และวัดกำลังไฟฟ้า ได้รับผลกระทบอย่างมากจากการเกิดฮาร์มอนิกในระบบ เนื่องจากมิเตอร์ดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อวัดปริมาณทางไฟฟ้าที่มีรูปเป็นไซน์ (Sinusoidal) บริสุทธิ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งมาตรวัดวัตต์ชั่วโมง (Watt-hour Meter) จะมีความคลาดเคลื่อนในการบันทึกค่าเมื่อเกิดฮาร์มอนิกขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้ผู้ให้บริการจ่ายค่าไฟมากขึ้นกว่าความเป็นจริง

6. ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อรีเลย์ การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น รีเลย์ ถูกออกแบบในเงื่อนไขที่ว่า สัญญาณแรงดัน และกระแสต้องมีรูปคลื่นไซน์ แต่เมื่อเกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบ สัญญาณดังกล่าวจะมีลักษณะบิดเบี้ยวไปจากเดิม ดังนั้นความถูกต้องแม่นยำในการใช้อุปกรณ์ดังกล่าวจึงมีค่าลดลง ซึ่งผลดังกล่าวอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้ากำลัง และเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อฟิวส์ การเกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า กระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนอย่างมากในตัวฟิวส์ จากผลดังกล่าวทำให้ฟิวส์ใช้เวลาในการหลอมละลายลดลง ซึ่งอาจส่งผลให้ฟิวส์หลอมละลายถึงแม้ยังไม่เกิดความผิดปกติในระบบ

8. ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสื่อสาร ฮาร์มอนิกส่งผลให้เกิดการรบกวนในระบบสื่อสาร เช่น ในระบบโทรศัพท์ ฮาร์มอนิกจะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวน ซึ่งทำให้มีเสียงรบกวนในขณะใช้โทรศัพท์ นอกจากนี้ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นยังส่งผลให้คุณภาพการส่งสัญญาณลดลง ซึ่งทำให้การส่งข้อมูลข่าวสารมีการสูญหายได้

## 2.2 วงจรที่ใช้กำจัดฮาร์มอนิก

วงจรที่สามารถนำมากำจัดฮาร์มอนิกของกระแสด้านอินพุท มีอยู่ 2 ชนิด คือ วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ และวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์

### 2.2.1 วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter)

วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ที่ใช้กรองฮาร์มอนิกได้โดยมีองค์ประกอบเป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ คือ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ที่ออกแบบมาเสมือนเป็นการลดวงจร (Low Impedance) สำหรับกระแสฮาร์มอนิก แต่เป็นเพียงโหลดชนิดหนึ่งสำหรับกระแสที่ความถี่มูลฐาน โดยที่กระแสไหลผ่านพาสซีฟฟิลเตอร์แทบไม่มีผลต่อระบบไฟฟ้า พาสซีฟฟิลเตอร์สามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ จูนฟิลเตอร์ และดีจูนฟิลเตอร์

1. จูนฟิลเตอร์ (Tuned Filter) ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ นำมาต่ออนุกรมกันโดยออกมามีความถี่ตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกรองหรือกำจัดโดยเลือกค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของตัวเหนี่ยวนำ ( $X_L$ ) และตัวเก็บประจุ ( $X_C$ ) ให้มีค่าเท่ากัน เพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์หักล้างกันเป็นศูนย์ในลักษณะของการลัดวงจร เพื่อควบคุมให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านชุดจูนฟิลเตอร์เท่านั้น ทำให้ระบบไฟฟ้าส่วนอื่นไม่ถูกรบกวน[10]

2. ดีจูนฟิลเตอร์ (Detuned Filter) ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ นำมาต่ออนุกรมกันเช่นเดียวกับจูนฟิลเตอร์ แต่มีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน โดยดีจูนฟิลเตอร์จะทำหน้าที่ปรับความถี่เรโซแนนซ์ให้ต่ำกว่าความถี่ฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาสถานะเรโซแนนซ์ที่อาจเกิดขึ้นได้

ขั้นตอนการคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกมีขั้นตอนทั้งหมดดังนี้[10]

ขั้นที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกว่ามีค่าเท่าใด

ขั้นที่ 2 กำหนดค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ

$$Q_{com} = kW(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (2.7)$$

โดยที่  $Q_{com}$  คือ กำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ

$kW$  คือ กำลังงานจริงของระบบของโหลดรวมทั้งหมด

$\theta_1$  คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเดิม

$\theta_2$  คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใหม่

ขั้นที่ 3 วิเคราะห์ข้อมูลกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบที่ได้จากการวัดจริงในโรงงาน หรือ การประเมิน และทำการกำหนดจำนวนชุดตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกในระบบ

ขั้นที่ 4 ทำการแบ่งค่า  $Q_{com}$  ออกเป็นส่วนตามจำนวนชุดของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกที่ได้ กำหนดไว้ โดยอาศัยข้อมูลขนาดกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบ และขนาดภาระในระบบไฟฟ้า

ขั้นที่ 5 กำหนดจุดปรับคลื่น (Tuning Point) ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ

ขั้นที่ 6 กำหนดขนาดพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุหลักมูลดังนี้

$$V_{Cr} \geq \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \times V_{Sys} \quad (2.8)$$

โดยที่  $V_{Sys}$  คือ แรงดันระบบที่ตัวกรองต่ออยู่

$n_h$  คือ ค่าจุดปรับคลื่นตัวกรอง

$V_{Cr}$  คือ แรงดันพิกัดตัวเก็บประจุ

ขั้นที่ 7 กำหนดขนาดกำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ ที่ต้องใช้ในตัวกรองแต่ละลำดับ

$$Q_{Cr} \geq \frac{Q_{com}}{\left[ \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \right] \times \left[ \frac{V_{Sys}}{V_{Cr}} \right]^2} \quad (2.9)$$

โดยที่  $Q_{Cr}$  คือ กำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 8 การหาค่าตัวเก็บประจุ ค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทาน ดังสมการต่อไปนี้

$$X_C = \frac{V_{Cr}^2}{Q_{Cr} \times 10^3} \tag{2.10}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f \times X_C} \tag{2.11}$$

$$L = \frac{X_C}{2\pi f \times n_h^2} \tag{2.12}$$

$$R = \frac{X_L}{Q_F} \text{ at } n_h \tag{2.13}$$

โดยที่  $Q_F$  คือ ตัวประกอบคุณภาพตัวกรอง  
 หมายเหตุ ค่า  $C, L$  และ  $R$  เป็นค่าต่อเฟส

**STANDARD RATINGS**

DxL (mm); R.C.: (mA rms) at 85°C, 120Hz

Cap (µF)	WV(V) (Code) Item	6.3 (0J)		10 (1A)		16 (1C)		25 (1E)		35 (1V)		50 (1H)		63 (1J)		100 (2A)	
		DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.	DxL	R.C.
0.1~0.68												5x11	12	5x11	19	5x11	20
1												5x11	18	5x11	24	5x11	26
2.2												5x11	34	5x11	43	5x11	45
3.3												5x11	42	5x11	48	5x11	49
4.7												5x11	42	5x11	48	5x11	49
10						5x11	61	5x11	66	5x11	73	5x11	78	5x11	85	6.3x11	89
22	5x11	78	5x11	82	5x11	90	5x11	97	5x11	116	5x11	121	5x11	126	8x12	151	
33	5x11	97	5x11	101	5x11	109	5x11	114	5x11	139	6.3x11	151	6.3x11	169	10x13	204	
47	5x11	116	5x11	123	5x11	145	5x11	157	6.3x11	169	6.3x11	182	8x12	218	10x16	266	
68	5x11	151	5x11	163	6.3x11	179	6.3x11	196	8x12	206	8x12	249	8x12	278	10x20	315	
100	5x11	168	5x11	218	6.3x11	223	6.3x11	230	8x12	278	8x12	303	8x14	363	10x20	459	
220	6.3x11	290	6.3x11	303	6.3x11	363	8x12	387	10x13	448	10x16	532	10x16	593	13x25	726	
330	6.3x11	363	6.3x11	399	8x12	436	8x14	508	10x16	593	10x20	702	10x20	823	16x26	907	
470	8x12	460	8x12	484	8x12	569	10x16	653	10x16	774	13x21	920	13x21	1065	16x32	1113	
1000	10x13	702	10x13	762	10x16	956	10x20	1150	13x21	1331	13x25	1634	16x26	1755	18x40	1573	
1500	10x16	788	10x20	823	10x20	1101	13x21	1367	13x25	1597	16x32	1925	18x32	2310	22x40	2141	
2200	10x16	1150	10x20	1331	13x21	1634	13x25	1876	16x26	2178	16x36	2541	18x35	2783	25x50	2433	
3300	10x20	1513	13x21	1694	13x25	2057	16x26	2118	16x32	2686	18x35	3037	22x40	3267			
4700	13x21	1815	13x25	2178	16x26	2420	15x32	2614	18x35	3110	22x40	3630	22x50	4114			
6800	13x25	2299	16x26	2481	16x32	2783	18x35	3207	22x40	3884	22x50	4235	25x50	4719			
10000	16x26	2491	16x36	3025	18x35	3485	22x40	4380	22x50	4719	25x50	4840					
15000	16x36	3243	18x35	3775	22x40	4659	22x50	5082	25x50	5203							
22000	18x40	3896	22x40	4489	22x50	5336	25x50	5445									
33000	22x50	4719	22x50	5445	25x50	5808											

รูปที่ 2.4 แสดงค่าและขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันขนาด 6.3-10V

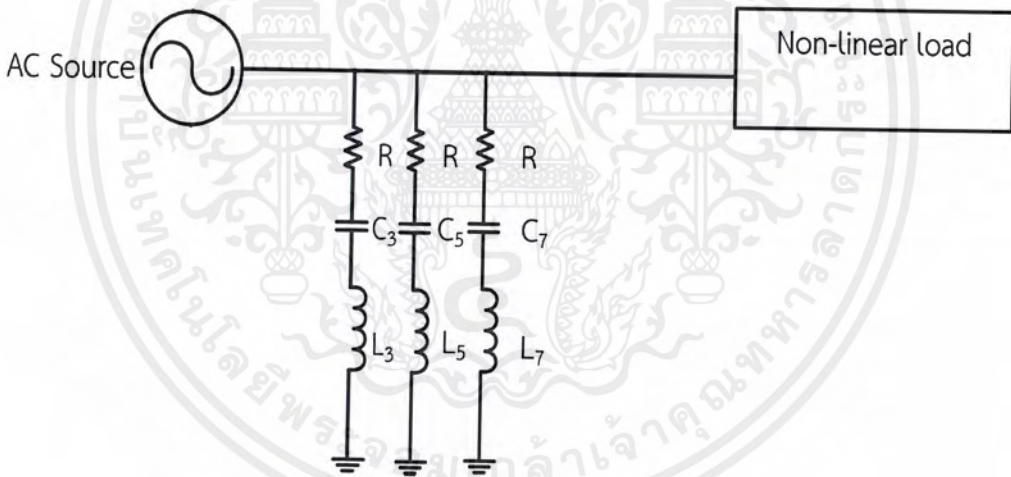
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cap ( $\mu$ F)	WV(V) (Code) Item	160 (2C)		200 (2D)		250 (2E)		350 (2V)		400 (2G)		450 (2W)		500 (2H)	
		D x L	R.C.	D x L	R.C.	D x L	R.C.	D x L	R.C.	D x L	R.C.	D x L	R.C.	D x L	R.C.
0.47		5x11	15	5x11	17	5x11	19	5x11	19	6.3x11	16	6.3x11	16	6.3x11	16
1		5x11	20	5x11	24	6.3x11	26	8x12	28	8x12	23	8x12	25	8x12	25
2.2		6.3x11	30	6.3x11	35	8x12	36	8x12	37	10x13	35	10x13	36	10x13	32
3.3		8x12	42	8x12	50	8x12	55	10x13	56	10x13	45	10x16	50	10x16	45
4.7		8x12	56	8x12	62	10x13	67	10x16	70	10x16	55	10x20	62	10x20	55
10		10x13	97	10x16	105	10x16	110	10x20	120	13x21	85	13x21	93	13x21	65
22		10x16	157	10x20	165	13x21	195	13x21	210	16x26	160	16x26	172	16x26	135
33		10x20	230	13x21	238	13x21	245	16x26	280	16x32	195	16x36	210	16x36	155
47		13x21	290	13x21	310	13x21	320	16x36	380	16x36	275	18x40	285	18x40	235
100		16x26	520	16x26	550	16x32	570	18x40	600	22x35	500	22x40	520	22x40	450
220		16x36	860	22x30	980	22x30	1070	22x50	1210	25x50	970				
330		18x40	1210	22x35	1280	22x35	1320								
470		22x40	1320	22x50	1360	25x50	1500								
1000		22x50	1720												

※: 13mm may be replaced by 12.5mm upon customer's request.

รูปที่ 2.5 แสดงค่าและขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันขนาด 160-500V

แสดงวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ที่ใช้ในการกรองฮาร์มอนิกอันดับ 3, 5 และ 7 ดังรูป

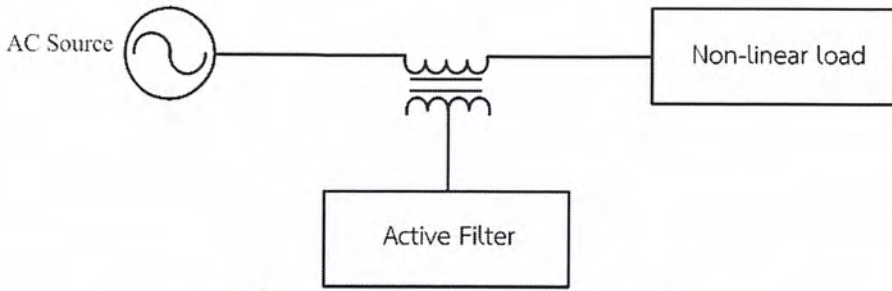


รูปที่ 2.6 วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์

### 2.2.2 วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter)

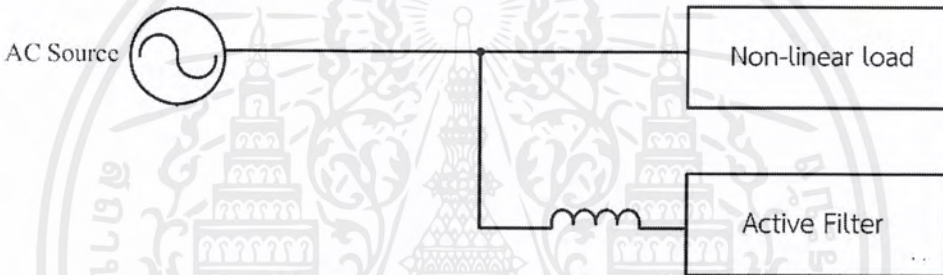
แอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter) เป็นการใช่วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในการสร้างกระแสเข้าไปลดฮาร์มอนิกในระบบ โดยตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบ และฉีดกระแสในลักษณะตรงกันข้ามเพื่อหักล้างฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม

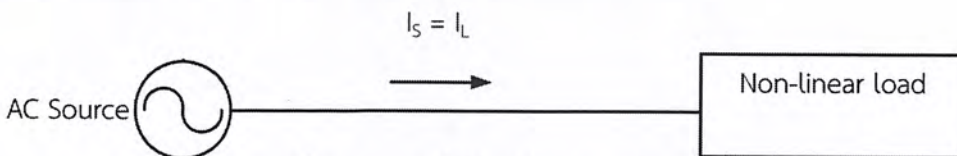
แอกทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม เป็นแอกทีฟฟิลเตอร์ที่ต่ออนุกรมกับระบบ ดังรูปที่ 2.7 โดยทำหน้าที่ชดเชยความผิดเพี้ยนจากฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดในระบบไฟฟ้า แอกทีฟฟิลเตอร์ชนิดนี้จะเชื่อมต่อกับระบบโดยใช้หม้อแปลงในการเชื่อมต่อ ซึ่งจะฉีดย้อนประกอบแรงดันและควบคุมแรงดันด้านแหล่งจ่าย ข้อเสียเปรียบของแอกทีฟฟิลเตอร์ชนิดนี้ คือตรวจจับได้เพียงแรงดันฮาร์มอนิกและหม้อแปลงจะต้องรับภาระเมื่อเกิดลัดวงจรที่โหลดของระบบ



รูปที่ 2.8 วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน

แอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน เป็นแอกทีฟฟิลเตอร์ที่ต่อขนานกับระบบ ดังรูปที่ 2.8 แอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนานเป็นที่รู้จักในการเป็นตัวกรองและชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีหลักการในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในระบบและฉีดกระแสชดเชยเข้าไปหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกในระบบ เปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ขนานอยู่กับระบบ หรือเรียกว่า แอกทีฟฟิลเตอร์แบบฉีดกระแสฮาร์มอนิก

2.3 วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบฉีดกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.9 ระบบที่ไม่มีแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

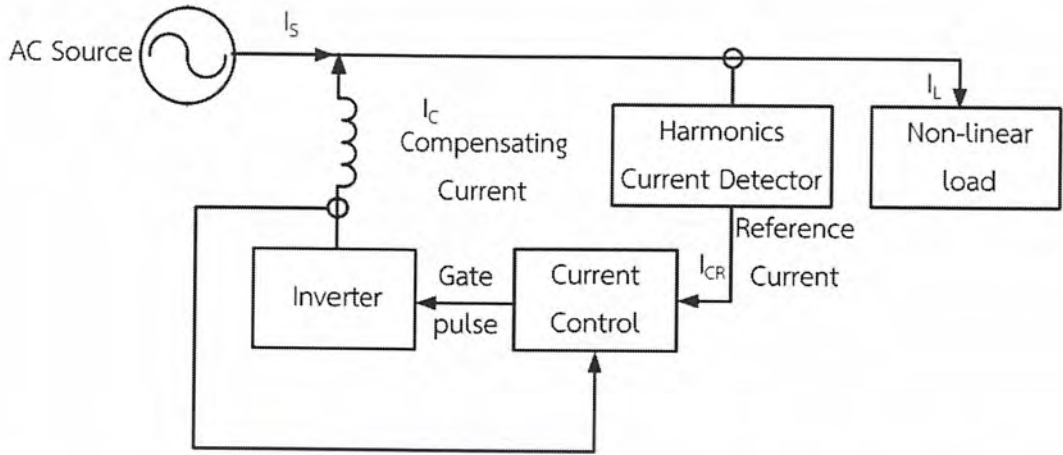
โดย  $I_s$  คือ กระแสด้านแหล่งจ่าย

$I_C$  คือ กระแสชดเชยฮาร์มอนิก

$I_{CR}$  คือ กระแสชดเชยอ้างอิง

$I_L$  คือ กระแสโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยว (One line diagram) ของแอคทีฟฟิลเตอร์[6]

ในรูปที่ 2.9 แสดงระบบที่ไม่มีกรองกระแสฮาร์มอนิกนั่นคือกระแสอินพุทจะมีค่าเท่ากับกระแสโหลดดังสมการ

$$i_s = i_L \tag{2.14}$$

ในรูปที่ 2.10 แสดงการนำแอคทีฟฟิลเตอร์ต่อขนานกับระบบเพื่อช่วยลดกระแสฮาร์มอนิก ดังนั้นกระแสอินพุทจะมีค่าดังสมการ

$$i_s + i_c = i_L \tag{2.15}$$

### 2.3.1 หลักการเบื้องต้นของวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์

สำหรับวิธีการนี้อาศัยการฉีดกระแสชดเชยหรือกระแสผิดเพี้ยน (Compensating Current or Distortion Current) ที่สร้างจากตัวคอนเวอร์เตอร์แปลงแรงดันกระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบสวิทช์โหมด (Switch-mode dc-ac Converter) หรือ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เข้าไปที่ด้านอินพุท เพื่อหักล้างกับฮาร์มอนิกให้เหลือแต่องค์ประกอบความถี่มูลฐานทำให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ดีขึ้น ดังนั้นสิ่งที่สำคัญ คือ ต้องมีเทคนิคการคำนวณหากระแสชดเชยที่เหมาะสม จากนั้นจะต้องออกแบบวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ให้สามารถสร้างสัญญาณกระแสชดเชยตามที่ต้องการได้ โดยการออกแบบสัญญาณพัลส์วิดมอดดูเลต (PWM) เพื่อควบคุมการสวิทช์ของอุปกรณ์สวิทช์ในอินเวอร์เตอร์ เช่น มอสเฟต (Mofset) หรือ ไอจีบีที (IGBT) เป็นต้น

### 2.3.2 ส่วนประกอบของวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์[9]

- ส่วนตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก (Harmonics Current Detector) เป็นส่วนสำคัญที่จะทำการหากระแสฮาร์มอนิกด้วยหลักการ Simple frequency independent method[3] โดยทั่วไปแล้วกระแสที่เกิดขึ้นในวงจรสามารถที่จะแยกเป็นองค์ประกอบต่างๆ คือ กระแสไฟฟ้าตรง กระแสแอคทีฟหรือกระแสที่ความถี่มูลฐาน กระแสรีแอคทีฟ และกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_L(t) = i_o(t) + i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (2.16)$$

เมื่อ

$i_L$  คือ กระแสโหลด

$i_o$  คือ กระแสไฟฟ้าตรง (DC Component)

$i_p$  คือ กระแสที่ความถี่มูลฐาน

$i_q$  คือ กระแสรีแอกทีฟ (Reactive current)

$i_h$  คือ กระแสฮาร์มอนิก

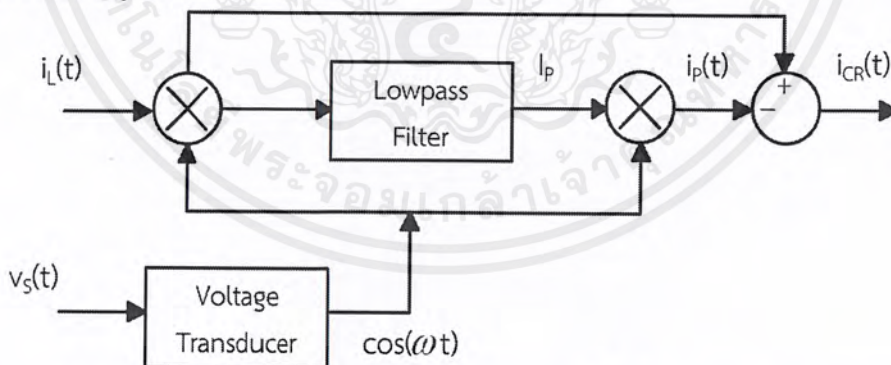
จากสมการที่ 2.16 นำมาวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะมี 2 องค์ประกอบย่อย คือ ฮาร์มอนิกเลขคู่ และฮาร์มอนิกเลขคี่ซึ่งจากสมการที่ 2.16 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} i_L(t) &= I_o + I_p \cos(\omega t) + I_q \sin(\omega t) \\ &+ \sum_{j=1}^{\infty} \frac{I_{2j}}{2} (\cos((2j\omega + 1) + \phi_{2j}) + \cos((2j\omega - 1) + \phi_{2j})) \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_{2k+1}}{2} (\cos((2k + 2)\omega t + \phi_{2k+1}) + \cos(\omega t + \phi_{2k+1})) \end{aligned} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.17 เป็นสมการรูปทั่วไปของกระแสโหลด ถ้าให้วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์เป็นตัวจ่ายองค์ประกอบกระแสตรง ( $i_o$ ) กระแสรีแอกทีฟ ( $i_q$ ) กระแสฮาร์มอนิก ( $i_h$ ) ดังนั้นแหล่งจ่ายจะต้องจ่ายเพียงกระแสแอกทีฟ ( $i_p = I_p \cos(\omega t)$ ) จากหลักการนี้เราสามารถหาค่ากระแสชดเชยอ้างอิง ( $i_{CR}$ ) ซึ่งวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์สร้างขึ้นมาคือ

$$i_{CR}(t) = i_L(t) - i_p(t) = i_L(t) + I_p \cos(\omega t) \quad (2.18)$$

จากสมการนี้เราจะต้องหาค่าประมาณของ  $I_p$  ซึ่งเป็นขนาดของกระแสอินเฟส (In-phase current) โดยใช้หลักการตามรูปดังนี้



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมแบบลูปเปิด (Open Loop) ที่ใช้คำนวณกระแสชดเชยการประมาณค่าของ  $I_p$  โดยวิธีลูปเปิดสามารถอธิบายได้ดังนี้

พิจารณาผลคูณของสมการที่ 2.18 กับแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage:  $v_s$ ) ซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ขอยดัด ที่อินเฟสกับแรงดันของแหล่งจ่าย ในที่นี้ใช้แรงดันอ้างอิงเป็นรูปฟังก์ชันของ  $\cos(\omega t)$  จะได้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 i_L(t) \cdot \cos(\omega t) &= I_o \cos(\omega t) + \frac{I_p}{2} [1 + \cos(2\omega t)] + \frac{I_q}{2} \sin(2\omega t) \\
 &+ \sum_{j=1}^{\infty} \frac{I_{2j}}{2} [\cos((2j+1)\omega t + \phi_{2j}) + \cos((2j-1)\omega t + \phi_{2j})] \\
 &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_{2k+1}}{2} [\cos((2k+2)\omega t + \phi_{2k+1}) + \cos(2k\omega t + \phi_{2k+1})]
 \end{aligned} \quad (2.19)$$

จากผลคูณของสมการที่ 2.19 ฎวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ที่ตั้งความถี่คัตออฟ (Cut-off frequency) เท่ากับ  $\omega$  จะเหลือเพียงเทอม  $I_p$  ซึ่งเป็นค่าประมาณขนาดของ  $i_p(t)$  จากนั้นค่า  $I_p$  คูณกับ  $\cos(\omega t)$  ได้ค่าประมาณของกระแสแอกทิฟชั่วขณะ  $i_p(t)$  แล้วนำมาลบจาก  $i_L(t)$  ได้ค่ากระแสชดเชยอ้างอิง  $i_{CR}(t)$  แต่วิธีการนี้จะมีปัญหาอยู่สามประการคือ

- ขนาดแอมพลิจูดของแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage), สเกลแฟกเตอร์ (Scaling Factor) ของการคูณและค่าขยาย (Gain) ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน จะมีผลต่อขนาดของ  $i_p(t)$
- หากมีการเลื่อนเฟส (Phase Shift) เพียงเล็กน้อยที่ Voltage Transducer มีผลต่อความแม่นยำของวงจร
- ถ้าแรงดันที่แหล่งจ่ายมีการผิดเพี้ยน จะทำให้  $\cos(\omega t)$  ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิงผิดเพี้ยนไป

- ส่วนควบคุมกระแสไฟฟ้า (Current Controller) จะทำหน้าที่ควบคุมให้กระแสฮาร์มอนิกที่จ่ายเข้าระบบมีขนาดที่ถูกต้องเป็นไปตามค่ากระแสฮาร์มอนิกจากส่วนการตรวจจับ ซึ่งจะใช้การควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส

### 1. เทคนิคการควบคุมกระแส

เนื่องจากเทคนิค พีดับลิวเอ็ม เป็นการควบคุมกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน ดังนั้นในการควบคุมกระแสขาออกโดยใช้เทคนิคพีดับลิวเอ็มนี้ จึงสามารถทำได้โดยอาศัยการป้อนกลับของกระแส โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแส เพื่อป้อนสัญญาณกระแสเข้าสู่วงจรควบคุม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกระแสชดเชยกับกระแสชดเชยอ้างอิง จะได้กระแสผิดพลาด (Error Current:  $i_e$ ) ซึ่งนำผลลัพธ์ที่ได้ไปกำหนดการสวิตซ์ที่เหมาะสม จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปป้อนที่ขาเกตของอินเวอร์เตอร์ ในที่สุดทำให้กระแสผิดพลาด และแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ ก็จะเป็นพีดับลิวเอ็มด้วย ซึ่งก็จะไปทำการควบคุมรูปคลื่นกระแสขาออกให้เหมือนกับกระแสอ้างอิงนั่นเอง

กลไกในการควบคุมกระแสให้ได้ประสิทธิภาพสูง ในทางปฏิบัติก็เป็นเรื่องที่ยุ่งยากมาก เนื่องจากในการใช้งานจริงไม่สามารถที่จะไปกำหนดลักษณะของโหลดที่ตายตัวทำให้กระแสของโหลดก็เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเงื่อนไขที่จำเป็นเพื่อให้ควบคุมกระแสได้ผลดีควรมีลักษณะดังนี้

1. มีคุณลักษณะอยู่ที่ไลซ์เซชันของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงที่ดี

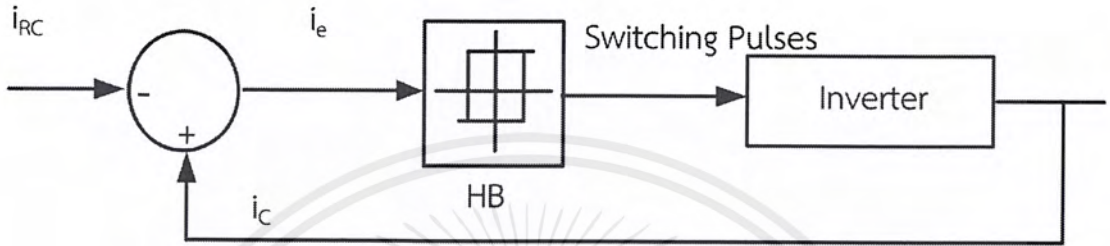
2. มีกระแสผิดพลาดค่อนข้างต่ำทั้งในสภาวะสแตติกและไดนามิก ซึ่งหมายถึงผลต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบของกระแสอ้างอิง และกระแสที่จ่ายจริงมีค่าต่ำทั้งในสภาวะคงตัว และสภาวะการทำงานแบบทรานเซียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

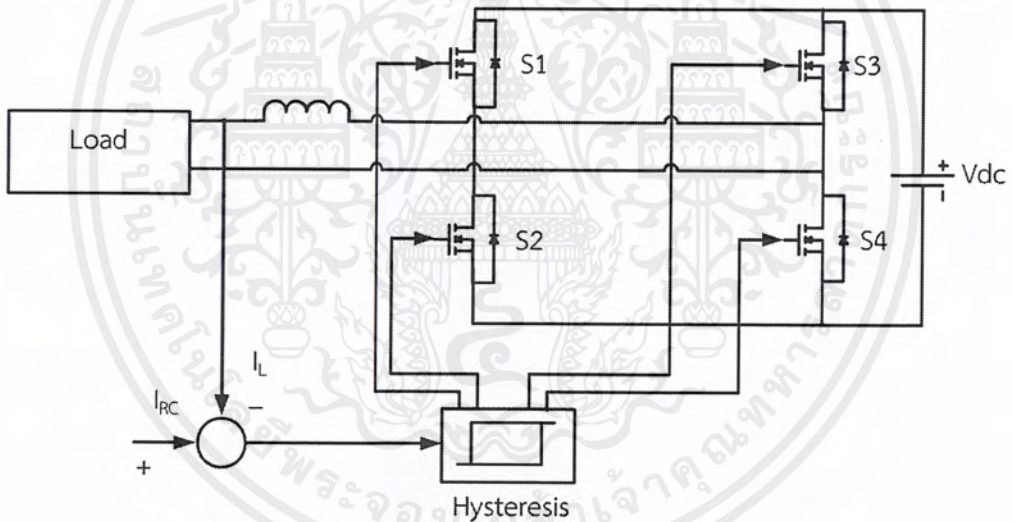
- 3. มีค่าการสูญเสียจากการสวิตช์ต่ำในวงจรอินเวอร์เตอร์
- 4. ต้องมีค่าเวลาที่เพียงพอเพื่อให้ระบบควบคุมและการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ทำงานได้อย่างเหมาะสม

2. การควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซิส[6]

ลักษณะของบล็อกไดอะแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 และการทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งมีชื่อเรียกว่าการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส



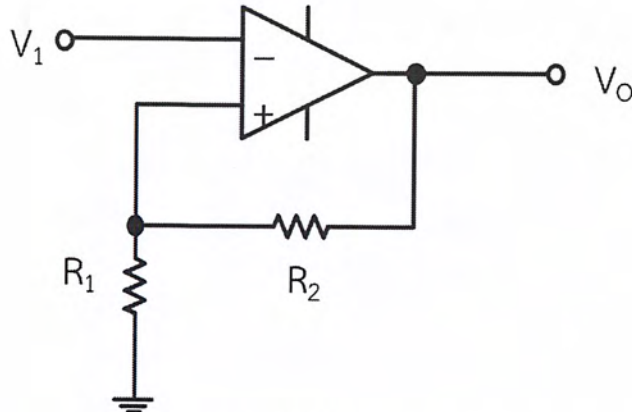
รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส



รูปที่ 2.13 การทำงานของวงจรฮิสเตอร์รีซิสเพื่อการควบคุมกระแส

วงจรฮิสเตอร์รีซิส สามารถกำหนดขอบเขตของฮิสเตอร์รีซิสได้จากการเลือกค่าความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ตามรูปที่ 2.12 โดยถ้าขอบเขตของฮิสเตอร์รีซิสมีช่วงแคบ จะทำให้การควบคุมกระแสใกล้เคียงตามที่ต้องการมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

