

ระบบลดค่าฮาร์มอนิกที่ใช้ตัวกรองแบบแอคทีฟโดยควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

HARMONICS REDUCTION SYSTEM USING ACTIVE FILTER
BASED ON COMPUTER UNIT

วีระชัย ธีรสถิตย์

WEERACHAI THEKSATHIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของกรณีศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2601-6

ระบบลดค่าฮาร์มอนิกที่ใช้ตัวกรองแบบแอคทีฟโดยควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

**HARMONICS REDUCTION SYSTEM USING ACTIVE FILTER
BASED ON COMPUTER UNIT**

วีระชัย ถึกสถิตย์

WEERACHAI THUEKSATHIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2601-6

**HARMONICS REDUCTION SYSTEM USING ACTIVE FILTER
BASED ON COMPUTER UNIT**

WEERACHAI THUEKSATHIT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2601-6

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบลดค่าฮาร์มอนิกที่ใช้ตัวกรองแบบแอกทีฟโดยการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
นักศึกษา	นายวีระชัย ถิกสถิตย์
รหัสนักศึกษา	45060412
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาและออกแบบระบบลดค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าด้วยการควบคุมจากคอมพิวเตอร์ โดยจะใช้การวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากระบบไฟฟ้าด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว เพื่อหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น แล้วคำนวณหามุมการสวิตช์ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่สอดคล้องกับฮาร์มอนิก ซึ่งฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนั้นจะถูกชดเชยด้วยตัวกรองฮาร์มอนิก แบบแอกทีฟ โดย ระบบนี้จะประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม ตัวประมวลผล วิเคราะห์ และเก็บข้อมูล พร้อมด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่มีตัวแปลงแอนาลอกเป็นดิจิตอลอยู่ในตัว และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์ และ ไอจีบีที โมดูลซึ่งใช้เป็นตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟจะถูกควบคุมโดยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่ได้จากการวัด จะถูกเก็บไว้ในฐานข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์ ซึ่งการลดค่าฮาร์มอนิกลงนี้จะช่วยให้ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นและลดอัตราความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าอันอาจเกิดขึ้นจากฮาร์มอนิกได้

Thesis Title	Harmonics Reduction System Using Active Filter Based On Computer Unit
Student	Mr. Weerachai Thueksathit
Student ID.	45060412
Degree	Master of Engineering
Programme	Instrumentation Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assc.Prof. Vittaya Tipsuwanporn

ABSTRACT

This thesis presents the study and design of Harmonics compensation system which occurs in the electrical system. The Harmonics compensation system is controlled by a computer. In analysis, the electrical signal is analyzed by using the Fast Fourier Transform (FFT) in order to find the harmonics in system. The next step is to calculate the switching angle of Pulse Width Modulation (PWM) that corresponds with the harmonics. The harmonics are compensated by harmonic filters. This system consists of a computer which works as controller, processor, analyzer and database unit together with a microcontroller at which A/D converter is used for sampling the electrical signals via a parallel port of the computer. The harmonic filters (IGBT Module) are controlled by PWM signal from the microcontroller. The data of measurement such as voltages, currents, the total harmonic distortion etc., can be saved as database in order to use in analysis. The harmonics compensation increases high efficiency of the electrical system and decreases the damage of the system that may happen with electrical devices.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับฮาร์มอนิกและการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม.....	6
2.2.1 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Current Distortion) ...	7
2.2.2 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Voltage Distortion) ...	7
2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	7
2.3.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปในบ้านพัก สำนักงาน ส่วนใหญ่เป็นชนิด เฟส.....	8
2.3.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในโรงงาน อุตสาหกรรม.....	9
2.3.3 อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ค.....	9
2.3.4 อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงดันและกระแสเนื่องจาก การอ้อมตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีผลต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า.....	9
2.4.1 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อการเกิดเรโซแนนซ์.....	9
2.4.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสายส่ง.....	10
2.4.3 ผลของกระแสฮาร์มอนิก Triplen (ฮาร์มอนิกลำดับที่3,6,9..)	10
2.4.4 ผลของกระแสฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลง.....	10
2.4.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อคาปาซิเตอร์แรงค์.....	11
2.4.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อฟิวส์.....	11
2.4.7 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อการทำงานของรีเลย์.....	11
2.4.8 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อสวิตช์เกียร์.....	12
2.4. 9 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า.....	12
2.4.10 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า.....	12
2.4.11 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบการสื่อสาร.....	12
2.5 การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกและอุปกรณ์กรองฮาร์มอนิก.....	13
2.6 แอคทีฟฟิลเตอร์.....	16
2.6.1 แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน.....	16
2.6.2 แอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม.....	17
บทที่ 3 ระบบลดค่าฮาร์มอนิกและหลักการที่ใช้.....	19
3.1 กล่าวนำ.....	19
3.2 ส่วนประกอบต่างๆของระบบลดค่าฮาร์มอนิก.....	19
3.3 หลักการทำงานของระบบลดค่าฮาร์มอนิก.....	21
3.4 ส่วนตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าในระบบ.....	21
3.4.1 การแชมป์ลิ่งสัญญาณ.....	22
3.4.2 โปรแกรมแสดงผลของสัญญาณ.....	23
3.4.3 การติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์.....	23
3.5 ส่วนของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น.....	24
3.5.1 การวิเคราะห์ FFT (Fast Fourier Transform).....	24
3.5.2 โปรแกรมแสดงผลของฮาร์มอนิก.....	25

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5.3 การคำนวณค่าองค์ประกอบความผิดเพี้ยนรวมของฮาร์มอนิก (Total Harmonic Distortion:THD)	25
3.6 ส่วนของการควบคุมแอกทีฟฟิลเตอร์.....	26
3.6.1 การคำนวณหาค่า Switching angle.....	26
3.6.2 ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรมคำนวณ	32
3.6.3 การสร้างสัญญาณ PWM.....	33
3.6.4 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์.....	35
3.6.5 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์.....	36
บทที่ 4 ระบบต่างๆ ที่ใช้ในการลดค่าฮาร์มอนิก.....	40
4.1 วงจรที่ใช้ในระบบลดค่าฮาร์มอนิก.....	40
4.2 วงจรเรียงกระแสที่ขงตรงเต็มลูกคลื่น(Precision Full-Wave Rectifier)	40
4.3 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero-crossing)	41
4.4 วงจรประวิงเวลา.....	42
4.5 วงจรขั้วเกิด.....	43
4.6 ตัวตรวจวัดกระแสและวงจรขยาย	44
4.7 วงจรกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	45
4.7.1 ตัวเก็บประจุไฟตรง.....	45
4.7.2 ตัวเหนี่ยวนำกรอง.....	45
4.7.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	46
4.7.4 วงจรสับเบอร์	46
4.8 รูปภาพฮาร์ดแวร์ของวิทยานิพนธ์.....	47
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	50
5.1 การทดลองในส่วนของวงจรวัดสัญญาณอินพุท.....	50
5.1.1 การวัดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม.....	50
5.1.2 การวัดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม.....	51

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1.3 การวัดสัญญาณรูปไซน์.....	52
5.2 การทดลองในส่วนของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	53
5.2.1 สัญญาณที่1 กำหนดให้ $H_1 = 100 \text{ v}$, $H_3 = 15 \text{ v}$	53
5.2.2 สัญญาณที่2 กำหนดให้ $H_1 = 100 \text{ v}$, $H_5 = 20 \text{ v}$	55
5.2.3 สัญญาณที่3 กำหนดให้ $H_1 = 100 \text{ v}$, $H_3 = 20 \text{ v}$, $H_5 = 15 \text{ v}$, $H_7 = 10 \text{ v}$, $H_9 = 5 \text{ v}$, $H_{11} = 1 \text{ v}$	56
5.3 การทดลองในส่วนของการสร้างสัญญาณพีคดับเบิ้ลยูเอ็ม.....	57
5.3.1 การทดลองสัญญาณ PWM ที่ 1 กำหนดให้ $H_3 = 0.5/\text{unit}$	57
5.3.2 การทดลองสัญญาณ PWM ที่ 2 กำหนดให้ $H_5 = 0.3/\text{unit}$	60
5.3.3 การทดลองสัญญาณ PWM ที่ 3 กำหนดให้ $H_3 = 0.4/\text{unit}$ และ $H_5 = 0.3/\text{unit}$	62
5.4 การทดลองในส่วนของการชดเชยสัญญาณ.....	64
5.4.1 ระบบที่ 1 เมื่อโหลดเป็นบริดจ์เรกติไฟร์	65
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
บรรณานุกรม.....	72
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมระบบลดค่าฮาร์มอนิก.....	74
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพาสซีฟฟิลเตอร์กับแอคทีฟฟิลเตอร์.....	15
3.1 แสดงแอดเครสที่ใช้ในการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์.....	24
3.2 Chebyshev Polynomials of the First Kind.	30
3.3 เงื่อนไขการสวิตชิงแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าค่านอกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์..	36

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ.....	4
2.2 ฮาร์มอนิกลำดับที่3และ5ที่มุมต่างๆทำให้สัญญาณไซน์มีรูปร่างผิดเพี้ยน.....	4
2.3ก สัญญาณความถี่มูลฐาน($\sin(x)$)และฮาร์มอนิกอันดับ3($\frac{1}{3}\sin(3x)$) ที่เฟสตรงกัน.....	5
2.3ข ฟังก์ชันของสัญญาณ $f(t) = \sin(x) + \frac{1}{3}\sin(3x)$	6
2.4ก สัญญาณความถี่มูลฐาน($\sin(x)$)และฮาร์มอนิกอันดับ3 ($-\frac{1}{3}\sin(3x)$) ที่เฟสตรงข้ามกัน.....	6
2.4ข ฟังก์ชันของสัญญาณ $f(t) = \sin(x) - \frac{1}{3}\sin(3x)$	6
2.5 สัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ที่มีการใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิทซ์ซิ่ง.....	8
2.6 สัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากบาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์.....	8
2.7 การต่อพาสซีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้า.....	14
2.8 การต่อแอคทีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้าเพื่อหักล้างฮาร์มอนิกในระบบ.....	14
2.9 ผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและกระแสฮาร์มอนิกจากแอคทีฟ ฟิลเตอร์รวมกันจะได้รูปคลื่นไซน์ที่ปราศจากฮาร์มอนิก.....	16
2.10 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก.....	17
2.11 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิก.....	17
2.12 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก.....	18
2.13 แสดงวงจรแอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิก.....	18
3.1 ระบบลดค่าฮาร์มอนิก.....	19
3.2 ส่วนประกอบต่างๆของระบบลดค่าฮาร์มอนิก.....	20
3.3 ส่วนซอฟต์แวร์ของระบบลดค่าฮาร์มอนิก.....	21
3.4 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของระบบลดค่าฮาร์มอนิก.....	21
3.5 ลักษณะการแซมปลิงสัญญาณ.....	22
3.6 ส่วนตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า.....	23
3.7 ส่วนโปรแกรมแสดงผลของสัญญาณ.....	23
3.8 การวิเคราะห์ FFT (Fast Fourier Transform).....	24
3.9 ส่วนโปรแกรมแสดงค่าขนาดของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น.....	25

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 ส่วนโปรแกรมแสดงสเปกตรัมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ.....	25
3.11 ลูกคลื่นพีคดับเบิ้ลยูเอ็ม.....	26
3.12 แสดงลำดับ โปรแกรมการคำนวณค่ามุมการสวิตช์.....	33
3.13 ก แสดงการสร้างสัญญาณ PWM ในช่วง 90 องศา.....	34
3.13 ข แสดงการสร้างสัญญาณ PWM ในช่วง 360 องศา.....	34
3.14 สัญญาณ PWM ที่ถูกสร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์.....	35
3.15 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์.....	35
3.16 สัญญาณจากการสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์.....	36
3.17 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์.....	37
3.18 วงจรจำลองอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ทำการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ในโปรแกรมจำลอง PSpice.....	38
3.19 ก สัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าและสัญญาณเอาต์พุตที่จากอินเวอร์เตอร์.....	38
3.19 ข แสดงสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต.....	39
4.1 วงจรเรียงกระแสที่ขงตรงเต็มลูกคลื่น(Precision Full-Wave Rectifier)	40
4.2 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อผ่านวงจรเรียงกระแสที่ขงตรงเต็มลูกคลื่น	41
4.3 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์	41
4.4 แสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตจากวงจรเรียงกระแสที่ขงตรงเต็มลูกคลื่น	42
4.5 วงจรประวิงเวลา	42
4.6 แสดงสัญญาณเปรียบเทียบอินพุตและเอาต์พุตของวงจรประวิงเวลา.....	43
4.7 วงจรขั้วเกิด	43
4.8 สัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง	44
4.9 ก ตัวตรวจวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบ Hall effect	44
4.9 ข วงจรขยายสัญญาณแบบ Inverting	45
4.10 วงจรกำลังของวงจรรอกำลังแอกทีฟ	45
4.11 วงจรภายในของ ไอจีบีที MG50J2YS50	46
4.12 วงจรสับเบอร์แบบขนาน	46
4.13 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	47
4.14 แสดงวงจรควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	47

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แสดงวงจรขับเกิด	48
4.16 แสดงวงจรประวิงเวลา	48
4.17 แสดงวงจรเรียงกระแสที่ยังคงเต็มลูกคลื่น(Precision Full-Wave Rectifier).....	49
4.18 แสดงวงจรกำลังของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	49
5.1 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากตัวกำเนิดคลื่นที่วัดได้จากออสซิลอสโคป.....	50
5.2 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่วัดได้จากส่วนวัดสัญญาณอินพุท.....	51
5.3 สัญญาณรูปสามเหลี่ยมจากตัวกำเนิดคลื่นที่วัดได้จากออสซิลอสโคป.....	51
5.4 สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่วัดได้จากส่วนวัดสัญญาณอินพุท.....	52
5.5 สัญญาณรูปไซน์จากตัวกำเนิดคลื่นที่วัดได้จากออสซิลอสโคป.....	52
5.6 สัญญาณรูปไซน์ที่วัดได้จากส่วนวัดสัญญาณอินพุท.....	53
5.7 สัญญาณที่1 $H_1 = 100 \text{ v}, H_3 = 15 \text{ v}$	53
5.8 สเปกตรัมของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นของสัญญาณที่ 1.....	54
5.9 สัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่ 1.....	54
5.10 ค่าฮาร์โมนิกอันดับต่างๆที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่ 1.....	54
5.11 สัญญาณที่2 $H_1 = 100 \text{ v}, H_5 = 20 \text{ v}$	55
5.12 สเปกตรัมของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นของสัญญาณที่2.....	55
5.13 สัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่2.....	55
5.14 ค่าฮาร์โมนิกอันดับต่างๆที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่2.	56
5.15 สัญญาณที่3 $H_1 = 100 \text{ v}, H_3 = 20 \text{ v}, H_5 = 15 \text{ v}, H_7 = 10 \text{ v}, H_9 = 5 \text{ v}$	56
5.16 สเปกตรัมของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นของสัญญาณที่ 3.....	56
5.17 สัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่3.....	57
5.18 ค่าฮาร์โมนิกอันดับต่างๆที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่3.	57
5.19 สัญญาณ PWM ที่ 1 $H_3 = 0.3/\text{unit}$ จากการจำลอง.....	58
5.20 สัญญาณ PWM ที่ 1 จาก การทดลอง.....	58
5.21 คลื่นสัญญาณที่ 1 จากการจำลอง	58
5.22 คลื่นสัญญาณที่ 1 จากการทดลอง	59
5.23 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่ 1 จากการจำลอง.....	59
5.24 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่ 1 จากการทดลอง.....	59
5.25 สัญญาณ PWM ที่ 2 $H_5 = 0.3/\text{unit}$ จากการจำลอง.....	60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 สัญญาณ PWM ที่ 2 จากการทดลอง	60
5.27 คลื่นสัญญาณ ที่ 2 จากการจำลอง.....	61
5.28 คลื่นสัญญาณ ที่ 2 จากการทดลอง	61
5.29 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่ 2 จากการจำลอง.....	61
5.30 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่ 2 จากการทดลอง.....	62
5.31 สัญญาณ PWM ที่ 3 $H_3 = 0.4/\text{unit}$ และ $H_5 = 0.3/\text{unit}$ จากการจำลอง.....	62
5.32 สัญญาณ PWM ที่ 3 จากการทดลอง.....	63
5.33 คลื่นสัญญาณที่ 3 จากการจำลอง	63
5.34 คลื่นสัญญาณที่ 3 จากการทดลอง.....	63
5.35 สเปกตรัมของสัญญาณที่3จากการจำลอง.....	64
5.36 สเปกตรัมของสัญญาณที่3จากการทดลอง.....	64
5.37 วงจรที่ใช้ในการทดลองชดเชยสัญญาณฮาร์มอนิก.....	65
5.38 แสดงโพลบริดจ์เรกติไฟร์	65
5.39 แสดงสัญญาณแรงดันก่อนมีการชดเชย	66
5.40 แสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าก่อนมีการชดเชย	66
5.41 แสดงสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าก่อนมีการชดเชย	67
5.42 แสดงสัญญาณของแรงดันหลังจากการชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น	67
5.43 แสดงสัญญาณของกระแสไฟฟ้าหลังจากการชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น	67
5.44 แสดงสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าหลังจากชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น	68
5.45 การเปรียบเทียบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสก่อนและหลังมีการชดเชยกระแส ฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE Std.519-1992	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการไฟฟ้าหรือผู้ใช้ไฟฟ้าได้ให้ความสำคัญกับคุณภาพไฟฟ้ามากขึ้น เนื่องจากในระบบไฟฟ้าและโดยเฉพาะในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมได้มีการใช้อุปกรณ์ที่มีเทคโนโลยีสูงกว่าเดิมในอดีต ซึ่งคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่อกระแสและแรงดันคือถ้ามีขนาดและรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากสภาพการจ่ายไฟปกติอาจจะทำให้อุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการชำรุดเสียหายขึ้นได้ซึ่งเป็นปัญหาคคุณภาพไฟฟ้าที่ต้องมีการป้องกันและแก้ไขโดยสาเหตุหลักที่ทำให้กระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้ามีขนาดและรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากสภาพการจ่ายไฟปกติ มีสาเหตุเกิดจากฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้า ซึ่งเนื่องจากปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารพาณิชย์มีการใช้อุปกรณ์สมัยใหม่เทคโนโลยีสูงที่ทำจากอุปกรณ์ทางด้าน โวลติสเทท เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีคุณภาพและได้ปริมาณตามที่ต้องการและในอนาคตจะมีแนวโน้มการใช้มากขึ้นเรื่อยๆ โดยส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ที่มทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear load) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เช่นคอนเวอร์เตอร์ (Convertor) ตัวเรียงกระแสกำลัง (Power Rectifier) และชุดขับเคลื่อนปรับความเร็ว(Adjustable-Speed Drive) เป็นต้น

ด้วยผลของการใช้อุปกรณ์ที่มทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น อุปกรณ์ดังกล่าวจะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ใช้ไฟเอง หรือถ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีพิคัดขนาดใหญ่ กระแสฮาร์มอนิกนั้นอาจไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าอื่นในบริเวณข้างเคียง จากผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ทำให้กระแสและแรงดันในระบบมีขนาดและรูปร่างเพี้ยน(Distortion)ไปจากสภาพการจ่ายไฟปกติซึ่งเป็นผลทำให้อุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการชำรุดเสียหายได้

ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการแก้ปัญหาของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นด้วยตัวกรองฮาร์มอนิก เพื่อลดค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นให้ลดลง เพื่อป้องกันการมทำงานผิดพลาดและความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ ในระบบไฟฟ้าพร้อมทั้งยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าอีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการกำหนดวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาวิจัยและพัฒนาการออกแบบระบบลดค่าฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองแบบแอกทีฟ และควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

2. การทดสอบส่วนต่างๆ ของระบบที่ทำการออกแบบโดยเทียบกับผลที่จำลองจาก

โปรแกรม PSPICE

3. สามารถสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกที่ต้องการได้
4. ระบบที่ออกแบบสามารถลดค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบได้

1.3 สมมติฐานการศึกษา

แนวทางในการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่ผ่านมามีหลายหลักการของวงจรพาสซีฟมาทำหน้าที่กรองฮาร์มอนิกแต่การใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟยังมีข้อจำกัดอยู่ได้แก่

- วงจรกรองหนึ่งชุดจะเหมาะสมกับฮาร์มอนิกเพียงหนึ่งอันดับเท่านั้น
- มีความซับซ้อนในการออกแบบและต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง
- อาจเกิดกระแสสูงไหลระหว่างแหล่งจ่ายกับวงจรกรองเมื่อเกิดเรโซแนนซ์ขนานกับ

อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายเมื่อมองจากทางด้านโหลดและทำให้อุปกรณ์ในระบบเสียหายจากแรงดันตกคร่อมสูงได้

- อาจเกิดกระแสเกินค่าพิกัดตัวกรองได้หากแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ด้วย

จากข้อจำกัดเบื้องต้นของวงจรพาสซีฟจึงได้พัฒนาวงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา โดยมีคุณสมบัติการกรองที่ดีกว่าและติดตั้งการใช้งานง่าย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบระบบลดค่าฮาร์มอนิกซึ่งใช้ตัวกรองแบบแอกทีฟโดยมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานเพื่อความสะดวกในการใช้งานและติดตามการทำงานของระบบ และใช้หลักการสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulate) กลับเข้าไปหักล้างกับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบเพื่อทำให้รูปสัญญาณทางด้านแหล่งจ่ายมีลักษณะใกล้เคียงลักษณะไซน์มากขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

แนวความคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือการนำคอมพิวเตอร์มาควบคุมระบบลดค่าฮาร์มอนิก ซึ่งจะมีการสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกเข้าไปชดเชยในระบบด้วยวิธีควบคุมการสวิตช์ของ IGBT แบบยูนิโพลาร์ ซึ่งสัญญาณที่ควบคุมการสวิตช์ของ IGBT นั้นมีลักษณะเป็นสัญญาณแบบพีดับเบิลยูเอ็ม โดยได้มาจากการคำนวณมุมของการสวิตช์ด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าฮาร์มอนิกที่วิเคราะห์ได้ จากนั้นจึงสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มขึ้นมา 2 สัญญาณ โดยสัญญาณหนึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณ ไซน์ส่วนอีกสัญญาณสัมพันธ์กับสัญญาณ ไซน์ร่วมกับสัญญาณฮาร์มอนิกที่ต้องการ เพื่อนำไปควบคุมการสวิตช์ ของ IGBT ผลลัพธ์ของสัญญาณที่ออกจาก IGBT ก็คือสัญญาณฮาร์มอนิกที่จะนำไปชดเชยกับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

1.5 การเปรียบเทียบหลักการเก่ากับใหม่

เนื่องจากใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมจึงมีการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้กับระบบได้ทำให้สามารถ ตรวจสอบการทำงาน แสดงสัญญาณที่วัดและวิเคราะห์ และควบคุมการทำงานด้วยตัวผู้ใช้งานได้ แต่ในระบบต่างๆ ไปจะเป็นการวิเคราะห์ระบบ ไฟฟ้าก่อนจึงหาตัวกรองมาติดตั้งในระบบซึ่งผู้ใช้ไม่สามารถเข้าไปควบคุมได้ และตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอกทีฟยังมีความยืดหยุ่นในการใช้งานกว่าแบบพาสซีฟ อีกทั้งในส่วนของ การควบคุมเป็นการควบคุมแบบดิจิทัลซึ่งมีการคำนวณสัญญาณพีคเบิ้ลยูเอ็มจากคอมพิวเตอร์ส่วนในระบบที่ใช้ตัวกรองแบบแอกทีฟก่อนหน้านี้จะใช้การควบคุมแบบแอนาลอก

1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบระบบลดค่าฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า 1 เฟส โดยใช้ตัวกรองแบบแอกทีฟ และควบคุมแบบดิจิทัลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยคอมพิวเตอร์จะวิเคราะห์ค่าของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจากการวัดสัญญาณ และคำนวณหามุมสวิทช์ของสัญญาณพีคเบิ้ลยูเอ็มส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้สร้างสัญญาณพีคเบิ้ลยูเอ็มไปควบคุมการสวิทช์ของ ไอจีบีทีซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกรองแบบแอกทีฟโดยสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกเข้าไปชดเชยกับสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะสนใจฮาร์มอนิกอันดับที่ในช่วง อันดับที่ 3 ถึง อันดับที่ 15

1.7 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับฮาร์มอนิกและการแก้ปัญหารฮาร์มอนิก

บทที่ 3 กล่าวถึงระบบลดค่าฮาร์มอนิกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้และหลักการในขั้นตอนของการวัดสัญญาณ การคำนวณค่าสวิทช์ การสร้างสัญญาณพีคเบิ้ลยูเอ็ม

บทที่ 4 กล่าวถึงวงจรต่างๆ ที่ใช้ในระบบลดค่าฮาร์มอนิก

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองในส่วนต่างๆ และผลการทดลอง

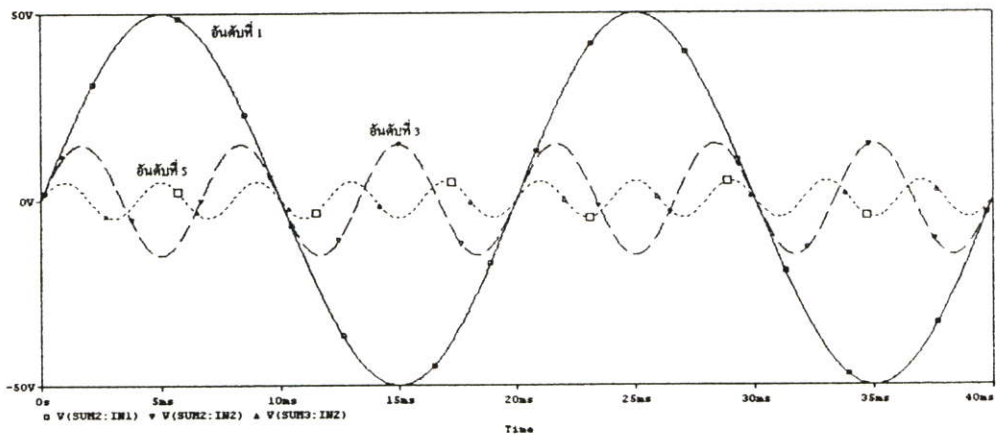
บทที่ 6 เป็นการสรุปการวิจัย และแนะนำการพัฒนา ระบบต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวกับฮาร์มอนิกและการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

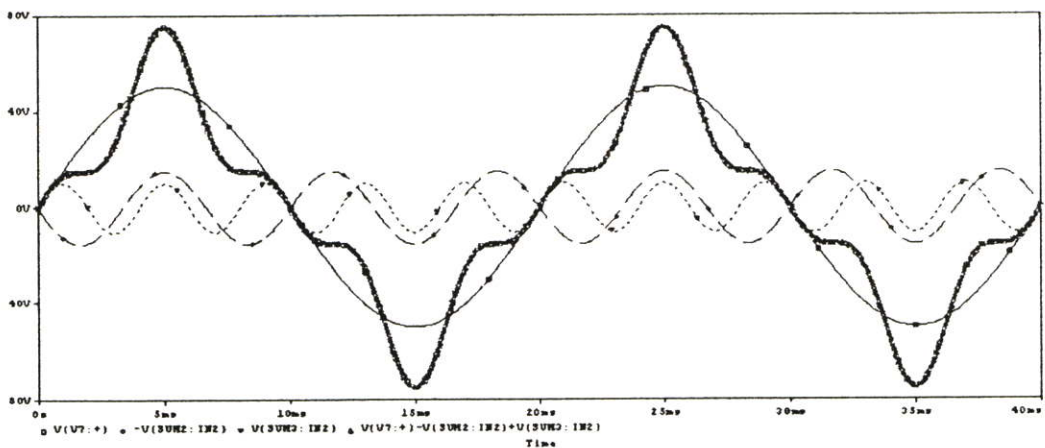
2.1 กล่าวนำ

ฮาร์มอนิกคือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล ในระบบไฟฟ้าเรามีค่าเท่ากับ 50 Hz เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มีค่าความถี่เป็น 150 Hz และฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250 Hz แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ

และผลของฮาร์มอนิกเมื่อรวมกันกับสัญญาณความถี่หลักมูลด้วยทางขนาดและมุมเฟสทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไปและมีรูปสัญญาณเพี้ยนไปจากสัญญาณคลื่น ไซน์ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 และ 5 ที่มุมต่างๆทำให้สัญญาณไซน์มีรูปร่างผิดเพี้ยน

ในทางคณิตศาสตร์สามารถใช้อนุกรมฟูเรียร์อธิบายคุณลักษณะของฮาร์มอนิกได้ โดย สัญญาณหรือฟังก์ชันที่เป็นคาบใดๆ สามารถกระจายให้อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่ ความถี่ต่างๆเป็นฟังก์ชันคาบที่เขียนแทนด้วย $f(t)$ ดังสมการที่ 2.1

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (2.1)$$

เมื่อ

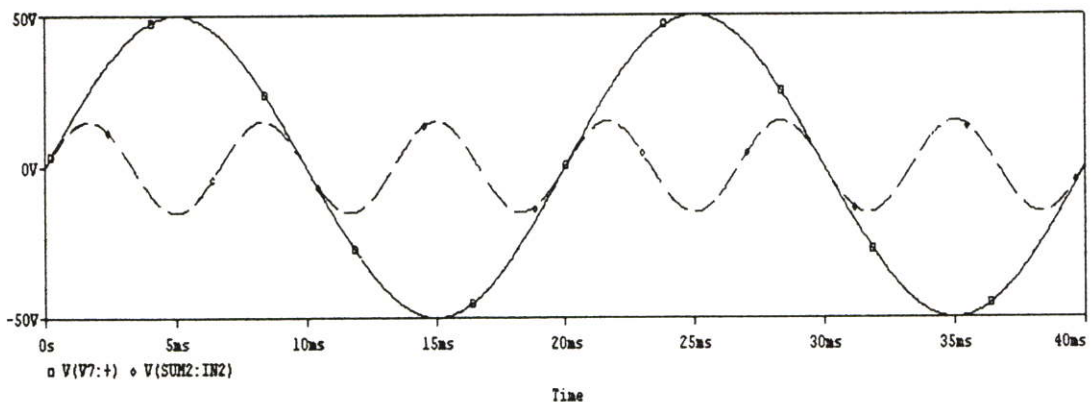
$$a_0 = \frac{1}{T} \int f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int f(t) \cos n\omega_0 t dt$$

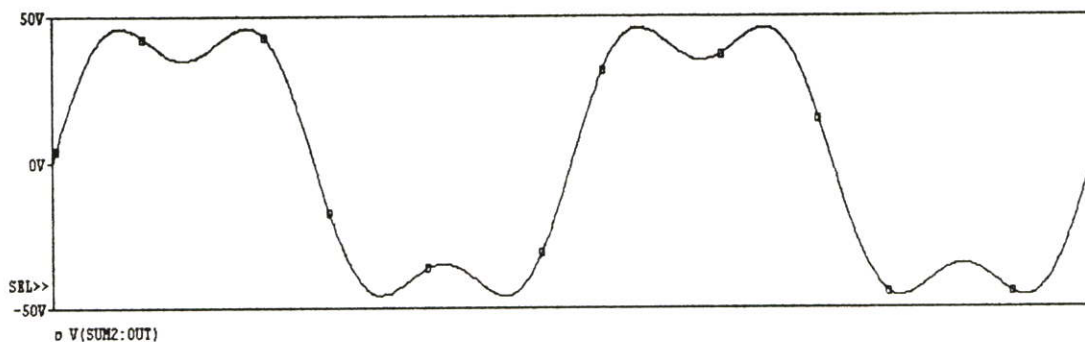
$$b_n = \frac{2}{T} \int f(t) \sin n\omega_0 t dt$$

เมื่อ T คือ 1 คาบของสัญญาณ และ n คือเลขจำนวนเต็มบวก
 n คือจำนวนเต็มบวก

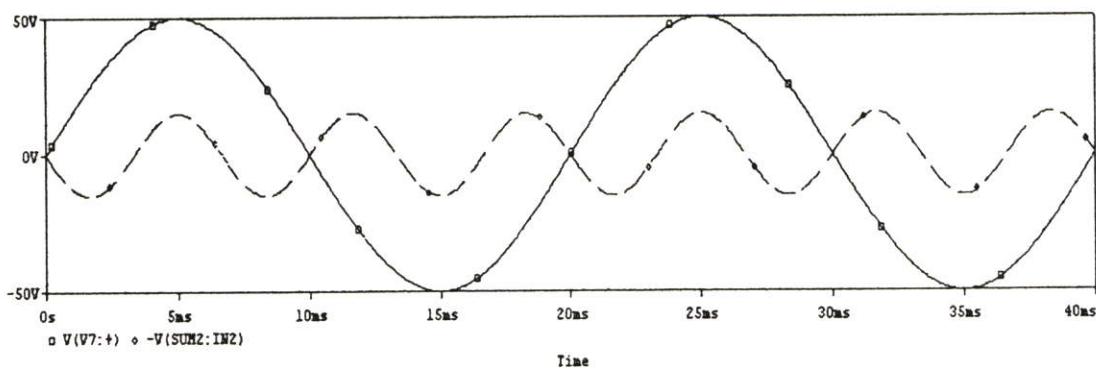
ในกรณีที่ $n = 0$ จะเป็นความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) หรือกรณีที่ n มีค่ามากกว่าศูนย์เราเรียกความถี่นี้ว่าฮาร์มอนิกลำดับที่ n ซึ่งเป็นได้ทั้งลำดับคู่และคี่ และจากรูปที่ 2.3 ข. และรูปที่ 2.4 ข แสดงถึงความเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นเกิดจากการรวมสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีความถี่หลักมูลกับคลื่นไซน์ที่เป็นฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ดังรูปที่ 2.3 ก และรูป 2.4 ก ตามลำดับ



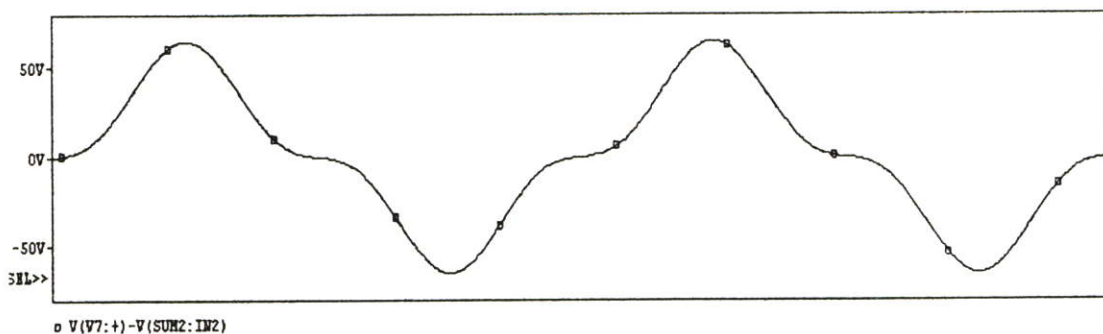
รูปที่ 2.3 ก สัญญาณความถี่มูลฐาน ($\sin(x)$) และฮาร์มอนิกอันดับ 3 ($\frac{1}{3}\sin(3x)$) ที่เฟสตรงกัน



รูปที่ 2.3 ข ฟังก์ชันของสัญญาณ $f(t) = \sin(x) + \frac{1}{3}\sin(3x)$



รูปที่ 2.4 ก สัญญาณความถี่มูลฐาน ($\sin(x)$) และฮาร์มอนิกอันดับ 3 ($-\frac{1}{3}\sin(3x)$) ที่เฟสตรงข้ามกัน



รูปที่ 2.4 ข ฟังก์ชันของสัญญาณ $f(t) = \sin(x) - \frac{1}{3}\sin(3x)$

2.2 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

มาตรฐาน IEC และ IEEE ใช้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก : %THD (Total Harmonic Distortion) เป็นค่าบอกระดับ ความเพี้ยนฮาร์มอนิกโดยเทียบจากอัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสองของส่วนประกอบฮาร์มอนิกกับค่าของส่วนประกอบความถี่หลักมูลเทียบ

เป็นร้อยละซึ่งจะแยกออกเป็นค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมและค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก รวม

2.2.1 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Current Distortion : THD_I)

$$\%THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 (rms)}}{I_1 (rms)} \times 100\% \quad (2.2)$$

2.2.2 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Voltage Distortion : THD_V)

$$\%THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2 (rms)}}{V_1 (rms)} \times 100\% \quad (2.3)$$

เมื่อ

$V_h (rms)$ คือค่า rms ของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ h

$I_h (rms)$ คือค่า rms ของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ h

$V_1 (rms)$ คือค่า rms ของแรงดันที่ความถี่หลักมูล

$I_1 (rms)$ คือค่า rms ของกระแสที่ความถี่หลักมูล

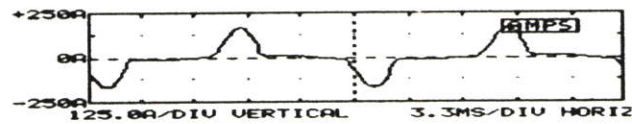
2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก

จากที่กล่าวมาโดยภาวะปกติ การไฟฟ้าจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปสัญญาณคลื่นไซน์ให้กับโหลดประเภทต่างๆของผู้ใช้ไฟ แต่ในกรณีในระบบไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟบางรายมีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งโหลดดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก กระแสฮาร์โมนิกนั้นจะไหลเข้าสู่ระบบของผู้ใช้ไฟเองและระบบไฟฟ้าข้างเคียง ผลของกระแสฮาร์โมนิกจะทำให้เกิดแรงดันในระบบไฟฟ้าเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ค่าความเพี้ยนของแรงดันจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบและขนาดของกระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่างๆ ด้วยผลของกระแสฮาร์โมนิก ดังกล่าวไหลเข้าสู่ระบบใกล้เคียง อาจไปรบกวนการทำงานหรือสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟรายอื่นๆและอุปกรณ์ในระบบของการไฟฟ้าได้ ดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบว่าโหลดที่อยู่ในอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรมเรานั้น มีโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกหรือไม่ และโหลดประเภทใดเป็นโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์โมนิก เพื่อทำความเข้าใจก่อนที่

จะทำการแก้ไขและป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากฮาร์โมนิกต่อไป เราสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกตามคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ได้ดังต่อไปนี้

2.3.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปในบ้านพัก สำนักงาน ส่วนใหญ่เป็นชนิด 1 เฟส

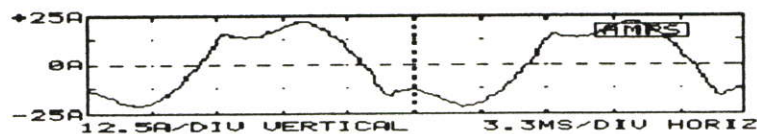
1. อุปกรณ์ที่มีการใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ซิ่ง (SWITCHING MODE POWER SUPPLY : SMPS) เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer) สัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ที่มีการใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ซิ่งแสดงดังรูปที่ 2.5



Fundamental HARM	PCT	amps: freq PHASE	15.2 A rms 60.0 Hz	HARM	PCT	PHASE
FUND	100.0%	-124°		2nd	0.2%	136°
3rd	19.9%	-144°		4th		
5th	7.4%	62°		6th		
7th	3.2%	-39°		8th		
9th	2.4%	-171°		10th		
11th	1.8%	111°		12th		
13th	0.8%	17°		14th		
15th	0.4%	-93°		16th		
17th	0.1%	-164°		18th		
19th	0.2%	-99°		20th		
21st	0.1%	160°		22nd		
23rd	0.1%	86°		24th		
25th				26th		
27th	0.1%	161°		28th		
29th				30th		
31st				32nd	0.1%	156°

รูปที่ 2.5 สัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ที่มีการใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ซิ่ง

2. บาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Ballast) สัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดจากบาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แสดงดังรูปที่ 2.6



Fundamental HARM	PCT	amps: freq PHASE	15.2 A rms 60.0 Hz	HARM	PCT	PHASE
FUND	100.0%	-124°		2nd	0.2%	136°
3rd	19.9%	-144°		4th		
5th	7.4%	62°		6th		
7th	3.2%	-39°		8th		
9th	2.4%	-171°		10th		
11th	1.8%	111°		12th		
13th	0.8%	17°		14th		
15th	0.4%	-93°		16th		
17th	0.1%	-164°		18th		
19th	0.2%	-99°		20th		
21st	0.1%	160°		22nd		
23rd	0.1%	86°		24th		
25th				26th		
27th	0.1%	161°		28th		
29th				30th		
31st				32nd	0.1%	156°

รูปที่ 2.6 สัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดจากบาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

2.3.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม

1. ตัวเรียงกระแสกำลัง (Power Rectifier)
2. เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต (Static Power Converter :SPC)
3. ตัวโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller :PLC)
4. ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable Speed Drive :ASD)

2.3.3 อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ค

1. เตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace)
2. เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)
3. เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค/แบบสปอต (Arc Welding / Spot Welding)

2.3.4 อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงดันและกระแสเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า

1. หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

2.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีผลต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

ปัญหาฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าออกเป็น 2 กรณีคือ

- ทำให้อุปกรณ์ในระบบมีการทำงานผิดพลาดด้วยผลของค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดและรูปคลื่นสัญญาณไซน์ผิดเพี้ยนไป
- ทำให้อุปกรณ์ในระบบมีอายุการใช้งานน้อยลงหรือเกิดการชำรุดเสียหาย เนื่องจากมีค่า rms ของแรงดันหรือกระแส สูงขึ้นที่เกิดจากค่าฮาร์มอนิก หรือมีการขยายของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก ที่เกิดจากฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

ปัญหาและผลกระทบของฮาร์มอนิกที่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าดังนี้คือ

2.4.1 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อการเกิดเรโซแนนซ์

ผลของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์เกิดขึ้นในกรณีที่ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบไปตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกทำให้เกิดการขยายขนาดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก เป็นผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากได้รับกระแสและแรงดันเกินพิกัด

2.4.2 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อระบบสายส่ง

ผลของกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลอยู่ในระบบจำหน่ายและสายส่ง ทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในสายมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพ การส่งจ่ายลดลง เนื่องจากกระแสฮาร์โมนิกทำให้ค่า rms ของกระแสและความต้านทานของสายสูงขึ้น ตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (2.4)$$

เมื่อ

- P_L = กำลังสูญเสียในระบบ
- I_n = กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ n (ค่า rms)
- R_n = ความต้านทานระบบที่ความถี่ฮาร์โมนิก

2.4.3 ผลของกระแสฮาร์โมนิกที่หารสามลงตัว Triplen harmonics

ผลของกระแสฮาร์โมนิกที่หารสามลงตัว (ลำดับที่ 3, 6, 9...) จัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับเป็นศูนย์ (Zero Sequence) ในระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิกกลุ่มนี้จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวตรอน (Neutron) อาจทำให้สายนิวตรอนหรือหม้อแปลงเสียหายได้หากไม่มี การออกแบบรองรับไว้

2.4.4 ผลของกระแสฮาร์โมนิกต่อหม้อแปลง

ผลของกระแสฮาร์โมนิกต่อหม้อแปลง มี 3 ประการ คือ

1. ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในหม้อแปลง กระแสฮาร์โมนิกจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียขณะมีโหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) ของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น
2. ทำให้เกิดเรโซแนนซ์(ที่ความถี่ฮาร์โมนิก)ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ของสาย(line capacitor)
3. ฮาร์โมนิกทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis -Loss) เพิ่มขึ้น โดยถ้าแหล่งจ่ายจ่ายแรงดันรูปไซน์ให้หม้อแปลง กำลังสูญเสียแกนเหล็กของหม้อแปลงจะเป็นไปตามสมการ

$$P_{CORE} = (k_1 f + k_2 f^2) V^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ

- P_{CORE} = กำลังสูญเสียแกนเหล็ก
- $k_1 f$ = กำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส
- $k_2 f$ = กำลังสูญเสียกระแสไหลวนในแกนเหล็ก
- V^2 = แรงดันรูปไซน์ของแหล่งจ่าย

จะเห็นได้ว่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดจากกระแส และ แรงดันฮาร์มอนิกซึ่งขึ้นกับค่าของความถี่โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม ดังนั้นที่ฮาร์มอนิกสูงๆ จะทำให้เกิดค่าความร้อนแก่หม้อแปลงมากกว่าฮาร์มอนิกต่ำๆ แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลงนี้ยังไม่มีมาตรฐานกำหนด

2.4.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อคาปาซิเตอร์แรงค์

ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) กับตัวคาปาซิเตอร์และอาจทำให้ฟิวส์ของตัวคาปาซิเตอร์ขาดง่ายกว่าการใช้งานปกติ ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์และผลจากภาวะเรโซแนนซ์ที่ตัวคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดขยายกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของคาปาซิเตอร์สามารถทนต่อค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิก คาปาซิเตอร์ที่ออกแบบสร้างจากผู้ผลิตได้กำหนดตามมาตรฐาน IEEE Std. 18-1992

2.4.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อฟิวส์

ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนในตัวฟิวส์เพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะเวลากระแส (Time-Current Characteristic) ของฟิวส์เปลี่ยนไป กรณีที่มี ฟอลต์ (False) ระดับต่ำเกิดขึ้นฟิวส์จะขาดก่อนในเวลาที่กำหนด หรือในกรณีที่ฟิวส์ขาดโดยไม่ทราบสาเหตุจะเป็นเหตุมาจากฮาร์มอนิกในกรณีที่เกิดภาวะเรโซแนนซ์ได้เช่นกัน

2.4.7 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อการทำงานของรีเลย์

ผลของฮาร์มอนิกทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาดซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการทำงาน ของชนิดรีเลย์ การทำงานของรีเลย์ชนิด Electromagnetic ขึ้นอยู่กับค่ากระแสและแรงดัน rms ส่วนการทำงานของรีเลย์ชนิด Digital ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันยอดคลื่น (Crest Voltage) จากการ Sampling และตรวจค่า Zero Crossing ค่ากระแสหรือแรงดันที่ศูนย์

โดยลักษณะที่ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดดังนี้

- ทำให้รีเลย์มีการทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่า (Pickup Values) ที่สูง โดยปกติรีเลย์จะทำงานอย่างรวดเร็วและทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำๆ
- กรณีที่มีกระแสฮาร์มอนิก Triplen มากพออาจทำให้กราวด์รีเลย์ทำงานผิดพลาด (False Trip)
- ทำให้รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) ทำงานผิดพลาด ด้วยผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำให้อิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นต่างจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการเซตซึ่งที่ความถี่หลักมูล
- ทำให้รีเลย์สถิตแบบความถี่ต่ำ (Static Underfrequency Relay) มีความไวกว่าปกติ

อาจทำให้เกิดการทรูปผิดพลาด

- ทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน (Overcurrent and Overvoltage Relay) ทำงานผิดพลาดตามคุณสมบัติที่ตั้งไว้
- ทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่าง (Differential Relay) ทำงานช้าลง

2.4.8 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อสวิตช์เกียร์

ผลของกระแสฮาร์มอนิกมีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแส (Current Interruption Capacity) ของอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ คือทำให้ขนาดของอัตราค่ากระแสเทียบกับเวลา di/dt มีค่าสูงในขณะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ เป็นผลทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้เมื่อมีฮาร์มอนิก ซึ่งปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ตัดกระแสได้เช่นกัน

2.4.9 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า

ผลของฮาร์มอนิกทำให้มิเตอร์วัดค่าไฟฟ้า (Watt - Hour Meter) ซึ่งเป็นมิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) ทำการวัดค่าผิดพลาดได้ ซึ่งโดยปกติการปรับแต่งมิเตอร์นั้นจะทำการปรับแต่งที่ความถี่หลักมูล โดยทั่วไปการผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกมากกว่า 20% จะมีผลต่อมิเตอร์

2.4.10 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ผลของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและขณะไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ สามเฟส เกิดปรากฏการณ์คือค็อกกิง (Cogging) คือไม่สามารถสตาร์ทมอเตอร์ได้ จากการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่า ความเร็วซิงโครนัส และทำให้เกิดการออสซิลเลตทางกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักร

2.4.11 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบการสื่อสาร

ผลของฮาร์มอนิกทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสารทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ (low level noise) เช่นในระบบโทรทัศน์อาจก่อให้เกิดความรำคาญ ซึ่งฮาร์มอนิกเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ได้ยินเสียงเบากว่าปกติ หรือมีเสียงรบกวน แต่ที่ระดับฮาร์มอนิกระดับสูงทำให้คุณภาพการส่งลดลงและอาจเกิดการสูญเสียของข่าวสารข้อมูลหรือระบบสื่อสารถึงกับใช้งานไม่ได้

2.5 การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกและอุปกรณ์กรองฮาร์มอนิก

ในระบบไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิกเมื่อใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบอาจทำให้เกิดเรโซแนนซ์กระแสสูงในระบบซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ วิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้หลายประการดังนี้

- 1) เปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดของคาปาซิเตอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิก
- 2) ใส่ LC ฟิวเจอร์ที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและปรับ (tune) ให้เข้ากับฮาร์มอนิกที่เกิดปัญหา LC ฟิวเจอร์ตัวดังกล่าวจะทำให้อิมพีแดนซ์ต่ำที่ฮาร์มอนิกที่มีปัญหาในกรณีที่ใส่ฟิวเจอร์เข้าไปแล้วนั้นก็ต้องทำการตรวจเช็คต่อไปอีกว่า อาจเกิดเรโซแนนซ์ตรงกับฮาร์มอนิกตัวอื่นหรือไม่ ถ้าเป็นอย่างนั้นก็ต้องใส่ LC ฟิวเจอร์กรองฮาร์มอนิกที่มีปัญหาค่ะต่อไปอีก
- 3) ใส่ L เข้าไปกับคาปาซิเตอร์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ไม่ให้ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกหรือใส่ L เข้าไปอนุกรมกับคาปาซิเตอร์เพื่อใช้เป็นฟิวเจอร์เลย

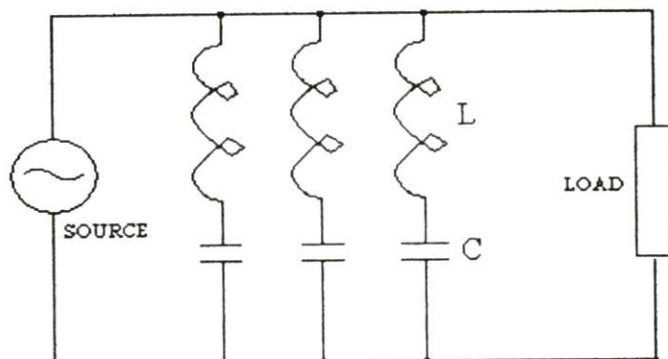
อีกวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าคือการใช้อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกเข้ามาช่วยกรองฮาร์มอนิกออกไปจากระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิก

ชนิดของอุปกรณ์กรองฮาร์มอนิก

1. พาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter)

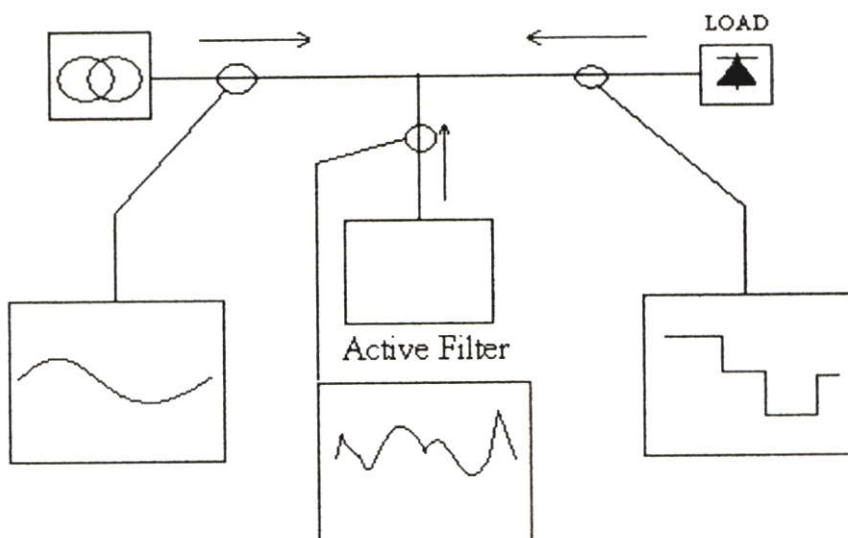
หมายถึง อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกที่ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ ตัวต้านทาน (R) รีแอคเตอร์ (L) และคาปาซิเตอร์ (C) ที่ได้รับการออกแบบที่มีค่า R L และ C ที่สัมพันธ์กันจนประพาคตัวเสมือนลัดวงจร (Low Impedance) สำหรับฮาร์มอนิกแต่เป็นเพียงโหลดธรรมดาตัวหนึ่งสำหรับไฟฟ้า 50 Hz ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกในระบบจะเห็นพาสซีฟฟิลเตอร์เป็นเสมือนลัดวงจรและกระแสที่ไหลผ่านพาสซีฟฟิลเตอร์นั้นแทบจะไม่รบกวนต่อระบบไฟฟ้าเลย ซึ่งพาสซีฟฟิลเตอร์ เป็นวงจรไฟฟ้าง่าย ๆ แต่ต้องทำการออกแบบและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่ซับซ้อน รวมถึงการผลิตตัว R L และ C ที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำจึงจะสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย พาสซีฟฟิลเตอร์มีข้อจำกัดในการใช้งานที่ไม่ยืดหยุ่น การต่อพาสซีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การต่อพาสซีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้า

2. แอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter)

แอคทีฟฟิลเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ คือ อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกที่ใช้กำลังของ IGBT ประกอบกับระบบควบคุมการทำงานแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะทำหน้าที่ตรวจวัดค่ากระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์แล้วคำนวณ แล้วจึงทำการฉีดกระแสฮาร์มอนิกในเฟสที่ตรงข้ามกับฮาร์มอนิกเข้าไปในระบบไฟฟ้า ผลที่ได้คือฮาร์มอนิกจะถูกหักล้างออกไปจนเหลือแต่ความถี่ 50Hz ดังรูปที่ 2.8 แอคทีฟฟิลเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถกรองฮาร์มอนิกได้ดีแต่จะมีราคาสูง



รูปที่ 2.8 การต่อแอคทีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้าเพื่อหักล้างฮาร์มอนิกในระบบ

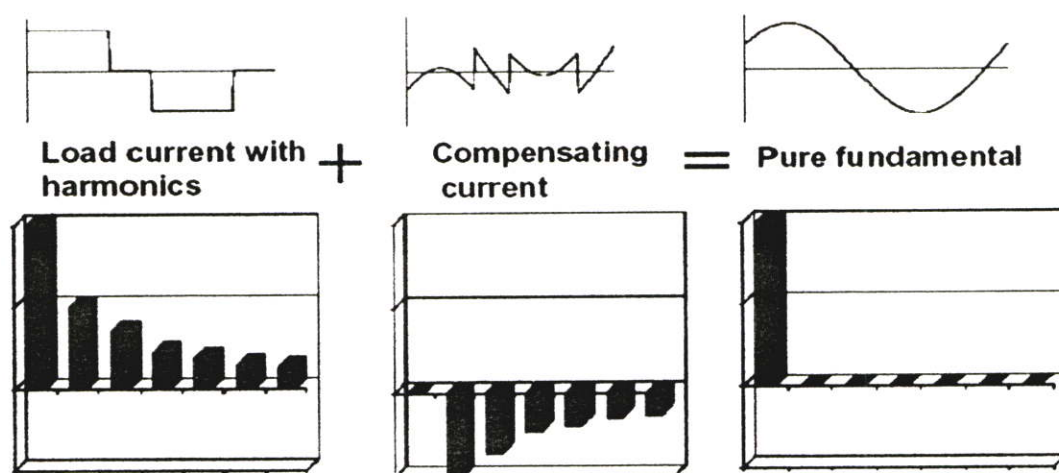
จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าแอคทีฟฟิลเตอร์นั้นมีข้อดีมากกว่าวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ จะเลือกใช้วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพาสซีฟฟิลเตอร์กับแอคทีฟฟิลเตอร์

ความสามารถ	แอคทีฟฟิลเตอร์	พาสซีฟฟิลเตอร์
สามารถกรองฮาร์มอนิกจากระบบไฟฟ้าได้ทั้งหมด	ได้	ได้
สามารถกรองได้หลายฮาร์มอนิกในเวลาเดียวกัน	ได้	ได้
ต้องการการวิเคราะห์ระบบอย่างละเอียด	ไม่ต้องการ	ต้องการอย่างยิ่ง
<p>มีความยืดหยุ่นในการทำงาน</p> <ul style="list-style-type: none"> - สามารถเปลี่ยนแปลงฮาร์มอนิกภายหลังได้ - สามารถต่อเพิ่มขนาดได้หากโหลดเพิ่มขึ้น - สามารถเลือกฮาร์มอนิกแบบไม่ต่อเนื่อง - สามารถโปรแกรมการทำงานโดยผู้ใช้งาน - สามารถกำหนดปริมาณฮาร์มอนิกที่ต้องการได้ - ออกแบบเป็น โมดูลสามารถเพิ่มหรือลดได้ 	<p>ได้</p> <p>ได้</p> <p>ได้</p> <p>ได้</p> <p>ได้</p> <p>ใช่</p>	<p>ไม่ได้</p> <p>อาจเกิดโอเวอร์โหลดได้</p> <p>ต้องเรียงลำดับจากมากไปน้อย</p> <p>โปรแกรมไม่ได้</p> <p>ไม่ได้, กรองทั้งหมด</p> <p>แก้ไขไม่ได้</p>
ไม่เกิด โอเวอร์โหลดแม้ฮาร์มอนิกจะมาก	ไม่โอเวอร์โหลด	เกิดได้ง่าย
มีขนาดเล็กและเบา	ใช่	ใหญ่และหนัก
สามารถกรองฮาร์มอนิกได้แม้ในระบบที่มี PF ใกล้ 1.0	ได้	ไม่ได้เพราะต้องใช้ตัวเก็บประจุจำนวนมากเป็นส่วนประกอบหลัก

2.6 แอคทีฟฟิลเตอร์

เนื่องจากปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นแอคทีฟฟิลเตอร์จึงได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ในรูปที่ 2.9 คือผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและกระแสฮาร์มอนิกจากแอคทีฟฟิลเตอร์เมื่อพิจารณาในรูปของสเปกตรัม



รูปที่ 2.9 ผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและกระแสฮาร์มอนิกจากแอคทีฟฟิลเตอร์รวมกันจะได้รูปคลื่นไซน์ที่ปราศจากฮาร์มอนิก

แอคทีฟฟิลเตอร์นั้นสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการต่อวงจร คือ

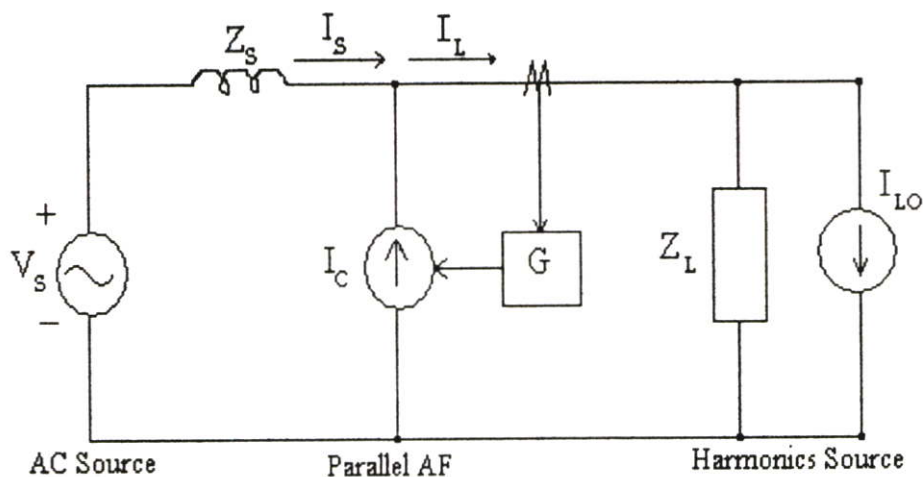
1. แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน
2. แอคทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม

2.6.1 แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน

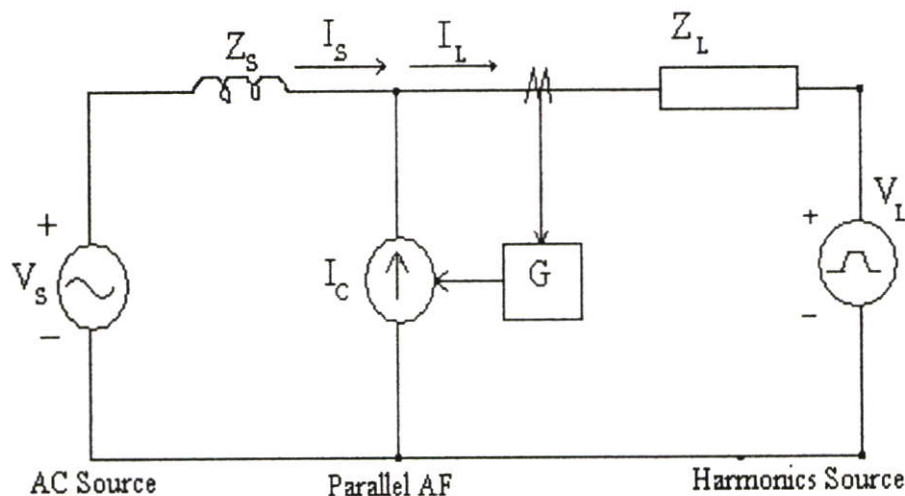
แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนานเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ใช้หลักการ พัลส์บวลิวเอ็ม (PWM) ที่ต่อขนานกับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเพื่อฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นกระแสที่มีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสตรงข้ามกับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ดังนั้นกลไกสำคัญของการทำงานจะอยู่ที่ความสามารถในการตรวจจับและคำนวณกระแสฮาร์มอนิกที่จะทำการชดเชยให้ถูกต้อง ซึ่งเป็นส่วนของวงจรควบคุม

แอคทีฟฟิลเตอร์แบบขนานสามารถแบ่งตามประเภทการทำงาน ได้อีก 2 ประเภทคือ

1. ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกดังรูปที่ 2.10
2. ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก



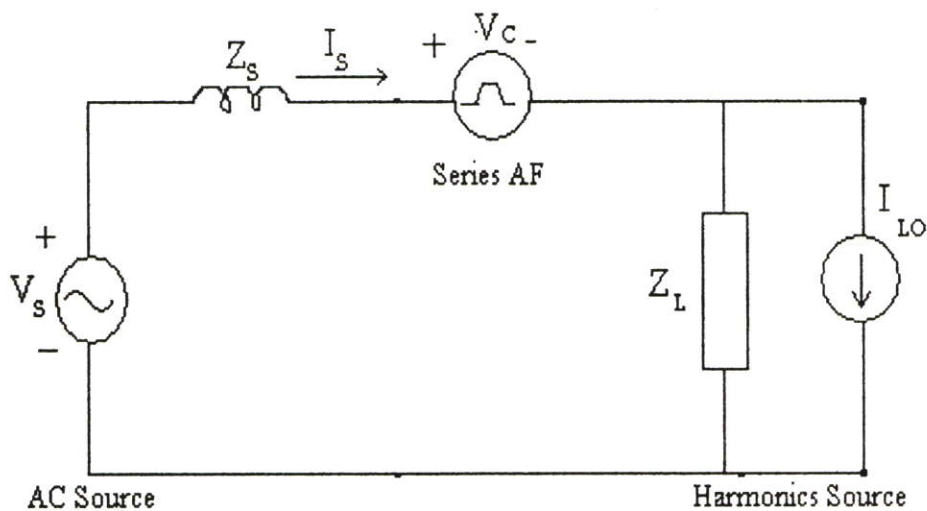
รูปที่ 2.11 แสดงวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบขนาน สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิก

2.6.2 แอกทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม

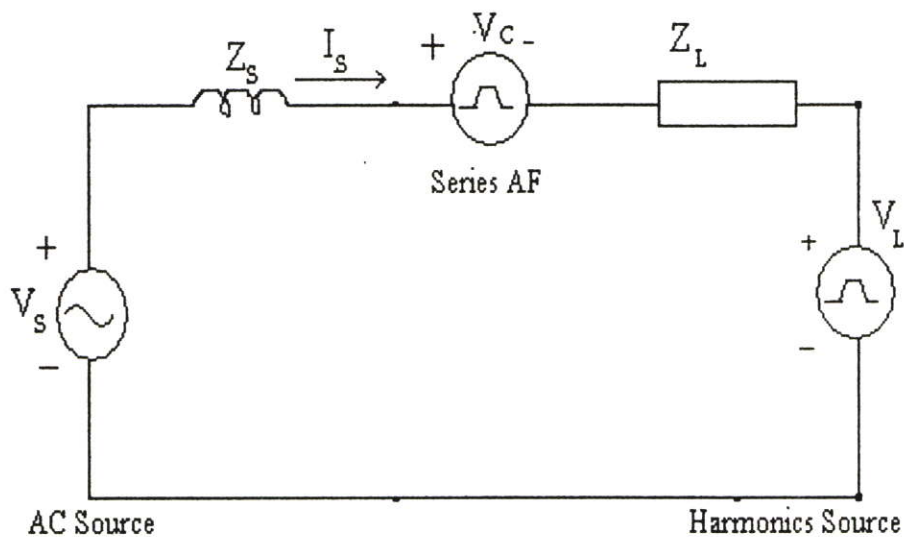
แอกทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม จะเป็นการต่อวงจรอนุกรมระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ กับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่เป็นโหลด เพื่อทำการบังคับกระแสแหล่งจ่ายให้มีความเป็นไซน์ซอซอดัล โดยที่แอกทีฟฟิลเตอร์อนุกรมนี้จะทำหน้าที่เป็นอิมพีแดนซ์สูงกับกระแสฮาร์มอนิกเพื่อกั้นขวางไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกไหลจากโหลดไปสู่อำนาจไฟฟ้ากระแสสลับและจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับไปสู่โหลดได้

แอดทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรมสามารถแบ่งตามประเภทการทำงานได้อีก 2 ประเภทคือ

1. ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกดังรูปที่ 2.12
2. ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 แสดงวงจรแอดทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก



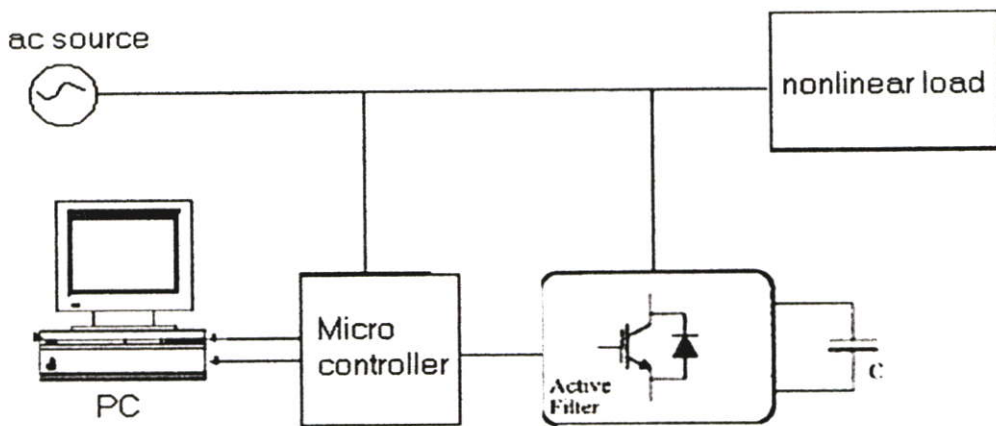
รูปที่ 2.13 แสดงวงจรแอดทีฟฟิลเตอร์แบบอนุกรม สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิก

บทที่ 3

ระบบลดค่าฮาร์มอนิกและหลักการที่ใช้

3.1 กล่าวนำ

ระบบลดค่าฮาร์มอนิกคือระบบที่นำมาใช้ในการตรวจวัด วิเคราะห์ และควบคุมฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าให้มีค่าลดลงอยู่ในระดับที่ต้องการ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ตัวกรองแบบแอคทีฟมาทำหน้าที่ชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบและใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด ดังรูปที่ 3.1

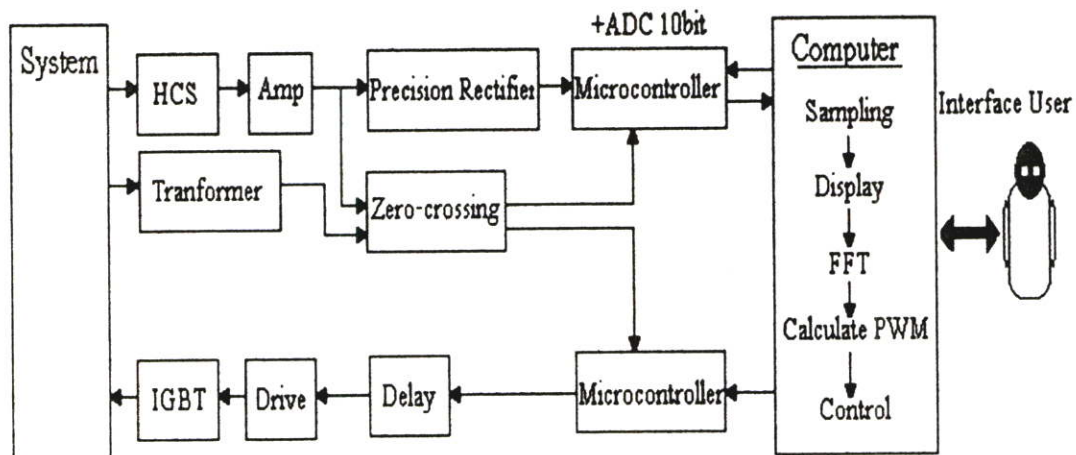


รูปที่ 3.1 ระบบลดค่าฮาร์มอนิก

3.2 ส่วนประกอบต่างๆของระบบลดค่าฮาร์มอนิก

ระบบลดค่าฮาร์มอนิกในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ 2 ส่วนดังรูปที่ 3.2 คือ

1. ส่วนของฮาร์ดแวร์
2. ส่วนของซอฟต์แวร์



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบลดค่าฮาร์มอนิก

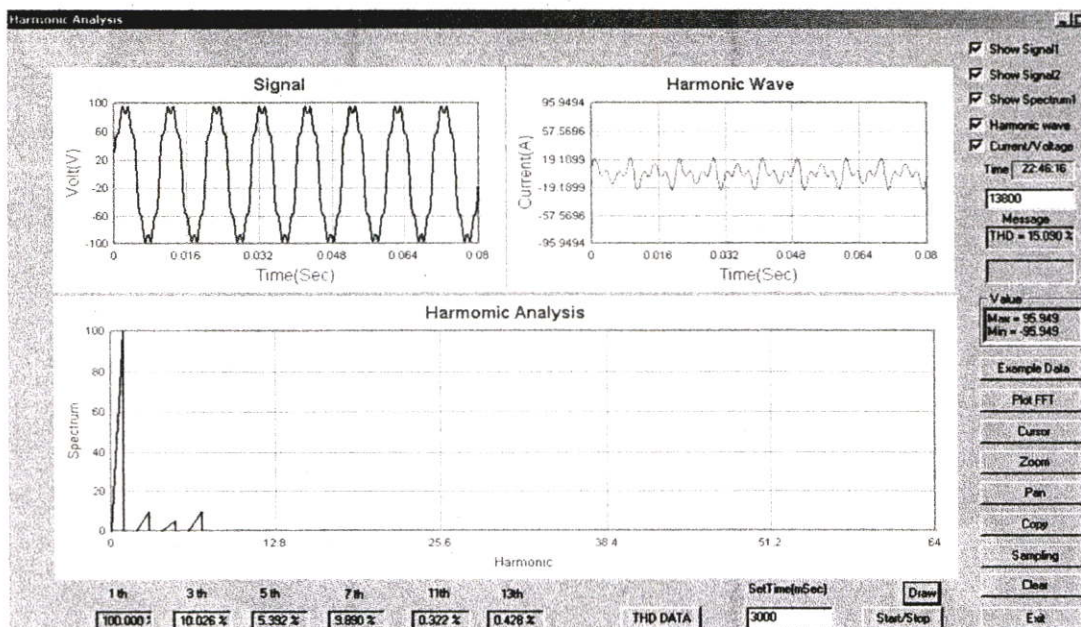
โดยในส่วนของฮาร์ดแวร์ประกอบไปด้วย

1. คอมพิวเตอร์
2. ไมโครคอนโทรลเลอร์
3. วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero-crossing)
4. วงจรเรียงกระแสเที่ยงตรงเต็มลูกคลื่น(Precision Full-Wave Rectifiers)
5. วงจรขยายสัญญาณ
6. ตัวตรวจวัดกระแสแบบ Hall effect
7. วงจรประวิงเวลา
8. วงจรขับเกท
9. ชุด IGBT ทำหน้าที่เป็นแอกทีฟฟิลเตอร์

ส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในระบบลดค่าฮาร์มอนิกนี้เขียนขึ้นโดยโปรแกรม Visual C++ 6 ซึ่งทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ ดังรูปที่ 3.3 และโปรแกรมซึ่งทำงานอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์จะโปรแกรมด้วยภาษาเบสิก โดยส่วนของซอฟต์แวร์จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบพร้อมทั้งติดต่อกับผู้ใช้โปรแกรมได้ด้วย

โดยสามารถแบ่งส่วนของโปรแกรมออกได้ดังนี้

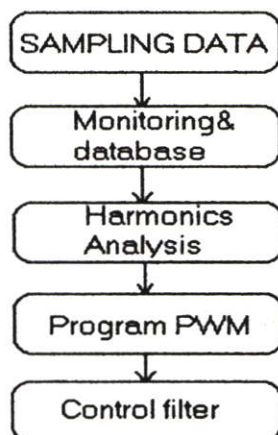
1. โปรแกรมแชมป์ลิ่งสัญญาณไฟฟ้า
2. โปรแกรมติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์
3. โปรแกรมวิเคราะห์ FFT
4. โปรแกรมแสดงผลของสัญญาณและฮาร์มอนิก
5. โปรแกรมคำนวณหาค่า PWM data(Switching index)
6. โปรแกรมสร้างสัญญาณพีคบลิวเอ็มเพื่อควบคุมแอกทีฟฟิลเตอร์



รูปที่ 3.3 ส่วนซอฟต์แวร์ของระบบลดค่าฮาร์มอนิก

3.3 หลักการทำงานของระบบลดค่าฮาร์มอนิก

หลักการทำงานของระบบลดค่าฮาร์มอนิกในวิทยานิพนธ์นี้แสดงดังรูปที่ 3.4 คือ ทำการตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าในระบบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และใช้คอมพิวเตอร์ทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นด้วยหลักการของ FFT (Fast Fourier Transform) หลังจากนั้นทำการคำนวณหาค่า Switching angle ที่เหมาะสมกับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น และสร้างสัญญาณพีคดับเบิ้ลยูเอ็ม ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ไปควบคุมชุด IGBT เพื่อชดเชยสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ โดยระบบทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.4 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของระบบลดค่าฮาร์มอนิก

3.4 ส่วนตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าในระบบ

ส่วนตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าในระบบ เป็นส่วนที่จะทำให้สามารถทราบถึงลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าในระบบได้ว่ามีลักษณะรูปคลื่นเป็นเช่นไร และสามารถนำข้อมูลของสัญญาณมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลอื่นๆ ที่ต้องการต่อไปได้ โดยในส่วนตรวจวัดค่าฮาร์มอนิกนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ PIC18F458 ซึ่งมี ตัวแปลงค่าแอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิตอยู่ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์มาทำการแชนเปลิ่งสัญญาณไฟฟ้าในระบบโดยแชนเปลิ่งสัญญาณเอาท์พุทจากตัวตรวจวัดกระแสแบบ Hall effect ที่ผ่านวงจรถ่ายสัญญาณออกมาในรูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและทำการส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้ไปยังคอมพิวเตอร์

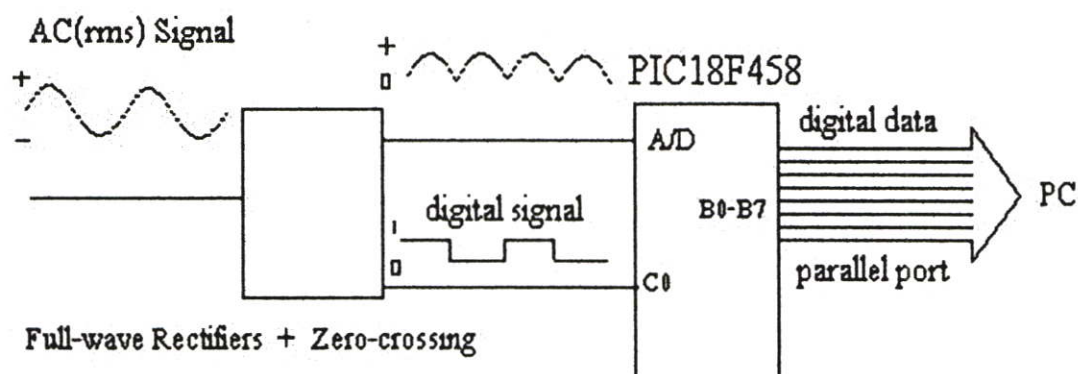
3.4.1 การแชนเปลิ่งสัญญาณ

การแชนเปลิ่งสัญญาณไฟฟ้าจะใช้อัตราการแชนเปลิ่งสัญญาณเท่ากับ 6.4 kHz ทำการแชนเปลิ่งสัญญาณไฟฟ้าจำนวน 8 ลูกคลื่นจะได้ข้อมูลทั้งหมด 1024 ข้อมูล เพื่อลดความผิดพลาดในการนำข้อมูลไปวิเคราะห์จึงต้องทำการแชนเปลิ่งสัญญาณมากกว่า 1 ลูก โดยจะเริ่มทำการแชนเปลิ่งสัญญาณเมื่อได้รับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ มีลักษณะการแชนเปลิ่งดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะการแชนเปลิ่งสัญญาณ

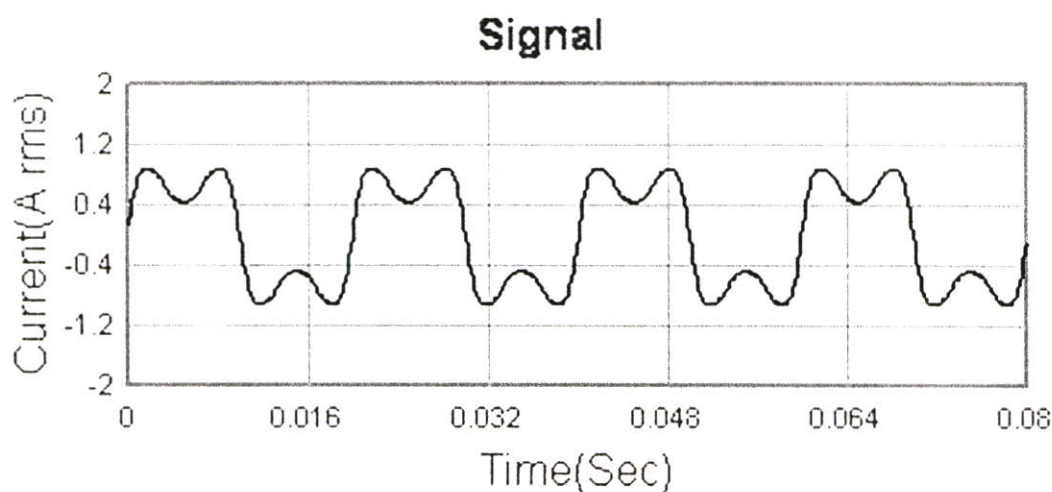
เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าที่ทำการวัดเป็นสัญญาณไฟกระแสสลับซึ่งมีทั้งไฟฝั่งบวกและไฟฝั่งลบแต่ทว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถรับสัญญาณไฟฝั่งลบได้จึงได้นำวงจรเรียงกระแสเที่ยงตรงเต็มลูกคลื่น (Precision Full-Wave Rectifiers) เข้ามาช่วยในการวัดสัญญาณ วงจรนี้จะช่วยในการแปลงสัญญาณไฟฟ้าในฝั่งลบให้กลับขึ้นมาอยู่ในฝั่งบวกทั้งหมดพร้อมทั้งมีวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero-crossing) ช่วยในการส่งสัญญาณบอกว่าสัญญาณขณะนั้นมีค่าเป็นฝั่งบวกหรือฝั่งลบ ดังรูปที่ 3.6 ซึ่ง สัญญาณอินพุทมีลักษณะเป็นไฟกระแสสลับ เมื่อผ่านวงจรเรียงกระแสเที่ยงตรงเต็มลูกคลื่น (Precision Full-Wave Rectifiers) และ วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero-crossing) จะให้สัญญาณเอาท์พุทออกมาสองสัญญาณคือสัญญาณแอนาลอกที่มีค่าอยู่ในฝั่งบวกและสัญญาณดิจิตอลที่ทำหน้าที่เป็นสัญญาณแฟลคบอกฝั่งบวกหรือฝั่งลบ หลังจากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะแปลงสัญญาณทั้งสองเป็นข้อมูลส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการแสดงผลของสัญญาณไฟฟ้าและวิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่ตรวจวัดจะถูกแปลงเป็นค่า RMS(Root Mean Square)