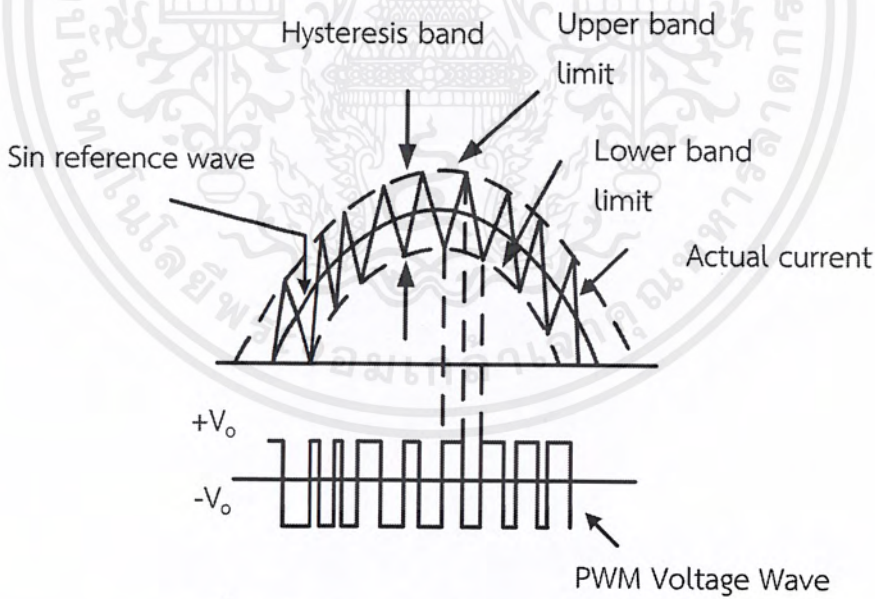


รูปที่ 2.14 วงจร Hysteresis band

$$\pm \frac{h}{2} = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_1 \tag{2.20}$$

3.การทำงาน

กระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์จะถูกตรวจจับ และถูกนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นของ กระแสอ้างอิงที่ต้องการ จากนั้นผลของการเปรียบเทียบที่ได้จะถูกป้อนเข้าสู่ตัวควบคุมกระแส ซึ่งตัว ควบคุมกระแสนี้จะทำการผลิตสัญญาณ เพื่อป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 2.13

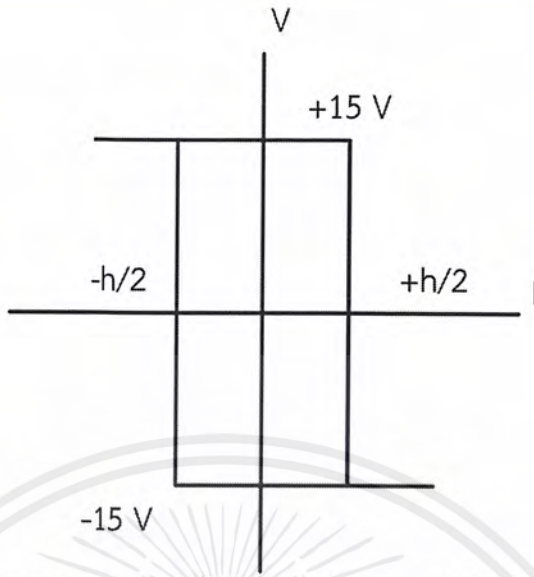


รูปที่ 2.15 การควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์ซิส

จากรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าลักษณะสัญญาณควบคุมกระแสของสวิตช์และคุณลักษณะของฮีสเตอร์ซิส เป็นดังสมการ

$$\begin{aligned} V_{out} &= -15 \text{ ถ้า } \Delta i < -h/2 \\ V_{out} &= +15 \text{ ถ้า } \Delta i < h/2 \end{aligned} \tag{2.21}$$

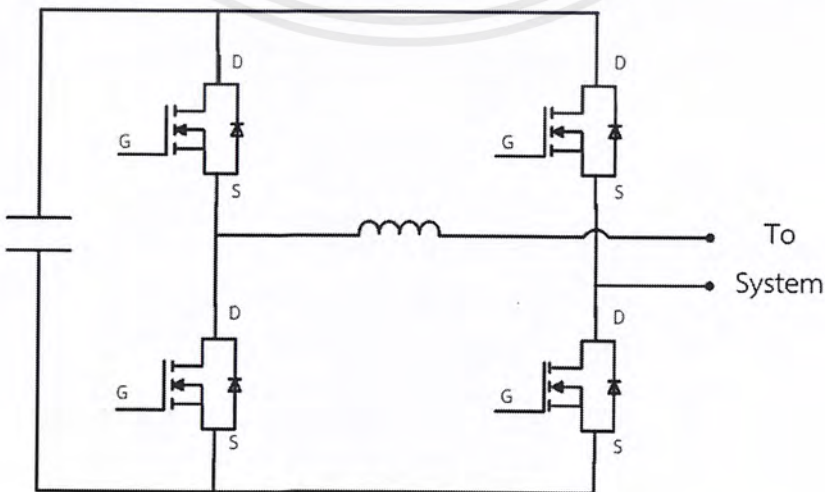
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 กราฟแรงดันระหว่าง  $V_o$  กับ  $I$  ที่มีลักษณะเป็นฮิสเตอร์รีซิสเมื่อ  $h$  แสดงความกว้างของลูป

จากสมการข้างต้นถ้าค่าของ  $-h/2 \leq \Delta I \leq h/2$  นั้นจะให้ค่าของสัญญาณเอาต์พุตไม่เปลี่ยนแปลง ความกว้างของลูป  $h$  สามารถพิจารณาเป็นความกว้างของทอร์เคิลแอนด์แบนของกระแส เพราะถ้ายังมีกระแสเออร์เรอร์อยู่ในช่วงนี้ การทำงานของตัวควบคุมก็ยังให้ค่าเอาต์พุตที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าค่ากระแสเออร์เรอร์ที่ได้มีค่าสูงเกินไป เช่นในกรณีที่กระแสแหล่งจ่ายจริงอยู่ต่ำกว่า ลูกลูกคลื่นของกระแสอ้างอิงเกินค่า  $h/2$  ผลลัพธ์ที่ได้จะกลายเป็น  $-15$  ซึ่งมีผลทำให้ค่ากระแสขาออกมีค่าสูงขึ้น ในทำนองเดียวกันจะได้  $+15$  เมื่อกระแสขาออกมีค่าเกิน  $-h/2$  ซึ่งจะทำให้กระแส  $I$  ลดลง

- อินเวอร์เตอร์กำลัง ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานสำหรับการจ่ายกระแสชดเชยฮาร์มอนิก[9] ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) ที่ใช้สัญญาณควบคุมแบบเฉลี่ยซึ่งความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM)



รูปที่ 2.17 อินเวอร์เตอร์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาเอกสารนี้

- ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแสรลอก (Current Ripple Filter Inductor:  $F_L$ )[9] ทำหน้าที่กรองกระแสรลอกที่เกิดจากความถี่ของการสวิตช์ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำนี้นี้จะมีขนาดต่ำ ๆ โดยค่าของตัวเหนี่ยวนำจะมีผลต่อความถี่สวิตช์ในกรณีที่ใช้การควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์ซิส หรือแบบ (Hysteresis or Bang-bang Current Control)

รายละเอียดแต่ละฟิลเตอร์	พาสซีฟฟิลเตอร์		แอคทีฟฟิลเตอร์
	ดีจูนฟิลเตอร์	จูนฟิลเตอร์	
ปรับปรุง p.f.	ได้	ได้	ได้
กรองฮาร์มอนิก	บางส่วน	ได้	ได้
เพิ่มเติมได้ภายหลัง	ได้	ไม่ได้	ได้
ต้องมีการศึกษาอย่างละเอียด	ไม่	ใช่	ไม่
อาจเกิดโอเวอร์โวลต์ได้ง่าย	ไม่	ใช่	ไม่
ความสามารถในการตามโหลด	ช้า	ช้ามาก	เร็วมาก
ความซับซ้อนในการใช้งานและติดตั้ง	ใหญ่	ใหญ่มาก	เล็ก
ความสูญเสีย	สูง	สูงมาก	ต่ำ
กรองฮาร์มอนิกได้แม้ p.f. ใกล้ 1.0	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้
เลือกกรองเฉพาะฮาร์มอนิก	ไม่ได้	บางส่วน	ได้
ความคลาดเคลื่อนของจุดจูน	มีบ้าง	มีบ้าง	ไม่มี
การทำงานแบบ Closed loop control	ไม่ใช่	ไม่ใช่	ใช่

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบพาสซีฟฟิลเตอร์และแอคทีฟฟิลเตอร์

แอคทีฟฟิลเตอร์ที่จะนำมาศึกษาในปริญญาโทฉบับนี้ จะพิจารณาแอคทีฟฟิลเตอร์เป็นแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งใช้หลักการฉีดกระแสฮาร์มอนิกให้มีขนาดเท่ากับกระแสฮาร์มอนิกแต่มีเฟสตรงกันข้าม เพื่อใช้ในการหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

## 2.4 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำ ( Inductor , Coil ) เป็นอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งในวงจรไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟสองขั้ว มีคุณสมบัติในการป้องกันการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวมัน ประกอบด้วยตัวนำ เช่นลวดทองแดงม้วนกันเป็นวงกลม เมื่อกระแสไหลผ่านตัวมัน พลังงานจะถูกเก็บไว้ชั่วคราวในรูปสนามแม่เหล็กในคอยล์นั้น เมื่อกระแสเปลี่ยนแปลง, สนามแม่เหล็กที่แปรตามเวลาจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าในตัวนำนั้น ตามกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของ ไมเคิล ฟาราเดย์ ซึ่งจะต้านกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่สร้างขึ้น เรียกว่าคือ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดทองแดง ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น

ตัวเหนี่ยวนำ อินดักเตอร์ คอยล์ หรือเรียกย่อ ๆ ว่าตัวแอล (L) หน่วยของการเหนี่ยวนำคือ เฮนรี (Henry) โดยตัวเหนี่ยวนำถูกกำหนดค่าโดยความสามารถในการเหนี่ยวนำ หรืออัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีหน่วยเป็น Henries (H) ตัวเหนี่ยวนำมีค่าปกติตั้งแต่ 1  $\mu$ H จนถึง 1 H ตัวเหนี่ยวนำจำนวนมากมีแกนเป็นแม่เหล็กที่ทำจากเหล็ก หรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟอร์ไรต์ภายในคอยล์ เหมือนกับตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำเป็นหนึ่งในสามชิ้นส่วน วงจรเชิงเส้นแบบพาสซีฟที่ประกอบขึ้นเป็น วงจรไฟฟ้า ในทางเครื่องเสียงนั้น Inductor ถูกนำมาใช้ในวงจร Low Pass Filter ของพาสซีฟครอสโอเวอร์

#### 2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ประการคือ

1. จำนวนรอบของขดลวด ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด
2. วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนมีหลายชนิดเช่น อากาศ, เหล็ก, เฟอร์ไรต์, โคบอล ฯลฯ เป็นต้น แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่เรียกว่าความซาบซึม (Permeability) แตกต่างกันในกรณีที่มีความซาบซึมมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมาก ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับความซาบซึมของแกน
3. พื้นที่หน้าตัดของแกน ถ้าพื้นที่ของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของแกน
4. ความยาวของแกน ถ้าความยาวของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำน้อย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผกผันกับความยาวของแกน

#### 2.4.2 ตัวเหนี่ยวนำในแกนต่างๆ

1. ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ (Air Core Inductor) เป็นตัวเหนี่ยวนำที่ใช้แกนทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวน เช่น คาร์บอน พลาสติก ไฟเบอร์ และ PVC เป็นต้น หรืออาจพันลอยๆ ไว้โดยไม่มีอะไรรองรับ ตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้นิยมนำไปใช้งานกับพวกความถี่สูงๆ หรือความถี่คลื่นวิทยุ เพราะมีอิสระจากการสูญเสียพลังงาน ที่เรียกว่า core loss ที่เกิดขึ้นในแกน ferromagnetic ซึ่งเพิ่มขึ้นตามความถี่ ผลข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นในคอยล์แกนอากาศในที่ซึ่งขดลวดไม่ได้รับการยึดติด
2. ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัด (Powdered – Iron Core Inductor) เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนสำหรับพันเส้นลวดทำด้วยผงเหล็กชนิดอัดแน่น โดยนำผงเหล็กผสมกับกาวอัดแน่นเป็นแท่ง ช่วยลดการสูญเสียสัญญาณจากกระแสไหลวนลงได้ สัญญาณส่งผ่านตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัดได้สูงขึ้น เกิดการสูญเสียสัญญาณภายในตัวเหนี่ยวนำลดลง ใช้งานได้ดีในย่านความถี่สูงๆ มีความเหนี่ยวนำสูงแต่มีขนาดเล็ก
3. ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core Inductor) เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนพันเส้นลวดทำด้วยเฟอร์ไรต์ ส่วนผสมของเฟอร์ไรต์มีความแตกต่างกันหลายอย่าง เช่น แมกนีเซียมกับสังกะสี แมกนีเซียมกับแมงกานีส แมกนีเซียมกับทองแดง นิกเกิลกับสังกะสี และแมงกานีสกับสังกะสี เป็นต้น แต่ละชนิดของเฟอร์ไรต์ให้ความเข้มของค่าความเหนี่ยวนำแตกต่างกัน ข้อดีของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ คือ สามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆ ได้ ใช้งานได้ดีทั้งความถี่ต่ำ และความถี่สูง
4. ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์ (Toroidal Core Inductor) เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนพันเส้นลวดทำด้วยผงเหล็กชนิดอัดแน่น หรือเฟอร์ไรต์ โดยสร้างขึ้นเป็นรูปวงแหวน ขดลวดถูกพันรอบแกนทอรอยด์โดยรอบ ข้อดีของการใช้แกนทอรอยด์ คือ เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่แพร่กระจายออกไปภายนอก และสนามแม่เหล็กจากภายนอกก็ไม่เข้ามารบกวน สามารถทำให้ตัวเหนี่ยวนำแบบนี้มีความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงในขนาดที่สร้างได้เล็กลง นิยมนำไปใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง ที่ต้องการหาค่าความเหนี่ยวนำสูงและมีสนามแม่เหล็กบริเวณต่ำ

5. ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแผ่น (Laminated – Iron Core Inductor) เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนสำหรับพันเส้นลวดทำด้วยเหล็กแผ่นบางวางซ้อนกัน เหล็กแผ่นบางแต่ละแผ่นเคลือบฉนวนไว้เพื่อช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและช่วยทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น การใช้งานนิยมนำไปใช้งานในย่านความถี่ต่ำและในย่านความถี่เสียง เช่น ใช้เป็นตัวกรองไฟ (Filter) แรงดันไฟสลับเป็นแรงดันไฟตรงให้ราบเรียบยิ่งขึ้น

#### 2.4.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบความเหนี่ยวนำพิจารณาที่กระแสสูงสุด  $I_{max}$  ที่อินเวอร์เตอร์ต้องจ่ายตามสมการดังนี้

$$L_{min} = \frac{\Delta V}{\omega_1 I_{max}} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\Delta V$  = ผลต่างระหว่างแรงดันแหล่งจ่ายและแรงดันอินเวอร์เตอร์

$\omega_1$  = ค่าของความถี่แหล่งจ่าย

$I_{max}$  = กระแสสูงสุดที่อินเวอร์เตอร์สร้าง

เพื่อที่จะให้กระแสเปิดมีระดับลดลง ควรใช้ค่าความเหนี่ยวนำที่ไม่น้อยกว่าค่านี้

ให้  $V_s = 141 \text{ V}$ ,  $V_{DC} = 150 \text{ V}$ ,  $\omega_1 = 314 \text{ rad/s}$ ,  $I_{max} = 3 \text{ A}$

$$L_{min} = \frac{(150 - 141)}{(314)(3)} = 9.55 \text{ mH}$$

ดังนั้นเลือกใช้ L ขนาด 10 mH

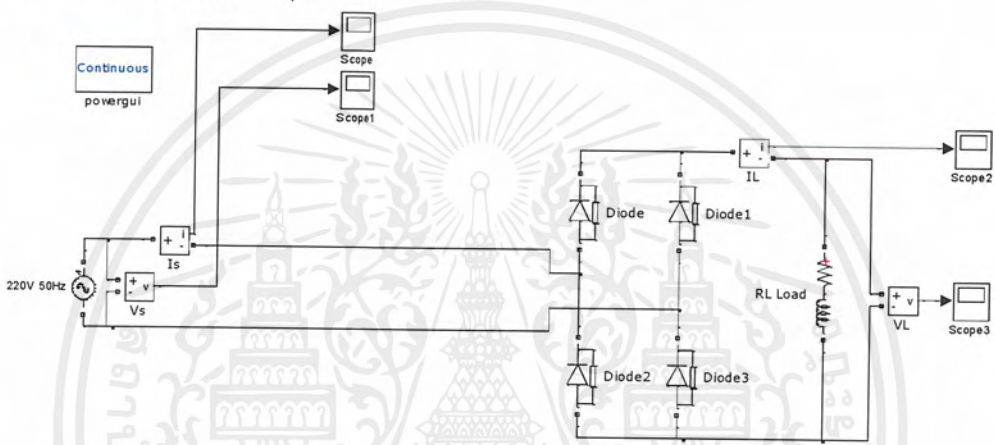
### บทที่ 3

## การจำลองแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม Matlab Simulink เพื่อศึกษารูปแบบและลักษณะของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ต่างชนิดกัน โดยจะดูกระแสและแรงดันของแหล่งจ่ายกับโหลด และจะนำผลที่ได้ในหัวข้อนี้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้หลังจากการกรองด้วยพาสซีฟฟิลเตอร์ในหัวข้อที่ 3.2 ต่อไป

### 3.1 จำลองแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

#### 3.1.1 Diode Rectifier 1 phase

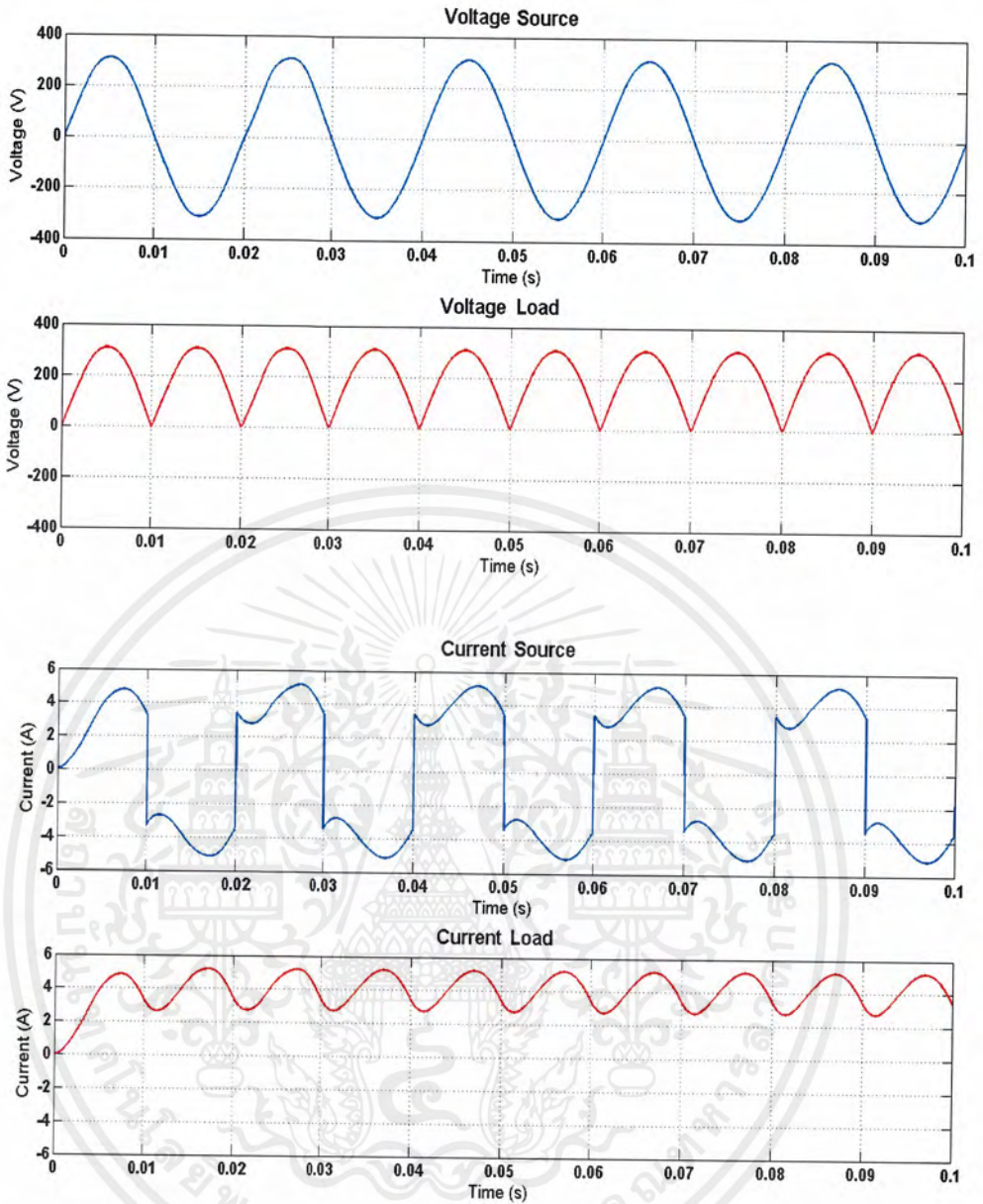


รูปที่ 3.1 วงจร Diode Rectifier 1 phase



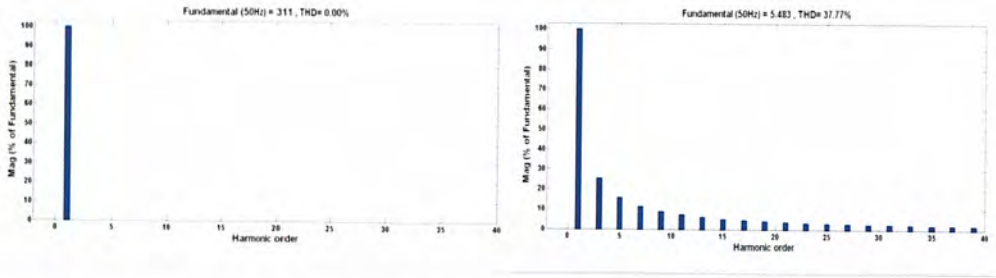
รูปที่ 3.2 Diode Rectifier 1 phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ผลจากการจำลองแรงดันและกระแสของโหนดไดโอดเรกติไฟร์ 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 สเปกตรัมของแรงดันด้านแหล่งจ่าย (ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสด้านแหล่งจ่าย (ขวา)

%Harmonic of Current Source

DC component = 0

Fundamental = 5.483 peak (3.877 rms)

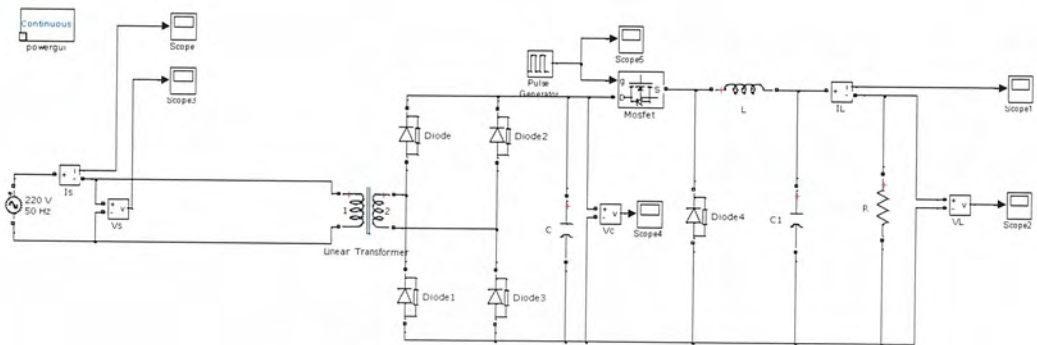
Total Harmonic Distortion (THD) = 37.77 %

Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental	Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental
1	50	100	26	1300	0
2	100	0	27	1350	2.97
3	150	25.47	28	1400	0
4	200	0	29	1450	2.77
5	250	15.79	30	1500	0
6	300	0	31	1550	2.59
7	350	11.39	32	1600	0
8	400	0	33	1650	2.43
9	450	8.89	34	1700	0
10	500	0	35	1750	2.29
11	550	7.29	36	1800	0
12	600	0	37	1850	2.17
13	650	6.17	38	1900	0
14	700	0	39	1950	2.06
15	750	5.35	40	2000	0
16	800	0	41	2050	1.95
17	850	4.72	42	2100	0
18	900	0	43	2150	1.86
19	950	4.22	44	2200	0
20	1000	0	45	2250	1.78
21	1050	3.82	46	2300	0
22	1100	0	47	2350	1.70
23	1150	3.49	48	2400	0
24	1200	0	49	2450	1.63
25	1250	3.21	50	2500	0

ตารางที่ 3.1 เปอร์เซนต์ค่าความผิดเพี้ยนของโหลดไดโอดเรกติไฟร์ 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 Switched mode power supply

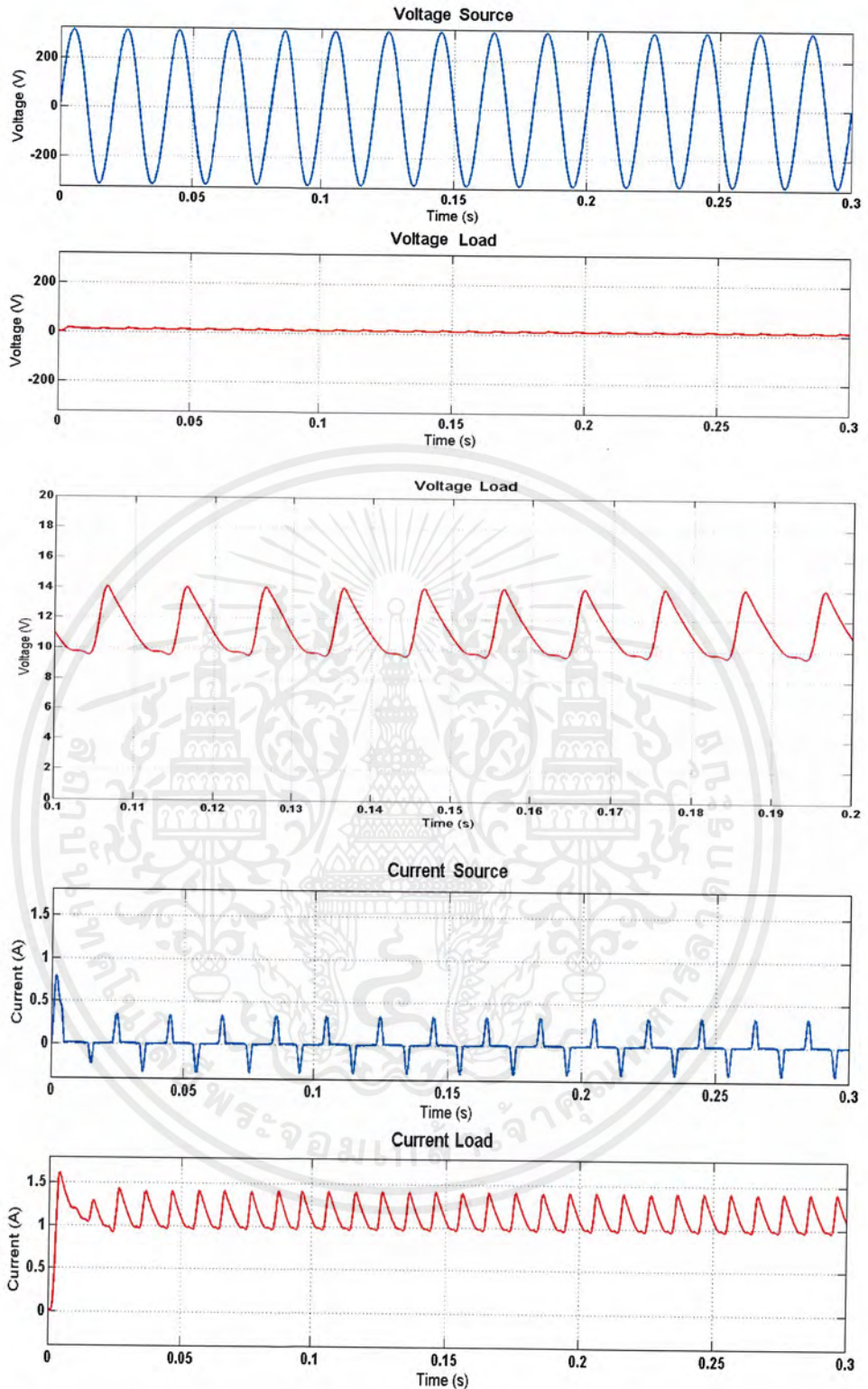


รูปที่ 3.5 วงจร Switched mode power supply



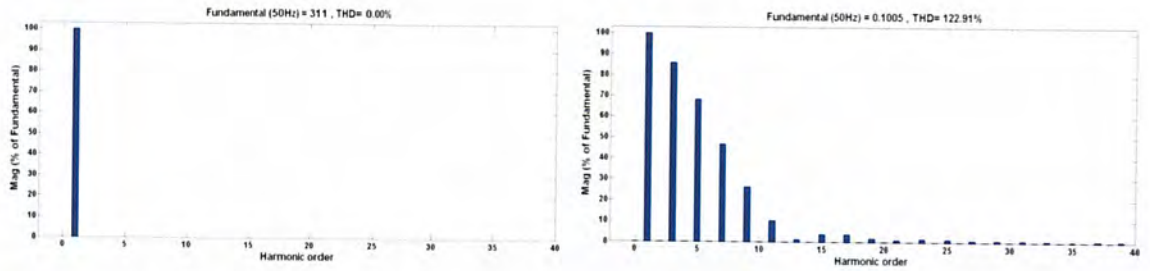
รูปที่ 3.6 Switched mode power supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ผลจากการจำลองแรงดันและกระแสของแหล่งจ่ายสวิตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 สเปกตรัมของแรงดันด้านแหล่งจ่าย(ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสด้านแหล่งจ่าย(ขวา)

%Harmonic of Current Source

DC component =  $2.522e-6$

Fundamental = 0.1005 peak (0.07108 rms)

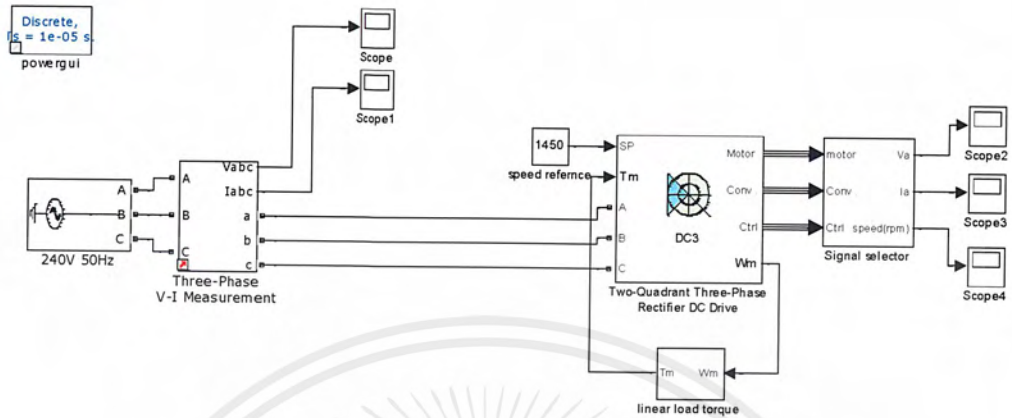
Total Harmonic Distortion (THD) = 122.91 %

Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental	Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental
1	50	100	26	1300	0.01
2	100	0.02	27	1350	0.74
3	150	86.04	28	1400	0.01
4	200	0.03	29	1450	0.74
5	250	68.28	30	1500	0.02
6	300	0.03	31	1550	0.90
7	350	46.83	32	1600	0.02
8	400	0.02	33	1650	0.70
9	450	26.43	34	1700	0.02
10	500	0.01	35	1750	0.44
11	550	10.35	36	1800	0.02
12	600	0.02	37	1850	0.51
13	650	1.33	38	1900	0.01
14	700	0.01	39	1950	0.52
15	750	3.83	40	2000	0.02
16	800	0.01	41	2050	0.40
17	850	3.72	42	2100	0.04
18	900	0.01	43	2150	0.30
19	950	1.80	44	2200	0.03
20	1000	0.02	45	2250	0.37
21	1050	1.05	46	2300	0.01
22	1100	0.01	47	2350	0.35
23	1150	1.59	48	2400	0.01
24	1200	0	49	2450	0.26
25	1250	1.41	50	2500	0.02

ตารางที่ 3.2 เปอร์เซนต์ค่าความผิดเพี้ยนของแหล่งจ่ายสวิตซิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.1.3 DC Drive motor