รูปที่3.6 ส่วนตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า

3.4.2 โปรแกรมแสดงผลของสัญญาณ

ส่วนของโปรแกรมแสดงผลของสัญญาณไฟฟ้านำข้อมูลที่รับมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์มาแสดงให้ผู้ใช้โปรแกรมได้เห็นลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าในระบบว่ามีลักษณะเช่นไร โดยแสดงเป็นกราฟระหว่างขนาดของสัญญาณไฟฟ้ากับเวลา ดังรูปที่3.7



รูปที่3.7 ส่วน โปรแกรมแสดงผลของสัญญาณ

3.4.3 การติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนของการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ทำการเชื่อมต่อกันผ่านพอร์ตขนานโดยใช้แอดเดรส 0378H ในการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ และ บิตที่4-7 ของแอดเดรส 0379H และบิตที่0-3 ของแอดเดรส 037AH ในการรับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังตารางที่3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงแอดเดรสที่ใช้ในการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์

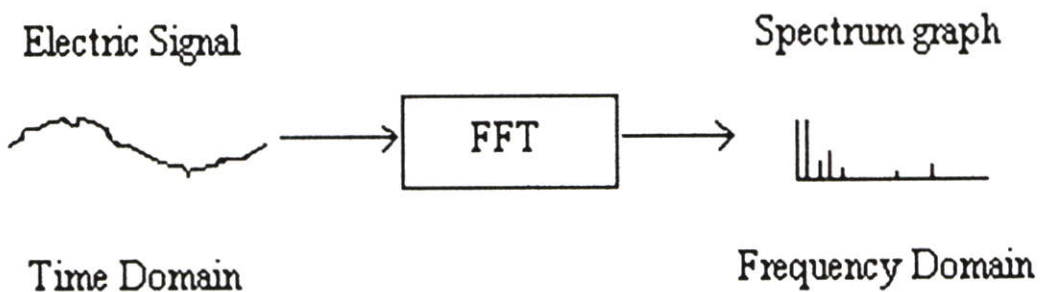
Address	Bit0	Bit1	Bit2	Bit3	Bit4	Bit5	Bit6	Bit7
0378H	Bit0-3 ใช้ในการควบคุมคอนโทรลเลอร์				Bit 4-7 ใช้ในการควบคุมฟิลเตอร์			
0379H	-	-	-	-	Bit 4-7 ใช้รับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์			
037AH	Bit0-3 ใช้รับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์				-	-	-	-

3.5 ส่วนของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น

ในส่วนของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้จะนำข้อมูลของสัญญาณมาทำการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของ FFT (Fast Fourier Transform) ด้วยคอมพิวเตอร์โดยแสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟของสเปกตรัมซึ่งจะทำให้ทราบค่าของฮาร์มอนิกต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบและช่วยให้สามารถคำนวณหาค่าองค์ประกอบความผิดเพี้ยนรวมของฮาร์มอนิก (Total Harmonic Distortion: THD) ของระบบไฟฟ้าได้

3.5.1 การวิเคราะห์ FFT (Fast Fourier Transform)

การวิเคราะห์ FFT (Fast Fourier Transform) จะสามารถแปลงค่าของสัญญาณในโดเมนของเวลาเป็นโดเมนของความถี่ได้ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงค่าของฮาร์มอนิกที่มีความถี่ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบที่ทำการวิเคราะห์ได้ ดังรูปที่ 3.8



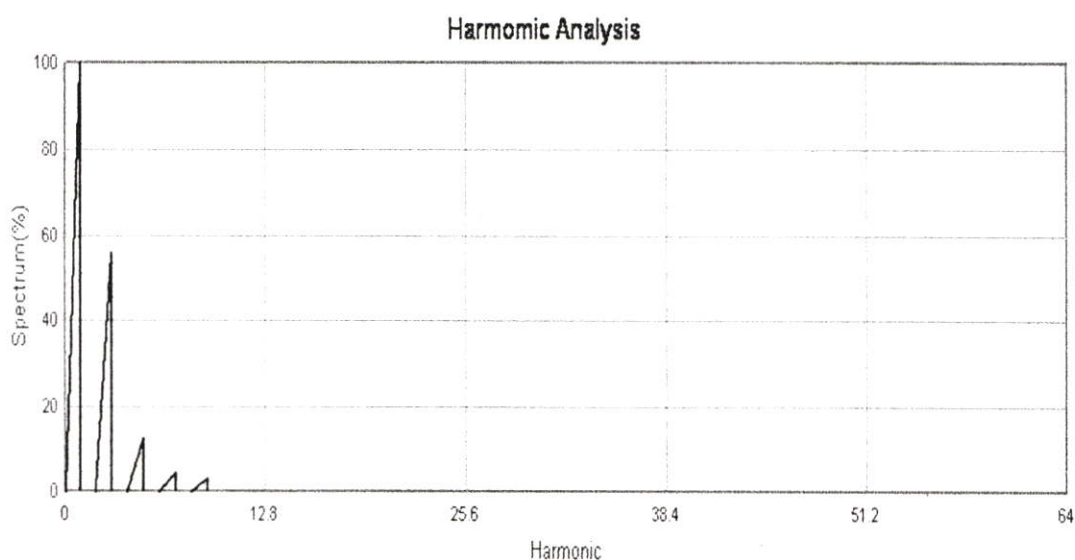
รูปที่ 3.8 การวิเคราะห์ FFT (Fast Fourier Transform)

3.5.2 โปรแกรมแสดงผลของฮาร์โมนิก

ส่วนของโปรแกรมแสดงผลของฮาร์โมนิกจะนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ FFT (Fast Fourier Transform) มาแสดงให้ผู้ใช้โปรแกรมได้เห็นค่าของฮาร์โมนิกต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ โดยแสดงเป็นกราฟระหว่างค่าขนาดของฮาร์โมนิกต่อความถี่ อีกทั้งยังมีส่วนที่แสดงค่าขนาดของฮาร์โมนิกในอันดับที่ให้ความสนใจเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับขนาดของความถี่มูลฐานอีกด้วย ดังรูปที่ 3.9 และ รูปที่ 3.10

1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th
100.00 %	55.87 %	12.34 %	4.42 %	3.11 %	0.16 %

รูปที่ 3.9 ส่วน โปรแกรมแสดงค่าขนาดของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.10 ส่วน โปรแกรมแสดงสเปกตรัมของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ

3.5.3 การคำนวณค่าองค์ประกอบความผิดเพี้ยนรวมของฮาร์โมนิก (Total Harmonic Distortion: THD)

ค่า Total Harmonic Distortion: THD เป็นดัชนีที่ใช้ในการบ่งชี้คุณภาพของความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ ในการหาค่า THD นี้จะต้องอาศัยการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์ เพื่อหาองค์ประกอบความถี่มูลฐาน และฮาร์โมนิกของรูปคลื่นสัญญาณ จึงจะสามารถนำมาคำนวณหาค่าออกมาได้ โดยถ้าเปอร์เซ็นต์ THD มีค่ามากแสดงว่ารูปคลื่นสัญญาณมีความผิดเพี้ยนมาก

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่า THD ของกระแสและแรงดัน คือสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} I_{n,rms}^2}{I_{1,rms}^2}} \quad (3.1)$$

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} V_{n,rms}^2}{V_{1,rms}^2}} \quad (3.2)$$

เมื่อ

THD คือ ค่าองค์ประกอบความผิดเพี้ยนรวมของฮาร์มอนิก

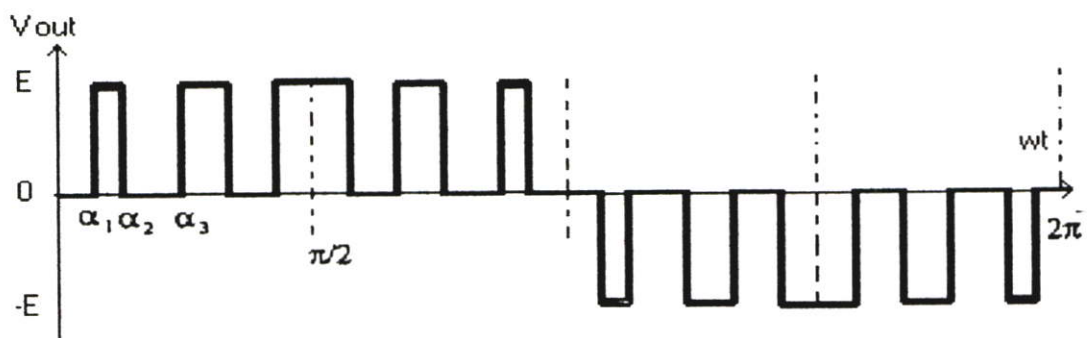
I_n คือ ค่าของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ n

V_n คือ ค่าของแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ n

3.6 ส่วนของการควบคุมแอกทีฟฟิลเตอร์

ส่วนของการควบคุมแอกทีฟฟิลเตอร์เป็นส่วนที่จะทำให้ ชุด IGBT มีการสวิทช์เปิดและปิดตามที่ต้องการเพื่อสร้างสัญญาณเข้าไปชดเชยกับสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบ โดยการควบคุม IGBT นั้นจะ ต้องทราบค่าของ ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบแล้วจึงทำการคำนวณหาค่า Switching angle ซึ่งเป็นค่ามุมการเปิดและปิดของ IGBT ที่จะทำให้ได้สัญญาณคล้ายสัญญาณของฮาร์มอนิกมากที่สุด

3.6.1 การคำนวณหาค่า Switching angle



รูปที่ 3.11 ลูกคลื่นพีคดับเบิ้ลยูเอ็ม

วิธีการคำนวณหา Switching angle ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำมาจากหลักการคำนวณลักษณะ
สัญญาณของลูกคลื่นพีคดับเบิลยูเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยมี 3 สถานะ คือ E, -E และ 0 มีมุม
การสวิตช์ที่ α ซึ่งลูกคลื่นพีคดับเบิลยูเอ็มที่ทำการคำนวณจะเป็นฟังก์ชัน $f(t)$ มีค่าไบนารีอยู่
ในช่วง $0 \leq t \leq \pi/2$ และมีความสมมาตรกันที่ $f(t) = f(\pi - t)$ และ $f(t) = -f(2\pi - t)$

จากคุณสมบัติของฟังก์ชันคี่ ฟังก์ชัน $f(t)$ จะสามารถเขียนเป็นอนุกรมฟูเรียร์ดังสมการ
ที่ 3.3 ซึ่งเป็นสมการเริ่มต้นในการที่จะทำการหาค่ามุมสวิตช์

$$f_{(t)} = \sum_{n=1}^{\infty} f_k \sin(kwt) \quad (3.3)$$

และจากคุณสมบัติการสมมาตรครึ่งลูกคลื่น f_k หาได้จากสมการที่ 3.4

$$f_k = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(t) \sin(kwt) d(wt) \quad (3.4)$$

การคำนวณพีคดับเบิลยูเอ็มจะทำการพิจารณาที่ตรงจุดนี้ ซึ่งก็คือการออกแบบลูกคลื่นพีค
ดับเบิลยูเอ็มฟังก์ชัน $f(t)$ ซึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ f_k จะเท่ากับค่าที่ถูกกำหนดซึ่ง f_k จะเป็น
ขนาดของฮาร์โมนิกในอันดับที่ k โดยที่ k คือจำนวนคี่ที่มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง $2n - 1$ และ n คือจำนวน
ของมุมสวิตช์ที่ทำการคำนวณในช่วง 90 องศา และในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การคำนวณมุมสวิตช์ 8 ค่า
ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณพัลส์ 16 ลูกใน 1 ลูกคลื่นสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม

จากสมการที่ 3.4 เมื่ออินทิเกรตแยกเป็นช่วงของแต่ละ α จะได้ออกมาเป็นสมการที่ 3.5

$$f_k = \frac{4E}{\pi k} \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} \cos k\alpha_i \quad (3.5)$$

เมื่อให้ $h_k = k\pi f_k / 4E$ และมีสมการจำนวน n สมการ กับตัวแปรจำนวน n ตัวคือ
 $\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$ พร้อมกับเงื่อนไข $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_n < \pi/2$ สมการที่ 3.5 จะเขียนได้เป็น
สมการที่ 3.6

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3 - \dots \cos \alpha_n &= h_1 \\ \cos 3\alpha_1 - \cos 3\alpha_2 + \cos 3\alpha_3 - \dots \cos 3\alpha_n &= h_3 \\ &\vdots \\ \cos(2n-1)\alpha_1 - \cos(2n-1)\alpha_2 \\ + \cos(2n-1)\alpha_3 - \dots \cos(2n-1)\alpha_n &= h_{2n-1} \end{aligned} \quad (3.6)$$

เมื่อให้ $\beta_i = \alpha_i$ สำหรับค่า i เป็นจำนวนคี่ และ $\beta_i = \pi - \alpha_i$ สำหรับค่า i ที่เป็นจำนวนคู่ จะทำให้เครื่องหมาย - ในสมการ 3.6 เป็นเครื่องหมาย + และเขียนได้สมการที่ 3.7

$$\begin{aligned} \cos \beta_1 + \cos \beta_2 + \cos \beta_3 + \dots + \cos \beta_n &= h_1 \\ \cos 3\beta_1 + \cos 3\beta_2 + \cos 3\beta_3 + \dots + \cos 3\beta_n &= h_3 \\ &\vdots \\ \cos(2n-1)\beta_1 + \cos(2n-1)\beta_2 \\ + \cos(2n-1)\beta_3 + \dots + \cos(2n-1)\beta_n &= h_{2n-1} \end{aligned} \quad (3.7)$$

จากนิยามของเชบิเชฟโพลิโนเมียลคือ $\cos nt = T_n(\cos t)$ เมื่อ T_n คือ อันดับที่ n ของเชบิเชฟโพลิโนเมียล และ ให้ $x_i = \cos \beta_i$ จะได้สมการที่ 3.8

$$\begin{aligned} T_1(x_1) + T_1(x_2) + \dots + T_1(x_n) &= h_1 \\ T_3(x_1) + T_3(x_2) + \dots + T_3(x_n) &= h_3 \\ &\vdots \\ T_{2n-1}(x_1) + T_{2n-1}(x_2) + \dots + T_{2n-1}(x_n) &= h_{2n-1} \end{aligned} \quad (3.8)$$

ขณะที่ดัชนีอันดับคี่ของเชบิเชฟโพลิโนเมียล คือ โพลิโนเมียลอันดับคี่ เราสามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_{2k-1}(x) = \sum_{m=1}^k c_{k,m} x^{2m-1} \quad (3.9)$$

เมื่อแทนสมการที่ 3.9 ลงในสมการที่ 3.8 ด้วยเหตุนี้สมการพีคับเบิ้ลยูเอ็มจะกลายเป็นสมการที่ 3.10

$$\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^k c_{k,m} \cdot x_i^{2m-1} = h_{2k-1}, \quad 1 \leq k \leq n \quad (3.10)$$

หรือ

$$\sum_{m=1}^k c_{k,m} \cdot s_{2m-1} = h_{2k-1}, \quad 1 \leq k \leq n \quad (3.11)$$

ที่

$$s_m = \sum_{i=1}^n x_i^m \quad (3.12)$$

s_m คือผลรวมของ $\{x_i\}$ ยกกำลัง m ในสมการที่ 3.12 ซึ่งจะเป็นรูปแบบของ สมการเชิงเส้นสำหรับ $s_{2m-1}, 1 \leq m \leq n$ ซึ่งค่า s_{2m-1} สามารถหาได้โดยแก้ระบบสมการเชิงเส้นสมการที่ 3.11 เมื่อให้ $\{s_1, s_3, \dots, s_{2n-1}\}$ จะหาคำตอบ $\{x_1, x_3, \dots, x_n\}$ ได้จาก ระบบสมการไม่เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ 3.13

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + \dots + x_n &= s_1 \\ x_1^3 + x_2^3 + \dots + x_n^3 &= s_3 \\ &\vdots \\ x_1^{2n-1} + x_2^{2n-1} + \dots + x_n^{2n-1} &= s_{2n-1} \end{aligned} \tag{3.13}$$

เมื่อหาค่า x_i ได้จะสามารถคำนวณหา α_i โดยค่าตัวแปร α_i จะสามารถหาได้จาก $\beta_i = \arccos x_i$ ที่ $\alpha_i = \beta_i$ สำหรับค่า i ที่อยู่ในช่วง 0 ถึง $\pi/2$ และ $\alpha_i = \pi - \beta_i$ สำหรับค่า i ที่อยู่ในช่วง $\pi/2$ ถึง π เนื่องจากความสมมาตรที่เกี่ยวข้องเนื่องถึง x_i ทุกๆ การเปลี่ยนลำดับของกลุ่มคำตอบ $\{x_i\}$ ก็ยังคงเป็นกลุ่มคำตอบอยู่ เช่นเดียวกับ β_i แต่ถึงอย่างไรก็ตามก็ยังจำเป็นที่จะต้องจัดลำดับของ β_i ให้เหมาะสมเช่น $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_n < \pi/2$ โดยที่ i เป็นจำนวนที่ $0 < \alpha_i < \pi/2$ จะให้ $0 < \beta_i < \pi/2$ และสำหรับ i เป็นจำนวนคู่ $0 < \alpha_i < \pi/2$ จะให้ $0 < \pi - \beta_i < \pi/2$ หรือ $\pi/2 < \beta_i < \pi$ ซึ่งเป็นแนวทางที่จะทำให้ได้ค่า α_i ที่มีการเรียงลำดับดังที่ต้องการจากค่า β_i

อย่างไรก็ตาม การออกแบบสมการที่ 3.13 ซึ่งเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อจะทำให้ได้ค่ากลุ่มคำตอบของ $\{x_i\}$ ต้องการนั้นไม่สามารถที่จะทำได้ง่ายๆ อย่างตรงไปตรงมา

การหาค่า S ในสมการที่ 3.13 แต่ละค่านั้นจะหาได้จากสมการที่ 3.11 โดยที่ $C_{k,m}$ คือสัมประสิทธิ์ของเชบิเชฟโพลิโนเมียลซึ่งหาได้จากตารางที่ 3.2

โดยตัวอย่างของค่า $C_{k,m}$ ในอันดับแรกๆ คือ $C_{1,1} = 1$, $C_{2,1} = -3$, $C_{2,2} = 4$, $C_{3,1} = 5$, $C_{3,2} = -20$, $C_{3,3} = 16$ เป็นต้น

ตารางที่ 3.2 Chebyshev Polynomials of the First Kind

Chebyshev Polynomials of the First Kind
$T_0(x) = 1$
$T_1(x) = x$
$T_2(x) = 2x^2 - 1$
$T_3(x) = 4x^3 - 3x$
$T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1$
$T_5(x) = 16x^5 - 20x^3 + 5x$
$T_6(x) = 32x^6 - 48x^4 + 18x^2 - 1$
$T_7(x) = 64x^7 - 112x^5 + 56x^3 - 7x$
$T_8(x) = 128x^8 - 256x^6 + 160x^4 - 32x^2 + 1$
$T_9(x) = 256x^9 - 576x^7 + 432x^5 - 120x^3 + 9x$
$T_{10}(x) = 512x^{10} - 1280x^8 + 1120x^6 - 400x^4 + 50x^2 - 1$
$T_{11}(x) = 1024x^{11} - 2816x^9 + 2816x^7 - 1232x^5 + 220x^3 - 11x$

การจะแก้ระบบสมการไม่เป็นเชิงเส้นนั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาความสัมพันธ์ก่อน ปัญหาต่างๆ ไปคือผลรวมของกำลังที่เชื่อมต่อกันคือสิ่งที่ทราบแล้ว เมื่อให้ค่า s_1, \dots, s_n จะหาค่า x_i ที่ต้องการได้จากสมการที่ 3.14

$$\begin{aligned}
 x_1 + x_2 + \dots + x_n &= s_1 \\
 x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 &= s_2 \\
 &\vdots \\
 x_1^n + x_2^n + \dots + x_n^n &= s_n
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

เมื่อแปลง $\{x_1, \dots, x_n\}$ กลับให้เป็นรากของโพลิโนเมียลจะได้สมการที่ 3.15

$$P(x) = x^n + p_1x^{n-1} + \dots + p_n = 0
 \tag{3.15}$$

$$s_1 + p_1 = 0$$

$$s_2 + p_1 s_1 + 2p_2 = 0$$

$$s_3 + p_1 s_2 + p_2 s_1 + 3p_3 = 0$$

ตัวอย่าง สัมประสิทธิ์ p_k สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} p_1 &= -s_1 \\ p_2 &= -\frac{1}{2}(s_2 + p_1 s_1) \\ p_3 &= -\frac{1}{3}(s_3 + p_1 s_2 + p_2 s_1) \\ &\vdots \\ p_k &= -\frac{1}{k}(s_k + p_1 s_{k-1} + \cdots + p_{k-1} s_1) \end{aligned} \quad (3.16)$$

หลังจากนั้นใช้หลักการของ newton's identities ทำให้ได้ระบบสมการที่สอดคล้องกัน ออกมาเป็นดังสมการที่ 3.17 ซึ่งเป็นระบบสมการเชิงเส้น

$$\begin{bmatrix} g_3 & -g_2 & g_1 \\ g_4 & -g_3 & g_2 \\ g_5 & -g_4 & g_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_4 \\ g_5 \\ g_6 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

ระบบสมการนี้ เกือบจะเป็นเมตริกแบบ Toeplitz มีเพียงสัญลักษณ์ของแถวที่เท่ากันที่ ต้องถูกแก้ไขให้เป็นระบบ Toeplitz ที่ถูกต้อง ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} g_3 & g_2 & g_1 \\ g_4 & g_3 & g_2 \\ g_5 & g_4 & g_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{p}_2 \\ \tilde{p}_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} g_4 \\ g_5 \\ g_6 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} g_n & \cdots & g_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{2n-1} & \cdots & g_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \vdots \\ \tilde{p}_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} g_{n+1} \\ \vdots \\ g_{2n} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

โดยที่ $p_1 = -\tilde{p}_1, p_2 = \tilde{p}_2, p_3 = -\tilde{p}_3$ ให้เป็นคำตอบของ p_i ระบบสมการนี้เป็นระบบสมการแบบ Toeplitz จะมีค่าในเส้นทแยงมุมในเมตริกคงที่ ค่า g_i ในเมตริกสามารถหาได้จาก

$$g_0 = e^{v_0} \quad (3.20)$$

$$g_i = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i k v_k g_{i-k} \quad (3.21)$$

เมื่อ $1 \leq i \leq m$ และทราบค่าของ s_i ตัวที่เป็นจำนวนคี่จะหา v_i ที่ $0 \leq i \leq 2n$ ได้จาก $v_{2i} = 0$ สำหรับ $0 \leq i \leq n$ และ $v_{2i-1} = -2s_{2i-1}/(2i-1)$ สำหรับ $1 \leq i \leq n$ เพราะฉะนั้นใช้ความสัมพันธ์ของสมการ 3.20 และ 3.21 ในการหาค่า g_i สำหรับ $0 \leq i \leq 2n$

3.6.2 ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรม คำนวณ PWM

การคำนวณหามุมสวิทช์ใน โปรแกรมมีขั้นตอนตามรูปที่ 3.12 ดังนี้

1. กำหนดค่า h แต่ละค่า จาก $h_k = k\pi f_k / 4E$ ซึ่ง กำหนดจากขนาดของ f_k ที่ต้องการ
2. หาค่า s_i แต่ละค่า จากสมการ 3.11
3. คำนวณค่า v_i แต่ละค่าจาก ค่า s_i, m
4. คำนวณค่า g_i แต่ละค่าจากสมการ 3.20 และ 3.21
5. นำค่า g_i ใส่ลงไปใน ระบบสมการแบบ Toeplitz จากสมการที่ 3.19
6. แก้ระบบสมการ Toeplitz จะได้คำตอบของ \tilde{p}_i
7. คำนวณค่า p_i จากค่า \tilde{p}_i แต่ละค่า โดยที่ $p_i = (-1)^i \tilde{p}_i$
8. นำค่า p_i ไปแทนในโพลิโนเมียล $P(x)$ สมการที่ 3.15
9. หารากของโพลิโนเมียลจะได้คำตอบ x_i
10. หาค่าของ α_i จาก $\beta_i = \arccos x_i$ และ $\alpha_i = \beta_i$ สำหรับค่า i ที่อยู่ในช่วง 0 ถึง $\pi/2$ และ $\alpha_i = \pi - \beta_i$ สำหรับค่า i ที่อยู่ในช่วง $\pi/2$ ถึง π
11. จัดลำดับคำตอบ α_i ตาม $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_n < \pi/2$
12. ขั้นตอนสุดท้ายแปลงค่า α_i ที่เป็นมุมมาเป็นค่าของเวลาที่จะทำการสวิทช์ IGBT

s1	v1	g1	Amplitude	Polynomial	Switch Angle	Calculate						
0.3927	-0.7854	-0.7854	0.5	0.3927	-0.3927000	12.655732						
0	0	0.30842658	1	Unit	-1.7252006	16.883328						
0.294525	-0.19635	-0.2770960	0	0	0.5894978	39.594480						
0	0	0.17006778	0	0	0.88952738	44.954084						
0.2454375	-0.098175	-0.1612249	0	0	-0.2499644	52.685926						
0	0	0.11256378	0.2	1.41372	-0.1402932	62.259091						
0.21475781	-0.0613593	-0.1099286	0	0	0.02563138	77.006648						
0	0	0.08183358	0	0	0.00214788	86.757321						
0.19880437	-0.0441787	-0.0826825	0	0								
0	0	0.06401328	0.081833	-0.10992	0.112563	-0.16122	0.170067	-0.277096	0.308426	-0.7854	p1	0.082688
0.19236164	-0.0349748	-0.0667398	0	-0.02922	0.003800	-0.05030	0.010600	-0.10990	0.034538	-0.48512	p2	0.019521
0	0	0.05305577	0	0	-0.00578	0.010495	-0.01926	0.043099	-0.06728	0.282388	p3	0.00427
0.19144125	-0.0294525	-0.0566966	0	0	0	0.004971	0.000210	0.026030	-0.00721	0.237200	p4	0.001521
0	0	0.04593368	0	0	0	0	0.001150	-0.00371	0.01368	-0.08148	p5	0.00028
0.19349774	-0.0257996	-0.0499448	0	0	0	0	0	-0.00186	0.00243	-0.05041	p6	9.10944
0	0	0.04104220	0	0	0	0	0	0	-0.00115	0.00805	p7	4.69226
			0	0	0	0	0	0	0	0.00429	p8	9.22668

รูปที่ 3.12 แสดงลำดับโปรแกรมการคำนวณค่ามุมการสวิตช์

3.6.3 การสร้างสัญญาณ PWM

ในการสร้างสัญญาณพีดีบีแอลยูเอ็มนี้จะใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวสร้างสัญญาณขึ้นมา โดยใช้ค่ามุมการสวิตช์ จากการคำนวณ PWM

ตัวอย่างการสร้างสัญญาณ PWM ที่ $n = 8$ ให้ค่ามุมการสวิตช์จากการคำนวณเป็นดังนี้

$$\alpha_1 = 17.9125$$

$$\alpha_2 = 21.4007$$

$$\alpha_3 = 36.1121$$

$$\alpha_4 = 42.7902$$

$$\alpha_5 = 54.8818$$

$$\alpha_6 = 64.1028$$

$$\alpha_7 = 74.4503$$

$$\alpha_8 = 85.1345$$

ที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz สัญญาณ 1 ลูกคลื่นจะใช้เวลา 0.02 วินาที สัญญาณ 1 ลูกคลื่นมี 360 องศา เพราะฉะนั้น 1 องศาจะใช้เวลา 55 ไมโครวินาที จะทำให้ได้

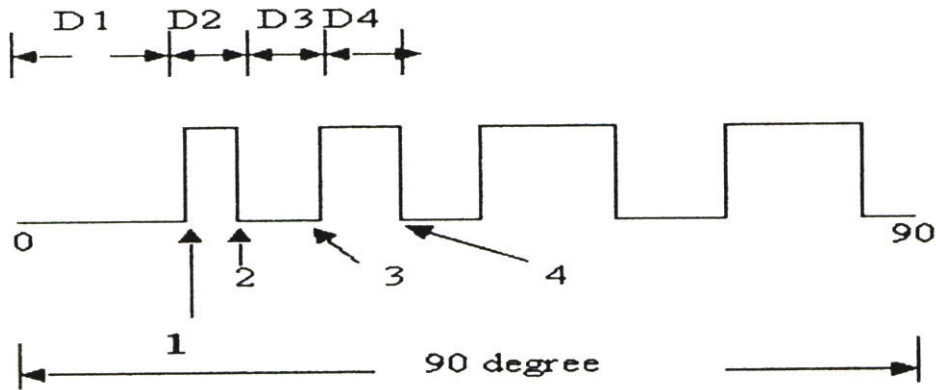
$$D1 = 17.9125 * 55 \text{ ไมโครวินาที}$$

$$D2 = (21.4007 - 17.9125) * 55 \text{ ไมโครวินาที}$$

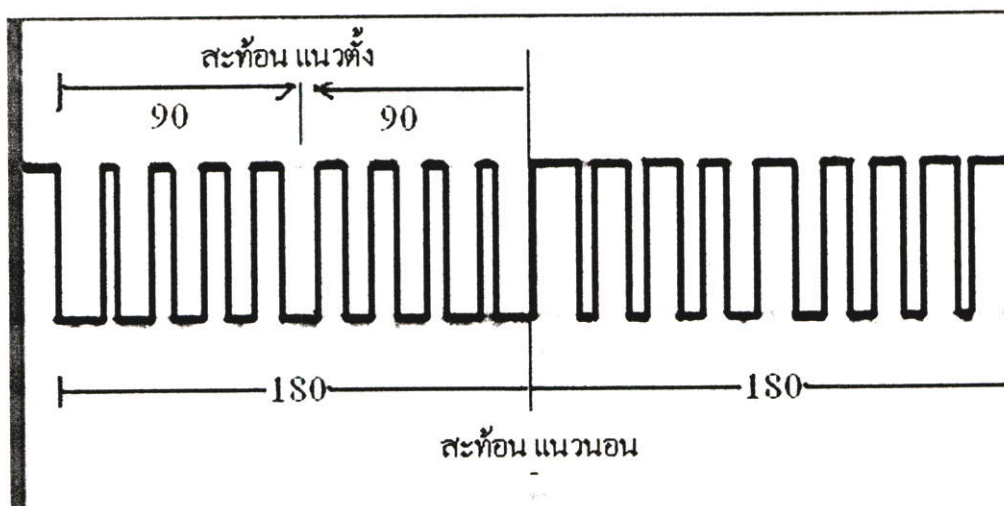
$$D3 = (36.1121 - 21.4007) * 55 \text{ ไมโครวินาที}$$

$$D4 = (42.7902 - 36.1121) * 55 \text{ ไมโครวินาที เป็นต้น}$$

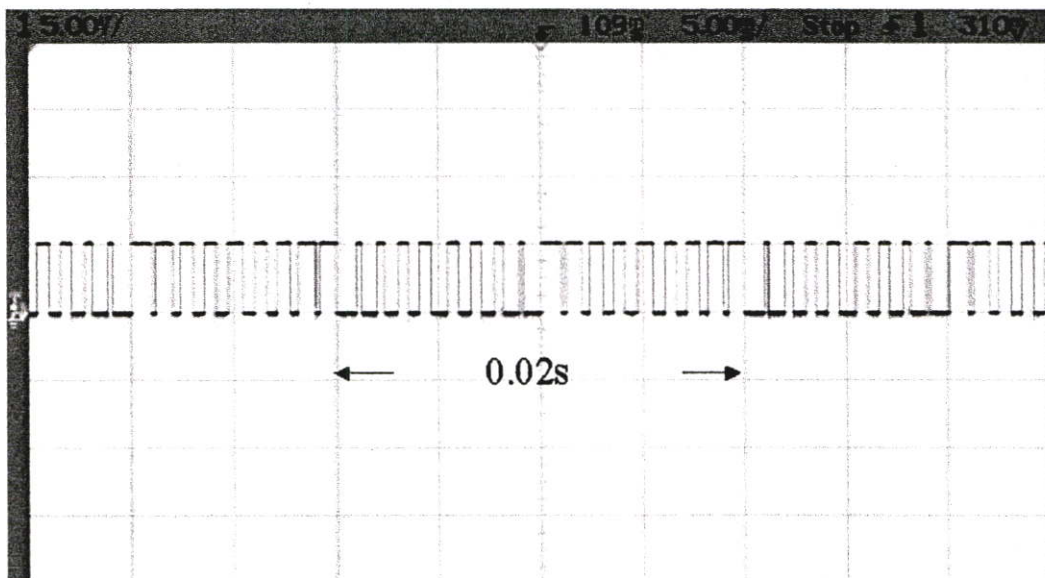
หลังจากนั้นนำค่า D ต่างๆ ไปใช้ในการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม ตามรูปที่ 3.13 ก ซึ่ง จะสร้างสัญญาณในช่วง 90 องศา หลังจากนั้นจะสร้างอีก 90 องศาในลักษณะสะท้อนกับ 90 องศา แรกในแนวตั้ง ถัดจากนั้นจะสร้างอีก 180 องศาในลักษณะที่สะท้อนกับ 180 องศาแรกใน แนวนอน ดังรูปที่ 3.13 ข และเมื่อใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการสร้างสัญญาณออกมาจะได้ดัง รูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 ก แสดงการสร้างสัญญาณ PWM ในช่วง 90 องศา



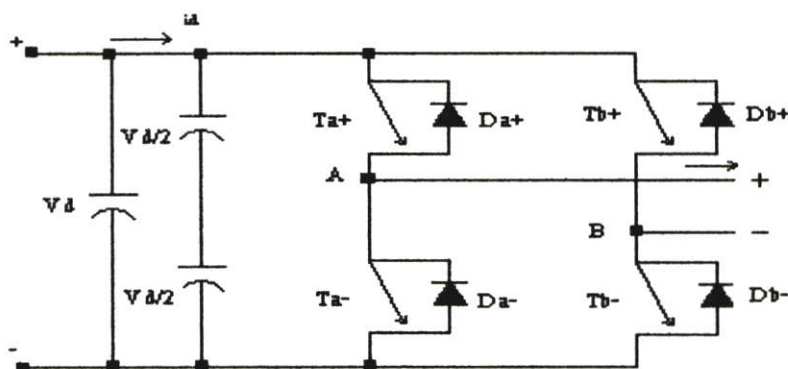
รูปที่ 3.13 ข แสดงการสร้างสัญญาณ PWM ในช่วง 360 องศา



รูปที่3.14 สัญญาณ PWM ที่ถูกสร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์

3.6.4 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์

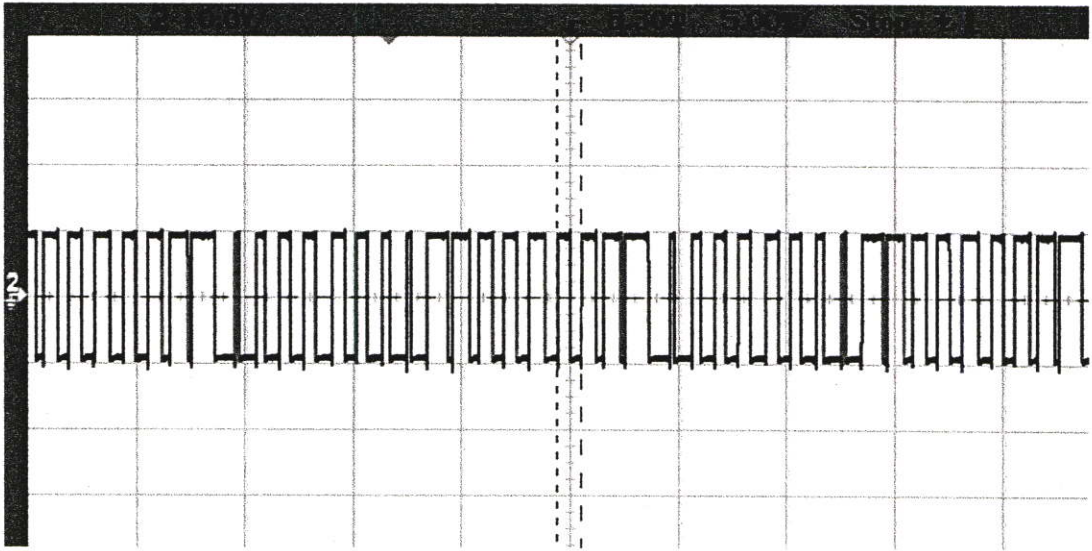
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ดังรูปที่ 3.15 มาทำหน้าที่เป็น แอคทีฟฟิลเตอร์โดยควบคุมการสวิตช์เปิดและปิดของ IGBT ด้วยสัญญาณพีดีบีเอ็มจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยการต่อผ่านวงจรประวิงเวลาและวงจรขั้วเกดในการควบคุม



รูปที่3.15 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์

เมื่อทำการควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ ด้วยการสวิตช์ซึ่ง แรงดันแบบไบโพลาร์ จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 3.16 ซึ่งสัญญาณมีเพียง 2 สถานะคือ + และ - และจากลักษณะของการออกแบบสัญญาณจะเห็นว่าไม่สามารถสร้าง สัญญาณที่เป็นฮาร์มอนิก เพียงอย่างเดียวได้ จะต้องมีสัญญาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 (ความถี่มูลฐาน) อยู่ด้วยเสมอ ซึ่งไม่ใช่ลักษณะสัญญาณที่เราต้องการ ดังนั้นเราจึงเลือก การสวิตช์ซึ่ง

แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ในการควบคุม IGBT มาช่วยในการสร้างสัญญาณที่มีเพียงฮาร์มอนิกที่เราต้องการและมี 3 สถานะ คือ + , - และ 0



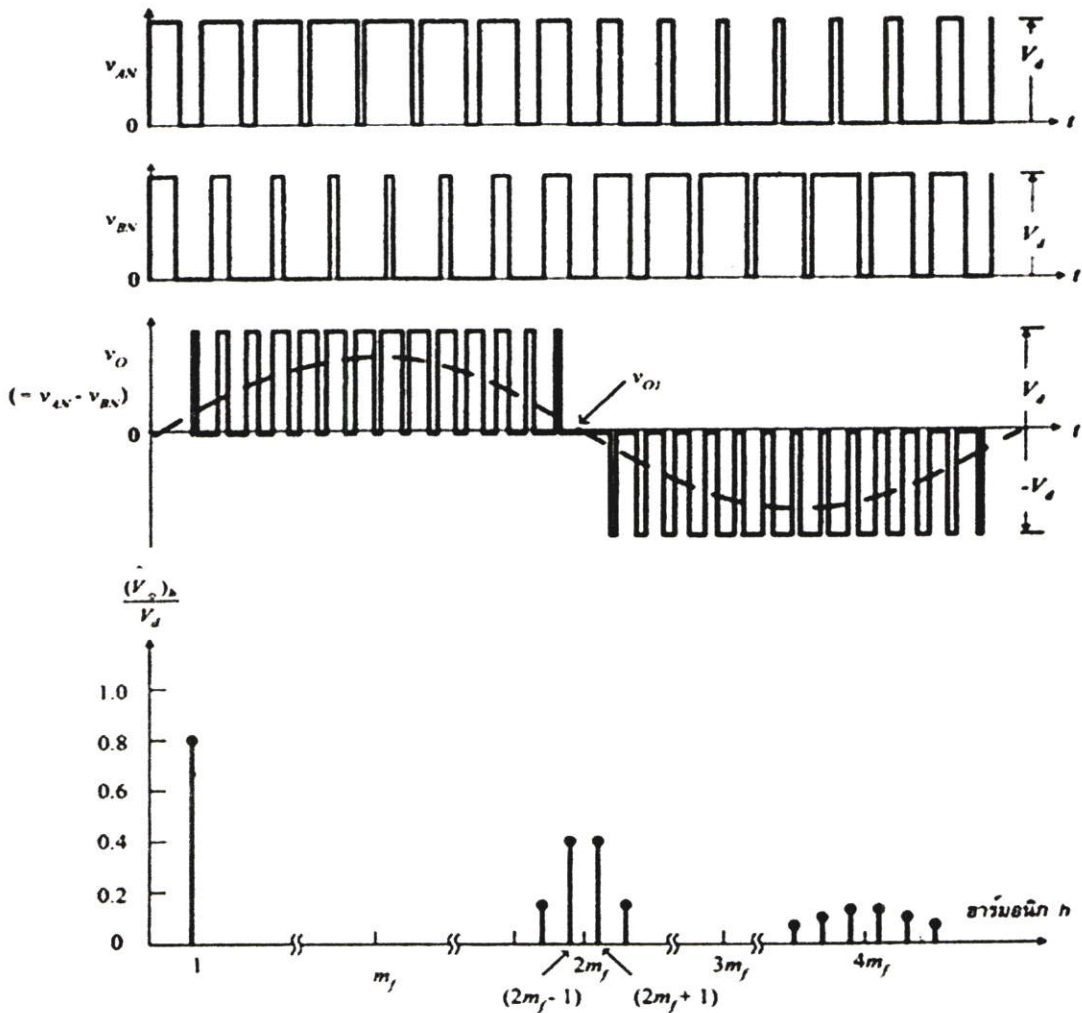
รูปที่ 3.16 สัญญาณจากการสวิตซ์แรงดันแบบไบโพลาร์

3.6.5 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ จะควบคุมสวิตซ์ในกึ่ง A กับกึ่ง B แยกสัญญาณควบคุมออกจากกัน คือสวิตซ์ในกึ่ง A จะถูกควบคุมด้วยสัญญาณ A-control ขณะที่สวิตซ์ในกึ่ง B ถูกควบคุมด้วยสัญญาณ B-control โดยป้อนสัญญาณ A+,A-B+,B- ตามรูปที่ 3.15 และมีเงื่อนไขการสวิตซ์ดังตารางที่ 3.3

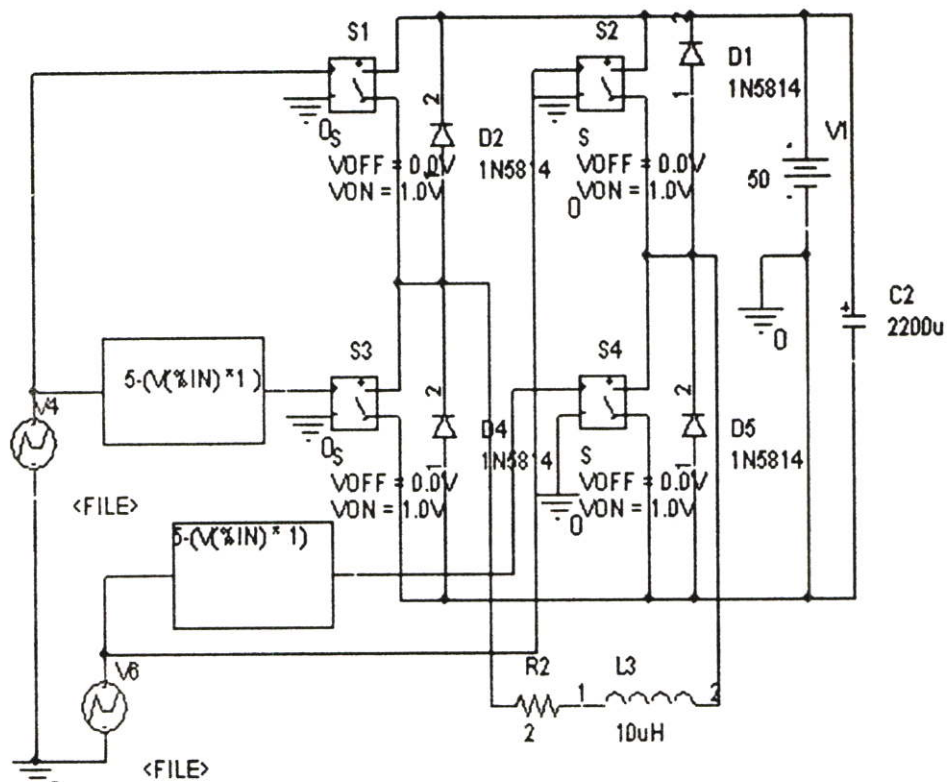
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการสวิตซ์แรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้านำออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์

เงื่อนไข	สวิตซ์นำกระแส	สวิตซ์นำกระแส	v_{AN}	v_{BN}	v_o
1	T_{A+}	T_{B-}	V_d	0	V_d
2	T_{A-}	T_{B+}	0	V_d	$-V_d$
3	T_{A+}	T_{B+}	V_d	V_d	0
4	T_{A-}	T_{B-}	0	0	0

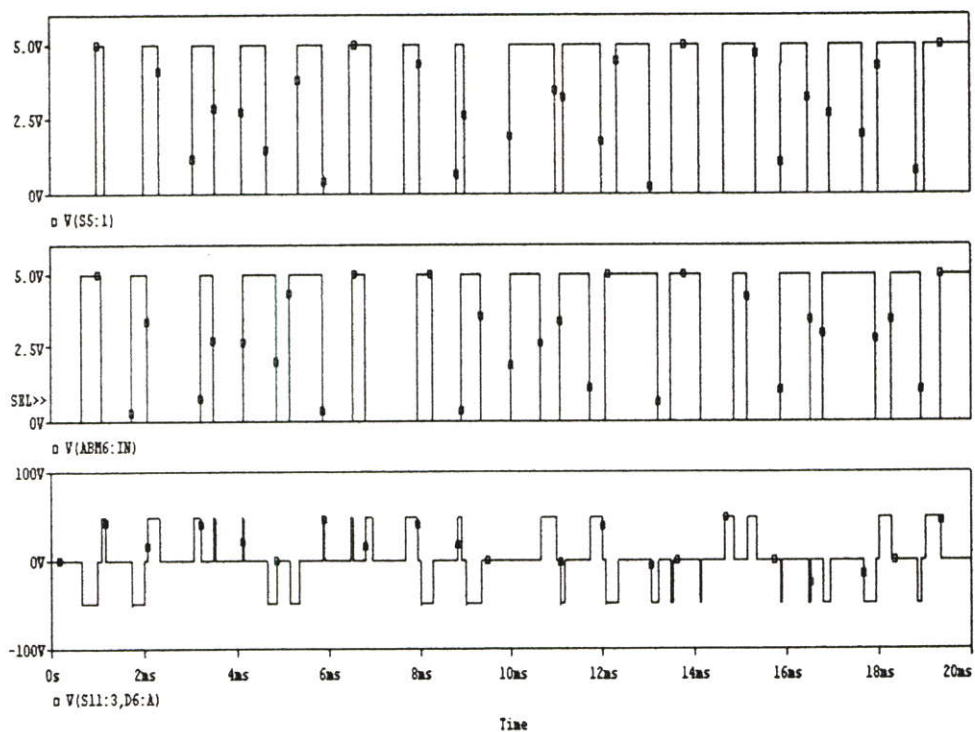


รูปที่ 3.17 การสวิตซ์ซึ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

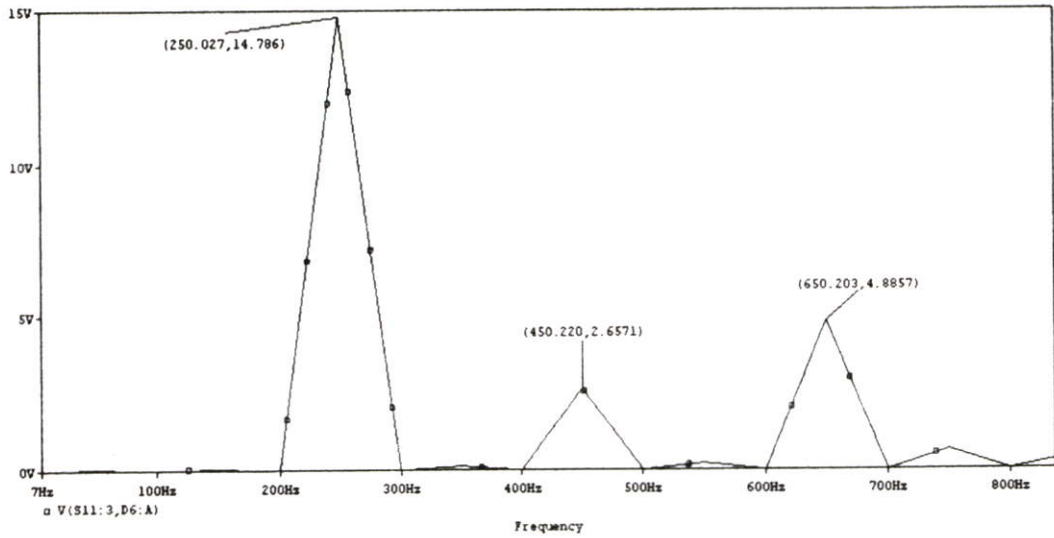
จากรูปที่ 3.17 จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุต v_o คือ ผล ของ $v_{AN} - v_{BN}$ ดังนั้นจึงได้นำวิธีตรงส่วนนี้มาใช้ในการสร้างสัญญาณฮาร์มอนิก โดยเราจะทำการคำนวณสัญญาณที่คืบเบิ้ลยูเอ็มออกมา 2 สัญญาณ โดยสัญญาณแรกคือ สัญญาณที่มีความถี่มูลฐานรวมกับฮาร์มอนิกที่เราต้องการ สัญญาณที่สองคือสัญญาณความถี่มูลฐานเพียงอย่างเดียว โดยให้ขนาดของสัญญาณความถี่มูลฐานของทั้งสองสัญญาณมีค่าเท่ากัน เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตทั้งสองผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์โดยทำการจำลองด้วยโปรแกรม Pspice ดังรูป 3.18 เอาต์พุตที่ออกมาจะเหลือเพียงสัญญาณของฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียวและมี 3 สถานะ คือ + , - และ 0 ดังรูปที่ 3.19 ก และ ข



รูปที่ 3.18 วงจรจำลองอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบพูลบริดจ์ทำการสวิตช์แบบซุนิโพลาร์ในโปรแกรมจำลอง PSpice



รูปที่ 3.19 ก สัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าและสัญญาณเอาต์พุตที่จากวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.19 ข แสดงสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

จากรูปที่ 3.19 ข จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจะมีเพียงที่ความถี่ 250 Hz 450 Hz และ 650 Hz ซึ่งเป็นฮาร์โมนิกอันดับที่ 5, 9 และ 13 ซึ่งกำหนดจะสร้างขึ้นมา ส่วนความถี่มูลฐานที่ 50 Hz จะหายไป ซึ่งทำให้เราสามารถสร้างฮาร์โมนิกได้ตามที่ต้องการและนำไปใช้ในการแก้ปัญหาฮาร์โมนิกต่อไปได้

บทที่ 4

วงจรต่างๆ ที่ใช้ในระบบลดค่าฮาร์มอนิก

4.1 วงจรที่ใช้ในระบบลดค่าฮาร์มอนิก

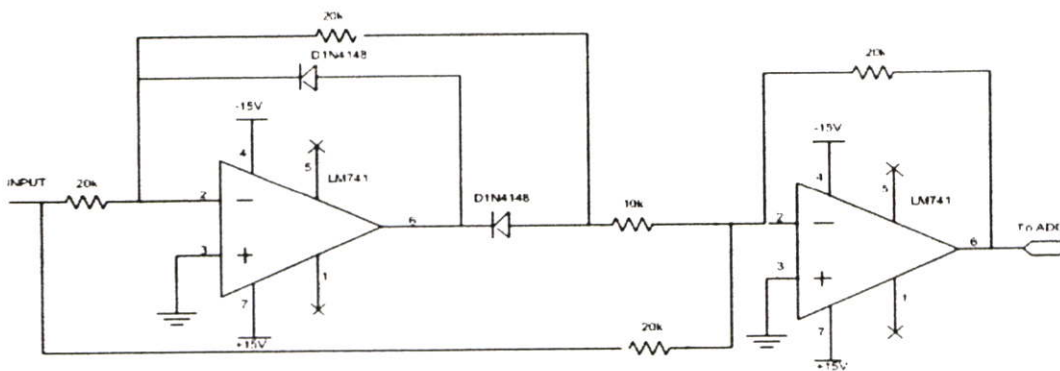
วงจรที่ใช้ในระบบลดค่าฮาร์มอนิกประกอบไปด้วย

1. วงจรเรียงกระแสที่เที่ยงตรงเต็มลูกคลื่น (Precision Full-Wave Rectifier)
2. วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero-crossing)
3. วงจรประวิงเวลา
4. วงจรวงจรขั้วเกต
5. วงจรกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทิฟ
6. ตัวตรวจวัดกระแสและวงจรขยาย

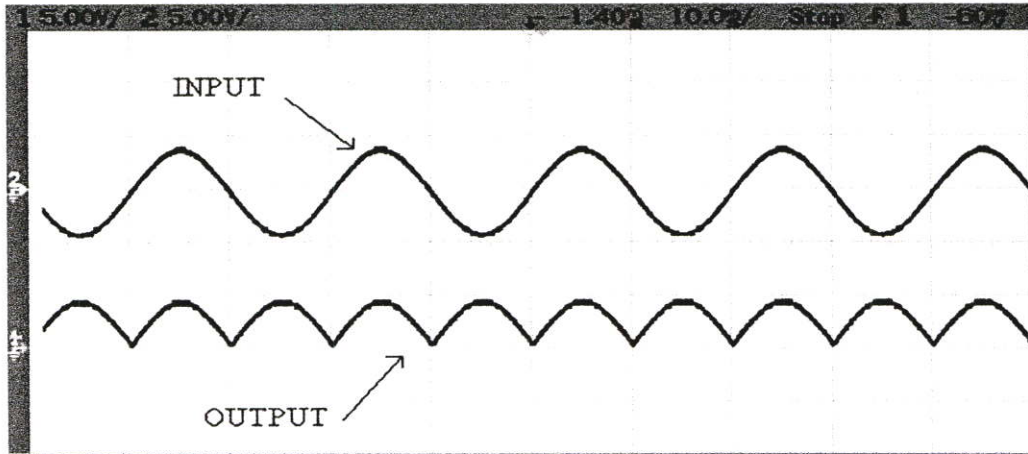
4.2 วงจรเรียงกระแสที่เที่ยงตรงเต็มลูกคลื่น (Precision Full-Wave Rectifier)

วงจรเรียงกระแสที่เที่ยงตรงเต็มลูกคลื่น (Precision Full-Wave Rectifier) ในรูปที่ 4.1 นี้จะใช้ในส่วนของการตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าในระบบเนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ไม่สามารถวัดสัญญาณไฟฟ้าในฝั่งลบได้ จึงนำวงจรนี้มาช่วยในการตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าในฝั่งลบ โดยใช้คู่กับวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero-crossing) เพื่อเป็นตัวบอกฝั่งบวกและฝั่งลบ ของสัญญาณ โดยวงจรเรียงกระแสเต็มลูกคลื่นนี้จะรับคลื่นสัญญาณอินพุตไฟสลับแล้วส่งผ่านเป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่เป็นเฉพาะสัญญาณฝั่งบวกหรือฝั่งลบเพียงอย่างเดียว ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มลูกคลื่นแบบบวกดังสมการที่ 4.1 โดยมีลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับอินพุตดังรูปที่ 4.2

$$V_{out} = |V_{in}| \quad (4.1)$$

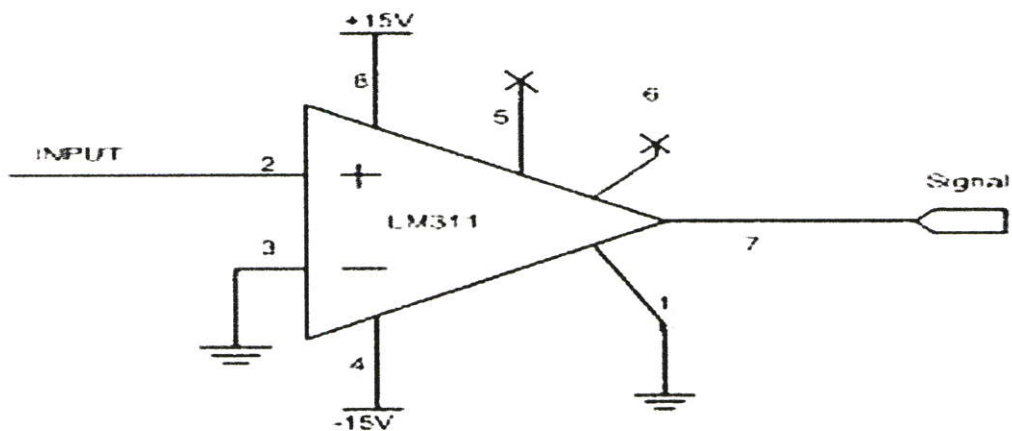


รูปที่ 4.1 วงจรเรียงกระแสที่เที่ยงตรงเต็มลูกคลื่น (Precision Full-Wave Rectifier)



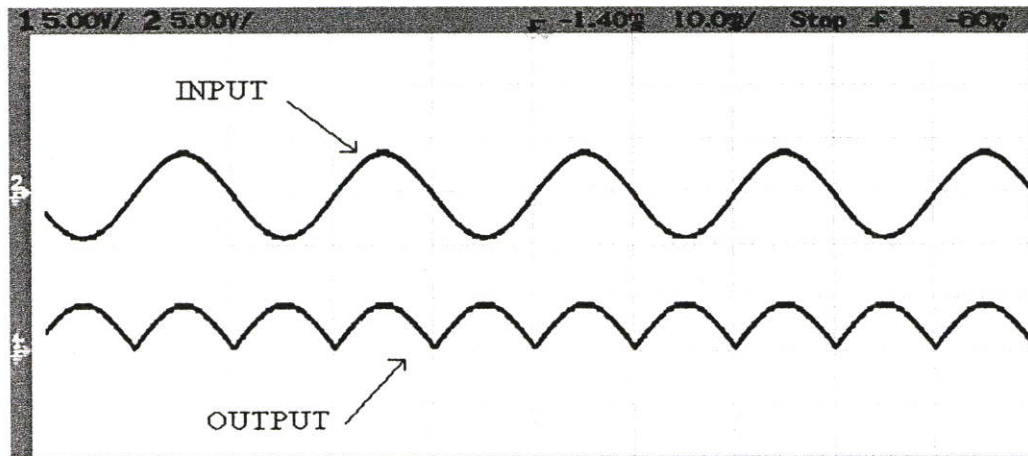
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อผ่านวงจรเรียงกระแสที่ขึงตรงเต็มลูกคลื่น

4.3 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero-crossing)



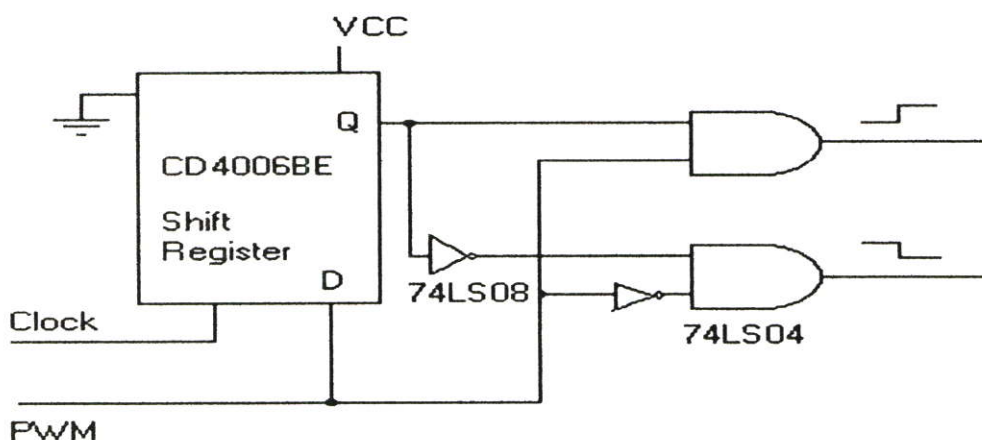
รูปที่ 4.3 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์

วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ทำหน้าที่บอกฝั่งบวกและฝั่งลบของสัญญาณอินพุทที่จะเข้ามาที่ส่วนตรวจวัดสัญญาณ โดยวงจรนี้จะส่งสัญญาณให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในส่วนของการตรวจวัดสัญญาณและในส่วนของการสร้างสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม โดยวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ (zero-crossing) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ไอซีเบอร์ LM311 แสดงดังรูปที่ 4.3 และมีสัญญาณอินพุทและเอาต์พุตดังรูปที่ 4.4 ก และ ข



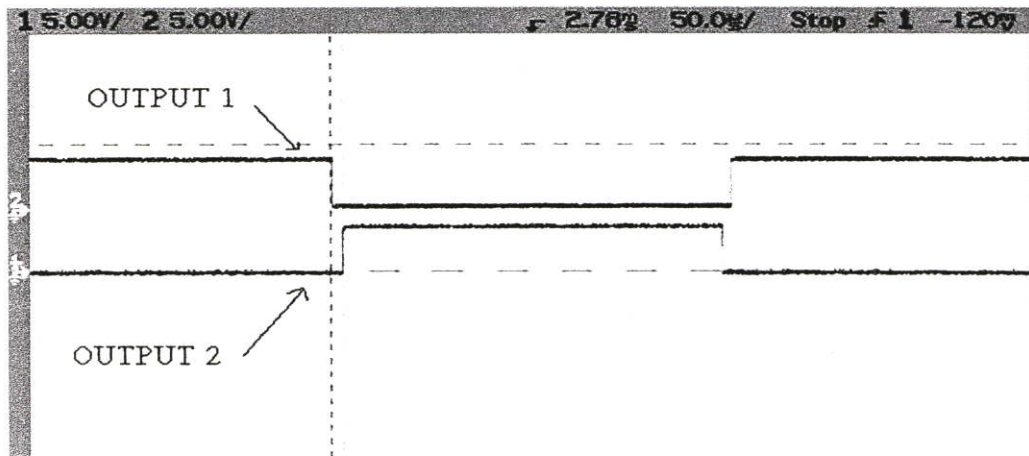
รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสที่ขั้วตรงเต็มลูกคลื่น

4.4 วงจรประวิงเวลา



รูปที่ 4.5 วงจรประวิงเวลา

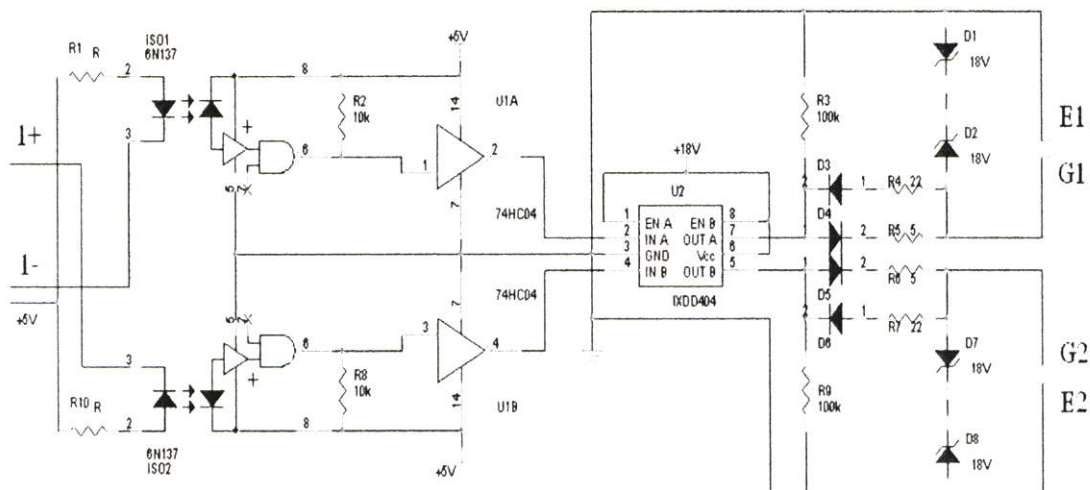
วงจรประวิงเวลาในรูปที่ 4.5 เป็นวงจรที่ใช้ในการแยกสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มที่จะนำไปควบคุมการสวิตช์อุปกรณ์สวิตช์กำลังไอจีบีทีตัวบนและล่างในกึ่งเดียวกัน โดยทำหน้าที่สร้างสัญญาณประวิงเวลาเพื่อป้องกันการทำงานพร้อมกันในขณะที่เปลี่ยนสถานะการทำงานของไอจีบีที ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นภายในกึ่งช่วงขณะ มีผลทำให้อุปกรณ์สวิตช์กำลังเกิดความเสียหายได้ การทำงานของวงจรนี้อธิบายได้คือ สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม ที่เป็นสัญญาณอินพุตถูกป้อนเข้าไอซีเบอร์ CD4006BE ซึ่งเป็น shift register มีคุณสมบัติเลื่อนบิต ทำให้เกิดการประวิงเวลาขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้เลือกสัญญาณประวิงเวลาเท่ากับ 6 ไมโครวินาที หลังจากนั้นทำให้สัญญาณเอาต์พุต 2 สัญญาณมีเฟสทิศทางตรงข้ามกัน และนำไป เข้าแอนแอกกับสัญญาณอินพุต ซึ่งเอาต์พุตที่ได้ทั้งสองสัญญาณดังรูปที่ 4.6 จะถูกส่งไปที่วงจรขับถัดต่อไป



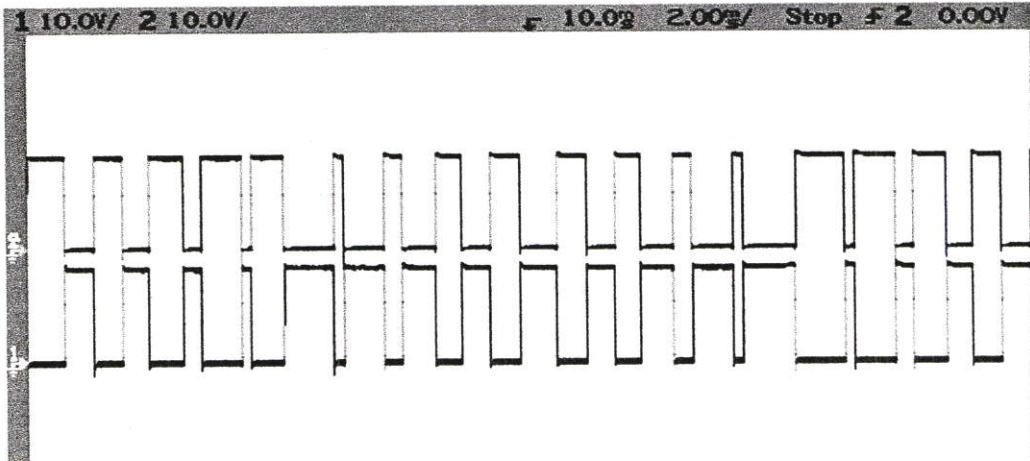
รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณเปรียบเทียบเอาต์พุตทั้งสองสัญญาณของวงจรประวิงเวลา

4.5 วงจรขับเคลื่อน

วงจรขับเคลื่อนในรูปที่ 4.7 เป็นวงจรที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์กำลัง โดยใช้อปโตไดโอดเบอร์ 6N137 รับสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มจากวงจรประวิงเวลา และผ่านไอซี 7404 เพื่อกลับสัญญาณ หลังจากนั้นจะผ่านไอซีเบอร์ IXDD404 ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้ในการขับ IGBT โดยส่งสัญญาณเอาต์พุตขนาด 18 โวลต์ออกไปยังขาเกตของ IGBT แต่ละตัวดังรูปที่ 4.8 โดยที่สัญญาณ 2 สัญญาณที่จะควบคุม IGBT 2 ตัวบนจะแยกหม้อแปลงไฟเลี้ยงคนละลูก ส่วนสัญญาณอีก 2 สัญญาณที่จะควบคุม IGBT 2 ตัวล่างจะใช้ไฟเลี้ยงจากหม้อแปลงเดียวกัน



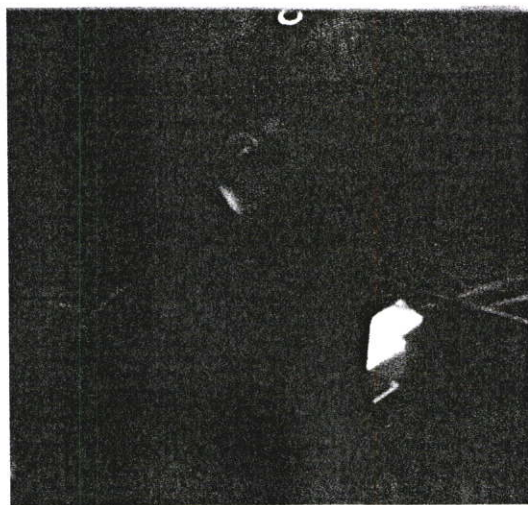
รูปที่ 4.7 วงจรขับเคลื่อน



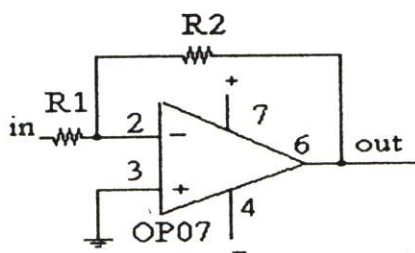
รูปที่ 4.8 สัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง

4.6 ตัวตรวจวัดกระแสและวงจรถยาย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ตัวตรวจวัดกระแสแบบ Hall effect ดังรูปที่ 4.9ก มาทำหน้าที่วัดสัญญาณของกระแสไฟฟ้าในระบบ โดยมีสัดส่วนของแรงดันต่อกระแสคือ 4 โวลต์ ต่อ 100 แอมป์ เช่น เมื่อมีกระแสไหลผ่าน 1 แอมป์ ตัวตรวจวัดจะให้เอาต์พุต 40 มิลลิโวลต์ หลังจากนั้นใช้วงจรถยายแบบ Inverting ในรูปที่ 4.9 ข มาทำการขยายสัญญาณ โดยมี อัตราการขยาย คือ $-R2/R1$ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้อัตราขยาย 50 เท่า หลังจากนั้นจะนำไปหาร 2 เมื่อแสดงสัญญาณออกทางคอมพิวเตอร์ เพื่อให้แสดงค่าของสัญญาณออกมาในสัดส่วนที่ถูกต้อง

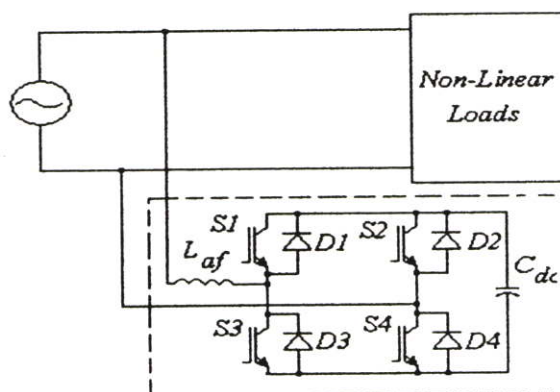


รูปที่ 4.9 ก ตัวตรวจวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบ Hall effect



รูปที่ 4.9 ข วงจรขยายสัญญาณแบบ Inverting

4.7 วงจรกำลังของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ



รูปที่ 4.10 วงจรกำลังของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ

ส่วนประกอบของวงจรกำลังมีหน้าที่และหลักการทำงานดังนี้

4.7.1 ตัวเก็บประจุไฟตรง(C_{dc})

ในอดีตที่ผ่านมาระบบจ่ายกำลังงานรีแอคทีฟหรือกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองพาสซีฟจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ประเภทพาสซีฟที่มีขนาดใหญ่ จากปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวเก็บพลังงานมีขนาดเล็ก ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวก็คือตัวเก็บประจุไฟกระแสตรงที่ใช้เป็นตัวเก็บพลังงาน โดยขนาดขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอคทีฟและชนิดของโหลด

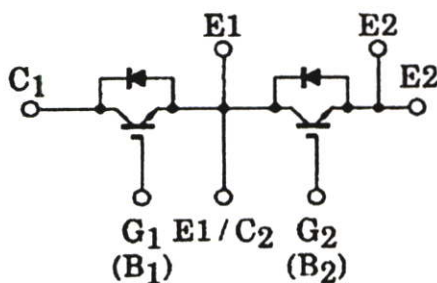
4.7.2 ตัวเหนี่ยวนำกรอง(L_{af})

การเชื่อมโยงระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่ายโดยผ่านตัวเหนี่ยวนำกรองที่ทำหน้าที่กรองกระแสรีปเปลที่เกิดจากการสวิทช์ชิ่งออก ทำให้กระแสชดเชยที่จ่ายโดยอินเวอร์เตอร์มีความเรียบมากขึ้นและเพื่อให้ผลตอบสนองที่ตีทางไดนามิกขนาดของตัวเหนี่ยวนำควรมีขนาดเล็กถ้า

เป็นไปได้แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีขนาดเล็กเกินไปจะไม่สามารถกำจัดกระแสรีปเปลต์ที่เกิดจากการสวิตช์ได้จึงควรมีการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน

4.7.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

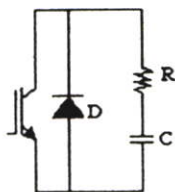
หลักการทํางานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าก็คือ ควบคุมกระแสของวงจรรองรับให้มีค่าตามส่วนควบคุมกำหนด โดยแปลงแรงดันขั้วไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟสลับด้วยเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์(Pulse Width Modulation; PWM) ในการออกแบบเลือกใช้ทรานซิสเตอร์กำลังไอจีบีที ของโตชิบารุ่น MG50J2YS50 ซึ่งภายในประกอบด้วย IGBT 2 ตัวคู่กันลักษณะฮาลฟบริดจ์ ดังรูปที่ 4.11 ขนาดพิกัดทนแรงดัน 600 โวลต์ รองรับกระแส 50 แอมแปร์ จำนวน 2 ชุดนำมาต่อกันแบบฟูลบริดจ์ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.11 วงจรภายในของ ไอจีบีที MG50J2YS50

4.7.4 วงจรสแน็บเบอร์

วงจรสแน็บเบอร์เป็นวงจรที่มีความสำคัญส่วนหนึ่งในการสวิตช์ซึ่งความถี่สูงเนื่อง จากการสวิตช์ซึ่งความถี่สูงในช่วงแรงดันสูงจะเกิด สไปค์โวลต์เตจ (spike voltage) หรือกระแส สไปค์ (spike current) ทำให้อัตราการเพิ่มของแรงดันต่อเวลา dv/dt และอัตราการเพิ่มของกระแสต่อเวลา di/dt เพิ่มขึ้นสูงอย่างมาก ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อทรานซิสเตอร์กำลังในวงจรได้จึงนำ วงจรสแน็บเบอร์มาต่อเพื่อที่จะลดค่า dv/dt และ di/dt ให้มีค่าน้อยลงพอที่วงจรจะทำงานได้โดยที่ ทรานซิสเตอร์กำลังจะไม่เกิดความเสียหาย ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรสแน็บเบอร์แบบขนานดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 วงจรสแน็บเบอร์แบบขนาน

4.8 รูปภาพฮาร์ดแวร์ของวิทยานิพนธ์

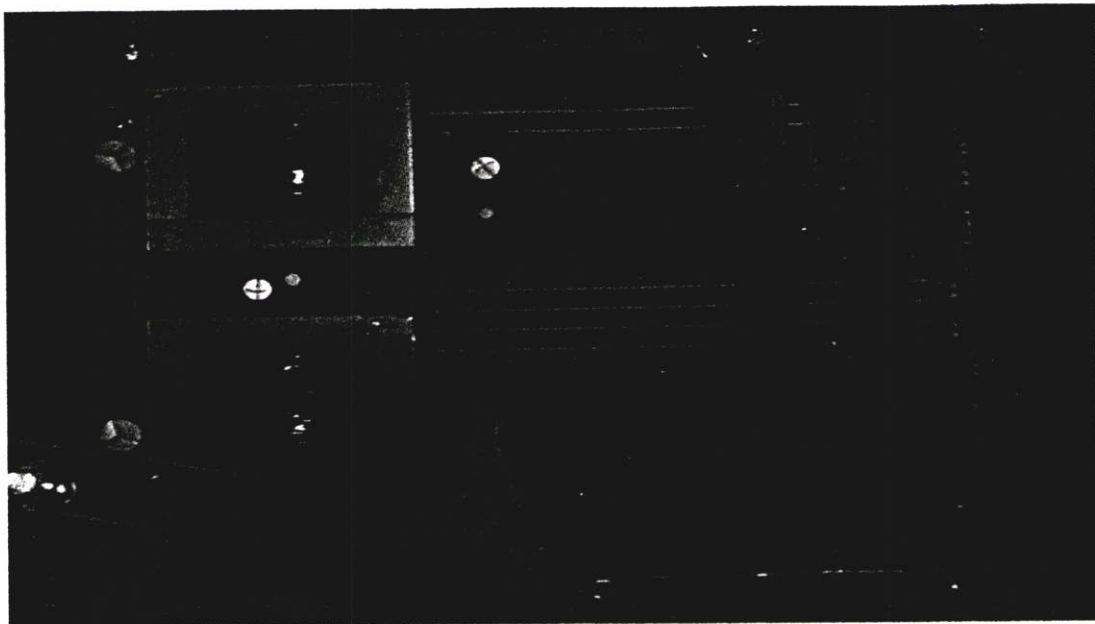
การทดลองของวิทยานิพนธ์นี้ ได้แสดงอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองของวิทยานิพนธ์เช่น วงจรกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ วงจรควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรขับเคลื่อน เป็นต้น



รูปที่ 4.13 แสดงอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองของวิทยานิพนธ์



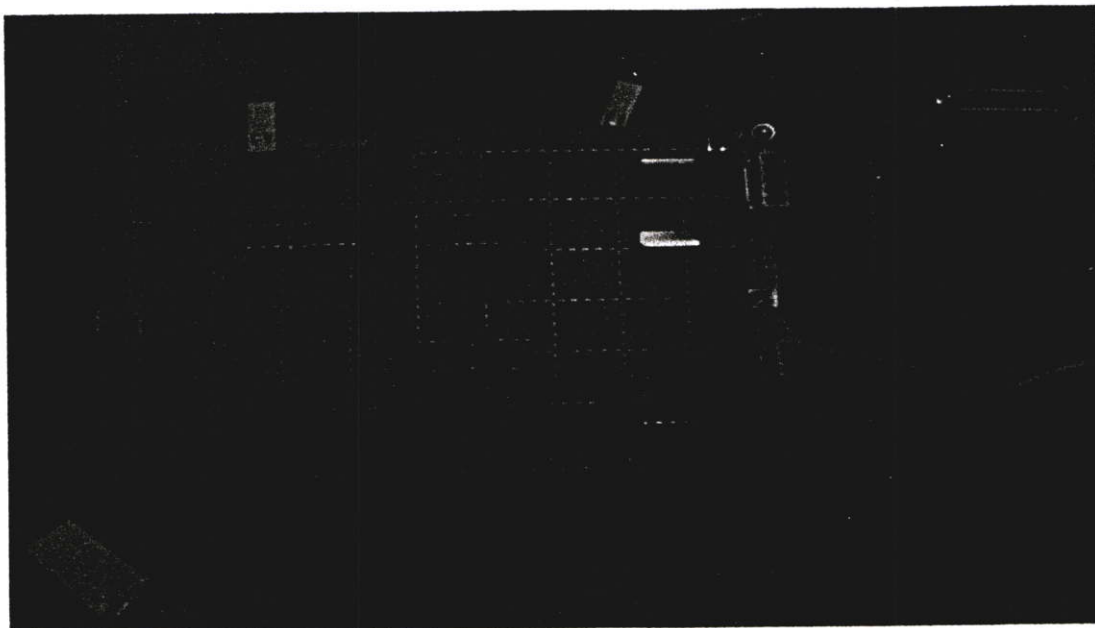
รูปที่ 4.14 แสดงวงจรควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์