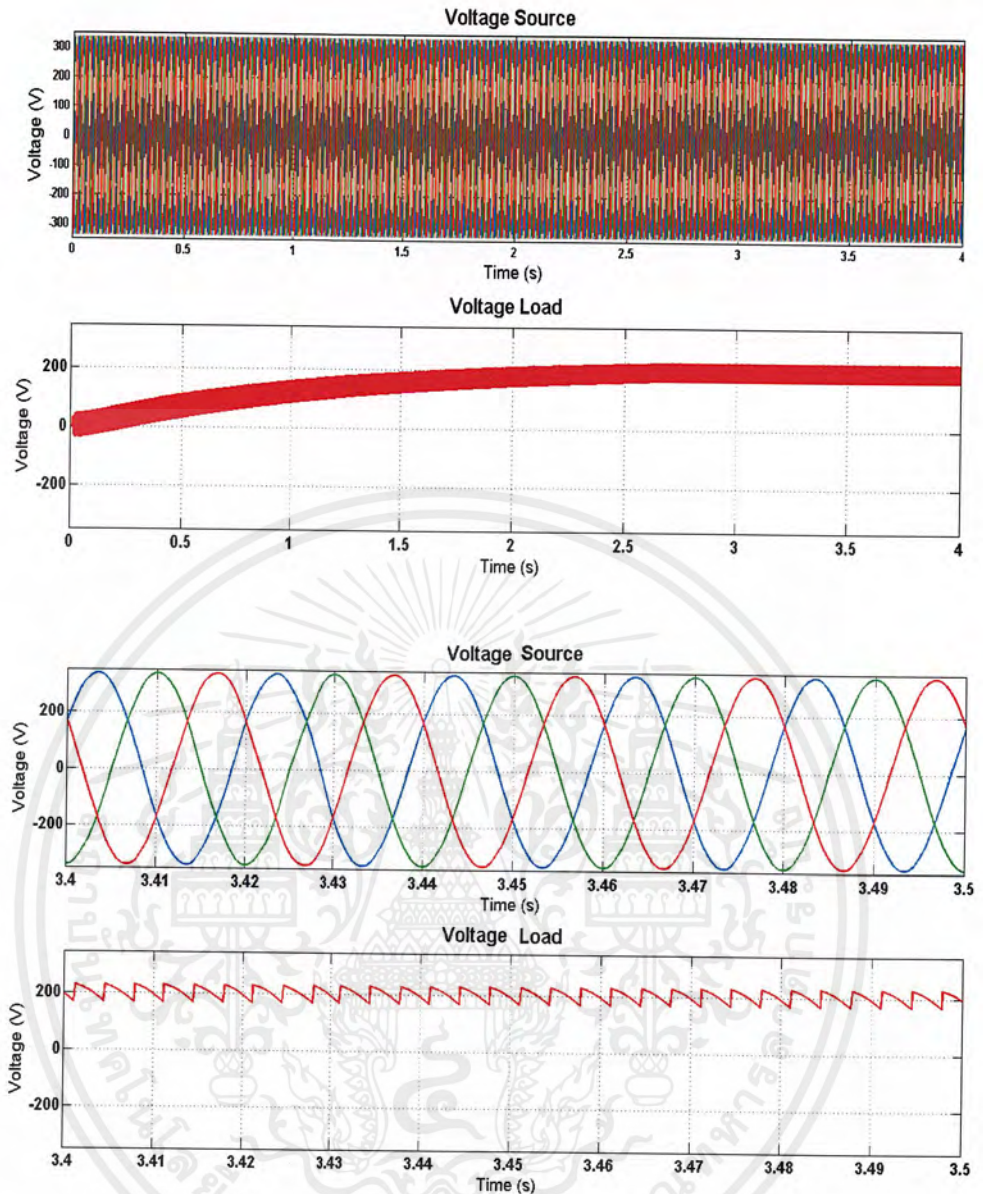


รูปที่ 3.9 วงจร DC drive motor



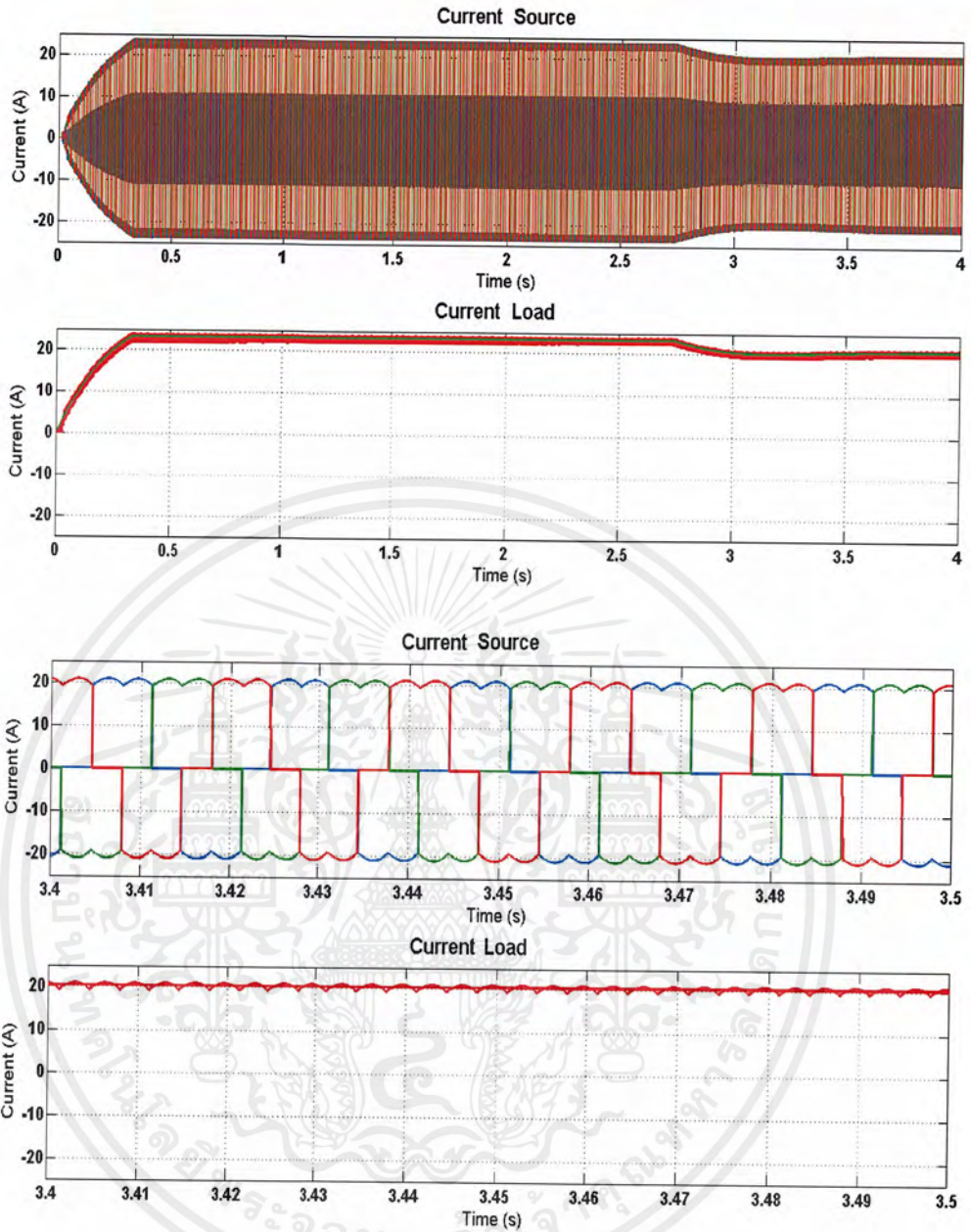
รูปที่ 3.10 DC drive motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



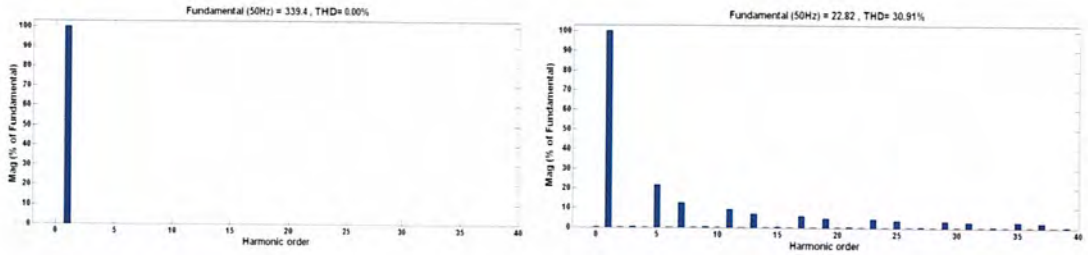
รูปที่ 3.11 ผลจากการจำลองแรงดันของดีซีไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ผลจากการจำลองกระแสของดีซีไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 สเปกตรัมของแรงดันด้านแหล่งจ่าย (ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสด้านแหล่งจ่าย (ขวา)

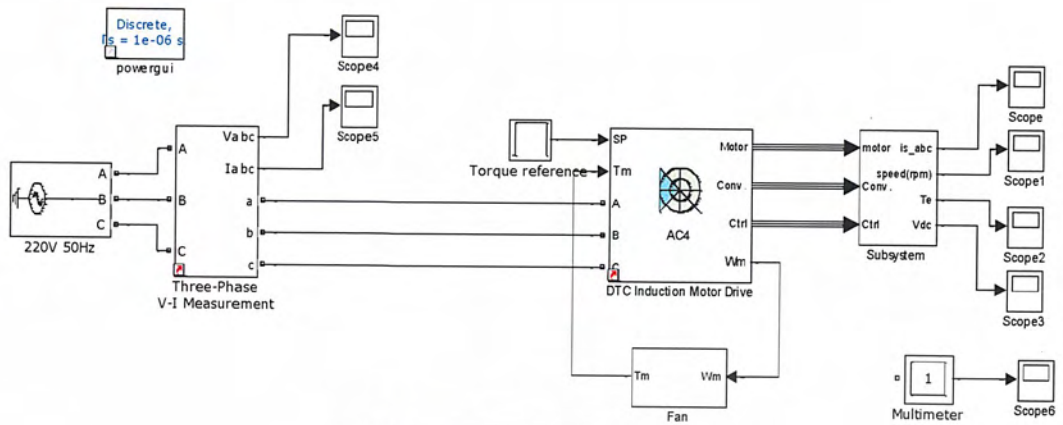
%Harmonic of Current Source  
 DC component = 0.002532  
 Fundamental = 22.82 peak (16.14 rms)  
 Total Harmonic Distortion (THD) = 30.91 %

Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental	Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental
1	50	100	26	1300	0.16
2	100	0.16	27	1350	0.29
3	150	0.29	28	1400	0.14
4	200	0.15	29	1450	3.45
5	250	21.69	30	1500	0.01
6	300	0.01	31	1550	2.84
7	350	12.41	32	1600	0.15
8	400	0.15	33	1650	0.28
9	450	0.29	34	1700	0.14
10	500	0.14	35	1750	2.87
11	550	9.21	36	1800	0.02
12	600	0.01	37	1850	2.36
13	650	6.83	38	1900	0.16
14	700	0.15	39	1950	0.29
15	750	0.28	40	2000	0.14
16	800	0.14	41	2050	2.46
17	850	5.89	42	2100	0.02
18	900	0.01	43	2150	2.01
19	950	4.68	44	2200	0.16
20	1000	0.15	45	2250	0.28
21	1050	0.29	46	2300	0.14
22	1100	0.14	47	2350	2.16
23	1150	4.35	48	2400	0.02
24	1200	0.01	49	2450	1.75
25	1250	3.54	50	2500	0.16

ตารางที่ 3.3 เปอร์เซนต์ค่าความผิดเพี้ยนของดิซีไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 AC Drive Motor

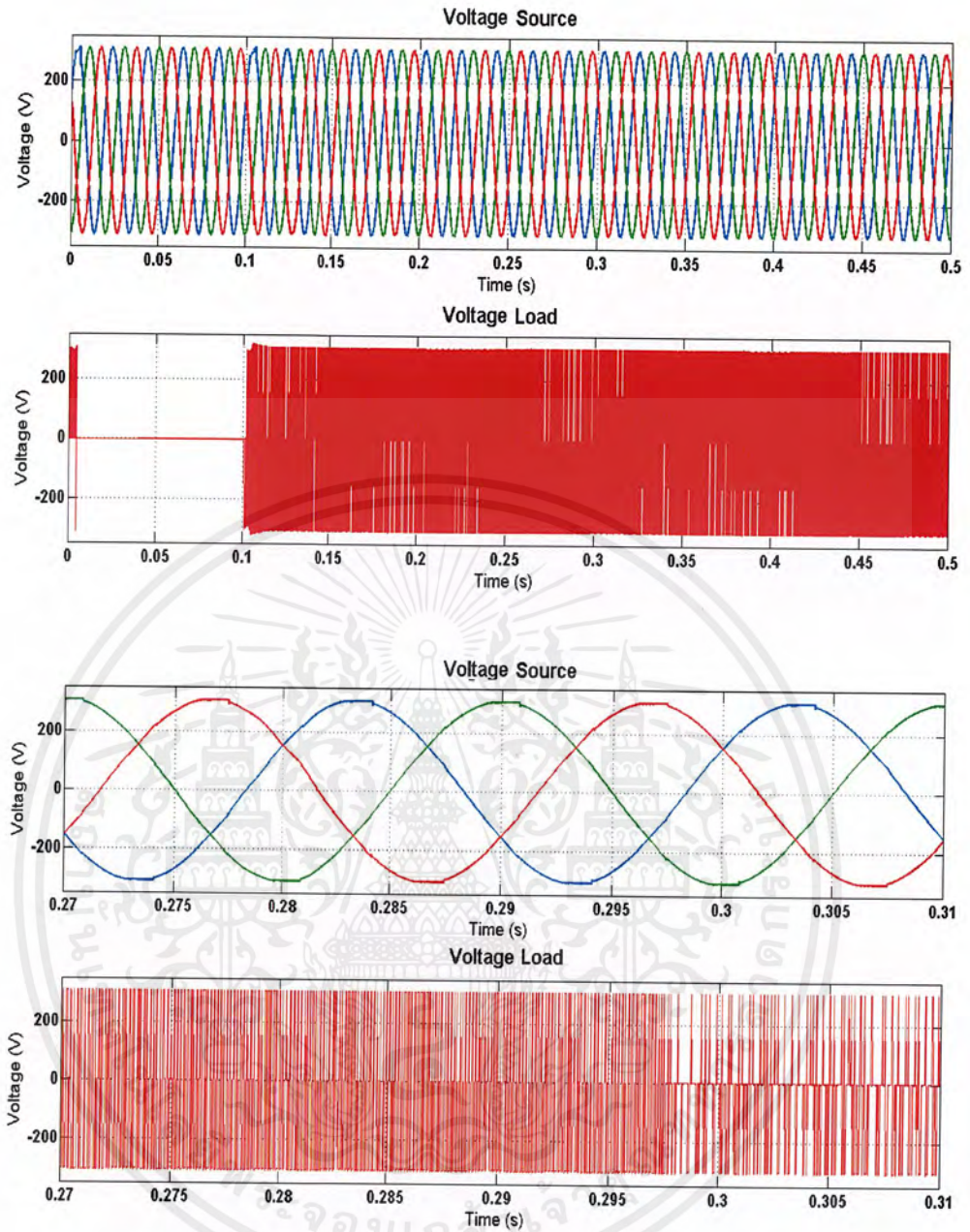


รูปที่ 3.14 วงจร AC Drive Motor



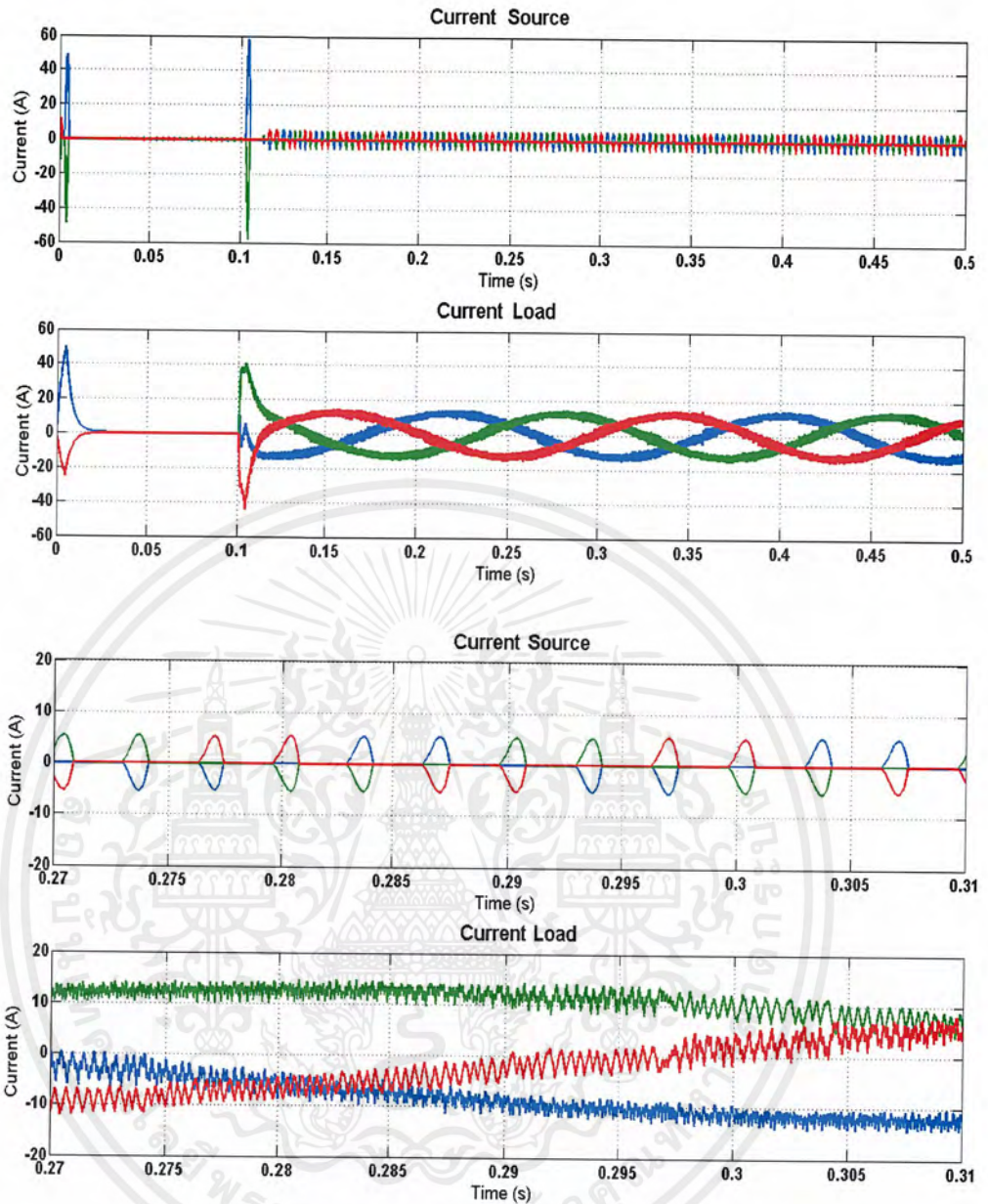
รูปที่ 3.15 AC Drive Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



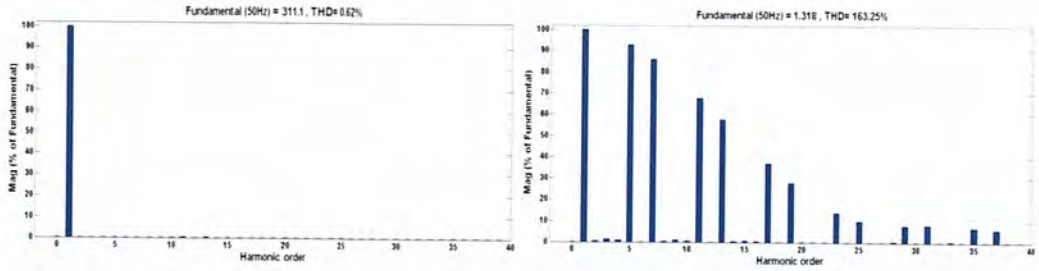
รูปที่ 3.16 ผลจากการจำลองแรงดันของเอซีไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ผลจากการจำลองกระแสของเอซีไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 สเปกตรัมของแรงดันด้านแหล่งจ่าย (ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสด้านแหล่งจ่าย (ขวา)

%Harmonic of Voltage Source

DC component = 0.0004041

Fundamental = 311.1 peak (220 rms)

Total Harmonic Distortion (THD) = 0.62 %

%Harmonic of Current Source

DC component = 0.001395

Fundamental = 1.318 peak (0.9318 rms)

Total Harmonic Distortion (THD) = 163.15 %

Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental (Voltage)	% of fundamental (Current)	Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental (Voltage)	% of fundamental (Current)
1	50	0	100	26	1300	0	0.07
2	100	100	0.67	27	1350	0	0.22
3	150	0	1.34	28	1400	0	0.24
4	200	0	0.73	29	1450	0.08	7.94
5	250	0	92.66	30	1500	0	0.18
6	300	0.16	0.22	31	1550	0.09	8.20
7	350	0	86.09	32	1600	0	0.07
8	400	0.21	0.45	33	1650	0	0.25
9	450	0	1.07	34	1700	0	0.21
10	500	0	0.56	35	1750	0.09	6.86
11	550	0	67.70	36	1800	0	0.14
12	600	0.26	0.17	37	1850	0.08	5.96
13	650	0	57.69	38	1900	0	0.02
14	700	0	0.24	39	1950	0	0.09
15	750	0	0.61	40	2000	0	0.08
16	800	0	0.25	41	2050	0.06	3.95
17	850	0	36.90	42	2100	0	0.08
18	900	0.22	0.04	43	2150	0.05	3.52
19	950	0	27.90	44	2200	0	0.09
20	1000	0.18	0.12	45	2250	0	0.12
21	1050	0	0.17	46	2300	0	0.06
22	1100	0	0.12	47	2350	0.05	3.35
23	1150	0	13.77	48	2400	0	0.13
24	1200	0.11	0.12	49	2450	0.06	3.45
25	1250	0	9.99	50	2500	0	0.20

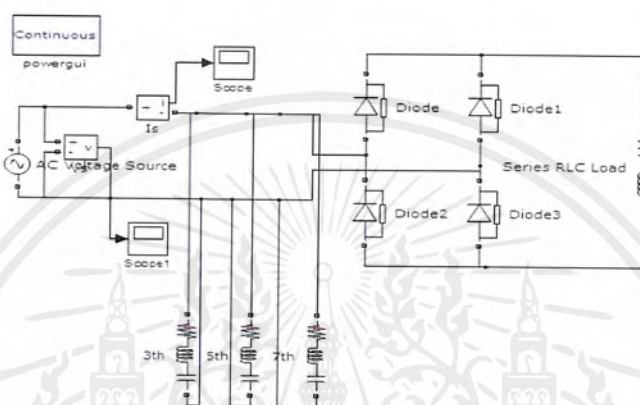
ตารางที่ 3.4 เปอร์เซนต์ค่าความผิดเพี้ยนของเอชไอไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

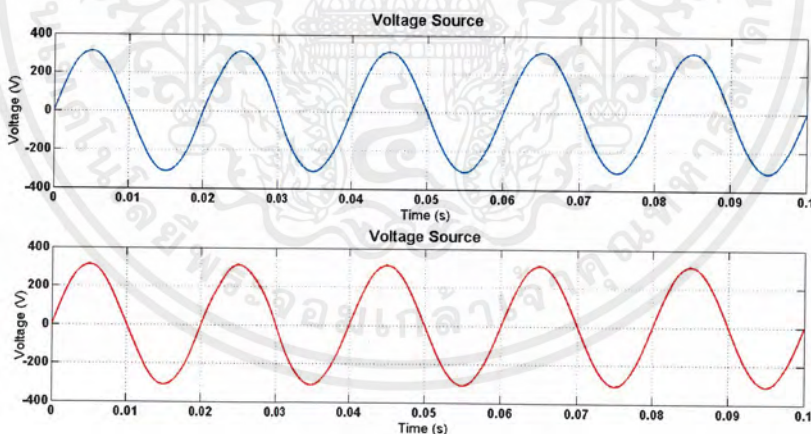
### 3.2 จำลองแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกโดยมีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์

หลังจากที่ได้ศึกษาลักษณะของฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นชนิดต่างๆแล้ว จากนั้นทำการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์เข้าไปเพื่อลดผลของฮาร์มอนิก และนำสัญญาณของกระแสและแรงดันของแหล่งจ่ายกับโหลดมาเปรียบเทียบกับกัน ซึ่งจะได้ผลดังนี้

#### 3.2.1 Diode Rectifier 1 phase

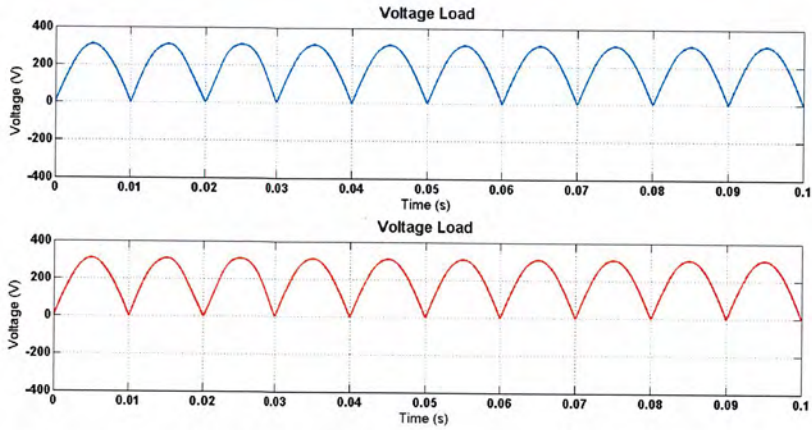


รูปที่ 3.19 วงจรไดโอดเรกติไฟร์ 1 เฟสโดยมีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์

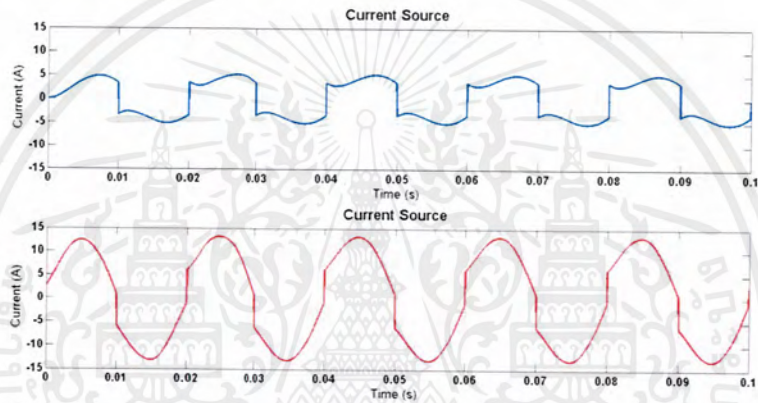


รูปที่ 3.20 แรงดันด้านแหล่งจ่าย(บน) แรงดันด้านแหล่งจ่ายที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

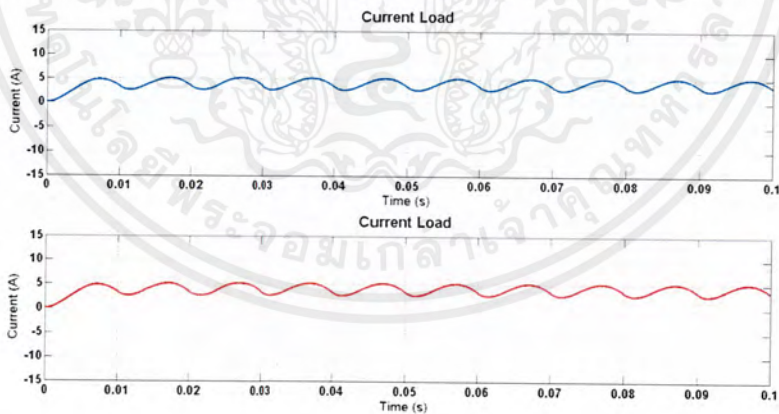
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แรงดันด้านโหลด(บน) แรงดันด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

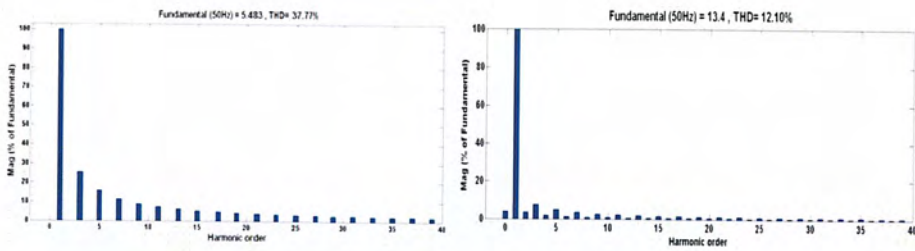


รูปที่ 3.22 กระแสด้านแหล่งจ่าย(บน) กระแสด้านแหล่งจ่ายที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)



รูปที่ 3.23 กระแสด้านโหลด(บน) กระแสด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



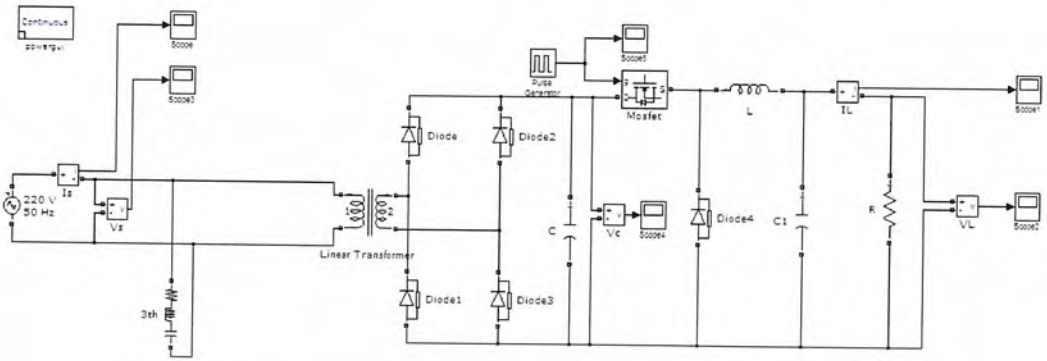
รูปที่ 3.24 สเปกตรัมของกระแสต้านแหล่งจ่าย(ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสต้านโหลดที่มีการต่อ วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ (ขวา)

กระแสต้านแหล่งจ่ายก่อนต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์	กระแสต้านแหล่งจ่ายหลังต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์
DC component = 0 Fundamental = 5.483 peak (3.877 rms) Total Harmonic Distortion (THD) = 37.77 %	DC component = 0 Fundamental = 13.4 peak (9.475 rms) Total Harmonic Distortion (THD) = 12.10%

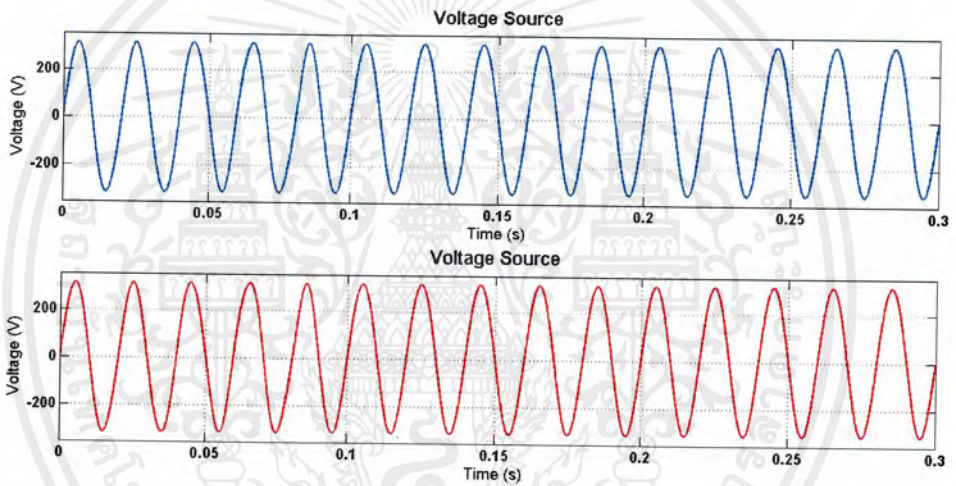
ตารางที่ 3.5 ฮาร์โมนิกของกระแสต้านแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

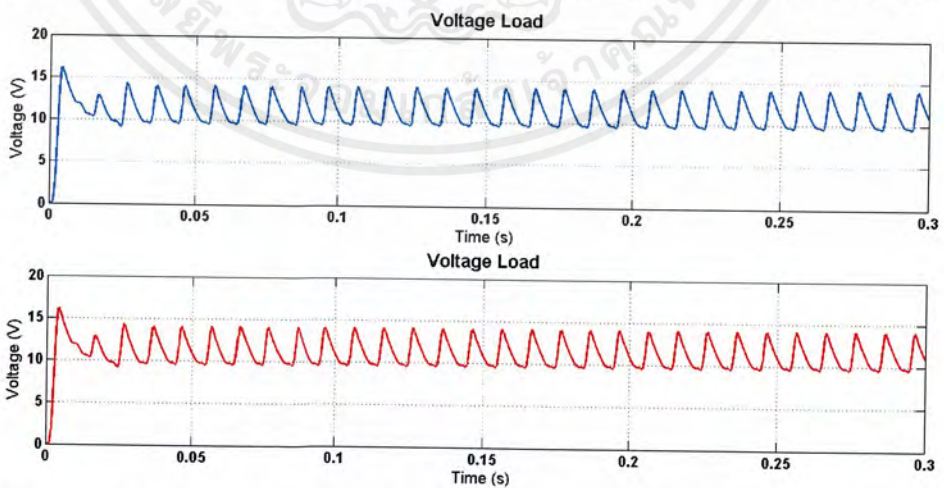
### 3.2.2 Switched mode power supply



รูปที่ 3.25 วงจรแหล่งจ่ายสวิตชิงโดยมีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์