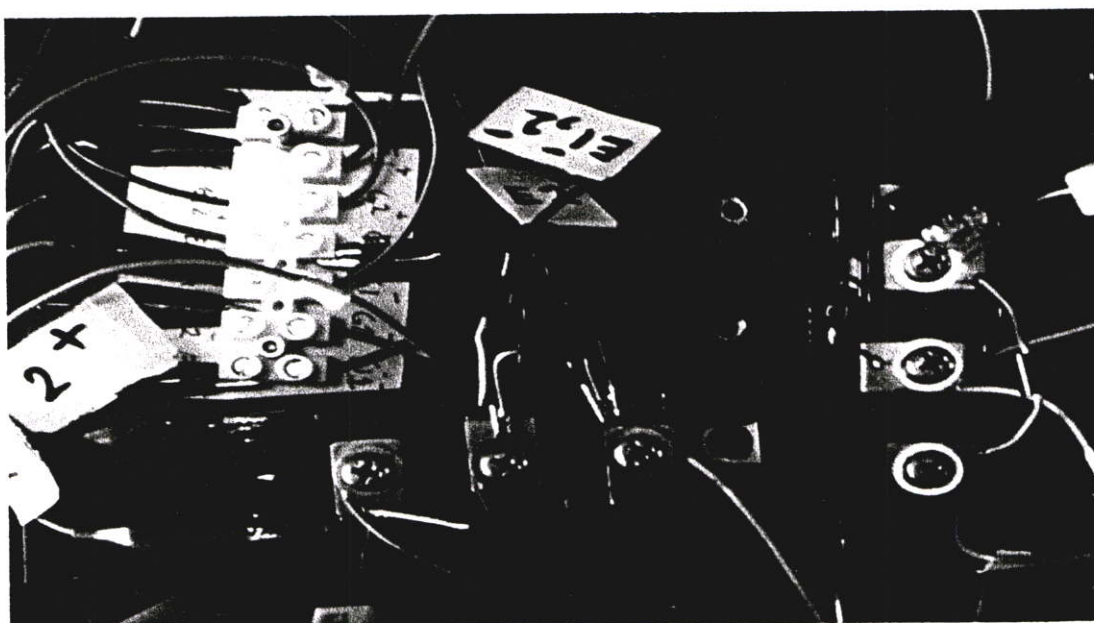
รูปที่ 4.15 แสดงวงจรจับแกต



รูปที่ 4.16 แสดงวงจรประวิงเวลา



รูปที่ 4.17 แสดงวงจรเรียงกระแสที่ขงตรงเต็มลูกคลื่น(Precision Full-Wave Rectifier) กับวงจร zero-crossing และวงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 4.18 แสดงวงจรกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

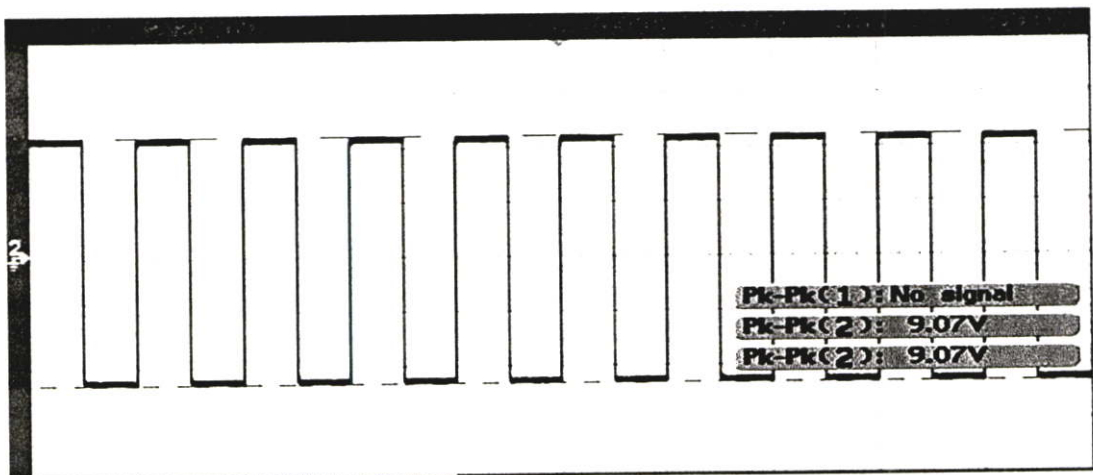
การทดลองในวิชานี้นี้จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ

1. ส่วนของการวัดสัญญาณอินพุท
2. ส่วนของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก
3. ส่วนของการสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกด้วยสัญญาณพีคเบิ้ลยูเอ็ม
4. ส่วนของการชดเชยฮาร์มอนิก

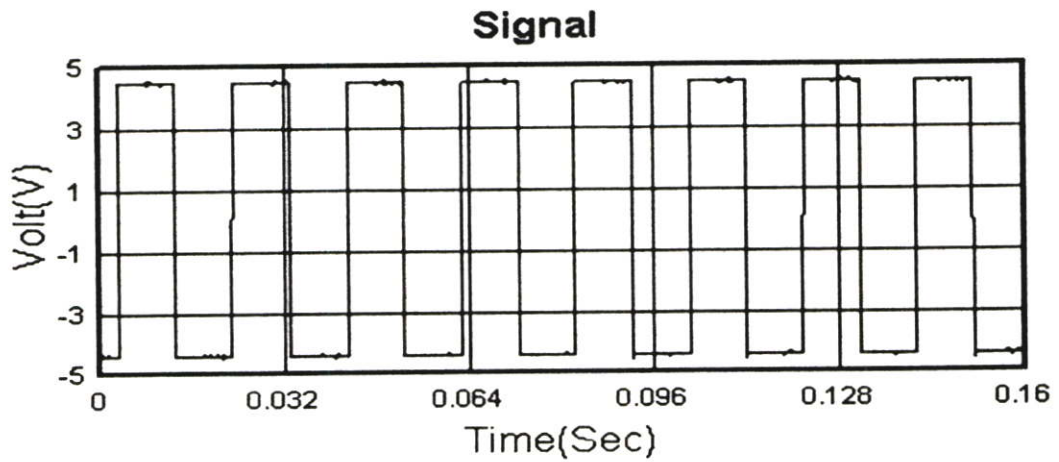
5.1 การทดลองในส่วนของการวัดสัญญาณอินพุท

ขั้นตอนการทดลองจะทำการวัดสัญญาณอินพุทรูปแบบต่างๆจากตัวกำเนิดคลื่น(ฟังก์ชันเจเนเรเตอร์) เช่น สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม สัญญาณรูปสามเหลี่ยมและ สัญญาณรูปไซน์ แล้วเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากส่วนวัดสัญญาณอินพุทกับออสซิลอสโคปว่ามีความถูกต้องหรือไม่

5.1.1 การวัดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม



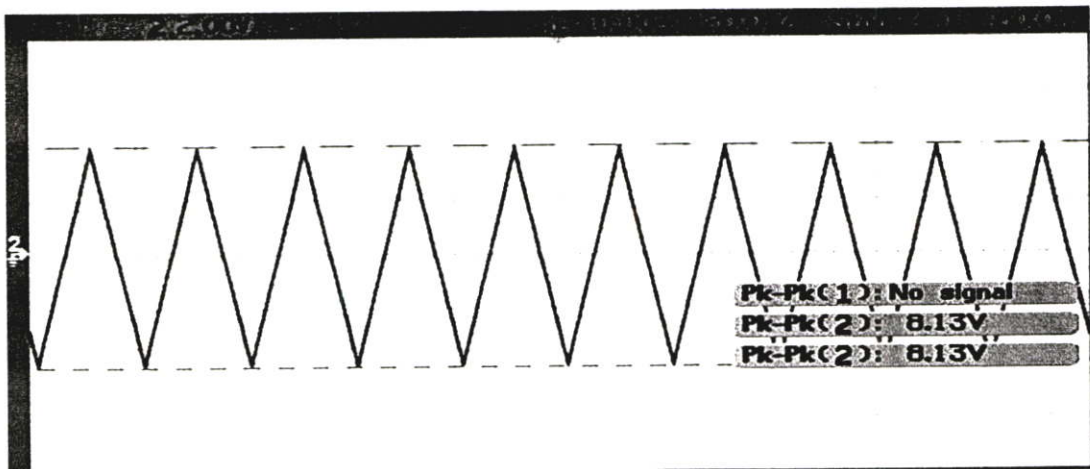
รูปที่ 5.1 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากตัวกำเนิดคลื่นที่วัดได้จากออสซิลอสโคป



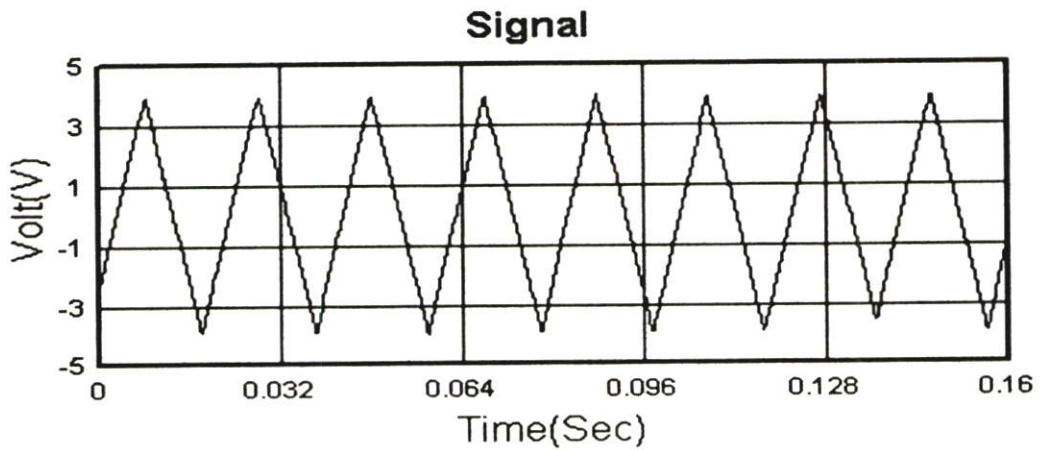
รูปที่ 5.2 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่วัดได้จากส่วนวัดสัญญาณอินพุต

จากรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าสัญญาณที่วัดได้จาก ออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมเหมือนกัน โดย สัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปมีขนาด 9.07 โวลต์ และสัญญาณที่วัดได้จากส่วนวัดสัญญาณอินพุตมีขนาด 9.12 โวลต์ ซึ่งมีค่าผิดพลาด 0.055%

5.1.2 การวัดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม



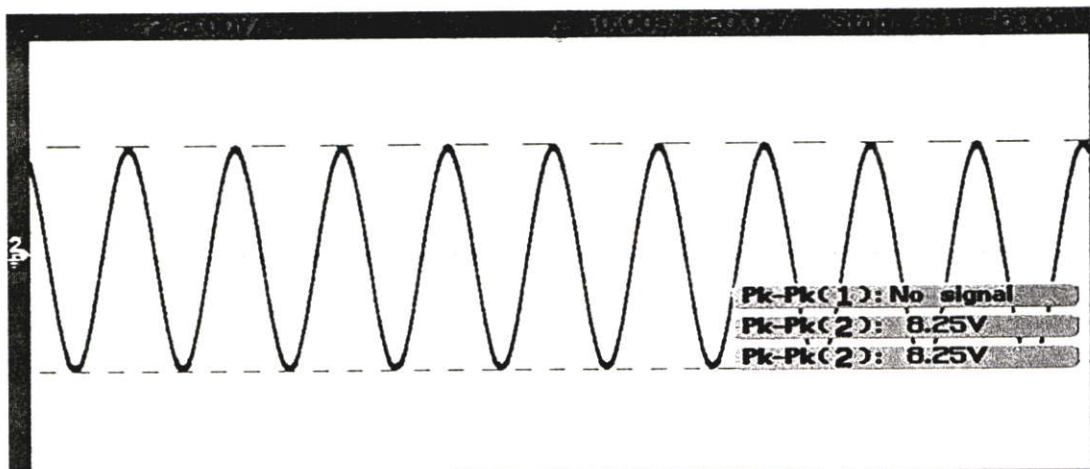
รูปที่ 5.3 สัญญาณรูปสามเหลี่ยมจากตัวกำเนิดคลื่นที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป



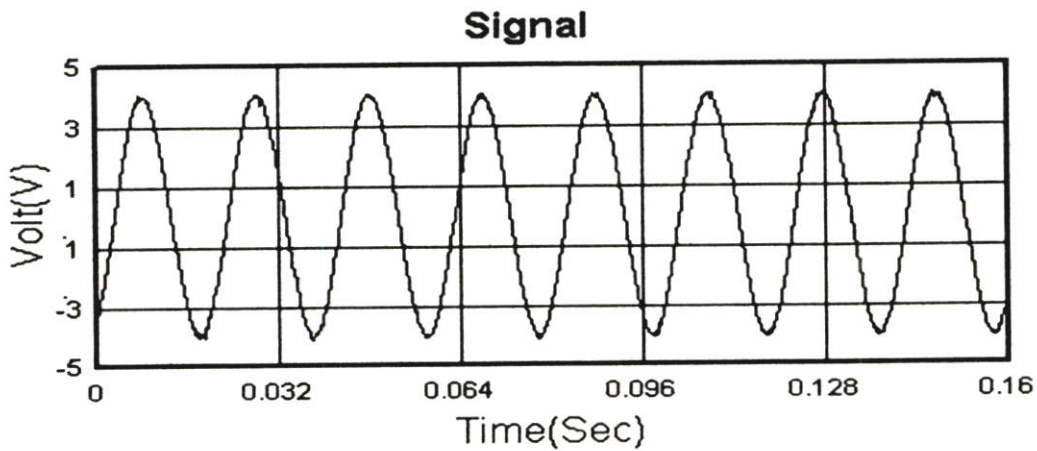
รูปที่ 5.4 สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่วัดได้จากส่วนวัดสัญญาณอินพุท

จากรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 จะเห็นว่าสัญญาณที่วัดได้จาก ออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมเหมือนกัน โดย สัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปมีขนาด 8.13 โวลต์ และสัญญาณที่วัดได้จากส่วนวัดสัญญาณอินพุทมีขนาด 7.93 โวลต์ ซึ่งมีค่าผิดพลาด 2.4%

5.1.3 การวัดสัญญาณรูปไซน์



รูปที่ 5.5 สัญญาณรูปไซน์จากตัวกำเนิดคลื่นที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป



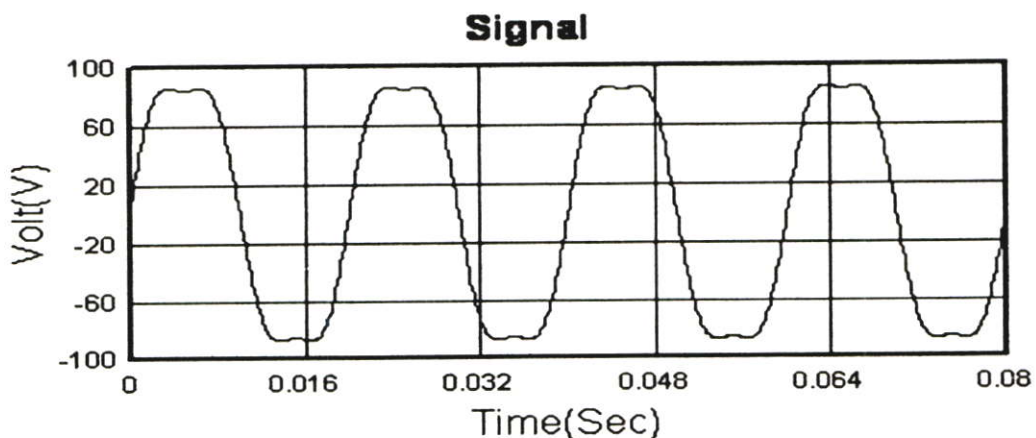
รูปที่ 5.6 สัญญาณรูปไซน์ที่วัดได้จากส่วนวัดสัญญาณอินพุท

จากรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าสัญญาณที่วัดได้จาก ออสซิลโคป มีลักษณะเป็น สามเหลี่ยมเหมือนกัน โดย สัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโคปมีขนาด 8.25 โวลต์ และสัญญาณที่วัดได้จากส่วนวัดสัญญาณอินพุทมีขนาด 8.237 โวลต์ ซึ่งมีค่าผิดพลาด 0.157%

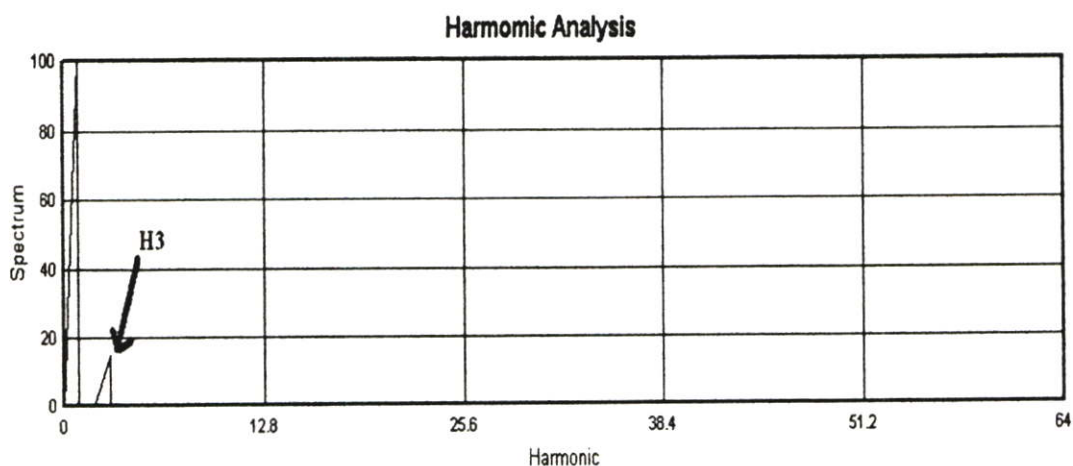
5.2 การทดลองในส่วนของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

ในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดข้อมูลของสัญญาณที่ทราบค่าฮาร์มอนิก แล้วใช้ส่วนวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของระบบลดค่าฮาร์มอนิกทำการวิเคราะห์หาฮาร์มอนิกเพื่อเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับค่าที่กำหนด โดยจะทำการวิเคราะห์สัญญาณขนาด 100 โวลต์ ที่มีฮาร์มอนิกในอันดับต่างๆ

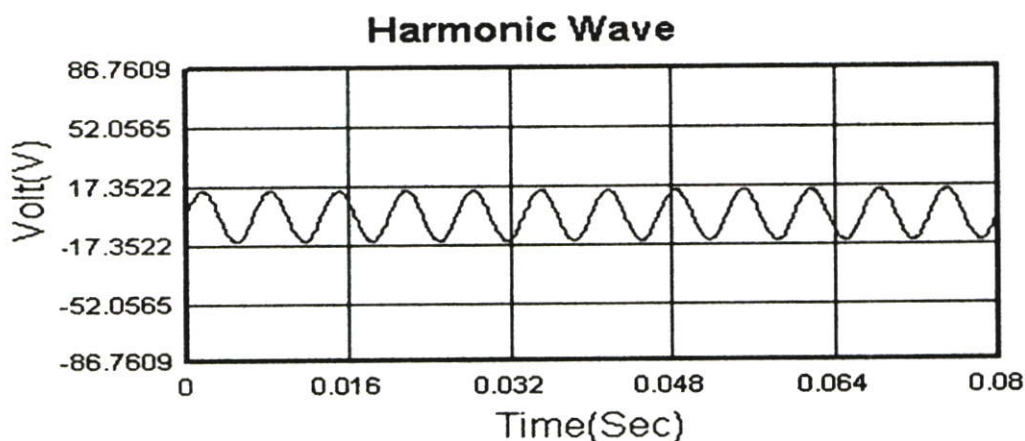
5.2.1 สัญญาณที่ 1 กำหนดให้ $H_1 = 100 \text{ v}$, $H_3 = 15 \text{ v}$



รูปที่ 5.7 สัญญาณที่ 1 $H_1 = 100 \text{ v}$, $H_3 = 15 \text{ v}$



รูปที่ 5.8 สเปกตรัมของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นของสัญญาณที่ 1



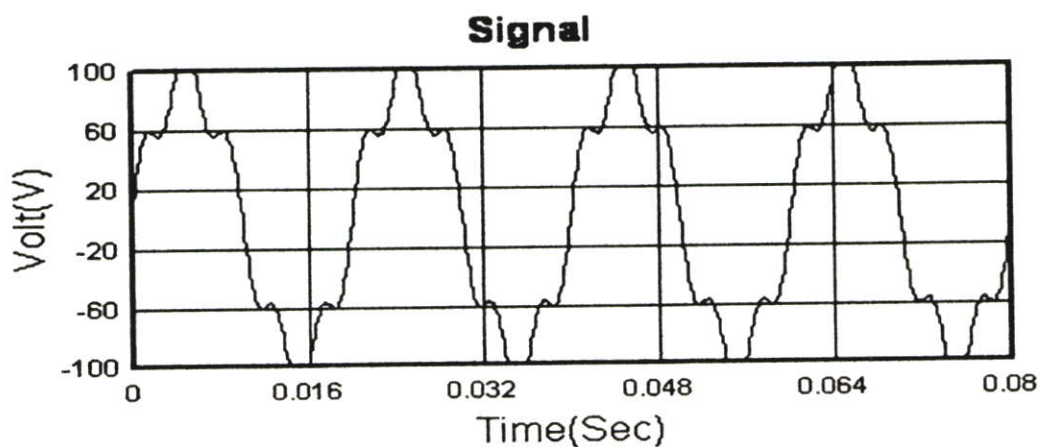
รูปที่ 5.9 สัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่ 1

1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
100.000 %	15.035 %	0.035 %	0.023 %	0.017 %	0.014 %	0.012 %

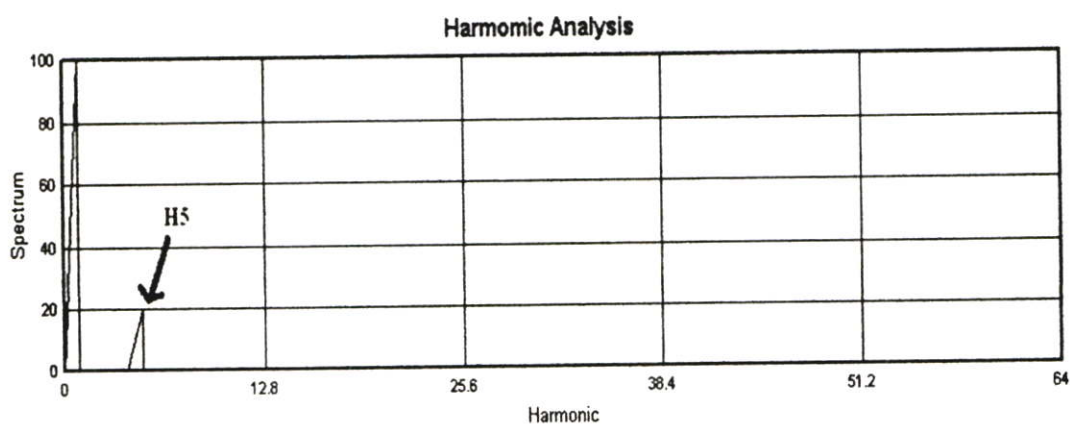
รูปที่ 5.10 ค่าฮาร์โมนิกอันดับต่างๆที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่ 1

จากรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่า เส้นสเปกตรัมที่เกิดขึ้นมีอันดับที่ 1 และอันดับที่ 3 โดยอันดับที่ 1 มีค่า 100 โวลต์ และอันดับที่ 3 มีค่า 15.035 โวลต์ ดังรูปที่ 5.9 และสัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 5.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นสัญญาณของฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ที่มีความถี่เป็น 3 เท่าของความถี่มูลฐาน

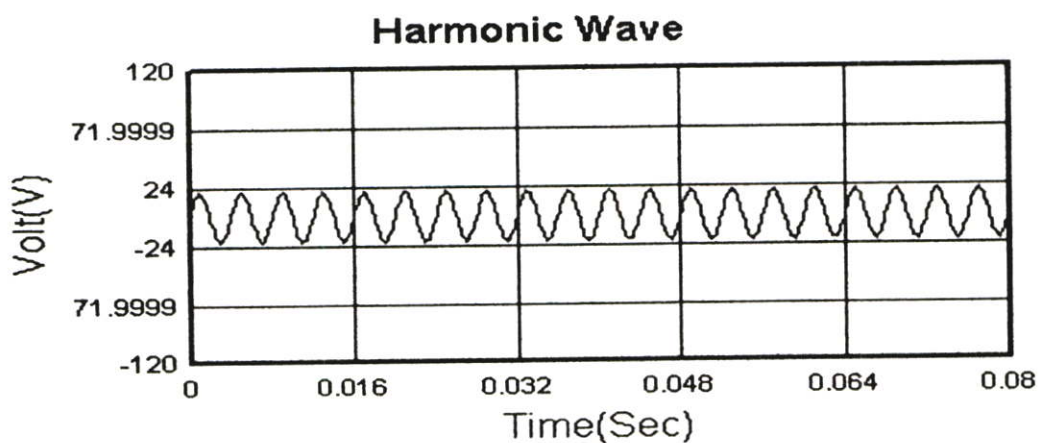
5.2.2 สัญญาณที่ 2 กำหนดให้ $H_1 = 100 \text{ v}$, $H_5 = 20 \text{ v}$



รูปที่ 5.11 สัญญาณที่ 2 $H_1 = 100 \text{ v}$, $H_5 = 20 \text{ v}$



รูปที่ 5.12 สเปกตรัมของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นของสัญญาณที่ 2



รูปที่ 5.13 สัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่ 2

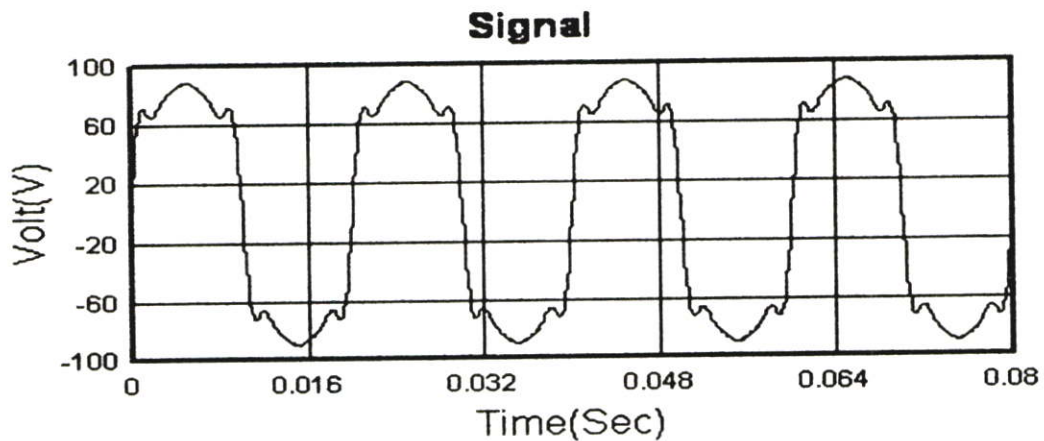
1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
100.000 %	0.020 %	20.008 %	0.044 %	0.028 %	0.021 %	0.017 %

รูปที่ 5.14 ค่าฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่ 2

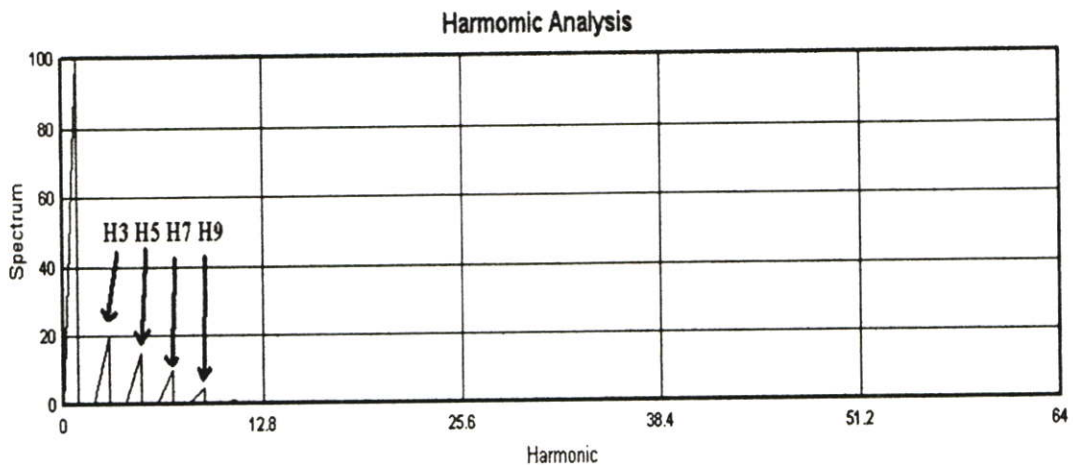
จากรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่า เส้นสเปกตรัมที่เกิดขึ้นมีอันดับที่ 1 และอันดับที่ 5 โดยอันดับที่ 1 มีค่า 100 โวลต์ และอันดับที่ 5 มีค่า 20.008 โวลต์ ดังรูปที่ 5.14 และสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 5.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นสัญญาณของฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ที่มีความถี่เป็น 5 เท่าของความถี่มูลฐาน

5.2.3 สัญญาณที่ 3 กำหนดให้ $H_1 = 100 \text{ v}$, $H_3 = 20 \text{ v}$, $H_5 = 15 \text{ v}$, $H_7 = 10 \text{ v}$, $H_9 = 5 \text{ v}$,

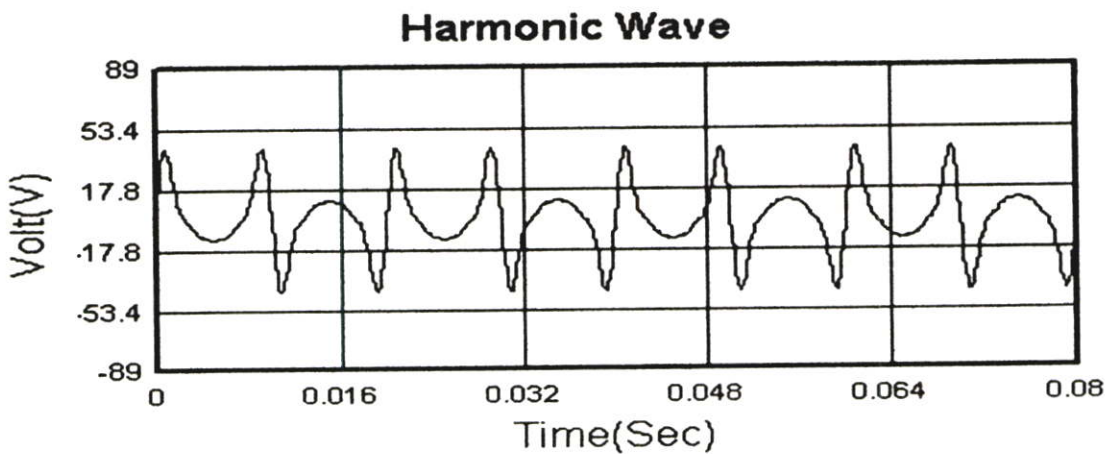
$H_{11} = 1 \text{ v}$



รูปที่ 5.15 สัญญาณที่ 3 $H_1 = 100 \text{ v}$, $H_3 = 20 \text{ v}$, $H_5 = 15 \text{ v}$, $H_7 = 10 \text{ v}$, $H_9 = 5 \text{ v}$, $H_{11} = 1 \text{ v}$



รูปที่ 5.16 สเปกตรัมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นของสัญญาณที่ 3



รูปที่ 5.17 สัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่3

1 th	3 th	5 th	7 th	9th	11th	13th
100.000 %	20.014 %	15.012 %	10.023 %	5.037 %	1.042 %	0.037 %

รูปที่ 5.18 ค่าฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่3

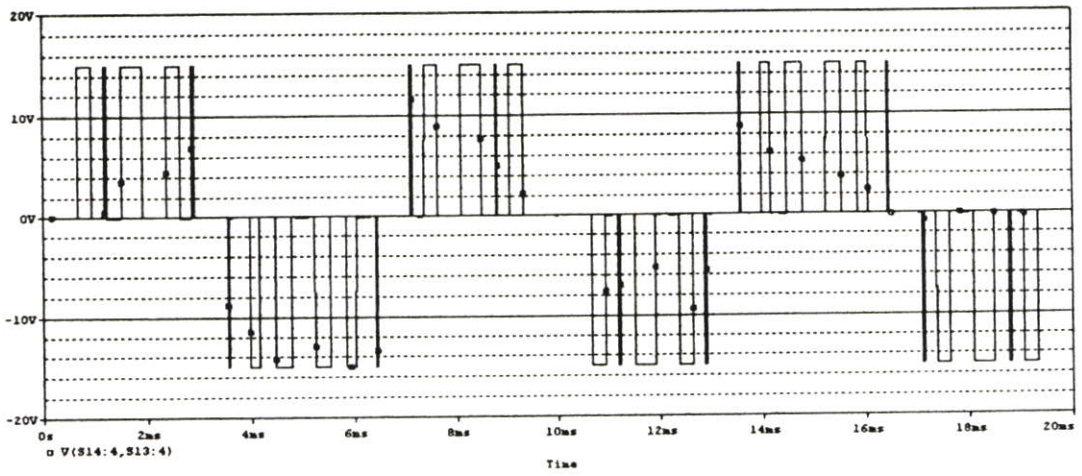
จากรูปที่ 5.17 จะเห็นได้ว่า เส้นสเปกตรัมที่เกิดขึ้นมีอันดับที่ 1,3,5,7,9 และอันดับที่ 11 โดยอันดับที่ 1 มีค่า 100 โวลต์ และอันดับที่ 3 มีค่า 20.014 โวลต์ อันดับที่ 5 มีค่า 15.012 โวลต์ อันดับที่ 7 มีค่า 10.023 โวลต์ อันดับที่ 9 มีค่า 5.037 โวลต์ และอันดับที่ 11 มีค่า 1.042 โวลต์ ดังรูปที่ 5.18 และสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 5.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นผลรวมของสัญญาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ,5 ,7 ,9 และ 11 รวมกัน

จากการทดลองในส่วนของการวิเคราะห์สัญญาณจะเห็นได้ว่าโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง

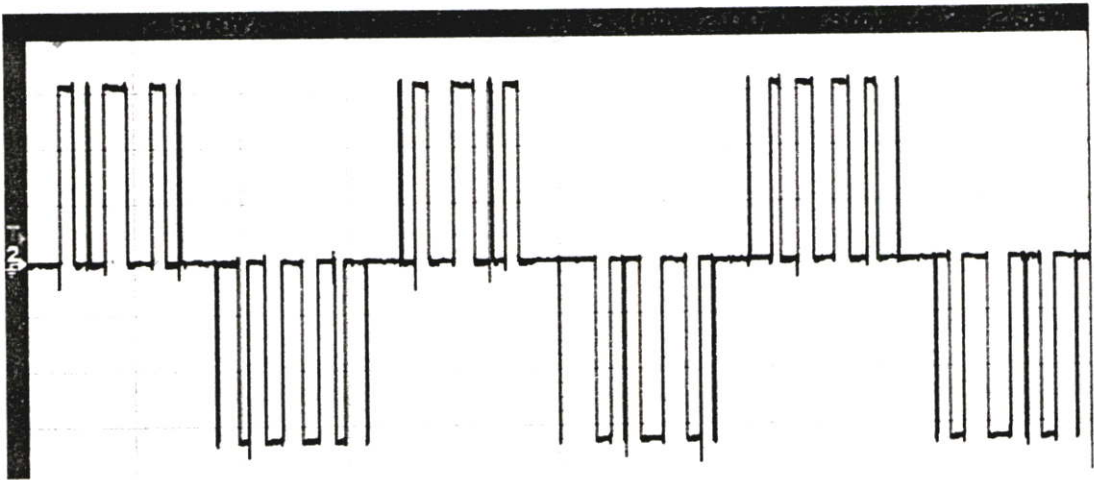
5.3 การทดลองในส่วนของการสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกด้วยสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม

ขั้นตอนการทดลองนี้จะทำการสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกด้วยสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม โดยการกำหนดฮาร์มอนิกที่เราต้องการจะสร้างแล้วทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่สร้างจาก IGBT กับสัญญาณที่ได้จำลองในโปรแกรม PSpice ในการกำหนดใช้เป็นการกำหนดต่อหนึ่งหน่วย(per unit) เช่น 0.5/unit หมายถึงลูกคลื่นมีขนาดเป็น 0.5 เท่าของขนาดแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ PWM

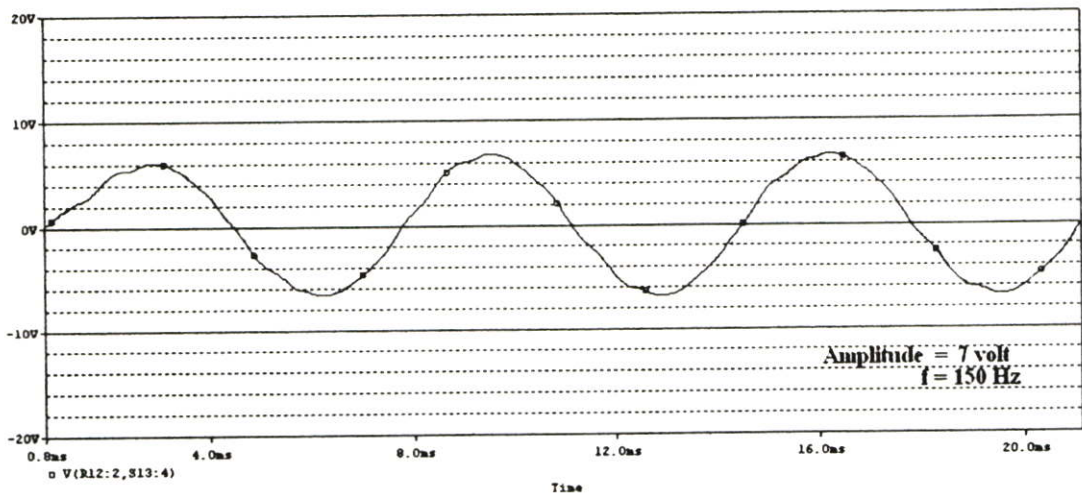
5.3.1 การทดลองสัญญาณ PWM ที่ 1 กำหนดให้ $H_3 = 0.5/unit$



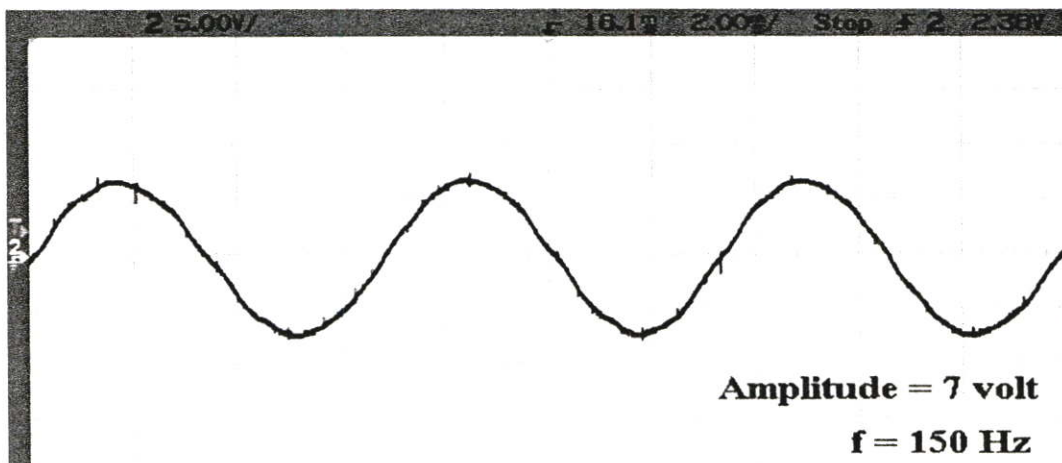
รูปที่ 5.19 สัญญาณ PWM ที่ $1 H_3 = 0.5/\text{unit}$ จากการจำลอง



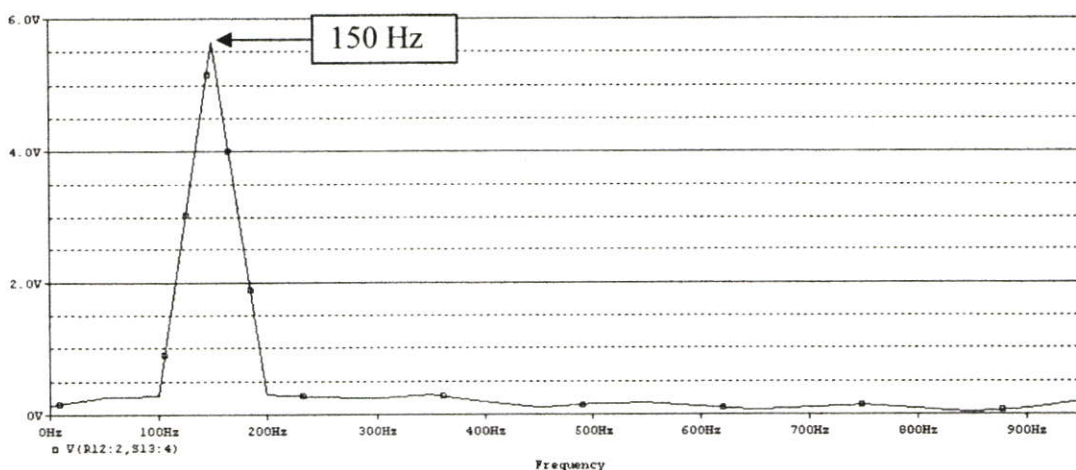
รูปที่ 5.20 สัญญาณ PWM ที่ 1 จากการทดลอง



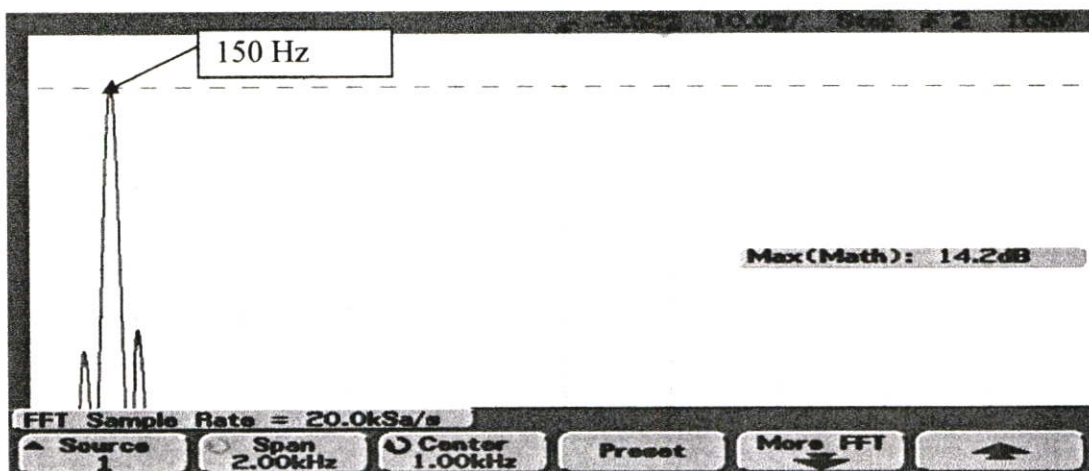
รูปที่ 5.21 คลื่นสัญญาณที่ 1 จากการจำลอง



รูปที่ 5.22 คลื่นสัญญาณที่ 1 จากการทดลอง



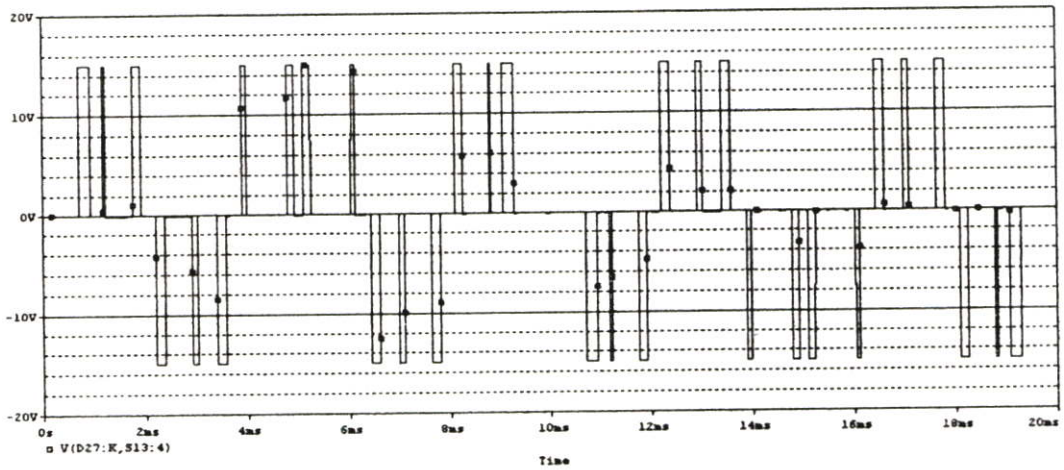
รูปที่ 5.23 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่ 1 จากการจำลอง



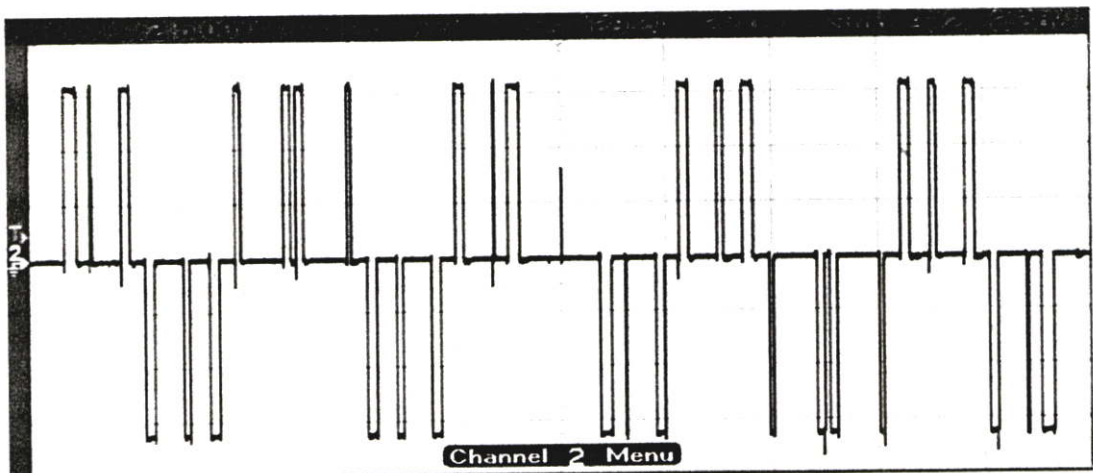
รูปที่ 5.24 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่ 1 จากการทดลอง

จากรูปที่ 5.19 และ 5.20 จะเห็นว่าสัญญาณที่คืบเบิ้ลยูเอ็มจากการจำลองและจากการทดลองมีลักษณะเหมือนกัน และในรูปที่ 5.21 และ รูปที่ 5.22 จะเห็นได้ว่ามีรูปคลื่นของสัญญาณไซน์ความถี่ 150 Hz ซึ่งเป็นฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ที่ต้องการสร้างโดยมีขนาด 7 โวลต์เท่ากัน ซึ่งคิดเป็น 0.46/unit ในรูปที่ 5.23 และ 5.24 แสดงขนาดสเปกตรัมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น

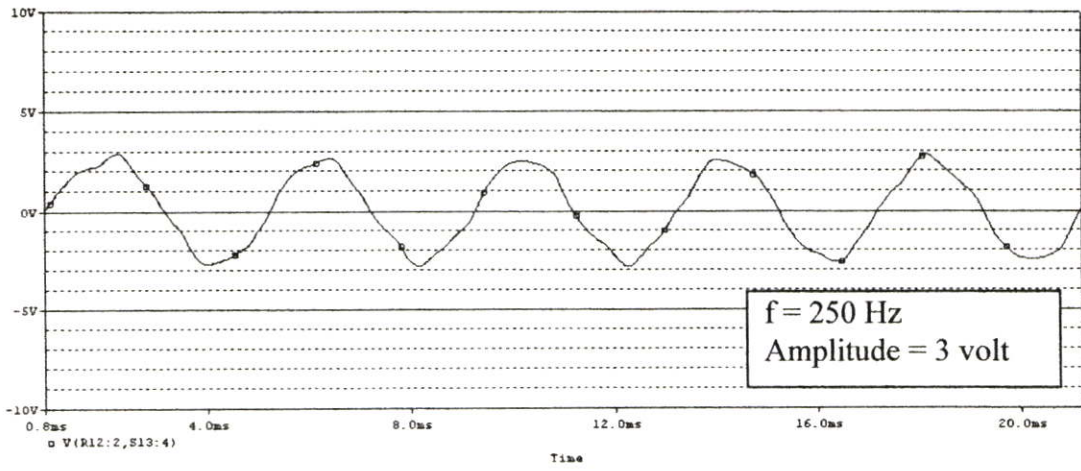
5.3.2 การทดลองสัญญาณ PWM ที่ 2 กำหนดให้ $H_s = 0.3/\text{unit}$



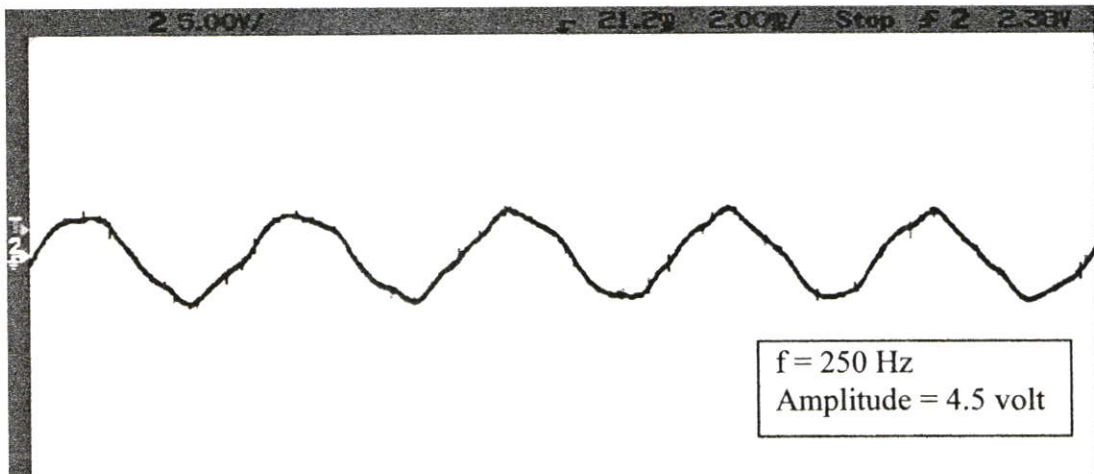
รูปที่ 5.25 สัญญาณ PWM ที่ 2 $H_s = 0.3/\text{unit}$ จากการจำลอง



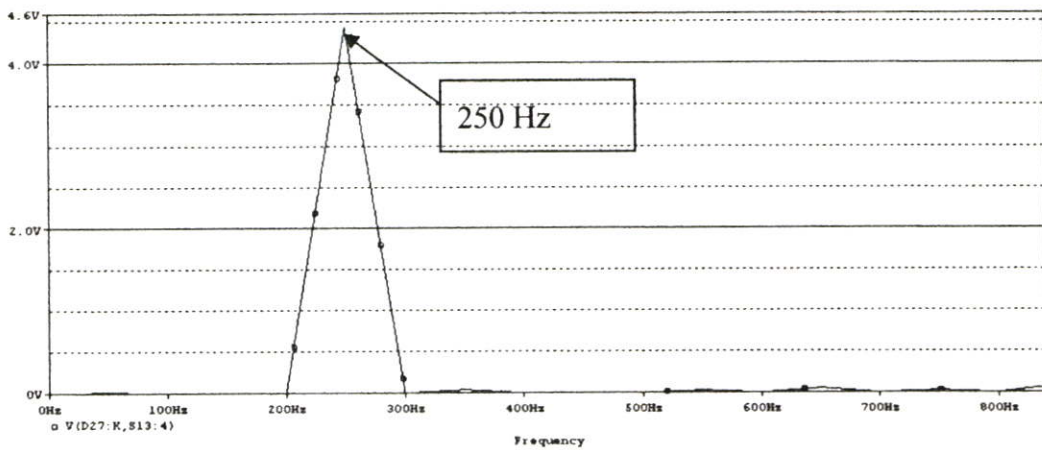
รูปที่ 5.26 สัญญาณ PWM ที่ 2 จากการทดลอง



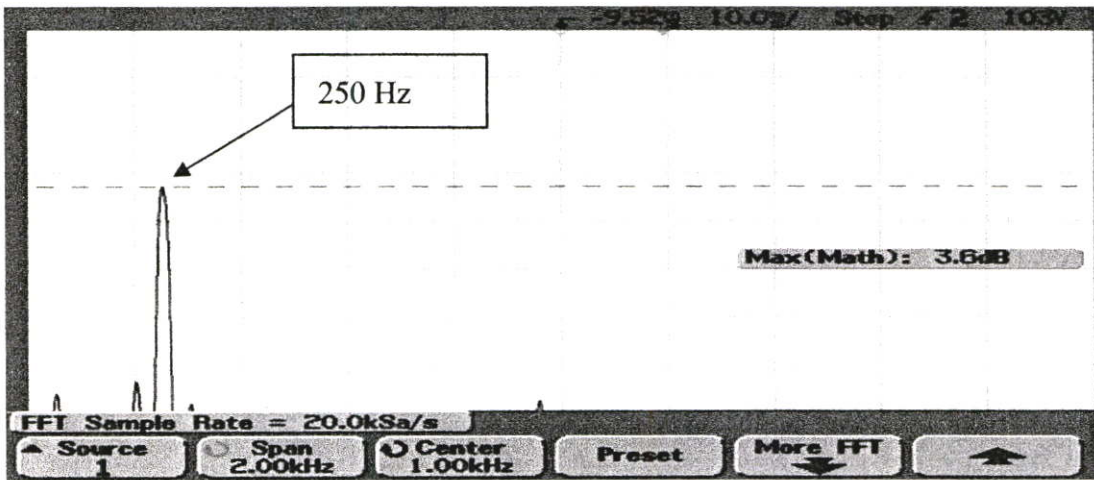
รูปที่ 5.27 คลื่นสัญญาณที่ 2 จากการจำลอง



รูปที่ 5.28 คลื่นสัญญาณที่ 2 จากการทดลอง



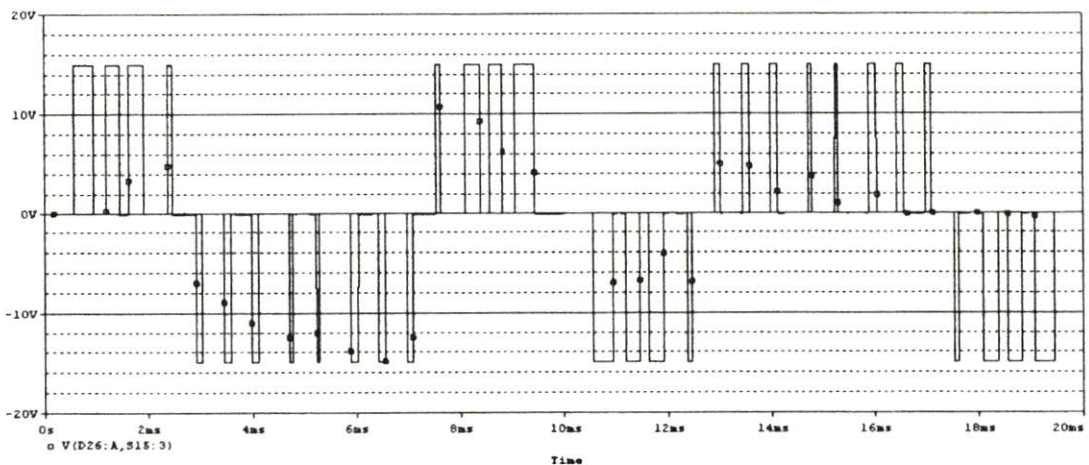
รูปที่ 5.29 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่ 2 จากการจำลอง



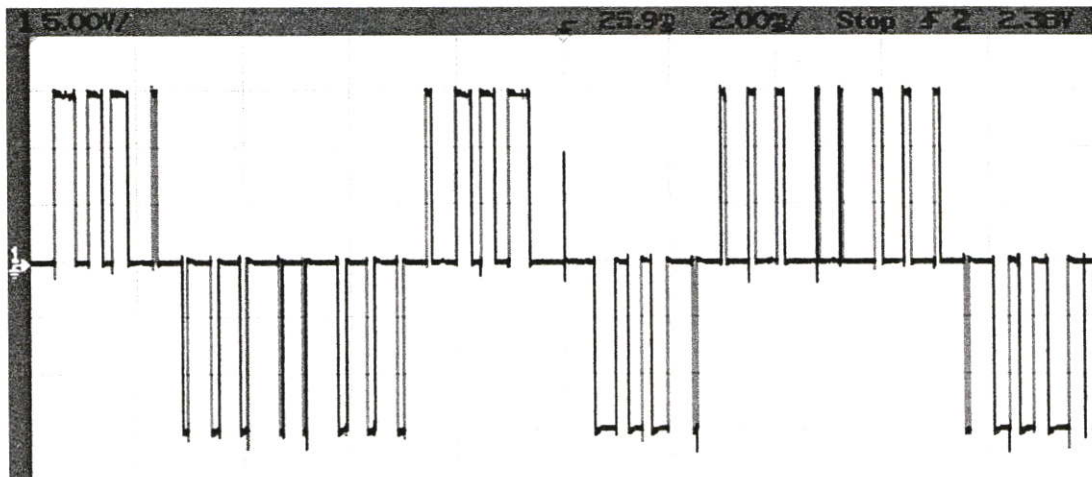
รูปที่ 5.30 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่ 2 จากการทดลอง

จากรูปที่ 5.25 และ 5.26 จะเห็นได้ว่าสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มจากการจำลองและจากการทดลองมีลักษณะเหมือนกัน และในรูปที่ 5.27 และ รูปที่ 5.28 จะเห็นได้ว่ามีรูปคลื่นของสัญญาณความถี่ 250 Hz ซึ่งเป็นฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ที่เราต้องการสร้างโดยมีขนาด 3 โวลต์และ 4.5 โวลต์ ซึ่งคิดเป็น 0.2/unit และ 0.3/unit จากการจำลองและจากการทดลองตามลำดับ ในรูปที่ 5.29 และ 5.30 แสดงขนาดสเปกตรัมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น

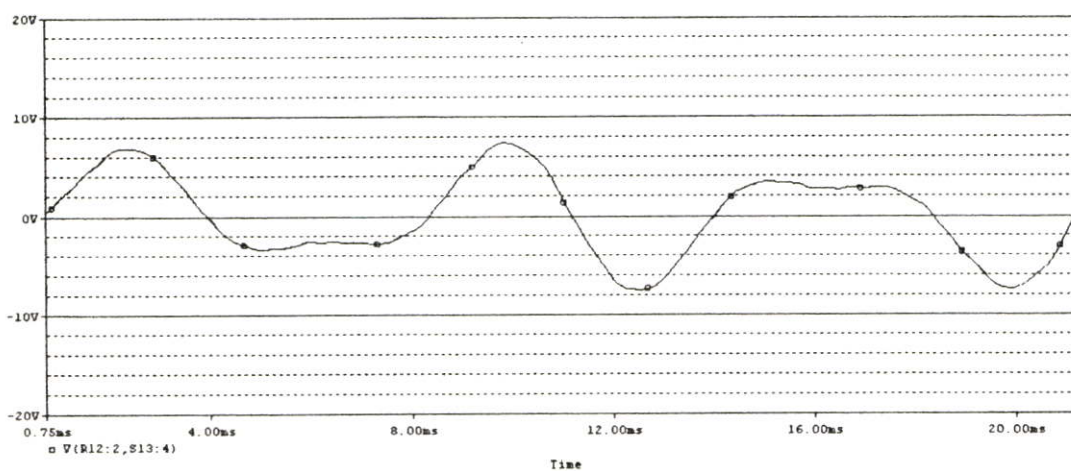
5.3.3 การทดลองสัญญาณ PWM ที่ 3 กำหนดให้ $H_3 = 0.4/\text{unit}$ และ $H_5 = 0.3/\text{unit}$



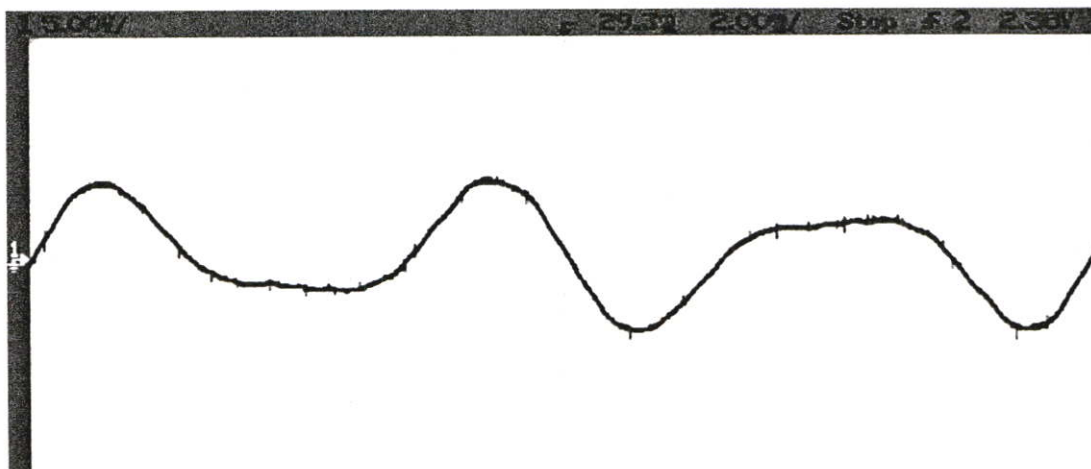
รูปที่ 5.31 สัญญาณ PWM ที่ 3 $H_3 = 0.4/\text{unit}$ และ $H_5 = 0.3/\text{unit}$ จากการจำลอง



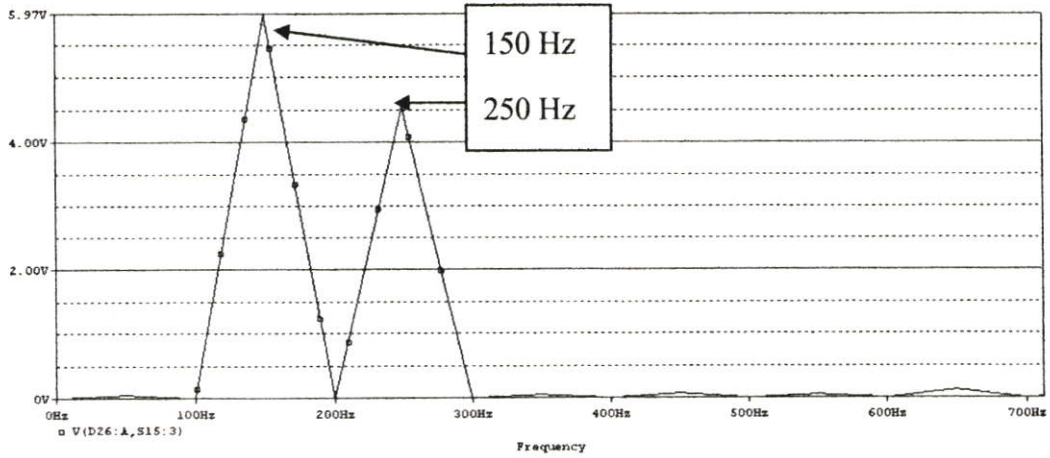
รูปที่ 5.32 สัญญาณ PWM ที่ 3 จากการทดลอง



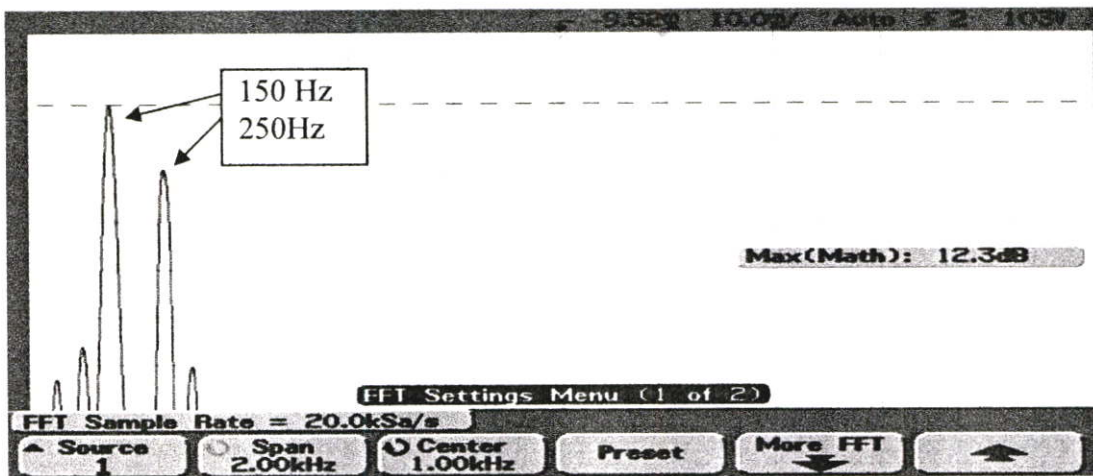
รูปที่ 5.33 คลื่นสัญญาณที่ 3 จากการจำลอง



รูปที่ 5.34 คลื่นสัญญาณที่ 3 จากการทดลอง



รูปที่ 5.35 สเปกตรัมของสัญญาณที่ 3 จากการจำลอง



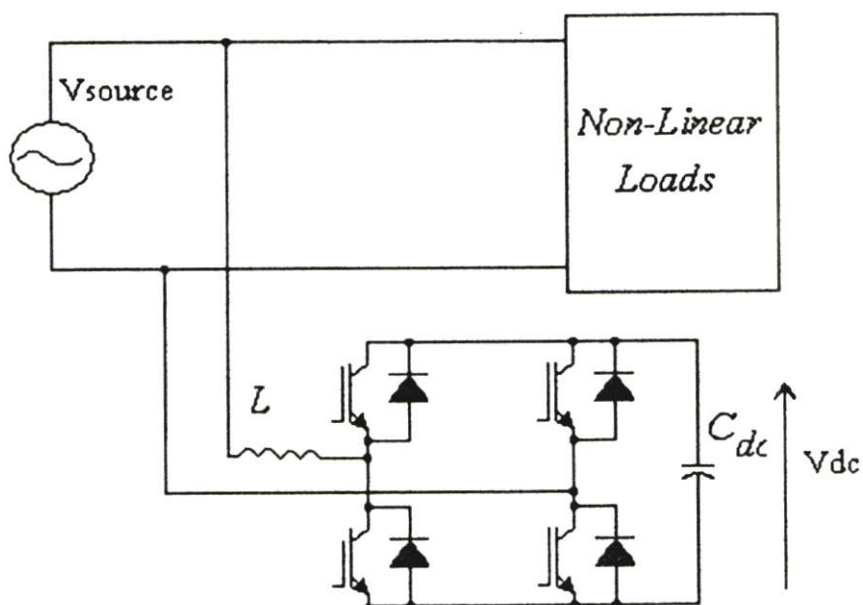
รูปที่ 5.36 สเปกตรัมของสัญญาณที่ 3 จากการทดลอง

จากรูปที่ 5.31 และ 5.32 จะเห็นได้ว่าสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มมีลักษณะเหมือนกัน และในรูปที่ 5.33 และ รูปที่ 5.34 จะเห็นได้ว่ามีรูปคลื่นของสัญญาณที่เกิดจากการรวมกันของฮาร์มอนิก โดยสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนั้นคือสัญญาณฮาร์มอนิก อันดับที่ 3 และ 5 โดยดูได้จากรูปที่ 5.35 และ 5.36 ซึ่งแสดงสเปกตรัมของสัญญาณฮาร์มอนิกซึ่งฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 มีขนาด 5.97 โวลต์และอันดับที่ 5 มีขนาด 5 โวลต์ คิดเป็น $0.398/\text{unit}$ และ $0.33/\text{unit}$

5.4 การทดลองในส่วนของการชดเชยสัญญาณ

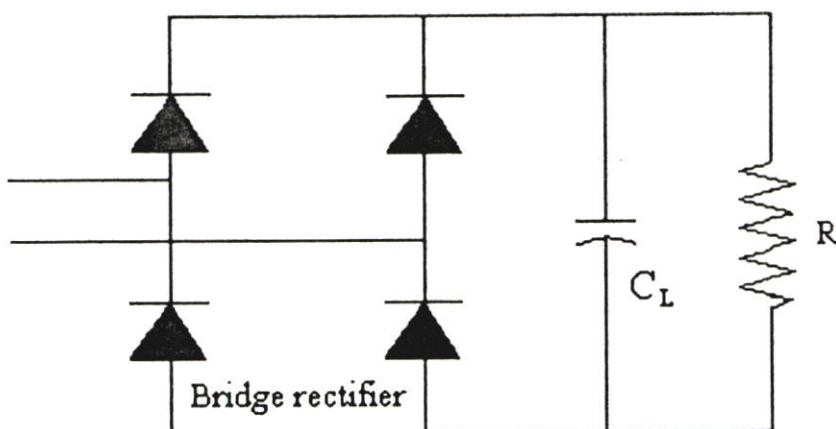
ขั้นตอนนี้จะทำการต่อส่วนของตัวกรองแอกทีฟเข้าไปในระบบไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกเกิดขึ้น โดยการต่อตัวกรองแอกทีฟแบบขนาน เพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิก หลังจากนั้นทำการวัดสัญญาณของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และค่าฮาร์มอนิกที่เกิดในระบบขึ้นเพื่อเปรียบเทียบ

สัญญาณของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และฮาร์มอนิก ของระบบไฟฟ้าก่อนและหลังทำการชดเชยสัญญาณฮาร์มอนิก



รูปที่ 5.37 วงจรที่ใช้ในการทดลองชดเชยสัญญาณฮาร์มอนิก

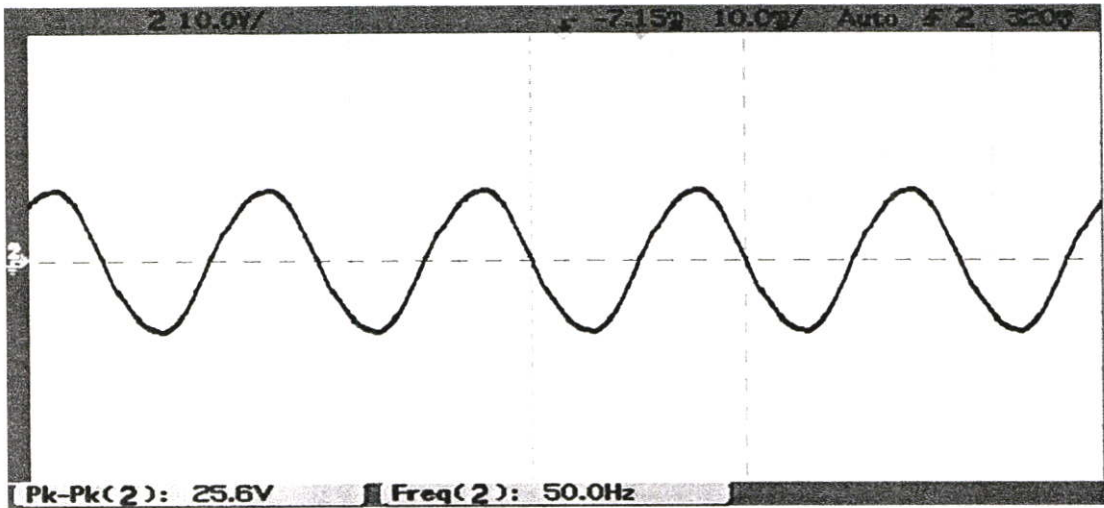
5.4.1 ระบบที่ 1 เมื่อโหลดเป็นบริดจ์เรกติไฟร์



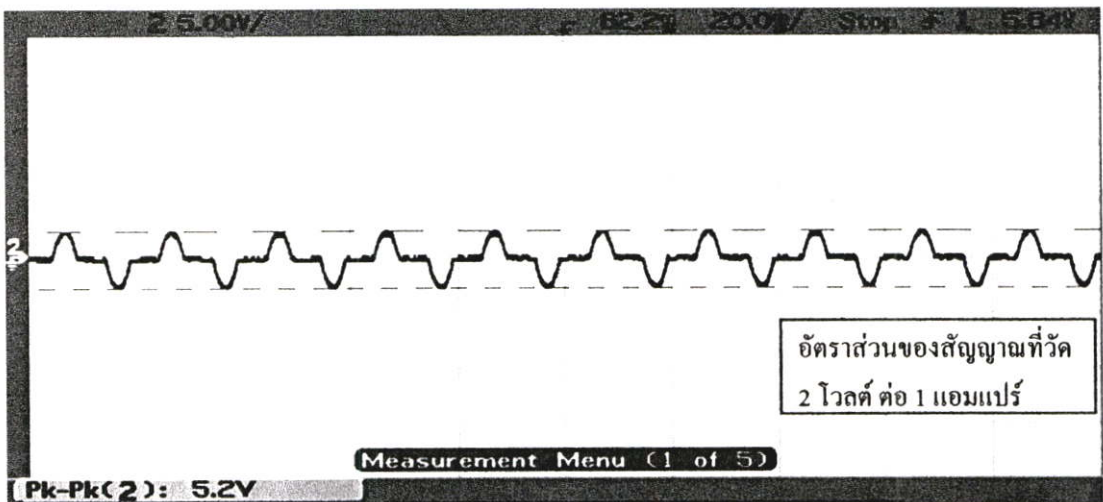
รูปที่ 5.38 แสดงโหลดบริดจ์เรกติไฟร์

กำหนดให้

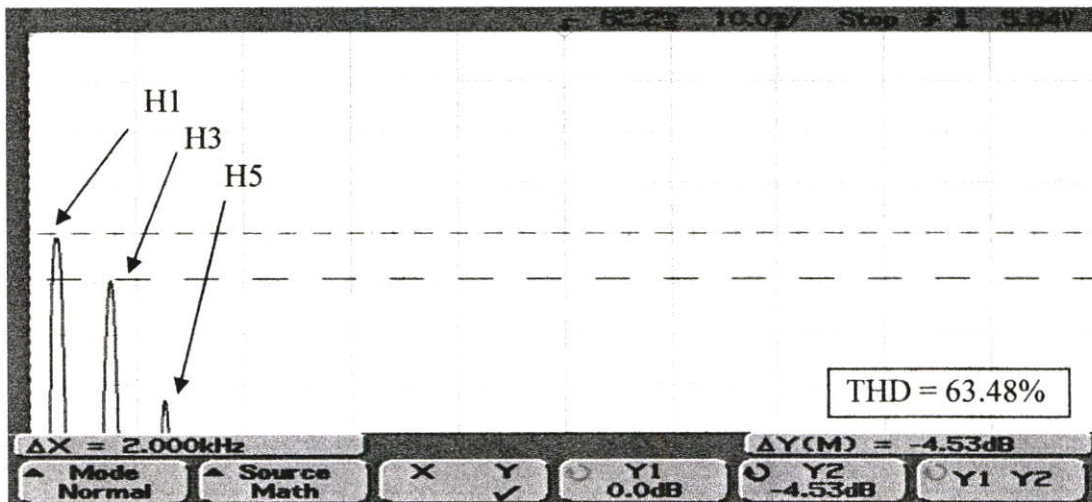
- $V_{\text{source}} = 9 \text{ Volt}_{\text{rms}}$
- $V_{\text{dc}} = 12.72 \text{ Volt}$
- $L = 14 \text{ mH}$
- $R = 24 \text{ Ohm}$
- $C_{\text{dc}} = 470 \mu\text{F}$
- $C_{\text{L}} = 10000 \mu\text{F}$



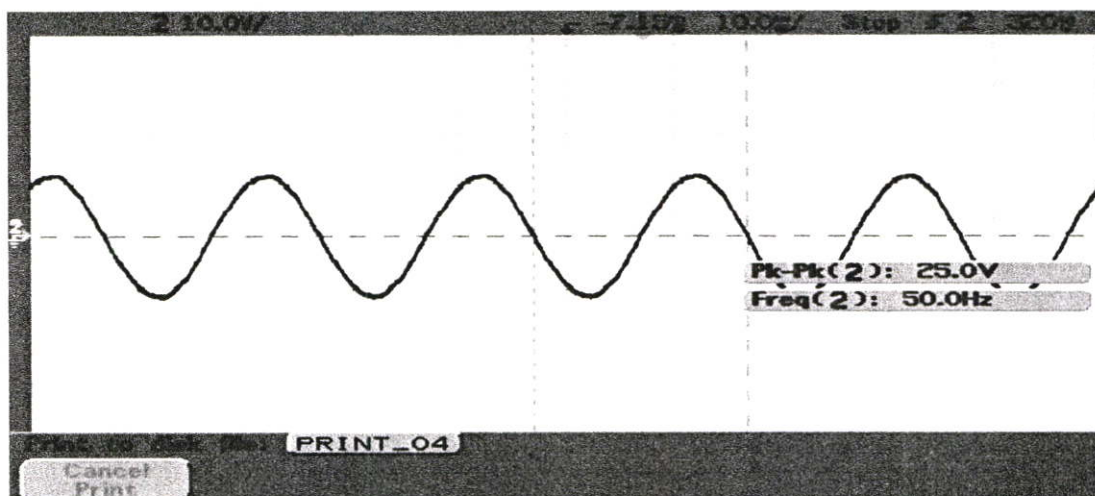
รูปที่ 5.39 แสดงสัญญาณแรงดันก่อนมีการชดเชย



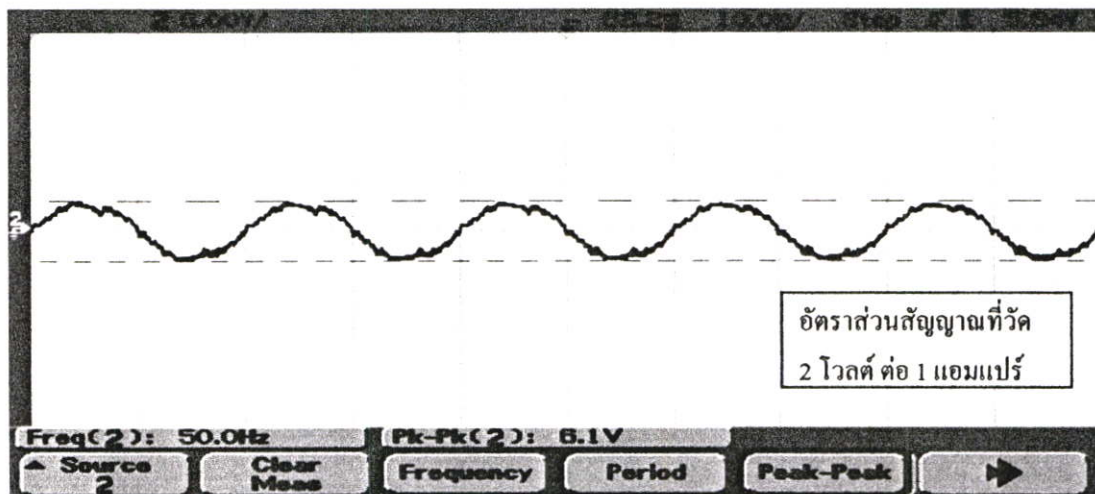
รูปที่ 5.40 แสดงสัญญาณกระแสไฟฟ้าก่อนมีการชดเชย