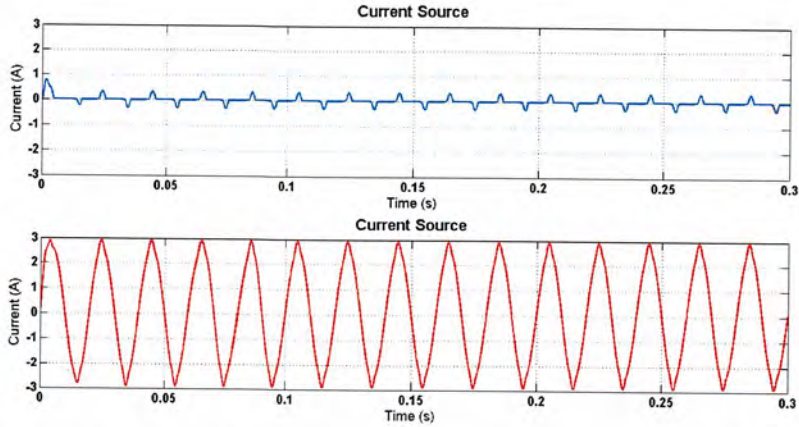


รูปที่ 3.26 แรงดันด้านแหล่งจ่าย(บน) แรงดันด้านแหล่งจ่ายที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

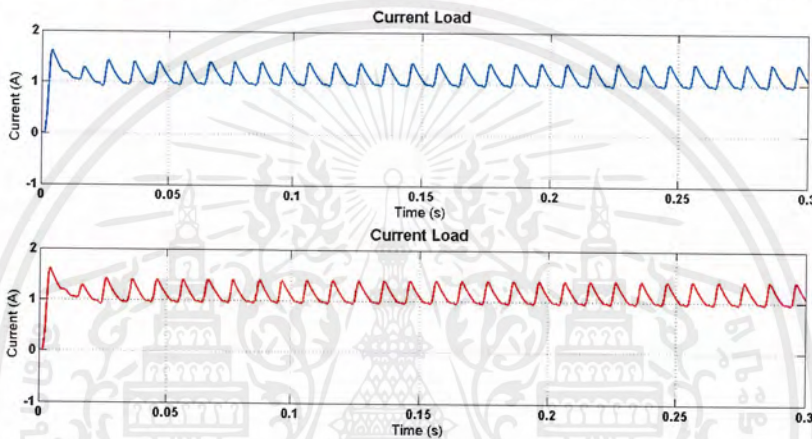


รูปที่ 3.27 แรงดันด้านโหลด(บน) แรงดันด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

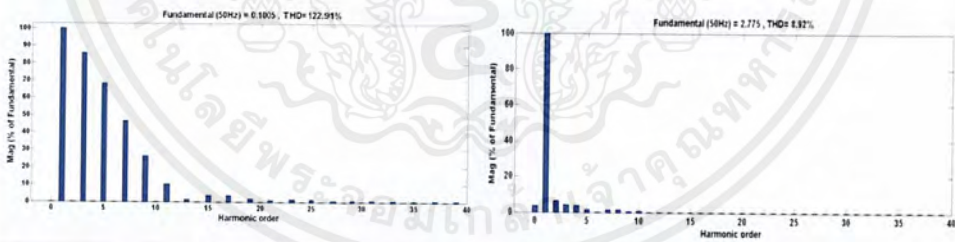
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 กระแสต้านแหล่งจ่าย(บน) กระแสต้านแหล่งจ่ายที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)



รูปที่ 3.29 กระแสต้านโหลด(บน) กระแสต้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)



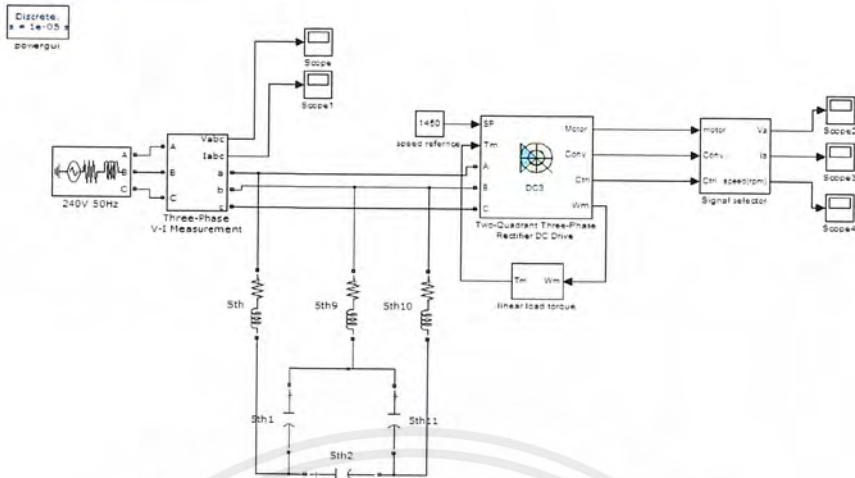
รูปที่ 3.30 สเปกตรัมของกระแสต้านแหล่งจ่าย(ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสต้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ (ขวา)

กระแสต้านแหล่งจ่ายก่อนต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์	กระแสต้านแหล่งจ่ายหลังต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์
DC component = 2.522e-6	DC component = 0.09246
Fundamental = 0.1005 peak (0.071rms)	Fundamental = 2.775 peak (1.962 rms)
Total Harmonic Distortion (THD) = 122.91 %	Total Harmonic Distortion (THD) = 8.92%

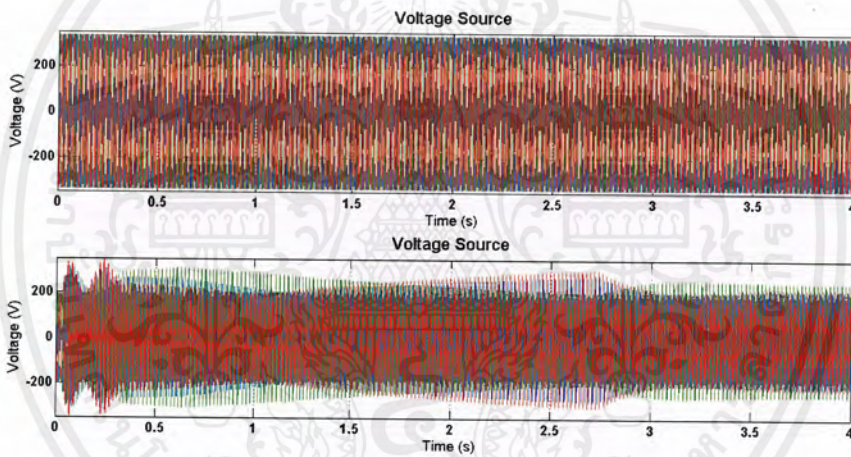
ตารางที่ 3.6 ฮาร์มอนิกของกระแสต้านแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

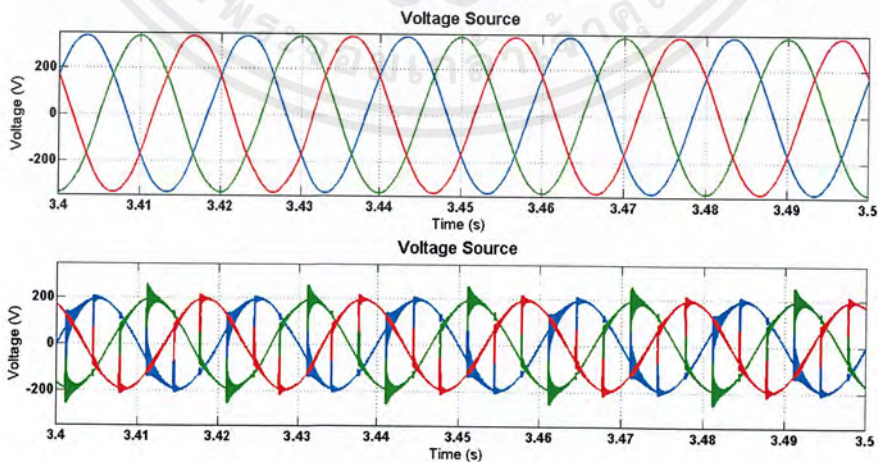
3.2.3 DC Drive motor



รูปที่ 3.31 วงจรดรีโวลต์โดยมีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์

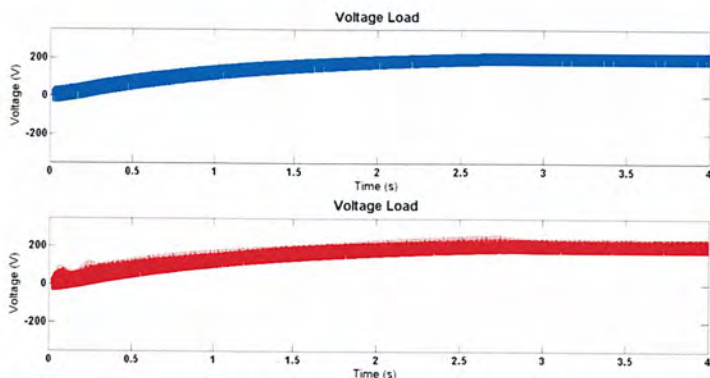


รูปที่ 3.32 แรงดันด้านแหล่งจ่าย(บน) แรงดันด้านแหล่งจ่ายที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

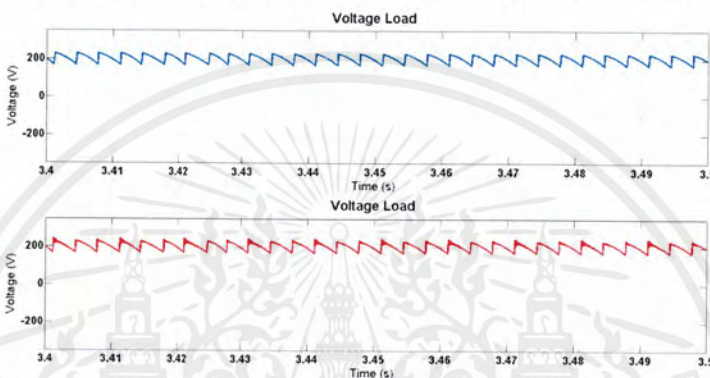


รูปที่ 3.33 แรงดันด้านแหล่งจ่าย(บน) แรงดันด้านแหล่งจ่ายที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

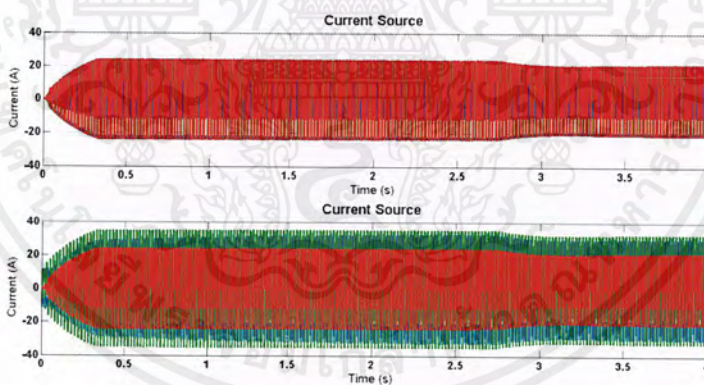
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



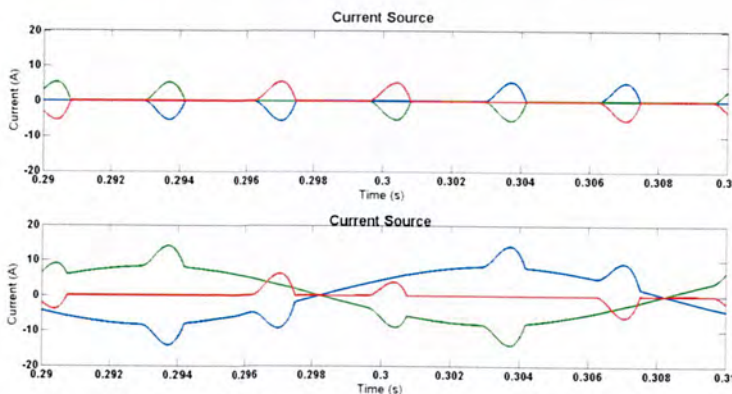
รูปที่ 3.34 แรงดันด้านโหลด(บน) แรงดันด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)



รูปที่ 3.35 แรงดันด้านโหลด(บน) แรงดันด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

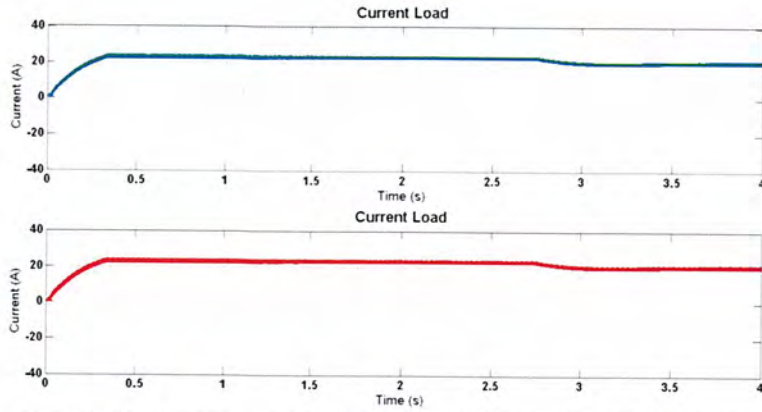


รูปที่ 3.36 กระแสด้านแหล่งจ่าย(บน) กระแสด้านแหล่งจ่ายที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

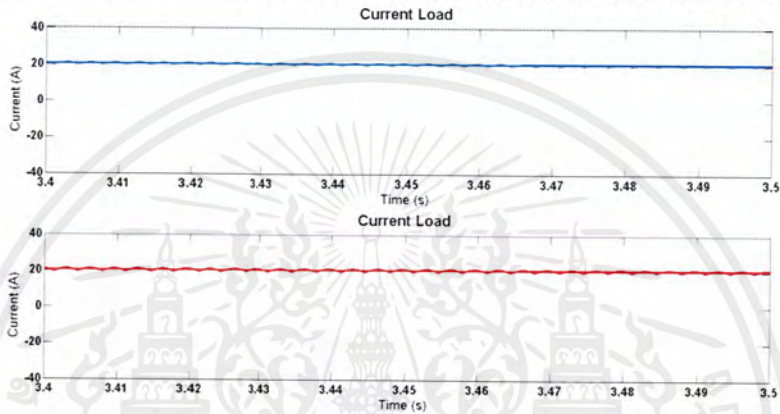


รูปที่ 3.37 กระแสด้านแหล่งจ่าย(บน) กระแสด้านแหล่งจ่ายที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

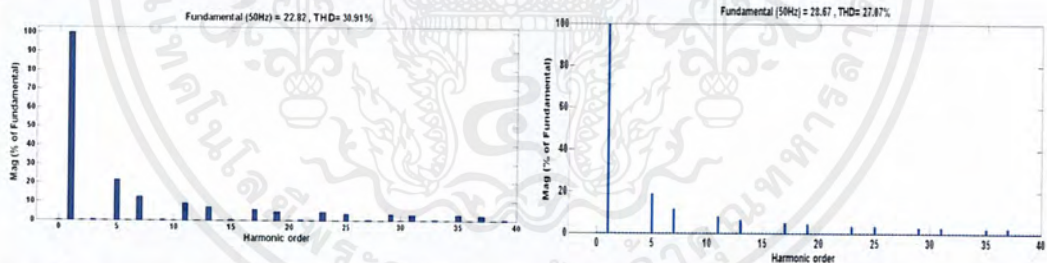
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.38 กระแสด้านโหลด(บน) กระแสด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)



รูปที่ 3.39 กระแสด้านโหลด(บน) กระแสด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)



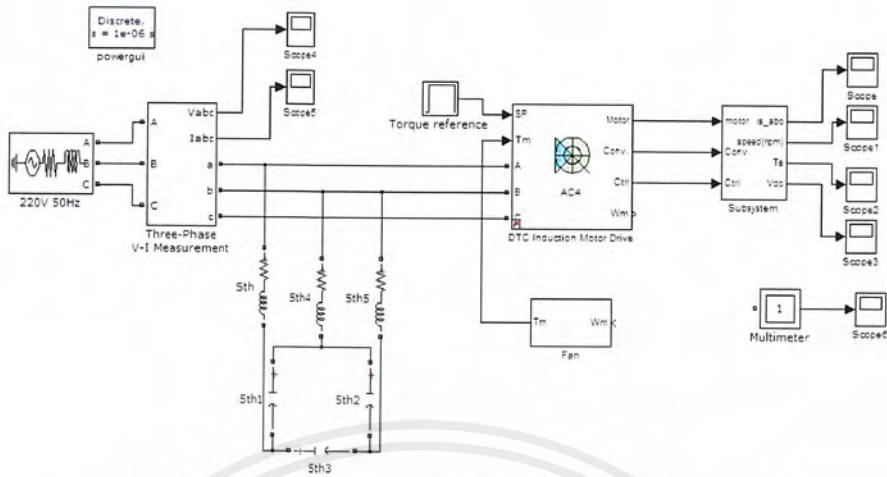
รูปที่ 3.40 สเปกตรัมของกระแสด้านแหล่งจ่าย(ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ (ขวา)

กระแสด้านแหล่งจ่ายก่อนต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์	กระแสด้านแหล่งจ่ายหลังต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์
DC component = 0.002532	DC component = 0.02883
Fundamental = 22.82 peak (16.14 rms)	Fundamental = 28.67 peak (20.27 rms)
Total Harmonic Distortion (THD) = 30.91 %	Total Harmonic Distortion (THD) = 27.07%

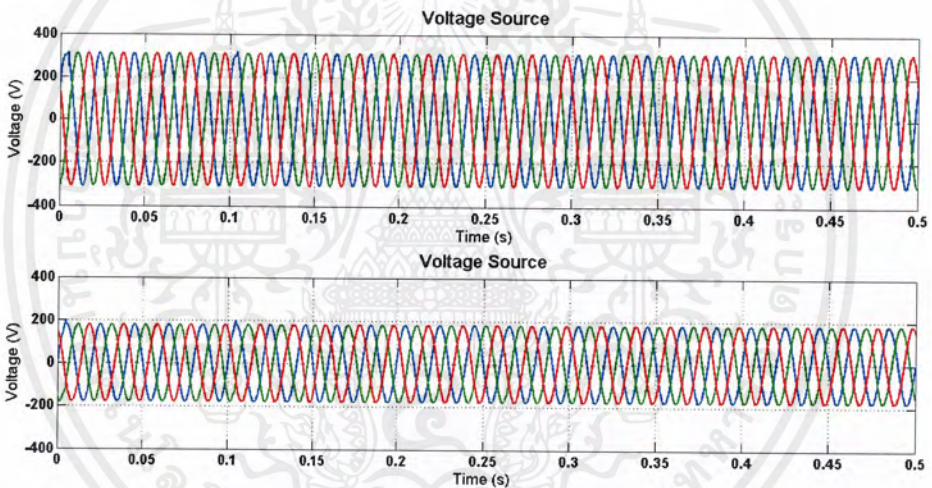
ตารางที่ 3.7 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านแหล่งจ่ายของดีซีไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

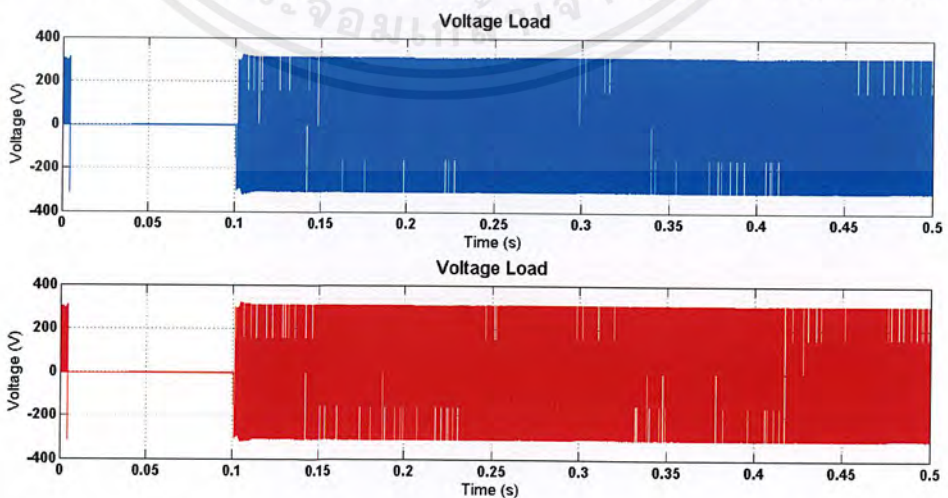
3.2.4 AC Drive Motor



รูปที่ 3.41 วงจร เอซีไดรฟ์โดยมีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์

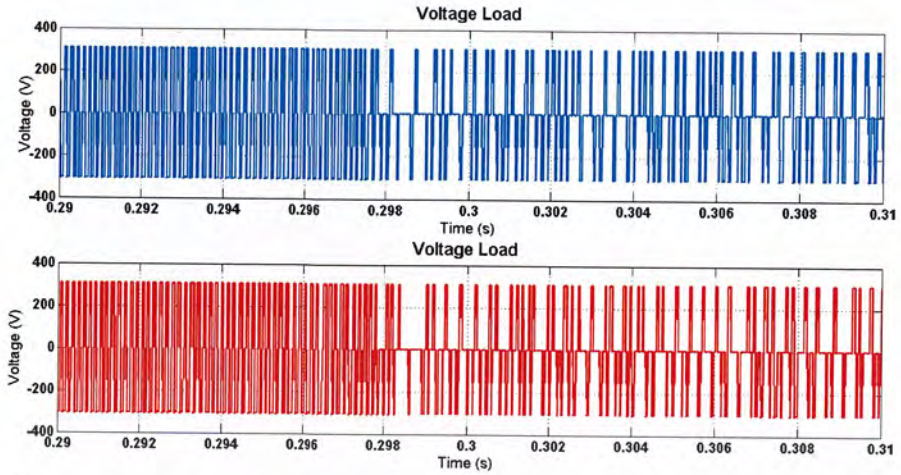


รูปที่ 3.42 แรงดันด้านแหล่งจ่าย(บน) แรงดันด้านแหล่งจ่ายที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

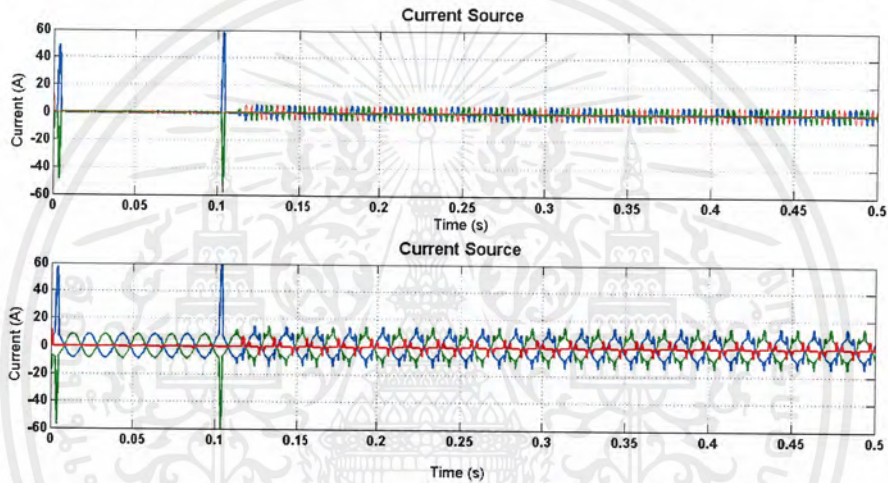


รูปที่ 3.43 แรงดันด้านโหลด(บน) แรงดันด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

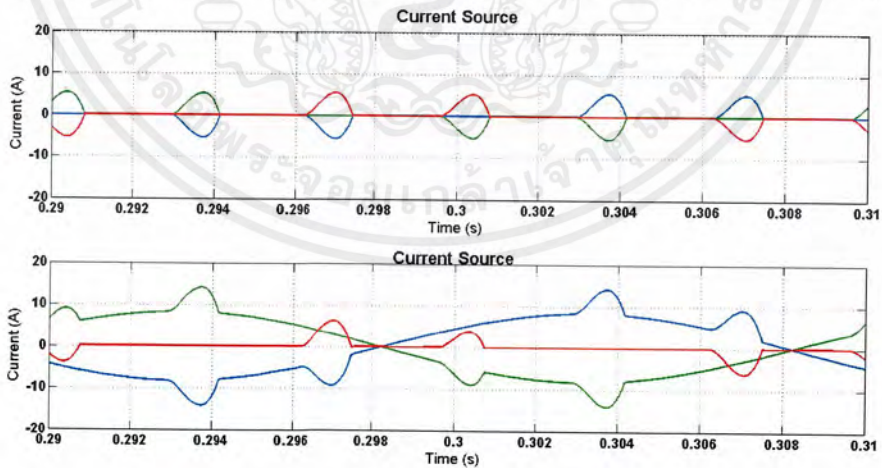
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.44 แรงดันด้านโหลด(บน) แรงดันด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

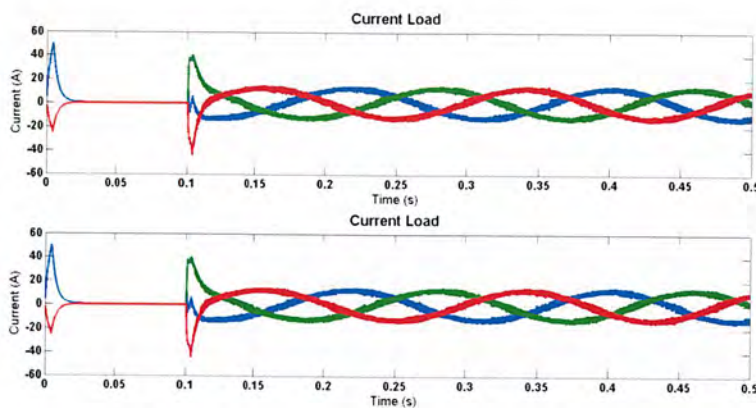


รูปที่ 3.45 กระแสด้านแหล่งจ่าย(บน) กระแสด้านแหล่งจ่ายที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

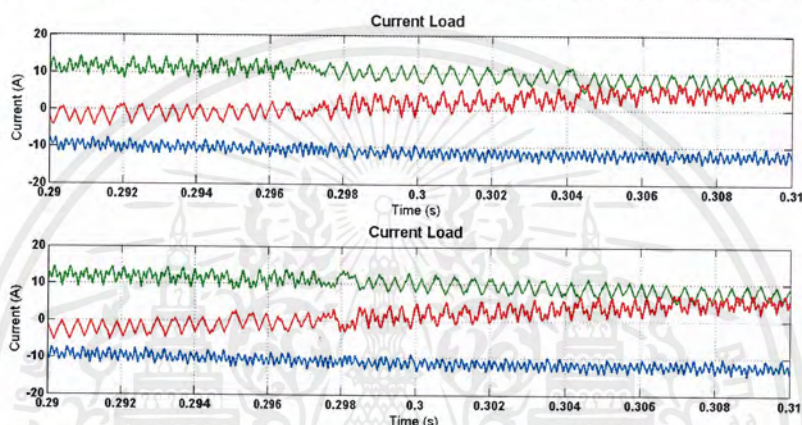


รูปที่ 3.46 กระแสด้านแหล่งจ่าย(บน) กระแสด้านแหล่งจ่ายที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

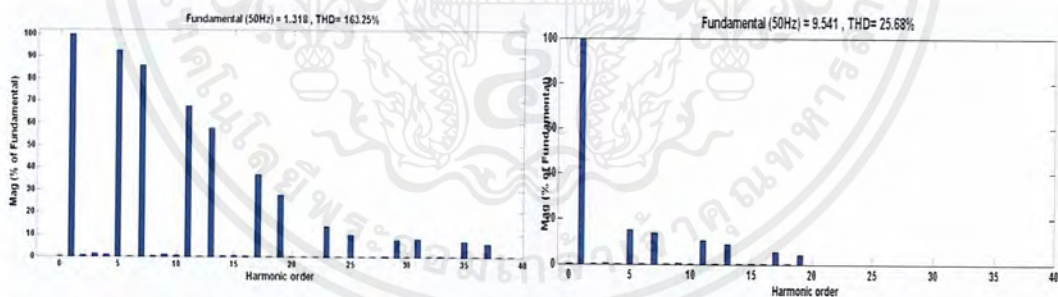
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.47 กระแสด้านโหลด(บน) กระแสด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)



รูปที่ 3.48 กระแสด้านโหลด(บน) กระแสด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์(ล่าง)



รูปที่ 3.49 สเปกตรัมของกระแสด้านแหล่งจ่าย(ซ้าย) สเปกตรัมของกระแสด้านโหลดที่มีการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ (ขวา)

กระแสด้านแหล่งจ่ายก่อนต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์	กระแสด้านแหล่งจ่ายหลังต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์
DC component = 0.001395	DC component = 0.005938
Fundamental = 1.318 peak (0.9318 rms)	Fundamental = 9.541 peak (6.746 rms)
Total Harmonic Distortion (THD) = 163.15 %	Total Harmonic Distortion (THD) = 25.68%

ตารางที่3.8 ฮาร์มอนิกของกระแสด้านแหล่งจ่ายของเอซีไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ผลสรุปที่ได้จากการจำลองแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

ข้อสรุปที่ได้จากจำลองแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ก่อนและหลังจากการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เปอร์เซนต์ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสด้านแหล่งจ่ายลดลง</li> <li>2. กำจัดฮาร์มอนิกอันดับที่ต้องการได้</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. กำลังที่จ่ายให้กับระบบสูงขึ้น</li> <li>2. กระแสด้านแหล่งจ่ายมีค่าสูงขึ้น</li> <li>3. แรงดันด้านแหล่งจ่ายมีค่าลดลง</li> <li>4. ลดฮาร์มอนิกได้ไม่ทุกลำดับ</li> <li>5. วงจรมีขนาดใหญ่</li> <li>6. มีค่ากำลังสูญเสียเพิ่มมากขึ้น</li> </ol>

ตารางที่ 3.9 ข้อดี-ข้อเสียของวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์



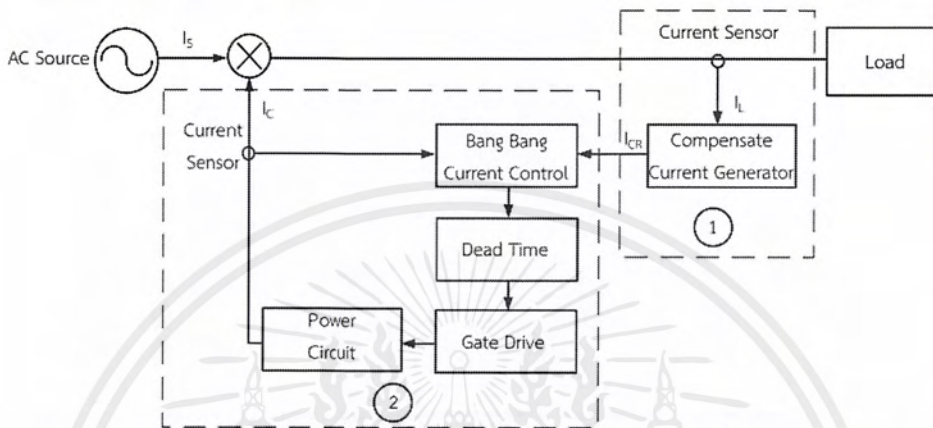
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การออกแบบวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และวงจรต้นแบบ

#### 4.1 การออกแบบวงจรและส่วนประกอบต่างๆ

แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ที่แยกเป็นส่วนประกอบต่างๆได้ดังรูปที่



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์

ออกแบบวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ตามหน้าที่การทำงานได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

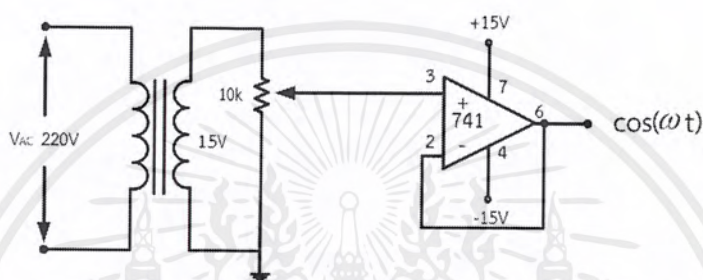
1. ส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิง การทำงานในส่วนนี้ประกอบด้วย
  - วงจรสร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิง
  - วงจรคูณสัญญาณ
  - วงจรกรองความถี่ต่ำ
  - วงจรลบ
2. ส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมและสร้างกระแสชดเชย
  - วงจรฮีสเตอร์รีซิส
  - วงจรเผื่อเวลา (Daed Time)
  - วงจรขับเกต (Gate Drive)
  - วงจรตรวจจับกระแส (Current Sensor)
  - วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)
  - วงจรไฟเลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 ส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิง

เป็นส่วนที่ทำการสร้างสัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิงให้แก่ส่วนควบคุมกระแส ซึ่งจะนำสัญญาณไปเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสชดเชยที่ฉีดเข้าไปในระบบเพื่อสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มไปขับส่วนวงจรถออินเวอร์เตอร์ต่อไป ในส่วนนี้มีส่วนที่เป็นอินพุตอยู่ 2 องค์ประกอบที่จะนำมาคำนวณในวงจรสร้างกระแสชดเชยอ้างอิง คือ กระแสโหลด และแรงดันอ้างอิงจากแหล่งจ่าย จึงต้องทำการป้อนสัญญาณทั้งสองเข้ามาผ่านวงจรถูกสัญญาณ วงจรกรองความถี่ต่ำ และวงจรถบ เพื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณ

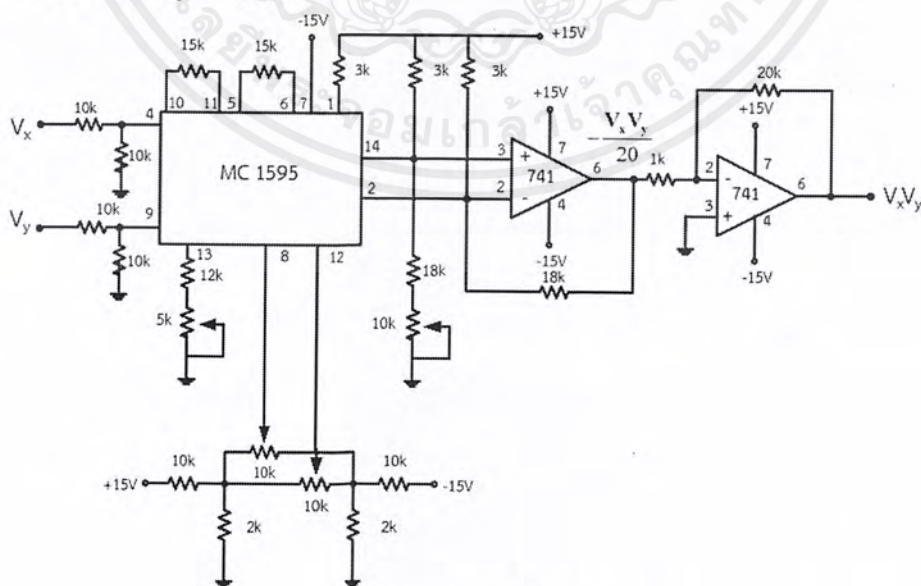
##### 4.1.1.1 วงจรสร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิง



รูปที่ 4.2 วงจรสร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิง

วงจรที่ใช้ในการส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $\cos(\omega t)$  ซึ่งจะต้องมีเฟสตรงกับแหล่งจ่าย และแยกกราวด์ส่วนของวงจรถออินเวอร์เตอร์ และวงจรถบคุมด้วยการใช้หม้อแปลง step down ให้มีแรงดัน 15V แล้วเข้าตัวต้านทานปรับค่าได้ เพื่อเปลี่ยนแรงดันให้เหลือ  $1 V_{rms}$  จากนั้นป้อนเข้าวงจรถบเพื่อต่อไฟเลี้ยง  $\pm 15V$  เพื่อนำสัญญาณไปใช้ในการหากระแสชดเชยอ้างอิง

##### 4.1.1.2 วงจรคูณสัญญาณ

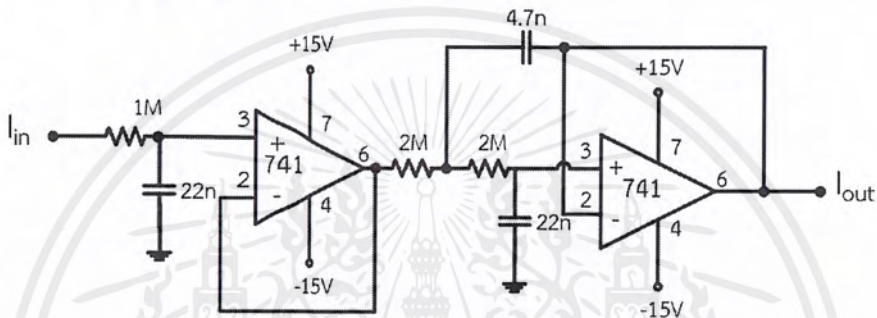


รูปที่ 4.3 วงจรคูณสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหากระแสชดเชย จะต้องนำสัญญาณมาคูณกัน ซึ่งทำได้โดยใช้ไอซี MC1595 ไอซีเบอร์นี้เป็นไอซีที่สามารถนำมาใช้ในการคูณ 4-quadrant โดยการต่อดังรูป ซึ่งการทำงานของวงจรประกอบด้วย ไฟเลี้ยงวงจร  $\pm 15V$  สัญญาณอินพุตจะต้องไม่เกิน  $\pm 10V$  และสัญญาณที่ออกจากไอซี MC1595 จะมีขนาดเล็กถึง 20 เท่า และมีลักษณะอินเวอร์ส ดังนั้นจึงนำสัญญาณที่ออกจาก MC1595 นี้มาทำการขยายสัญญาณ 20 เท่าด้วยวงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตที่ถูกต้อง ก่อนนำไปใช้งานจริงจะต้องนำวงจรคูณมาทำการทดสอบเพื่อปรับค่า DC offset และ AC offset ก่อน เพราะถ้าไม่ทำการแก้ค่า offset จะทำให้ผลของการคูณสัญญาณผิดเพี้ยน

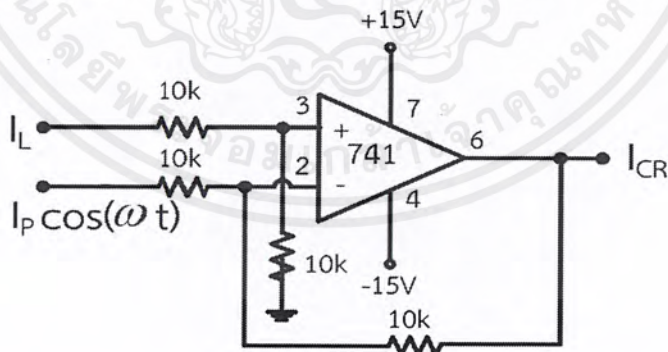
#### 4.1.1.3 วงจรกรองความถี่ต่ำ



รูปที่ 4.4 วงจรกรองความถี่ต่ำ

วงจรกรองความถี่ต่ำออกแบบให้มีความถี่คัทออฟที่ 25 Hz เพื่อให้ได้ขนาดของ  $I_p$  ที่มีแต่ส่วนของ DC

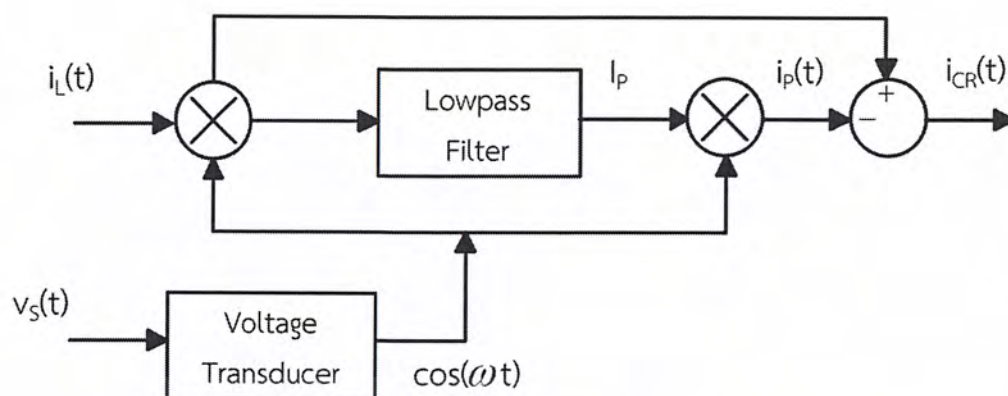
#### 4.1.1.4 วงจรลบ



รูปที่ 4.5 วงจรลบ

เมื่อได้สัญญาณ  $I_p \cos(\omega t)$  จากการคำนวณ จะสามารถหากระแสชดเชยอ้างอิง  $I_{CR}$  ได้จากวงจรลบ โดยจะสามารถสร้างกระแสชดเชยอ้างอิงได้โดยการต่อวงจรตามบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.6 โดยการนำสัญญาณ  $\cos(\omega t)$  จากหม้อแปลง step down และสัญญาณกระแส  $i_L(t)$  จากวงจรตรวจจับกระแส นำมาคูณกันแล้วผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ โดยวงจรความถี่ต่ำออกแบบให้มีความถี่คัทออฟที่  $\omega$  เพื่อให้ได้ส่วนของ DC ซึ่งเป็นขนาดของกระแส  $I_p$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

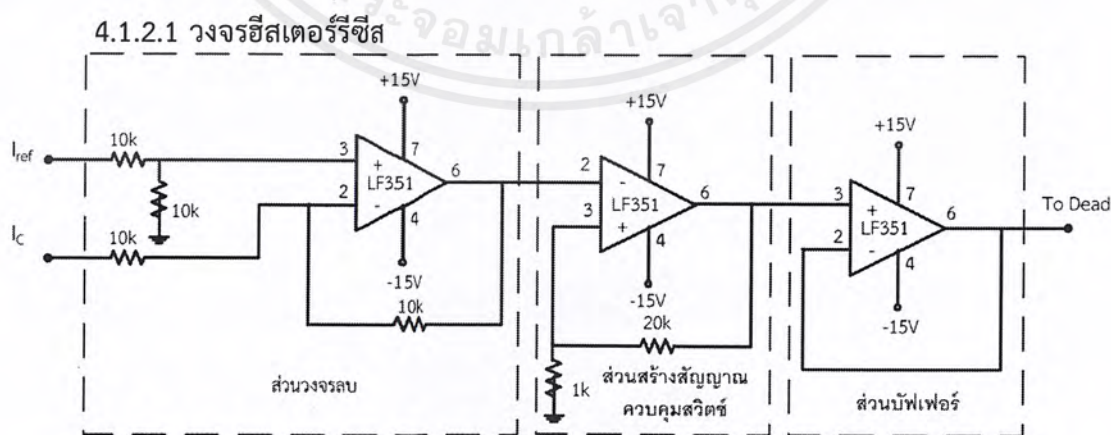


รูปที่ 4.6 โดอะแกรมแบบลูปเปิด (Open Loop) ที่ใช้คำนวณกระแสชดเชย

เมื่อได้กระแส  $I_p$  นำมาคูณกับแรงดันไซน์อ้างอิง  $\cos(\omega t)$  จะได้ค่าประมาณของกระแสแอกที่พ่วงขณะ  $i_p(t)$  จะได้สัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิงโดยการนำเอาสัญญาณ  $i_L(t)$  ลบกับสัญญาณ  $I_p \cos(\omega t)$  ซึ่งจะได้กระแสชดเชยอ้างอิงที่จะจ่ายให้ส่วนควบคุมกระแสเพื่อสร้างกระแสชดเชยที่จะจ่ายให้กับระบบ

#### 4.1.2 ส่วนที่ทำการควบคุมและสร้างกระแสชดเชย

การทำงานในส่วนนี้ จะเป็นการนำสัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิงที่ได้จาก 4.1.1 มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสชดเชยที่จ่ายเข้าไปในระบบ โดยจะตรวจจับสัญญาณมาจากเอาต์พุทของวงจรอินเวอร์เตอร์ จากนั้นจะนำไปคำนวณสร้างสัญญาณพีดีบีลิวเอ็มโดยใช้วงจรแบ่ง แวง หรือ วงจรควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส เพื่อนำไปป้อนเข้าสู่วงจรมือเวลาและวงจรขับเกทแล้วสร้างสัญญาณสวิตช์ไปป้อนวงจรอินเวอร์เตอร์ ให้ทำการสร้างกระแสชดเชยต่อไป การควบคุมและสร้างกระแสชดเชยจะแยกการทำงานออกเป็นส่วนต่างๆดังนี้



รูปที่ 4.7 วงจรฮิสเตอร์รีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนวงจรลบ

โดยออปแอมป์จะเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณกระแสอ้างอิง กับสัญญาณกระแสชดเชยที่ป้อนเข้าระบบโดยตรวจจับสัญญาณมาจากด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ เมื่อเปรียบเทียบแล้วจะได้สัญญาณ error แล้วนำสัญญาณไปเข้าวงจรฮีสเตอร์ริซิส

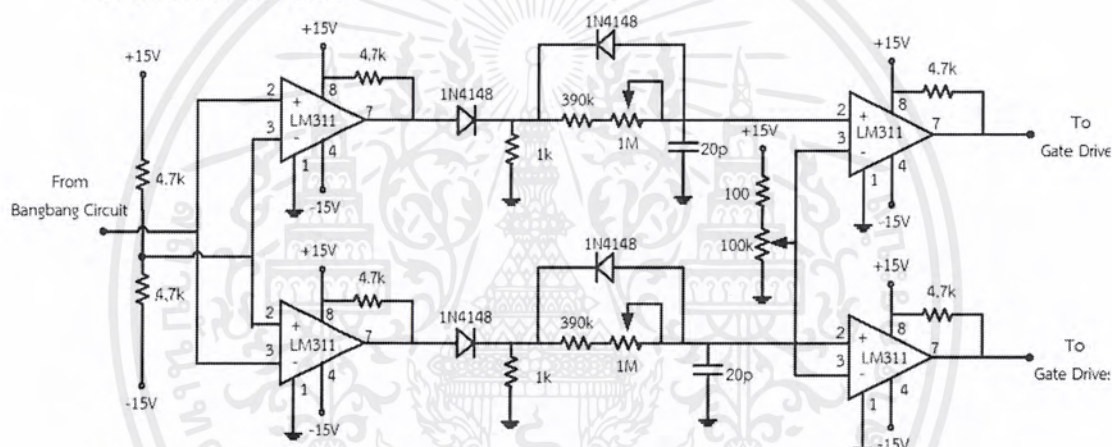
- ส่วนสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์

สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบมาผ่านวงจรฮีสเตอร์ริซิสคอมแพเรเตอร์ ถ้าสัญญาณที่เข้ามามากกว่าขอบเขตบนจะได้สัญญาณ -15V แต่ถ้าสัญญาณที่เข้ามาน้อยกว่าขอบเขตล่างจะได้สัญญาณ +15V

- ส่วนบัฟเฟอร์ (Buffer)

ออปแอมป์จะนำสัญญาณที่ผ่านจากวงจรฮีสเตอร์ริซิสคอมแพเรเตอร์ ผ่านออกไป โดยกันไม่ให้สัญญาณที่เกิดการผิดเพี้ยนมารบกวน

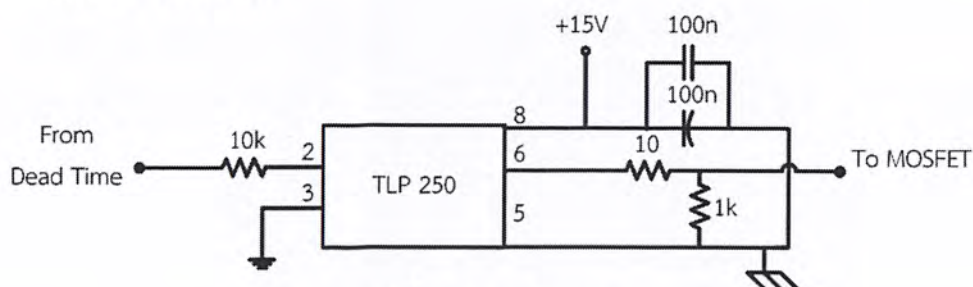
#### 4.1.2.2 วงจรเพื่อเวลา



รูปที่ 4.8 วงจรเพื่อเวลา

การทำให้อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งนำกระแส (ON) และหยุดนำกระแส (OFF) จำเป็นที่จะต้องใช้เวลาช่วงสั้นๆ ก่อนที่สวิตช์ตัวหนึ่งจะนำกระแส สวิตช์ในคู่เดียวกันนั้นได้หยุดนำกระแสไปแล้ว เพื่อป้องกันการลัดวงจรซึ่งทำให้สวิตช์ทั้งคู่เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นสัญญาณขั้วเกทของแต่ละสวิตช์จะถูกหน่วงเวลาไปช่วงเวลาหนึ่งเรียกว่าช่วง เดดไทม์ (Dead Time) มีลักษณะของวงจรดังรูปที่ 4.8 โดยสามารถปรับช่วงการหน่วงเวลาด้วยการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่า 100k

#### 4.1.2.3 วงจรขั้วเกท

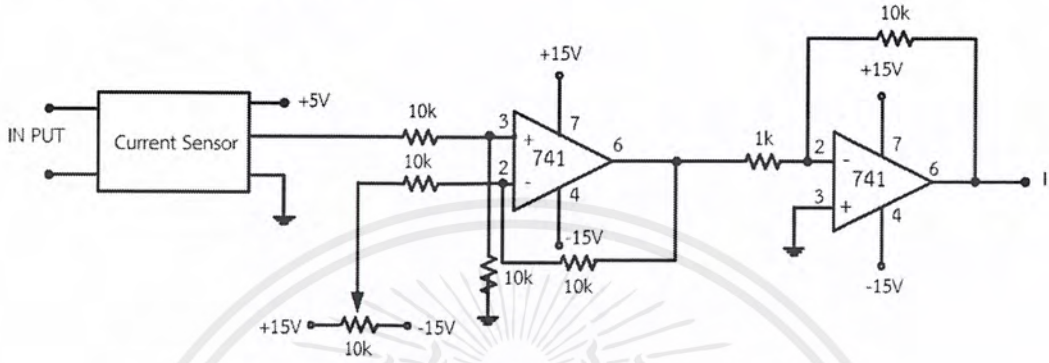


รูปที่ 4.9 วงจรขั้วเกท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่จะนำไปขับวงจรเพาเวอร์ซึ่งเป็นสวิทช์ 4 ตัว จะต้องมีการแยกกราวด์ระหว่างวงจรควบคุม และวงจรอินเวอร์เตอร์ออกจากกัน โดยใช้ออปโตคัปเปิลเลอร์ (Optocouplers) ซึ่งนำสัญญาณที่ได้จากวงจรเพื่อเวลาเข้ามาเข้าออปโตคัปเปิลเลอร์ TLP250 ซึ่งสัญญาณเอาท์พุทที่ได้สามารถนำไปขับเกทได้โดยไม่ต้องผ่านวงจรปรับแต่งสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะส่งต่อไปยังวงจรสวิทช์ต่อไป

#### 4.1.2.4 วงจรตรวจจับกระแส

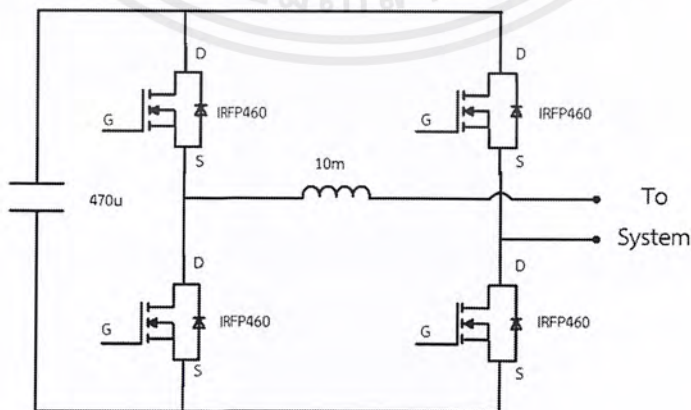


รูปที่ 4.10 วงจรตรวจจับกระแส

สัญญาณอินพุทที่ใช้ในวงจรฮีสเตอร์รีซิส จำเป็นต้องใช้สัญญาณกระแสคือ สัญญาณกระแสอ้างอิงและสัญญาณกระแสชดเชยจากอินเวอร์เตอร์โดยใช้ Current Sensor ในการตรวจจับสัญญาณกระแส

ในวงจรนี้ จะต่อให้ Current Sensor มี ratio มีค่า  $1A : 0.1V$  ดังนั้นกระแสที่เข้ามา  $1A$  จะออกจาก Current Sensor  $0.1V$  สัญญาณที่ได้จะมีค่า Offset=2.5V จึงต้องแก้ไขด้วยการปรับค่าตัวต้านทานที่วงจรลบ จากนั้นนำไปเข้าวงจรขยายสัญญาณที่มีค่า Gain = 10 เพื่อให้ได้สัญญาณขนาด  $1V$  ต่อ กระแส  $1A$

#### 4.1.2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์

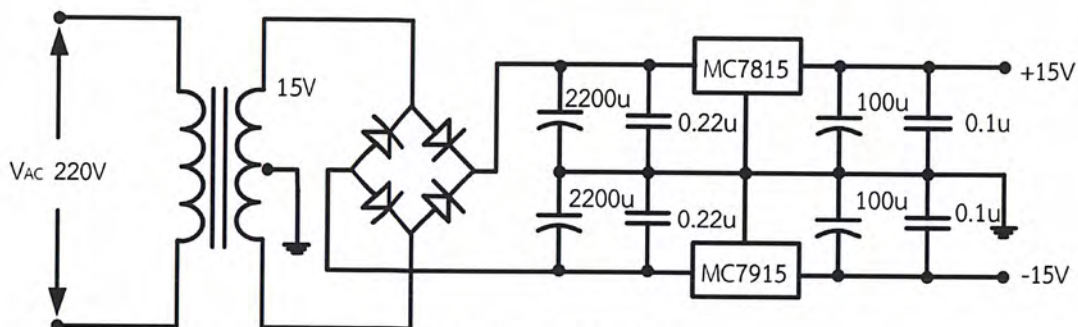


รูปที่ 4.11 วงจรอินเวอร์เตอร์

สัญญาณที่ได้จากวงจรขับเกท จะนำมาป้อนเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ขาเกทของอุปกรณ์สวิทช์ เพื่อเปิด ปิดการทำงาน ให้จ่ายกระแสตามวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2.6 วงจรไฟเลี้ยง

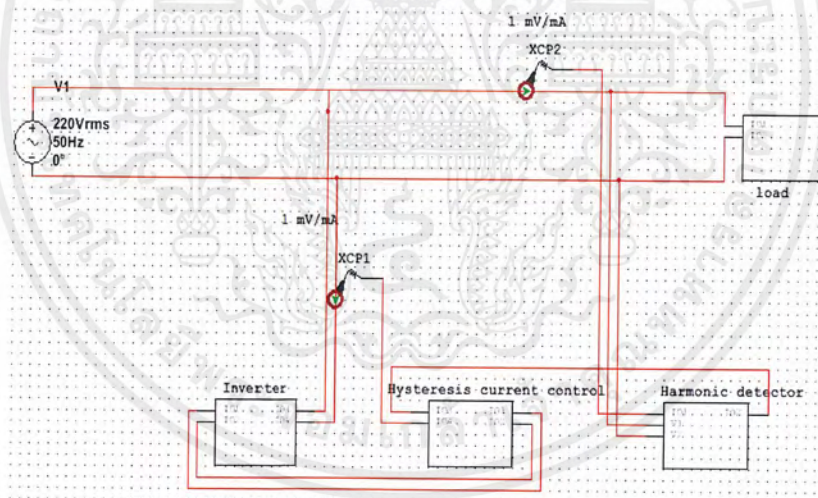


รูปที่ 4.12 วงจรไฟเลี้ยง

วงจรไฟเลี้ยง ใช้สำหรับจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุมซึ่งใช้ไฟ  $\pm 15\text{V}$  โดยออกแบบให้มี 5 เอาร์ทพุท ไฟ  $+15\text{V}$  จำนวน 5 เอาร์ทพุท และ  $-15\text{V}$  จำนวน 5 เอาร์ทพุท

### 4.2 การออกแบบวงจรโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และวงจรจริง

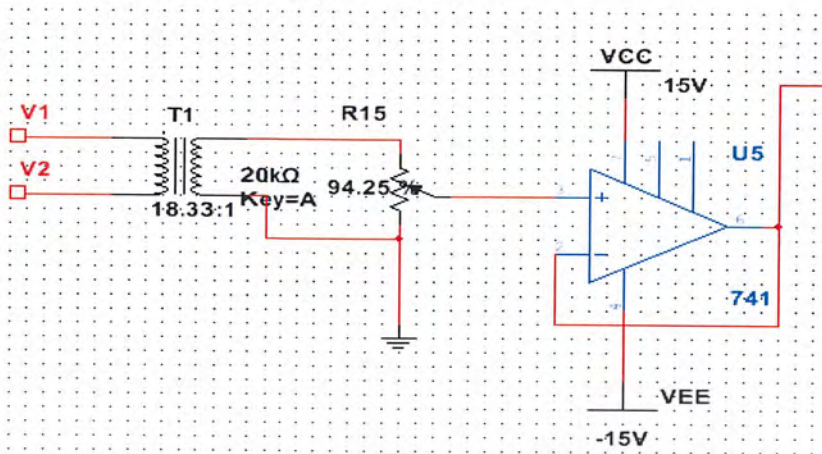
#### 4.2.1 วงจรโดยรวมที่ออกแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



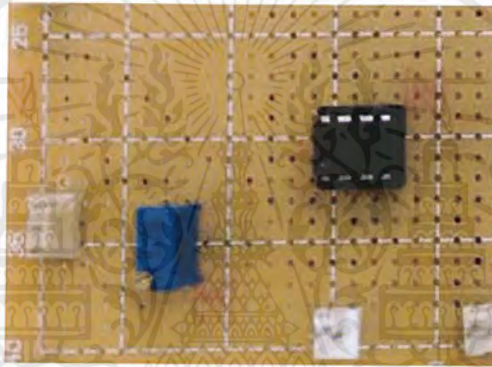
รูปที่ 4.13 วงจรโดยรวมที่ออกแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิง

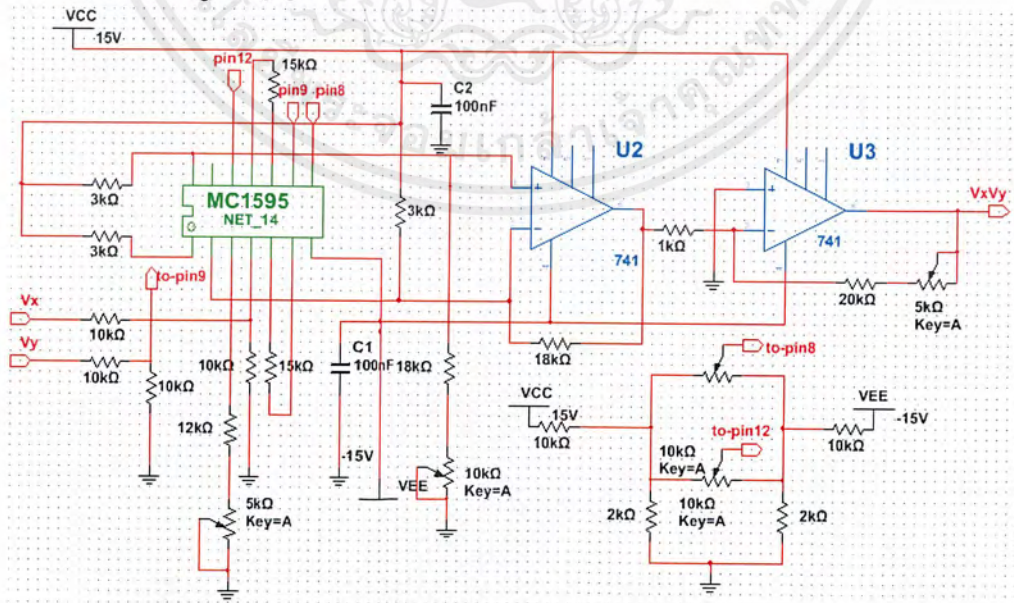


รูปที่ 4.14 วงจรส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิงที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์



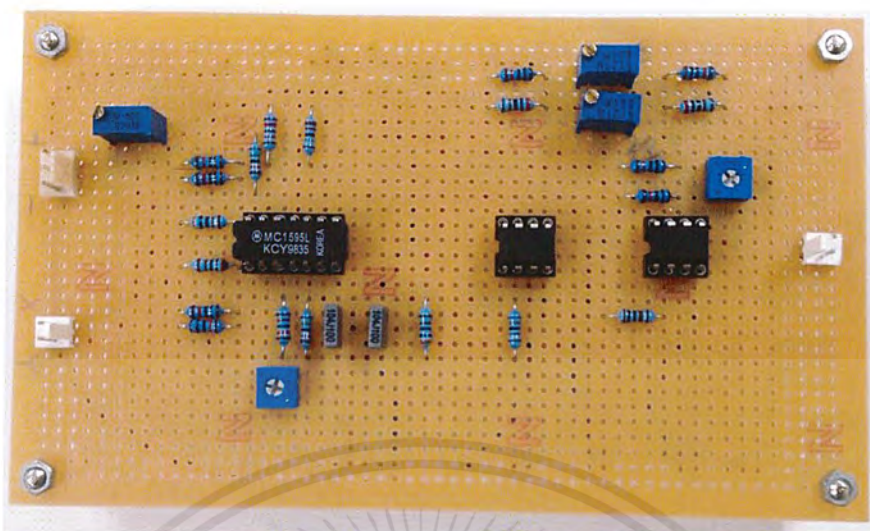
รูปที่ 4.15 วงจรส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิงที่สร้างขึ้น

#### 4.2.3 วงจรคูณสัญญาณ



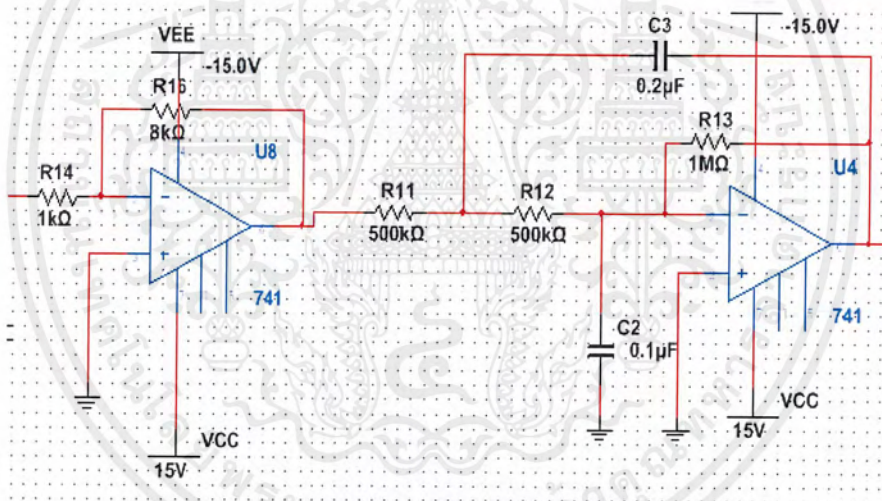
รูปที่ 4.16 วงจรคูณสัญญาณที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

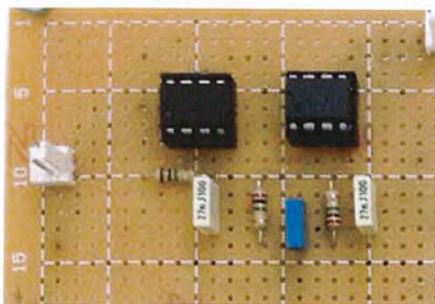


รูปที่ 4.17 วงจรคุณสัญญาณที่สร้างขึ้น

4.2.4 วงจรรองความถี่ต่ำ



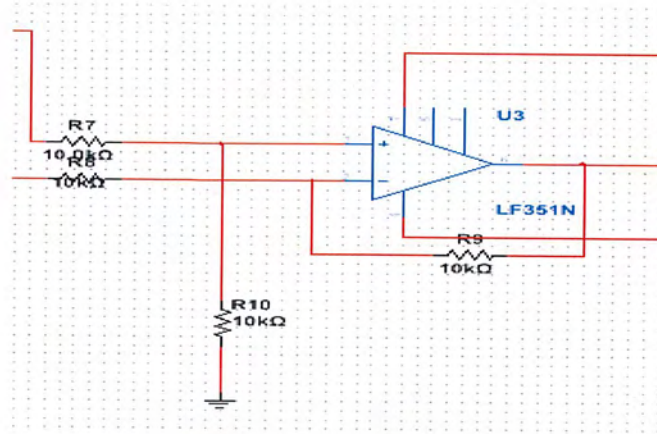
รูปที่ 4.18 วงจรรองความถี่ต่ำที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์



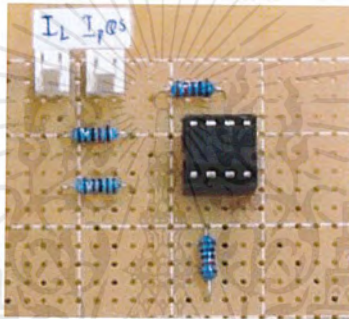
รูปที่ 4.19 วงจรรองความถี่ต่ำที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.5 วงจรลบ

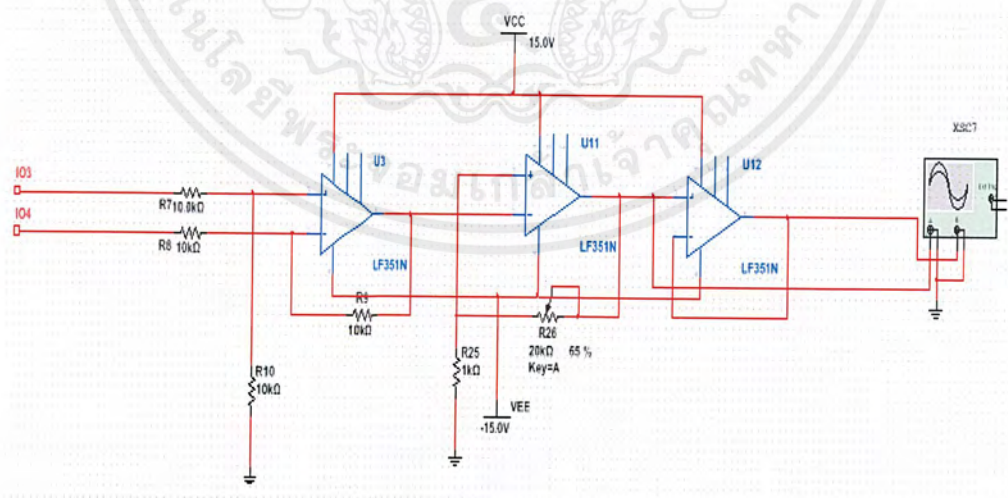


รูปที่ 4.20 วงจรลบที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์



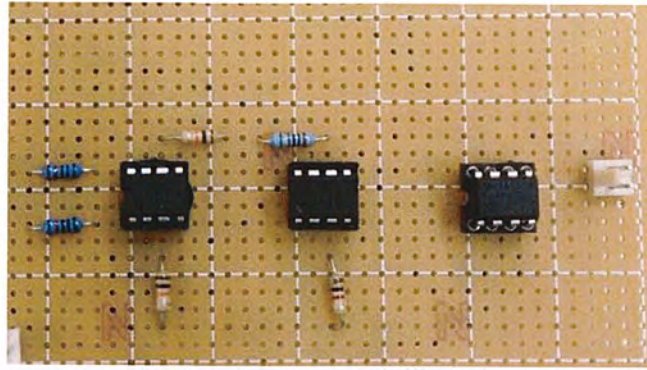
รูปที่ 4.21 วงจรลบที่สร้างขึ้น

## 4.2.6 วงจรฮีสเตอร์รีซิส



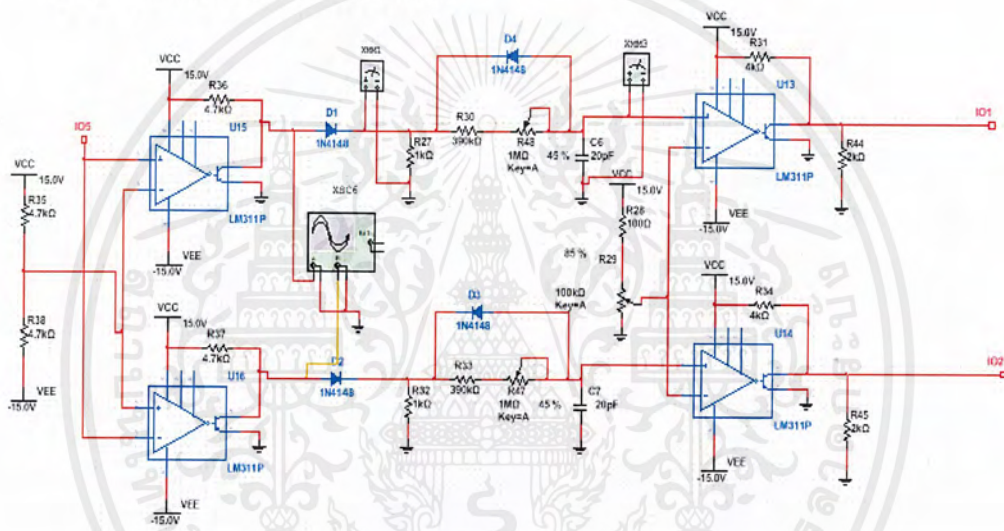
รูปที่ 4.22 วงจรฮีสเตอร์รีซิสที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

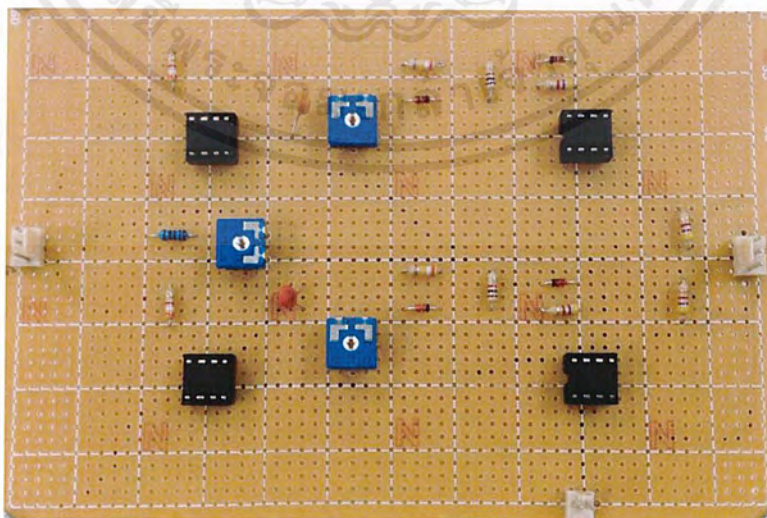


รูปที่ 4.23 วงจรฮิสเตอร์ซิสที่สร้างขึ้น

#### 4.2.7 วงจรเพื่อเวลา (Daed Time)



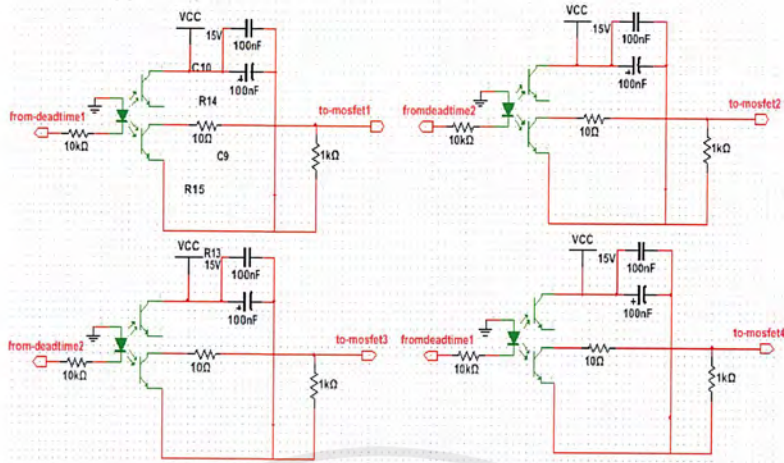
รูปที่ 4.24 วงจรเพื่อเวลาที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์



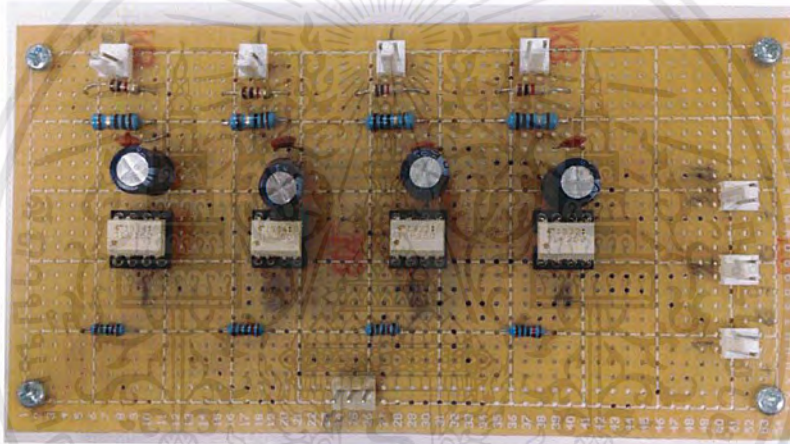
รูปที่ 4.25 วงจรเพื่อเวลาที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.8 วงจรขับเกท (Gate Drive)

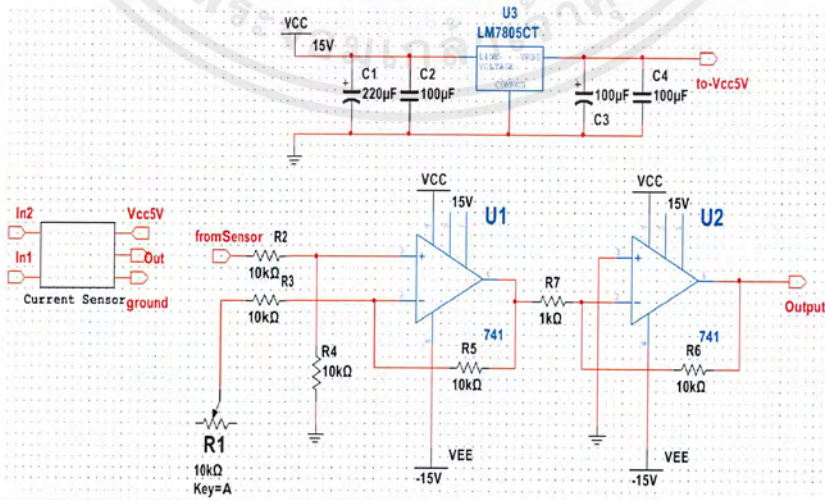


รูปที่ 4.26 วงจรขับเกทที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์



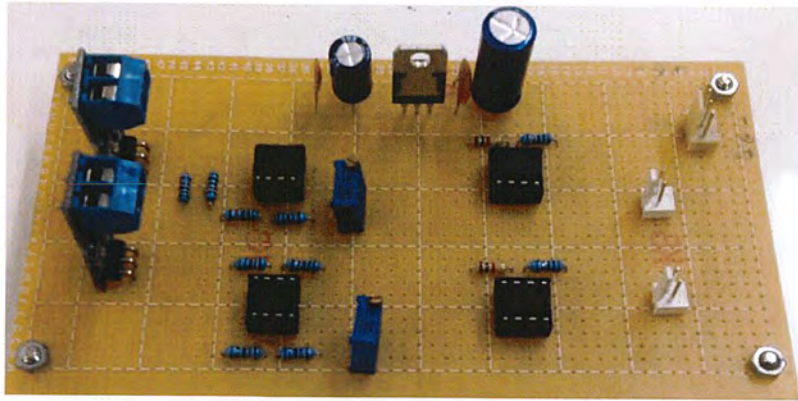
รูปที่ 4.27 วงจรขับเกทที่สร้างขึ้น

#### 4.2.9 วงจรตรวจจับกระแส (Current Sensor)



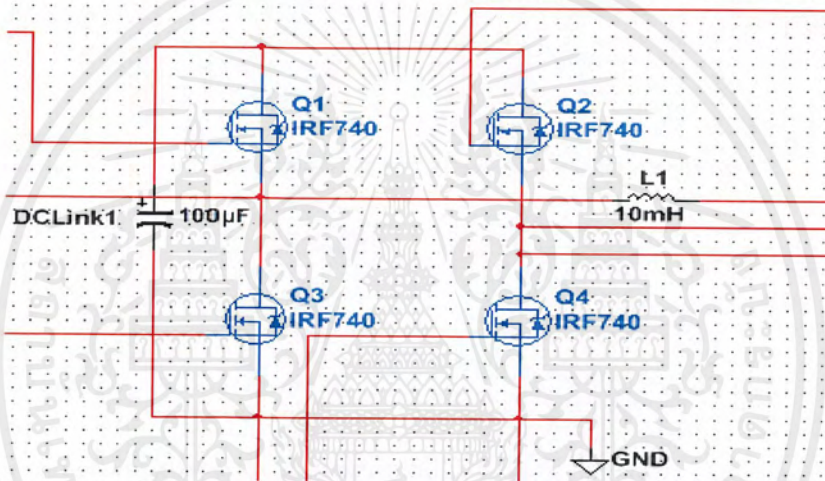
รูปที่ 4.28 วงจรตรวจจับกระแสที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

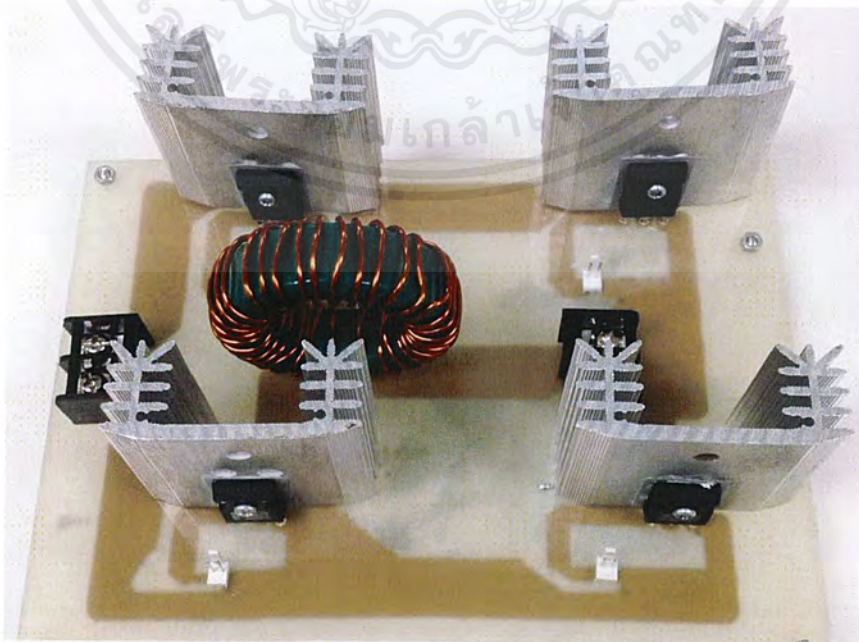


รูปที่ 4.29 วงจรตรวจจับกระแสที่สร้างขึ้น

#### 4.2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)



รูปที่ 4.30 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.31 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น

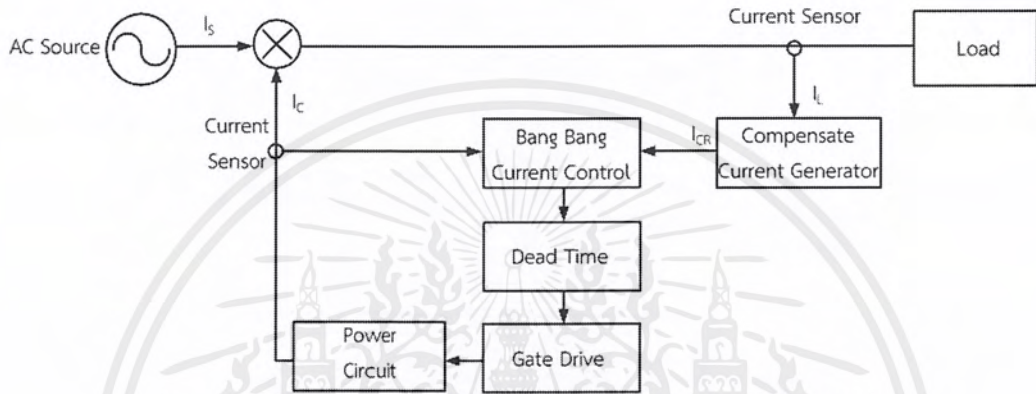
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

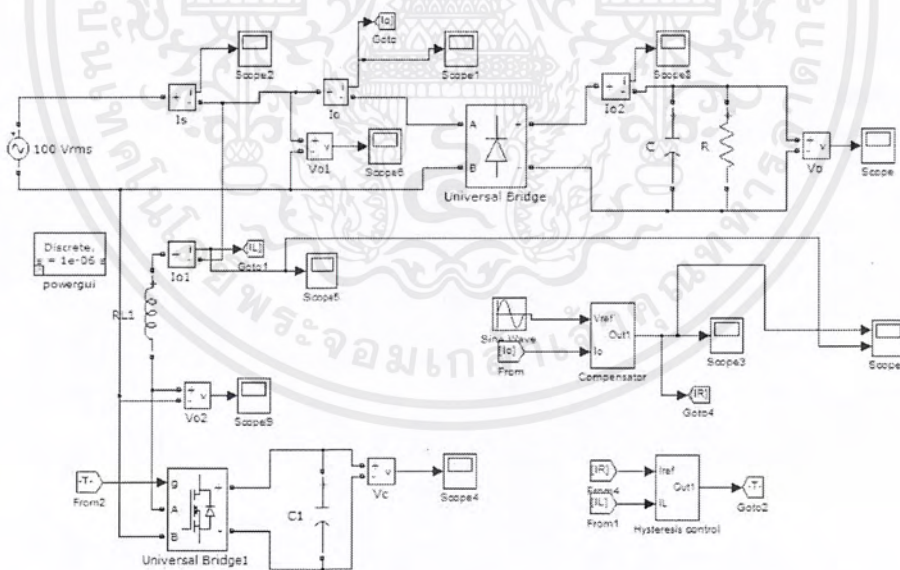
### ผลของการเชื่อมต่อวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์เข้าในระบบ

#### 5.1 ผลของแอกทีฟฟิลเตอร์ที่มีต่อโหลด R-C Rectifier

ทำการจำลองผลของการต่อวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์เข้าไปในระบบด้วยโปรแกรม Matlab Simulink เพื่อดูผลของสัญญาณต่างๆ ซึ่งทำการจำลองโดยใช้โหลด R-C Rectifier ส่วนการทดลองด้วยวงจรจริงนั้นจะใช้ R-C Rectifier เช่นกัน มีค่าตัวเก็บประจุ  $50 \mu F$  ขนานกับโหลดไส้ขนาด 100 Watt จำนวนสี่หลอด และทำการป้อนแรงดันแหล่งจ่าย  $100 V_{rms}$

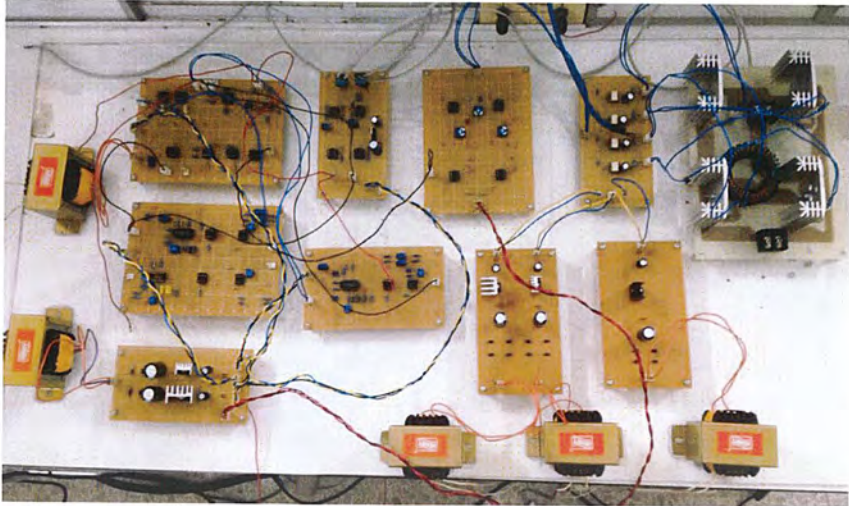


รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์



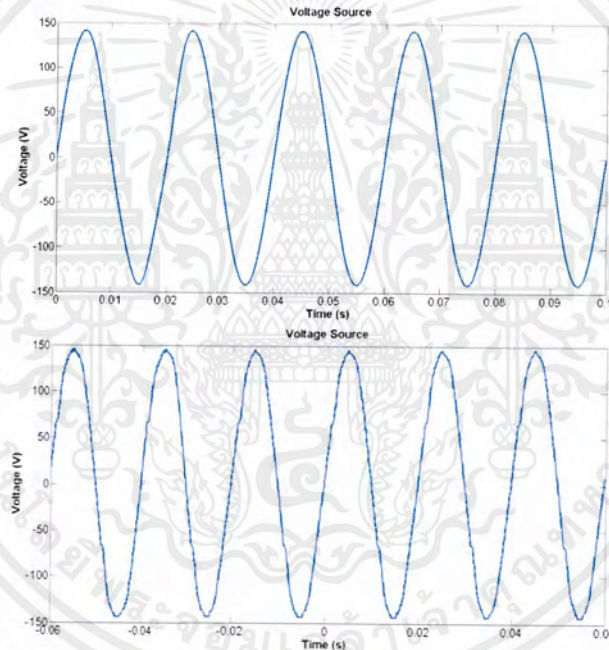
รูปที่ 5.2 วงจรจำลองแอกทีฟฟิลเตอร์ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Matlab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



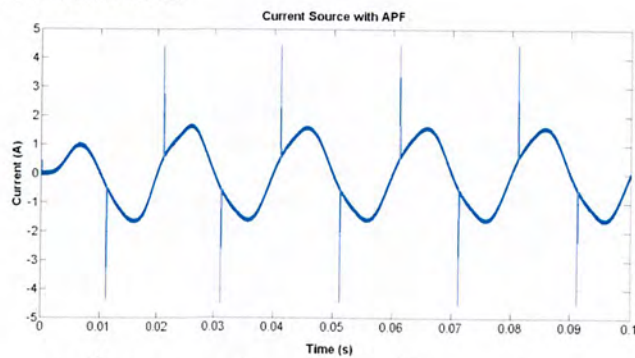
รูปที่ 5.3 วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์จริงที่ใช้ในการทดลอง

### 5.1.1 แรงดันทางด้านแหล่งจ่าย



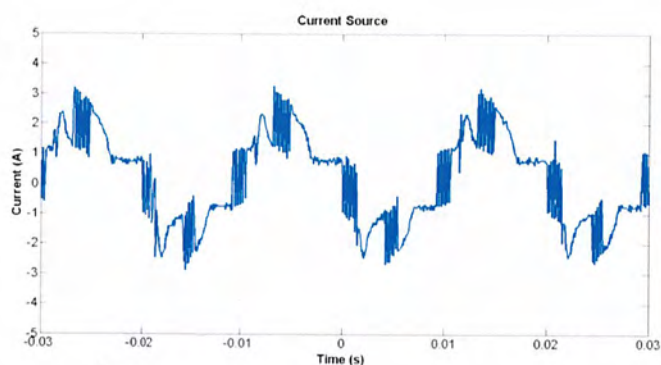
รูปที่ 5.4 ผลการจำลอง(บน)และผลทดลองจริง(ล่าง)ของแรงดันแหล่งจ่าย  $100 \text{ V}_{rms}$

### 5.1.2 กระแสทางด้านแหล่งจ่าย



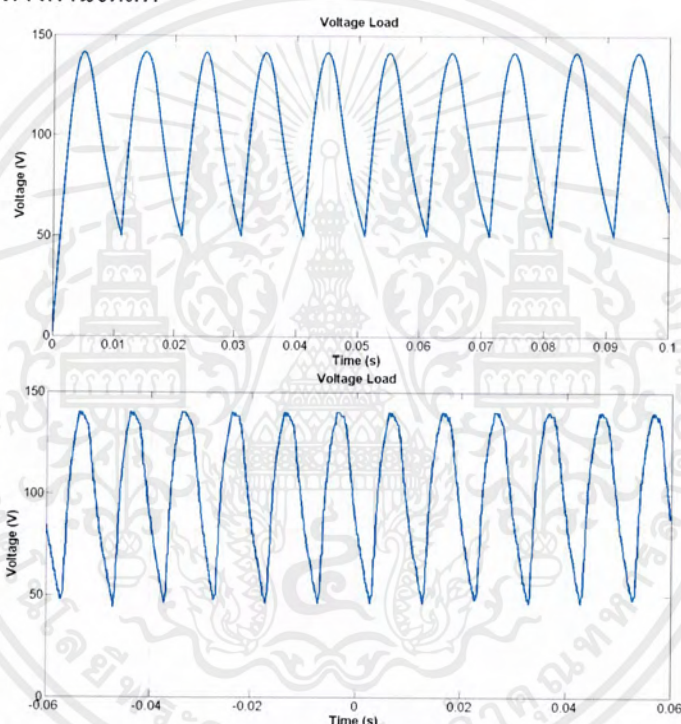
รูปที่ 5.5 กระแสด้านแหล่งจ่ายที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



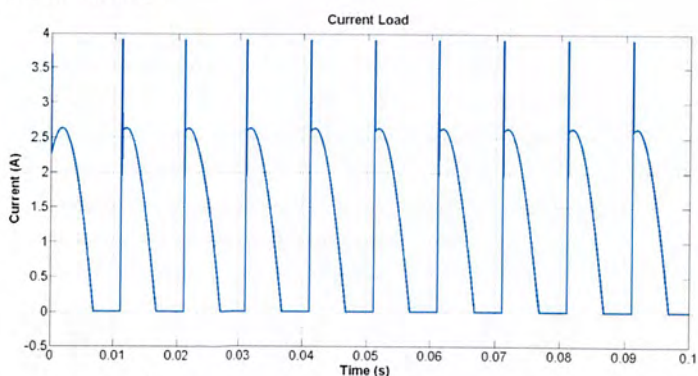
รูปที่ 5.6 กระแสต้านแหล่งจ่ายที่ได้จากการทดลอง

### 5.1.3 แรงดันทางด้านโหลด



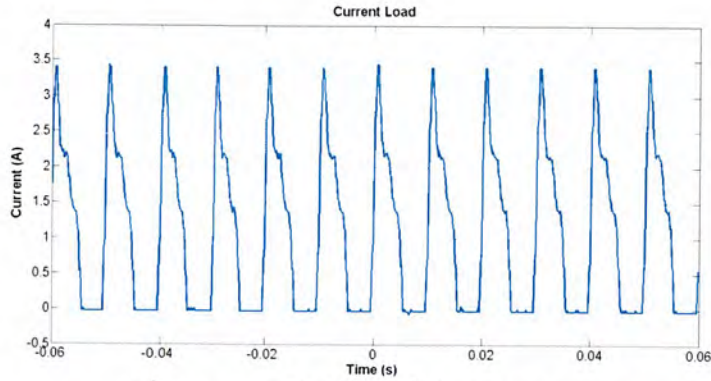
รูปที่ 5.7 แรงดันด้านโหลดที่ได้จากการจำลอง(บน)และแรงดันด้านโหลดที่ได้จากการทดลอง(ล่าง)

### 5.1.4 กระแสทางด้านโหลด



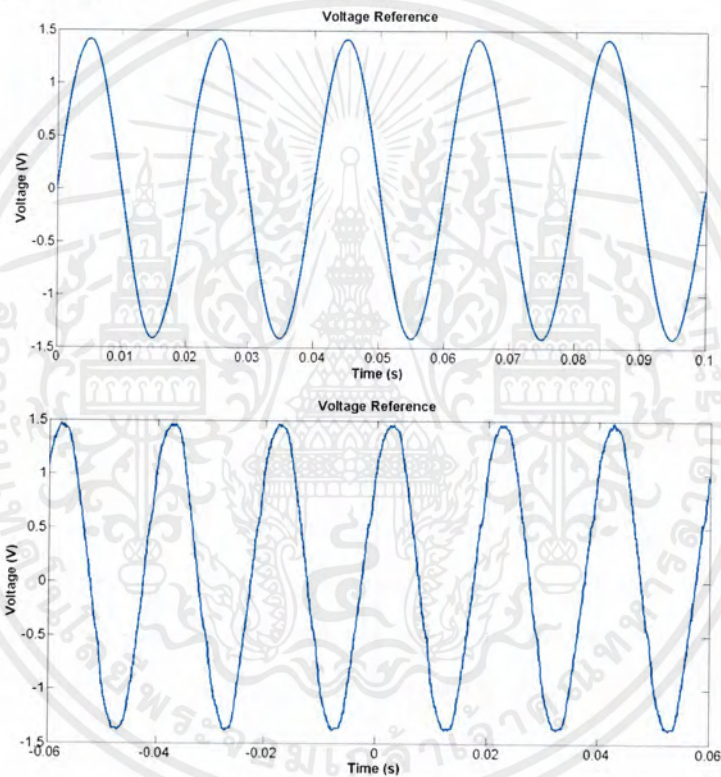
รูปที่ 5.8 กระแสด้านโหลดที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 กระแสด้านโหลดที่ได้จากการทดลอง

### 5.1.5 สัญญาณไซน์อ้างอิง

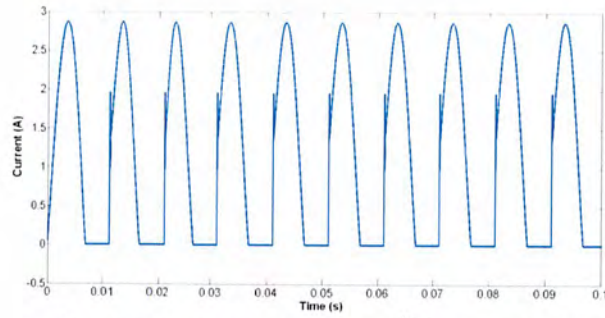


รูปที่ 5.10 สัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิงจากแหล่งจ่ายที่ได้จากการจำลอง(บน)สัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิงจากแหล่งจ่ายที่ได้จากการทดลอง(ล่าง)

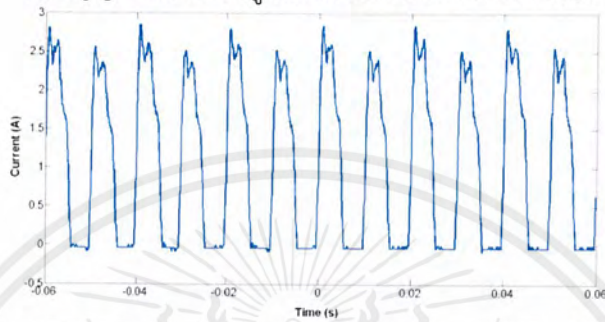
### 5.1.6 สัญญาณจากวงจรคูณ

สำหรับวงจรคูณสัญญาณนั้นจะแบ่งเป็นสองวงจร วงจรแรกจะเป็นการนำสัญญาณกระแสโหลด  $I_L$  มาทำการคูณกับแรงดันไซน์อ้างอิง  $\cos(\omega t)$  ซึ่งผลที่ได้จะเป็นตามรูป(ก)และ(ข) เอกลักษณ์ของวงจรคูณวงจรแรกจะถูกส่งต่อไปยัง Low-pass Filter ส่วนวงจรที่สองนั้นจะเป็นการคูณกันระหว่างกระแสอินเฟส (กระแสที่ความถี่มูลฐาน  $I_p$ ) ซึ่งได้มาจาก Low-pass Filter นำมาคูณกับไซน์อ้างอิง ผลที่ได้จะเป็นตามรูป(ค)และ(ง)

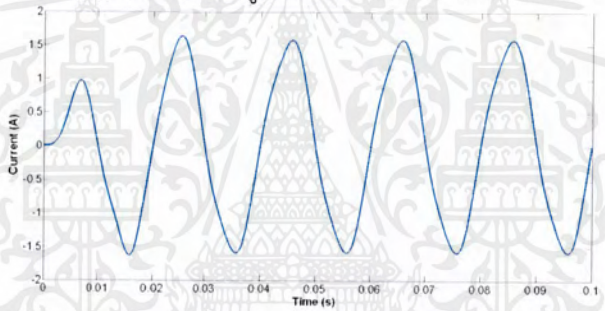
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



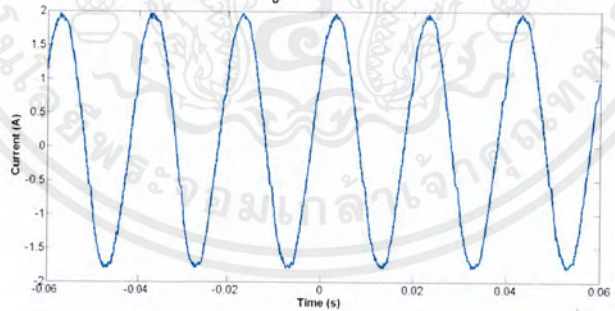
(ก) สัญญาณของวงจรคุณวงจรแรกที่ได้จากการจำลอง



(ข) สัญญาณของวงจรคุณวงจรแรกจากการทดลองจริง



(ค) สัญญาณของวงจรคุณวงจรที่สองจากการจำลอง



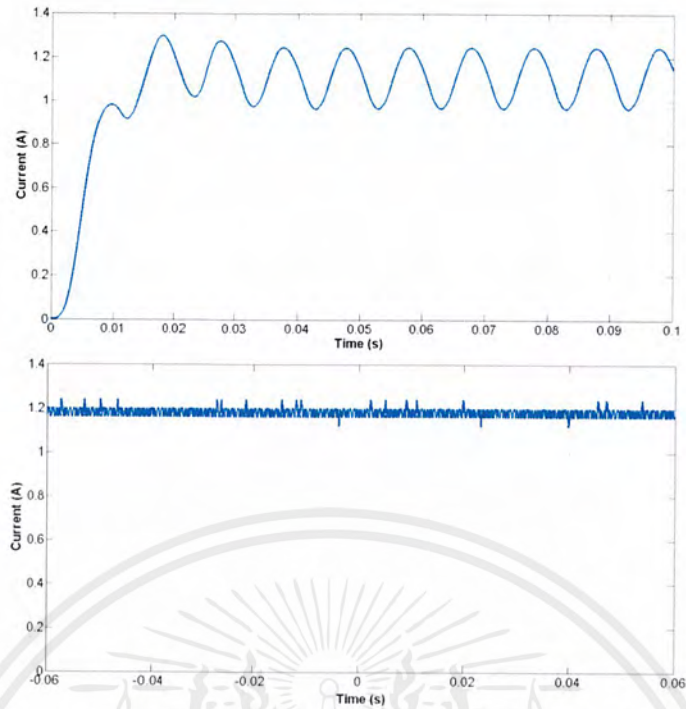
(ง) สัญญาณของวงจรคุณวงจรที่สองจากการทดลองจริง

รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบผลจำลองกับการทดลองจริงของสัญญาณที่ได้จาก  
วงจรคุณวงจรแรกและวงจรคุณที่สอง

### 5.1.7 สัญญาณจาก Low-pass Filter

วงจร Low-pass Filter เป็นส่วนที่ทำการหาค่าประมาณของกระแสอินเฟส  $I_p$  จะรับ  
สัญญาณอินพุตมาจากวงจรคุณวงจรแรก

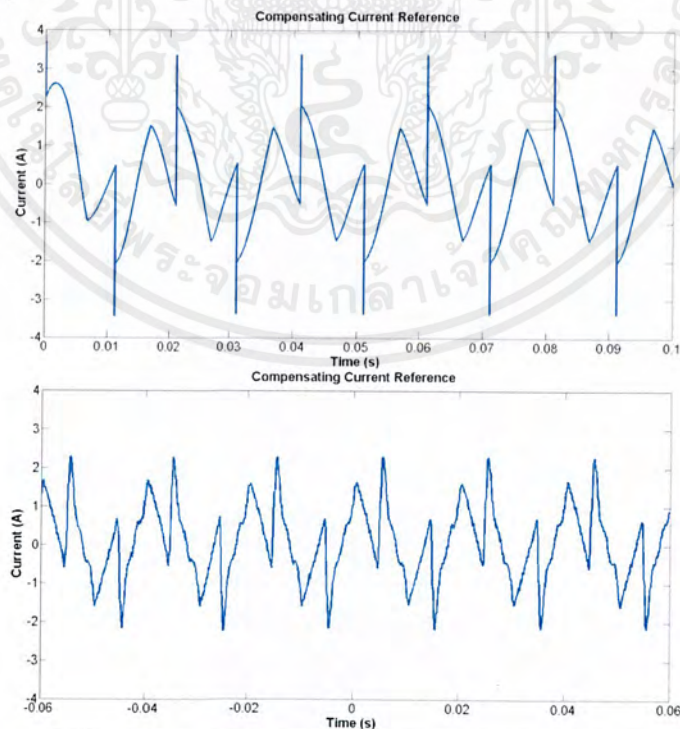
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 สัญญาณจากวงจร Low-pass Filter จากการจำลอง(บน) จากการทดลอง(ล่าง)

### 5.1.8 สัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิง

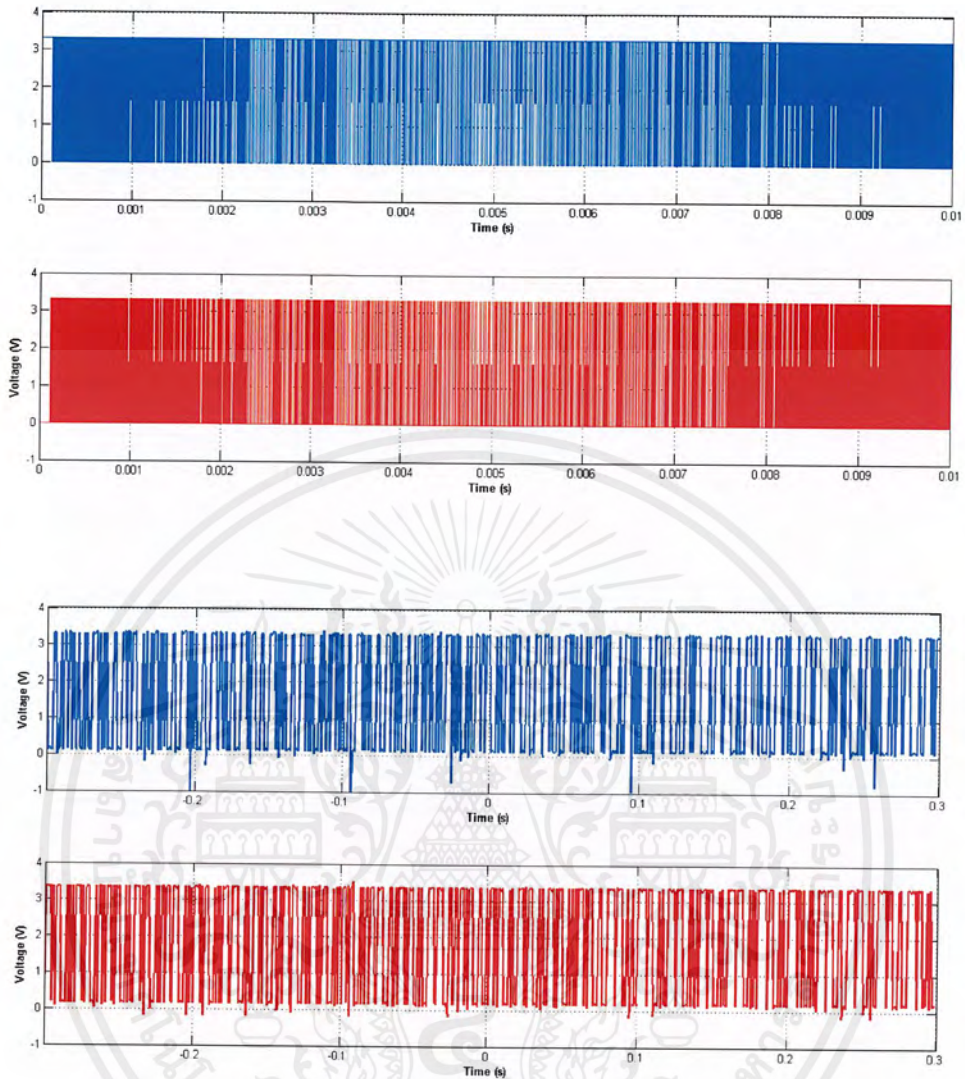
สัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิงสร้างขึ้นมาจากการเปรียบเทียบสัญญาณที่มาจากทรานซิสเตอร์จากกระแสโหลด  $I_L$  กับค่ากระแสแอมป์ที่พ่วงขณะ  $I_p \cos(\omega t)$  ซึ่งรับสัญญาณมาจากเอาต์พุตของวงจรควบคุมวงจรที่สอง



รูปที่ 5.13 กระแสชดเชยอ้างอิงที่ได้จากการจำลอง(บน)  
กระแสชดเชยอ้างอิงที่ได้จากการทดลอง(ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.9 สัญญาณจากวงจร Dead Time

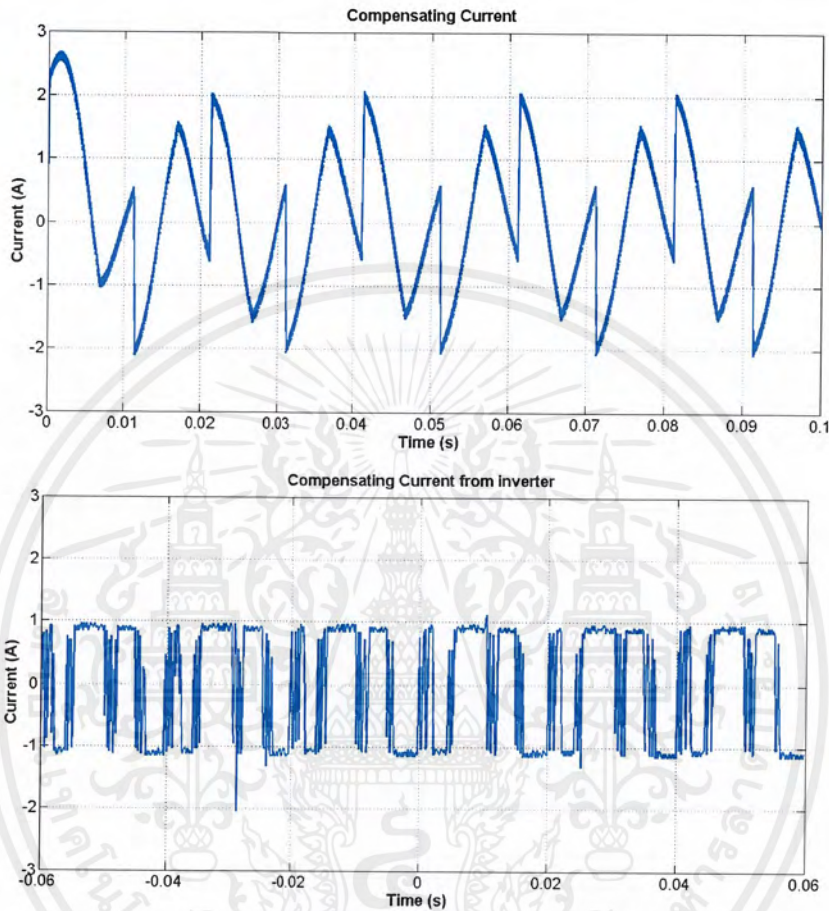


รูปที่ 5.14 สัญญาณจากวงจร Dead Time ที่ได้จากการจำลอง(บน)  
สัญญาณจากวงจร Dead Time ที่ได้จากการทดลอง(ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.10 สัญญาณกระแสชดเชยที่ฉีดเข้าระบบ

สำหรับการทดลองจริง ใช้หลอดไส้ 100 Watt จำนวนสี่หลอดเป็นโหลด แล้วเช็คสัญญาณของกระแสฉีดเข้าระบบที่ตรวจจับมาจากเซ็นเซอร์ จากนั้นเปรียบเทียบสัญญาณกับกระแสชดเชยอ้างอิงว่ามีรูปคลื่นใกล้เคียงกันหรือไม่

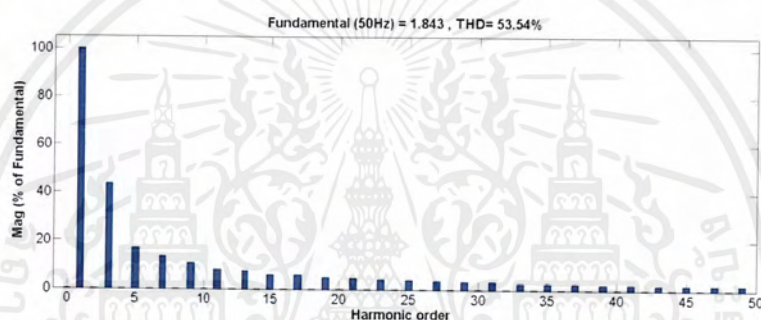
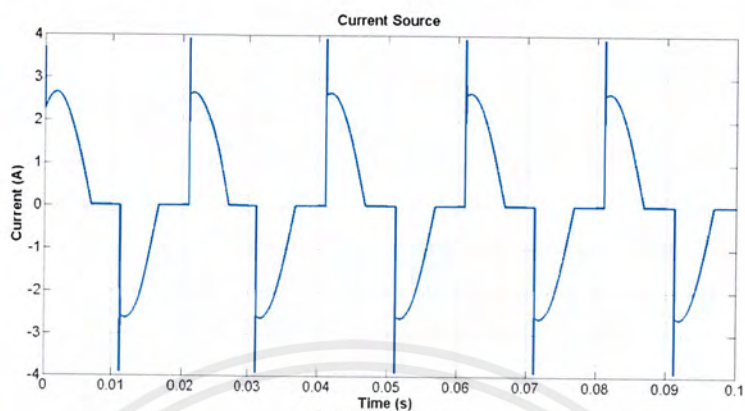


รูปที่ 5.15 ผลการจำลองสัญญาณกระแสชดเชยที่อินเวอร์เตอร์ฉีดเข้าไปในระบบ(บน) ผลการทดลองจริงกับวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์(ล่าง)

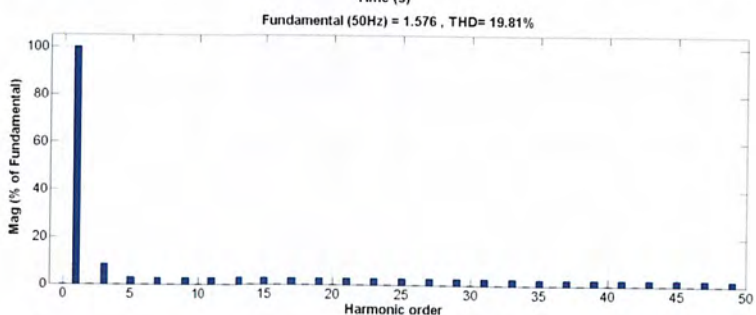
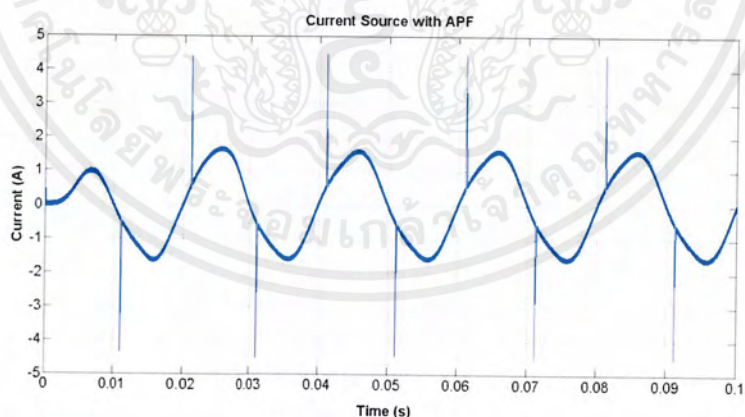
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.11 ผลของกระแสแหล่งจ่ายที่ผ่านการกรองด้วยแอกทีฟฟิลเตอร์

ผลของกระแสแหล่งจ่ายจากการจำลองใน Matlab Simulink



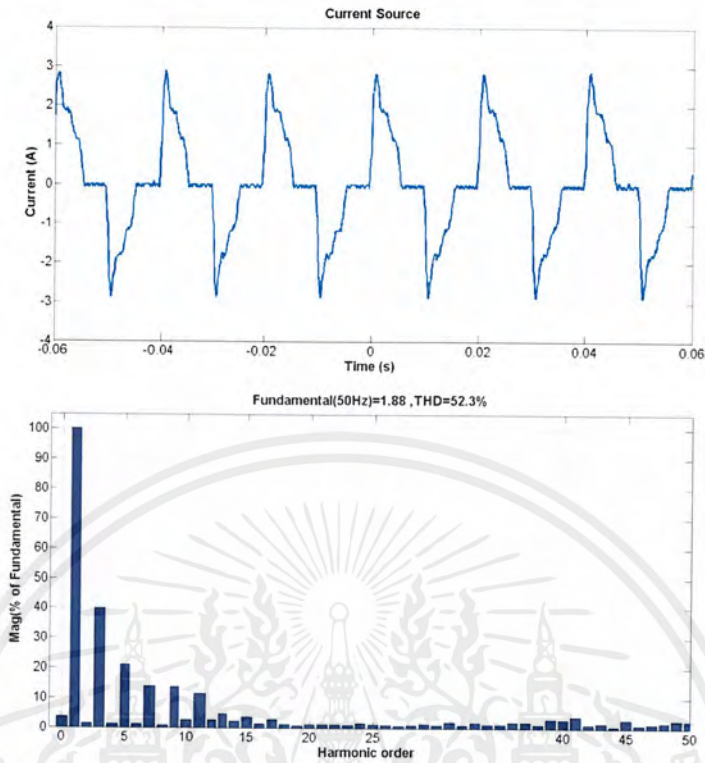
รูปที่ 5.16 รูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมก่อนผ่านการกรองด้วยแอกทีฟฟิลเตอร์จากการจำลอง



รูปที่ 5.17 รูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมหลังผ่านการกรองด้วยแอกทีฟฟิลเตอร์จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของกระแสแหล่งจ่ายจากการทดลองด้วยแอดทีฟฟิลเตอร์ที่ใช้งานจริง



รูปที่ 5.18 รูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมก่อนผ่านการกรองด้วยแอดทีฟฟิลเตอร์จากการทดลอง

%Harmonic of Current Source

DC component = 0.0656

Fundamental = 1.329rms

Total Harmonic Distortion (THD) = 52.3%

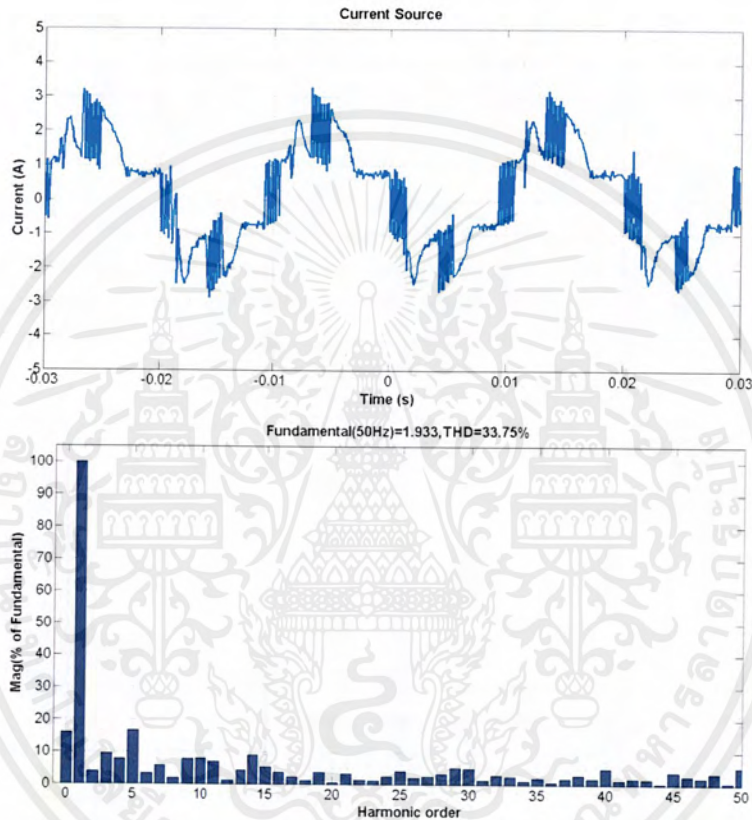
Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental	Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental
1	50	100	26	1300	0.92
2	100	1.35	27	1350	0.67
3	150	39.9	28	1400	0.85
4	200	1.17	29	1450	1.41
5	250	21.07	30	1500	0.98
6	300	1.21	31	1550	1.88
7	350	13.85	32	1600	0.99
8	400	0.62	33	1650	1.69
9	450	13.68	34	1700	1.16
10	500	2.52	35	1750	1.23
11	550	11.41	36	1800	1.98
12	600	2.47	37	1850	2.02
13	650	4.54	38	1900	1.19
14	700	2.16	39	1950	3.02
15	750	3.56	40	2000	2.68
16	800	1.26	41	2050	3.74
17	850	2.68	42	2100	1.15
18	900	1.10	43	2150	1.56

ตารางที่ 5.1 ฮาร์โมนิกของกระแสของโหลด RC ก่อนต่อแอดทีฟฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental	Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental
19	950	0.68	44	2200	0.42
20	1000	1.23	45	2250	2.74
21	1050	1.12	46	2300	0.95
22	1100	1.09	47	2350	1.39
23	1150	0.94	48	2400	1.66
24	1200	1.49	49	2450	2.65
25	1250	1.16	50	2500	2.46

ตารางที่ 5.1 ฮาร์มอนิกของกระแสของโหลด RC ก่อนต่อแอกทีฟฟิลเตอร์(ต่อ)



รูปที่ 5.19 รูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมหลังผ่านการกรองด้วยแอกทีฟฟิลเตอร์จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%Harmonic of Current Source

DC component = 0.3068

Fundamental = 1.933rms

Total Harmonic Distortion (THD) = 33.75%

Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental	Harmonic	Frequency (Hz)	% of fundamental
1	50	100	26	1300	2.04
2	100	3.83	27	1350	2.42
3	150	9.26	28	1400	3.22
4	200	7.60	29	1450	5.01
5	250	16.45	30	1500	4.80
6	300	3.17	31	1550	1.34
7	350	5.67	32	1600	2.69
8	400	1.82	33	1650	2.30
9	450	7.62	34	1700	1.16
10	500	7.96	35	1750	1.86
11	550	6.79	36	1800	0.74
12	600	1.16	37	1850	1.81
13	650	4.18	38	1900	2.74
14	700	8.89	39	1950	1.80
15	750	5.33	40	2000	4.76
16	800	3.61	41	2050	1.28
17	850	2.25	42	2100	1.82
18	900	1.19	43	2150	1.556
19	950	3.66	44	2200	0.32
20	1000	0.49	45	2250	3.77
21	1050	3.13	46	2300	2.66
22	1100	1.42	47	2350	1.96
23	1150	1.13	48	2400	3.31
24	1200	2.31	49	2450	0.51
25	1250	4.03	50	2500	5.16

ตารางที่ 5.2 ฮาร์มอนิกของกระแสของโหลด RC หลังต่อแอดที่ฟิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

ในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการสร้างวงจรต้นแบบของตัวกรองฮาร์มอนิกคือวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์โดยใช้หลักการฉีดกระแสฮาร์มอนิกเข้าไปในระบบและหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกเดิมเพื่อให้สัญญาณกระแสออกมาเป็นรูปไซน์และลดเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสในระบบ โดยโหลดชนิดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC) โดยมีค่า 400 W และ 50  $\mu$ F ณ แรงดัน 220 V กับ 400 W แต่ในการทดลองนี้ได้ใช้แรงดันทดสอบ ที่ 100 V ผลที่ได้ดังตารางต่อไปนี้

	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยน (%THD)	
	โหลด RC	
	จำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์	วงจรต้นแบบ
ก่อนการต่อวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์	53.54	52.87
หลังการต่อวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์	17.63	37.17

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยน (%THD) จากการจำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์กับวงจรต้นแบบ

จากตารางที่ 6.1 จะพบว่าเมื่อมีการต่อวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์เข้าไป ในโหลดประเภท RC เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนจะมีค่าที่ลดลงทั้งการจำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

#### 6.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทํางจรแอกทีฟฟิลเตอร์โดยใช้หลักการฉีดกระแสฮาร์มอนิกนี้ สามารถสร้างกระแสชดเชยเพื่อหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกได้ แต่ยังคงฮาร์มอนิกได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เนื่องจากในส่วนของวงจรควบคุมยังไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สร้างสัญญาณชั้บเกทได้ไม่ดีพอ กระแสชดเชยที่สร้างขึ้นจากอินเวอร์เตอร์จึงไม่เหมือนกับกระแสชดเชยอ้างอิง และสัญญาณแรงดันอ้างอิงแปลงมาจากแหล่งจ่ายโดยตรง หากรูปคลื่นแรงดันแหล่งจ่ายผิดเพี้ยนไปทำให้ค่ากระแสชดเชยที่คำนวณได้ผิดเพี้ยนไปด้วย

#### 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

- เปลี่ยนวงจรควบคุมให้สามารถสร้างสัญญาณชั้บเกทได้ดีขึ้น เพื่อให้ได้กระแสชดเชยที่สร้างขึ้นเหมือนกับกระแสชดเชยอ้างอิง
- ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แทนวงจรคำนวณเพื่อให้สามารถคำนวณได้ถูกต้องมากขึ้นและลดขนาดของวงจรให้เล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] George, J. W, "Power Systems Harmonics: Fundamentals", Analysis and Filter Design, New York: Springer, 2001.
- [2] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519-1992.
- [3] J.S.Tepper, J.W.Dixon, G.Venegas, and L.Moran, "A Simple Frequency-Independent Method for Calculating the Reactive and Harmonic Current in a Nonlinear Load," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.43, No.6, 1996, pp.647-654
- [4] Nikunj Shah, "Synthesis of a non-sinusoidal waveform using Fourier analysis," Harmonics in power system, 2013, pp.7
- [5] Srianthumrong, "S. Study of Series Active and Shunt Hybrid Filters for Harmonic Compensation of Large-Capacity Three-Phase Diode Rectifiers ," Ph.D. Dissertation, Tokyo Institute of Technology, Japan, 2003.
- [6] Vaddi Ramesh, B Haritha, P Rabeya Sulthana, M Diveswar Reddy, "An Adaptive Hysteresis Band Current Controlled Shunt Active Power Filter," International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol 3, No 3, 2014, pp.8031-8040
- [7] Tzung-Lin Lee. Design of a hybrid active filter for harmonics suppression in industrial facilities. 2009.
- [8] ณัฐวุฒิ พันธ์แสง และ คณะ, "วงจรรองกำลังไฟฟ้าประเภทแอกคิฟเฟสเดี่ยว," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2554.
- [9] สุกัญญา ถือมัน และ ประวิทย์ ยั่งยืนถาวร, "การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก," Power Quality, ปีที่ 7, 2554, หน้า 2-3.
- [10] สุกกิจ นัวเจริญ และ คณะ, "การศึกษาและออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่

## POWER QUALITY ENHANCEMENT STUDY FOR MODERN POWER SYSTEM NETWORK

ตรีวัชร เตชะพะโลกุล อภิวัฒน์ ศิริวงศ์พานิช ทฤษฎี พรหมลิขิต และ ธนัชพงศ์ เตชะกัณฑ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: triwat-book@hotmail.com

### บทคัดย่อ

ฮาร์มอนิกเป็นหนึ่งในปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้รูปคลื่นไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ เป็นผลให้คุณภาพทางไฟฟ้าลดลง ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้ทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาด เกิดความร้อนหรือเกิดแรงดันเกินของตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง สาเหตุเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น ปริมาณพหุนามนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกประเภทวงจรถักที่ฟิลเตอร์แบบดิจิทัลกระแสฮาร์มอนิก โดยจุดประสงค์หลักของวงจรถักที่ฟิลเตอร์แบบดิจิทัลกระแสฮาร์มอนิก เพื่อใช้ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกซึ่งประกอบไปด้วย วงจรลบ วงจรคูณ วงจรขับเกท วงจรวางจับกระแส วงจรกำลัง วงจรฮิสเตอร์รีซีต วงจรต่อเวลา วงจรไฟเลี้ยง วงจรอินเวอร์เตอร์ โดยจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB & SIMULINK และ NI Multisim เพื่อสร้างวงจรต้นแบบ

คำสำคัญ: ฮาร์มอนิก, แอคทีฟฟิลเตอร์

### ABSTRACT

Harmonics is a problem of power quality that effect to the power system. Harmonics can do a distorted waveform from sinusoidal, harmonics cause to mistake operating equipment, heating and resonance from a capacitor to power factor correction. Harmonics are occurred by non-linear load. The purpose of this thesis is to study design of active filter type inject compensated current to eliminate harmonic current. The active filter including subtract circuit, multiplier circuit, current detection circuit, bang-bang circuit, drive circuits, power supply circuit and inverter circuit. Simulation of the active filter operated by Matlab/simulink and NI Multisim for the prototype design.

Keyword: Harmonics, active filter

### 1. บทนำ

ฮาร์มอนิกเป็นหนึ่งในปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้รูปคลื่นไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ เป็นผลให้คุณภาพทางไฟฟ้าลดลง ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้ทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาดหรือชำรุด สาเหตุเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น อุปกรณ์ประเภทสวิตซ์จิ่ง เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ บาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า

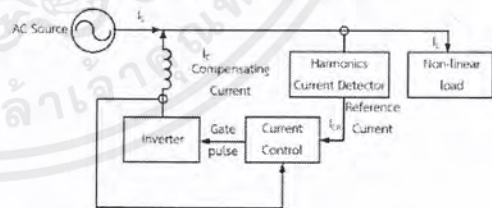
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร หากมีการนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต เจ้าของเอกสารขอสงวนสิทธิ์ในการดำเนินคดีตามกฎหมาย

เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ตัวเรียงกระแสกำลัง ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วมอเตอร์ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นที่อยู่อาศัย สำนักงาน โรงงาน อุตสาหกรรม เป็นต้น

ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาถึงผลกระทบ และปัญหาของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง และวิธีการแก้ไข โดยจะศึกษาถึงลักษณะของฮาร์มอนิก ปริมาณฮาร์มอนิก เพื่อที่จะนำมาแก้ไข และทำการควบคุมระบบให้มีฮาร์มอนิกลดลงซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้น ในการแก้ปัญหาเหล่านี้ ที่นิยมทั่วไปคือ การใช้ พาสซีฟฟิลเตอร์ในการกรองฮาร์มอนิกออกไป แต่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้น แอคทีฟฟิลเตอร์จึงถูกนำมาเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหานี้ ซึ่งแอคทีฟฟิลเตอร์ที่นำมาใช้ในปริมาณพหุนามนี้คือ แอคทีฟฟิลเตอร์ชนิดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบขนาน ใช้หลักการสร้างกระแสขึ้นมาชดเชยกับกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลไม่เป็นเชิงเส้นสร้างขึ้นมา เพื่อให้กระแสแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ที่มีเฟสตรงกับแรงดัน และคุณภาพทางไฟฟ้าดีขึ้น

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบดิจิทัลกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 1 วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์

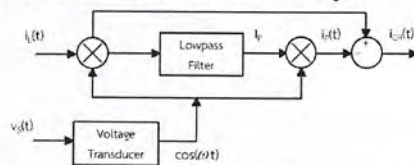
โดย  $I_s$  คือ กระแสด้านแหล่งจ่าย,  $I_c$  คือ กระแสชดเชยฮาร์มอนิก,

$I_{cr}$  คือ กระแสชดเชยอ้างอิง และ  $I_L$  คือ กระแสโหลด

#### 2.1.1 ส่วนประกอบของวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์

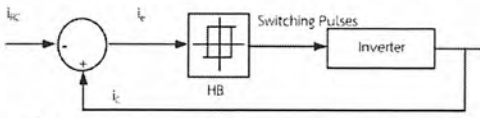
##### 2.1.1.1 ส่วนตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก เป็นส่วนสำคัญที่

จะทำการหากระแสชดเชยอ้างอิงโดยคำนวณได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โค้ดอะแกรมแบบรูปเปิดที่ใช้คำนวณกระแสชดเชย

2.1.1.2 ส่วนควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบฮิสเตอร์รีซิส



รูปที่ 3 บล็อกโคอะแกรมของการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส

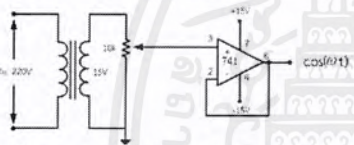
การควบคุมกระแสขาออกโดยใช้เทคนิคที่ดับลิเอ็มนี้สามารถทำได้โดยอาศัยการป้อนกลับของกระแสโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสเพื่อป้อนสัญญาณกระแสเข้าสู่วงจรควบคุม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกระแสขาออกกับกระแสขาเข้าอ้างอิง จะได้กระแสผิดพลาด ( $I_e$ ) ซึ่งนำผลลัพธ์ที่ได้ไปกำหนดการสวิตช์ซึ่งที่เหมาะสม จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปป้อนที่ขาเกตของอินเวอร์เตอร์

2.1.1.3 อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานสำหรับการจ่ายกระแสขาออก

ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้สัญญาณควบคุมแบบ PWM

3. การออกแบบวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์

3.1 วงจรสร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิง

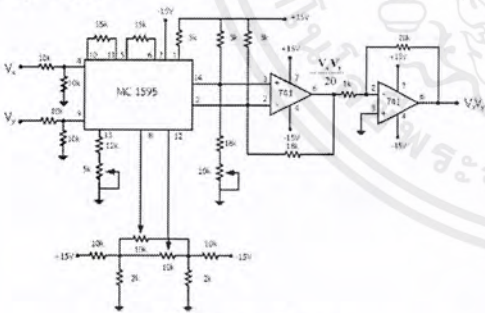


รูปที่ 4 วงจรสร้างสัญญาณแรงดันไซน์อ้างอิง

เป็นวงจรที่ใช้ในการส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $\cos(\omega t)$

ขนาด 1 Vrms

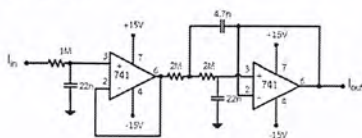
3.2 วงจรคูณสัญญาณ



รูปที่ 5 วงจรคูณสัญญาณ

การคำนวณหากระแสขาออกจะต้องนำสัญญาณมาคูณกัน ซึ่งทำได้โดยใช้ไอซี MC1595

3.3 วงจรกรองความถี่ต่ำ



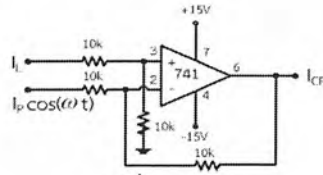
รูปที่ 6 วงจรกรองความถี่ต่ำ

วงจรกรองความถี่ต่ำออกแบบให้มีความถี่คutoff ที่ 25 Hz

เพื่อให้ได้ขนาดของ  $I_p$  ที่มีค่าส่วนของ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วงจรลบ



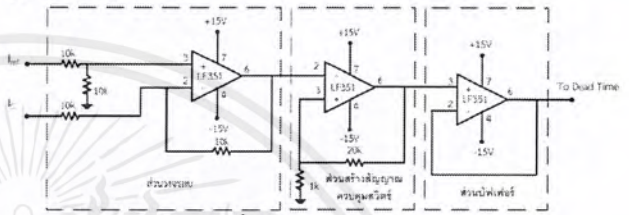
รูปที่ 7 วงจรลบ

เมื่อได้สัญญาณ  $I_p \cos(\omega t)$  จากการคำนวณ จะสามารถหา

กระแสขาออกอ้างอิง ( $I_{CR}$ ) ได้จากวงจรตามสมการ(1)

$$i_{CR}(t) = i_L(t) - I_p \cos(\omega t) \quad (1)$$

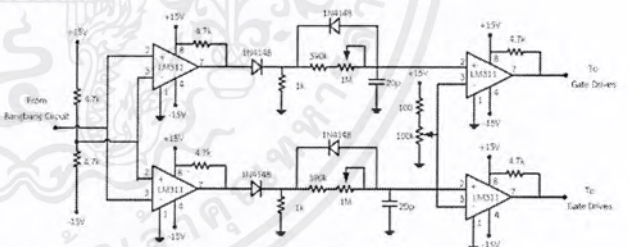
3.5 วงจรฮิสเตอร์รีซิส



รูปที่ 8 วงจรฮิสเตอร์รีซิส

ทำการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณกระแสขาออกอ้างอิง กับสัญญาณกระแสขาเข้าที่ป้อนเข้าระบบ โดยตรงจึงสัญญาณมาจากด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ เมื่อเปรียบเทียบแล้วจะได้สัญญาณ error แล้วนำสัญญาณไปเข้าวงจรฮิสเตอร์รีซิสถ้าสัญญาณที่เข้ามามากกว่าขอบเขตบนจะได้สัญญาณ -15V แต่ถ้าสัญญาณที่เข้ามาน้อยกว่าขอบเขตล่างจะได้สัญญาณ +15V

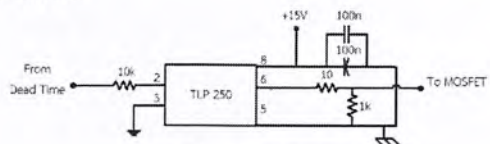
3.6 วงจรเพื่อเวลา



รูปที่ 9 วงจรเพื่อเวลา

ให้สวิตช์ทำงานไม่พร้อมกันเพื่อป้องกันการลัดวงจรของสวิตช์ ดังนั้นสัญญาณขาเข้าของแต่ละสวิตช์จะถูกหน่วงเวลาไปช่วงเวลาหนึ่ง โดยสามารถปรับช่วงการเกิดเวลาด้วยการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่า 100k

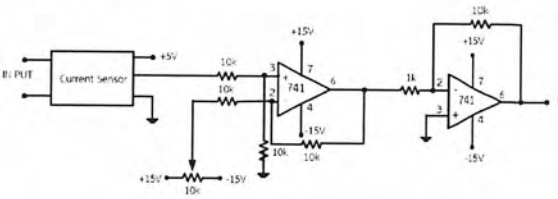
3.7 วงจรขับเกต



รูปที่ 10 วงจรขับเกต

สัญญาณขาเข้าจะนำไปขั้ววงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นสวิตช์ 4 ตัว จะต้องมีกรแยกกราวด์ระหว่างวงจรควบคุม และวงจรกำลังออกจากกัน โดยใช้ฮอปโอดีคัปเปิลอร์ TLP250

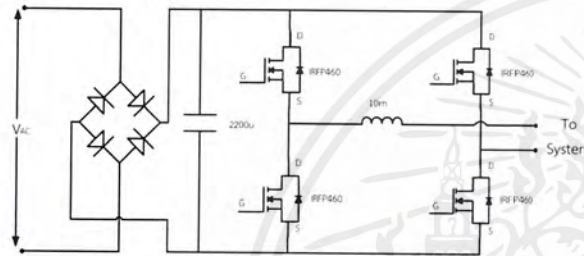
3.8 วงจรตรวจจับกระแส



รูปที่ 11 วงจรตรวจจับกระแส

ใช้ Current Sensor ในการตรวจจับสัญญาณกระแสสัญญาณที่ได้จะมีค่า Offset 2.5V จึงต้องแก้ไขด้วยการปรับค่าตัวต้านทานที่วงจรลบ จากนั้นนำไปเข้าวงจรขยายสัญญาณ 10 เท่าเพื่อให้ได้สัญญาณขนาด 1 V / A

3.9 วงจรอินเวอร์เตอร์

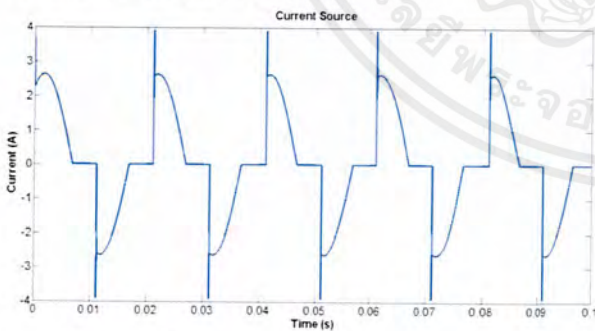


รูปที่ 12 วงจรอินเวอร์เตอร์

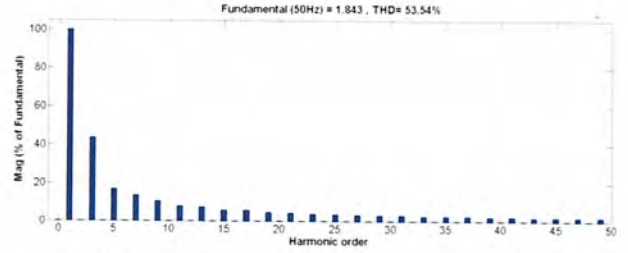
สัญญาณที่ได้จากวงจรขับเคลื่อน จะนำมาป้อนเข้าวงจรกำลังที่ขาเกทของอุปกรณ์สวิตช์ เพื่อเปิด ปิดการทำงาน ให้จ่ายกระแสตามวงจรควบคุม

4. ผลการทดลอง

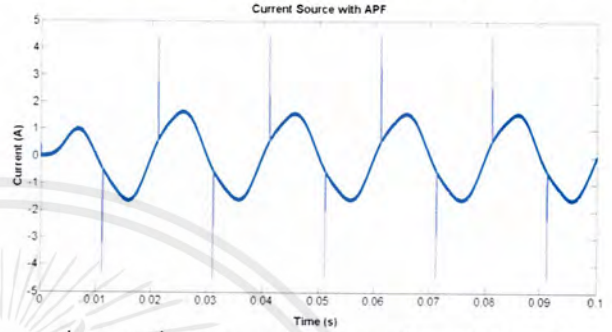
4.1 จำลองผลของการต่อวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์เข้าไปในระบบด้วยโปรแกรม Matlab ต่อโหลด R-C Rectifier



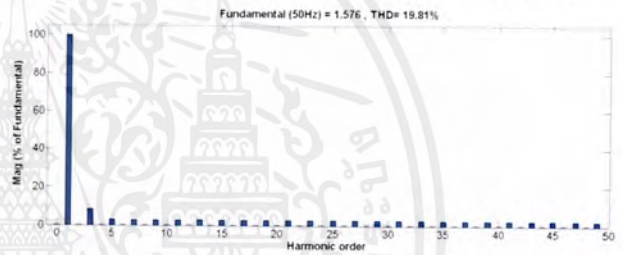
รูปที่ 5.12 รูปคลื่นกระแสก่อนผ่านการกรองด้วยแอคทีฟฟิลเตอร์



รูปที่ 5.12 สเปกตรัมก่อนผ่านการกรองด้วยแอคทีฟฟิลเตอร์



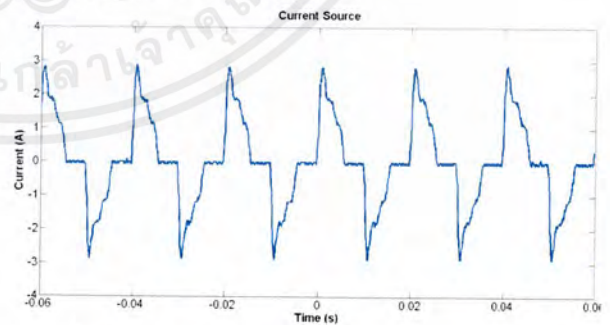
รูปที่ 5.13 รูปคลื่นกระแสหลังผ่านการกรองด้วยแอคทีฟฟิลเตอร์



รูปที่ 5.13 สเปกตรัมหลังผ่านการกรองด้วยแอคทีฟฟิลเตอร์

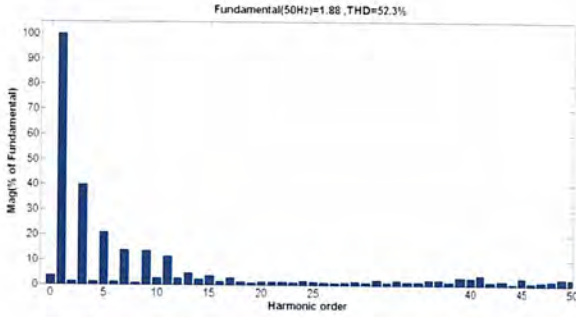
4.2 แอคทีฟฟิลเตอร์ที่มีต่อโหลด R-C Rectifier จริง

การทดลองด้วยวงจรจริงนั้นจะใช้ R-C Rectifier มีค่าตัวเก็บประจุ 50  $\mu F$  ขนาดกับโหลดได้ขนาด 100 Watt จำนวนที่โหลดและทำการป้อนแรงดันแหล่งจ่าย 100 V<sub>rms</sub>

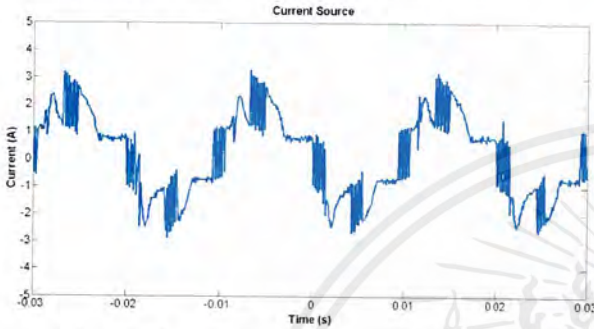


รูปที่ 13 รูปคลื่นกระแสก่อนผ่านการกรองด้วยแอคทีฟฟิลเตอร์

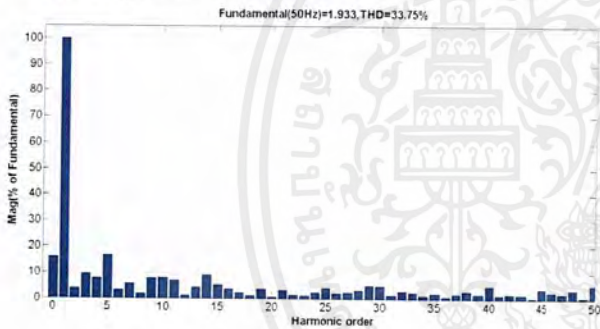
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 14 สเปกตรัมก่อนผ่านการกรองด้วยแอกทีฟฟิลเตอร์



รูปที่ 15 รูปคลื่นกระแสหลังผ่านการกรองด้วยแอกทีฟฟิลเตอร์



รูปที่ 15 สเปกตรัมหลังผ่านการกรองด้วยแอกทีฟฟิลเตอร์

5. สรุป

ในปฏิญานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการสร้างวงจรต้นแบบของตัวกรองฮาร์มอนิกคือวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์โดยใช้หลักการฉีดกระแสฮาร์มอนิกเข้าไปในระบบและหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกเดิม เพื่อให้สัญญาณกระแสออกมาเป็นรูปไซน์และลดเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสในระบบ โดยโหลดชนิดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC) โดยมีค่า 400 W และ 50  $\mu$ F ณ แรงดัน 220 V กับ 400 W แต่ในการทดลองนี้ได้ใช้แรงดันทดสอบ ที่ 100 V ผลที่ได้ดังตารางต่อไปนี้

	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยน (%THD)	
	โหลด RC	
	จำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์	วงจรต้นแบบ
ก่อนการต่อวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์	53.54	52.87
หลังการต่อวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์	17.63	37.17

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยน (%THD) จากการจำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์กับวงจรต้นแบบ จากตารางที่ 1 จะพบว่าเมื่อมีการต่อวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์เข้าไปในโหลดประเภท RC เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนจะมีค่าที่ลดลงทั้งการจำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

6. วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทำวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์โดยใช้หลักการฉีดกระแสฮาร์มอนิกนี้ สามารถสร้างกระแสชดเชยเพื่อหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกได้ แต่ยังคงฮาร์มอนิกได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เนื่องจากในส่วนของวงจรควบคุมยังไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้สร้างสัญญาณชดเชยไม่ได้พอ กระแสชดเชยที่สร้างขึ้นจากอินเวอร์เตอร์จึงไม่เหมือนกับกระแสชดเชยอ้างอิง และสัญญาณแรงดันอ้างอิงแปลงมาจากแหล่งจ่ายโดยตรง หากรูปคลื่นแรงดันแหล่งจ่ายผิดเพี้ยนไปทำให้ค่ากระแสชดเชยที่คำนวณได้ผิดเพี้ยนไปด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ปฏิญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลือในการให้ความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน แม้จะพบอุปสรรคในการทำงานมากมาย อย่างไรก็ตามปฏิญานิพนธ์เล่มนี้ก็สามารถสำเร็จลุล่วงมาได้ ซึ่งขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ ผศ. ดร. เซวาร์ ชมพูอินทิว ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโทและปริญญาเอกในห้อง LAB ESIRC ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

[1] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519-1992.  
 [2] J.S.Tepper, "A Simple Frequency-Independent Method for Calculating the Reactive and Harmonic Current in a Nonlinear Load," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.43, No.6, 1996,  
 [3] Nikunj Shah, "Synthesis of a non-sinusoidal waveform using Fourier analysis," Harmonics in power system, 2013, pp.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข  
ข้อมูลอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRFP460, SiHFP460

Vishay Siliconix

## Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY		
$V_{DS}$ (V)	500	
$R_{DS(on)}$ ( $\Omega$ )	$V_{GS} = 10$ V	0.27
$Q_g$ (Max.) (nC)	210	
$Q_{gs}$ (nC)	29	
$Q_{gd}$ (nC)	110	
Configuration	Single	

## FEATURES

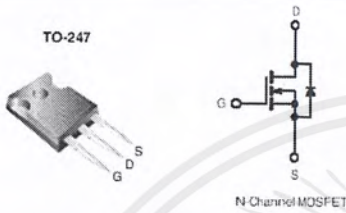
- Dynamic  $dV/dt$  Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Lead (Pb)-free Available



## DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distances between pins to meet the requirements of most safety specifications.



ORDERING INFORMATION	
Package	TO-247
Lead (Pb)-free	IRFP460PbF SiHFP460-E3
SnPb	IRFP460 SiHFP460

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS $T_C = 25$ °C, unless otherwise noted			
PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage	$V_{DS}$	500	V
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$	$\pm 20$	
Continuous Drain Current	$I_D$	$V_{GS} \text{ at } 10 \text{ V}$	A
		$T_C = 25$ °C	
		$T_C = 100$ °C	13
Pulsed Drain Current <sup>a</sup>	$I_{DM}$	80	A
Linear Derating Factor		2.2	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy <sup>b</sup>	$E_{AS}$	960	mJ
Repetitive Avalanche Current <sup>c</sup>	$I_{AR}$	20	A
Repetitive Avalanche Energy <sup>d</sup>	$E_{AR}$	28	mJ
Maximum Power Dissipation	$P_D$	280	W
Peak Diode Recovery $dV/dt$ <sup>e</sup>	$dV/dt$	3.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to +150	°C
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s	300 <sup>f</sup>	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw	10	lbf · in
		1.1	N · m

## Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DS} = 50$  V, starting  $T_J = 25$  °C,  $L = 4.3$  mH,  $R_G = 25$   $\Omega$ ,  $I_{AS} = 20$  A (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq 20$  A,  $dI/dt \leq 160$  A/ $\mu$ s,  $V_{DB} \leq V_{DS}$ ,  $T_J \leq 150$  °C.
- 1.6 mm from case.

<sup>f</sup> Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

Document Number: 91237  
S-61360-Rev. A, 28-Jul-08

www.vishay.com

1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## IRFP460, SiHFP460

Vishay Siliconix



THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	-	40	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	$R_{\theta CS}$	0.24	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	$R_{\theta JC}$	-	0.45	

SPECIFICATIONS $T_J = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
<b>Static</b>						
Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{DS}$	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\ \mu\text{A}$	500	-	-	V
$V_{DS}$ Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{ mA}$	-	0.63	-	V/°C
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\ \mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	$I_{GSS}$	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	$\pm 100$	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	$I_{DSS}$	$V_{DS} = 500\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	25	$\mu\text{A}$
		$V_{DS} = 400\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 125^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 12\text{ A}^b$	-	-	0.27	$\Omega$
Forward Transconductance	$g_{fs}$	$V_{DS} = 50\text{ V}, I_D = 12\text{ A}^b$	13	-	-	S
<b>Dynamic</b>						
Input Capacitance	$C_{iss}$	$V_{GS} = 0\text{ V}, V_{DS} = 25\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}$ , see fig. 5	-	4200	-	pF
Output Capacitance	$C_{oss}$		-	870	-	
Reverse Transfer Capacitance	$C_{rss}$		-	350	-	
Total Gate Charge	$Q_g$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 20\text{ A}, V_{DS} = 400\text{ V}$ see fig. 6 and 13 <sup>b</sup>	-	-	210	nC
Gate-Source Charge	$Q_{gs}$		-	-	29	
Gate-Drain Charge	$Q_{gd}$		-	-	110	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 250\text{ V}, I_D = 20\text{ A}, R_G = 4.3\ \Omega, R_D = 13\ \Omega$ , see fig. 10 <sup>b</sup>	-	18	-	ns
Rise Time	$t_r$		-	59	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	110	-	
Fall Time	$t_f$		-	58	-	
Internal Drain Inductance	$L_D$	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact	-	5.0	-	nH
Internal Source Inductance	$L_S$		-	13	-	nH
<b>Drain-Source Body Diode Characteristics</b>						
Continuous Source-Drain Diode Current	$I_S$	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode	-	-	20	A
Pulsed Diode Forward Current <sup>a</sup>	$I_{SM}$		-	-	80	
Body Diode Voltage	$V_{SD}$	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 20\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	1.8	V
Body Diode Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 20\text{ A}, dI/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	570	860	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	$Q_{rr}$		-	5.7	8.6	$\mu\text{C}$
Forward Turn-On Time	$t_{on}$	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S$ and $L_D$ )				

**Notes**

- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).  
 b. Pulse width  $\leq 300\ \mu\text{s}$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .

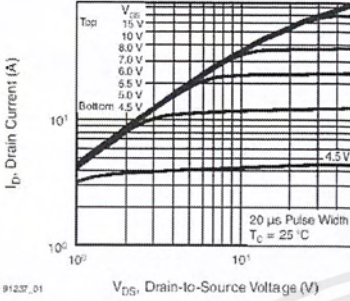
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRFP460, SiHFP460

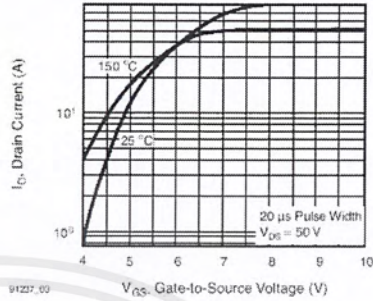
Vishay Siliconix

TYPICAL CHARACTERISTICS 25 °C, unless otherwise noted



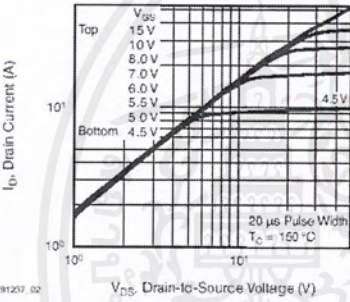
91237\_01

Fig. 1 - Typical Output Characteristics, T<sub>c</sub> = 25 °C



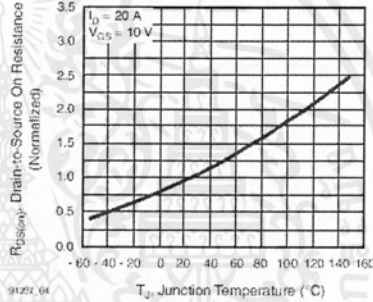
91237\_02

Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics



91237\_02

Fig. 2 - Typical Output Characteristics, T<sub>c</sub> = 150 °C



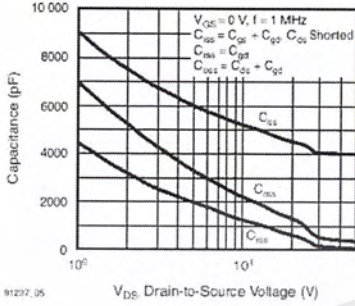
91237\_04

Fig. 4 - Normalized On-Resistance vs. Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

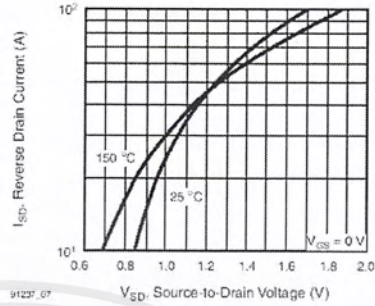
# IRFP460, SiHFP460

Vishay Siliconix



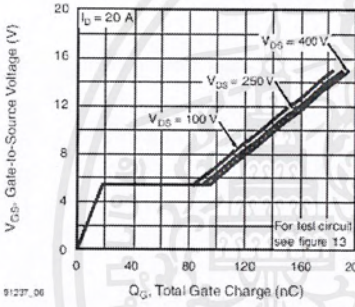
91237\_05

Fig. 5 - Typical Capacitance vs. Drain-to-Source Voltage



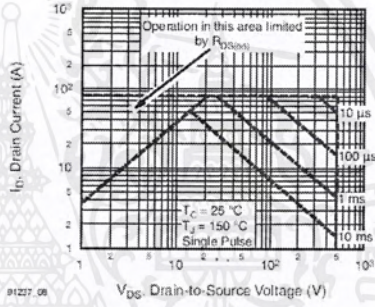
91237\_07

Fig. 7 - Typical Source-Drain Diode Forward Voltage



91237\_06

Fig. 6 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Source Voltage



91237\_08

Fig. 8 - Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MOTOROLA  
SEMICONDUCTOR  
TECHNICAL DATA**

**MC1495  
MC1595**

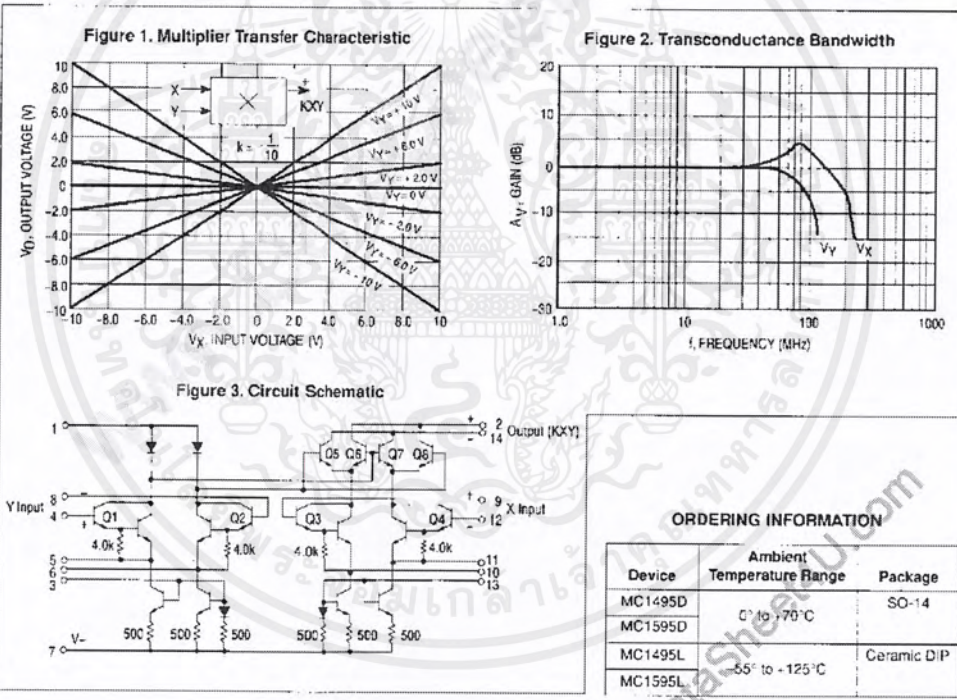
**Wideband Linear  
Four-Quadrant Multiplier**

The MC1495/1595 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 (MC1495)  
1% max Error on X Input, 2% max Error on Y Input (MC1595)
  - 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**

**SILICON MONOLITHIC  
INTEGRATED CIRCUIT**



**ORDERING INFORMATION**

Device	Ambient Temperature Range	Package
MC1495D	0° to +70°C	SO-14
MC1595D	0° to +70°C	SO-14
MC1495L	-55° to +125°C	Ceramic DIP
MC1595L	-55° to +125°C	Ceramic DIP

MOTOROLA LINEAR/INTERFACE ICs DEVICE DATA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MC1495, MC1595

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** (+V = +32 V, -V = -15 V, T<sub>A</sub> = +25°C, I<sub>g</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)	5					%
T <sub>A</sub> = +25°C -10 < V <sub>X</sub> < +10 (V <sub>Y</sub> = ±10 V)	MC1495	E <sub>RX</sub>	—	±1.0	±2.0	
	MC1595	E <sub>RY</sub>	—	±0.5	±1.0	
-10 < V <sub>Y</sub> < +10 (V <sub>X</sub> = ±10 V)	MC1495	E <sub>RX</sub>	—	±2.0	±4.0	
	MC1595	E <sub>RY</sub>	—	±1.0	±2.0	
T <sub>A</sub> = 0° to +70°C -10 < V <sub>X</sub> < +10 (V <sub>Y</sub> = ±10 V)	MC1495	E <sub>RX</sub>	—	±1.5	—	
		E <sub>RY</sub>	—	±3.0	—	
-10 < V <sub>Y</sub> < +10 (V <sub>X</sub> = ±10 V)	MC1595	E <sub>RX</sub>	—	±0.75	—	
		E <sub>RY</sub>	—	±1.5	—	
Square Mode Error (Accuracy in percent of full scale after Offset and Scale Factor adjustment)	5	E <sub>SQ</sub>				%
T <sub>A</sub> = +25°C	MC1495		—	±0.75	—	
	MC1595		—	10.5	—	
T <sub>A</sub> = 0° to +70°C	MC1495		—	±1.0	—	
T <sub>A</sub> = -55° to +125°C	MC1595		—	±0.75	—	
Scale Factor (Adjustable) $(K = \frac{2R_L}{I_3 R_X R_Y})$	—	K		0.1	—	
Input Resistance (f = 20 Hz)	MC1495 MC1595 MC1495 MC1595	R <sub>INX</sub> R <sub>INY</sub>	—	30 35 20 35	—	MΩ
Differential Output Resistance (f = 20 Hz)	8	R <sub>O</sub>	—	300	—	kΩ
Input Bias Current $I_{bx} = \frac{(I_9 + I_{12})}{2}$ , $I_{by} = \frac{(I_4 + I_8)}{2}$	6	I <sub>bx</sub> I <sub>by</sub>	—	2.0 2.0 2.0 2.0	12 8.0 12 8.0	μA
Input Offset Current  I <sub>9</sub> - I <sub>12</sub>    I <sub>4</sub> - I <sub>8</sub>	6	I <sub>IOX</sub> I <sub>IOY</sub>	—	0.4 0.2 0.4 0.2	2.0 1.0 2.0 1.0	μA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current (T <sub>A</sub> = 0° to +70°C) (T <sub>A</sub> = -55° to +125°C)	6	TC <sub>IIO</sub>	—	2.5 2.5	—	nA/°C
Output Offset Current  I <sub>14</sub> - I <sub>2</sub>	6	I <sub>IOO</sub>	—	20 10	100 50	μA
Average Temperature Coefficient of Output Offset Current (T <sub>A</sub> = 0° to +70°C) (T <sub>A</sub> = -55° to +125°C)	6	TC <sub>IIOO</sub>	—	20 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) f <sub>3</sub> f <sub>φ</sub>	—	3.0 80 750 30	— — — —	MHz MHz kHz kHz
Common Mode Input Swing (Either Input)	11	CMV	±10.5 ±11.5	—12 —13	—	V <sub>dc</sub>
Common Mode Gain (Either Input)	11	ACM	-40 -50	-50 -60	—	dB
Common Mode Quiescent Output Voltage	12	V <sub>O1</sub> V <sub>O2</sub>	—	21 21	—	V <sub>dc</sub>
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>	—	5.0	7.0	mA
DC Power Dissipation	12	P <sub>D</sub>	—	135	170	mW

11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### MC1495, MC1595

Figure 6. Input and Output Current

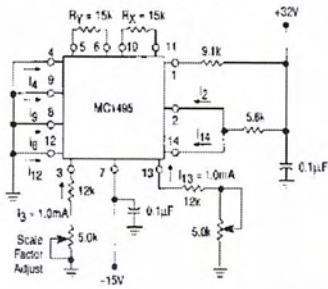


Figure 7. Input Resistance

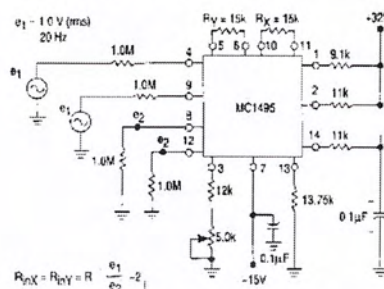


Figure 8. Output Resistance

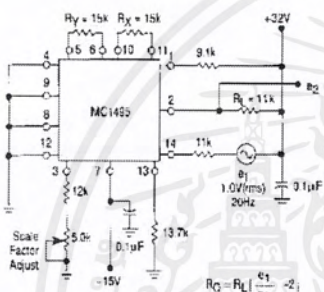


Figure 9. Bandwidth ( $R_L = 11k\Omega$ )

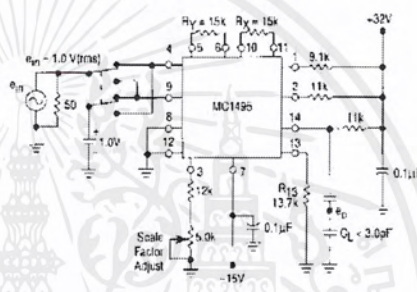


Figure 10. Bandwidth ( $R_L = 50\Omega$ )

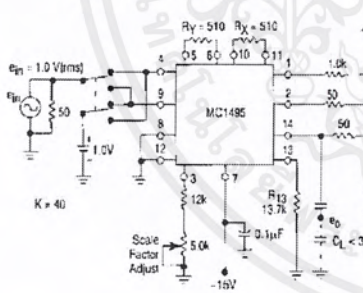
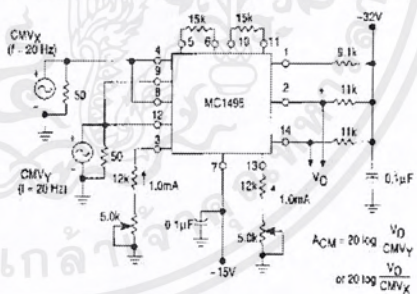


Figure 11. Common Mode Gain and Common Mode Input Swing



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### MC1495, MC1595

Figure 12. Power Supply Sensitivity

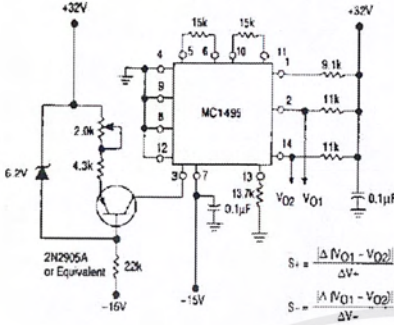


Figure 13. Offset Adjust Circuit

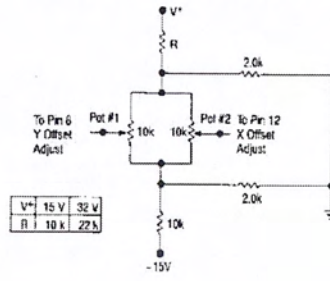
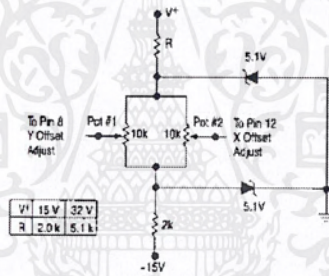


Figure 14. Offset Adjust Circuit (Alternate)



11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้จัดทำ



ชื่อ นาย ตริวัชร เตชะพะโลกุล  
 ที่อยู่ 53/1-2 ถ.เทศบาล1 ต.ทางเกวียน อ.แกลง จ.ระยอง 21110  
 E-mail : triwat-book@hotmail.com  
 โทรศัพท์ 08 6833 7358



ชื่อ นาย ถิรวัดน์ ศิริวงศพานิช  
 ที่อยู่ 629/36 หมู่ 3 ต.ในเมือง อ. บ้านไผ่ จ.ขอนแก่น 40110  
 E-mail : apy\_tay@hotmail.com  
 โทรศัพท์ 08 8068 3169



ชื่อ นาย ทฤษฎี พรหมสิทธิ์  
 ที่อยู่ 164 หมู่ 13 ต.ท่าวังทอง อ.เมือง จ.พะเยา 56000  
 E-mail : p.thitsadee@hotmail.com  
 โทรศัพท์ 08 8268 1922



ชื่อ นาย ธนัชพงศ์ เดชกัณฑ์  
 ที่อยู่ 427/1 หมู่ 14 ต.ยู่หวา อ.สันป่าตอง จ.เชียงใหม่ 50120  
 E-Mail : thanutpong.d@gmail.com  
 โทรศัพท์ 09 3134 5647

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้