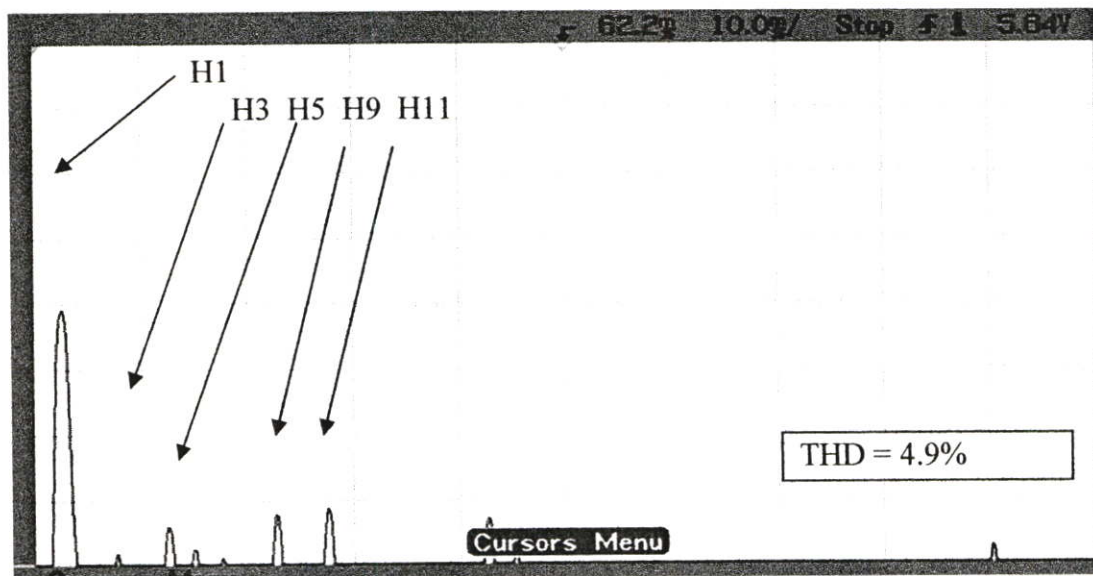
รูปที่ 5.41 แสดงสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าก่อนมีการชดเชย



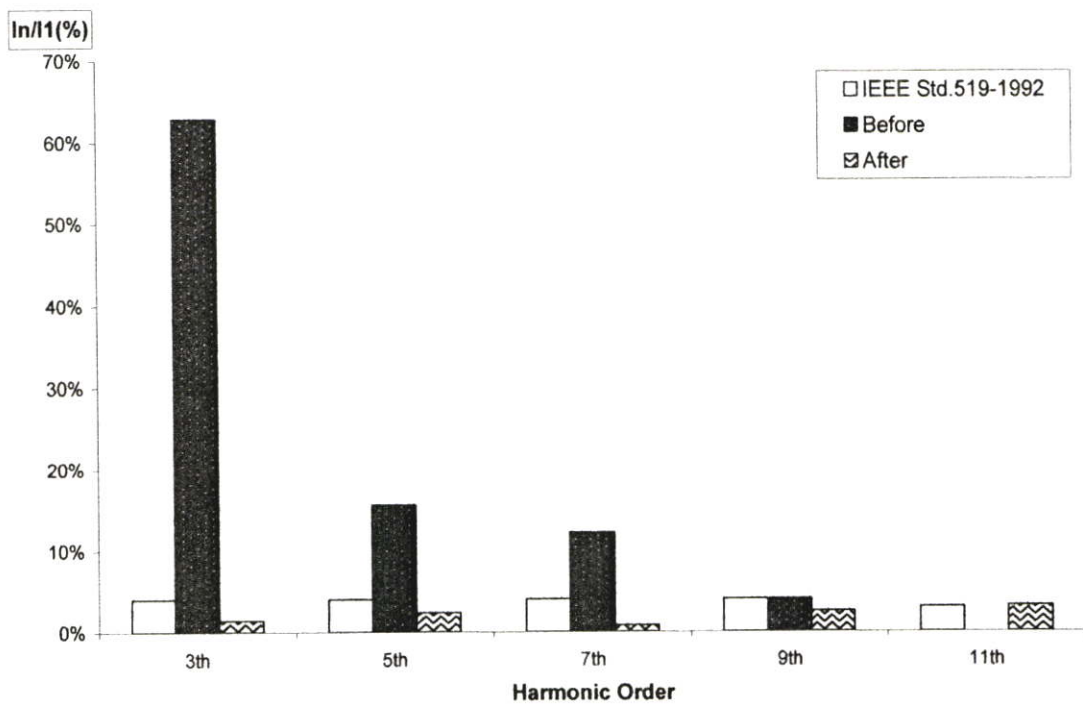
รูปที่ 5.42 แสดงสัญญาณของแรงดันหลังจากชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น



รูปที่ 5.43 แสดงสัญญาณของกระแสไฟฟ้าหลังจากชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น



รูปที่ 5.44 แสดงสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าหลังจากชดเชยฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น



รูปที่ 5.45 การเปรียบเทียบสเปกตรัมฮาร์โมนิกของกระแสก่อนและหลังมีการชดเชยกระแสฮาร์โมนิกตามมาตรฐาน IEEE Std.519-1992

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าสัญญาณของกระแสไฟฟ้าในระบบมีฮาร์โมนิกเกิดขึ้นในอันดับที่ 3 และ 5 ตามรูปที่ 5.41 โดยมีค่าอยู่ที่ $-4.53\text{dB}(504\text{ mA.})$, $-16.4\text{dB}(120\text{ mA.})$, ตามลำดับ มีค่า $\text{THD} = 63.48\%$ และเมื่อทำการชดเชยฮาร์โมนิก สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าหลังการชดเชยสัญญาณมีลักษณะดังรูปที่ 5.42 และ 5.43 และจากรูปที่ 5.44 พบว่าฮาร์โมนิกในอันดับที่ 3 และ 5 มีขนาดลดลงเหลือ $-30.3\text{dB}(2.59\text{ mA.})$, และ $-25.94\text{dB}(4.28\text{ mA.})$ ตามลำดับ และมีฮาร์โมนิกอันดับ 9 และ 11 เกิดขึ้นมา $-25.37\text{dB}(4.5\text{mA})$ และ $-23.44\text{dB}(5.7\text{mA})$ โดยมีค่ามีค่า $\text{THD} = 4.9\%$ ซึ่งมีค่าลดลง และจากรูปที่ 5.45 เป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์สเปคตรัมของความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิก เทียบกับองค์ประกอบมูลฐาน โดยมีข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 จากรูปจะพบว่าสเปคตรัมของกระแสฮาร์โมนิกอันดับ 3 และ 5 มีค่าลดลงเมื่อทำการชดเชย และต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด ส่วนอันดับ 9 และ 11 เกิดขึ้นมาหลังจากชดเชยสัญญาณเนื่องจาก ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้จำนวนพัลส์ใน 1 ลูกคลื่น 16 พัลส์ซึ่งถือว่ามีค่าน้อย จึงมีความแม่นยำในการควบคุมฮาร์โมนิกได้เพียงอันดับต้นๆ แต่เมื่อมองโดยภาพรวมแล้ว ค่าเปอร์เซ็นต์การผิดเพี้ยนรวมของกระแสฮาร์โมนิกยังมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานอยู่(ค่ามาตรฐาน 5%)

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบลดค่าฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า 1 เฟส โดยใช้เทคนิคพีคเบิ้ลยูเอ็มในการควบคุมการสวิตช์ของ IGBT เพื่อสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกมาชดเชยกับสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบ ในการควบคุมการสวิตช์ของ IGBT นั้นใช้เทคนิคการควบคุมแบบยูนิโพลาร์ โดยจะใช้สัญญาณพีคเบิ้ลยูเอ็ม 2 สัญญาณ ซึ่งในการคำนวณสัญญาณที่ค้บเบิ้ลยูเอ็มนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของฮาร์มอนิกที่วิเคราะห์ได้จากการวัดในระบบไฟฟ้านั้นเอง โดยใช้เทคนิค FFT อีกทั้งระบบลดค่าฮาร์มอนิกนี้จะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์และแสดงผลต่างๆ บนหน้าจอโปรแกรมในส่วนของการตรวจวัดสัญญาณ และส่วนของการสร้างสัญญาณพีคเบิ้ลยูเอ็มนั้นจะใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม

และจากผลการทดลอง ในส่วนการตรวจวัดสัญญาณได้ทำการวัดสัญญาณในลักษณะต่างๆ จะเห็นว่าสามารถวัดสัญญาณในรูปได้ตรงตามสัญญาณที่เข้ามา และในส่วนของการทดลองวิเคราะห์หาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ได้ทำการป้อนข้อมูลของสัญญาณที่มีฮาร์มอนิกต่างๆ กัน แล้วทำการวิเคราะห์ ผลการทดลองที่ได้พบว่าสามารถวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้ถูกต้อง ในส่วนของการสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกได้ทำการคำนวณมุมสวิตช์และสร้างสัญญาณพีคเบิ้ลยูเอ็ม ไปควบคุมการสวิตช์ของ IGBT ซึ่งผลของสัญญาณที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกับสัญญาณที่ต้องการคือ ต้องการสร้างฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 0.5/unit จากการทดลองสามารถสร้างได้ 0.46/unit ต้องการสร้างฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 0.3/unit จากการทดลองสามารถสร้างได้ 0.3/unit ในการทดลองการชดเชยฮาร์มอนิกได้ทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบที่มีโหลดเป็นบริดจ์เรกติไฟร์ พบว่าก่อนการชดเชยมีค่า THD เท่ากับ 63.48 % และหลังจากมีการชดเชยฮาร์มอนิกได้ทำให้ค่าของTHD ลดลงเหลือ 4.9 % ซึ่งสามารถลดค่าฮาร์มอนิกลงได้

ตัวกรองแบบแอคทีฟที่ใช้ในการทดลอง มีพิกัดขนาด 27 VA ในระบบแรงดันไฟฟ้า 9 Vrms ความถี่ 50 Hz พิกัดโหลดสูงสุด 27 Watt

ข้อดีของระบบลดค่าฮาร์มอนิก ในวิทยานิพนธ์นี้คือ การควบคุมแบบดิจิทัลช่วยให้ง่ายต่อการควบคุม และแก้ไข อีกทั้งมีส่วนแสดงผลแสดงให้ผู้ใช้งานได้ติดตามการทำงานได้ และสามารถเลือกอันดับของฮาร์มอนิกที่ต้องการชดเชยได้ แต่จากการทดลองก็ยังพบข้อผิดพลาดบางประการได้แก่ การควบคุมแบบดิจิทัลจะต้องวัดสัญญาณมาจำนวน 8 ลูกคลื่น(ในระบบนี้) เพื่อวิเคราะห์ซึ่งทำให้ระบบทำงานได้ช้ากว่าแบบแอนาลอก ในส่วนของการวัดสัญญาณนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเล็กน้อย

ข้อเสนอแนะในการพัฒนาระบบต่อไป ถ้าต้องการให้ระบบมีความแม่นยำในการตรวจวัดสัญญาณ ควรเปลี่ยนไมโครคอนโทรลเลอร์ให้มีความไวสูงขึ้น เช่น DSP (Digital Signal Processing) ซึ่งทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ความถี่สูงขึ้น และการสร้างสัญญาณพีคเบิ้ลยูเอ็มในจำนวนอันดับมากขึ้นจะยังสามารถควบคุมฮาร์มอนิกที่ต้องการได้อันดับมากขึ้นได้ ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพ ยิ่งขึ้นในการลดค่าฮาร์มอนิก

บรรณานุกรม

- [1] Tain-Syh Luor, “**Influence of load characteristics on the applications of passive and active harmonic filters,**” *Harmonics and Quality of Power*, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on , Volume: 1 , 1-4 Oct. 2000 Page(s): 128 -133 vol.1.
- [2] P. Enjeti, P. D. Ziogas, and J. F. Lindsay, “**Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: A critical evaluation,**” *IEEE Trans. Ind.Applicat.*, vol. 26, pp. 302–316, Mar. 1990.
- [3] Dariusz Czarkowski, David V. Chudnovsky, Gregory V. Chudnovsky, and Ivan W. Selesnick , “**Solving the Optimal PWM Problem for Single-Phase Inverters,**” *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—I: FUNDAMENTAL THEORY AND APPLICATIONS*, VOL. 49, NO. 4, APRIL 2002.
- [4] Chen, Z., Blaabjerg, F. Pedersen, J.K., “**A study of parallel operations of active and passive filters,**” *Power Electronics Specialists Conference*, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual , Volume: 2 , 23-27 June 2002 Page(s): 1021 -1026 vol.2
- [5] E.O. Brigham, **The Fast Fourier transform**. Prentice- Hall,1974.
- [6] L.H. Thomas, **Using A Computer to Solve Problems in Physics, Application of digital Computer**. Boston. Mass. :Ginn,1963.
- [7] รศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน และวุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง, กรุงเทพฯ, 2547
- [8] ผศ.นภัทร วัฒนเทพินทร์, **การจำลองการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง**. บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด, ปทุมธานี, 2548
- [9] Tore M.Underland. “ **Snubbers For Pulse Width Modulated Bridge Convert With Power Transister Or GTOS** ”,IPES-Tokyo 83,345P,1983

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมระบบลดค่าฮาร์มอนิก

```

#include "stdafx.h"
#include "Demo.h"
#include "DemoDlg.h"
#include "Fourier.h"
#include <iostream.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include "Smappedlg.h"

#ifdef _DEBUG
#define new DEBUG_NEW
#undef THIS_FILE
static char THIS_FILE[] = __FILE__;
#endif

#define CHECKPOINTER(p) CheckPointer(p,#p)
#define BITS_PER_WORD (sizeof(unsigned) * 8)

#define pwrite 0x378
#define pread 0x379
#define pread1 0x37A

long m_input,Num;
long m_num;
float RealIn[1024]; /* array of input's real samples */
float ImagIn[1024];
float Real[1024], wave[1024]; /* array of input's real samples */
float Imag[1024];

UINT ADC(LPVOID pParam)
{
    int buff;
    int bits;
    PROGRESSTHREAD *pPro = (PROGRESSTHREAD*)pParam;
    HWND hWnd = pPro -> hWnd;
    delete pPro;

    for(int i =0;i<=1023; i++)
    {

```

```
buff = 0;
m_input = 0;

    bits = 0;

    for(int t4 = 0; t4<=m_num; t4++)
    {
        _asm{nop}
    }
//clear bit
    bits = 0xff;
    _outp(pread,bits);
    bits = 0x04;
    _outp(pread1,bits);

//start ADC
    bits = 0x01;
    _outp(pwrite,bits);

//wait ADC
    for(int t2 = 0; t2<16000; t2++)
    {
        _asm{nop}
    }

//Read 4-4 low bit
    buff = _inp(pread)&0xf0;
    m_input|= buff;

    buff = _inp(pread1)&0x0f;
    m_input|= buff;

// clear
    bits = 0x04;
    _outp(pread1,bits);

// trick for 2 hi bit
    bits = 0x02;
```

```

_outp(pwrite,bits);

//wait
for(int t3 = 0; t3<=16000; t3++)
{
    _asm{nop}
}

//read 2 hi bit
buff = _inp(pread1)&0x03;
buff <<= 8 ;
m_input |= buff;

//read +- flag
buff = _inp(pread1)&0x04;
if (buff != 0 )
{
    m_input = -1*(m_input);
}

//trick for end adc
bits = 0x00;
_outp(pwrite,bits);

Real[i] = (m_input*0.0048);//---> ADC 12 bit((m_input*0.0024402)-4.9963);// 1LSB = 0.0024402
Imag[i] = 0 ;
//i++ ;
}
::PostMessage(hWnd,YWM_DRAW_MESSAGE,(WPARAM)0,(LPARAM)0);
return 0 ;
}

//////////////////////////////////////
// CDemoDlg dialog

CDemoDlg::CDemoDlg(CWnd* pParent /*=NULL*/)
: CDialog(CDemoDlg::IDD, pParent)
{

```

```

//{{AFX_DATA_INIT(CDemoDlg)
m_cbShowElement5 = FALSE;
m_ti = _T("");
//}}AFX_DATA_INIT

// Note that LoadIcon does not require a subsequent DestroyIcon in Win32
m_hIcon = AfxGetApp()->LoadIcon(IDR_MAINFRAME);
m_num = 13800//44395;
Num = 1024;
m_bStartStop = FALSE;
m_num2 = 3000;
m_Rmin = -5;
m_Rmax = 5;

}

void CDemoDlg::DoDataExchange(CDataExchange* pDX)
{
    DDX_Text(pDX, IDC_EDIT2, m_num);
    DDV_MinMaxInt(pDX, m_num, 1, 500000);
    DDX_Text(pDX, IDC_EDIT4, m_num2);
    DDV_MinMaxInt(pDX, m_num, 0, 500000);
    CDialog::DoDataExchange(pDX);

//{{AFX_DATA_MAP(CDemoDlg)
    DDX_Control(pDX, IDC_DATA, m_cbData);
    DDX_Control(pDX, IDC_SHOW_PAN, m_cbShowPan);
    DDX_Control(pDX, IDC_SHOW_ZOOM, m_cbShowZoom);
    DDX_Control(pDX, IDC_SHOW_CURSOR, m_cbShowCursor);
    DDX_Control(pDX, IDC_CHECK_SHOW_ELEMENT4, m_cbShowElement4);
    DDX_Control(pDX, IDC_CHECK_SHOW_ELEMENT3, m_cbShowElement3);
    DDX_Control(pDX, IDC_CHECK_SHOW_ELEMENT2, m_cbShowElement2);
    DDX_Control(pDX, IDC_CHECK_SHOW_ELEMENT1, m_cbShowElement1);
    DDX_Control(pDX, IDC_NTGRAPHCTRL1, m_Graph);
    DDX_Control(pDX, IDC_NTGRAPHCTRL2, m_Graph2);
    DDX_Check(pDX, IDC_CHECK_SHOW_ELEMENT5, m_cbShowElement5);
    DDX_Text(pDX, IDC_STATICTIME, m_ti);
    DDX_Control(pDX, IDC_NTGRAPHCTRL3, m_Graph3);

//}}AFX_DATA_MAP

```



```

BOOL CDemoDlg::OnInitDialog()
{
    CDialog::OnInitDialog();

    // Set the icon for this dialog. The framework does this automatically
    // when the application's main window is not a dialog
    SetIcon(m_hIcon, TRUE);           // Set big icon
    SetIcon(m_hIcon, FALSE);        // Set small icon

    // TODO: Add extra initialization here
// GetDlgItem(IDC_Sample)->GetWindowRect(&m_RectSample);
// ScreenToClient(&m_RectSample);

    m_cbShowElement1.SetCheck(1);
    m_cbShowElement2.SetCheck(1);
    m_cbShowElement3.SetCheck(1);
    m_cbShowElement4.SetCheck(1);

    // Customize Graph
    m_Graph.SetBackColor (RGB(0,0,0));
    m_Graph.SetAxisColor (RGB(0,255,0));
    m_Graph.SetLabelColor (RGB(128,128,255));
    m_Graph.SetGridColor(RGB(192,192,192));
    m_Graph.SetShowGrid (TRUE);
    m_Graph.SetCursorColor (RGB(255,0,0));

    m_Graph.SetGraphTitle("Signal");
    m_Graph.SetXLabel ("Time(Sec)");
    m_Graph.SetYLabel("Current(A)");

    // Customize Graph
    m_Graph2.SetBackColor (RGB(0,0,0));
    m_Graph2.SetAxisColor (RGB(0,255,0));
    m_Graph2.SetLabelColor (RGB(128,128,255));

    m_Graph2.SetGridColor(RGB(192,192,192));
    m_Graph2.SetShowGrid (TRUE);
    m_Graph2.SetCursorColor (RGB(255,0,0));

```

```

m_Graph2.SetGraphTitle("Harmonic Analysis");
m_Graph2.SetXLabel ("Harmonic");
m_Graph2.SetYLabel("Spectrum");

m_Graph.SetRange(0.,Num*0.02/128,-5,5.);
m_Graph2.SetRange(0.,Num,0,10.);

m_Graph3.SetBackColor (RGB(0,0,0));
m_Graph3.SetAxisColor (RGB(0,255,0));
m_Graph3.SetLabelColor (RGB(128,128,255));

m_Graph3.SetGridColor(RGB(192,192,192));
m_Graph3.SetShowGrid (TRUE);
m_Graph3.SetCursorColor (RGB(255,0,0));

m_Graph3.SetGraphTitle("Harmonic Wave");
m_Graph3.SetXLabel ("Time(Sec)");
m_Graph3.SetYLabel("Current(A)");
// Set the number of elements to be plotted.
m_Graph.SetElementCount (4);
m_Graph2.SetElementCount (4);
m_Graph3.SetElementCount (4);

SetDlgItemText(IDC_EDIT1,"Enter Delay");
pThread = NULL;

_outp(pwrite,0x00);
// Allocate space for Elements with 2000 points.
if ( !m_Graph.CreateElement(2000) ) {
    AfxMessageBox("Error allocating graph element");
return FALSE;
}
if ( !m_Graph2.CreateElement(2000) ) {
    AfxMessageBox("Error allocating graph element");
return FALSE;
}
if ( !m_Graph3.CreateElement(2000) ) {

```

```

        AfxMessageBox("Error allocating graph element");
return FALSE;
    }
    SetTimer(ID_CLOCK_TIMER, 1000, NULL);
    return TRUE; // return TRUE unless you set the focus to a control
}

// If you add a minimize button to your dialog, you will need the code below
// to draw the icon. For MFC applications using the document/view model,
// this is automatically done for you by the framework.

void CDemoDlg::OnPaint()
{
    if (IsIconic())
    {
        CPaintDC dc(this); // device context for painting

        SendMessage(WM_ICONERASEBKGND, (WPARAM) dc.GetSafeHdc(), 0);

        // Center icon in client rectangle
        int cxIcon = GetSystemMetrics(SM_CXICON);
        int cyIcon = GetSystemMetrics(SM_CYICON);
        CRect rect;
        GetClientRect(&rect);
        int x = (rect.Width() - cxIcon + 1) / 2;
        int y = (rect.Height() - cyIcon + 1) / 2;

        // Draw the icon
        dc.DrawIcon(x, y, m_hIcon);
    }
    else
    {
        CDialog::OnPaint();
    }
}

// The system calls this to obtain the cursor to display while the user drags
// the minimized window.

```

```

HCURSOR CDemoDlg::OnQueryDragIcon()
{
    return (HCURSOR) m_hIcon;
}

void CDemoDlg::OnButtonPlot()
{
    //
    // Customize Graph Elements
    // Change the plot color of the Element 0

    m_Graph.SetElementColor (0,RGB(255,0,0));
    m_Graph.SetElementLinewidth(0,1);
    m_Graph.SetElementLinetype(0,0);

    // Load Data int the Graph Elements
    //

    for ( int i = 0 ; i < Num ; i++)//Num
    {
        double sigma = 150;
        double pi = 3.14;
        // double x0 = 1000.;
        double x = i*0.02/128;// (double)i;

        Real[i]
=0*sin(2*pi/128*i)+30*sin(3*2*pi/128*i)+0*sin(5*2*pi/128*i)+0*sin(7*2*pi/128*i)+0*sin(11*2*pi/128*i)
+0*sin(9*2*pi/128*i);
        Imag[i] = 0;
        double y = Real[i];
        m_Graph.SetXYValue(x,y,i,0);    //Element 1
        //      Writedata(y,"data.txt","a");//data name type
    }

    VMaxmin();

    SetDlgItemText(IDC_EDIT1,"Simulate DATA");
    m_Graph.SetRange(0,(Num*0.02)/256,-100,100);//m_Vmin,m_Vmax);

```

```

        m_Graph.Invalidate ();
    }
void CDemoDlg::OnButtonClear()
    {
        m_Graph.ClearGraph ();
        m_Graph2.ClearGraph ();
        m_Graph3.ClearGraph ();
        SetDlgItemText(IDC_EDIT1,"Clear !!!" );
        SetDlgItemText(IDC_EDIT3,"Clear !!!" );
    }
void CDemoDlg::OnCheckShowElement1()
{
    ShowElement(0, m_cbShowElement1.GetCheck());
}
void CDemoDlg::OnCheckShowElement2()
{
    ShowElement(1, m_cbShowElement2.GetCheck());
}
void CDemoDlg::OnCheckShowElement3()
{
    ShowElement(2, m_cbShowElement3.GetCheck());
}
void CDemoDlg::OnCheckShowElement4()
{
    ShowElement(3, m_cbShowElement4.GetCheck());
}
void CDemoDlg::ShowElement(const int nElement, const BOOL bShow)
{
    m_Graph.ShowElement(nElement, bShow);
    m_Graph2.ShowElement(nElement, bShow);
    m_Graph3.ShowElement(nElement, bShow);
}
void CDemoDlg::OnButtonCopy() {m_Graph.Copy2Clipboard();}
void CDemoDlg::OnCursorEventNtgraphctrl1(double x, double y)
{
    TRACE( "X%3.3f, Y%3.3f\n", x, y ); // gibt die Koordinaten korrekt aus.
}

```

```
void CDemoDlg::OnShowCursor()
{
    m_Graph.SetZoomMode(FALSE);
        m_cbShowZoom.SetCheck(0);
        m_Graph.SetCursorMode(m_cbShowCursor.GetCheck());

    m_Graph2.SetZoomMode(FALSE);
        m_cbShowZoom.SetCheck(0);
        m_Graph2.SetCursorMode(m_cbShowCursor.GetCheck());

    m_Graph3.SetZoomMode(FALSE);
        m_cbShowZoom.SetCheck(0);
        m_Graph3.SetCursorMode(m_cbShowCursor.GetCheck());
}

void CDemoDlg::OnShowZoom()
{
    m_Graph.SetCursorMode(FALSE);
        m_cbShowCursor.SetCheck(0);
        m_Graph.SetZoomMode(m_cbShowZoom.GetCheck());

    m_Graph2.SetCursorMode(FALSE);
        m_cbShowCursor.SetCheck(0);
        m_Graph2.SetZoomMode(m_cbShowZoom.GetCheck());

    m_Graph3.SetCursorMode(FALSE);
        m_cbShowCursor.SetCheck(0);
        m_Graph3.SetZoomMode(m_cbShowZoom.GetCheck());
}

void CDemoDlg::OnShowPan()
{
    m_Graph.SetZoomMode(FALSE);
        m_cbShowCursor.SetCheck(0);
        m_Graph.SetCursorMode(FALSE);
        m_cbShowCursor.SetCheck(0);
        m_Graph.SetPanMode(m_cbShowPan.GetCheck());
        m_Graph2.SetZoomMode(FALSE);
        m_cbShowCursor.SetCheck(0);
```

```

    m_Graph2.SetCursorMode(FALSE);
    m_cbShowCursor.SetCheck(0);
    m_Graph2.SetPanMode(m_cbShowPan.GetCheck());
    m_Graph3.SetZoomMode(FALSE);
    m_cbShowCursor.SetCheck(0);
    m_Graph3.SetCursorMode(FALSE);
    m_cbShowCursor.SetCheck(0);
    m_Graph3.SetPanMode(m_cbShowPan.GetCheck());
}

static void CheckPointer ( void *p, char *name )
{
    if ( p == NULL )
    {
        //      sprintf(tempstr, "Error in fft_double(): %s == NULL\n", name);
        // OKBox(tempstr, "Error!");
        exit(1);
    }
}

void WINAPI fft_float (
    unsigned NumSamples,
    int    InverseTransform,
    float  *RealIn,
    float  *ImagIn,
    float  *RealOut,
    float  *ImagOut )
{
    unsigned NumBits; /* Number of bits needed to store indices */
    unsigned i, j, k, n;
    unsigned BlockSize, BlockEnd;

    double angle_numerator = 2.0 * DDC_PI;
    double tr, ti; /* temp real, temp imaginary */

    if ( !IsPowerOfTwo(NumSamples) )
    {
        //      sprintf (
//      tempstr,
//      "Error in fft(): NumSamples=%u is not power of two\n",

```

```

//    NumSamples );
//            OKBox(tempstr, "Error!");
    exit(1);
}
if ( InverseTransform )
    angle_numerator = -angle_numerator;

CHECKPOINTER ( RealIn );
CHECKPOINTER ( RealOut );
CHECKPOINTER ( ImagOut );

NumBits = NumberOfBitsNeeded ( NumSamples );
/*
** Do simultaneous data copy and bit-reversal ordering into outputs...
*/
for ( i=0; i < NumSamples; i++ )
{
    j = ReverseBits ( i, NumBits );
    RealOut[j] = RealIn[i];
    ImagOut[j] = (ImagIn == NULL) ? (float)0.0 : ImagIn[i];
}

/*
** Do the FFT itself...
*/
BlockEnd = 1;
for ( BlockSize = 2; BlockSize <= NumSamples; BlockSize <<= 1 )
{
    double delta_angle = angle_numerator / (double)BlockSize;
    double sm2 = sin ( -2 * delta_angle );
    double sm1 = sin ( -delta_angle );
    double cm2 = cos ( -2 * delta_angle );
    double cm1 = cos ( -delta_angle );
    double w = 2 * cm1;
    double ar[3], ai[3];
    //double temp;

    for ( i=0; i < NumSamples; i += BlockSize )

```

```

{
    ar[2] = cm2;
    ar[1] = cm1;

    ai[2] = sm2;
    ai[1] = sm1;
    for ( j=i, n=0; n < BlockEnd; j++, n++ )
    {
        ar[0] = w*ar[1] - ar[2];
        ar[2] = ar[1];
        ar[1] = ar[0];

        ai[0] = w*ai[1] - ai[2];
        ai[2] = ai[1];
        ai[1] = ai[0];

        k = j + BlockEnd;
        tr = ar[0]*RealOut[k] - ai[0]*ImagOut[k];
        ti = ar[0]*ImagOut[k] + ai[0]*RealOut[k];

        RealOut[k] = RealOut[j] - (float)tr;
        ImagOut[k] = ImagOut[j] - (float)ti;

        RealOut[j] += (float)tr;
        ImagOut[j] += (float)ti;
    }
}

BlockEnd = BlockSize;
}

/*
** Need to normalize if inverse transform...
*/
if ( InverseTransform )
{
    double denom = (double)NumSamples;

```

```

    for ( i=0; i < NumSamples; i++ )
    {
        RealOut[i] /= (float)denom;
        ImagOut[i] /= (float)denom;
    }
}

int IsPowerOfTwo ( unsigned x )
{
    if ( x < 2 )
        return FALSE;

    if ( x & (x-1) )    // Thanks to 'byang' for this cute trick!
        return FALSE;

    return TRUE;
}

unsigned NumberOfBitsNeeded ( unsigned PowerOfTwo )
{
    unsigned i;

    if ( PowerOfTwo < 2 )
    {
        //sprintf(tempstr, ">>> Error in fftmisc.c: argument %d to NumberOfBitsNeeded is too
small.\n", PowerOfTwo);
        //      OKBox(tempstr, "Error!");

        // exit(1);
    }

    for ( i=0; ; i++ )
    {
        if ( PowerOfTwo & (1 << i) )
            return i;
    }
}

```

```

unsigned ReverseBits ( unsigned index, unsigned NumBits )
{
    unsigned i, rev;

    for ( i=rev=0; i < NumBits; i++ )
    {
        rev = (rev << 1) | (index & 1);
        index >>= 1;
    }

    return rev;
}

double WINAPI Index_to_frequency ( unsigned NumSamples, unsigned Index )
{
    if ( Index >= NumSamples )
        return 0.0;
    else if ( Index <= NumSamples/2 )
        return (double)Index / (double)NumSamples;

    return -(double)(NumSamples-Index) / (double)NumSamples;
}

void CDemoDlg::OnFft()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here

    // Load Data int the Graph Elements
    //

    //*****//
    m_Graph2.SetElementColor (2,RGB(0,0,255));
    m_Graph2.SetElementLinewidth(2,1);
    m_Graph2.SetElementLinetype(2,0);
    fft_float ( Num,0 , Real, Imag, RealOut, ImagOut );
    for (int f=0;f<Num;f++)
    {
        a[f] = sqrt((RealOut[f]*RealOut[f])+(ImagOut[f]*ImagOut[f]));
    }
}

```

```

    }
    for (int y=0;y<Num/2;y++)
    {
        b[y] = 0;
    }
    for (int g=0;g<Num/2;g++)
    {
        b[g] = a[g];
    }
    for(int i=0;i<(Num/2);i++)
    {
        double y = (b[i]/512);
        double x = i/(Num/128) ;
        m_Graph2.SetXYValue(x,y,i,2);
        //Writedata(y,"ana.txt","a");//data name type
    }

double m_thd = 0.0;
double m_buff=0.0;
for (int o=2*(Num/128);o<Num/2;)
{
    m_thd = m_thd+(b[o]*b[o]);
    o += Num/128 ;
}
CString m_Thd;
m_buff = 100*sqrt(m_thd/(b[Num/128]*b[Num/128]));
m_Thd.Format("THD = %.3f%%",m_buff);
SetDlgItemText(IDC_EDIT1,m_Thd) ;

m_Thd.Format(" %.3f ",(b[Num/128]/512));
SetDlgItemText(IDC_N1,m_Thd) ;

m_Thd.Format(" %.3f ",b[3*(Num/128)]/512);
SetDlgItemText(IDC_N3,m_Thd) ;

m_Thd.Format(" %.3f ",b[5*(Num/128)]/512);
SetDlgItemText(IDC_N5,m_Thd) ;

```

```

m_Thd.Format(" %.3f ",b[7*(Num/128)]/512);
SetDlgItemText(IDC_N7,m_Thd);

m_Thd.Format(" %.3f ",b[11*(Num/128)]/512);
SetDlgItemText(IDC_N11,m_Thd);

m_Thd.Format(" %.3f ",b[13*(Num/128)]/512);
SetDlgItemText(IDC_N12,m_Thd);

//Redraw the Control]
m_Graph2.SetRange(0,(Num/2)/(Num/128),0,m_Vmax); //(Num/128)

m_Graph2.Invalidate ();
OnHw();
}
void CDemoDlg::ADRW()
{
    BeginWaitCursor();

    //delaytime = Num
    for(int t = 0; t<m_num; t++)
        {
            _asm{nop}
        }

    //Read signal
    _outp(0x378,0xffff);

    int bits = 0;
    long buff;

    //set a2d
    bits = 0x0b; //cs1 clk1 di1
    _outp(pwrite,bits);
    bits = 0x03; //cs0
    _outp(pwrite,bits);
    bits = 0x01; //di1 start clk
    _outp(pwrite,bits);
    bits = 0x03;

```

```

        _outp(pwrite,bits);
        bits = 0x01; //di1 sgl
_outp(pwrite,bits);
    bits = 0x03;
        _outp(pwrite,bits);
    bits = 0x00; //di 0 = odd
_outp(pwrite,bits);
    bits = 0x02;
        _outp(pwrite,bits);
        bits = 0x1; //di1 msbf
_outp(pwrite,bits);
    bits = 0x03;
_outp(pwrite,bits);
////////////////////////////////////
    bits = 0x01; //clk0 =start clk
_outp(pwrite,bits);
    m_input = 0;
    for (int i=1;i<14;i++)
    {
        buff = _inp(pread)&0x080;
        buff <<= 6 ;
        buff >>=i ;

        m_input|= buff;
    bits = 0x03;
        _outp(pwrite,bits);
        bits = 0x01;
_outp(pwrite,bits);
    }
    m_input &= 0x0fff;
//    m_data[a] = m_input/50;
    bits = 0x0b;
_outp(pwrite,bits);
    EndWaitCursor();
}
void CDemoDlg::OnSampling()
{
    UpdateData();
}

```

```

        m_num = m_num;
DWORD ExitCode;
    if(pThread != NULL)
    {
        ::GetExitCodeThread(pThread->m_hThread,&ExitCode);
        if(ExitCode == STILL_ACTIVE)
            return;
    }
//    StartAuto = true;
    PROGRESSTHREAD *progThread = new PROGRESSTHREAD;
    progThread ->hWnd = this ->m_hWnd;
    pThread = AfxBeginThread(ADC,progThread,THREAD_PRIORITY_NORMAL);
}
void CDemoDlg::VMaxmin()
{
    m_Vmax = 0;
    m_Vmin = 0;
    m_Vmin = Real[0];
    for (int i=1;i<Num;i++)
    {
        if (Real[i] >= m_Vmax)
        {
            m_Vmax = Real[i];
        }
        if (Real[i] <= m_Vmin)
        {
            m_Vmin = Real[i];
        }
    }
    CString m_Volt;
    m_Volt.Format("Max = %.3f \r\nMin = %.3f",m_Vmax,m_Vmin);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT3,m_Volt);
    //AfxMessageBox(m_Volt);
}
void CDemoDlg::OnStart()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here

```

```
m_bStartStop ^= TRUE;

if (m_bStartStop)
{
    m_cbData.EnableWindow(FALSE);
    SetTimer(Sampling_TIMER,m_num2,NULL);
}
else
{
    m_cbData.EnableWindow(TRUE);
    KillTimer(1);
}
}

void CDemoDlg::OnTimer(UINT nIDEvent)
{
    // TODO: Add your message handler code here and/or call default
    UpdateData();
    CTime curTime = CTime::GetCurrentTime();
    switch (nIDEvent)
    {
        case Sampling_TIMER:
            OnSampling() ;
            Sleep(1000);
            OnFft();

            break;
        case ID_CLOCK_TIMER:
            //if(nIDEvent == Sampling_TIMER)
            m_ti.Format("%d:%d:%d", curTime.GetHour(),
curTime.GetMinute(),
curTime.GetSecond());

            break;
    }
    UpdateData(FALSE);
    CDialog::OnTimer(nIDEvent);
}
```

```

void CDemoDlg::OnCheckShowElement5()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here
    UpdateData();
    if (m_cbShowElement5 == FALSE)
    {
        m_Graph.SetYLabel("Current(A)");//.);

    }else
        m_Graph.SetYLabel("Volt(V)");

}

void CDemoDlg::OnDatashow()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here
    m_dlg.DoModal();
}

void CDemoDlg::Writedata(double m_DATA, CString nam, CString typ)
{
    FILE *fp;
    CString str;
    // TODO: Add your control notification handler code here
    if(!(fp = fopen(nam,typ)))
    {
        str.Format("Cannot open data.txt file!");
        ::SetWindowText(::GetDlgItem(m_hWnd, IDC_EDIT1 ),str);
        return;
    }
    else{
        // UpdateData();
        CString m_nu;
        m_nu.Format("%.2F",m_DATA);
        fputs(m_nu, fp);
        str.Format(",");
        fputs(str, fp);
        fclose(fp);
    }
}

```

```

}

void CDemoDlg::OnHw()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here

    m_Graph3.SetElementColor (3,RGB(100,200,0));
    m_Graph3.SetElementLinewidth(3,1);
    m_Graph3.SetElementLinetype(3,0);

    for(int f = 1; f<(Num-1);f++)
    {
        double x = f*0.02/128;
        double pi = 3.14;
        wave[f] =
            (b[3*(Num/128)]/512)*sin(3*2*pi/128*f)+
            (b[5*(Num/128)]/512)*sin(5*2*pi/128*f)+
            (b[7*(Num/128)]/512)*sin(7*2*pi/128*f)+
            (b[9*(Num/128)]/512)*sin(9*2*pi/128*f)+
            (b[11*(Num/128)]/512)*sin(11*2*pi/128*f)+
            (b[13*(Num/128)]/512)*sin(13*2*pi/128*f)+
            (b[2*(Num/128)]/512)*sin(2*2*pi/128*f)+
            (b[15*(Num/128)]/512)*sin(15*2*pi/128*f);

        double y = wave[f];
        m_Graph3.SetXYValue(x,y,f,3);
    }

    m_Graph3.SetRange(0,(Num*0.02)/256,-m_Vmax,m_Vmax);
    m_Graph3.Invalidate ();
}

void CDemoDlg::OnDraw()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here

    m_Graph.SetElementColor (0,RGB(0,0,255));
    m_Graph.SetElementLinewidth(0,1);
    m_Graph.SetElementLinetype(0,0);

    m_Graph.SetElementColor (1,RGB(255,255,0));
    m_Graph.SetElementLinewidth(1,1);

```

```
m_Graph.SetElementLinetype(1,2);
m_Graph.SetRange(0,(Num*0.02)/128,m_Rmin,m_Rmax);

    for (int w=0;w<(Num-1);w++)
    {
        double y = Real[w];
        double x = w*0.02/128 ;
        m_Graph.SetXYValue(x,y,w,0);

    }    // Redraw the Control
// SetDlgItemText(IDC_EDIT1,"Real DATA") ;
    VMaxmin();
    CString m_nu;
    m_nu.Format(" Delay = %d ",m_num);
    SetDlgItemText(IDC_EDIT6,m_nu) ;

    m_Graph.Invalidate ();

}
```

ภาคผนวก ข.

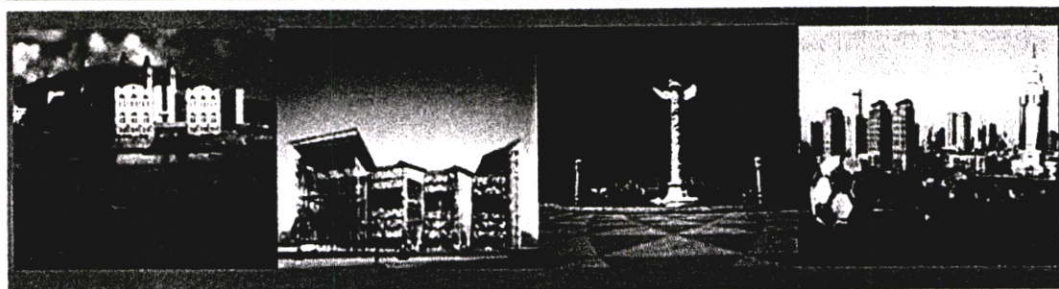
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. V.Tipsuwanporn, W.Thueksathit, and W.Sawaengsinkasikit, “ **Harmonics reduction system using active filter based on computer unit,**” Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES 15-18 Aug. 2005 Dalian, China, Page(s): 1 - 5
2. W.Thueksathit, V.Tipsuwanporn, P.Hemawanit, S.Gulpanich, and K.Srisuwan, “**Harmonics reduction in load control and management system,**” International Conference on Control, Automation and Systems/ICCAS 2003, 22-25 Gyeongju, Korea, pp. 2283-2286:



2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific

August 14-18, 2005 Dalian, China



[Home](#)

[Session List](#)

[Authors' Index](#)

[Search](#)

Co-Sponsored by:



IEEE Power Engineering Society
(IEEE/PES)



The Chinese Society for
Electrical Engineering (CSEE)

In cooperation with:



China Electric Power Research
Institute (CEPRI)

CD-Rom Sponsored by:



Guodian Nanjing Automation
Co., Ltd.

©2005 IEEE. Personal use of this material is permitted. However, permission to reprint/republish this material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution to servers or lists, or to reuse any copyrighted component of this work in other works must be obtained from the IEEE.

IEEE Catalog Number: 05CH37678C ISBN: 0-7803-9115-2



2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific

August 14-18, 2005 Dalian, China

[Home](#)

[Session List](#)

[Authors' Index](#)

[Search](#)

FA3-09 **Quasi-Resonant DC Link Control of 3-Dimensional Hysteresis Current PWM Technique in 3-Phase 4-Wired Power Quality Compensator**
 T&D-F0517 Minghui Zhan, Manchung Wong, Yingduo Han,
 (Macau)
[PDF](#)

FA3-10 **Application of Adaptive Filtering in Harmonic Analysis and Detection**
 T&D-C0310 Longhua Mu, Zi Jiang,
 (China)
[PDF](#)

FA3-11 **Harmonics Reduction System Using Active Filter Based on Computer Unit**
 T&D-F0416 Vittaya Tipsuwanpon, Weerachai Thueksathit, Winyu Sawaengsinkasikit,
 (Thailand)
[PDF](#)

[↑ TOP](#)

KS1 - Keynote Speeches

KS1-01 **Current Status and Development of National Grid of China**
 T&D-C1275 Yinbiao Shu,
 (China)
[PDF](#)

KS1-02 **South China HVAC/HVDC Hybrid Grid: Development and Challenges**
 Manthor V.

Harmonics reduction system using active filter based on computer unit

V.Tipsuwanporn, Member, IEEE, W.Thueksathit, and W.Sawaengsinkasikit

Abstract—This paper presents the harmonics analysis and compensation which occurred in the electrical system. We use the electrical signal analysis based on FFT technique in order to calculate harmonics that occurred in the electrical system. The harmonics are compensated by using active harmonic filters. This system consists of a computer which works as controller, processor, analysis, monitor and database unit together with a microcontroller which has A/D converter is used for sampling the electrical signals via a parallel port of the computer. The active harmonic filters (IGBT Module) are controlled by PWM (Pulse Width Modulation) signal from the microcontroller. The PWM data (Switching angle) is programmed by computer. The data such as voltages, currents, the total harmonic distortion etc., can be saved as database for analysis. The harmonics compensation increase high efficiency of the electrical system and decrease the damage and incorrect operation that may happen with electrical devices.

Keywords—Harmonics compensation, pulsewidth modulation (PWM), single-phase fullbridge inverter

I. INTRODUCTION

IN the present, the electrical works or users have realized the importance of the electrical quality since in electrical systems especially the process of production of industries, which use high technology devices. The characteristic of these devices is sensitive to the changes of current and voltage. If the size and shape of signals are distorted, it may damage the devices and make the functional failure. This problem needs to be protected and solved. The main reason of signal distortion is the harmonics of electrical systems. Most of that are non-linear device which oscillate harmonics such as converter, power rectifier, adjustable-speed drive and vice versa. Using non-linear devices, harmonic current is applied to the electrical system itself but if non-linear devices have wide range, harmonic current may leakage into adjacent electrical system.

In this paper, we present the development of harmonics reduction system by using active filter based on computer unit, which within the medium and small building. This system are used computer which work with 2 microcontrollers. The information received from first microcontroller can be show in data monitoring record to

database system. Harmonic reduction system base on the FFT technique in order to evaluate the occurring harmonics in the system and control active harmonic filter to compensate the harmonics by PWM signal from second microcontroller. PWM data can program by computer and it can be select harmonics to compensation.

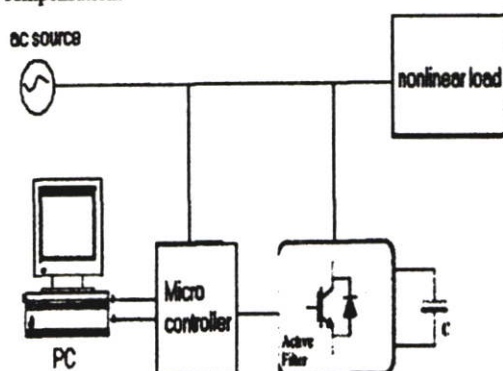


Fig. 1. Hardware configuration system.

II. HARDWARE CONFIGURATION

All system consist of data acquisition part and control part, show in Fig. 1. The data acquisition consist of the first microcontroller which have A/D, that install in building for sampling of electric signal, then link to the computer with parallel port. The control system consist of computer, work as supervisory system. That is for monitoring of signal, Harmonic analysis, communication, database and PWM program. Second microcontroller will generate PWM signal to control harmonics filter by using data from computer. Harmonics filter is active filter type (IGBT module). In this paper use microchip microcontroller (PIC18F458).

III. SOFTWARE CONFIGURATION

The software is developed by Visual C++ Ver.6 program and can be used on the windows 98/2000 operation system. The function of software is electric signal monitor, Spectrum graph from harmonic analysis, communication software, Program PWM and Harmonic filter control. All function is inside the computer. Program in microcontroller consist of program for sampling signal and generate PWM signal from data.

A. The control system flowchart

Fig. 2, shows control system flowchart of harmonics reduction system. The first, we sampling data from signal of

V. Tipsuwanporn and W. Thueksathit are with Department of Industrial Instrumentation, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520.
(e-mail: ktvitay@kmitl.ac.th).

W. Sawaengsinkasikit is with Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University, Bangkok, Thailand

system and then monitoring signal on computer. We analyze the harmonics. The next, we calculate PWM data from program PWM. Finally, we sent PWM signal to control filter.

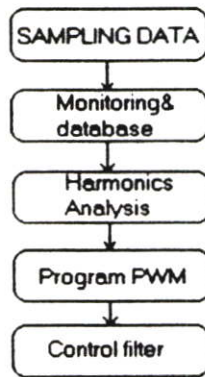


Fig. 2. The control system flowchart.

B. Electric signal and harmonic analysis monitoring

Monitoring software can be shown electric signal and harmonic analysis in the graph format. Another values such as total harmonic distortion (THD) to show in monitor also. Show in Figs. 3-4.

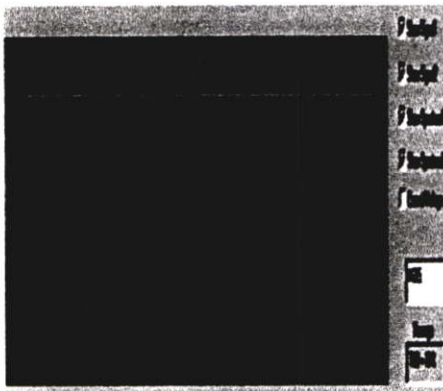


Fig. 3. Electric signal monitor.

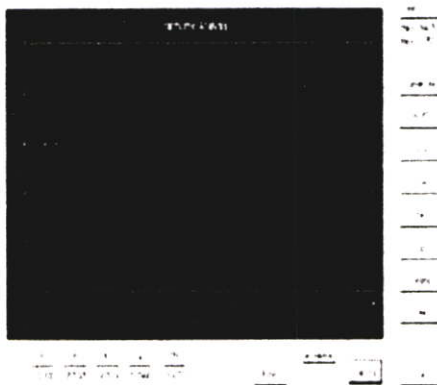


Fig. 4. Harmonic analysis monitor.

C. Communication software

The communication software in this paper is interfacing between computer and Microcontrollers by via parallel port. Using address 0379H and 037AH for receive data of electric signal from first microcontroller and address 0378H is used for control first microcontroller and sent data to second microcontroller for generate PWM signal, show in table 1.

TABLE I
PARALLEL PORT COMMUNICATION ADDRESS

Address	Bit0	Bit1	Bit2	Bit3	Bit4	Bit5	Bit6	Bit7
0378H	Bit0-3 use for control				Bit 4-7 use for control filter			
0379H	-	-	-	-	Bit 4-7 use for receive data from microcontroller			
037AH	Bit0-3 use for receive data from microcontroller				-	-	-	-

D. Harmonics analysis

Harmonic analysis program in this paper use FFT method. This method can sharply convert the measured signals from A/D converter in microcontroller on the time domain to the frequency domain. Diagram is show in Fig. 5. The signals are represented with spectrum lines and these lines indicate the occurring harmonics in the measured system.

We can calculate total harmonic distortion (THD) from (1) and (2).

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{n=2} I_{n,rms}^2}{I_{1,rms}^2}} \quad (1)$$

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{n=2} V_{n,rms}^2}{V_{1,rms}^2}} \quad (2)$$

where

THD is Total Harmonic Distortion.

I_n is n^{th} harmonic current.

V_n is n^{th} harmonic voltage.

This program analyzes the harmonics and sent data of harmonics to program PWM in order to calculate PWM data (switching angle). The computer will sent the properly PWM data to microcontroller in order to generate PWM signal for active filter to compensating harmonics in electrical system. Function of harmonic analysis, program PWM and control filter can be direct and automatic control.

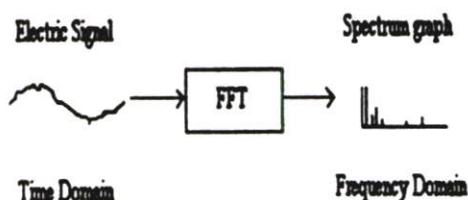


Fig. 5. Harmonic analysis diagram.

E. Program PWM

A PWM waveform consist of a series of positive and negative pulses of constances amplitude but with variable switching instance as depiced in Fig. 6.(as in a power electronic PWM full bridge inverter)

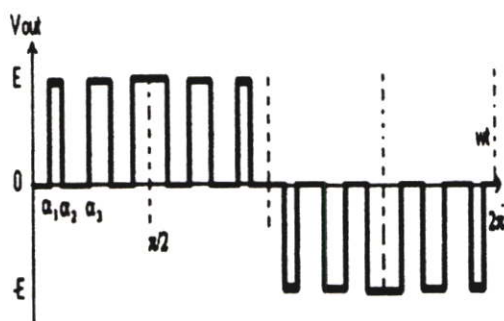


Fig. 6. PWM waveform.

A method to generate PWM in this paper call programmed or optimal PWM. Owing to the symmetries in the PWM waveform of Fig. 6,only odd harmonics exist. As summing that the PWM waveform is choppes n time per half a cycle,the Fourier coefficient of odd harmonics are given by

$$V_k = \frac{4E}{k\pi} \left[\cos k\alpha_1 - \cos k\alpha_2 + \dots + (-1)^{n-1} \cos k\alpha_n \right] \quad (3)$$

Where $k=1,3,5,\dots$

E is amplitude of square wave .

α is switching angle .

Amplitude of any n harmonics can be set by solving a system of n nonlinear equation obtained from setting (3) equal to prespecified values. In the harmonics eliminate program PWM method,the fundamental component is set to a required amplitude and $n-1$ low-order harmonics are set to zero but in this paper $n-1$ low-order harmonics are set to required amplitude.In this method can select harmonic to compensation.From (3) the nonlinear equation system of PWM waveform can be written ad follows:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \dots \cos(\alpha_n) &= \frac{\pi}{4E} h_1 \\ \cos(3\alpha_1) - \cos(3\alpha_2) + \dots \cos(3\alpha_n) &= \frac{3\pi}{4E} h_3 \\ &\dots \\ \cos(n\alpha_1) - \cos(n\alpha_2) + \dots \cos(n\alpha_n) &= \frac{n\pi}{4E} h_n \end{aligned} \quad (4)$$

where h is amplitude of harmonics.

In this paper,The program PWM in computer using algorithm ODDSOL in [3] ,usually use in the nonlinear system equation solving to modifies PWM signal of sine-fundamental for PWM signal of sine-fundamental and harmonics .The final results of n nonlinear equation system are switching angle ,and take this data to generate PWM signal by microcontroller. In Fig. 7,show the example of generated PWM signal .

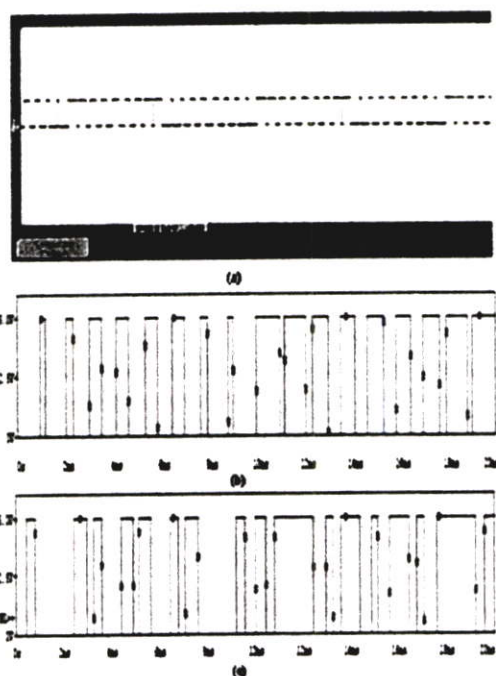


Fig. 7. Example of PWM signal.(a) PWM signal at $n = 8$ from microcontroller. (b) PWM signal of sine 50 Hz amplitude at 0.5 per unit. (c) PWM signal of sine 50 Hz amplitude at 0.5 per unit and 9thharmonic amplitude at 0.4 per unit .

The harmonics signal generating is to put the PWM signal of sine-fundamental at S1 and PWM signal of sine-fundamental and harmonics at S3 follow as the Fig. 8. The amplitude of sine-fundamental in PWM signal at S1 must equal the amplitude of sine-fundamental in PWM signal at S3 and the amplitude of harmonics in PWM signal at S3 is set to required.The signal at S2 is 180 degree out of phase with the signal at S1 and the signal at S4 is 180 degree out of phase with the signal at S3 also. The waveform output of full bridge inverter is the PWM signal of desired harmonics as shown in Fig. 9(c).

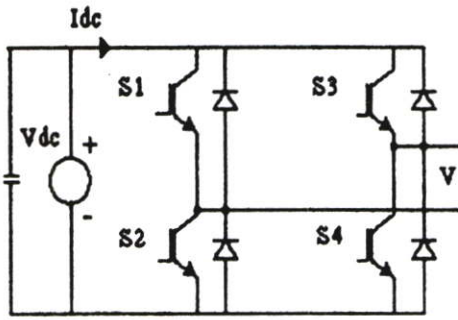


Fig. 8. Single-phase full bridge inverter.

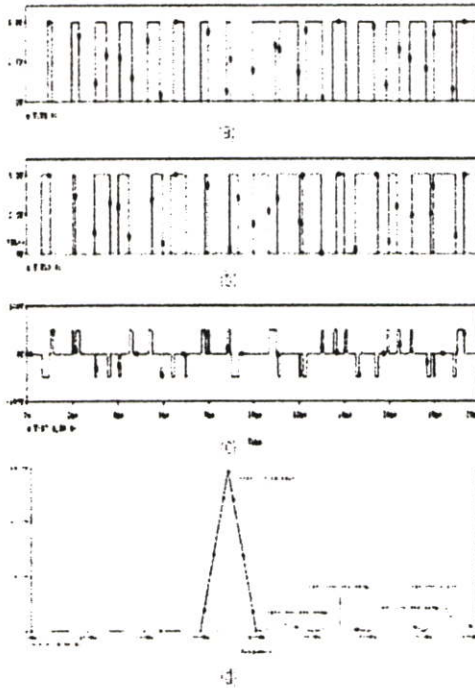


Fig. 9. Waveform of full bridge inverter. (a) PWM signal of sine-fundamental at S1. (b) PWM signal of sine-fundamental and Harmonic at S3. (c) Line-to-line voltage.(d) Frequency spectrum of (c).

IV. EXPERIMENT AND RESULT

In this paper, we use Orcad Pspice program to simulation signal. We define the system which has voltage 50 Volts and frequency 50 Hz and also has the 3th and the 5th harmonics that have the voltage 15 and 5 Volts, respectively. After that, we program PWM data of the harmonics and generate PWM signal which is 180 degree out of phase to compensate signal in system.

In Figs. 10(a) and (b), show the voltage signal before and after the signal are compensated the harmonics, respectively. In Figs. 10(c) and (d), show the frequency spectrum of signal before and after the signal are compensated the harmonics, respectively. According to the above figures, after the signal compensated the harmonics, the THD (Total Harmonics Distortion) values decrease from 10% to 1.893%.

In Figs. 11(a) and (b), show the current before and after the signal are compensated the harmonics, respectively. In Figs. 11(c) and (d), show the frequency spectrum of signal before and after the signal are compensated the harmonics, respectively. According to the above figures, after the signal compensated the harmonics, the THD (Total Harmonics Distortion) values decrease from 10% to 1.167%.

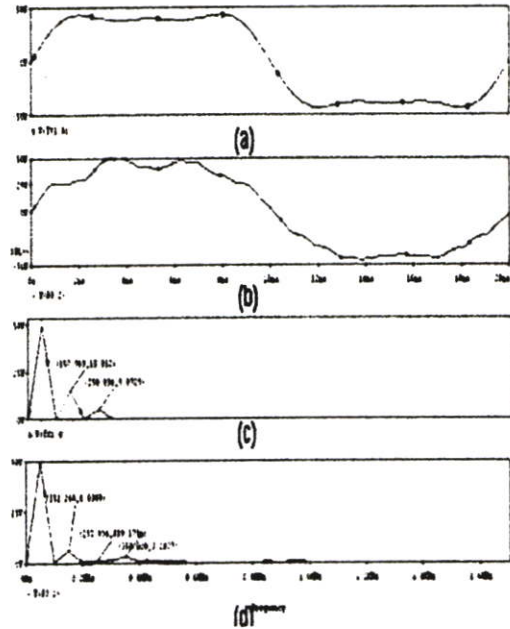


Fig. 10. Voltage signal. (a) Before the signal will be compensated. (b) After the signal was compensated. (c) Frequency spectrum of signal before it will be compensated. (d) Frequency spectrum of signal after it was compensated.

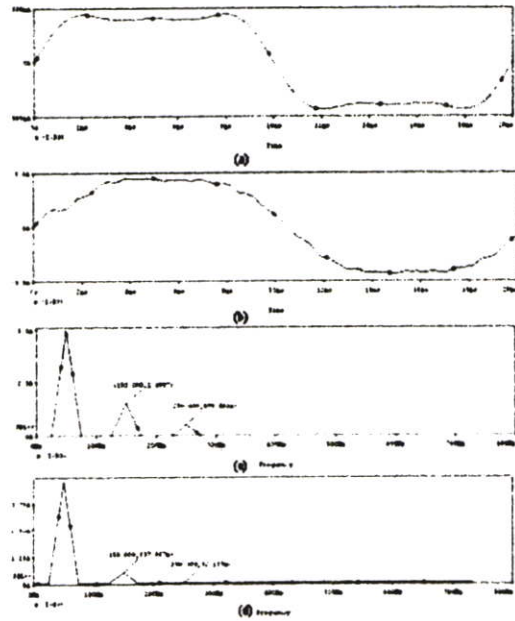


Fig. 11. Current signal. (a) Before the signal will be compensated. (b) After the signal was compensated. (c) Frequency spectrum of signal before it will be compensated. (d) Frequency spectrum of signal after it was compensated.

V. CONCLUSIONS

In this paper we present the harmonic reduction system using active filter to reduction total harmonic distortion value by the computer which work with microcontroller and active harmonic filter(IGBT module).The harmonic reduction system program PWM and control active harmonic filter by analyze signal in system .The computer shows electric signal ,harmonic analysis,function direct and automatic filter control.The results present ability of the harmonics reduction that increase the efficiency of electric system and can improve in the real system(in the future).

VI.REFERENCES

- [1] Tain-Syh Luor;" Influence of load characteristics on the applications of passive and active harmonic filters" *Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on* . Volume: 1, 1-4 Oct. 2000 Page(s): 128 -133 vol.1
- [2] P. Enjeti, P. D. Ziogas, and J. F. Lindsay, "Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: A critical evaluation," *IEEE Trans. Ind.Applicat.*, vol. 26, pp. 302-316, Mar. 1990.
- [3] Dariusz Czarkowski, Member; David V. Chudnovsky; Gregory V. Chudnovsky; and Ivan W. Selesnick "Solving the Optimal PWM Problem for Single-Phase Inverters" *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—I: FUNDAMENTAL THEORY AND APPLICATIONS*, VOL. 49, NO. 4, APRIL 2002.
- [4] Chen, Z.; Blaabjerg, F.; Pedersen, J.K.; "A study of parallel operations of active and passive filters" *Power Electronics Specialists Conference, 2002. pESC 02. 2002 IEEE 33rd Annual* . Volume: 2, 23-27 June 2002 Page(s): 1021 -1026 vol.2
- [5] Wilson E. Kazibwe,Musoke H. Sendaula. *Electric Power Quality Control Techniques*. New York:Van Nostrand Reinhold,1993.
- [6] E.O. Brigham, "The Fast Fourier transform",Prentice- Hall,1974.
- [7] L.H. Thomas, "Using A Computer to Solve Problems in Physics. Application of digital Computer ." Boston, Mass. :Ginn,1963.
- [8] Acha, Enrique "Power system harmonics: Computer modelling and analysis" Chichester : John Wiley & Sons, c2001 .



Winyu Sewnengsakasit was born in Bangkok, Thailand, on Apr 23,1972.He receive the B.Eng(EE)degree from South-East Asia University, Bangkok, Thailand, in 1995.In 2002,he receive the M.Eng(EE) degree from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. Since 1996, he has been instructor at the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University, Bangkok, Thailand. He was Assistance Professor in 2004. His research of interests included power electronics and motor drive.



Vittaya Tipsewanpora He received the B. Ind. and M. Eng. Degree in electrical engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITLE), Thailand, in 1985 and 1989, respectively. Since 1986, he has been instructor at the Department of Industrial Instrumentation Technology of KMITLE. He was Assistance Professor and Associate Professor in 1995 and 1998, respectively. His research interests include measurement and control system, non-linear dynamics in power electronics, and remote control.



Weerachai Thuksathit He received the B. sci. Degree in applied physics from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITLE), Thailand, in 2002.Since 2003,he had been studied at the Department of Industrial Instrument Technology of KMITLE.His research interests included power electronics and computer programming.



Final Program & Digest Book

ICCAAS 2003

International Conference on
Control, Automation and Systems

October, 22 ~ 25, 2003
Gyeongju TEMF Hotel, Gyeongju, Korea

ICASE

The Institute of Control, Automation and Systems Engineering, Korea
<http://www.icas.org> <http://www.ica.or.kr> <http://www.icas.org>

<i>Tantaworrasitp Apicitt, Benjanarasuth Taworn, Ngamwinit Jongkol and Komine Noriyuki</i>	
Shape Design of Frame Structures for Vibration Suppression and Weight Reduction	2246
<i>Hase Miyahito and Ikeda Masao</i>	
Least Squares Based PID Control of an Electromagnetic Suspension System	2252
<i>Park Younmook, Nam Myeong-Ryong, Seo In-Ho, Lee Sang-Hyun, Lim Jong-Tae and Tahk Min-Jea</i>	
Design and Development of an optimal Intelligent Fuzzy logic Controller for a laser tracking system	2258
<i>Lu Jia and Cannady James</i>	
An Improved Method to Construct T-S Fuzzy Model	2264
<i>Min HyungGi</i>	
Simulation of the Air Conditioning System Using Fuzzy Logic Control	2270
<i>Mongkolwongrojn Mongkol and Sarawit Wasin</i>	

FE02 : Power Electronics II

Programmable Ministep Drive	2274
<i>Thedmolee Sunhapitch, Pongswatd Sawai, Ukakimapun Prapart and Kumool Sart</i>	
Immune Algorithms Based 2-DOF Controller Design And Tuning For Power Stabilizer	2278
<i>Kim Dong Hwa</i>	
Harmonics Reduction in Load Control and Management System	2283
<i>Thueksathit Weerachai, Hemawanit Puttipong, Tipsuwanporn Vittaya, Srisuwan Komkrit and Kulpanich Suphan</i>	
The Effects of γ -rays on Power Devices	2287
<i>Lho Young Hwan, Kim Ki Yup, Cho Kyoung Yun and Devarajan G.</i>	
Analysis and Design of Sliding Mode Control for a Single-Phase AC-DC Converter	2291
<i>Tipsuwanporn Vittaya, Tarasantsuk Chanlit and Sawaengsinkasikit Winayn</i>	
A Study on the SEU in the SRAM to proton Irradiation	2295
<i>Lho Young Hwan, Lee Seok Won, Park Bo Kyun and Kim Bong Sun</i>	

FE03 : Process Design and Optimization

Modelling of Time Delay Systems using Exponential Analysis Method	2298
<i>Iwai Zenta, Mizumoto Ikuro, Kumon Mahoto and Torigoe Ippel</i>	
Dynamic Model for Ocean Thermal Energy Conversion Plant with Working Fluid of Binary Mixtures	2304
<i>Nakamura Masatoshi, Zhang Yong, Bai Ou and Ikegami Yasuyuki</i>	
Optimal Energy Costs based on Improving Retort Process In Food Canning Manufacturing	2309
<i>Saredchapan Supawut, Chaikla Amphawan, Masuchun Ruedee, Triawannawat Thanit and Juisereewong Prasit</i>	
Development of an irradiation strategy within a closed loop control system for the laser adjustment of deformation	2313
<i>Hutterer Angelika, Hagenah Hinnerk and Geiger Manfred</i>	
Optimal Design and Control of Heat Integrated Distillation Column.	2319
<i>Lee moonyoung and Lee Kihong</i>	

FE04 : Navigation Algorithms II

Orbit Determination System for the KOMPSAT-2 Using GPS Measurements Data	2325
<i>Lee Byoung-Sun, Kim Jae-Hoon and Yoon Jae-Cheol</i>	

Harmonics Reduction in Load control and Management system

W.Thueksathit, V.Tipsuwanporn, P.Hemawanit, S. Gulpanich, and K. Srisuwan
 Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520.
 E-mail : ktvittay@kmitl.ac.th

Abstract : This paper presents conservation of electrical energy in building with harmonics analysis and compensation which occur in electrical system. We use load controlling and management system in order to adjust load factor of system. The maximum demand limiting and controlling are used, then the system can acquire the prediction and compare it to the maximum demand set point. The electrical signal analysis based on FFT technique. The harmonics are compensated by using harmonic filters. This system consists computer which works as controller, processor, analysis and database unit together with digital power meter in form of multidrop network through serial communication via RS-485. The load control system uses PLC to control load via serial communication RS-485. The A/D converter is used for sampling the electrical signals via parallel port of computer. The harmonic filters are controlled by a computer. The data of measurement such as voltage, current, power, power factor, total harmonic distortion, energy, etc., can be saved as database and analysis. The load factor is adjusted by limiting and controlling maximum demand. The load factor adjustment can reduce the cost of electric consumption and energy generation together with harmonics compensation in order to increase high efficiency of electrical system.

Keywords : Harmonic analysis, Harmonic reduction system, FFT.

1. INTRODUCTION

Presently, the energy conservation systems, use the load control and management system method, in building or factory level are more interesting. However, the most systems do not consider to harmonics, that occur from non linear load. These harmonics result in the efficiency of the electrical system is decreased. Thus, the harmonics reduction have an effect on the system that has more efficiency and do not damage to the other electrical devices.

In this paper, we present the development of harmonics reduction in load control and management system, which within the medium and small building, by increasing harmonic reduction system associate with the load control and management system that these whole systems are used with the computer which work as 12 bit A/D, digital powermeter, plc and harmonic filter. The information received from digital powermeter and 12 bit A/D can be show in data monitoring record to database system and forecast load demand and harmonics analysis. Demand forecast and load shedding are used in load control system. Harmonic reduction system base on the FFT technique in order to evaluate the occurring harmonics in the system and control filter to eliminate the harmonics.

2. HARDWARE CONFIGURATION

All system consist of data acquisition system and control system, show in Fig.1. The data acquisition consist of the digital power meter and the 12 bit A/D, that install in building for measurement of electric signal, then link to the computer, with RS-485 and parallel port, respectively. The control system consist of computer, work as supervisory system. That is for monitoring of signal, harmonic filter control, communication, load control, demand forecast, database and Harmonic analysis. The load is controlled by PLC.

Harmonic filter is passive filter type. The induction of L_1^b and L_2^b are 1.54mH and 1.38mH, which a tuned at 240, 340, respectively.

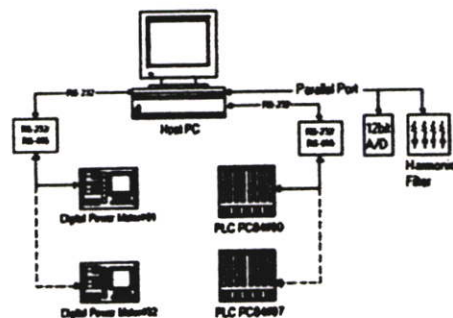


Fig. 1 All hardware configuration system.

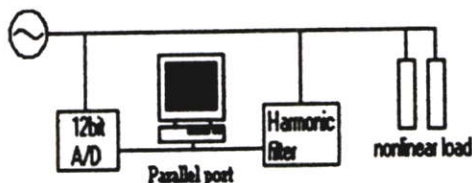


Fig. 2 Harmonic reduction system.

3. SOFTWARE CONFIGURATION

The software is developed by Visual C++ Ver.6 program and can be used on the windows 98 operation system. The function of software is electric signal monitor, Spectrum graph from harmonic analysis, 12Bit A/D communication software

This program analyzes the harmonics every 50 ms and every time the load control system operate with the non-linear loads. The computer will select filter for reduction harmonics after it analyzes the harmonics. Function of harmonic analysis and control filter can be direct and automatic control.

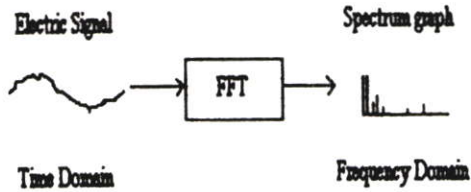


Fig.6 Harmonic analysis diagram.

5. EXPERIMENT AND RESULT

The harmonic reduction system is tested in the small model system which has a non-linear load (converter). In experiment, we measure the signal of current from system that has a non-linear load and the signal of current is shown in Fig. 7(a). It can be seen that the signal is non-sinusoidal. The occurring harmonics in current of system consist of 5th, 7th, 11th, 13th of harmonics that shown in Fig.7(b). The measured total harmonic distortion (THD) of the current before the filter operate is 23.40%. The results, after filter operate in system, are shown in the Figs. 7(c) and 7(d). Then, the total harmonic distortion (THD) of the current is 4.16%.

In Figs. 8(a)–8(b) show signal and spectrum of voltage from system before filter operate. The total harmonic distortion (THD) of voltage is 5.49%. In Figs.8(c)–8(d) show signal and spectrum of voltage from system after filter operate. The total harmonic distortion (THD) of voltage is 1.04%.

Fig. 9 show demand graph of load control system while harmonic reduction system is operate. It can be seen that the load control usually work by can control the demand in the limitation of set point.

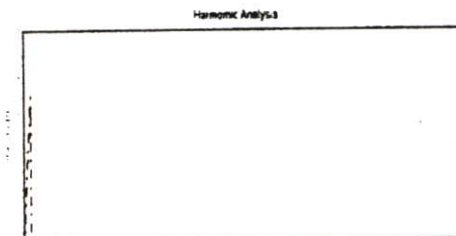
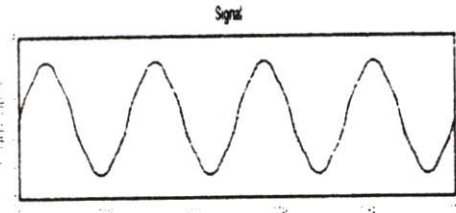
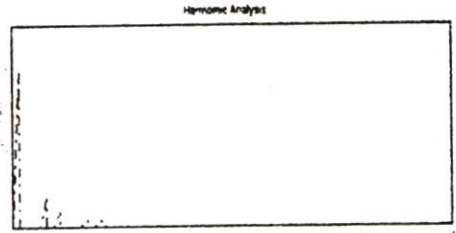
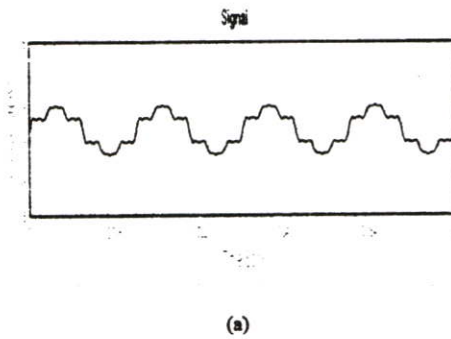
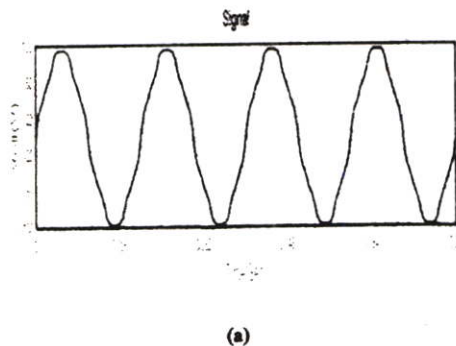


Fig. 7 show waveforms and spectrum of current.
 (a) signal of current before filter operate.
 (b) current harmonics before filter operate.
 (c) signal of current after filter operate
 (d) current harmonic after filter operate.



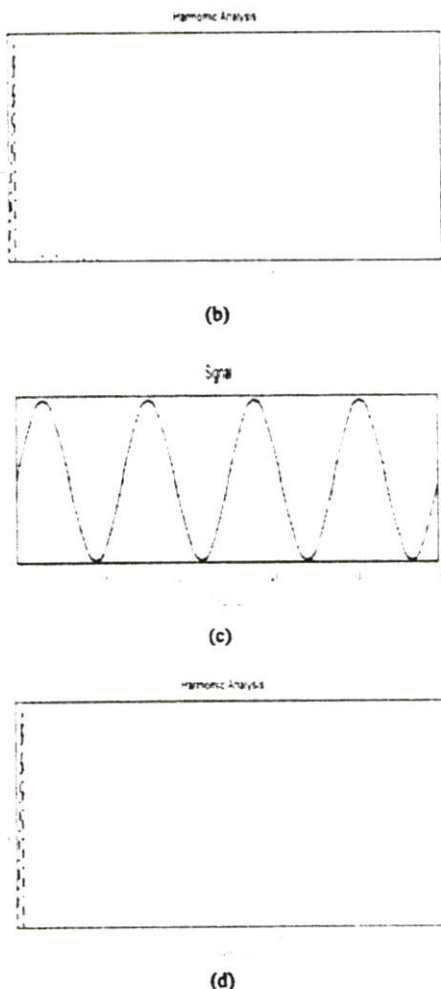


Fig.8 show wave form and spectrum of voltage.
 (a) signal of voltage before filter operate.
 (b) voltage harmonics before filter operate.
 (c) signal of voltage after filter operate .
 (d) voltage harmonic after filter operate.

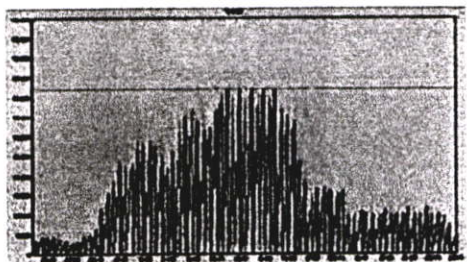


Fig. 9 Show Demand value from Load control system.

6. CONCLUSION

In this paper we present the harmonic reduction in load control system for reducing the total harmonic distortion (THD) by computer which work as 12Bit A/D and harmonic filter. The harmonic reduction system select and control filter by analyze signal from system .On computer was show electric signal ,harmonic analysis,function direct and automatic filter control .And the harmonic reduction in this paper can work with load control system.

REFERRENTS

- [1] Tain-Syh Luor; " Influence of load characteristics on the applications of passive and active harmonic filters" *Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on* , Volume: 1 , 1-4 Oct. 2000 Page(s): 128 -133 vol.1.
- [2] INTERSIL, "HI-574A 12 Bit A/D Converters datasheet" www.intersil.com.
- [3] Tipsuwanporn, V. ; Srisuwan, K. ; Kulpanich, S. ; Suesut, T. ; Numsomran, A. .: "Development of load control and management system" *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES* , Volume: 3 , 6-10 Oct. 2002 Page(s): 2139 -2142 vol.3.
- [4] Chen, Z.; Blaabjerg, F.; Pedersen, J.K.; "A study of parallel operations of active and passive filters" *Power Electronics Specialists Conference, 2002. pESC 02. 2002 IEEE 33rd Annual* , Volume: 2 , 23-27 June 2002 Page(s): 1021 -1026 vol.2.
- [5] Wilson E. Kazibwe, Musoke H. Sendaula. *Electric Power Quality Control Techniques*. New York: Van Nosteand Reinhold, 1993.
- [6] E.O. Brigham, "The Fast Fourier transform", Prentice-Hall, 1974.
- [7] L.H. Thomas, "Using A Computer to Solve Problems in Physics, Application of digital Computer ," Boston. Mass. :Ginn, 1963.
- [8] Acha, Enrique "Power system harmonics: Computer modelling and analysis" Chichester : John Wielely & Sons, c2001.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย วีระชัย ถึกสถิตย์
วัน เดือน ปีเกิด	16 ตุลาคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัด ฉะเชิงเทรา
ที่อยู่ปัจจุบัน	201 หมู่ 2 ต.ท่าถ่าน อ.พนมสารคาม จ.ฉะเชิงเทรา 24120
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2541-2544 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ.2545 จนถึงปัจจุบัน เป็นผู้ช่วยวิจัย อยู่ที่ หน่วยวิจัยเครื่องมือทางการแพทย์และสิ่งแวดล่อม ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง