

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การออกแบบการขนานอินเวอร์เตอร์  
DESIGN OF PARALLELED INVERTERS**



ร.พ.  
๒๔๔๗๗  
๑๖๕๑

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**82966**  
วัน,เดือน,ปี...**30...11...2551**

b. 11958303
i. ....

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การออกแบบการขนานอินเวอร์เตอร์  
DESIGN OF PARALLELED INVERTERS



โดย

นายบุญเดช  
นายยุทธนา  
นายสถาพร  
นายอนุศักดิ์

เกลี้ยงกลม  
สีบเสระ  
ศิวรัตน์  
พลอยงาม

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบการขนานอินเวอร์เตอร์

ผู้จัดทำ

1. นายบุญเดช เกลี้ยงกลม
2. นายยุทธนา สิบเสระ
3. นายสถาพร ศิลารัตน์
4. นายอนุศักดิ์ พลอยงาม



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบการขนานอินเวอร์เตอร์

นายบุญเดช	เกลี้ยงกลม
นายยุทธนา	สีบเสระ
นายสถาพร	ศิลารัตน์
นายอนุศักดิ์	พลอยงาม
รศ.ดร. วีระเชษฐ์	ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550	

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการขนานอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ชนิด พูลบริดจ์ ขนาด 100 W จำนวน 3 ตัว มาขนานกันเพื่อขยายพิกัดกำลังไฟฟ้าให้เพิ่มมากขึ้น และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ นอกจากนี้ยังสามารถปรับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับภาระโหลดที่ 80 W, 160 W, 240 W และ 320 W และสามารถรู้ได้ว่าอินเวอร์เตอร์ตัวใดเสียหาย จากการตรวจสอบระบบโดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล (dsPIC) และยังทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม แบบไซน์เพื่อใช้เป็นสัญญาณในการขับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ รับค่ากระแสต้านออกของ อินเวอร์เตอร์แต่ละตัว เพื่อนำไปประมวลผลและตัดสินใจทำงานในโหมดต่างๆ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอินเวอร์เตอร์ และยังประมวลผลในการปรับระดับค่าอัตราการผลิตให้มีค่าแรงดันต้านออกคงที่ เงื่อนไขสำคัญที่ทำให้ระบบนี้ทำงานได้ คือ การชิ่งโครโมส โดยที่ อินเวอร์เตอร์ทั้งสามตัวจะต้องมีความถี่ แอมพลิจูด และมุมเฟสเท่ากัน ซึ่งจะทำให้อินเวอร์เตอร์ ที่ขนานกันนั้นทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## DESIGN OF PARALLELED INVERTERS

Boondech      Kliengklor

Yutthana      Suebsara

Sathaporn      Silarat

Anusak      Ployngam

Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern Advisor

2007

### ABSTRACT

This thesis focuses on the design of paralleled Inverters which uses three 100 W single phase full-bridge inverters. This method is not only improving the efficiency of system but also controlling inverters capacity with various load conditions at 80 W, 160 W, 240 W and 320 W. The dsPIC microcontroller is used to control and generate the sinusoidal pulse-width-modulation to drive the inverters. The dsPIC receive current sensing signals from each inverter to process and select the suitable inverter to run with closed to inverter rate to achieve high efficiency. Moreover amplitude modulation can be adjusted automatically to compensate the output voltage stability. The main idea of the designed system is to control three inverters synchronization based on frequency, amplitude and phase angle to operate paralleled inverters working with high efficiency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและปรึกษาของ รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาบัตร ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่ ดัน จำปีทอง ที่คอยให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคนิค และให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ ห้อง EMC LAB ที่มีส่วนช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ และยังให้กำลังใจที่ดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ คอยห่วงใย และเป็นแรงผลักดันให้ผู้จัดทำตลอดเวลา และตลอดไป

สุดท้ายนี้ไม่ว่าจะด้วยประการใดผู้จัดทำหวังว่า คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาบัตรฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญภาพ .....	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ .....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
1.4 ขอบเขตของปริิญาานิพนธ์ .....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีการทำงานของอินเวอร์เตอร์	
2.1.1 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว .....	5
2.1.2 การสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม .....	6
2.1.3 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ .....	8
2.1.4 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ .....	9
2.1.5 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ .....	11
2.2 อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	
2.2.1 ไอจีบีที ( Isulated Gate Biopolar Transistor : IGBT ) .....	12
2.3 วงจรกรองความถี่ .....	13
2.4 ฮาร์มอนิกและตัวประกอบกำลัง .....	14
2.4.1 ฮาร์มอนิกและความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม .....	14
2.4.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังหรือการไฟฟ้า .....	15
2.5 การประมวลผลสัญญาณ .....	16
2.5.1 คุณสมบัติเด่นโดยรวมของ dsPIC .....	16
2.5.2 แนะนำ dsPIC30F4011 .....	17
2.6 สรุป	
บทที่ 3 การขนานอินเวอร์เตอร์	
3.1 ส่วนประกอบกรขนานอินเวอร์เตอร์ .....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ทฤษฎีการขนานแหล่งจ่าย .....	22
3.3 ทฤษฎีการขนานอินเวอร์เตอร์.....	23
3.3.1 Current Distribution Control .....	23
3.3.2 Master Slave Control.....	24
3.3.3 Circular Chain Control.....	24
3.4 การจำลองการขนานอินเวอร์เตอร์.....	27
3.5 สรุป.....	30
บทที่ 4 ออกแบบและสร้างวงจรการขนานอินเวอร์เตอร์	
4.1 แหล่งจ่ายกระแสตรง .....	31
4.2 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์.....	32
4.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	33
4.4 การตรวจจับกระแสและแรงดัน .....	38
4.5 วงจรขับนำสวิตช์.....	39
4.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC .....	39
4.7 สรุป.....	40
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	
5.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดไฟฟ้า.....	41
5.2 ผลการทดลอง.....	41
5.3 สรุป.....	58
บทที่ 6 บทวิจารณ์และสรุป .....	59
เอกสารอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก ก รูปวงจรและอุปกรณ์วัด.....	62
ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม dsPIC.....	67
ภาคผนวก ค ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร .....	80

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม .....	4
ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ .....	9
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์กับยูนิโพลาร์ .....	11
ตารางที่ 2.3 ตารางคุณสมบัติของอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง.....	12
ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติการขนานอินเวอร์เตอร์.....	26
ตารางที่ 4.1 อัตราการลดทอนความถี่ .....	34
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	42
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 ขณะจ่ายโหลดความต้านทาน .....	42
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	43
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ขณะจ่ายโหลดความต้านทาน .....	43
ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 3 ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	44
ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 3 ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า.....	44
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบจ่ายโหลดด้วย อินเวอร์เตอร์ 1 โมดูล.....	45
ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบจ่ายโหลดด้วย อินเวอร์เตอร์ 2 โมดูล.....	45
ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบจ่ายโหลดด้วย อินเวอร์เตอร์ 3 โมดูล.....	46
ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์แบบขนาน ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า .....	47
ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์แบบขนาน ขณะจ่ายโหลดความต้านทาน .....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์และวงจรถบคุม .....	6
ภาพที่ 2.2 การสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม .....	7
ภาพที่ 2.3 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ .....	8
ภาพที่ 2.4 ฮาร์มอนิกสเปคตราการสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์ .....	8
ภาพที่ 2.5 (ก) การสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์ .....	10
(ข) ฮาร์มอนิกสเปคตราการสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์.....	10
ภาพที่ 2.6 (ก) สัญลักษณ์พื้นฐานจากมอสเฟต และพื้นฐานจากบีเจที.....	12
(ข) คุณสมบัติของกระแส และแรงดันไฟฟ้า.....	12
(ค) คุณสมบัติในอุดมคติ.....	12
ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างรูปร่างของ ไอจีบีที .....	13
ภาพที่ 2.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่ .....	14
ภาพที่ 2.9 ไดอะแกรมการทำงานและส่วนประกอบทั้งหมดของ dsPIC30F4011 .....	20
ภาพที่ 3.1 วงจรขนานอินเวอร์เตอร์.....	21
ภาพที่ 3.2 วงจรสมมูลการขนานแหล่งจ่าย .....	22
ภาพที่ 3.3 การควบคุมแบบ Current Distribution Control .....	23
ภาพที่ 3.4 การควบคุมแบบ Master Slave Control.....	24
ภาพที่ 3.5 รูปแบบการควบคุมเทคนิค SPWM Current Control .....	25
ภาพที่ 3.6 การควบคุมแบบ Circulation Chain Control .....	25
ภาพที่ 3.7 การควบคุมแบบ Circulation Chain Control .....	27
ภาพที่ 3.8 การจำลองระบบการขนานอินเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม MatLab Simulink.....	28
ภาพที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดัน output และ harmonic order ของอินเวอร์เตอร์ .....	29
ภาพที่ 3.10 (ก) รูปคลื่นแรงดัน และกระแส ของระบบ .....	29
(ข) รูปคลื่นแรงดัน และกระแส ของอินเวอร์เตอร์ 1 .....	29
(ค) รูปคลื่นแรงดัน และกระแส ของอินเวอร์เตอร์ 2 .....	29
(ง) รูปคลื่นแรงดัน และกระแส ของอินเวอร์เตอร์ 3.....	29
ภาพที่ 3.11 (ก) รูปคลื่นแรงดัน และกระแส ของระบบ .....	30
(ข) รูปคลื่นแรงดัน และกระแส ของอินเวอร์เตอร์ 1 .....	30
(ค) รูปคลื่นแรงดัน และกระแส ของอินเวอร์เตอร์ 2 .....	30
(ง) รูปคลื่นแรงดัน และกระแส ของอินเวอร์เตอร์ 3.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.1 ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์.....	31
ภาพที่ 4.2 วงจรเรียงกระแส.....	31
ภาพที่ 4.3 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์.....	32
ภาพที่ 4.4 AC Energy storage of -26 Materials.....	36
ภาพที่ 4.5 วงจรตรวจจับแรงดัน.....	38
ภาพที่ 4.6 วงจรตรวจจับกระแส.....	39
ภาพที่ 4.7 วงจรขับนำสวิตช์.....	39
ภาพที่ 4.8 แผนผังการทำงานของโปรแกรมหลัก.....	40
ภาพที่ 5.1 วงจรทดสอบอินเวอร์เตอร์ต่อกับโหลดความต้านทาน.....	41



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการขยายตัวของเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม โดยที่พลังงานไฟฟ้ามีส่วนสำคัญเป็นอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรม หากพลังงานหลักเกิดความเสียหายจะส่งผลกระทบต่อการผลิตในภาคอุตสาหกรรม และ โหลดที่จำเป็นต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา เช่น โหลดฉุกเฉิน ในโรงพยาบาล

ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มเสถียรภาพของระบบด้วยการหาพลังงานสำรองเข้ามาทดแทน เพื่อเพิ่มความมีเสถียรภาพ และ ความน่าเชื่อถือให้แก่ระบบ โดยนำแบตเตอรี่มาเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแล้วทำการแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอินเวอร์เตอร์ แต่เมื่อขนาดโหลดเพิ่มขึ้นมีผลให้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองที่ใช้ต้องมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งก็หมายความว่าต้องมีอุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีพิกัดที่ใหญ่ขึ้น การขยายขนาดพิกัดวิธีที่ง่ายที่สุดก็คือเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ใหม่ให้ขนาดพิกัดที่ใหญ่ขึ้น แต่วิธีนี้จะสิ้นเปลือง และด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์สวิตชิง ซึ่งทำให้ขนาดอินเวอร์เตอร์มีข้อจำกัด ส่วนอีกวิธีหนึ่งก็คือการขนานอินเวอร์เตอร์ (Parallel Inverters) เพื่อขยายพิกัดการจ่ายโหลดของอินเวอร์เตอร์ แต่การขนานอินเวอร์เตอร์นั้นต้องมีระบบควบคุมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลวน (Circulation current) ระหว่างอินเวอร์เตอร์แต่ละตัวและควบคุมการจ่ายภาระให้เท่าๆกัน หากสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้นอกจากจะได้อินเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดเพิ่มขึ้นแล้วยังทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นกว่าเดิม ซึ่งการใช้ระบบควบคุมมาควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ขนานกันหลายตัวนี้ จะทำให้อินเวอร์เตอร์ทุกตัวในระบบทำงานเสมือนเป็นตัวเดียวกัน ทำให้การจ่ายและตอบสนองต่อสภาวะโหลดดีขึ้น ประหยัดมากขึ้น มีเสถียรภาพสูงขึ้น และยังสามารถขยายขนาดโดยการขนานกันได้โดยไม่จำกัดจำนวน

#### แนวทางการศึกษา

ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์ พร้อมทั้งระบบควบคุมที่ใช้สำหรับการขนานแหล่งจ่ายแบบอัตโนมัติ โดยมีคุณสมบัติดังนี้

1. สามารถทำการขนานและควบคุมอินเวอร์เตอร์หลายตัวให้ทำงานเสมือนเป็นตัวเดียวกัน
2. สามารถจ่ายและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะโหลดได้ดี และเหมาะสมกับโหลด
3. มีการเลือกแบ่งการจ่ายภาระซึ่งเหมาะสมกับประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ออกแบบและสร้างวงจรควบคุมการขนานอินเวอร์เตอร์แบบอัตโนมัติ
2. ศึกษาออกแบบและทดลองการตอบสนองต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงของโหลด
3. ศึกษาและทดลองประสิทธิภาพและเสถียรภาพของอินเวอร์เตอร์แบบขนาน

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
2. สามารถประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้
3. อินเวอร์เตอร์ที่ขนานกันสามารถจ่ายโหลดได้มากขึ้นและมีเสถียรภาพ
4. อินเวอร์เตอร์ที่ขนานกันตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะโหลดได้ดีพร้อมทั้งสามารถแบ่งภาระทางไฟฟ้าได้อย่างสมดุล

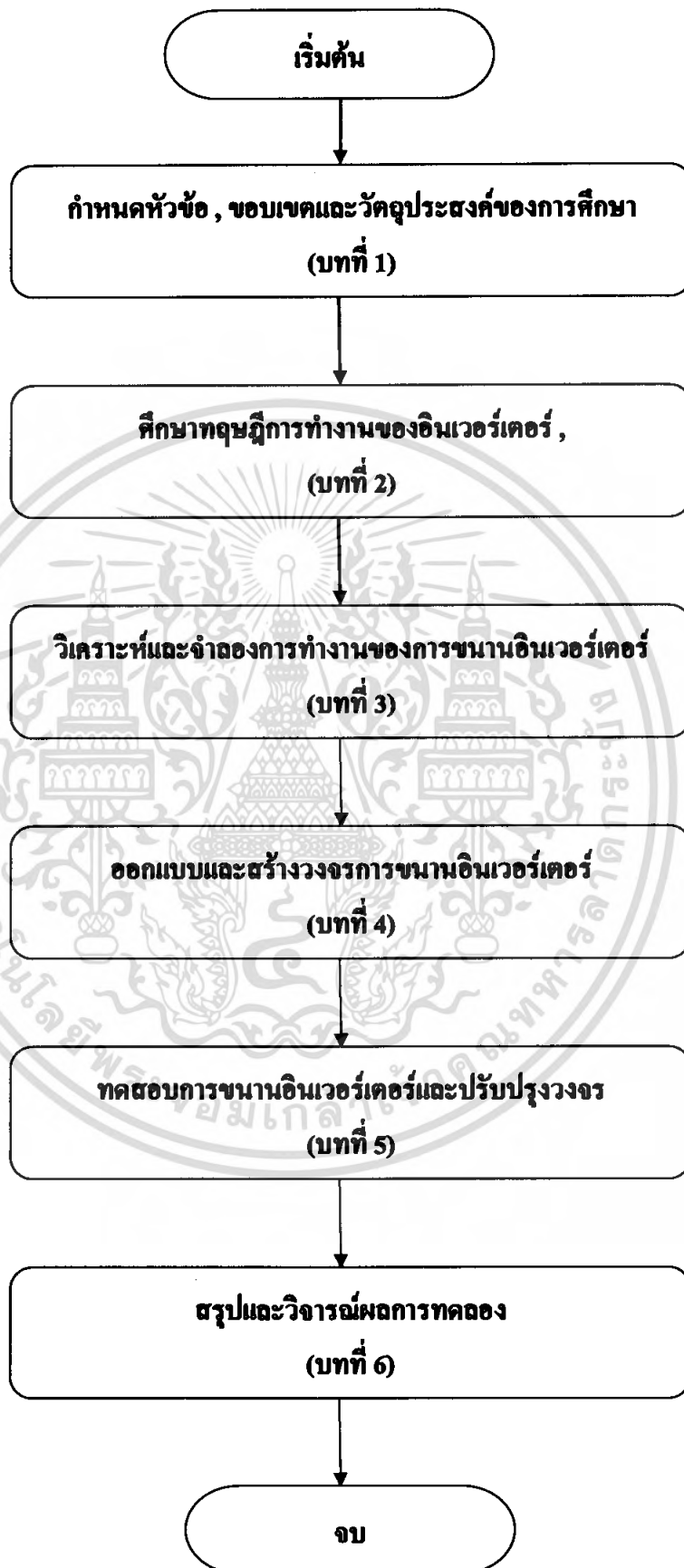
## 1.4 ขอบเขตของปริิญาพนธ์

ทำการสร้างอินเวอร์เตอร์ 100 W จำนวน 3 ตัว โดยใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตซิ่ง ที่ความถี่ 20 kHz สร้างสัญญาณ PWM และสร้างวงจรควบคุม โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ทดสอบกับ linear load (load R) ที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 0 - 300 W ทดลองจ่ายโหลดขนาดต่างๆ ในพิกัดที่ต่างกัน

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล
2. ออกแบบวงจร
3. จำลองระบบการทำงานของวงจร
4. ทดสอบวงจร
  - 4.1) ทดสอบโดยการจ่ายโหลดต่างๆ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ตัวเดียว
  - 4.2) ทดสอบโดยการจ่ายโหลดต่างๆที่มีพิกัดสูง โดยการนำอินเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวมาต่อขนานกัน ว่าตรงกับเงื่อนไขที่ตั้งไว้หรือไม่
5. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ สรุปผล และนำเสนอโครงการ

## ขั้นตอนการศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2550								2551			
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	
1.ศึกษาทฤษฎีอินเวอร์เตอร์และการชานอินเวอร์เตอร์		■	■									
2.simulation วงจรกำลังและวงจรควบคุมจากทฤษฎี		■	■	■	■	■						
3.ออกแบบวงจรควบคุมและ วงจรกำลัง				■	■	■	■					
4.สร้างและทดสอบการชาน อินเวอร์เตอร์							■	■	■	■	■	
5.สรุปและจะทำปริญญานิพนธ์									■	■	■	■

■ แผนการดำเนินงานที่กำหนดไว้  
 ■ แผนการดำเนินงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถจ่ายโหลดกระแสสลับได้โดยใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อความต้องการพลังงานมากขึ้น การขยายขนาดอินเวอร์เตอร์นั้น มีข้อจำกัดเรื่องของราคาและพิกัดของอุปกรณ์สวิตชิง เราจึงใช้วิธีการขนานอินเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถขยายความจุโหลดได้โดยไม่จำกัดแต่ต้องอาศัยระบบควบคุมที่ดี

#### 2.1 ทฤษฎีการทำงานของอินเวอร์เตอร์ [1]

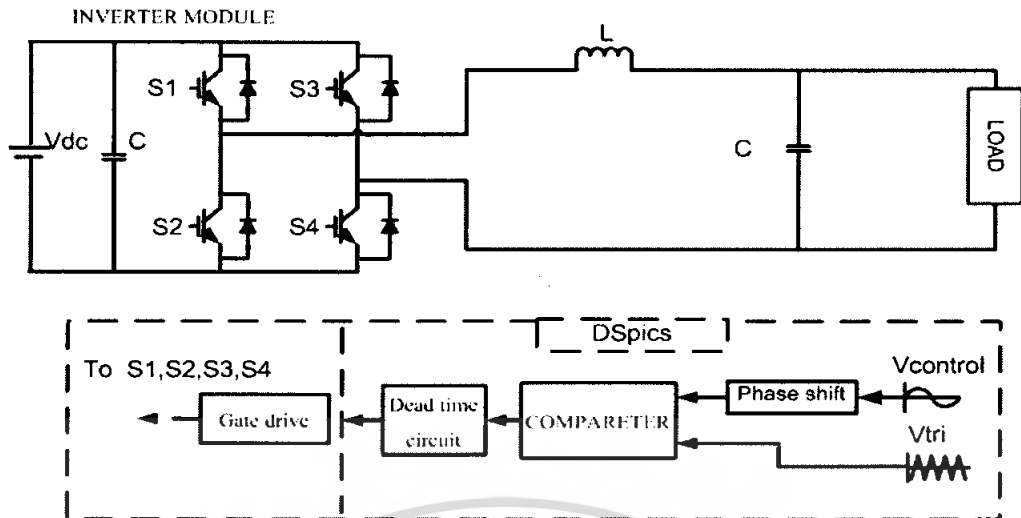
ในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์เป็นที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้เป็นต้นกำลังทางไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทำการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งมีข้อดีคือแรงดันไฟฟ้าด้านออกสามารถควบคุมได้ทั้งขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้านี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คืออินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) และอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI)

อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน มักจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก ส่วนอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ที่นิยมนำไปใช้งานคืออินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse width-Modulation inverter : PWM inverter) ส่วนอีกประเภทหนึ่ง ที่นิยมใช้คืออินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-wave inverter) ซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนแต่มีข้อเสียคือขนาดของฮาร์โมนิกอันดับต่ำๆ จะมีค่าสูง สำหรับในโครงการนี้จะเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ประเภทแหล่งจ่ายแรงดันแบบพีดับเบิลยูเอ็ม เนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงฮาร์โมนิกอันดับต่ำ

##### 2.1.1 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวจะแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ แบบฮาร์ฟบริดจ์ (half – bridge) และแบบฟูลบริดจ์ (full – bridge) สำหรับโครงการนี้จะเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ โดยแบบฟูลบริดจ์จะมีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบฮาร์ฟบริดจ์ 2 เท่าจึงเหมาะที่จะเลือกใช้เมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าโหลดสูงขึ้น เงื่อนไขการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบฮาร์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์ คือการทำงานของสวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  ต้องไม่ทำงานพร้อมกันในทุกช่วงเวลา มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบ ในอุดมคติเวลาการการสวิตชิงของ  $S_1$  และ  $S_2$  จะตรงข้ามกันแต่ในทางปฏิบัติจะต้องการช่วงเวลาเวลาที่สวิตช์ทั้งคู่ไม่นำกระแสซึ่งเรียกว่า เดทไทม์ (deadtime) โดยเดทไทม์จะอยู่ในช่วงการเปลี่ยนสถานะการสวิตชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์และวงจรควบคุม

### 2.1.2 การสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

การที่อินเวอร์เตอร์จะสร้างแรงดันไฟฟ้าออกมาเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ที่ต้องการได้นั้น ไม่เพียงแต่ใช้วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์เท่านั้น แต่ยังคงอาศัยวงจรควบคุมมาคอยควบคุมการสวิตชิงอุปกรณ์สวิตชิงในอินเวอร์เตอร์ด้วย โดยวงจรควบคุมจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ความถี่ของการสวิตชิง ( $f_s$ ) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม

การเปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณภายใต้เงื่อนไข คือ หาก  $V_{control} > V_{tri}$  จะได้สัญญาณพัลส์เป็นบวก ในทำนองเดียวกันหาก  $V_{control} < V_{tri}$  จะได้พัลส์เป็นลบ ดังภาพที่ 2.2 คำย่อและความหมายที่สำคัญของการสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มมีดังนี้

$V_{control}$  สัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก

$V_{tri}$  สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตชิง

$f_1$  ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์

$f_s$  ความถี่ของการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์

$m_a$  อัตราการมอดูเลตทางด้านแอมพลิจูด

$m_f$  อัตราการมอดูเลตทางด้านความถี่

ค่า  $m_a$  และ  $m_f$  จะนิยามจากสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.2)$$

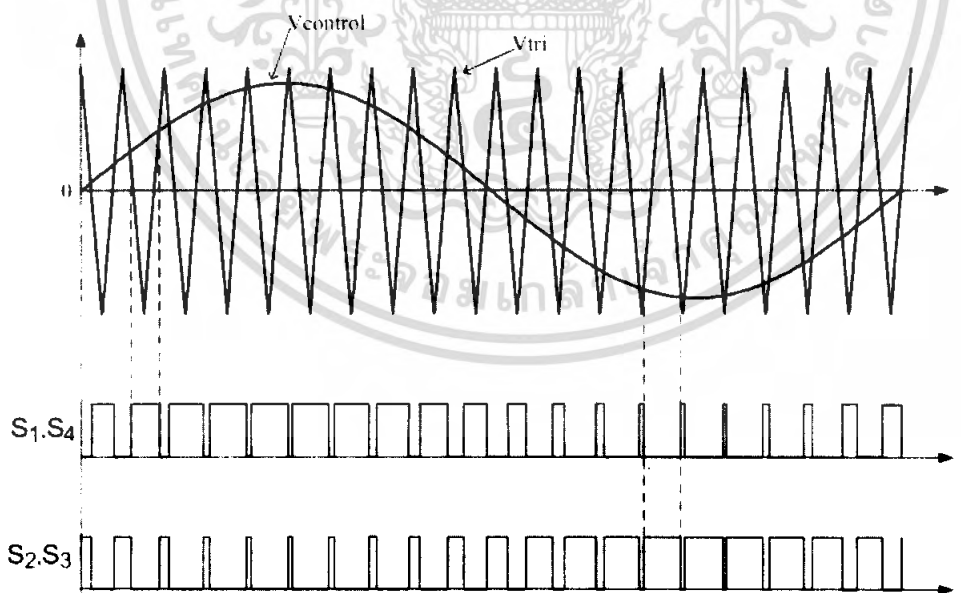
เมื่อ  $V_{control}$  คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์

$V_{tri}$  คือ ค่ายอดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

ถ้า  $0 \leq m_a \leq 1$  จะเป็นช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น ซึ่งหมายถึงองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้าด้านออก (fundamental – frequency component of the output voltage) โดยจะแปรผันเชิงเส้นกับค่า  $m_a$

ในกรณี  $m_a > 1$  จะเป็นช่วงการควบคุมแบบโอเวอร์มอดูเลต ซึ่งผลของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกสูงกว่าช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น

กรณีโอเวอร์มอดูเลชันไซเคิลบวกของ  $V_{control}$  จะมีช่วงยอดที่  $V_{control}$  มากกว่า  $V_{tri}$  จนถือว่าจะได้พัลส์บวกเป็นระยะเวลาหนึ่ง เหมือนว่าไม่มีการสวิตซิ่งเช่นเดียวกับการเกิดขึ้นที่ครึ่งไซเคิลลบของ  $V_{control}$  ช่วง PEAK ล่างจะทำให้ค่าพัลส์เป็นลบหรือศูนย์ เป็นช่วงขณะที่ไม่มีการสวิตซิ่ง ข้อดีของการเกิดโอเวอร์มอดูเลชันคือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าของความถี่หลักมูลจะมีค่าสูงกว่าในกรณี  $m_a \leq 1$  แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และช่วงแรงดันยอดทางด้านออกของความถี่หลักมูลจะมีค่าอยู่ระหว่าง  $\frac{V_d}{2}$  ถึง  $\frac{4V_d}{2\pi}$  ส่วนข้อเสียของการเกิดโอเวอร์มอดูเลชันคือ การทำให้เกิดฮาร์มอนิกต่างๆ ที่อยู่ใกล้กับฮาร์มอนิกอันดับที่หนึ่งหรือความถี่หลักมูล ซึ่งจะเกิดผลเสียอย่างมากหากนำไปใช้งาน

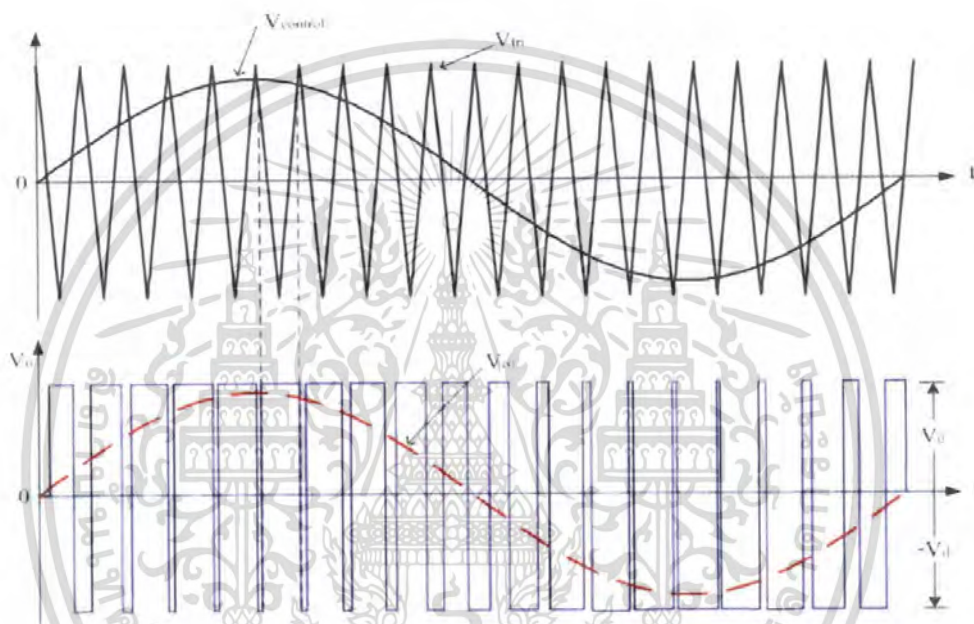


ภาพที่ 2.2 การสร้างสัญญาณสวิตซิ่งแบบพีดับเบิลยูเอ็ม [1]

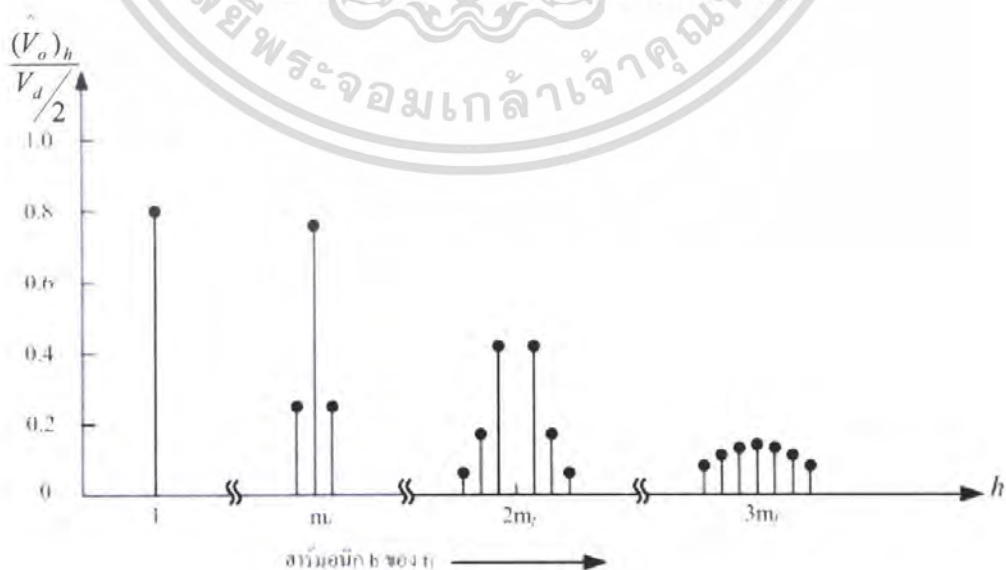
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (bipolar voltage switching) คือการควบคุมให้สวิตช์แบบบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ เช่น ในภาพที่ 2.1 การทำงานของสวิตช์ที่กึ่ง A คือ  $S_1$  และ  $S_4$  จะถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลา อีกคู่หนึ่งคือการทำงานของสวิตช์ที่กึ่ง B คือ  $S_2$  และ  $S_3$  โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะสวิตช์อยู่ระหว่าง  $+V_d$  กับ  $-V_d$  ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ส่วนไซด์แบนฮาร์โมนิกจะเกิดขึ้นรอบๆ  $mf$ ,  $2mf$ ,  $3mf$ , ... เช่นหากความถี่สวิตชิงเท่ากับ 20 kHz ไซด์แบนฮาร์โมนิกก็จะเกิดขึ้นที่ 20 kHz, 40 kHz, และ 60 kHz ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.3 การสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์ [1]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาพที่ 2.4 ฮาร์โมนิกสเปกตรัมการสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์ [1] ยืนยันการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

ข้อแตกต่างระหว่างการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ กับแบบยูนิโพลาร์ ( unipolar voltage switching ) ก็คือ ในแบบยูนิโพลาร์การควบคุมสวิตช์ในกึ่ง A กับกึ่ง B จะแยกสัญญาณควบคุมออกจากกัน คือสวิตช์ในกึ่ง A จะถูกควบคุมจากสัญญาณ  $v_{control}$  เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม  $v_{tri}$  ขณะที่สวิตช์ในกึ่ง B จะถูกควบคุมจากสัญญาณ  $-v_{control}$  เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม  $v_{tri}$  การสวิตชิงจะมีเงื่อนไขดังนี้

เมื่อ  $v_{control} > v_{tri}$  : สวิตช์  $S_1$  จะนำกระแส  $v_{AN} = V_d$

เมื่อ  $v_{control} < v_{tri}$  : สวิตช์  $S_2$  จะนำกระแส  $v_{AN} = 0$

เมื่อ  $-(v_{control}) > v_{tri}$  : สวิตช์  $S_3$  จะนำกระแส  $v_{BN} = V_d$

เมื่อ  $-(v_{control}) < v_{tri}$  : สวิตช์  $S_4$  จะนำกระแส  $v_{BN} = 0$

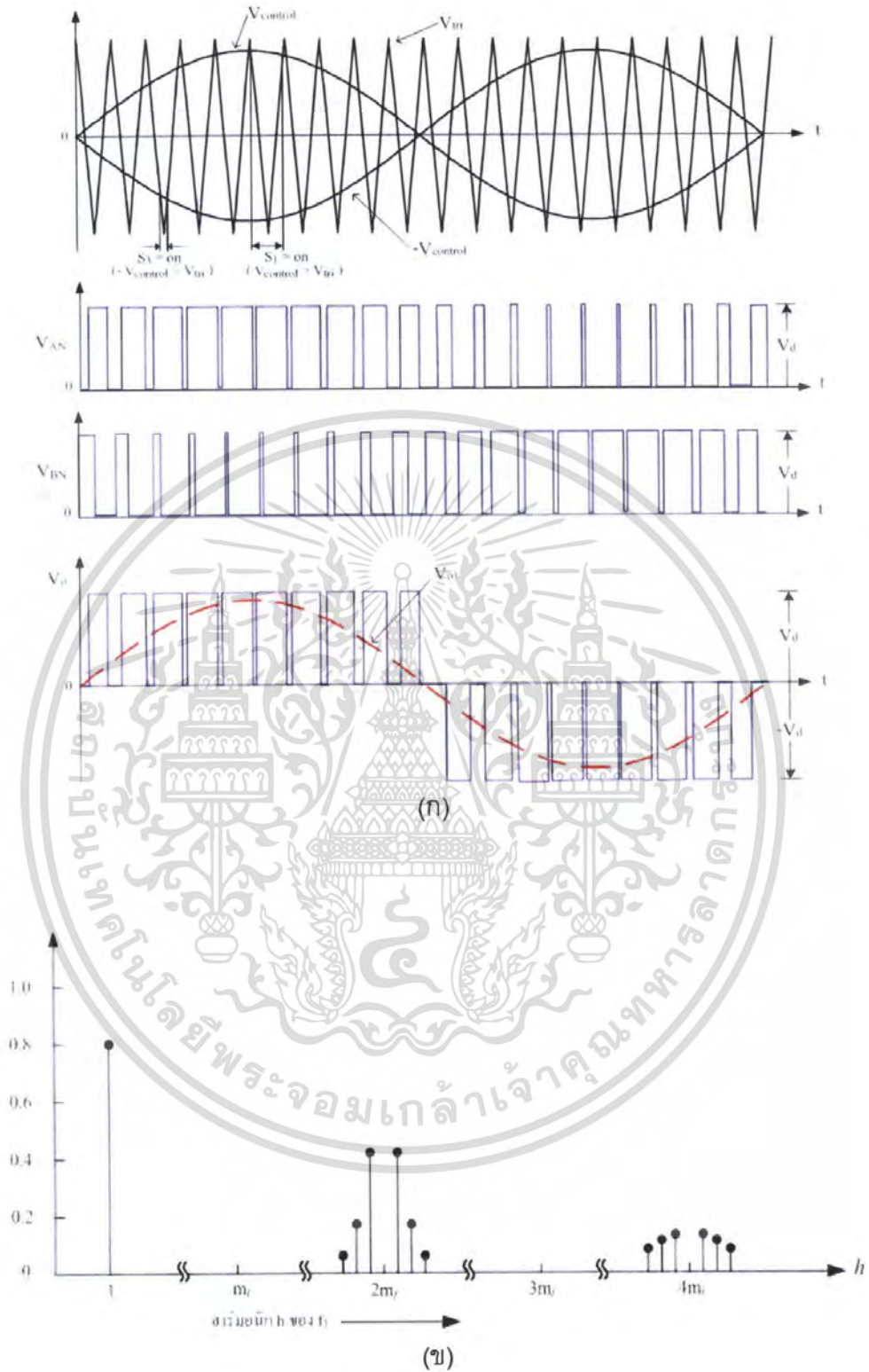
จากตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนสถานะของแรงดันระหว่างสาย ( $v_o$  หรือ  $v_{ab}$ ) จะเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอยู่ระหว่างศูนย์ไปยังบวกหรือศูนย์ไปยังลบจึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจากการสวิตชิงสูง เช่น กรณีไบโพลาร์

จุดเด่นของยูนิโพลาร์ คือ การเกิดความถี่ด้านออกจะมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตชิงของแต่ละเฟส เช่น ความถี่สวิตชิงของอุปกรณ์เป็น 10 kHz หากเป็นการทำงานแบบยูนิโพลาร์ ค่าแรงดันออกจะประกอบไปด้วยสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม ที่มีความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกที่ 2 เท่าของแบบไบโพลาร์ ที่ 20 kHz สอดคล้องกับสเปคตารภาพที่ 2.5 โดยเกิดความถี่ขึ้นรอบข้าง ผลของความถี่ที่โหลดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ทำให้การออกแบบวงจรกรองความถี่ เล็ก ง่ายและประหยัด

เงื่อนไขในการสร้างแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกตกคร่อมโหลด ( $v_o$ ) แสดงในตารางที่ 2.1 ผลที่ได้จากเงื่อนไขการทำงานในตารางที่ 2.1 และภาพที่ 2.5 คือแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้าค่าบวกไปยังศูนย์และศูนย์ไปยังบวกในครึ่งคาบส่วนอีกครึ่งคาบจะมีแรงดันไฟฟ้าด้านออกเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้าค่าลบไปยังศูนย์ และจาก ศูนย์ไปยังลบ ซึ่งจากลักษณะการทำงานดังกล่าวจึงเรียกวิธีการสวิตชิงนี้ว่ายูนิโพลาร์ ส่วนขาดของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะเท่ากับแบบไบโพลาร์ และเมื่อเปรียบเทียบข้อดี - ข้อเสียของการสวิตชิงทั้งสองแบบ จะได้ตามตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.1** เงื่อนไขการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ [1]

เงื่อนไข	สวิตช์นำกระแส	สวิตช์นำกระแส	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$v_o$
1	$S_1$	$S_4$	$V_d$	0	$V_d$
2	$S_2$	$S_3$	0	$V_d$	$-V_d$
3	$S_1$	$S_4$	$V_d$	$V_d$	0
4	$S_2$	$S_3$	0	0	0



**ภาพที่ 2.5** (ก) การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ [1]  
 (ข) ฮาร์มอนิกสเปกตรัมการสวิตซ์แรงดันแบบยูนิโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดี – ข้อเสียของการสวิตชิงแบบไบโพลาร์กับยูนิโพลาร์ [1]

ประเด็น	ไบโพลาร์	ยูนิโพลาร์
แรงดันไฟฟ้าต้านออก ( $\hat{V}_{o1}$ ) $m_a \leq 1.0$	$\hat{V}_{o1} = m_a V_d$	$\hat{V}_{o1} = m_a V_d$
แรงดันไฟฟ้าต้านออก ( $\hat{V}_{o1}$ ) $m_a > 1.0$	$V_d < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d$	$V_d < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d$
แรงดันไฟฟ้าต้านออก ( $v_o$ )	$V_d \Leftrightarrow (-V_d)$	$V_d \Leftrightarrow 0$ $(-V_d) \Leftrightarrow 0$
ไซค์แบนชาร์มอนิกส์	$m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$	$2m_f, 4m_f, 6m_f, \dots$
การกรองความถี่สูง	ดี	ดีมาก
การควบคุม	ง่าย	ซับซ้อน

ข้อเปรียบเทียบของสองเทคนิค คือ จะแตกต่างกันที่แรงดันต้านออก ที่มีระดับการเปลี่ยนแปลงของยูนิโพลาร์จะมีแรงดัน ศูนย์ไปบวกหรือศูนย์ไปลบและมีไซค์แบนด์ที่  $2m_f, 4m_f, 6m_f, \dots$  ตามลำดับ ยูนิโพลาร์ที่มีความถี่สวิตชิงสูงกว่าทำให้การกรองความถี่ทำได้ง่ายขึ้น เล็กและประหยัด ดังนั้นในโครงงานนี้จึงเลือกใช้เทคนิคการสวิตชิงแรงดันแบบยูนิโพลาร์

### 2.1.5 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าต้านออกของอินเวอร์เตอร์

ในทางปฏิบัติกิ่งใดๆของอินเวอร์เตอร์ สวิตซ์ตัวบนและตัวล่างต้องไม่นำกระแสพร้อมกัน ดังนั้นจึงต้องการช่วงเวลาสวิตซ์ทั้งคู่หยุดนำกระแสก่อนที่สวิตซ์จะเปลี่ยนสถานะเพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบ ช่วงเวลานี้จะเรียกว่า เดดไทม์ (Dead time) ซึ่งเวลาเดดไทม์ดังกล่าวจะต้องมีความเหมาะสม คือหากมีค่าน้อยเกินไปอาจทำให้มีโอกาสลัดวงจรได้ง่าย หรือถ้าหากมีค่ามากเกินไปก็อาจจะทำให้แรงดันไฟฟ้าต้านออกของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไป

ข้อดีของเดดไทม์ คือ การทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างบัสบวกบัสลบ

ข้อเสียของเดดไทม์ คือ การเกิดฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่รอบข้างความถี่สวิตชิงและเกิดความถี่ฮาร์โมนิกลำดับต่ำๆ อันเป็นผลเสียต่อสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์

## 2.2 อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง [1]

หลักในการเลือกใช้งานสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต้องคำนึงถึงขนาดพิกัดกำลังและความถี่ในการสวิตชิง ซึ่งสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีหลายชนิด และมีลักษณะการใช้งานแตกต่างกันไป โดยสามารถเปรียบเทียบความสามารถแต่ละชนิดได้ดังนี้

**ตารางที่ 2.3** ตารางคุณสมบัติของอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง [1]

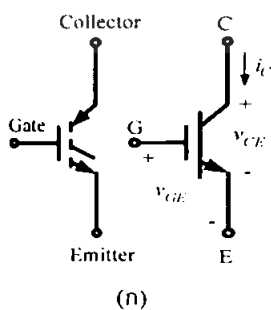
อุปกรณ์	ความสามารถ การส่งผ่าน กำลัง	ความเร็วใน การสวิตชิง	ความสามารถใน แรงดันไฟฟ้า ด้านลบ	ชนิดการ ควบคุม
จีทีโอ	สูง	ต่ำ	ได้	กระแสไฟฟ้า
บีเจที	กลาง	กลาง	ไม่ได้	กระแสไฟฟ้า
ไอจีบีที	กลาง	กลางและ ค่อนข้างสูง	ได้	แรงดันไฟฟ้า
มอสเฟตกำลัง	ต่ำ	สูง	ไม่ได้	แรงดันไฟฟ้า

ในโครงการนี้เราเลือกใช้ ไอจีบีที เนื่องจากมีคุณสมบัติเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานที่ต้องการ

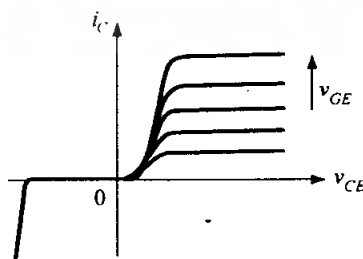
### 2.2.1 ไอจีบีที (Isulated Gate Bipolar Transistor : IGBT)

ไอจีบีที เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถควบคุมให้น่ากระแส และ ควบคุมให้หยุดนำกระแสได้ โดยการควบคุมจากแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต ไอจีบีที มีสัญลักษณ์คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติดังแสดงในภาพที่ 2.6 ก - ค ตามลำดับ ซึ่งไอจีบีทีนั้นได้รวมข้อดีของมอสเฟตกำลังและทรานซิสเตอร์กำลัง (บีเจที) และจีทีโอไทรสเตอร์มารวมอยู่ด้วยกัน กล่าวคือ

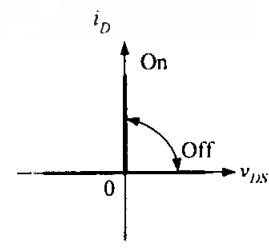
ไอจีบีที จะมีค่าอิมพีแดนซ์ขาเกตที่มีค่าสูงคล้าย มอสเฟตกำลัง ซึ่งต้องการพลังงานน้อยมากในการควบคุมการสวิตช์ ควบคุมการนำกระแสและหยุดนำกระแสด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต รวมทั้งสามารถใช้งานการสวิตชิงที่ความถี่สูง ไอจีบีที จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำคล้าย ทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งมีค่า 2 – 3 โวลต์ นอกจากนี้ ไอจีบีที จะออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้านานลบได้คล้ายกับ จีทีโอไทรสเตอร์



(ก)



(ข)



(ค)

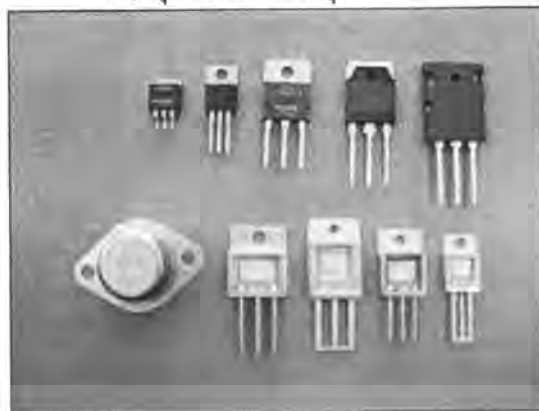
**ภาพที่ 2.6** ไอจีบีที

(ก) สัญลักษณ์พื้นฐานจากมอสเฟต และพื้นฐานจากบีเจที

(ข) คุณลักษณะของกระแส และแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) คุณสมบัติในอุดมคติ



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างรูปร่างของ ไอจีบีที

ไอจีบีที จะมีช่วงเวลานำกระแสและหยุดนำกระแสมีค่าประมาณ 1 ไมโครวินาที มีขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้าถึง 2,000 แอมแปร์ และ พิกัดแรงดันไฟฟ้าถึง 5,000 โวลต์ สำหรับตัวอย่างรูปร่างไอจีบีทีที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.7

ไอจีบีที เหมาะสำหรับการใช้งานที่หลากหลายนับร้อยกับ มอสเฟตกำลัง แต่มีพิกัดกำลังที่ใหญ่กว่า และสามารถออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้าทั้งด้านบวกและด้านลบ ไอจีบีที จึงอาจเรียกได้ว่า เป็นอุปกรณ์ประเภทไม่จำเป็นต้องมีสแน็บเบอร์ (snubberless) คือ สามารถทนกระแสและแรงดันได้มากจนอาจไม่ต้องการวงจรสแน็บเบอร์ ความเร็วในการสวิตซ์ยังไม่เท่ามอสเฟตกำลัง

### 2.3 วงจรกรองความถี่ [3]

ในโครงการนี้เราจะใช้วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ที่เป็นวงจรกรองที่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกที่มีค่าความถี่เหนือความถี่เรโซแนนซ์ของตัวกรองเองซึ่งสามารถสรุปเป็นข้อดีข้อเสียได้ดังนี้

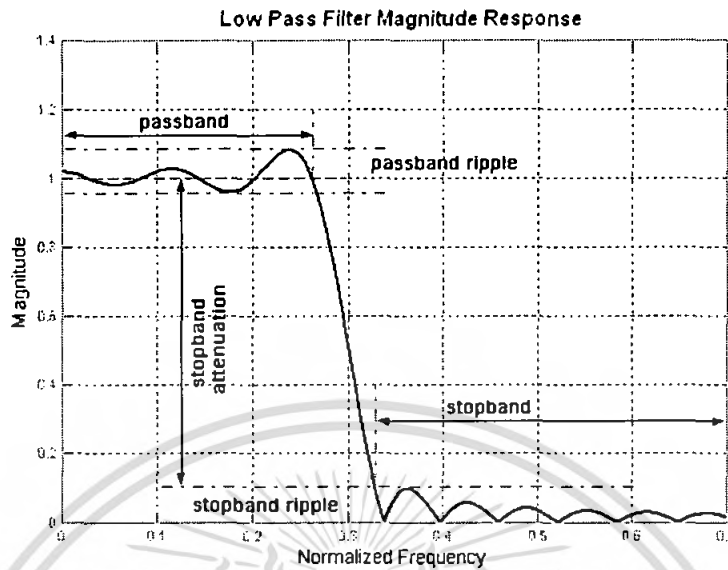
- ข้อดี
1. สามารถลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิกได้หลายความถี่
  2. สามารถปรับปรุงค่า P.F ให้ดีขึ้นได้

- ข้อเสีย
1. จะทำงานได้ดีเฉพาะที่กระแสไหลตพิกัด
  2. สามารถใช้งานได้ดีเฉพาะกับโหลดที่เป็นเชิงเส้น

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน คือวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่าน แต่จะกั้นสัญญาณความถี่สูงไว้ จากภาพที่ 2.8 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติโดยนิยาม เราเรียกย่านความถี่ที่วงจรมอบให้ผ่านว่า ย่านความถี่ต่ำผ่าน (passband) หรือแบนด์วิดท์ (bandwidth : BW) ของวงจร ส่วนย่านที่วงจรมอบไม่ผ่านไปเรียกว่า ย่านความถี่หยุด (stopband) จากภาพที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าย่านความถี่ผ่านจะอยู่ระหว่าง 0 และ  $\omega_c$  ว่าความถี่คัทออฟ (cut off frequency) ในทางปฏิบัติเราจะไม่สามารถสร้างวงจรที่มีผลตอบสนองเป็นดังภาพ

ที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าในทางปฏิบัติแล้ว ค่าความถี่คัทออฟ จะหมายถึง ค่าความถี่ที่ขนาดของกระแสหรือแรงดันที่ผ่านในตัวกรองจะลดลงเรื่อยๆ เมื่ออยู่เหนือค่าเรโซแนนซ์ของตัวกรองค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณด้านนอกของวงจรซึ่งโดยทั่วไปที่นิยมใช้กัน คือ มีค่าเท่ากับ 0.707 เท่า (หรือประมาณ -3 dB ) ของขนาดสัญญาณสูงสุด



ภาพที่ 2.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ทางทฤษฎี และทางปฏิบัติ [3]

## 2.4 ฮาร์โมนิกและตัวประกอบกำลัง [4]

อินเวอร์เตอร์หรือตัวผันกลับเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ในการแปลงแรงดัน ไฟกระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟสลับเทียม ที่ใช้คำว่า "เทียม" เนื่องจากว่ารูปคลื่นแรงดันไฟสลับที่ได้จากตัวอินเวอร์เตอร์นั้นจะไม่เรียบเหมือนสัญญาณไซน์จริงเพราะวิธีการทำงานของอินเวอร์เตอร์ จะใช้วิธีการ เปิด/ปิด ค่าของแรงดันไฟตรงมาให้ปรากฏที่ด้านขาออก (Output) ด้วยช่วงเวลาสั้นๆ และมีความไวสูง เพื่อทำการปรับระดับของแรงดันขาออกให้ใกล้เคียงกับไฟสลับรูปไซน์มากที่สุดซึ่งกระบวนการสร้างสัญญาณไฟสลับด้านขาออกนี้จะมีฮาร์โมนิกปะปนมาด้วย ซึ่งเป็นผลให้รูปคลื่นกระแสระบบไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาฮาร์โมนิกและผลกระทบของฮาร์โมนิก

### 2.4.1 ฮาร์โมนิกและความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม

ฮาร์โมนิก (harmonics) หมายถึง ส่วนประกอบในรูปคลื่นไซน์ของสัญญาณ หรือ ปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล ตัวอย่างเช่น ส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่หลักมูลจะเรียกว่า ฮาร์โมนิกอันดับที่ 2 (second harmonics) เป็นต้น ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่ารูปคลื่นของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปไซน์โดยสมบูรณ์จะไม่มีฮาร์โมนิกรวมอยู่ด้วยในขณะที่รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนจากไซน์จะมีฮาร์โมนิกรวมอยู่ด้วยเสมอ การที่จะบอกว่ารูปคลื่นนั้นๆ

ผิดเพี้ยนมากหรือน้อยไปจากรูปคลื่นไซน์จะต้องพิจารณาจากค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (total harmonic distortion : THD)

ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion:THD) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสองของค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (rms) ของส่วนประกอบฮาร์มอนิก กับค่ากำลังสองเฉลี่ยของส่วนประกอบความถี่หลักมูล ดังแสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.4 ค่าTHD มีค่าน้อยจะหมายถึง สัญญาณฮาร์มอนิกรวมขนาดไม่มากปนกับความถี่หลักมูล

$$THD_v = \sqrt{\left(\left(\frac{V_{rms}}{V_1}\right)^2 - 1\right)} \quad (2.3)$$

$$THD_i = \sqrt{\left(\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1\right)} \quad (2.4)$$

#### 2.4.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังหรือการไฟฟ้า

ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกต่อการไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้สองแบบด้วยกันคือ แบบระยะสั้น และ แบบระยะยาว โดยแบบระยะสั้นผลกระทบจะสามารถเห็นได้ชัดและโดยมากจะอยู่ในรูปของความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ส่วนแบบระยะยาวจะตรวจสอบไม่ค่อยพบ และมักจะอยู่ในรูปของความสูญเสียตัวต้านทานหรือแรงดันเค้น

ผลกระทบแบบระยะสั้น คือ สามารถทำให้โหลดที่มีความไวสูงเกิดการทริปขึ้นได้ เช่น โหลดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์จะไวต่อความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น

ในขณะที่ผลฮาร์มอนิกจะทำให้ความเที่ยงตรงของเครื่องวัดไฟฟ้าลดลงและนอกจากนั้นยังทำให้ฟิวส์ขาด และ อาจจะทำให้ตัวเก็บประจุทำงานผิดพลาดเพราะแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกเกินที่ตัวเก็บประจุ ซึ่งค่าความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าประมาณ 5%-10% อาจมีผลทำให้ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสเพิ่มขึ้น 0% - 50% และนอกจากนั้นยังอาจจะเกิดค่าแรงดันเค้นที่ไดอิเล็กตริก (dielectric) ของตัวเก็บประจุอีกด้วย

ฮาร์มอนิกยังอาจให้เกิดความร้อนเกิน (overheating) ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งจะพบบ่อยในกรณีที่หม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เชิงเส้นเป็นจำนวนมาก โดย ที่ในกรณีดังกล่าวการคิดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปจะนิยมคิดที่ค่าเท่ากับ 0.9 ของค่าที่พิกัดของกำลังไฟฟ้าปรากฏ (kVA) และยังทำให้เกิดกระแสเกินที่สายนิวทรัล (neutral) อีกด้วย

## 2.5 การประมวลผลสัญญาณ [2]

การประมวลผลสัญญาณจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ประมวลผลโดยสัญญาณดิจิทัลซึ่งมีให้เลือกหลายชนิด เช่น DSP(TI) dsPIC(MICROSHIP)

dsPIC คือชื่อของไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิตจาก Microchip Technology inc. ผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ซึ่งรู้จักกันเป็นอย่างดีในแวดวงนักพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ โดย Microchip Technology ได้กำหนดชื่ออย่างเป็นทางการสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรมใหม่นี้ว่า Digital Signal Controller หรือ DSC นั้นหมายความว่า dsPIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่องานประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถสูง

### 2.5.1 คุณสมบัติเด่นโดยรวมของ dsPIC

#### 2.5.1.1 คุณสมบัติของซีพียู

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ซีพียูแบบ RISC
- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- มี 84 คำสั่งภาษาแอสเซมบลีมาตรฐาน รองรับรูปแบบการอ้างแอดเดรสได้อย่างอิสระ
- ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลช สามารถลบ และ เขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 100,000 ครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้ และสามารถโปรแกรมตัวเอง โดยใช้กระบวนการทางซอฟต์แวร์
- มีหน่วยความจำข้อมูลอีพียูที่ลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 1,000,000 ครั้ง
- มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์จำนวนมาก จึงรองรับการตอบสนองสัญญาณอินเตอร์รัปต์ได้ดี
- มีวงจรตรวจจับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีเพาเวอร์-อนรีเซต, เพาเวอร์-อับไทมเมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ด-อับไทมเมอร์
- มีวอตช์ดอกไทเมอร์แบบโปรแกรมได้
- มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณนาฬิกา
- รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม (ICSP : In-Circuit Serial Programming)
- สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 คุณสมบัติด้านการประมวลสัญญาณดิจิทัล

-มีแอมพลิจูดสัญญาณ 40 บิต 2 ตัว รองรับการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ได้เป็นอย่างดี

-มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและหารเลข 17 บิตในรูปของฮาร์ดแวร์จึงทำให้สามารถคูณและหารเลขได้อย่างรวดเร็ว

-ทำการคูณเลข 16 บิตได้ภายในสัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ไชเกิล

-มีตัวเลื่อนข้อมูลบาร์เรล 40 สเตจ ช่วยให้การประมวลผลข้อมูลที่จำนวนบิตมากๆ สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว

-มีวงจรเพดซ์ข้อมูลคู่ จึงทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว

3. คุณสมบัติของไมโครพังก์ชันพิเศษ

-สามารถจ่ายกระแสออกทางขาพอร์ตได้ 25 mA ทั้งแบบกระแสซิงก์และซอร์ส

-ไทเมอร์/เคาน์เตอร์มีขนาด 16 บิต ไม่น้อยกว่า 3 ตัว ต่อใช้งานร่วมกันเป็นไทเมอร์ 32 บิตได้

-มีไมโครตรวจจับและเปรียบเทียบสัญญาณดิจิทัล

-มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมทั้งแบบ SPI และผ่านระบบบัส I2C

-มีไมโครสื่อสารข้อมูลอนุกรม UART พร้อมบัฟเฟอร์แบบ FIFO

-มีวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล ความละเอียด 10 หรือ 12 บิต\*

-มีไมโครสร้างสัญญาณ PWM สำหรับการควบคุมมอเตอร์\*

-มีไมโครเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดตราเจอร์\*

\*เป็นคุณสมบัติที่มีในบางเบอร์

2.5.2 แนะนำ dsPIC30F4011

สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ที่นำมาใช้ในการเรียนรู้ และ ทดลองของโปรเจกต์นี้คือเบอร์ dsPIC30F4011 ซึ่งมีขาต่อใช้งาน 40 ขา ในรูปที่ 2.8 แสดงไดอะแกรมการทำงานและส่วนประกอบทั้งหมดของ dsPIC30F4011 และการจัดขา สำหรับหน้าที่ของแต่ละขาได้อธิบายโดยสรุปไว้ในตาราง คุณสมบัติทางเทคนิคของ dsPIC30F4011 มีดังนี้

2.5.2.1 คุณสมบัติของซีพียู

- มี 84 คำสั่งมาตรฐาน สามารถรองรับรูปแบบการอ้างแอดเดรสได้อย่างอิสระ
- ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ความจุ 12 กิโลไบต์ ลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 100,000 ครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้
- สามารถโปรแกรมหน่วยความจำโปรแกรมได้ด้วยตัวเอง โดยใช้กระบวนการทางซอฟต์แวร์

- มีหน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม 1 กิโลไบต์ ลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 1,000,000 ครั้ง
- มีหน่วยความจำข้อมูลแรม 512 ไบต์
- รีจิสเตอร์ W จัดในรูปของอะเรย์ มีขนาด 16 บิต จำนวน 16 ตัว
- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- ความถี่สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก ตั้งแต่ย่านไฟตรงจนถึง 40 MHz
- ความถี่สัญญาณนาฬิกาในกรณีใช้งานร่วมกับวงจรเฟสล็อกภายใน ตั้งแต่ 4 MHz ถึง 10 MHz เลือกได้ 3 ระดับ คือ 4, 8 หรือ 16 เท่า
- รองรับแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์ได้สูงสุด 62 แหล่ง รวมทั้งการอินเทอร์รัปต์จากภายนอก 3 แหล่ง
- สามารถกำหนดระดับความสำคัญในการตอบสนองอินเทอร์รัปต์ได้ 8 ระดับ
- มีอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ 48 ตำแหน่ง
- มีวงจรตรวจจับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีเพาเวอร์-อนรีเซต, เพาเวอร์-อัปไทเมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ท-อัปไทเมอร์
- มีวอตช์ด็อกไทเมอร์แบบโปรแกรมได้
- มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา หากผิดพลาดจะเข้าสู่โหมดสัญญาณนาฬิกา RC พลังงานต่ำทันที
- รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม (ICSP : In-Circuit Serial Programming)
- สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้
- ย่านไฟเลี้ยง 2.5 ถึง 5.5V กระแสไฟฟ้า 2.6 ถึง 44mA ที่ไฟเลี้ยง +5V ขึ้นอยู่กับการกำหนดความเร็วในการทำงาน

#### 2.5.2.2 คุณสมบัติด้านการประมวลสัญญาณดิจิทัล

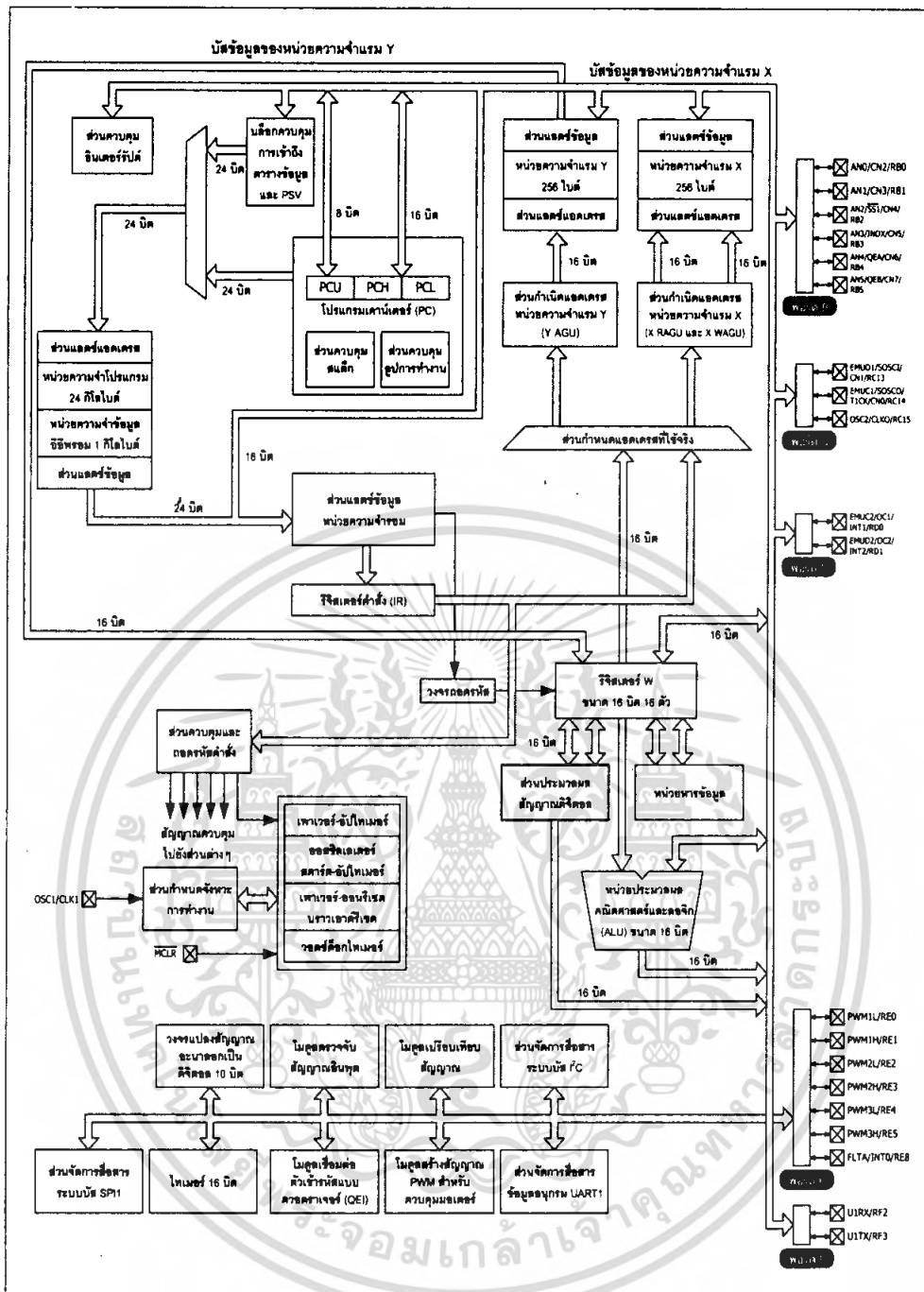
- มีแอดคิวมูเลเตอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว รองรับการประมวลทางคณิตศาสตร์ได้เป็นอย่างดี
- มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและการหารเลข 17 บิตในรูปของฮาร์ดแวร์ จึงทำให้สามารถทำการคูณและหารเลขได้อย่างรวดเร็ว
- ทำการคูณเลข 16 บิตได้ภายในสัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ไซเคิล
- มีตัวเลื่อนข้อมูลบาร์เรล 40 สเตจ ช่วยให้ประมวลผลข้อมูลที่จำนวนบิตมากๆ ทำได้รวดเร็ว
- มีวงจรเฟดซ์ข้อมูลคู่ จึงทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2.3 คุณสมบัติของโมดูลฟังก์ชันพิเศษ

- สามารถจ่ายกระแสออกทางขาพอร์ตได้ 25 mA ทั้งแบบกระแสซิงก์และซอร์ส
- ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 16 บิต 3 ตัว สามารถต่อใช้งานร่วมกันเป็นไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 32 บิตได้
- มีโมดูลตรวจจับสัญญาณดิจิตอลขนาด 16 บิต 4 ชุด
- มีโมดูลเปรียบเทียบข้อมูลและกำเนิดสัญญาณ PWM ความละเอียด 16 บิต 2 ชุด  
ในการเปรียบเทียบข้อมูลสามารถเลือกการทำงานได้ 2 โหมด
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมแบบSPI
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์ผ่านระบบบัส I2C ทั้งแบบ 7 และ 10 บิต กำหนดเป็นมาสเตอร์หรือสลาฟได้
- มีโมดูลสื่อสารข้อมูลอนุกรม UART พร้อมบัฟเฟอร์แบบ FIFO
- มีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์ 6 ช่อง
  - เลือกรูปแบบเอาต์พุตได้ทั้งแบบคอมพลีเมนต์และแบบอิสระ
  - มีโหมดปรับตำแหน่งการหมุนทั้งแบบปรับขอบสัญญาณและแบบกึ่งกลาง
  - มีส่วนกำเนิดดิวิตีไซเคิล 4 ชุด
  - กำหนดฐานเวลาได้ 4 โหมด
  - สามารถเลือกขั้วของสัญญาณทางเอาต์พุตได้
  - มีสัญญาณกระตุ้นเพื่อให้ทำงานสัมพันธ์กับวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์
  - สามารถควบคุมสัญญาณเอาต์พุตได้
- มีโมดูลเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดร่าเจอร์
  - มีอินพุต Phase A, Phase B และรับสัญญาณพัลส์เพื่อกำหนดตำแหน่ง
  - มีตัวนับตำแหน่งขนาด 16 บิต นับได้ทั้งขึ้นและลง
  - แสดงสถานะของทิศทางการนับได้
  - กำหนดโหมดของการวัดตำแหน่งได้ 2 โหมดคือ x2 และx4
  - มีวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบดิจิตอลจากอินพุตแบบโปรแกรมได้
  - สำหรับกำหนดให้ทำงานเป็นไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 16 บิตได้
  - กำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากตำแหน่งที่นับเกิน (rollover) หรือนับขาด (underflow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 ไดอะแกรมการทำงานและส่วนประกอบทั้งหมดของ dsPIC30F4011 [2]

### 2.6 สรุป

บทนี้ทำให้เราทราบข้อมูลเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์แต่ละชนิดว่ามีข้อดีข้อเสียต่างกันอย่างไร ทราบถึงวงจรกรองความถี่ พร้อมทั้งการออกแบบ รวมทั้งการออกแบบ รวมทั้งปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของกำลังไฟฟ้าด้านนอกได้แก่ฮาร์มอนิกและตัวประกอบกำลัง และ คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล dsPIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

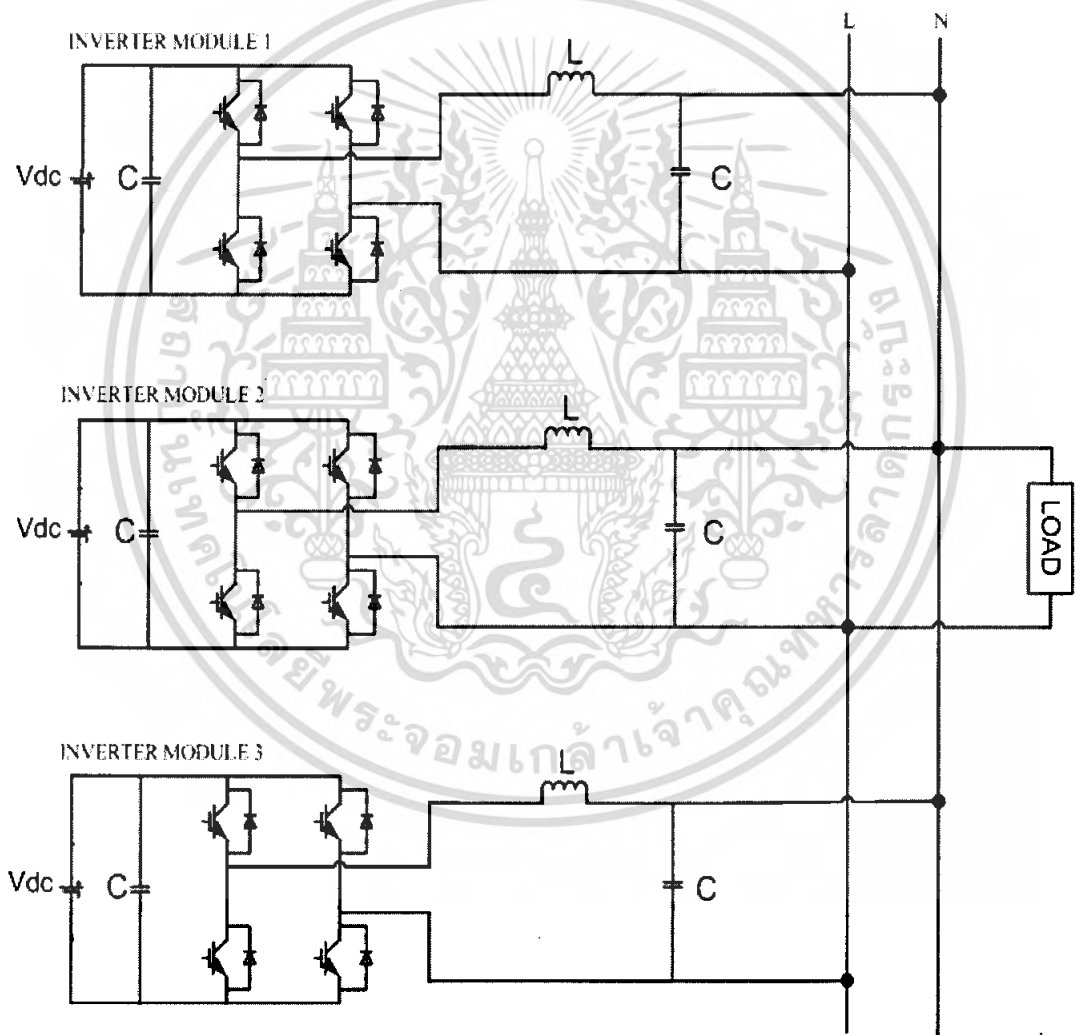
# บทที่ 3

## การขนานอินเวอร์เตอร์

### 3.1 ส่วนประกอบกรขนานอินเวอร์เตอร์

วงจรขนานอินเวอร์เตอร์อัตโนมัติ มี 4 ส่วน คือ

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
2. วงจรอินเวอร์เตอร์
3. จงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน
4. ระบบควบคุม



ภาพที่ 3.1 วงจรขนานอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ทฤษฎีการขนานแหล่งจ่าย [3]

เทคนิคการเพิ่มขนาดของแหล่งจ่ายกำลัง มีหลายวิธีหนึ่งก็คือการนำแหล่งจ่ายมาขนานกัน ซึ่งจะสามารถเพิ่มขนาดได้อย่างไม่จำกัด และได้ขนาดแหล่งจ่ายตามต้องการ ในการขนานแหล่งจ่าย DC ซึ่งต้องมีเงื่อนไขคือแรงดันของแหล่งจ่ายที่นำมาขนานกันจะต้องเท่ากันเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลวนระหว่างแหล่งจ่าย (circulating current) แต่สำหรับแหล่งจ่าย AC นั้น มีหลายสาเหตุซึ่งจะนำไปสู่การเกิดกระแสไหลวนระหว่างแหล่งจ่ายซึ่งเงื่อนไขในการขนานแหล่งจ่ายกระแสลับมีดังนี้

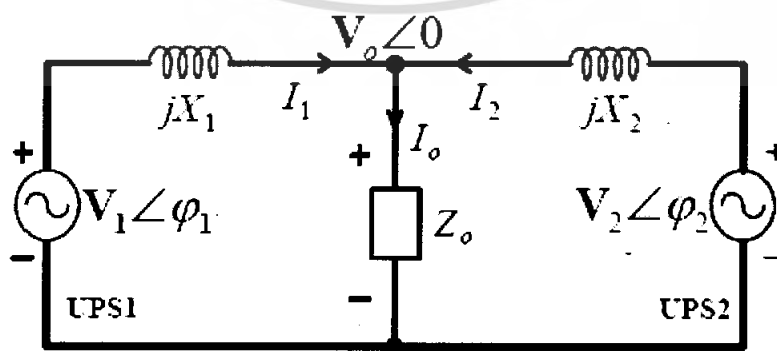
1. แอมพลิจูดของแรงดันต้องเท่ากัน
2. ความถี่ของแหล่งจ่ายต้องเท่ากัน
3. เฟสของแหล่งจ่ายต้องตรงกัน

โดยเมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายเท่ากันแต่เฟสต่างกัน Active power จะไหลวนในวงจรถ้าเฟสตรงกันแต่แรงดันต่างกัน Reactive power จะไหลวนในวงจร แต่ถ้าแหล่งจ่ายต่างกันทั้งเฟสและแรงดัน ก็จะทำให้เกิดไหลวนทั้ง Active และ Reactive power

$$P_i = \frac{V_i V_o}{X_i} \sin \phi_i \quad (3.1)$$

$$Q_i = \frac{V_i V_o \cos \phi_i - V_o^2}{X_i} \quad (3.2)$$

จากสมการจะเห็นว่าปริมาณการไหลของ P และ Q จะขึ้นอยู่กับมุมต่างเฟสของ  $V_1$  และ  $V_2$  ( $\phi_i$ ) ซึ่งหากจะนำแหล่งจ่ายมาขนานกันนั้น ต้องทำการปรับแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากันทั้ง 3 เงื่อนไข สำหรับแหล่งจ่ายกระแสลับกระแสไหลวนอาจไม่ก่อให้เกิดปัญหามากมายนอกเสียจากพลังงานด้านออกที่ลดลง โดยสามารถแก้ไขได้โดยการซิงโครไนซ์ โดยการ ใช้ Phase lock



ภาพที่ 3.2 วงจรสมมูลการขนานแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ทฤษฎีการขนานอินเวอร์เตอร์ [8]

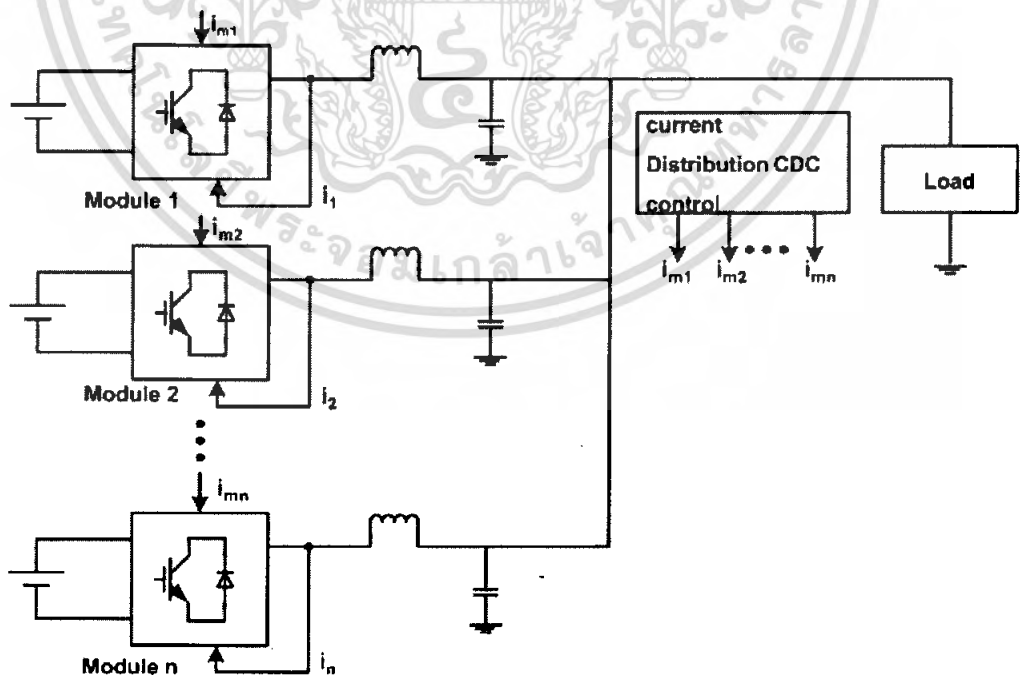
ใช้หลักการเดียวกับการขนานแหล่งจ่าย เพียงแต่อินเวอร์เตอร์นั้นเป็นแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง ซึ่งผลจากการที่กระแสไหลวนจะส่งผลให้เกิดความเสียหายมากกว่า โดยผลจากกระแสไหลวนจะทำให้อุปกรณ์สวิตชิง เกิดความเสียหาย ในการขนานอินเวอร์เตอร์จึงต้องใช้วงจรมาควบคุมการชิงโคโรไนซ์ระบบ รวมทั้งควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกัน อย่างเป็นระบบ มีประสิทธิภาพสูง เสถียรภาพสูง ซึ่งระบบการควบคุมนั้นมีหลายแบบจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

ระบบการควบคุมอินเวอร์เตอร์นั้นมีหลายวิธีแต่ละวิธีมีข้อดีต่างกัน ทั้งในทางด้านลักษณะการควบคุม ประสิทธิภาพ เสถียรภาพ และการตอบสนองต่อสภาวะโหลด โดยในปริยญาณินพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอวิธีการขนานอินเวอร์เตอร์ไว้ 3 วิธีด้วยกัน ได้แก่

1. Current Distribution Control
2. Master – Slave Control
3. Circulation chain control

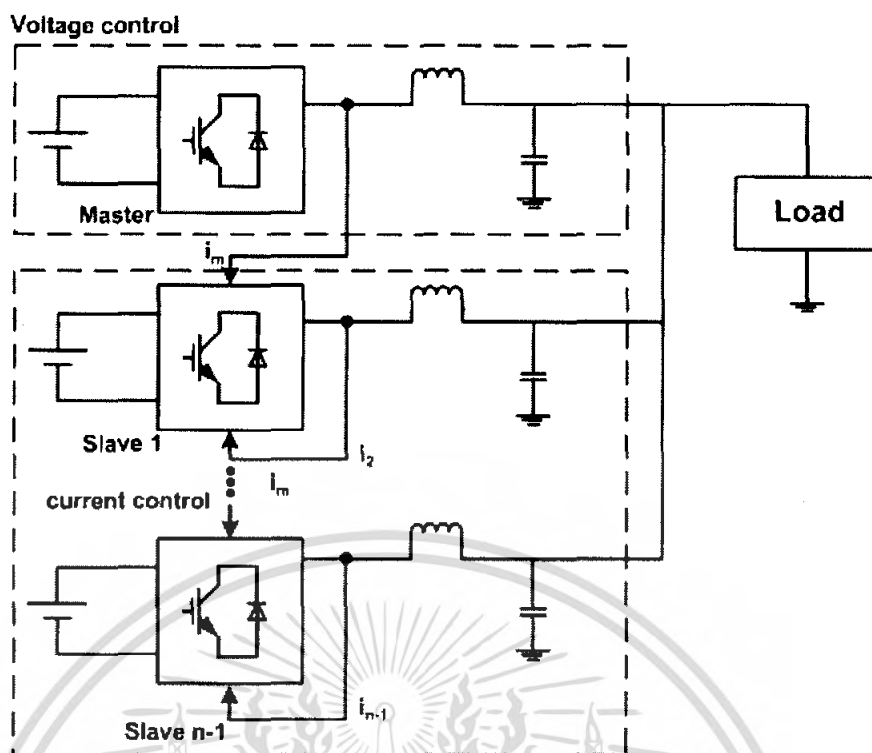
#### 3.3.1 Current Distribution Control

Phase Lock Loop (PLL) ในอินเวอร์เตอร์แต่ละตัวนั้นจะทำการ Synchronize เฟสและความถี่ ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าจริงของระบบจะสมดุลโหลดของอินเวอร์เตอร์แต่ละตัว โดยวงจรควบคุมจะทำการจับกระแสโหลดมาแล้วทำการแบ่งขนาดของกระแสแล้วส่งไปให้เป็นค่าอ้างอิงแก่วงจรควบคุมของอินเวอร์เตอร์แต่ละตัว กระแสของอินเวอร์เตอร์แต่ละตัวที่ผ่านวงจรกรองออกมาจะถูกนำมาเป็นสัญญาณในการป้อนกลับแบบลบ ซึ่งกระแสโหลดก็จะถูก Sharing



ภาพที่ 3.3 การควบคุมแบบ Current Distribution Control [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 การควบคุมแบบ Master Slave Control [5]

### 3.3.2 Master Slave Control

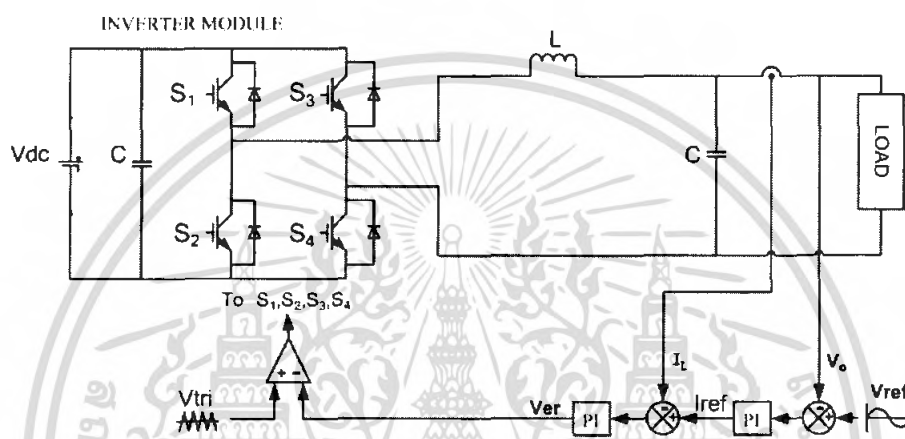
พื้นฐานการควบคุมนั้นเหมือนกับ Concentrated Control ต่างกันตรงที่ Master เท่านั้นที่จำเป็นต้องมี PLL ซึ่งใช้ในการซิงโครไนซ์ ความถี่และเฟส อินเวอร์เตอร์ตัวอื่นทำงานเป็น Slave ซึ่งจะถูกควบคุมตาม หน่วยควบคุมจากมาสเตอร์ โดยจะจับค่ากระแสขาออกมาเป็นสัญญาณของวงจรควบคุม โดยอินเวอร์เตอร์ตัวที่มีกระแสสูงสุดจะเป็นมาสเตอร์ ที่เหลือจะเป็น Slave โดยอัตโนมัติ โดยตัวที่เป็นมาสเตอร์จะเป็นตัวควบคุมแรงดัน และกระแสขาออกของ Slave ยังจะเป็นกระแสอ้างอิงให้ Slave ตัวอื่นๆ โดยหาก Master เกิดเสียหายไม่สามารถจ่ายกำลังได้ Slave จะเปลี่ยนไปเป็น Master ตัวโดยอัตโนมัติ

### 3.3.3 Circular Chain Control

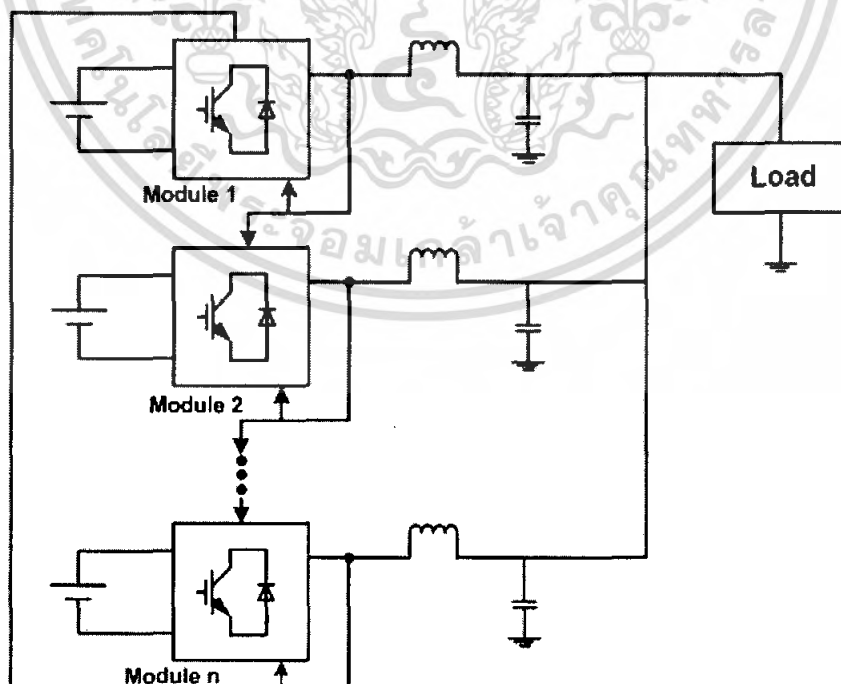
วิธีนี้เป็นการนำเสนอการขนานอินเวอร์เตอร์แบบใหม่ซึ่งพัฒนามาจากการควบคุมแบบ Master Slave Control และ Current Distribution Control เป็นวิธีที่เลือกศึกษาในปริญญาโท นินท์ จึงจะกล่าวถึงรายละเอียดมากกว่า วิธีอื่นๆ ซึ่งวิธี 3C มีการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลเป็นลักษณะวงกลมโดยทำงานในโหมดควบคุมกระแส ด้วยเทคนิค SPWM Current Control ซึ่งเทคนิคดังกล่าวมีค่าความถี่ในการสวิตช์ซึ่งที่คงที่ ยังให้ผลตอบสนองทางไดนามิกที่รวดเร็วทั้ง Linear load และ Non-Linear load ในขณะที่มีวงจรควบคุมที่ง่ายไม่ซับซ้อนซึ่ง SPWM Current Control นี้ มีทั้งการควบคุมกระแสใน C Filter และใน L Filter ซึ่งใน Paper นี้แนะนำการใช้การควบคุมกระแสใน L ซึ่งกระแสในตัวเหนี่ยวนำนี้จะรวมทั้งกระแสในตัวเก็บประจุและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไหลต ซึ่งวิธีนี้ก่อให้เกิดผลตอบสนองทางไดนามิกที่รวดเร็ว มีเสถียรภาพสูง และยังสามารถลิมิตกระแสในช่วงที่เกิดการลัดวงจรของโหลด ดังนั้นจึงง่ายในการแบ่งภาระเท่าๆกันในการทำงานแบบขนานของอินเวอร์เตอร์ พร้อมทั้งวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในสภาวะไม่มีภาระ (No-Load) 50 % ของโหลด และ 100 % ของโหลด (Full Load) โดยจะใช้แรงดันขาออกเป็นสัญญาณในการป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงซึ่งจะได้ค่า Error Voltage จะถูกชดเชยโดย PI regulator เพื่อผลิตสัญญาณกระแสอ้างอิงกระแสที่ผ่านวงจรกรองจะถูกจับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง สัญญาณ error จะถูกชดเชยโดย P regulator หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อสร้าง SPWM สำหรับการสวิตซ์ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับความถี่ในการสวิตซ์ซึ่งที่คงที่และไวต่อ dynamic respond



ภาพที่ 3.5 รูปแบบการควบคุมเทคนิค SPWM Current Control [7]



ภาพที่ 3.6 การควบคุมแบบ Circulation Chain Control [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.1** เปรียบเทียบคุณสมบัติวิธีการขนานอินเวอร์เตอร์ [5]

Performance Index	MSC		CDC		CCC(3C)	
	With Identical modules	With Different modules	With Identical modules	With Different modules	With Identical modules	With Different modules
rise time (individual)	7.95 $\mu$ s	8.04 $\mu$ s	5.44 $\mu$ s	5.49 $\mu$ s	5.85 $\mu$ s	6.07 $\mu$ s
overshoot (individual)	36.59%	36.45%	40.66%	38.19%	36.90%	37.08%
steady state error (individual)	9.10%	10.08%	2.29%	2.30%	3.62%	3.53%
ripple (individual)	176.2mA	332.2mA	214.2mA	328.2mA	265.1mA	511.2mA
steady state error (total)	9.10%	10.08%	1.29%	1.28%	1.41%	1.45%
control cost	Low		High		Moderate	
reliability	Low		High		High	
redundancy	Low		High		High	
flexibility	High		Low		High	

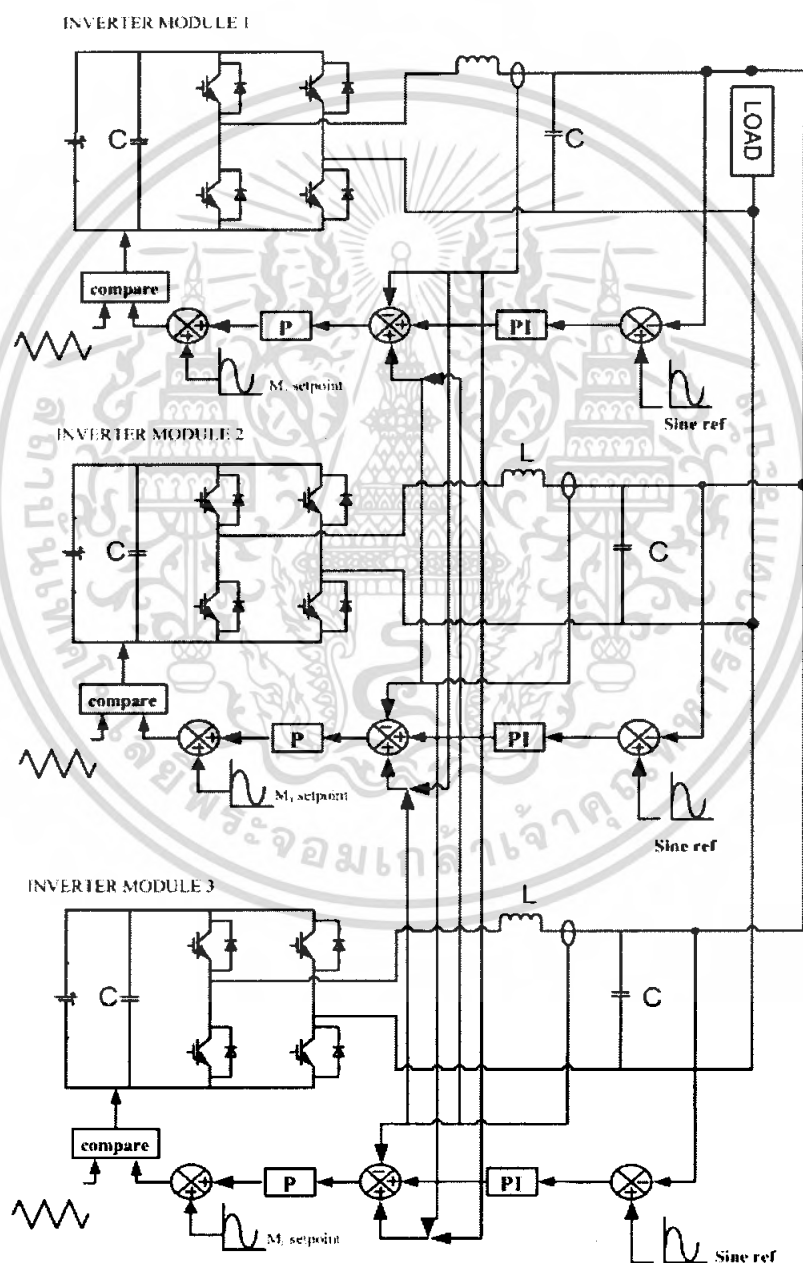
ซึ่งจากตารางจะพบว่าวิธีการขนานแบบ 3C นั้นมีประสิทธิภาพสูงกว่า MSC และ CLC ถึงแม้ว่าจะมีค่า ripple ของกระแสเทียบกับทั้ง 2 วิธีจะมากกว่า แต่ก็ยังถือว่าน้อยอยู่

ในปี 2000 Tsai-Fu Wu ,Yu-Kai Chen และ Yong-heh Huang ได้นำเสนอวิธีการขนานอินเวอร์เตอร์แบบใหม่ซึ่งพัฒนามาจากการควบคุมแบบ Master slave และ Distribute Logic Control ซึ่งก็คือ Circular Chain Control (3C) ซึ่งมีวิธีการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลเป็นลักษณะวงกลมโดยทำงานในโหมดควบคุมกระแส SPWM Current Control ซึ่งสามารถทำให้กระแสขาออกของแต่ละโมดูลนั้นเท่าๆกัน

### 3.4 การจำลองการขนานอินเวอร์เตอร์

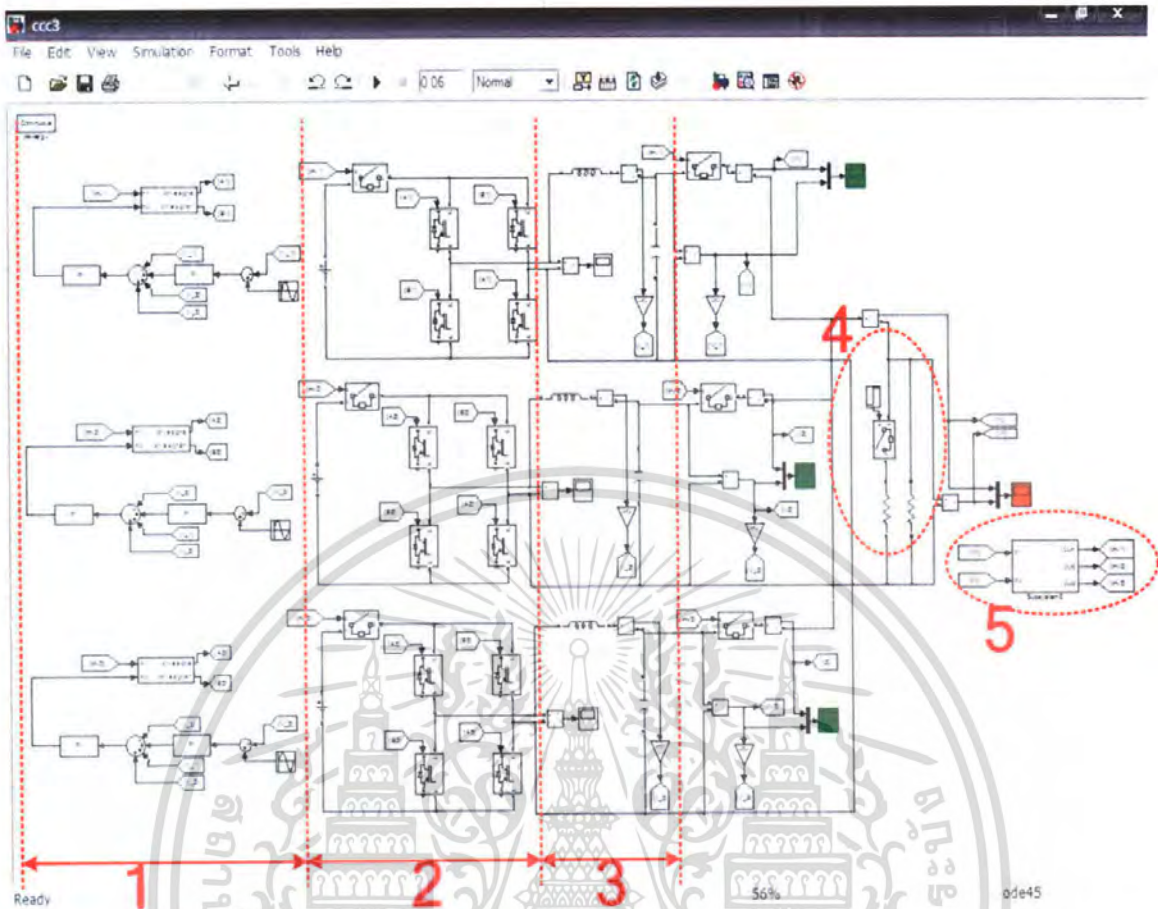
ทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MatLab Simulink 2006a โดยมีรายละเอียดของการจำลองดังนี้

- ขนานอินเวอร์เตอร์ 3 module ควบคุมด้วยวิธี Circular Chain Control (3C)
- อินเวอร์เตอร์แต่ละตัวมีขนาด 100 W สวิตซ์ด้วยเทคนิคยูนิโพลาร์
- แรงดัน DC ขาเข้า 48 V ทำงานที่  $M_a = 0.8$
- IGBT เป็นอุปกรณ์ในการสวิตซ์ ที่ความถี่ 20 KHz
- วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน  $L = 820 \mu\text{H}$  ,  $C = 6 \mu\text{F}$



ภาพที่ 3.7 การควบคุมแบบ Circular Chain Control

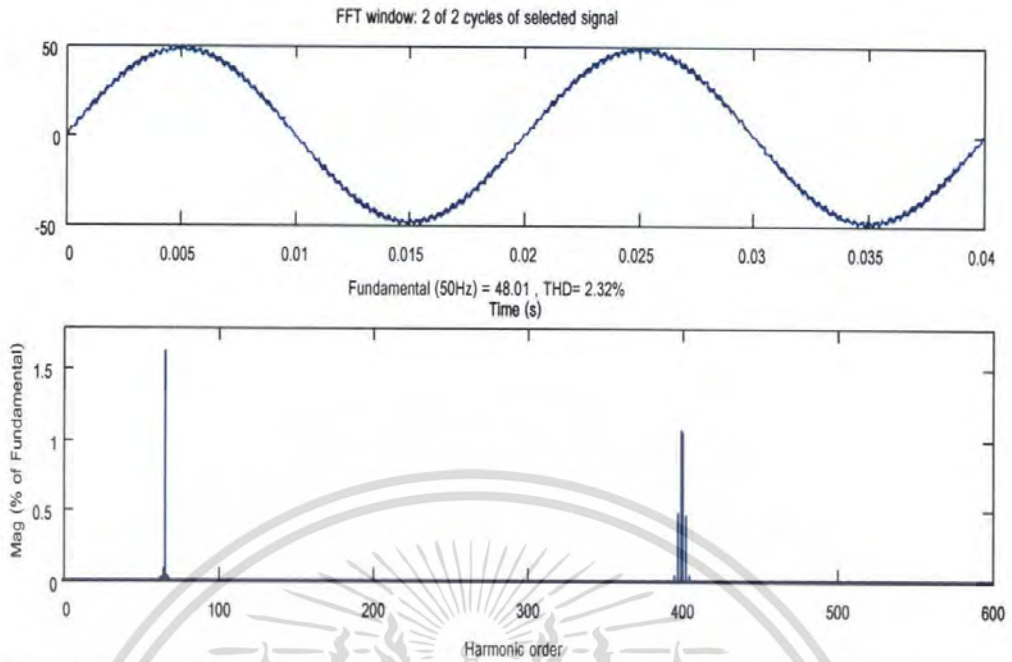
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 การจำลองระบบการขนานอินเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม MatLab Simulink 2006a

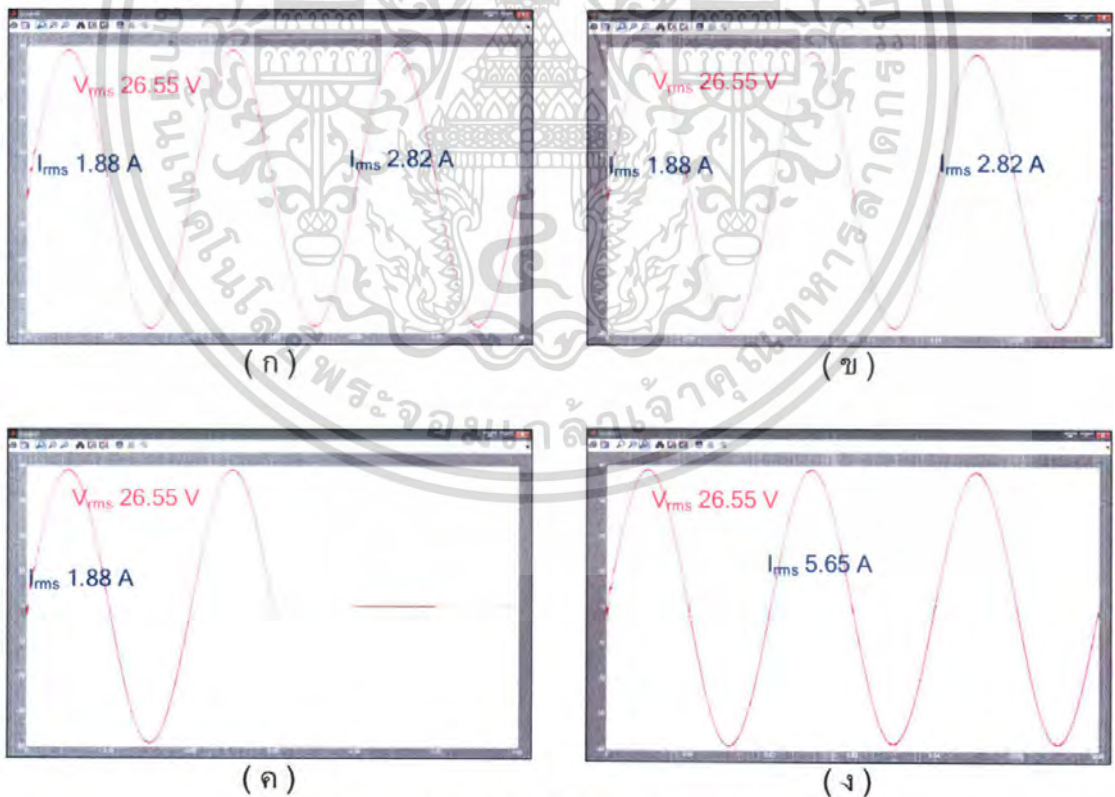
- ส่วนที่ 1 คือ วงจรขับสวิตช์แบบยูนิโพลาร์  
 2 คือ วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ 3 Module  
 3 คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน  
 4 คือ ชุดโหลด  
 5 คือ ระบบควบคุมการทำงานให้เหมาะสมกับภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดัน output และ harmonic order ของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 module

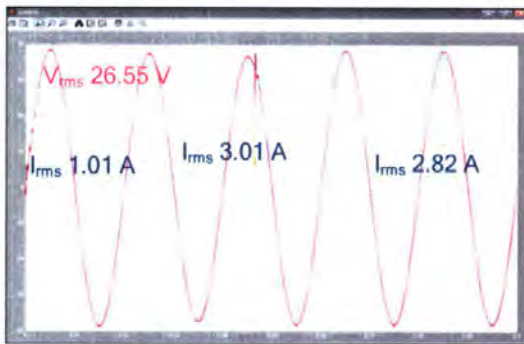
**ทดสอบจ่ายภาระตัวต้านทานที่ 50% ของพิกัด ( 150 W )**



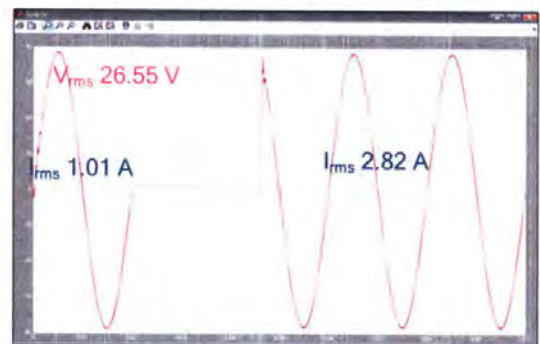
ภาพที่ 3.10 (ก) รูปคลื่นแรงดัน และ กระแส ของระบบ  
 (ข) รูปคลื่นแรงดัน และ กระแส อินเวอร์เตอร์ 1  
 (ค) รูปคลื่นแรงดัน และ กระแส อินเวอร์เตอร์ 2  
 (ง) รูปคลื่นแรงดัน และ กระแส อินเวอร์เตอร์ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

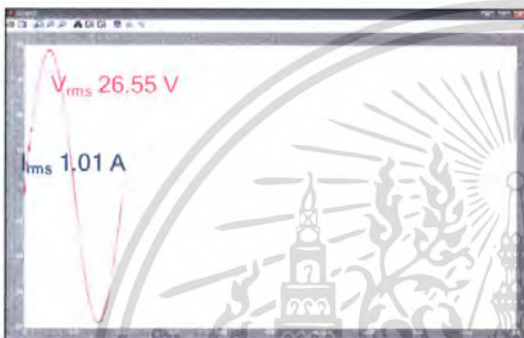
### ทดสอบจำภาวะตัวต้านทานที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 80W เป็น 150W



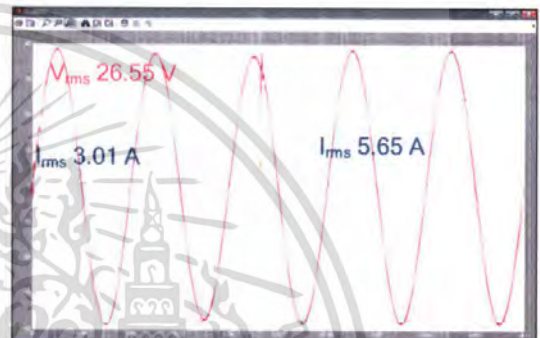
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 3.11 (ก) รูปคลื่นแรงดัน และ กระแส ของระบบ

(ข) รูปคลื่นแรงดัน และ กระแส อินเวอร์เตอร์ 1

(ค) รูปคลื่นแรงดัน และ กระแส อินเวอร์เตอร์ 2

(ง) รูปคลื่นแรงดัน และ กระแส อินเวอร์เตอร์ 3

### 3.5 สรุป

ในบทที่ 3 นี้แสดงถึงทฤษฎีการขนานอินเวอร์เตอร์ซึ่งในปริภูมียนิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอไว้ 3 แบบด้วยกัน ได้แก่ Master Slave Control( MSC ), Current Distribution Control( CDC ), และ Circulation chain control(3C), จากทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษามานี้ จะเห็นได้ว่า วิธี 3C นั้นได้มีการพัฒนามาจาก MSC และ CDC ดังนั้นจึงเลือกที่จะใช้การขนานแบบ 3C ส่วนการจำลองระบบนั้นได้ใช้โปรแกรม MatLab Simulink 2006a มาทำการทดสอบระบบที่ได้ทำการออกแบบเบื้องต้นว่า สามารถทำงานได้ตรงตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้หรือไม่

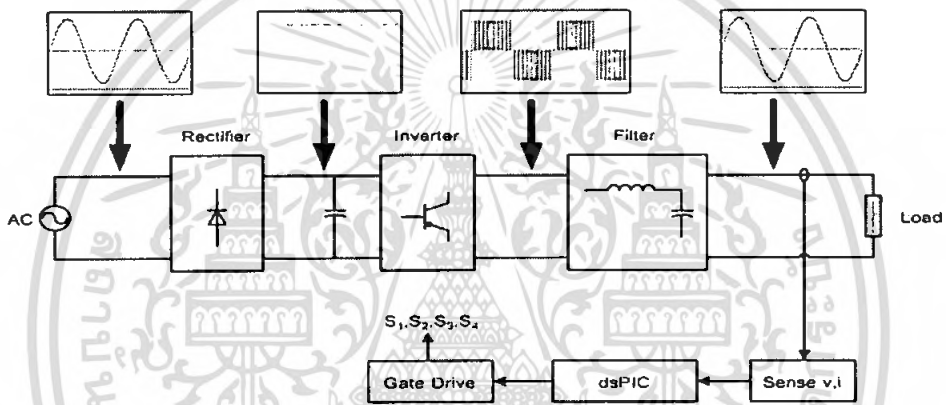
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ออกแบบและสร้างวงจรการขนานอินเวอร์เตอร์

ส่วนประกอบของวงจรการขนานอินเวอร์เตอร์แบบอัตโนมัติ

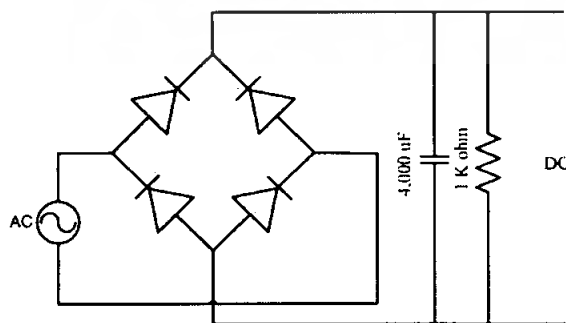
1. แหล่งจ่ายกระแสตรง
2. วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์
3. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน
4. วงจรตรวจจับแรงดันและกระแส
5. วงจรขับนำสวิตช์
6. ไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 4.1 ส่วนประกอบของวงจรอินเวอร์เตอร์

#### 4.1 แหล่งจ่ายกระแสตรง

ในการออกแบบเราใช้แหล่งจ่ายกระแสตรงจาก Variac แล้วใช้วงจรเรียงกระแสขนาด 60 โวลต์ โดยใช้ Diode Bridge Module KBPC35-08

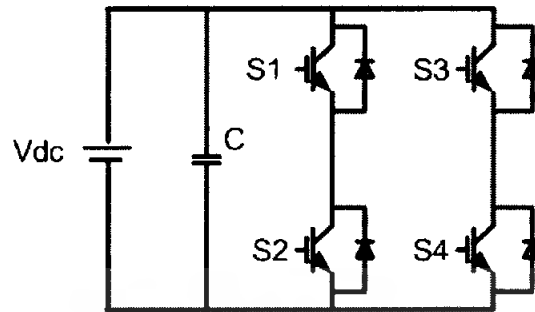


ภาพที่ 4.2 วงจรเรียงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์

เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสฟลูบริดจ์ อุปกรณ์สวิตช์ใช้ IGBT เบอร์ GTB30N60C3D



ภาพที่ 4.3 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์

### 4.2.1 หาพิคตแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์

เมื่อกำหนดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า  $V_d = 60$  โวลต์ และค่ามอดูเลชันที่สภาวะปกติ  $m_a = 0.64$  สามารถคำนวณหาค่าแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ได้ดังนี้

$$\hat{V}_{o1} = \hat{V}_{inv1} = m_a V_d \quad (4.1)$$

$$\hat{V}_{o1} = 0.64 \times 60 = 38.4 \text{ V}$$

$$V_{o1} = \frac{\hat{V}_{o1}}{\sqrt{2}} = \frac{38.4}{\sqrt{2}} = 27.153 \text{ V}$$

สำหรับเงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าต่ำสุด ที่จะไม่ทำให้เกิดการทำงานในโหมดโอเวอร์มอดูเลชัน  $m_a > 1.0$  โดยที่แรงดันด้านออกยังคงเดิมนั้น สามารถหาได้ดังนี้

$$V_d = \frac{\hat{V}_{o1}}{m_a} = \frac{38.4}{1} = 38.4 \text{ V}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าต้องไม่ต่ำกว่า 38.4 V เพื่อไม่ให้เกิดการโอเวอร์มอดูเลชัน

### 4.2.2 หาพิคตกระแสตรงด้านออกของอินเวอร์เตอร์

โดยกำหนดพิคตกำลังด้านออก 100 W ค่าตัวประกอบกำลังกับ 0.8 จะได้

$$P_{o1} = V_{o1} I_{o1} \cos \phi \quad (4.2)$$

$$I_{o1} = \frac{P_{o1}}{V_{o1} \cos \phi} = \frac{100}{27.153 \times 0.8} \times 100 = 4.6 \text{ A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในวิชาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{I}_{o1} = \sqrt{2} \times I_{o1} = 6.51 \text{ A}$$

#### 4.2.3 หาขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านออก

พิกัดของอินเวอร์เตอร์ในโครงการนี้กำหนดไว้ที่ 100 W โดยพิจารณาประสิทธิภาพที่ 80% ของพิกัด ดังนั้นกำลังไฟฟ้าด้านเข้าหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4.3)$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \times 100\% = \frac{100}{80} \times 100 = 125 \text{ W}$$

#### 4.2.4 หาพิกัดกระแสต้านเข้าจากสมการ

$$P_d = I_d V_d \quad (4.4)$$

$$I_d = \frac{125}{60} = 2.08 \text{ A}$$

จากการคำนวณเบื้องต้น สามารถสรุปพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ได้ดังนี้

แรงดันกระแสตรงด้านเข้า ( $V_d$ )	48 – 60 V (เฉลี่ย) (ปกติใช้ 60 V)
กระแสไฟฟ้าด้านเข้า ( $I_d$ )	2.08 A
กำลังไฟฟ้าจริงด้านเข้า ( $P_d$ )	125 W
แรงดันไฟฟ้าด้านออก ( $V_{o1}$ )	27.16 V
กระแสไฟฟ้าด้านออก ( $I_{o1}$ )	4.6 A
กำลังไฟฟ้าจริงด้านออก ( $P_o$ )	100 W
ประสิทธิภาพ	80 % (โดยประมาณ)
ตัวประกอบกำลัง (PF)	0.8 (โดยประมาณ)

### 4.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ในที่นี้เราจะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว ส่วนตัวเก็บประจุนั้นสามารถหาซื้อได้ทั่วไปตามท้องตลาด โดยการสร้างตัวเหนี่ยวนำมีลำดับขั้นตอน ดังนี้

1. ในโครงการนี้ต้องการออกแบบวงจรกรองความถี่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟส พิกัด 100 W ความถี่ด้านออกที่ต้องการคือ 50 Hz โดยมีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนคือวงจรกำลัง และวงจรควบคุมของตัวอินเวอร์เตอร์เอง ซึ่งพิกัดด้านออกของอินเวอร์เตอร์ดังต่อไปนี้

- แรงดันด้านออกต่ำสุด คือ 42.43 V
- กระแสด้านออกต่ำสุด คือ 2.95 A

โดยใช้ตัวต้านทานเป็นภาระโหลด ซึ่งสมมติให้เท่ากับ  $R_d$  ค่าความถี่ที่ต้องการกำจัดคือ 40 kHz ซึ่งก็คือ ความถี่ที่ใช้ในการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์

2. วงจรกรองที่เลือกใช้คือ Low Pass Filter แบบ LC โดยมี อัตราการลดทอนตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราการลดทอนความถี่

Filter	Number of filter in tandem						
	1	2	3	4	5	6	7
L	12	24	36	48	60	72	84

3. คำนวณหาค่า  $R_d$  จาก

$$R_d = \frac{V_{min,rms}}{I_{min,rms}} \tag{4.5}$$

$$R_d = \frac{42.43V}{2.95A} = 14.38 \Omega$$

โดยที่  $V_{min,rms}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าดำสุดที่ใช้งาน  
 $I_{min,rms}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งาน

4. คำนวณหาค่าความถี่คัทออฟจาก

$$F_o = \frac{F}{2^{\frac{dB}{L}}} \tag{4.6}$$

$$F_o = \frac{40kHz}{2^{\frac{29}{12}}} = 75 \text{ kHz}$$

โดยที่  $F_o$  คือ ความถี่คัทออฟ  
 $F$  คือ ความถี่ของสัญญาณที่ต้องการกำจัด  
 dB คือ ค่าการลดทอนที่ต้องการ ณ ความถี่ที่ต้องการกำจัด  
 $L$  คือ ค่าความสูญเสีย (loss) หรือ ค่าอัตราการลดทอนในหน่วย dB/decade วงจรกรองความถี่ที่เลือกใช้ตามตารางที่4.1 แบบแอล มีค่า  $L = 12N$   
 $N$  คือ จำนวนชุดของวงจรกรองแต่ละแบบที่มาต่ออนุกรมกัน ตัวอย่างเช่นในกรณีของวงจรกรองแบบแอลประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอย่างละหนึ่งตัวถือว่าเป็นหนึ่งชุด จะได้  $N = 1$  ถ้ามีการต่อคาสเคดกันอีกชุดจะได้  $N = 2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ โดยนำค่า  $R_d$  และค่า  $F_0$  ที่ได้มาแทนในสมการ (4.7) และ (4.8)

$$L = \frac{R_d}{2\pi F_0} \quad (4.7)$$

$$L = \frac{14.38}{\pi(7.5kHz)} = 610 \mu H$$

$$C = \frac{1}{\pi F_0 R_d} \quad (4.8)$$

$$C = \frac{1}{\pi(7.5kHz)(14.38)} = 2.95 \mu F$$

ดังนั้นเลือกใช้  $C = 3 \mu F$

6. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

6.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธีใช้กราฟจาก data sheet ของบริษัท mircometals ดังนั้นการออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่  $L = 610 \mu H$ ,  $I = 4.17 A$   
หาค่าพลังงานสะสม

$$E = \frac{1}{2} Li^2 \quad (4.9)$$

$$E = \frac{1}{2} (610 \mu H)(4.17)^2$$

$$E = 5303.6 \mu J$$

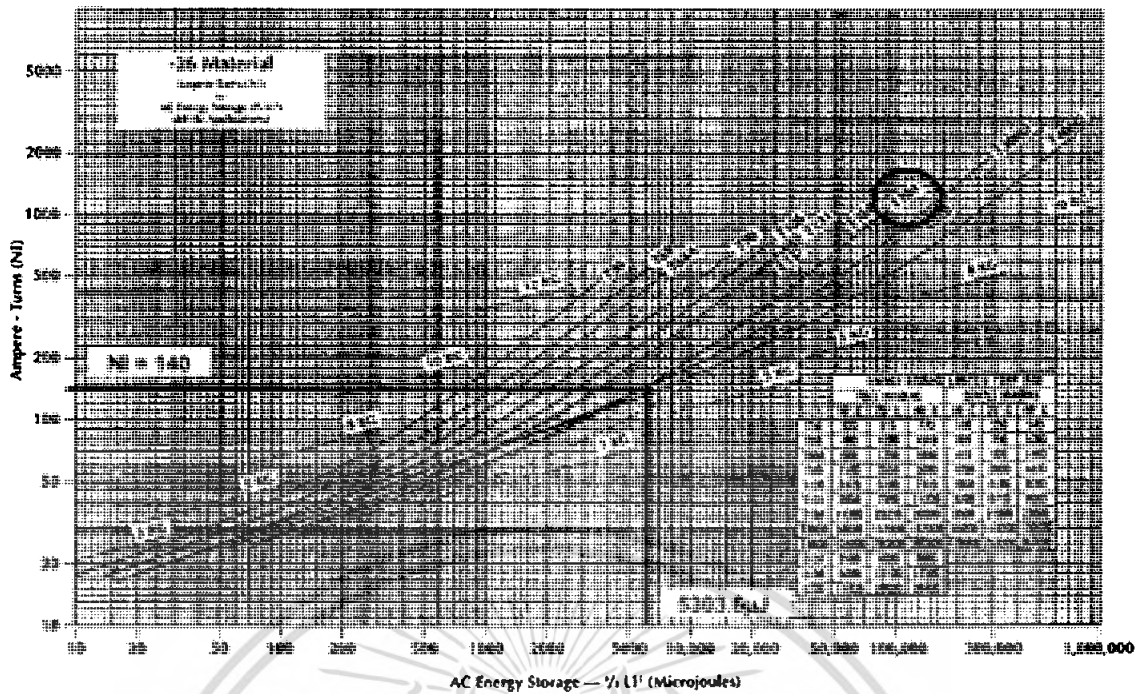
6.2 การหาค่า NI จากกราฟ ( - 26 Material ) โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้  
แกนทอรอยด์ T 184 - 26 ( แกนทอรอยด์สีเหลือง/ขาว ) เหตุที่เลือกแกนทอรอยด์ T 184 เพราะว่าเราสามารถดูค่า energy storage limit ได้จากกราฟภาพที่ 4.4 เมื่อเป็นการพันแบบ full winding ที่อุณหภูมิ 25 °C แกน T 184 จะมี AC Energy Storage ที่ 23200  $\mu J$  ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้จากการคำนวณหาค่าพลังงานสะสมในหัวข้อที่ 6.1 จะได้ NI = 140 เมื่อ  $I = 4.17 A$

จะได้

$$N = \frac{140}{4.17A} = 33.87$$

ดังนั้น

$$N = 34 \text{ รอบ}$$



ภาพที่ 4.4 AC Energy storage of -26 Materials

6.3 การเลือกขนาดเส้นลวดจากกราฟ Winding Table ( single layer ) โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

แกนเหล็กทอรอยด์ T 184 – 26, จำนวนรอบ( N ) = 34 รอบ หลังจากนั้นเราจะใช้ค่าจากตารางที่ 4.1 ในการหาขนาดเส้นลวด ซึ่งจากตารางจะได้ค่าเบอร์ลวดดังนี้ AWG # 13

ตารางที่ 4.1 Winding Table

SINGLE LAYER WINDING TABLE																				
WIRE SIZE (AWG)		28	26	24	22	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	TOTAL POWER (WATTAGE) VS TEMPERATURE			
RESISTIVITY (ohm/cm)		2.13	1.34	942	530	350	264	210	166	132	104	82.8	66.5	52.1	41.3	32.8				
MAXIMUM AMPS		100	64	90	129	183	262	312	372	445	533	635	760	933	108	129	154			
PER ALUMINUM WIRE		250°	1.07	1.52	2.17	3.09	4.41	5.28	6.27	7.50	8.97	10.7	12.8	15.2	18.2	21.7	26.0			
TEMPERATURE		400°	1.38	1.97	2.81	4.00	5.70	6.81	8.11	9.70	11.6	13.8	16.6	19.7	23.5	28.1	33.6			
PART No.	MULTI turns	WIRE AREA (cm <sup>2</sup> )	NUMBER OF TURNS														100	250	400	
			9	6	4	2	1													
T16	80	80	9	6	4	2	1											.013	.038	.067
T20	96	1.16	11	8	5	3	2	1										.018	.055	.097
T25	1.19	1.68	18	14	10	7	5	4	3	2	1							.030	.089	.157
T26	1.74	2.67	15	11	8	5	3	2	1									.042	.127	.223
T30	1.44	2.79	25	20	15	11	7	6	5	4	3	2	1	1				.044	.133	.233
T37	1.53	3.77	37	29	22	17	12	11	9	7	6	5	4	3	2	1	1	.060	.180	.316
T38	1.92	4.43	31	24	18	13	10	8	7	5	4	3	2	2	1			.071	.211	.371
T44	1.84	5.23	43	34	26	20	15	13	11	9	7	6	5	4	3	2	1	.083	.249	.437
T50	2.01	6.86	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	.109	.326	.574
T50B	2.32	7.83	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	.125	.373	.659
T50D	2.95	9.87	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	.157	.470	.826
T51C	2.58	7.56	36	28	22	16	12	10	9	7	6	5	4	3	2	1		.120	.360	.633
T60	2.48	9.84	67	53	41	32	25	21	19	16	14	12	10	8	7	6	4	.156	.468	.824
T60D	3.68	14.3	67	53	41	32	25	21	19	16	14	12	10	8	7	6	4	.228	.681	1.20
T68	2.47	11.2	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7	5	.178	.533	.936
T68A	2.77	12.5	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7	5	.198	.594	1.04
T68D	3.41	15.2	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7	5	.241	.722	1.27
T72	3.15	13.3	54	43	33	26	19	17	14	12	11	9	7	6	5	4	3	.212	.634	1.11
T80	2.80	15.5	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11	9	.246	.736	1.30
T80B	3.44	18.7	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11	9	.298	.892	1.57
T80D	4.07	22.0	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11	9	.350	1.05	1.84
T90	3.64	22.4	115	92	72	57	44	39	34	30	26	23	20	17	15	13	11	.356	1.07	1.88
T94	3.44	22.0	117	94	74	58	45	40	35	31	27	24	21	18	15	13	11	.350	1.05	1.85
T106	4.49	31.0	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13	11	.492	1.47	2.59
T106A	3.86	26.8	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13	11	.427	1.28	2.25
T106B	5.19	39.5	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13	11	.565	1.69	2.97
T124	3.95	33.3	150	120	95	75	59	52	46	40	36	31	27	24	21	18	15	.529	1.58	2.79
T130	4.75	42.2	165	133	105	83	65	58	51	45	40	35	31	27	23	20	17	.671	2.01	3.53
T130A	3.67	33.2	165	133	105	83	65	58	51	45	40	35	31	27	23	20	17	.529	1.58	2.78
T131	5.11	42.1	134	107	85	67	52	46	41	36	32	28	24	21	18	16	13	.669	2.00	3.52
T132	4.95	42.2	147	118	93	74	58	51	45	40	35	31	27	23	20	18	15	.671	2.01	3.53
T141	4.75	46.8	188	151	119	95	75	66	59	52	46	40	35	31	27	24	20	.744	2.23	3.92
T150	5.28	53.2	180	145	114	91	71	63	56	49	44	38	34	29	26	22	19	.846	2.53	4.45
T157	5.89	63.2	204	164	129	103	81	72	64	56	50	44	39	34	30	26	23	1.01	3.01	5.29
T175	6.58	79.1	230	186	147	117	92	82	73	64	57	50	44	39	34	30	26	1.26	3.78	6.16
T184	7.54	89.2	202	163	129	102	81	72	63	56	50	44	38	34	29	26	22	1.42	4.25	7.47
T200	6.50	90.9	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36	31	1.45	4.33	7.61
T200B	8.78	120	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36	31	1.91	5.74	10.1
T201	8.90	111	202	163	129	102	81	72	63	56	50	44	38	34	29	26	22	1.76	5.28	9.28
T225	6.93	109	305	245	195	155	123	109	97	86	76	68	60	53	46	41	36	1.74	5.21	9.16
T225B	9.21	143	305	245	195	155	123	109	97	86	76	68	60	53	46	41	36	2.27	6.79	11.9
T250	10.4	166	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36	31	2.63	7.88	13.9
T300	7.95	173	422	341	271	216	171	153	136	121	108	96	85	75	66	58	52	2.75	8.23	14.5
T300D	10.5	223	422	341	271	216	171	153	136	121	108	96	85	75	66	58	52	3.55	10.6	18.7
T400	11.1	301	494	399	317	254	201	179	160	142	126	113	100	88	78	69	61	4.79	14.3	25.2
T400D	14.4	384	494	399	317	254	201	179	160	142	126	113	100	88	78	69	61	6.10	18.2	32.1
T520	13.7	496	680	550	437	350	278	248	221	197	176	156	139	123	109	97	86	7.88	23.6	41.5
T520D	17.7	629	680	550	437	350	278	248	221	197	176	156	139	123	109	97	86	10.0	30.0	52.7
T650	23.1	996	789	621	494	396	315	281	250	223	199	177	158	139	124	110	98	15.7	46.9	82.5

ดังนั้นในโครงการนี้จึงเลือกใช้แกนทอรอยด์ T 184 – 26 ไขลวดเบอร์ AWG # 13 พันจำนวน 34 รอบจึงได้ LC Filter ตามที่ได้ออกแบบมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 วงจรตรวจจับแรงดันและกระแส

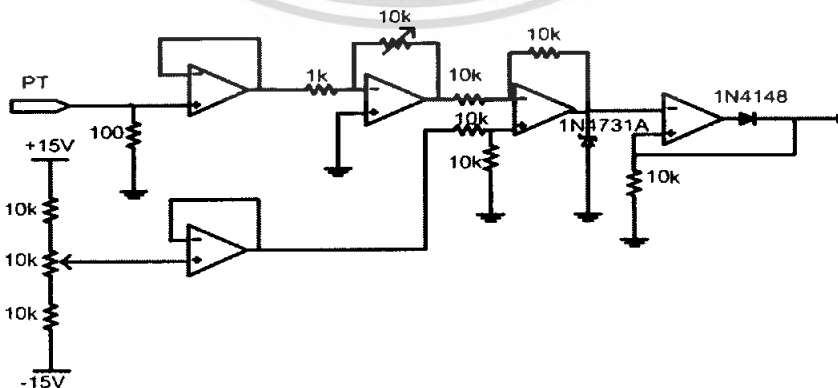
เนื่องจากการประมวลสัญญาณของวงจรควบคุมจะต้องมีการรับสัญญาณทั้งกระแสและแรงดันจากจุดต่าง ๆ แล้วทำการส่งสัญญาณมายังตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล เพื่อนำสัญญาณเข้ามาทำการประมวลผลและสร้างสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมภาคกำลังต่อไป ซึ่งในส่วนของวงจรตรวจจับสัญญาณมีทั้งหมด 3 ชุด แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกใช้ในการตรวจจับสัญญาณแรงดันที่อินเวอร์เตอร์แต่ละตัว ส่วนที่สองใช้ในการตรวจจับสัญญาณกระแสที่เอาต์พุทของระบบ

##### 4.4.1 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันนี้จะมีสองชุดโดยแต่ละชุดจะเป็นการตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สัญญาณขาออกของอินเวอร์เตอร์แต่ละตัว เพื่อใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับ ส่งไปยังตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล และนำไปควบคุมอินเวอร์เตอร์ต่อไป ซึ่งในงานปริญญาโทนี้ใช้หม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformer) ในการตรวจจับ จากนั้นสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับแรงดันจะส่งไปยังวงจรปรับอัตราขยายให้เหมาะสมแล้วทำการยกระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 2 โวลต์ จากนั้นจะส่งไปยังวงจรปรับแต่งรูปสัญญาณเพื่อให้สัญญาณที่รับเข้ามามีระดับแรงดันที่เหมาะสมกับพอร์ตของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ทำหน้าที่แปลงสัญญาณให้มีระดับไม่เกิน 5 โวลต์ และต้องเป็นระดับสัญญาณบวกเท่านั้น โดยใช้ไดโอดในการตัดแต่งสัญญาณแล้วทำการส่งไปยังตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปประมวลต่อไป

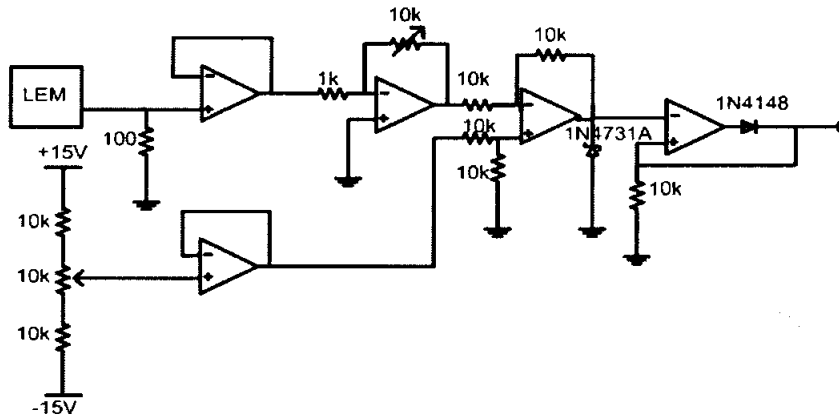
##### 4.4.2 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส

การตรวจจับสัญญาณกระแสจะตรวจจับที่จุดเดียวคือ เอาต์พุทของระบบ โดยสัญญาณที่ได้จะนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของระบบ และใช้ในการตัดในการเปิดปิดอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับภาระทางไฟฟ้า ซึ่งในงานปริญญาโทฉบับนี้ใช้พิกัดของกระแสไม่เกิน 25 A ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวตรวจจับกระแส LEM เบอร์ LA25-NP แล้วทำการเลือกอัตรากระแสอินพุทต่อกระแสเอาต์พุทไว้ที่ 1000:5 จากนั้นสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสจะส่งไปยังวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและปรับระดับออฟเซต ซึ่งมีลักษณะวงจรเหมือนกับวงจรตรวจจับระดับแรงดันที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนวงจรตรวจจับสัญญาณกระแส



ภาพที่ 4.5 วงจรตรวจจับแรงดัน

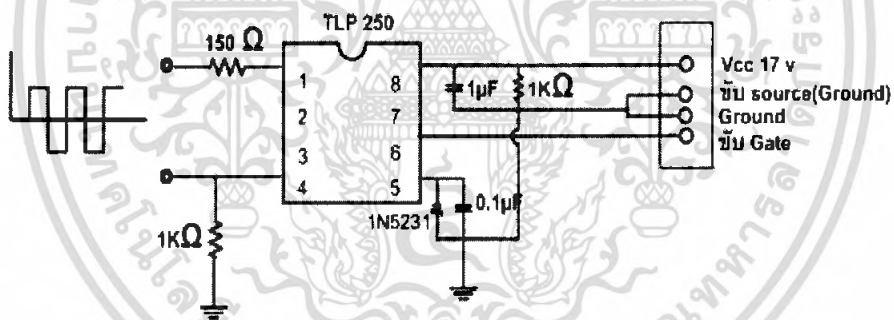
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 วงจรตรวจจับกระแส

### 4.5 วงจรขับนำสวิตช์

วงจรขับนำสวิตช์จะรับสัญญาณขับนำสวิตช์มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสัญญาณที่ใช้จะเป็นแบบ SPWM ( Sinusoidal Pulse-width Modulation ) แล้วทำการแยกสัญญาณด้วย Opto TLP 250 ซึ่งจะได้รับแหล่งจ่ายไฟตรงจากชุดวงจร พุช – พูล ที่มีแรงดัน 17 โวลต์ เพื่อนำไปขับ IGBT

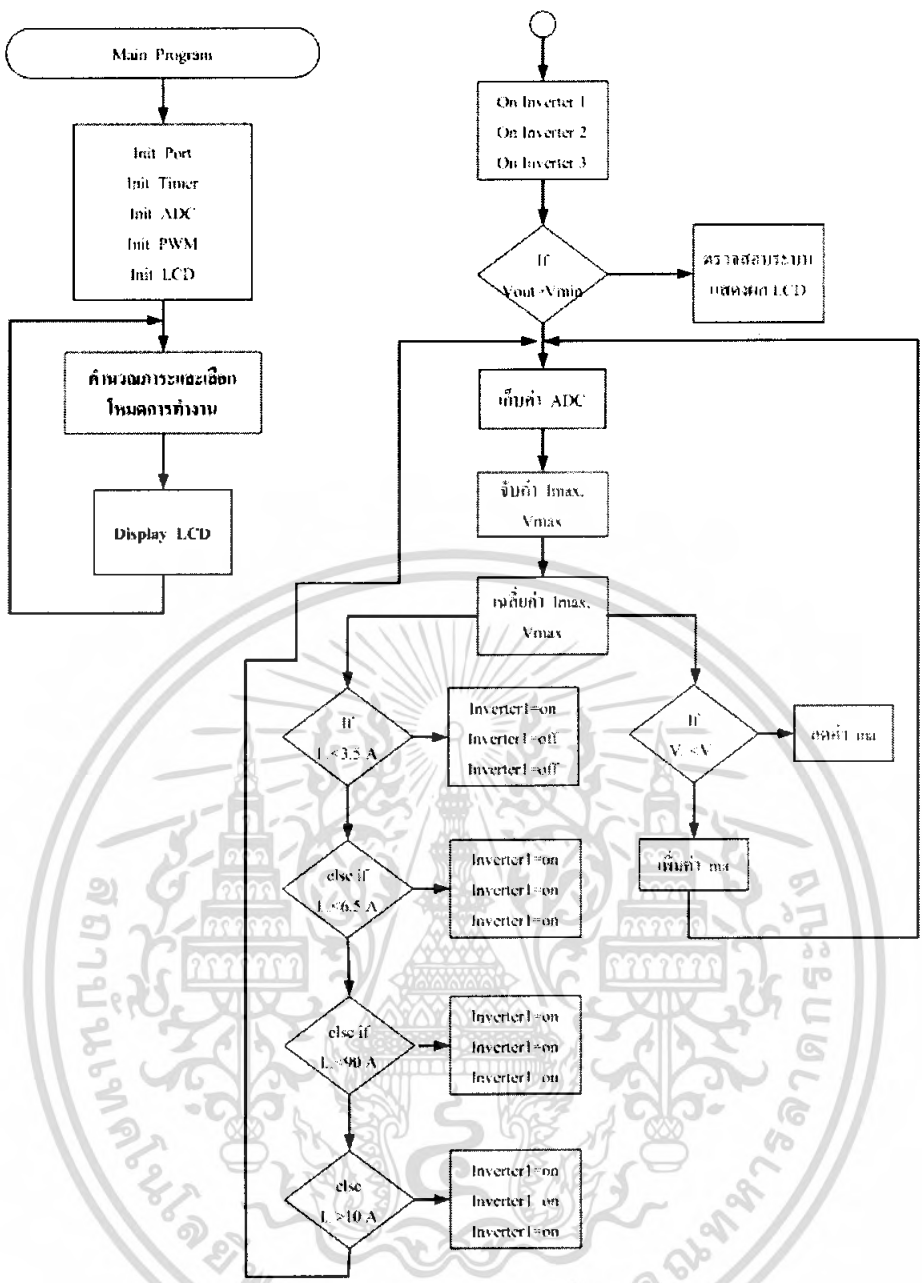


ภาพที่ 4.7 วงจรขับนำสวิตช์

### 4.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC

ในโครงการนี้ใช้การควบคุมด้วยหน่วยประมวลผลแบบดิจิทัลโดยเลือกใช้ dsPIC เบอร์ 30F4011 ใช้ภาษาซีในการโปรแกรมเนื่องจากง่ายต่อการเขียนโปรแกรม ซึ่งจะควบคุมทั้งในส่วนการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อขับนำสวิตช์( $M_a$ , Dead Time) และในส่วนการรับค่าอนาล็อกจากวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสเพื่อคำนวณภาระและตัดสินใจเลือกโหมดการทำงาน โดยมีแผนผังการทำงานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 แผนผังการทำงานของโปรแกรมหลัก

### 4.7 สรุป

จากบทนี้ แสดงให้เห็นส่วนประกอบและวิธีการคำนวณออกแบบวงจรต่างๆ ที่ใช้ในการขนานอินเวอร์เตอร์แบบอัตโนมัติ ซึ่งส่วนประกอบของวงจรควบคุมนั้น จะใช้การควบคุมด้วยหน่วยประมวลผลกลางแบบดิจิทัลโดยใช้ dsPIC เบอร์ 30F4011 ซึ่งในบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงกระบวนการการทำงานของหน่วยประมวลผลแบบดิจิทัลในการควบคุมการขนานอินเวอร์เตอร์แบบอัตโนมัติ

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 5.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดไฟฟ้า

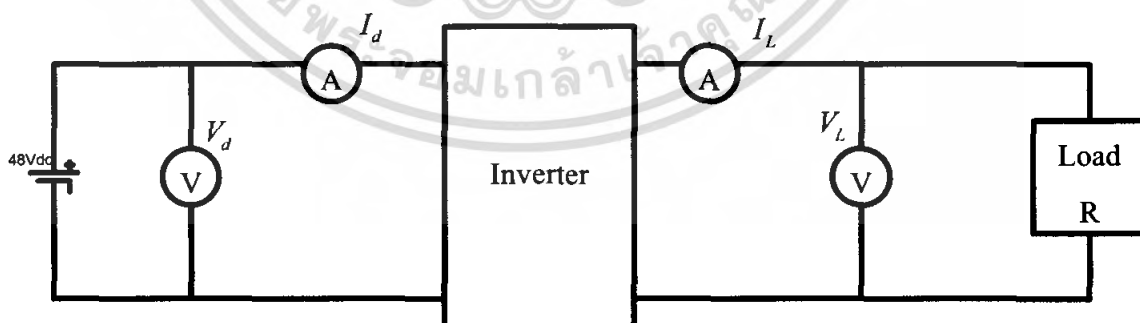
เครื่องมือวัดไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

1. ดิจิตอลออสซิลโลสโคปรุ่น DL 1520 8 bit 200 Ms/s 150 MHz YOKOGAWA ใช้ในการวัดรูปคลื่นสัญญาณการทดลอง
2. FLUKE 43 Power Quality Analyzer ใช้ในการบันทึกค่ากระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้า และค่าคงตัวประกอบกำลังในส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับและรูปคลื่นที่ได้จากอินเวอร์เตอร์
3. MULTIMETER รุ่น 973 A ของ HEWLETT PACKARD
5. MULTIMETER รุ่น UT30D ของ UNI-T
6. Digital Clamp-on Tester รุ่น 234302 ของ YOGOGAWA
7. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ (voltage regulator) standard SD 16 capacity 4 kVA max 16 A

#### 5.2 ผลการทดลอง

ผลการทดสอบจ่ายกำลังเอาต์พุตต่อกับโหลดความต้านทาน

การทดลองที่ 1 การทดสอบวัดค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าขณะไม่มีภาระไฟฟ้า (no load) และขณะจ่ายให้กับโหลดค่าความต้านทาน ที่พิกัดกำลัง 80 W, 160 W, 240 W และ 320 W โดยจะมีการทดสอบอินเวอร์เตอร์ทั้งสามตัว ซึ่งมีวงจรการทดลองดังแสดงตามภาพที่ 5.1 และผลการทดลองดังต่อไปนี้



ภาพที่ 5.1 วงจรทดสอบอินเวอร์เตอร์ต่อกับโหลดความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อินเวอร์เตอร์ตัวที่ 1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า (no load)

$m_a$	Input			Output			
	$V_d$ (V)	$I_d$ (A)	$P_d$ (W)	$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$\cos\theta$	$P_o$
0.64	60	0	0	27.76	0	0	0

$m_a$	Power Output						
	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	PF	DPF	$THD_i$ (%)	$THD_v$ (%)
0.64	0	0	0	0	0	0	0.3

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 ขณะจ่ายโหลดความต้านทาน

Load (W)	Input			$m_a$	output				$\eta$ (%)
	$V_d$ (V)	$I_d$ (A)	$P_d$ (W)		$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$\cos\theta$	$P_o$ (W)	
80	55.5	1.6	88.8	0.82	27.1	2.62	1	69	77.7
160	52.7	3.3	173.91	0.91	26.8	5.27	1	138	79.35
240	50	5	250	0.98	25.67	7.53	1	191	76.4
320	49	6	294	0.98	23.57	9.61	1	213	72.45

Load (W)	Power Output						
	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	PF	DPF	$THD_i$ (%)	$THD_v$ (%)
80	69	69	5	1	1	4.1	4.5
160	138	138	9	1	1	4.0	4.1
240	191	191	7	1	1	7.5	7.7
320	213	213	13	1	1	8.8	8.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า (no load)

$m_a$	Input			Output			
	$V_d$ (V)	$I_d$ (A)	$P_d$ (W)	$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$\cos\theta$	$P_o$
0.64	60	0	0	27.67	0	0	0

$m_a$	Power Output						
	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	PF	DPF	$THD_i$ (%)	$THD_v$ (%)
0.64	0	0	0	0	0	73	0.5

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ขณะจ่ายโหลดความต้านทาน

Load (W)	Input			ma	output				$\eta$ (%)
	$V_d$ (V)	$I_d$ (A)	$P_d$ (W)		$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$\cos\theta$	$P_o$ (W)	
80	55.5	1.6	88.8	0.82	27.1	2.64	1	71	79.95
160	52.3	3.5	183.05	0.9	27	5.28	1	140	76.48
240	49.3	5.2	256.36	0.97	25.98	7.68	1	198	77.24
320	48.5	6.2	300.7	0.98	24	9.36	1	222	73.83

Load (W)	Power Output						
	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	PF	DPF	$THD_i$ (%)	$THD_v$ (%)
80	71	71	4	1	1	4.7	4.8
160	140	140	5	1	1	6.7	6.5
240	198	198	7	1	1	8.5	8.1
320	222	222	8	1	1	9.4	9.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อินเวอร์เตอร์ตัวที่ 3

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 3 ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า (no load)

$m_a$	Input			Output			
	$V_d$ (V)	$I_d$ (A)	$P_d$ (W)	$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$\cos\theta$	$P_o$
0.64	60	0	0	27.6	0	0	0

$m_a$	Power Output						
	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	PF	DPF	$THD_i$ (%)	$THD_v$ (%)
0.64	0	0	0	0	0	93	0.4

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 3 ขณะจ่ายโหลดความต้านทาน

Load (W)	Input			$m_a$	output				$\eta$ (%)
	$V_d$ (V)	$I_d$ (A)	$P_d$ (W)		$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$\cos\theta$	$P_o$ (W)	
80	55.4	1.7	94.18	0.84	27.22	2.63	1	70	74.33
160	51.7	3.6	186.12	0.93	26.72	5.25	1	141	75.76
240	49.7	5.8	288.26	0.98	25.28	7.4	1	184	63.83
320	48.9	6	293.4	0.98	23	8.96	1	204	69.53

Load (W)	Power Output						
	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	PF	DPF	$THD_i$ (%)	$THD_v$ (%)
80	70	70	3	1	1	3.6	3.8
160	141	141	5	1	1	5.8	5.5
240	184	184	7	1	1	8.4	8.4
320	204	204	8	1	1	9.4	9.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การทดลองที่ 2** ทดสอบวัดค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่สภาวะโหลดเดียวกัน เปรียบเทียบระหว่างการจ่ายโหลดด้วยอินเวอร์เตอร์ 1 โมดูล 2 โมดูล และ 3 โมดูล ที่พิกัดกำลัง 80 W, 160 W, 240 W และ 320 W เพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ

**ตารางที่ 5.7** ผลการทดสอบจ่ายโหลดด้วย อินเวอร์เตอร์ 1 โมดูล

Load (W)	Input			ma	output				$\eta$ (%)
	$V_d$ (V)	$I_d$ (A)	$P_d$ (W)		$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$\cos\theta$	$P_o$ (W)	
80	55.5	1.6	88.8	0.82	27.1	2.62	1	69	77.7
160	52.7	3.3	173.91	0.91	26.8	5.27	1	138	79.35
240	50	5	250	0.98	25.67	7.53	1	191	76.4
320	49	6	294	0.98	23.57	9.61	1	213	72.45

Load (W)	Power Output						
	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	PF	DPF	$THD_i$ (%)	$THD_v$ (%)
80	69	69	5	1	1	4.1	4.5
160	138	138	9	1	1	4.0	4.1
240	191	191	7	1	1	7.5	7.7
320	213	213	13	1	1	8.8	8.7

**ตารางที่ 5.8** ผลการทดสอบจ่ายโหลดด้วย อินเวอร์เตอร์ 2 โมดูล

Load (W)	Input			ma	output				$\eta$ (%)
	$V_d$ (V)	$I_d$ (A)	$P_d$ (W)		$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$\cos\theta$	$P_o$ (W)	
80	55.7	1.66	92.46	0.78	27.16	2.56	1	70	75.71
160	52.5	3.23	169.58	0.87	27.21	5.19	1	140	82.56
240	49.5	4.92	243.54	0.95	26.87	7.68	1	202	82.94
320	47.8	6.65	317.87	0.98	25.61	9.77	1	251	78.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (W)	Power Output						
	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	PF	DPF	$THD_i$ (%)	$THD_v$ (%)
80	70	70	3	1	1	3	3.2
160	140	140	5	1	1	4.5	4.4
240	202	202	7	1	1	5.5	5.3
320	251	251	9	1	1	6.5	6.4

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบจ่ายโหลดด้วย อินเวอร์เตอร์ 3 โมดูล

Load (W)	Input			ma	output				$\eta$ (%)
	$V_d$ (V)	$I_d$ (A)	$P_d$ (W)		$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$\cos\theta$	$P_0$ (W)	
80	55.4	1.76	97.504	0.77	27.04	2.57	1	69	70.77
160	52.5	3.49	183.225	0.85	26.98	5.19	1	140	76.41
240	49.6	5.25	260.4	0.91	26.73	7.68	1	204	78.34
320	47.7	6.62	315.77	0.97	26.23	10.01	1	260	82.34

Load (W)	Power Output						
	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	PF	DPF	$THD_i$ (%)	$THD_v$ (%)
80	69	69	4	1	1	2.2	2.3
160	140	140	5	1	1	3.5	3.3
240	204	204	5	1	1	4.2	4.3
320	260	260	6	1	1	5.2	4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การทดลองที่ 3** การทดสอบวัดค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าขณะไม่มีภาระไฟฟ้า (no load) และขณะจ่ายให้กับโหลดค่าความต้านทาน ที่พิกัดกำลัง 80 W, 160 W, 240 W และ 320 W ของอินเวอร์เตอร์แบบขนาน และทดสอบเงื่อนไขการขนานอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์แบบขนาน ขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า (no load)

$m_a$	Input			Output			
	$V_d$ (V)	$I_d$ (A)	$P_d$ (W)	$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$\cos\theta$	$P_o$
0.64	60	0	0	27.15	0	0	0

$m_a$	Inverter1				Inverter2			
	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$\cos\theta_1$	$P_1$ (W)	$V_2$ (V)	$I_2$ (A)	$\cos\theta_2$	$P_2$ (W)
0.64	27.15	0	0	0	27.15	0	0	0

$m_a$	Inverter3			
	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$\cos\theta_1$	$P_1$ (W)
0.64	27.15	0	0	0

$m_a$	Power Output						
	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	PF	DPF	$THD_i$ (%)	$THD_v$ (%)
0.64	0	0	0	0	0	85.15	0.5

ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบของอินเวอร์เตอร์แบบขนาน ขณะจ่ายโหลดความต้านทาน

Load (W)	Input			$m_a$	Output				ฟังก์ชันการทำงาน
	$V_d$ (V)	$I_d$ (A)	$P_d$ (W)		$V_L$ (V)	$I_L$ (A)	$\cos\theta$	$P_L$ (W)	
80	56.5	1.6	90.4	0.82	27.29	2.59	1	68	อินเวอร์เตอร์ 1
160	53.4	3.23	172.48	0.92	27.05	5.32	1	145	อินเวอร์เตอร์ 1,2
240	50.4	5.25	264.6	0.96	27.12	7.86	1	207	อินเวอร์เตอร์ 1,2,3
320	--	--	--	--	--	--	--	--	โอเวอร์ โหลด

Load (W)	Inverter1				Inverter 2			
	$V_1$	$I_1$	$\cos\theta_1$	$P_1$	$V_2$	$I_2$	$\cos\theta_2$	$P_2$
80	27.29	2.59	1	58	--	--	--	--

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

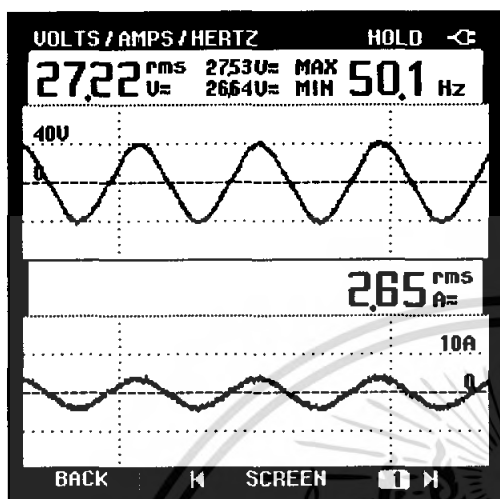
160	27.13	2.58	1	70	27.17	2.63	1	70
240	26.62	3.26	1	86	26.91	2.72	1	73
320	--	--	--	--	--	--	--	--
Load (W)	Inverter3							
	$V_1$	$I_1$	$\cos \theta_1$	$P_1$				
80	--	--	--	--				
160	--	--	--	--				
240	26.94	2.08	0.98	52				
320	--	--	--	--				

Load (W)	Power Output						
	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	PF	DPF	$THD_i$ (%)	$THD_v$ (%)
80	68	68	4	1	1	4.4	4.3
160	145	145	5	1	1	4.6	4.7
240	207	207	8	1	1	4.8	4.7
320	--	--	--	--	--	--	--

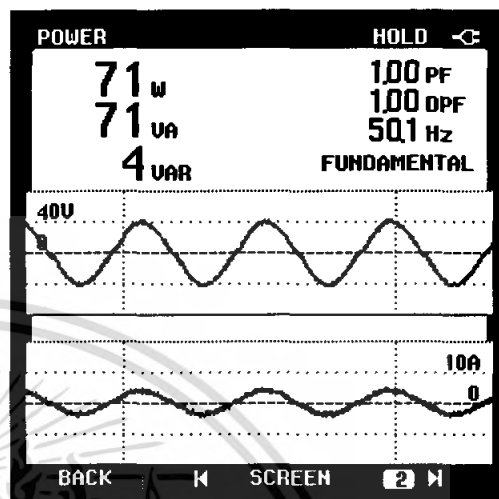
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทดสอบการจ่ายภาระที่ 80 W เปรียบเทียบระหว่าง 1 โมดูล, 2 โมดูล และ 3 โมดูล

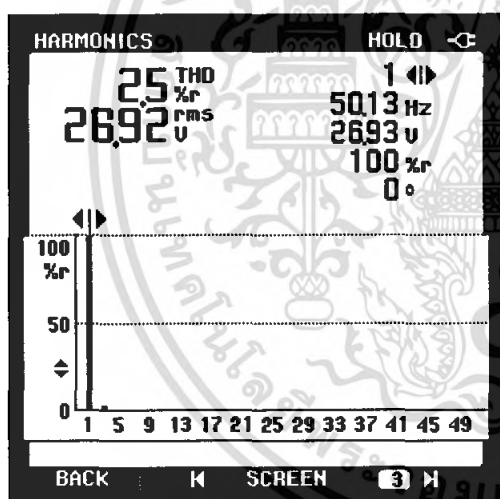
- อินเวอร์เตอร์ 1 โมดูล จ่ายโหลดที่ 80 W



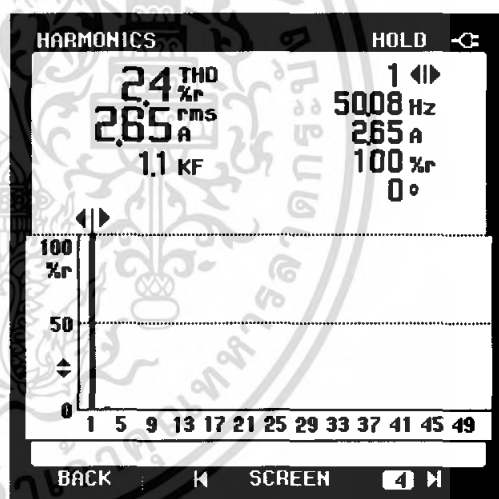
(ก)



(ข)



(ค)

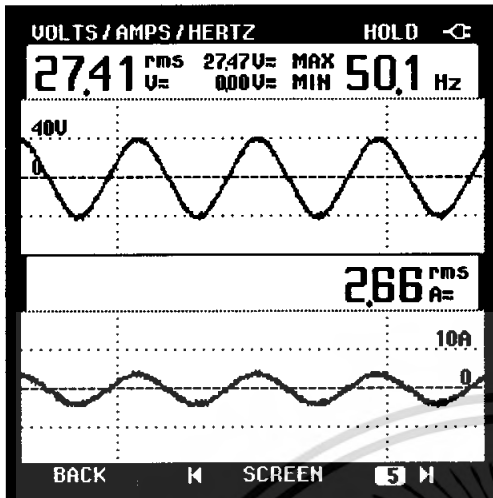


(ง)

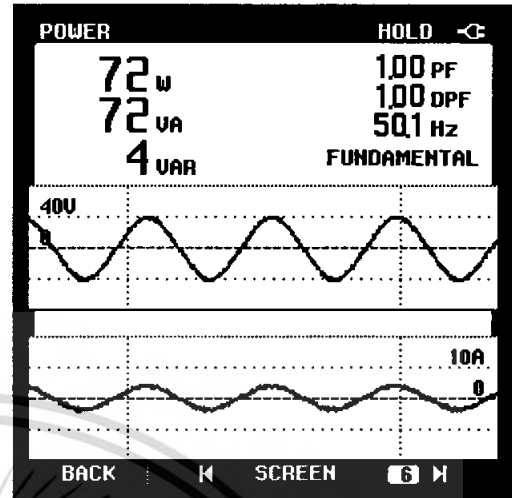
- ภาพที่ 5.2 (ก) สัญญาณแรงดันและกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์  
(ข) กำลังไฟฟ้าด้านออกอินเวอร์เตอร์  
(ค) ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์  
(ง) ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสรูปคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

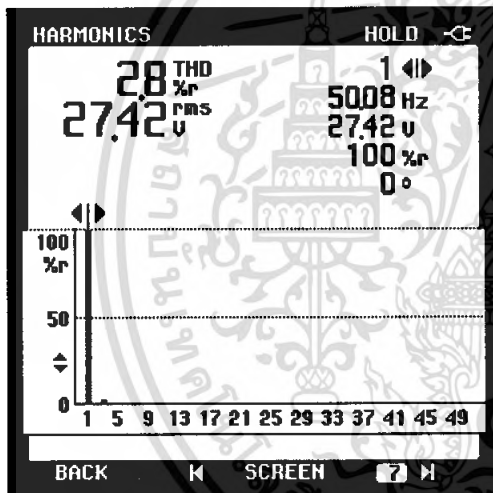
- อินเวอร์เตอร์ 2 โมดูล จ่ายโหลดที่ 80 W



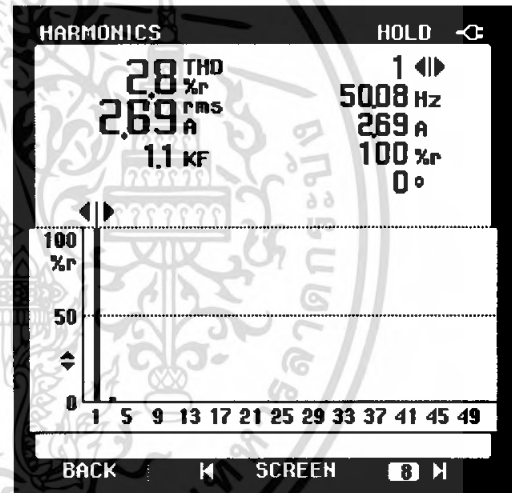
(ก)



(ข)



(ค)

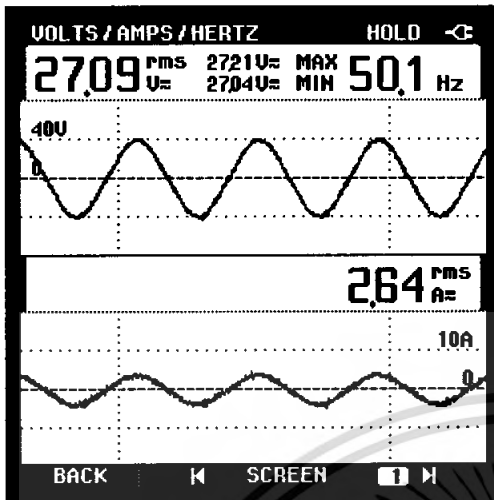


(ง)

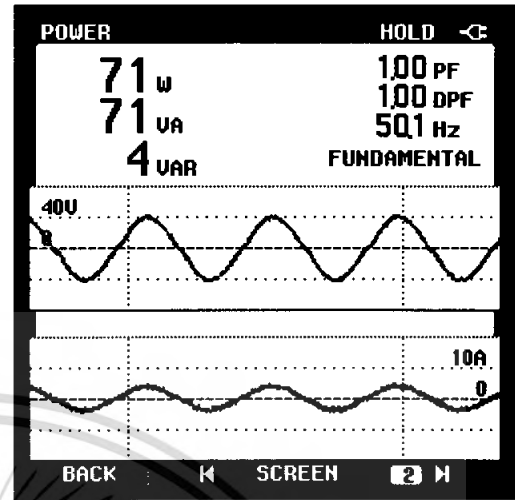
- ภาพที่ 5.3 (ก) สัญญาณแรงดันและกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์  
 (ข) กำลังไฟฟ้าด้านออกอินเวอร์เตอร์  
 (ค) ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์  
 (ง) ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสรูปคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

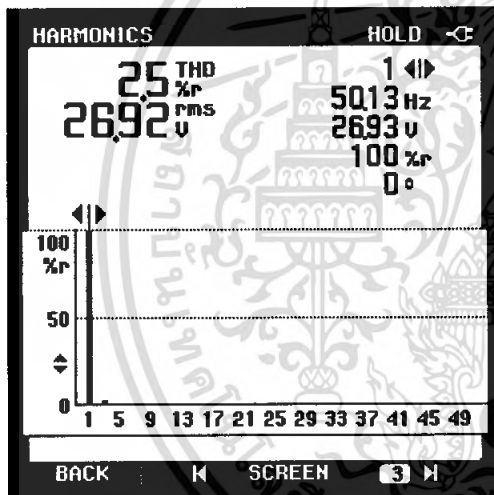
- อินเวอร์เตอร์ 3 โมดูล จ่ายโหลดที่ 80 W



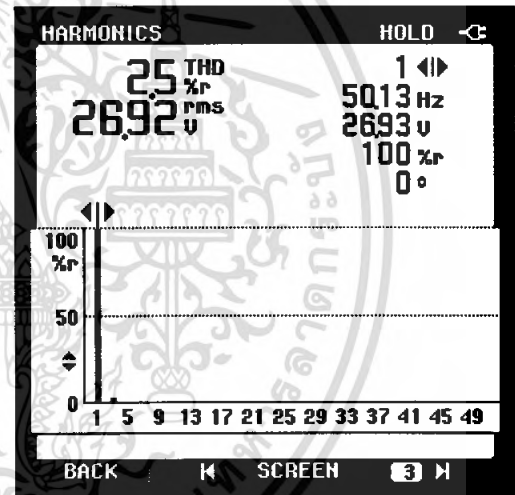
(ก)



(ข)



(ค)



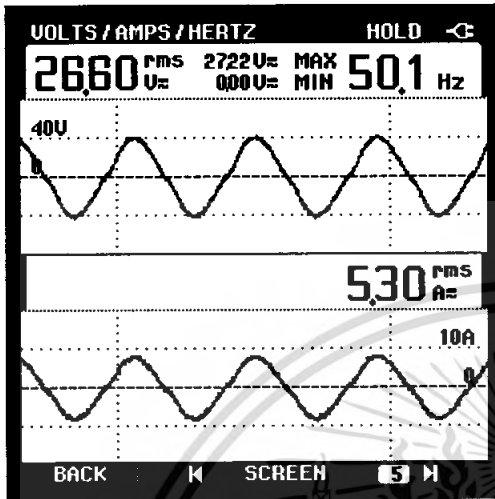
(ง)

- ภาพที่ 5.4 (ก) สัญญาณแรงดันและกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์  
 (ข) กำลังไฟฟ้าด้านออกอินเวอร์เตอร์  
 (ค) ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์  
 (ง) ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสรูปคลื่นไซน์

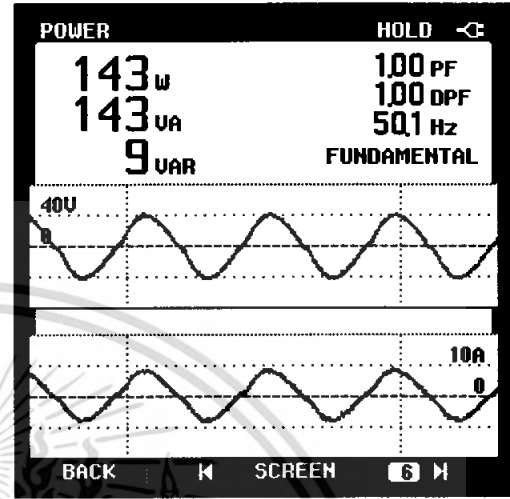
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบการจ่ายภาระที่ 160 W เปรียบเทียบระหว่าง 1 โมดูล, 2 โมดูล และ 3 โมดูล

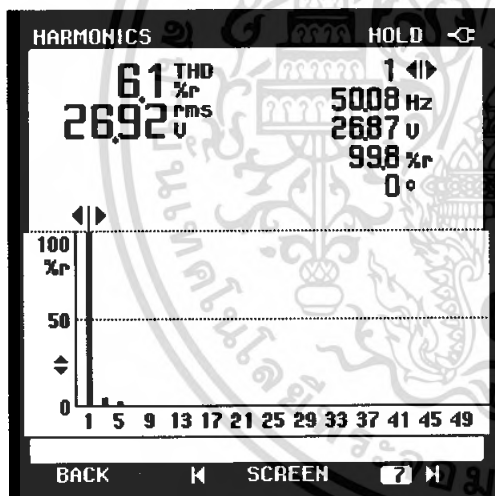
- อินเวอร์เตอร์ 1 โมดูล จ่ายโหลดที่ 160 W



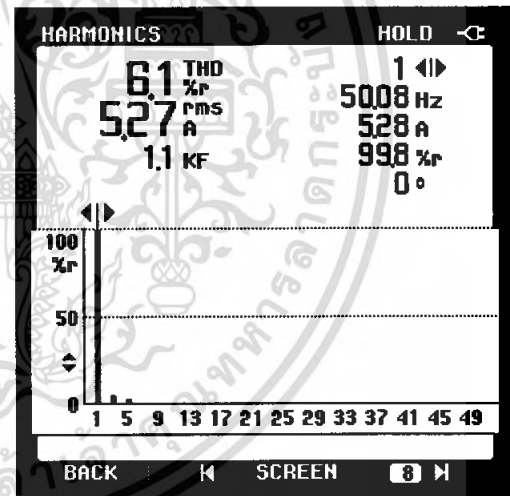
(ก)



(ข)



(ค)

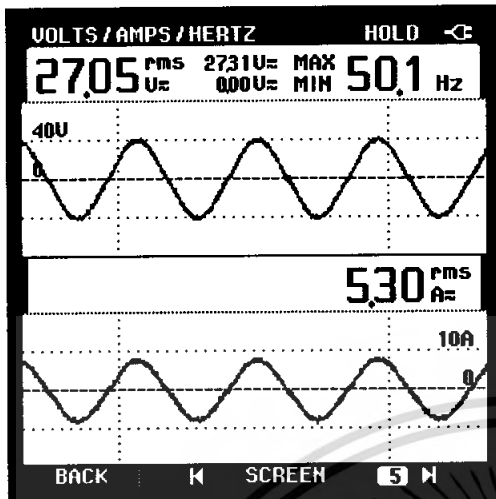


(ง)

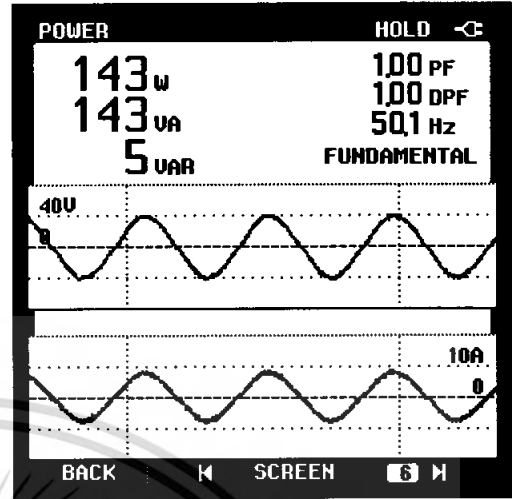
- ภาพที่ 5.5 (ก) สัญญาณแรงดันและกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์  
 (ข) กำลังไฟฟ้าด้านออกอินเวอร์เตอร์  
 (ค) ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์  
 (ง) ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสรูปคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

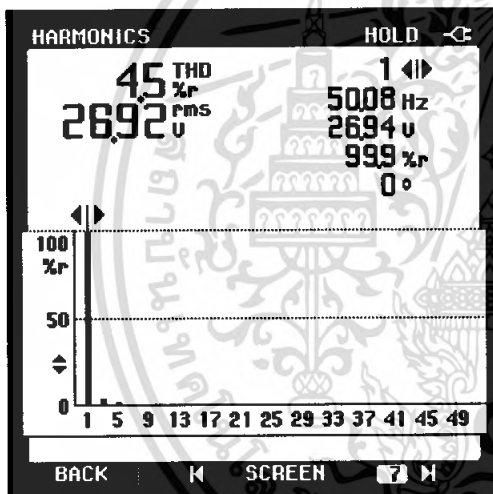
- อินเวอร์เตอร์ 2 โมเดล จ่ายโหลดที่ 160 W



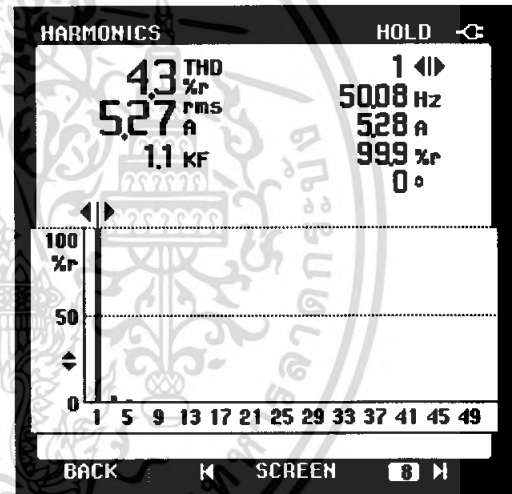
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 5.6 (ก) สัญญาณแรงดันและกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์

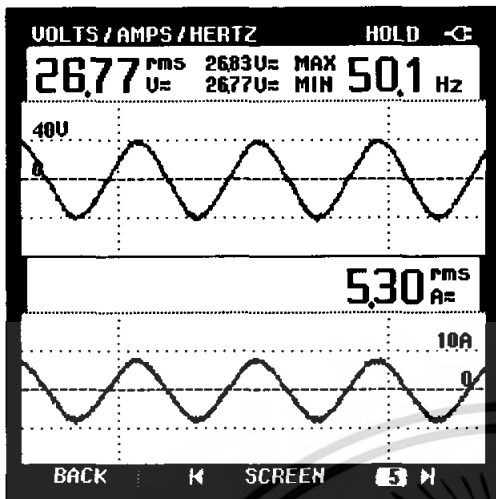
(ข) กำลังไฟฟ้าต้านออกอินเวอร์เตอร์

(ค) ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์

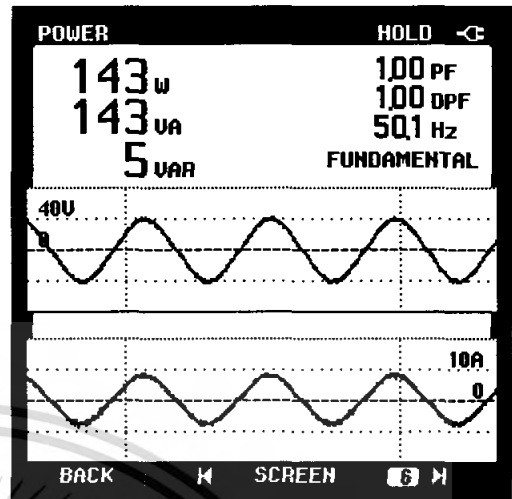
(ง) ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสรูปคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

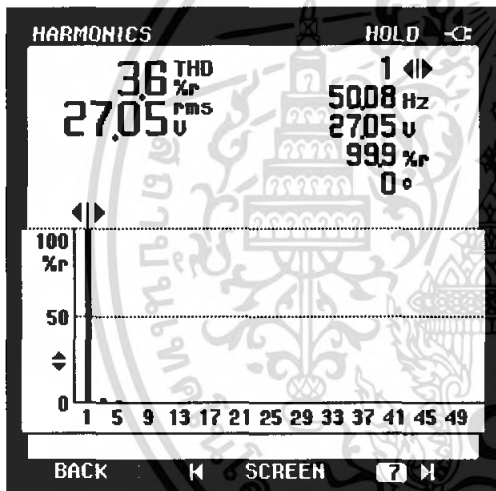
- อินเวอร์เตอร์ 3 โมดูล จ่ายโหลดที่ 160 W



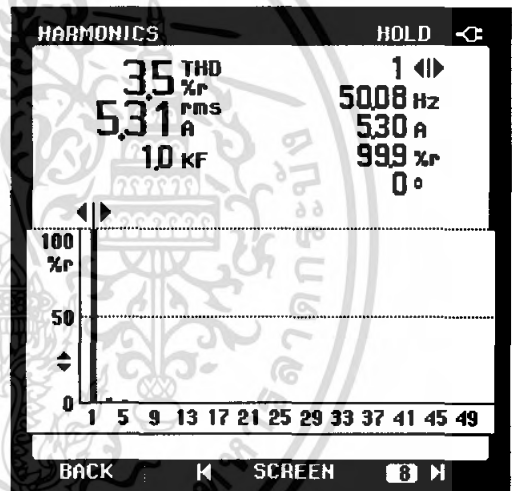
(ก)



(ข)



(ค)



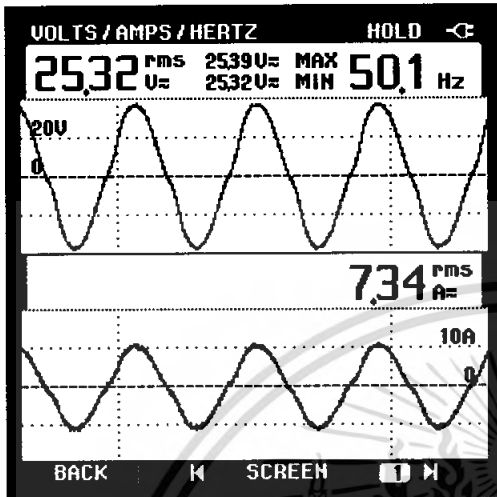
(ง)

- ภาพที่ 5.7 (ก) สัญญาณแรงดันและกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์  
 (ข) กำลังไฟฟ้าต้านออกอินเวอร์เตอร์  
 (ค) ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์  
 (ง) ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสรูปคลื่นไซน์

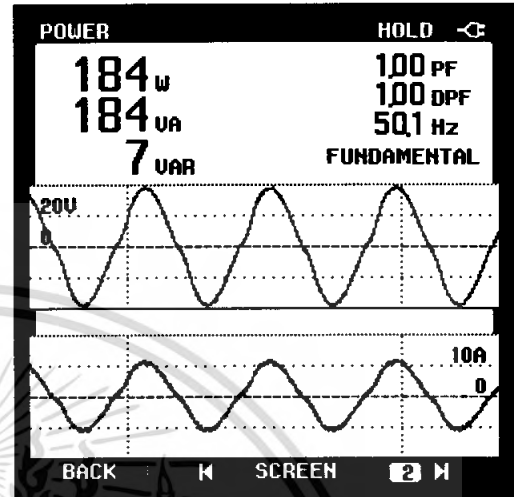
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทดสอบการจ่ายภาระที่ 240 W เปรียบเทียบระหว่าง 1 โมดูล, 2 โมดูล และ 3 โมดูล

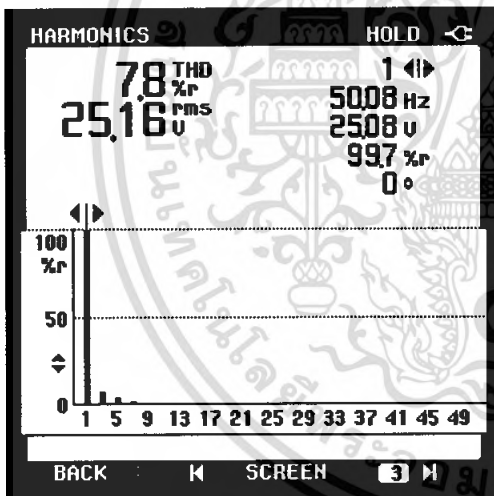
- อินเวอร์เตอร์ 1 โมดูล จ่ายโหลดที่ 240 W



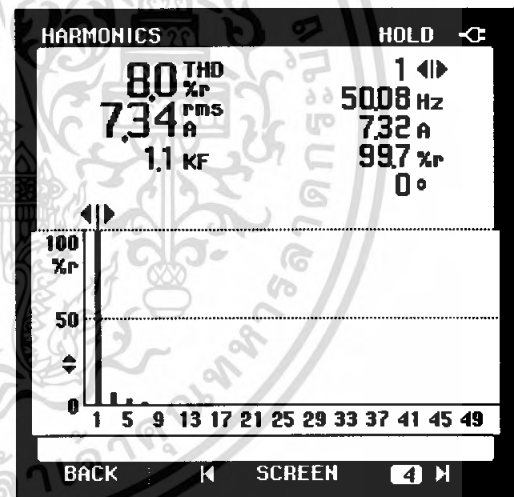
(ก)



(ข)



(ค)

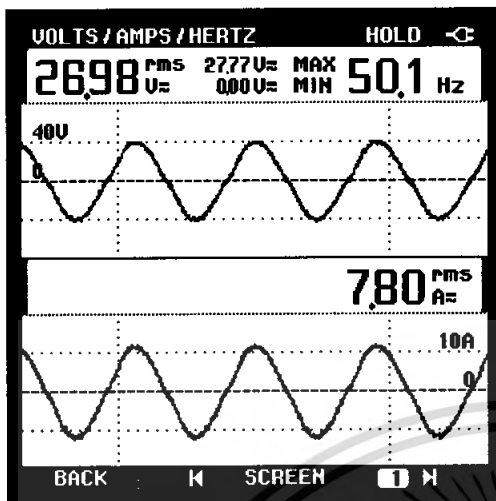


(ง)

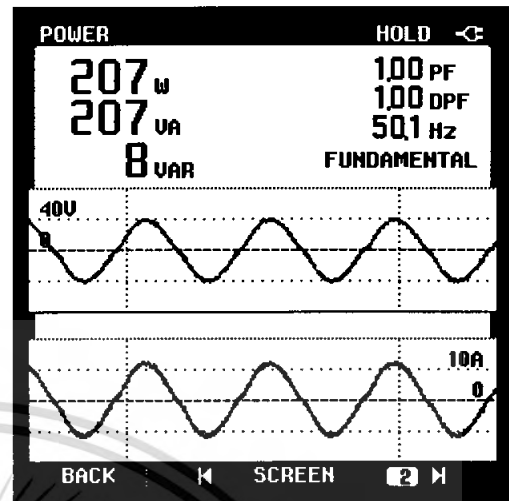
- ภาพที่ 5.8 (ก) สัญญาณแรงดันและกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์  
 (ข) กำลังไฟฟ้าด้านออกอินเวอร์เตอร์  
 (ค) ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์  
 (ง) ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสรูปคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

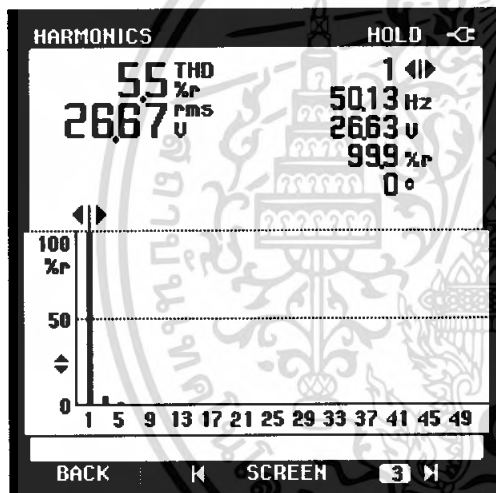
- อินเวอร์เตอร์ 2 โมเดล จ่ายโหลดที่ 240 W



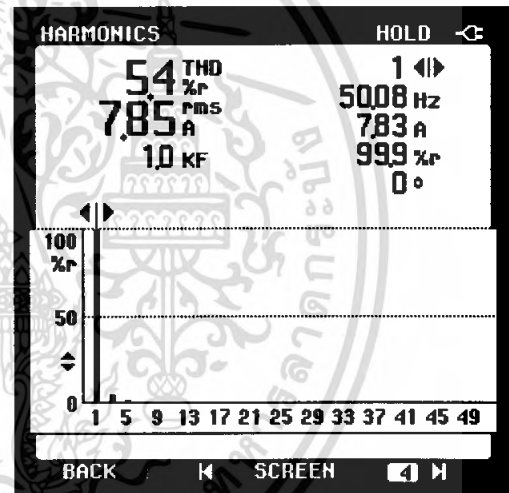
(ก)



(ข)



(ค)

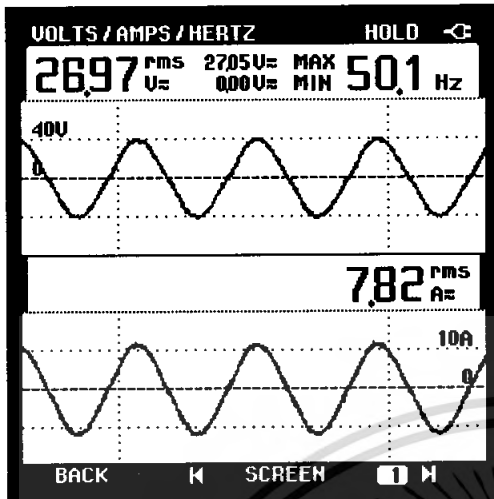


(ง)

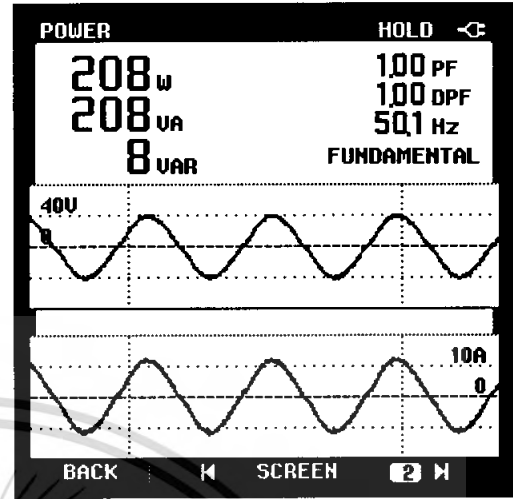
- ภาพที่ 5.9 (ก) สัญญาณแรงดันและกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์  
 (ข) กำลังไฟฟ้าด้านออกอินเวอร์เตอร์  
 (ค) ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์  
 (ง) ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสรูปคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

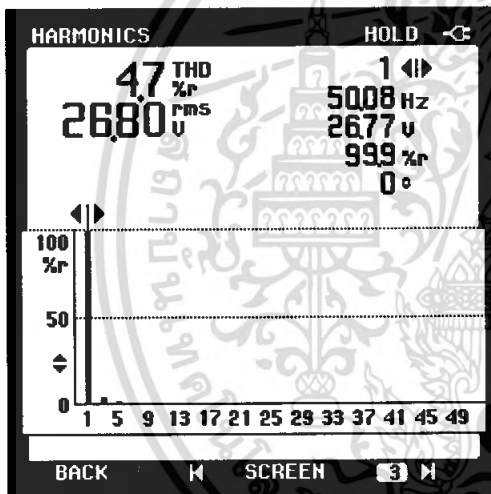
- อินเวอร์เตอร์ 3 โมดูล จ่ายโหลดที่ 240 W



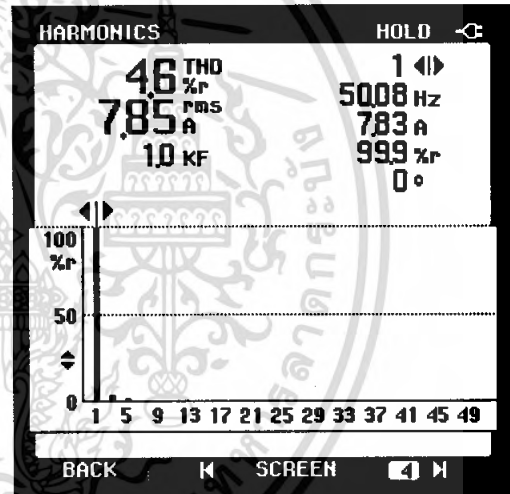
(ก)



(ข)



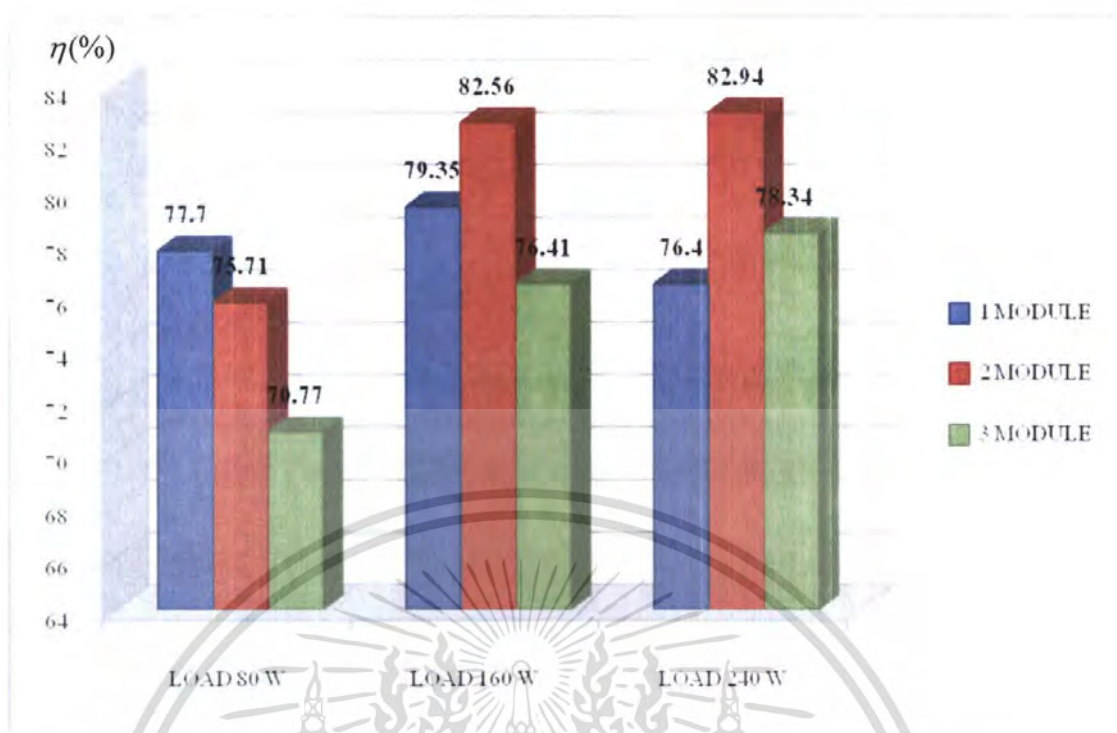
(ค)



(ง)

- ภาพที่ 5.10 (ก) สัญญาณแรงดันและกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์  
 (ข) กำลังไฟฟ้าด้านออกอินเวอร์เตอร์  
 (ค) ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์  
 (ง) ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสรูปคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ตัวเดียวและแบบขนาน

### 5.3

ในบทที่ 5 นี้แสดงถึงผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษาโดยจากการทดลองที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์แบบตัวเดียวและแบบขนาน 2 ตัว และ 3 ตัว ซึ่งจะพบว่าหากมีภาระไม่เกินพิกัดของอินเวอร์เตอร์ การทำงานด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียวจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าแบบขนาน แต่เมื่อภาระเพิ่มขึ้นจนเกินความสามารถของอินเวอร์เตอร์ตัวเดียวนั้น การขนานอินเวอร์เตอร์จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าซึ่งตรงกับสิ่งที่โครงการนี้ได้ออกแบบเงื่อนไขการทำงานนั้นไว้

## บทที่ 6

### บทวิจารณ์และสรุป

จากวัตถุประสงค์และทฤษฎีที่กล่าวมาในข้างต้น ได้ทำการศึกษา ออกแบบและสร้างระบบการขนานอินเวอร์เตอร์ซึ่งเกิดจากการนำอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส 3 โมดูล มาทำการขนานกัน เพื่อให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นและมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยอินเวอร์เตอร์แต่ละโมดูลมีพิกัดกำลังไฟฟ้า 100 W เมื่อทำการขนานกันจะทำให้ได้พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นเป็น 300 W และทำการควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จากผลการทดลองและผลการดำเนินงานของโครงการทั้งหมดสรุปได้ว่า ในส่วนของวงจรควบคุมการขนานและวงจรสร้างสัญญาณ SPWM จะใช้การเขียนโปรแกรมสร้างขึ้น ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด dsPIC เป็นตัวควบคุมการทำงาน โดยสัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปขับเกตของวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสได้จริง และในส่วนของวงจรควบคุมการขนานของอินเวอร์เตอร์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็สามารถทำงานได้ประสิทธิภาพตรงตามต้องการ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

จากผลการพิสูจน์ทั้งหมดนี้สรุปได้ว่า สามารถทำโครงการนี้ให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามเป้าหมายได้ โดยสามารถสร้างอินเวอร์เตอร์และทำการควบคุมขนานอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นและระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นได้ ซึ่งในอนาคตสามารถพัฒนาให้มีระบบมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นต่อไปได้

#### 6.1 ข้อดีของระบบการขนานอินเวอร์เตอร์

1. มีราคาต่ำกว่าอินเวอร์เตอร์ตัวเดียวที่ขนาดเดียวกัน
2. มีเสถียรภาพสูงกว่าอินเวอร์เตอร์ที่มีขนาดใหญ่เพียงตัวเดียว
3. วงจรรองรับความถี่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพกว่า
4. ง่ายต่อการซ่อมบำรุง
5. อินเวอร์เตอร์ตัวใหญ่ๆ มีข้อจำกัดด้านอุปกรณ์สวิตซ์ิ่ง
6. มีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีกว่า
7. ทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงกว่า
8. มีความยืดหยุ่นของระบบสามารถเพิ่มและลดพิกัดได้

#### 6.2 ข้อเสียของระบบการขนานอินเวอร์เตอร์

1. การควบคุมมีความซับซ้อน
2. มีโอกาสที่อุปกรณ์สวิตซ์ิ่งจะเสียหายได้ง่ายอันเนื่องมาจากกระแสไหลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 ปัญหาที่พบในการดำเนินการ

1. ข้อจำกัดบางอย่างของ program simulation ทำให้เกิดปัญหาในการ simulation
2. มีปัญหาในการทดลองซึ่งทางปฏิบัติไม่ตรงกับทางทฤษฎี
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่เป็นภาษาไทยหาได้ยาก จึงต้องศึกษาจากทฤษฎีที่ภาษาอังกฤษ
4. ขาดความเข้าใจในทฤษฎีการควบคุมแบบป้อนกลับ
5. มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในส่วนของวงจรควบคุมทำให้เกิดปัญหาในการควบคุมแบบ ป้อนกลับ (Close loop control)
6. การควบคุมแรงดันให้อิสระต่อกันในแต่ละตัวนั้นทำได้ยากเนื่องจากขีดจำกัดของไมโครคอนโทรลเลอร์ และการควบคุมที่ซับซ้อน

### 6.4 สิ่งที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไปสำหรับโครงการนี้

1. ในการออกแบบลายวงจรควรคำนึงถึง Loop area เพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้น
2. การจัดวางของวงจรควรใกล้เคียงกันให้มากที่สุด เพื่อลดระยะของสายไฟให้น้อยลงซึ่งมีผลต่อสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้น
3. ควรเพิ่มอุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัยต่างๆ ให้กับระบบ เพื่อเป็นการป้องกันในกรณีฉุกเฉิน
4. สร้างวงจรรองความถี่ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อลดสัญญาณรบกวนที่ปนออกมากับแรงดันด้านออก
5. Switching Supply สำหรับชุดขับเกดนั้นควรเลือกขนาดพิกัดให้เหมาะสมกับการใช้งานสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายตัว
6. การวัดกำลังอินพุทควรจะใช้เครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง เช่น เครื่อง PZ
7. ควรมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแยกให้ชุดอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดเพื่อเป็นแหล่งจ่ายที่อิสระต่อกัน ซึ่งจะเป็นผลดีในการปรับค่าอัตรามอดูเลชันของอินเวอร์เตอร์ในการรักษาระดับแรงดันขาออกให้คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐุ์ ขันเงิน ,วุฒิพล ชาราริธีรเศรชฐุ์ “ อิเล็กทรอนิกส์ก้ำลิ่ง(Power Electronic)” พิมพ์ครั้งที่ 1 , 2547
- [2] นคร ภัคดิชชาติ, ณัฏฐพล วงศ์สุนทรชัย, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, “คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้น ด้วยภาษา C กับ MPLAB C30”, บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด, กรุงเทพฯ, พิมพ์ครั้งที่ 1
- [3] ณัฏฐพล ว่องวสุพงศา, ประวิทย์ มาตรอ, พงศ์พันธ์ ศรีละออง, พรชัย มั่นหมาย, “การขนานอินเวอร์เตอร์แบบอัตโนมัติ” ปรินญญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549
- [4] ทองเพียร พรหมบุตร, วีรวุฒิ ดีพร้อม, สรรมย์ บัวลิ่งกา, “การต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับกริดระบบไฟฟ้า”, ปรินญญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
- [5] Tsai-Fu Wu, Yu-Kai Chen, and Yong-Heh Huang “ 3C Strategy for Inverters in Parallel Operation Achieving an Equal Current Distribution IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 47, APRIL 2000
- [6] Ai Emadi , Abdolhosein Nasiri , Storan B.Bekiarov “Uninterruptible Power Supply and Active Filter” , first edition , CRC PRESS
- [7] Hongying Wu, Dong Lin, Dehua Zhang, Kaiwei Yao, Jinfa Zhang “A Current-Mode Control Techniquewith Instantaneous Inductor-Current Feedback for UPS Inverters” IEEE Trans. On Power Electronic ,1999,pp 951-957

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ ชันเงิน , วุฒิพล ชาราธิ์เรษฐ “ **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง(Power Electronic)**” พิมพ์ครั้งที่ 1 , 2547
- [2] นคร ภักดีชาติ, ณัฐพล วงศ์สุนทรชัย, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวีไล, “**คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้น ด้วยภาษา C กับ MPLAB C30**”, บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด, กรุงเทพฯ, พิมพ์ครั้งที่ 1
- [3] ณัฐพล ว่องวสุพงศา, ประวิทย์ มาตรอ, พงศ์พันธ์ ศรีละออง, พรชัย มั่นหมาย, “**การขนานอินเวอร์เตอร์แบบอัตโนมัติ**” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549
- [4] ทองเพียร พรหมบุตร, วีรวุฒิ ดีพร้อม, สรรมย์ บัวลังกา, “**การต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับกริดระบบไฟฟ้า**”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
- [5] Tsai-Fu Wu, Yu-Kai Chen, and Yong-Heh Huang “**3C Strategy for Inverters in Parallel Operation Achieving an Equal Current Distribution** IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 47, APRIL 2000
- [6] Ai Emadi , Abdolhosein Nasiri , Storan B.Bekiarov “**Uninterruptible Power Supply and Active Filter**” , first edition , CRC PRESS
- [7] Hongying Wu, Dong Lin, Dehua Zhang, Kaiwei Yao, Jinfa Zhang “**A Current-Mode Control Techniquewith Instantaneous Inductor-Current Feedback for UPS Inverters**” IEEE Trans. On Power Electronic ,1999,pp 951-957
- [8] Duan Shanxu, Meng Yu, Xiong Jian, Kang Yong, Chen Jian “ **Parallel Operation Control Technique of Voltage Source Inverters in UPS** ” IEEE Trans. On Power Electronic , July 1999, pp.883-887

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

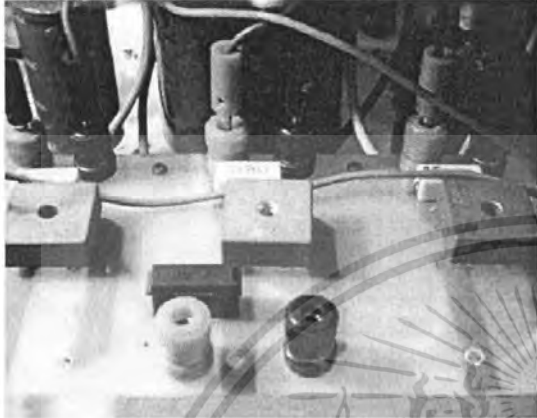
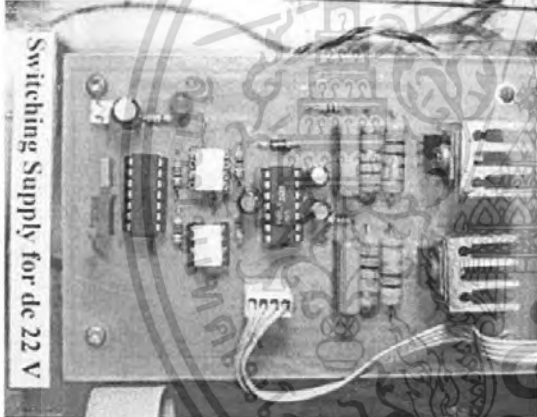
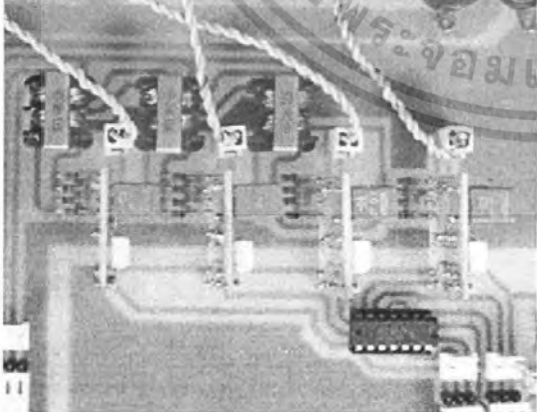
ภาคผนวก ก.

**รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ**



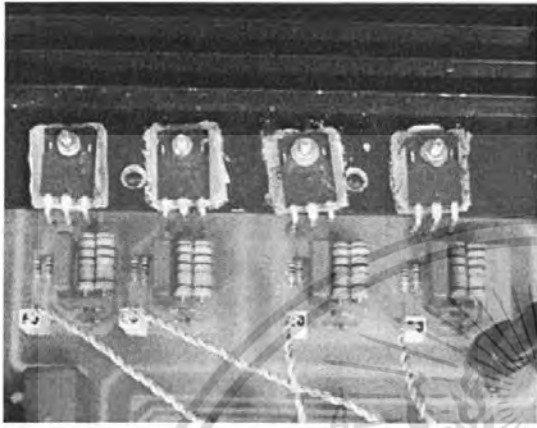

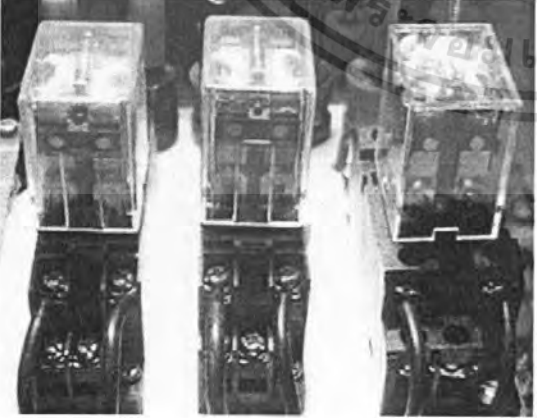
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>วงจรเรียงกระแส</p>
	<p>วงจรพุ่ม - พูล</p>
	<p>วงจรขับนำสวิตช์</p>

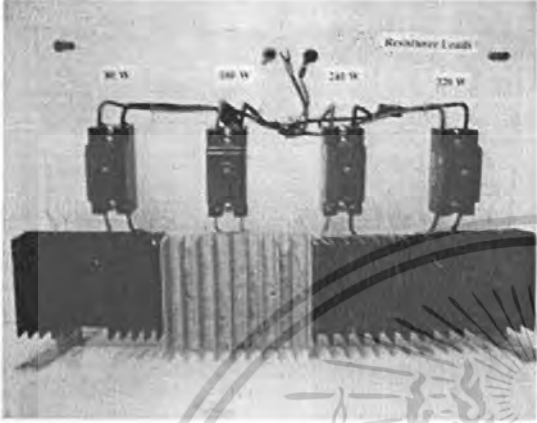
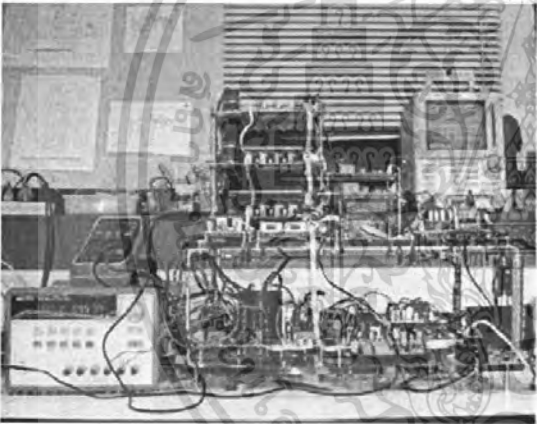

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก. (ต่อ)  
รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>วงจรถ่ายอินเวอร์เตอร์</p>
	<p>วงจรถองความถี่</p>
	<p>วงจรถอง relay ที่ใช้ในการ on/off อินเวอร์เตอร์</p>

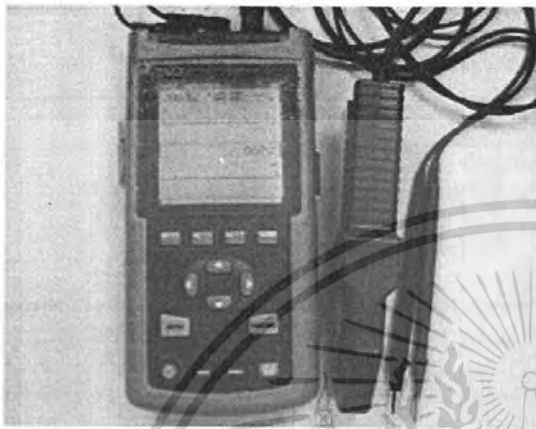
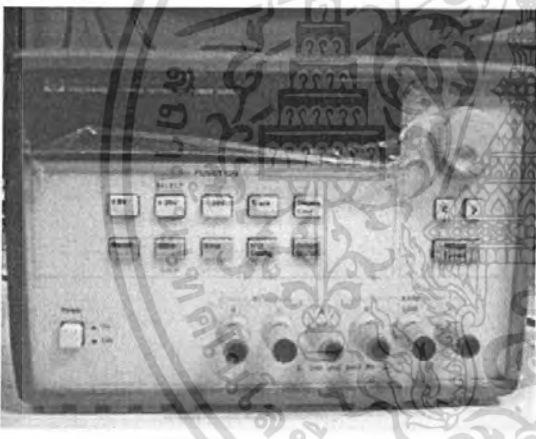
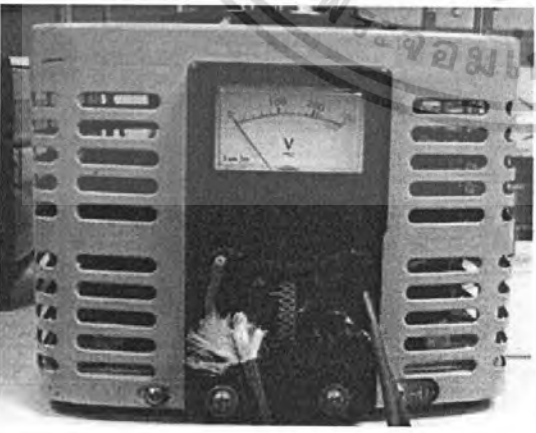
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก. (ต่อ)  
รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>ชุดโหลด R Step Change</p>
	<p>ชุดโครงงานการขนานอินเวอร์เตอร์</p>
	<p>ดิจิตอลออสซิลโลสโคปรุ่น DL 1520 8 bit 200 Ms/s 150 YOKOGAWA</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก. (ต่อ)  
รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>FLUKE 43 Power Quality Analyzer</p>
	<p>DC Power Supply</p>
	<p>แหล่งจ่ายกระแสสลับ ปรับค่าได้</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ข.**  
**โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม dsPIC**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include<p30f4011.h> // Header file for dsPIC30F4011
#include <pwm.h>
#include<adc10.h>
#include<lcd4011.h>
#define INT PORTCbits.RC13
#define DEC PORTCbits.RC14
#define LED LATBbits.LATB5
#define INV_1 LATBbits.LATB8
#define INV_2 LATBbits.LATB7
#define INV_3 LATBbits.LATB6
#define V_offset 518
#define I_offset 518
#define V_gain 40
#define I_gain 2
#define VOLTPEAK 38.0
#define MAXHIS 20
_FBORPOR(PBOR_ON&BORV_20&PWRT_64&MCLR_EN&PWMxH_ACT_LO&PWMxL
_ACT_LO&RST_PWMPIN);
_FWDT(WDT_OFF);
_FOSC(CSW_ON_FSCM_OFF & XT_PLL16);
_FGS(CODE_PROT_OFF);
unsigned int sine_addr_p= 0;
float ma = 0.64;
unsigned int sine_n,gain;
float sine_p,i_max1_use,pdc1,pdc2,i_maxs1_use,i_maxs2_use,i_maxs3_use;
int l1,V1,v_run,count,Vr=190,er,stage, i,j,k,l,m,p,x,y,z,o,
    //, v_max1_dsp , his_v1[MAXHIS]
    v_dat1, v_max1,v_max1_dummy,v_max1_avg,v_max1_use,
    i_dat1, i_max1, i_max1_dummy, i_max1_avg,
    i_dats1,i_maxs1, i_maxs1_dummy, i_maxs1_avg,
    i_dats2,i_maxs2, i_maxs2_dummy, i_maxs2_avg,
    i_dats3,i_maxs3, i_maxs3_dummy, i_maxs3_avg;
char
v_flag = 0,

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

i_flag = 0;
static float sine_table[400]={
0,12,23,35,46,58,69,81,92,104,115,126,138,149,160,172,183,194,205,216,227,238,249,
260,271,281,292,302,313,323,334,344,354,364,374,384,394,404,413,423,432,441,450,4
60,469,477,486,495,503,511,520,528,536,544,551,559,566,574,581,588,595,601,608,61
4,621,627,633,638,644,650,655,660,665,670,675,679,683,688,692,695,699,703,706,709
,712,715,717,720,722,724,726,728,729,731,732,733,734,734,735,735,735,735,735,734,
734,733,732,731,729,728,726,724,722,720,717,715,712,709,706,703,699,695,692,688,6
83,679,675,670,665,660,655,650,644,638,633,627,621,614,608,601,595,588,581,574,56
6,559,551,544,536,528,520,511,503,495,486,477,469,460,450,441,432,423,413,404,394
,384,374,364,354,344,334,323,313,302,292,281,271,260,249,238,227,216,205,194,183,
172,160,149,138,126,115,104,92,81,69,58,46,35,23,12,0,-12,-23,-35,-46,-58,-69,-81,-92,-
104,-115,-126,-138,-149,-160,-172,-183,-194,-205,-216,-227,-238,-249,-260,-271,-281,-
292,-302,-313,-323,-334,-344,-354,-364,-374,-384,-394,-404,-413,-423,-432,-441,-450,-
460,-469,-477,-486,-495,-503,-511,-520,-528,-536,-544,-551,-559,-566,-574,-581,-588,-
595,-601,-608,-614,-621,-627,-633,-638,-644,-650,-655,-660,-665,-670,-675,-679,-683,-
688,-692,-695,-699,-703,-706,-709,-712,-715,-717,-720,-722,-724,-726,-728,-729,-731,-
732,-733,-734,-734,-735,-735,-735,-735,-735,-734,-734,-733,-732,-731,-729,-728,-726,-
724,-722,-720,-717,-715,-712,-709,-706,-703,-699,-695,-692,-688,-683,-679,-675,-670,-
665,-660,-655,-650,-644,-638,-633,-627,-621,-614,-608,-601,-595,-588,-581,-574,-566,-
559,-551,-544,-536,-528,-520,-511,-503,-495,-486,-477,-469,-460,-450,-441,-432,-423,-
413,-404,-394,-384,-374,-364,-354,-344,-334,-323,-313,-302,-292,-281,-271,-260,-249,-
238,-227,-216,-205,-194,-183,-172,-160,-149,-138,-126,-115,-104,-92,-81,-69,-58,-46,-
35,-23,-12};
void delay(unsigned int ms)
{ int i,a;
    for(i=0;i<ms;i++) { for(a=0;a<816;a++); }
}
void _ISR _FLTAInterrupt(void) {
    IFS2bits.FLTAIF = 0;
    return;
}
void display_adc_value(unsigned char addr,unsigned int val)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

char i;                // Counter for send character
lcd_command(2);       // Set origin of LCD
lcd_command(addr);    // Set address of LCD
for(i=0;i<4;i++)
{
    lcd_text(0x20);    // Send character to LCD
}
inttolcd(addr,val);   // Display integer
}

void display_title()
{
    lcd_puts(LINE1," Auto Parallel"); // Display message start at
address 00H
    lcd_puts(LINE2," Inverters ");    // Display message start at
address 40H
    lcd_delay(1000); // Delay 1 sec
}

void pwm_int()
{
    IEC2bits.PWMIE = 1; // PWM_INT_EN
    IPC9 = 0xd000 ;
    DTCON1 = (PWM_DTAPS4 & PWM_DTA6);
    FLTACON = (PWM_OVA1H_ACTIVE &
    PWM_OVA2H_ACTIVE &
    PWM_FLTA_MODE_LATCH &
    PWM_FLTA1_DIS &
    PWM_FLTA2_DIS );
    PTCON = (PWM_EN &
    PWM_OP_SCALE1 &
    PWM_IPCLK_SCALE1 &
    PWM_MOD_UPDN);
    PWMCON1 = (PWM_MOD1_COMP &
    PWM_MOD2_COMP &
    PWM_PEN1H &

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        PWM_PEN2H &
        PWM_PEN1L &
        PWM_PEN2L);
    PWMCON2= (PWM_SEVOPS1 &
        PWM_OSYNC_PWM &
        PWM_UEN);
}
void PWM()
{
    sine_p = (float)(ma*(sine_table[sine_addr_p]));
    if(sine_p<(-735)){sine_p =(-735);}
    if(sine_p>735) {sine_p=735;}
    pdc1= 735 + sine_p;
    pdc2= 735 - sine_p;
    sine_addr_p++;
    if (sine_addr_p>399) {sine_addr_p = 0;}
    return;
}
void _ISR_PWMInterrupt(void)
{
    LED=1;
    PDC1 = pdc1;
    PDC2 = pdc2;
    PWM();
    IFS2bits.PWMIF = 0;
    Calc_Param();LED=0;
}
void adc_init()
{
    ADPCFG = 0x0000;           //0000 0000 0000 0000           ; analog = 0
    ADCON1 = 0x00E6;          //0000 0000 1110 0110           ; CH
    ADCON2 = 0x0414;          //0000 0100 0001 0100           ;----"-----
    ADCON3 = 0x0505;          //0000 0101 0000 0101           ;
    ADCHS = 0x0000; //0000 0000 0000 0000           ; S&H => 0 :A
    ADCSSL = 0x00FF;          //0000 0000 1111 1111; Input Scan AN 0 1 2 3
    ADCON1bits.ADON = 1; //Start AID

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
void Calc_Param()
{
  i_dat1 = (ADCBUF0+1)-I_offset;
  i_dats1 = (ADCBUF1+1)-I_offset;
  i_dats2 = (ADCBUF2+1)-I_offset;
  i_dats3 = (ADCBUF3+1)-I_offset;
  v_dat1 = (ADCBUF4+1)-V_offset;
  if (sine_addr_p==99)count++;
if(count>=1)
{ count=0;
  i_flag = 1;
  // I1
  if(i_dats1>=i_max1)
    i_max1 = i_dats1;
    i_max1_dummy = i_max1;
    i_max1 = 0;
  // I2
  if(i_dats2>=i_max2)
    i_max2 = i_dats2;
    i_max2_dummy = i_max2;
    i_max2 = 0;
  // I3
  if(i_dats3>=i_max3)
    i_max3 = i_dats3;
    i_max3_dummy = i_max3;
    i_max3 = 0;

  // I total
  if(i_dat1>=i_max1)
    i_max1 = i_dat1;
    i_max1_dummy = i_max1;
    i_max1 = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// V total
if(v_dat1>=v_max1)
    v_max1 = v_dat1;
    v_max1_dummy = v_max1;
    v_max1 = 0;
}
}
void display_complete()
{
    lcd_puts(LINE1," Inverters ");lcd_puts(LINE2," complete
");//lcd_delay(1000);
}
void display_In1_fail()
{
    lcd_puts(LINE1," Fail : 1 ");lcd_puts(LINE2," Inverter : 1
");//lcd_delay(1000);
}
void display_In2_fail()
{
    lcd_puts(LINE1," Fail : 1 ");lcd_puts(LINE2," Inverter : 2
");//lcd_delay(1000);
}
void display_In3_fail()
{
    lcd_puts(LINE1," Fail : 1 ");lcd_puts(LINE2," Inverter : 3
");//lcd_delay(1000);
}
void display_In23_fail()
{
    lcd_puts(LINE1," Fail : 2 ");lcd_puts(LINE2," Inverter : 2,3
");//lcd_delay(1000);
}
void display_In13_fail()
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        lcd_puts(LINE1," Fail : 2 ");lcd_puts(LINE2," Inverter : 1,3
");//lcd_delay(1000);
    }
void display_In12_fail()
{
    lcd_puts(LINE1," Fail : 2 ");lcd_puts(LINE2," Inverter : 1,2
");//lcd_delay(1000);
}
void display_all_fail()
{
    lcd_puts(LINE1," all fail ");lcd_puts(LINE2," Inverters ");//lcd_delay(1000);
}
void display_No_input()
{
    lcd_puts(LINE1," No Volt Input!");lcd_puts(LINE2,"or inverter
fail");//lcd_delay(1000);
}
void display_Overlaod()
{
    lcd_puts(LINE1," OVER LOAD !");//lcd_puts(LINE2,"or inverter
fail");//lcd_delay(1000);
}
void display_value()
{
    lcd_puts(0x80," Operating..");
    //lcd_puts(0x88,"IN_1:");
    lcd_puts(0xC0," Ma :");
    //lcd_puts(0xC8,"IN_3:");
}

int main(void)
{
    TRISBbits.TRISB5 = 0;
    TRISBbits.TRISB8 = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TRISBbits.TRISB7 = 0;
TRISBbits.TRISB6 = 0;
TRISCbits.TRISC13 = 1;
TRISCbits.TRISC14 = 1;
PTCONbits.PTCKPS = 0;
pwm_int();
PTPER = 735;
lcd_init();
adc_init();
display_title();

//INV_1=1;INV_2=1;INV_3=1;//delay(1000);
while(1){
    if(!INT){while(!INT)m=1;lcd_clear();display_value();}
    if(p==0)
        {INV_1=1;INV_2=1;INV_3=1;}
    if(p==1)
        {INV_1=0;INV_2=0;INV_3=0;}
    if(p==2)
        {
if((I>0)&(I<21)) { INV_1=1;INV_2=0;INV_3=0; if(v_max1_use>10) x=1; else x=0; }
if((I>20)&(I<31)){ INV_1=0;INV_2=1;INV_3=0; if(v_max1_use>10) y=1; else y=0; }
if((I>30)&(I<41)){ INV_1=0;INV_2=0;INV_3=1; if(v_max1_use>10) z=1; else z=0;
lcd_clear();}

if(I>40){
if((x==1)&(y==1)&(z==1)){
if(m==0){display_complete();INV_1=1;INV_2=1;INV_3=1;} else {stage=1;p=3;}}
if((x==0)&(y==1)&(z==1)){
if(m==0){display_In1_fail();INV_1=0;INV_2=1;INV_3=1;} else {stage=2;p=3;}}

if((x==1)&(y==0)&(z==1)){
if(m==0){display_In2_fail();INV_1=1;INV_2=0;INV_3=1;} else {stage=3;p=3;}}
if((x==1)&(y==1)&(z==0)){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(m==0){display_In3_fail();INV_1=1;INV_2=1;INV_3=0;}      else {stage=4;p=3;}
if((x==1)&(y==0)&(z==0)){
if(m==0){display_In23_fail();INV_1=1;INV_2=0;INV_3=0;}    else {stage=5;p=3;}
if((x==0)&(y==1)&(z==0)){
if(m==0){display_In13_fail();INV_1=0;INV_2=1;INV_3=0;}    else {stage=6;p=3;}
if((x==0)&(y==0)&(z==1)){
if(m==0){display_In12_fail();INV_1=0;INV_2=0;INV_3=1;}    else {stage=7;p=3;}
if((x==0)&(y==0)&(z==0)){if(m==0){display_all_fail();  INV_1=0;INV_2=0;INV_3=0;}}
        }
    }
}

switch(stage)
    {case 1: { if ((i_max1_use>0)&(i_max1_use<35)){
INV_1=1;INV_2=0;INV_3=0; }
        if ((i_max1_use>35)&(i_max1_use<65)){
INV_1=1;INV_2=1;INV_3=0; }
        if ((i_max1_use>65)&(i_max1_use<86)) {
INV_1=1;INV_2=1;INV_3=1; }
        if (i_max1_use>86){ INV_1=0;INV_2=0;INV_3=0;delay(100);
i_flag = 0;
        ADCON1bits.ADON = 0;lcd_clear();display_Overlaod(); }};
break;
        case 2: { if ((i_max1_use>0)&(i_max1_use<35)){
INV_1=0;INV_2=1;INV_3=0; }
        if ((i_max1_use>35)&(i_max1_use<65)){
INV_1=0;INV_2=1;INV_3=1; }
        if (i_max1_use>65) { INV_1=0;INV_2=0;INV_3=0;delay(100);
i_flag = 0;
        ADCON1bits.ADON = 0;lcd_clear();display_Overlaod(); }};
break;
        case 3: { if ((i_max1_use>0)&(i_max1_use<35)){
INV_1=1;INV_2=0;INV_3=0; }
        if ((i_max1_use>35)&(i_max1_use<65)){
INV_1=1;INV_2=0;INV_3=1; }

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        if (i_max1_use>65) { INV_1=0;INV_2=0;INV_3=0;delay(100);
i_flag = 0;
        ADCON1bits.ADON = 0;lcd_clear();display_Overlaod(); };
break;

        case 4: { if ((i_max1_use>0)&(i_max1_use<35)){
INV_1=1;INV_2=0;INV_3=0; }
        if ((i_max1_use>35)&(i_max1_use<65)){
INV_1=1;INV_2=1;INV_3=0; }
        if (i_max1_use>65) { INV_1=0;INV_2=0;INV_3=0;delay(100);
i_flag = 0;
        ADCON1bits.ADON = 0;lcd_clear();display_Overlaod(); }; break;
        case 5: { if ((i_max1_use>0)&(i_max1_use<35)){
INV_1=1;INV_2=0;INV_3=0; } if (i_max1_use>35) {
INV_1=0;INV_2=0;INV_3=0;delay(100); i_flag = 0;
        ADCON1bits.ADON = 0;lcd_clear();display_Overlaod(); }; break;
        case 6: { if ((i_max1_use>0)&(i_max1_use<35)){
INV_1=0;INV_2=1;INV_3=0; } if (i_max1_use>35) {
INV_1=0;INV_2=0;INV_3=0;delay(100); i_flag = 0;
        ADCON1bits.ADON = 0;lcd_clear();display_Overlaod(); }; break;
        case 7: { if ((i_max1_use>0)&(i_max1_use<35)){
INV_1=0;INV_2=0;INV_3=1; } if (i_max1_use>35) {
INV_1=0;INV_2=0;INV_3=0;delay(100); i_flag = 0;
        ADCON1bits.ADON = 0;lcd_clear();display_Overlaod(); }
}

        ADCON1bits.DONE = 0;
        while (ADCON1bits.DONE==0);
        if (i_flag) {
        i_flag = 0; j++;k++;
        if(m==1){
        if(j<20){
                i_max1_avg += i_max1_dummy;
                i_maxs1_avg += i_maxs1_dummy;
                i_maxs2_avg += i_maxs2_dummy;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        i_max3_avg += i_max3_dummy;
    }
    else
    {

//l_total
    i_max1_use = i_max1_avg/20;
    i_max1_use = i_max1_use*0.55;
    i_max1_avg = 0;

//l_1
    i_maxs1_use = i_maxs1_avg/20;
    i_maxs1_use = i_maxs1_use*0.9;
    i_maxs1_avg = 0;

//l_2
    i_maxs2_use = i_maxs2_avg/20;
    i_maxs2_use = i_maxs2_use*0.9;
    i_maxs2_avg = 0;

//l_3
    i_maxs3_use = i_maxs3_avg/20;
    i_maxs3_use = i_maxs3_use*0.9;
    i_maxs3_avg = 0; j=0;
    }}
    if(k<5) {
        v_max1_avg += v_max1_dummy;
    }

    else
    {
        v_max1_use = v_max1_avg/5;
        er=Vr-v_max1_use;
        if(er>5){ma=ma+0.01;if(ma>0.98) ma=0.98;}
        if((er<=5)&(er>=1))ma=ma;
        if(er<1){ma=ma-0.01; if(ma<0.4) ma=0.4;}
        gain=ma*100;
        if(p==3)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        {display_adc_value(0xC9,gain);}
v_max1_avg = 0; k=0; l++; if(l>45)l=45;
if(l==10)
    {if(v_max1_use<10){p=1; display_No_input();} else p=2;}

    }
}

};
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ค.**  
**ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**63A, 600V, UFS Series N-Channel IGBT with Anti-Parallel Hyperfast Diodes**

The HGTG30N60C3D is a MOS gated high voltage switching device combining the best features of MOSFETs and bipolar transistors. The device has the high input impedance of a MOSFET and the low on-state conduction loss of a bipolar transistor. The much lower on-state voltage drop varies only moderately between 25°C and 150°C. The IGBT used is the development type TA49051. The diode used in anti-parallel with the IGBT is the development type TA49053.

The IGBT is ideal for many high voltage switching applications operating at moderate frequencies where low conduction losses are essential.

Formerly Developmental Type TA49014.

**Ordering Information**

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
HGTG30N60C3D	TO-247	G30N60C3D

NOTE: When ordering, use the entire part number.

**Symbol**



**Features**

- 63A, 600V at  $T_C = 25^\circ\text{C}$
- Typical Fall Time . . . . . 230ns at  $T_J = 150^\circ\text{C}$
- Short Circuit Rating
- Low Conduction Loss
- Hyperfast Anti-Parallel Diode

**Packaging**

JEDEC STYLE TO-247

E  
C  
G

**FAIRCHILD CORPORATION IGBT PRODUCT IS COVERED BY ONE OR MORE OF THE FOLLOWING U.S. PATENTS**

4,364,073	4,417,385	4,430,792	4,443,931	4,466,176	4,516,143	4,532,534	4,587,713
4,598,461	4,605,948	4,620,211	4,631,564	4,639,754	4,639,762	4,641,162	4,644,637
4,682,195	4,684,413	4,694,313	4,717,679	4,743,952	4,783,690	4,794,432	4,801,986
4,803,533	4,809,045	4,809,047	4,810,665	4,823,176	4,837,606	4,860,080	4,883,767
4,888,627	4,890,143	4,901,127	4,904,609	4,933,740	4,963,951	4,969,027	

## HGTG30N60C3D

### Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^\circ\text{C}$ , Unless Otherwise Specified

	HGTG30N60C3D	UNITS
Collector to Emitter Voltage	600	V
Collector Current Continuous		
At $T_C = 25^\circ\text{C}$	63	A
At $T_C = 110^\circ\text{C}$	30	A
Average Diode Forward Current at $110^\circ\text{C}$	25	A
Collector Current Pulsed (Note 1)	252	A
Gate to Emitter Voltage Continuous	$\pm 20$	V
Gate to Emitter Voltage Pulsed	$\pm 30$	V
Switching Safe Operating Area at $T_J = 150^\circ\text{C}$	60A at 600V	
Power Dissipation Total at $T_C = 25^\circ\text{C}$	208	W
Power Dissipation Derating $T_C > 25^\circ\text{C}$	1.67	W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	-40 to 150	$^\circ\text{C}$
Maximum Lead Temperature for Soldering	260	$^\circ\text{C}$
Short Circuit Withstand Time (Note 2) at $V_{GE} = 15\text{V}$	4	$\mu\text{s}$
Short Circuit Withstand Time (Note 2) at $V_{GE} = 10\text{V}$	15	$\mu\text{s}$

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

#### NOTES:

1. Repetitive Rating: Pulse width limited by maximum junction temperature.
2.  $V_{CE(PK)} = 360\text{V}$ ,  $T_J = 125^\circ\text{C}$ ,  $R_G = 25\Omega$ .

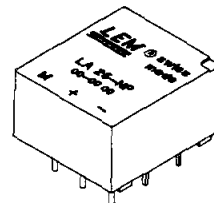
### Electrical Specifications $T_C = 25^\circ\text{C}$ , Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Collector to Emitter Breakdown Voltage	$BV_{CES}$	$I_C = 250\mu\text{A}$ , $V_{GE} = 0\text{V}$	600	-	-	V
Emitter to Collector Breakdown Voltage	$BV_{ECS}$	$I_C = 10\text{mA}$ , $V_{GE} = 0\text{V}$	15	25	-	V
Collector to Emitter Leakage Current	$I_{CES}$	$V_{CE} = BV_{CES}$ , $T_C = 25^\circ\text{C}$	-	-	250	$\mu\text{A}$
		$V_{CE} = BV_{CES}$ , $T_C = 150^\circ\text{C}$	-	-	3.0	mA
Collector to Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(SAT)}$	$I_C = I_{C110}$ , $V_{GE} = 15\text{V}$ , $T_C = 25^\circ\text{C}$	-	1.5	1.8	V
		$T_C = 150^\circ\text{C}$	-	1.7	2.0	V
Gate to Emitter Threshold Voltage	$V_{GE(TH)}$	$I_C = 250\mu\text{A}$ , $V_{CE} = V_{GE}$ , $T_C = 25^\circ\text{C}$	3.0	5.2	6.0	V
Gate to Emitter Leakage Current	$I_{GES}$	$V_{GE} = \pm 20\text{V}$	-	-	$\pm 100$	nA
Switching SOA	SSOA	$T_J = 150^\circ\text{C}$ , $V_{GE} = 15\text{V}$ , $R_G = 3\Omega$ , $L = 100\mu\text{H}$ , $V_{CE(PK)} = 480\text{V}$	200	-	-	A
		$V_{CE(PK)} = 600\text{V}$	60	-	-	A
Gate to Emitter Plateau Voltage	$V_{GEP}$	$I_C = I_{C110}$ , $V_{CE} = 0.5 BV_{CES}$	-	8.1	-	V
On-State Gate Charge	$Q_{G(ON)}$	$I_C = I_{C110}$ , $V_{CE} = 0.5 BV_{CES}$ , $V_{GE} = 15\text{V}$	-	162	180	nC
		$V_{GE} = 20\text{V}$	-	216	250	nC
Current Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$	$T_J = 150^\circ\text{C}$ , $I_{CE} = I_{C110}$ , $V_{CE(PK)} = 0.8 BV_{CES}$ , $V_{GE} = 15\text{V}$ , $R_G = 3\Omega$ , $L = 100\mu\text{H}$	-	40	-	ns
Current Rise Time	$t_r$		-	45	-	ns
Current Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$		-	320	400	ns
Current Fall Time	$t_f$		-	230	275	ns
Turn-On Energy	$E_{ON}$		-	1050	-	$\mu\text{J}$
Turn-Off Energy (Note 3)	$E_{OFF}$		-	2500	-	$\mu\text{J}$
Diode Forward Voltage	$V_{EC}$	$I_{EC} = 30\text{A}$	-	1.75	2.2	V

## Current Transducer LA 25-NP

$I_{PN} = 5-6-8-12-25 \text{ A}$

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed, mixed, with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



### Electrical data

$I_{PN}$	Primary nominal r.m.s. current	25	At
$I_P$	Primary current, measuring range	$0 \dots \pm 36$	At
$R_M$	Measuring resistance with $\pm 15 \text{ V}$	$R_{Mmin}$	$R_{Mmax}$
		@ $\pm 25 \text{ At}_{max}$	100    320 $\Omega$
		@ $\pm 36 \text{ At}_{max}$	100    190 $\Omega$
$I_{SN}$	Secondary nominal r.m.s. current	25	mA
$K_N$	Conversion ratio	1-2-3-4-5 : 1000	
$V_C$	Supply voltage ( $\pm 5 \%$ )	$\pm 15$	V
$I_C$	Current consumption	$10 + I_S$	mA
$V_d$	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn	2.5	kV
$V_b$	R.m.s. rated voltage <sup>1)</sup> , safe separation basic isolation	600	V
		1700	V

### Features

- Closed loop (compensated) multi-range current transducer using the Hall effect
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

### Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

### Accuracy - Dynamic performance data

$X$	Accuracy @ $I_{PN}, T_A = 25^\circ\text{C}$	$\pm 0.5$	%
$\epsilon_L$	Linearity	$< 0.2$	%
$I_o$	Offset current <sup>2)</sup> @ $I_P = 0, T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	Max
		$\pm 0.05$	$\pm 0.15$ mA
$I_{OM}$	Residual current <sup>3)</sup> @ $I_P = 0$ , after an overload of $3 \times I_{PN}$	$\pm 0.05$	$\pm 0.15$ mA
$I_{OT}$	Thermal drift of $I_o$	$0^\circ\text{C} \dots + 25^\circ\text{C}$	$\pm 0.06$ $\pm 0.25$ mA
		$+ 25^\circ\text{C} \dots + 70^\circ\text{C}$	$\pm 0.10$ $\pm 0.35$ mA
$t_r$	Response time <sup>4)</sup> @ 90 % of $I_{Pmax}$	$< 1$	$\mu\text{s}$
$di/dt$	$di/dt$ accurately followed	$> 50$	A/ $\mu\text{s}$
$f$	Frequency bandwidth (-1 dB)	DC .. 150	kHz

### General data

$T_A$	Ambient operating temperature	$0 \dots + 70$	$^\circ\text{C}$
$T_S$	Ambient storage temperature	$- 25 \dots + 85$	$^\circ\text{C}$
$R_P$	Primary resistance per turn @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	$< 1.25$	m $\Omega$
$R_S$	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	$\Omega$
$R_{is}$	Isolation resistance @ 500 V, $T_A = 25^\circ\text{C}$	$> 1500$	M $\Omega$
$m$	Mass	22	g
	Standards <sup>5)</sup>	EN 50178	

Notes : <sup>1)</sup> Pollution class 2

<sup>2)</sup> Measurement carried out after 15 mn functioning

<sup>3)</sup> The result of the coercive field of the magnetic circuit

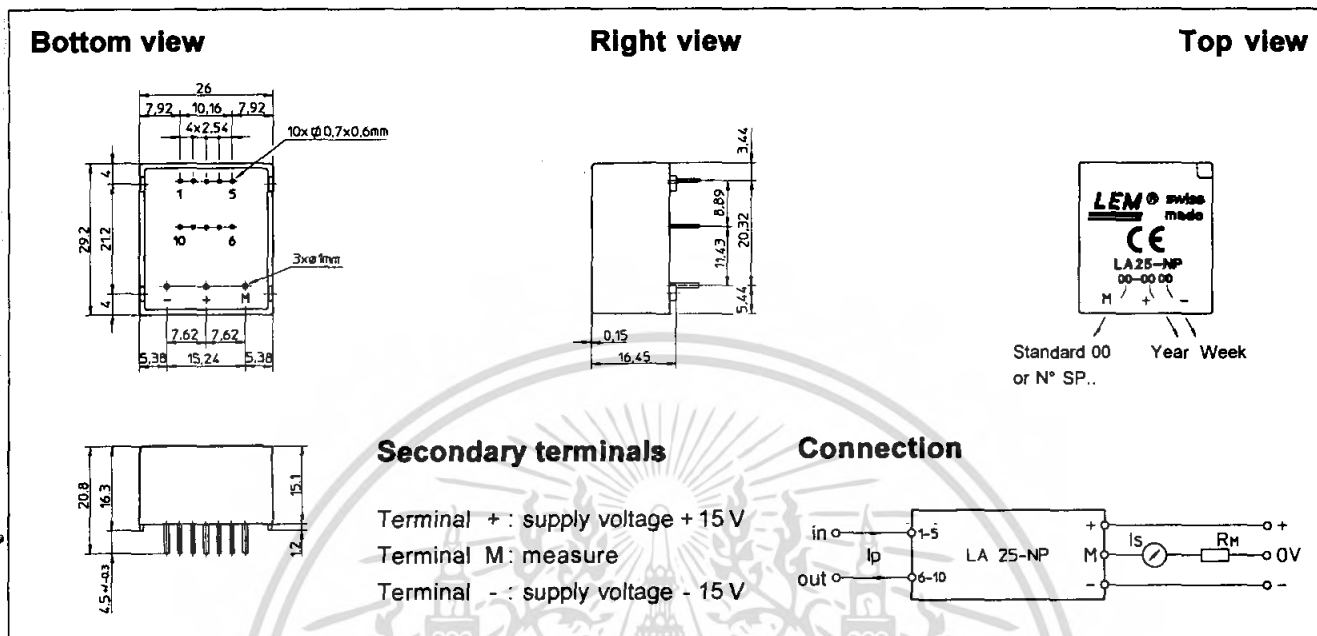
<sup>4)</sup> With a  $di/dt$  of 100 A/ $\mu\text{s}$

<sup>5)</sup> A list of corresponding tests is available

980909/8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## Dimensions LA 25-NP (in mm, 1 mm = 0.0394 inch)



Number of primary turns	Primary current		Nominal output current $I_{SN}$ [mA]	Turns ratio $K_N$	Primary resistance $R_P$ [ $m\Omega$ ]	Primary insertion inductance $L_P$ [ $\mu H$ ]	Recommended connections
	nominal $I_{PN}$ [A]	maximum $I_P$ [A]					
1	25	36	25	1/1000	0.3	0.023	IN 5 4 3 2 1 OUT 6 7 8 9 10
2	12	18	24	2/1000	1.1	0.09	IN 5 4 3 2 1 OUT 6 7 8 9 10
3	8	12	24	3/1000	2.5	0.21	IN 5 4 3 2 1 OUT 6 7 8 9 10
4	6	9	24	4/1000	4.4	0.37	IN 5 4 3 2 1 OUT 6 7 8 9 10
5	5	7	25	5/1000	6.3	0.58	IN 5 4 3 2 1 OUT 6 7 8 9 10

### Mechanical characteristics

- General tolerance  $\pm 0.2$  mm
- Fastening & connection of primary 10 pins 0.7 x 0.6 mm
- Fastening & connection of secondary 3 pins  $\varnothing 1$  mm
- Recommended PCB hole 1.2 mm

### Remarks

- $I_S$  is positive when  $I_P$  flows from terminals 1, 2, 3, 4, 5 to terminals 10, 9, 8, 7, 6
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**HIGH AND LOW SIDE DRIVER**

**Features**

- Floating channel designed for bootstrap operation Fully operational to +500V or +600V Tolerant to negative transient voltage dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible Separate logic supply range from 3.3V to 20V Logic and power ground  $\pm 5V$  offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs

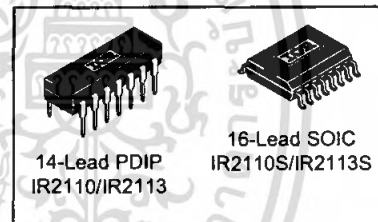
**Product Summary**

$V_{OFFSET}$ (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{O+/-}$	2A / 2A
$V_{OUT}$	10 - 20V
$t_{on/off}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

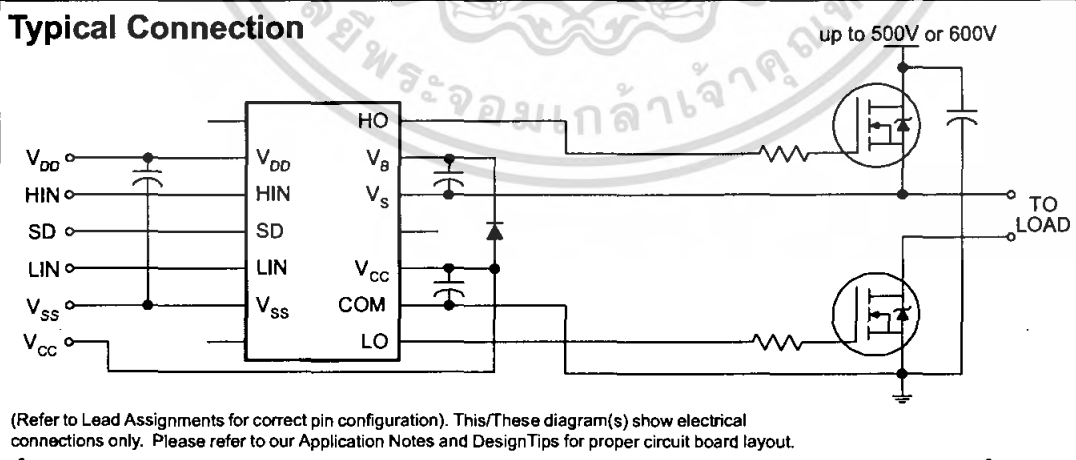
**Description**

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

**Packages**



**Typical Connection**



# IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International  
IOR Rectifier

## Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Additional information is shown in Figures 28 through 35.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units	
V <sub>B</sub>	High side floating supply voltage (IR2110)	-0.3	525	V	
	(IR2113)	-0.3	625		
V <sub>S</sub>	High side floating supply offset voltage	V <sub>B</sub> - 25	V <sub>B</sub> + 0.3		
V <sub>HO</sub>	High side floating output voltage	V <sub>S</sub> - 0.3	V <sub>B</sub> + 0.3		
V <sub>CC</sub>	Low side fixed supply voltage	-0.3	25		
V <sub>LO</sub>	Low side output voltage	-0.3	V <sub>CC</sub> + 0.3		
V <sub>DD</sub>	Logic supply voltage	-0.3	V <sub>SS</sub> + 25		
V <sub>SS</sub>	Logic supply offset voltage	V <sub>CC</sub> - 25	V <sub>CC</sub> + 0.3		
V <sub>IN</sub>	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V <sub>SS</sub> - 0.3	V <sub>DD</sub> + 0.3		
dV <sub>G</sub> /dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50		V/ns
P <sub>D</sub>	Package power dissipation @ T <sub>A</sub> ≤ +25°C	(14 lead DIP)	—	1.6	W
		(16 lead SOIC)	—	1.25	
R <sub>THJA</sub>	Thermal resistance, junction to ambient	(14 lead DIP)	—	75	°C/W
		(16 lead SOIC)	—	100	
T <sub>J</sub>	Junction temperature	—	150	°C	
T <sub>S</sub>	Storage temperature	-55	150		
T <sub>L</sub>	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300		

## Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V<sub>S</sub> and V<sub>SS</sub> offset ratings are tested with all supplies biased at 15V differential. Typical ratings at other bias conditions are shown in figures 36 and 37.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units	
V <sub>B</sub>	High side floating supply absolute voltage	V <sub>S</sub> + 10	V <sub>S</sub> + 20	V	
V <sub>S</sub>	High side floating supply offset voltage	(IR2110)	Note 1		500
		(IR2113)	Note 1		600
V <sub>HO</sub>	High side floating output voltage	V <sub>S</sub>	V <sub>B</sub>		
V <sub>CC</sub>	Low side fixed supply voltage	10	20		
V <sub>LO</sub>	Low side output voltage	0	V <sub>CC</sub>		
V <sub>DD</sub>	Logic supply voltage	V <sub>SS</sub> + 3	V <sub>SS</sub> + 20		
V <sub>SS</sub>	Logic supply offset voltage	-5 (Note 2)	5		
V <sub>IN</sub>	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V <sub>SS</sub>	V <sub>DD</sub>		
T <sub>A</sub>	Ambient temperature	-40	125	°C	

Note 1: Logic operational for V<sub>S</sub> of -4 to +500V. Logic state held for V<sub>S</sub> of -4V to -V<sub>BS</sub>. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Note 2: When V<sub>DD</sub> < 5V, the minimum V<sub>SS</sub> offset is limited to -V<sub>DD</sub>.

### Dynamic Electrical Characteristics

$V_{BIAS}$  ( $V_{CC}$ ,  $V_{BS}$ ,  $V_{DD}$ ) = 15V,  $C_L$  = 1000 pF,  $T_A$  = 25°C and  $V_{SS}$  = COM unless otherwise specified. The dynamic electrical characteristics are measured using the test circuit shown in Figure 3.

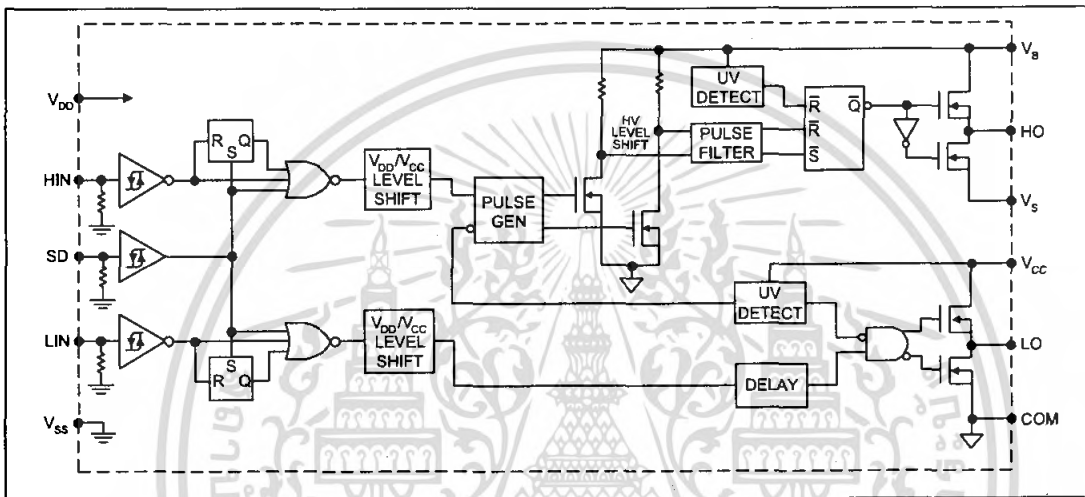
Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$t_{on}$	Turn-on propagation delay	7	—	120	150	ns	$V_S = 0V$
$t_{off}$	Turn-off propagation delay	8	—	94	125		$V_S = 500V/600V$
$t_{sd}$	Shutdown propagation delay	9	—	110	140		$V_S = 500V/600V$
$t_r$	Turn-on rise time	10	—	25	35		
$t_f$	Turn-off fall time	11	—	17	25		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	(IR2110) (IR2113)	—	—	—		10 20

### Static Electrical Characteristics

$V_{BIAS}$  ( $V_{CC}$ ,  $V_{BS}$ ,  $V_{DD}$ ) = 15V,  $T_A$  = 25°C and  $V_{SS}$  = COM unless otherwise specified. The  $V_{IN}$ ,  $V_{TH}$  and  $I_{IN}$  parameters are referenced to  $V_{SS}$  and are applicable to all three logic input leads: HIN, LIN and SD. The  $V_O$  and  $I_O$  parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{IH}$	Logic "1" input voltage	12	9.5	—	—	V	
$V_{IL}$	Logic "0" input voltage	13	—	—	6.0		
$V_{OH}$	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	14	—	—	1.2		$I_O = 0A$
$V_{OL}$	Low level output voltage, $V_O$	15	—	—	0.1		$I_O = 0A$
$I_{LK}$	Offset supply leakage current	16	—	—	50	$\mu A$	$V_B = V_S = 500V/600V$
$I_{QBS}$	Quiescent $V_{BS}$ supply current	17	—	125	230		$V_{IN} = 0V$ or $V_{DD}$
$I_{QCC}$	Quiescent $V_{CC}$ supply current	18	—	180	340		$V_{IN} = 0V$ or $V_{DD}$
$I_{QDD}$	Quiescent $V_{DD}$ supply current	19	—	15	30		$V_{IN} = 0V$ or $V_{DD}$
$I_{IN+}$	Logic "1" input bias current	20	—	20	40	V	$V_{IN} = V_{DD}$
$I_{IN-}$	Logic "0" input bias current	21	—	—	1.0		$V_{IN} = 0V$
$V_{BSUV+}$	$V_{BS}$ supply undervoltage positive going threshold	22	7.5	8.6	9.7	V	
$V_{BSUV-}$	$V_{BS}$ supply undervoltage negative going threshold	23	7.0	8.2	9.4		
$V_{CCUV+}$	$V_{CC}$ supply undervoltage positive going threshold	24	7.4	8.5	9.6		
$V_{CCUV-}$	$V_{CC}$ supply undervoltage negative going threshold	25	7.0	8.2	9.4		
$I_{O+}$	Output high short circuit pulsed current	26	2.0	2.5	—	A	$V_O = 0V$ , $V_{IN} = V_{DD}$ $PW \leq 10 \mu s$
$I_{O-}$	Output low short circuit pulsed current	27	2.0	2.5	—		$V_O = 15V$ , $V_{IN} = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$

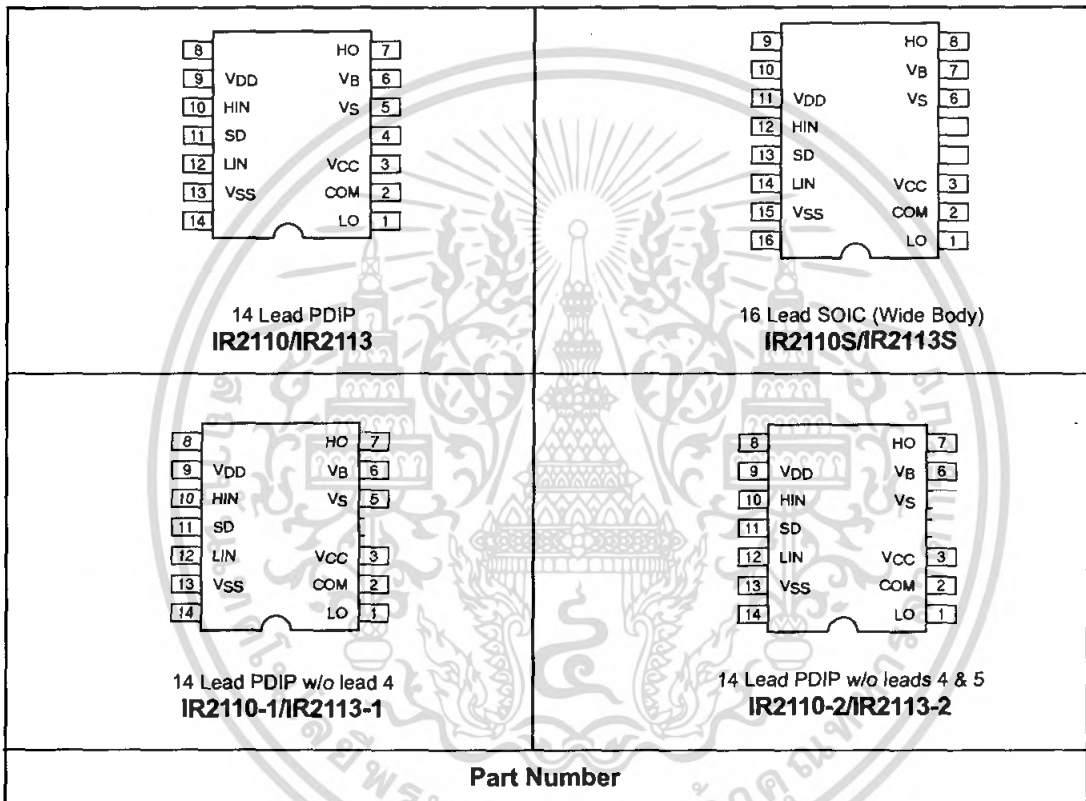
Functional Block Diagram



Lead Definitions

Symbol	Description
VDD	Logic supply
HIN	Logic input for high side gate driver output (HO), in phase
SD	Logic input for shutdown
LIN	Logic input for low side gate driver output (LO), in phase
VSS	Logic ground
VB	High side floating supply
HO	High side gate drive output
VS	High side floating supply return
VCC	Low side supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

**Lead Assignments**



# IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International  
**IR** Rectifier

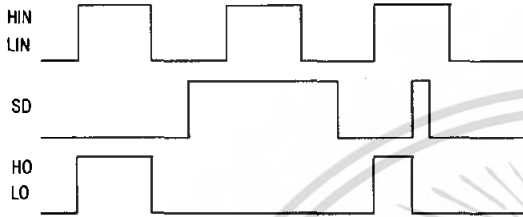


Figure 1. Input/Output Timing Diagram

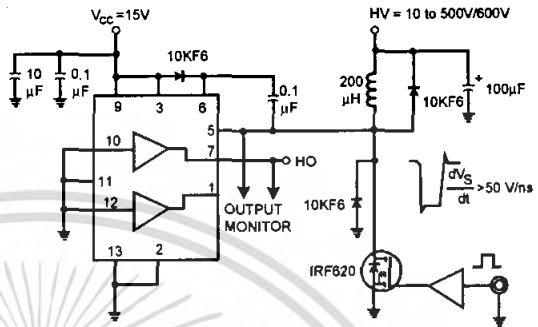


Figure 2. Floating Supply Voltage Transient Test Circuit

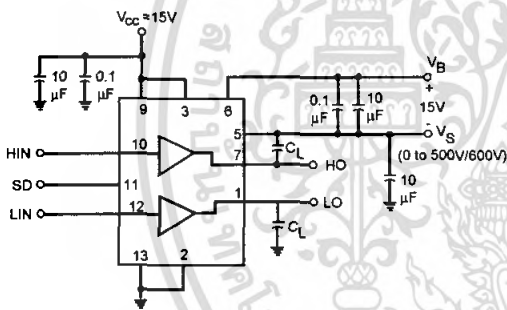


Figure 3. Switching Time Test Circuit

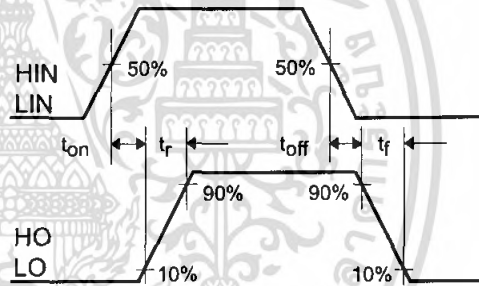


Figure 4. Switching Time Waveform Definition

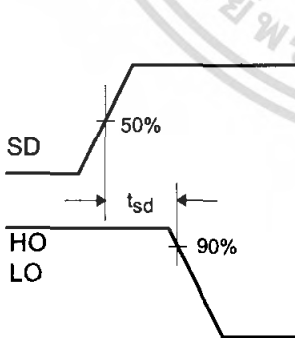


Figure 5. Shutdown Waveform Definitions

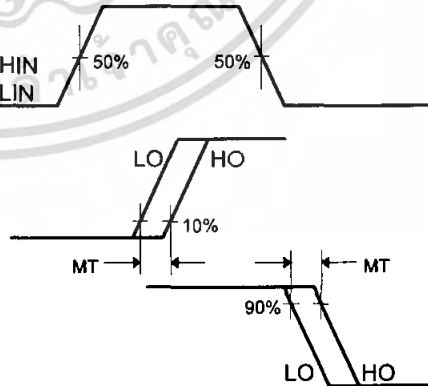


Figure 6. Delay Matching Waveform Definitions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

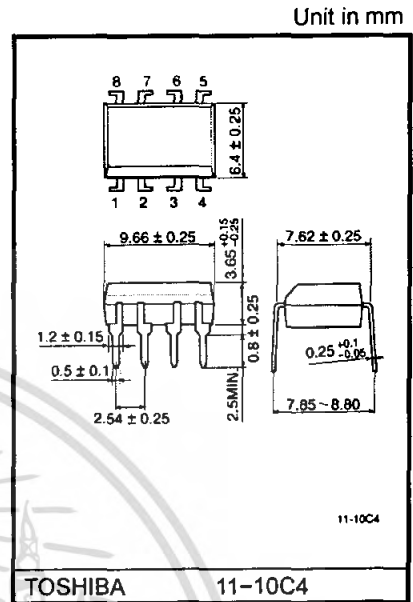
TOSHIBA Photocoupler Infrared LED + Photo IC

# TLP550

- Digital Logic Isolation
- Line Receiver Feedback Control
- Power Supply Control
- Switching Power Supply
- Transistor Inverter

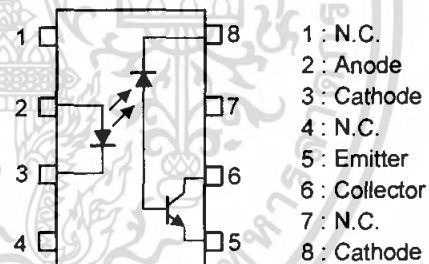
TLP550 constructs a high emitting diode and a one chip photo diode-transistor.  
 TLP550 has no base connection, and is suitable for application at noisy environmental condition.  
 This unit is 8-lead DIP package.

- Isolation voltage: 2500 Vrms (min.)
- Switching speed:  $t_{pHL}, t_{pLH} = 0.5\mu s$  (typ.) ( $R_L=1.9 k\Omega$ )
- TTL compatible
- UL recognized: UL1577, file No. E67349

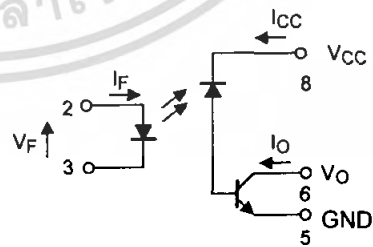


Weight: 0.54 g

### Pin Configuration (top view)



### Schematic



## Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit
LED	Forward current (Note 1)	I <sub>F</sub>	25	mA
	Pulse forward current (Note 2)	I <sub>FP</sub>	50	mA
	Peak transient forward current (Note 3)	I <sub>FPT</sub>	1	A
	Reverse voltage	V <sub>R</sub>	5	V
	Diode power dissipation (Note 4)	P <sub>D</sub>	45	mW
Detector	Output current	I <sub>O</sub>	8	mA
	Peak output current	I <sub>OP</sub>	16	mA
	Supply voltage	V <sub>CC</sub>	-0.5~15	V
	Output voltage	V <sub>O</sub>	-0.5~15	V
	Output power dissipation (Note 5)	P <sub>O</sub>	100	mW
Operating temperature range		T <sub>opr</sub>	-55~100	°C
Storage temperature range		T <sub>stg</sub>	-55~125	°C
Lead solder temperature (10s)		T <sub>sol</sub>	260	°C
Isolation voltage (AC, 1min., R.H. = 40~60%) (Note 6)		BV <sub>S</sub>	2500	V <sub>rms</sub>

(Note 1) Derate 0.8mA above 70°C.

(Note 2) 50% duty cycle, 1ms pulse width.  
Derate 1.6mA / °C above 70°C.

(Note 3) Pulse width 1μs, 300pps.

(Note 4) Derate 0.9mW / °C above 70°C.

(Note 5) Derate 2mW / °C above 70°C.

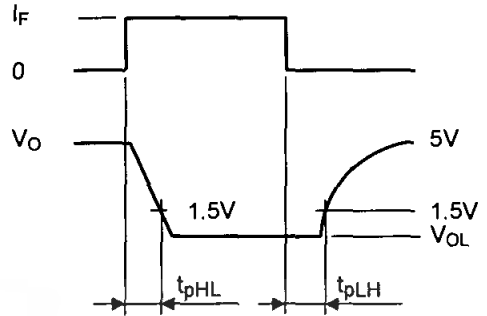
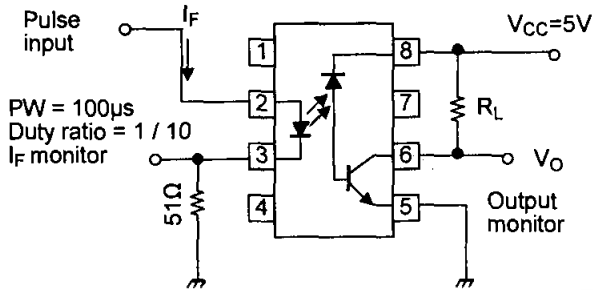
## Electrical Characteristics (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Test condition	Min.	Typ.	Max.	Unit	
LED	Forward voltage	$V_F$	$I_F = 16 \text{ mA}$	1.45	1.65	1.85	V	
	Forward voltage temperature coefficient	$\Delta V_F / \Delta T_a$	$I_F = 16 \text{ mA}$	—	-2	—	mV/°C	
	Reverse current	$I_R$	$V_R = 5 \text{ V}$	—	—	10	$\mu\text{A}$	
	Capacitance between terminal	$C_T$	$V_F = 0, f = 1 \text{ MHz}$	—	60	—	pF	
Detector	High level output current	$I_{OH(1)}$	$I_F = 0 \text{ mA}, V_{CC} = V_O = 5.5 \text{ V}$	—	3	500	nA	
		$I_{OH(2)}$	$I_F = 0 \text{ mA}, V_{CC} = V_O = 15 \text{ V}$	—	—	5	$\mu\text{A}$	
		$I_{OH}$	$I_F = 0 \text{ mA}, V_{CC} = V_O = 15 \text{ V}$ $T_a = 70^\circ\text{C}$	—	—	50	$\mu\text{A}$	
	High level supply voltage	$I_{CCH}$	$I_F = 0 \text{ mA}, V_{CC} = 15 \text{ V}$	—	0.01	1	$\mu\text{A}$	
Coupled	Current transfer ratio	$I_O / I_F$	$I_F = 16 \text{ mA}$ $V_{CC} = 4.5 \text{ V}$ $V_O = 0.4 \text{ V}$	$T_a = 25^\circ\text{C}$	10	30	—	%
				Rank : 0	19	30	—	
				$T_a = 0 \sim 70^\circ\text{C}$	5	—	—	
					Rank : 0	15	—	—
		Low level output voltage	$V_{OL}$	$I_F = 16 \text{ mA}, V_{CC} = 4.5 \text{ V}$ $I_O = 1.1 \text{ mA}$ (rank 0: $I_O = 2.4 \text{ mA}$ )	—	—	0.4	V
	Isolation resistance	$R_S$	R.H. = 40~60%, V = 1kV DC (Note 6)	—	$10^{12}$	—	$\Omega$	
	Capacitance between input to output	$C_S$	$V = 0, f = 1 \text{ MHz}$	—	0.8	—	pF	

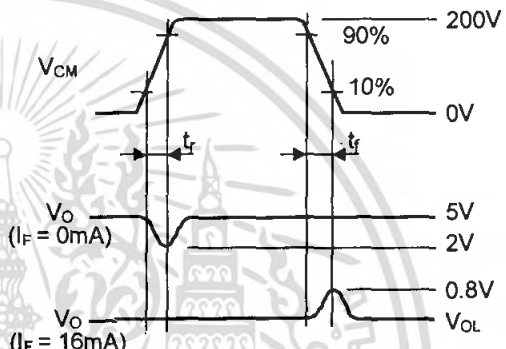
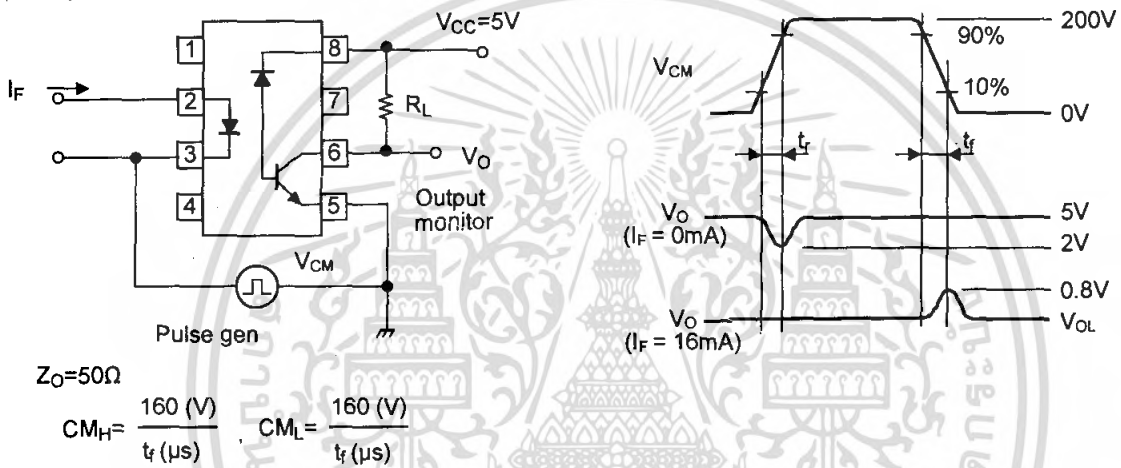
## Switching Characteristics (Ta = 25°C)

Characteristic	Symbol	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Propagation delay time (H → L)	$t_{pHL}$	$I_F = 0 \rightarrow 16 \text{ mA}, V_{CC} = 5 \text{ V}, R_L = 4.1 \text{ k}\Omega$	—	0.3	0.8	$\mu\text{s}$
		(Note 7) Rank 0: $R_L = 1.9 \text{ k}\Omega$	—	0.5	0.8	
Propagation delay time (L → H)	$t_{pLH}$	$I_F = 16 \rightarrow 0 \text{ mA}, V_{CC} = 5 \text{ V}, R_L = 4.1 \text{ k}\Omega$	—	1.0	2.0	$\mu\text{s}$
		(Note 7) Rank 0: $R_L = 1.9 \text{ k}\Omega$	—	0.6	1.2	
Common mode transient immunity at high output level	$C_{MH}$	$I_F = 0 \text{ mA}, V_{CM} = 200 \text{ V}_{p-p}$ $R_L = 4.1 \text{ k}\Omega$ (rank 0: $R_L = 1.9 \text{ k}\Omega$ ) (Note 8)	—	1500	—	V/ $\mu\text{s}$
Common mode transient immunity at low output level	$C_{ML}$	$I_F = 16 \text{ mA}, V_{CM} = 200 \text{ V}_{p-p}$ $R_L = 4.1 \text{ k}\Omega$ (rank 0: $R_L = 1.9 \text{ k}\Omega$ ) (Note 8)	—	-1500	—	V/ $\mu\text{s}$

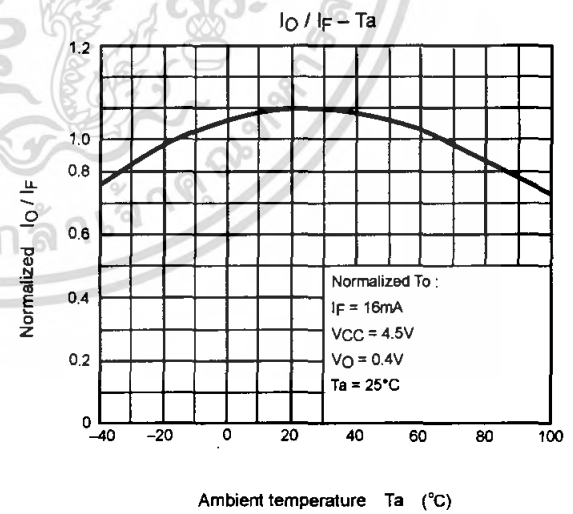
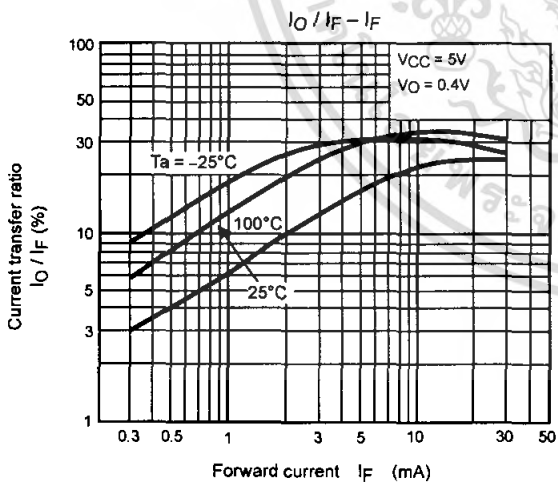
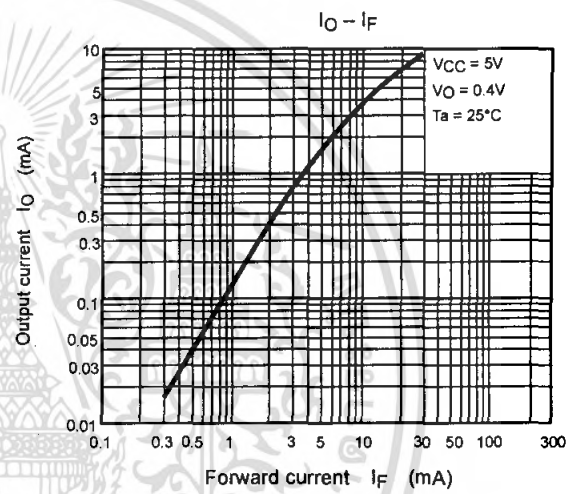
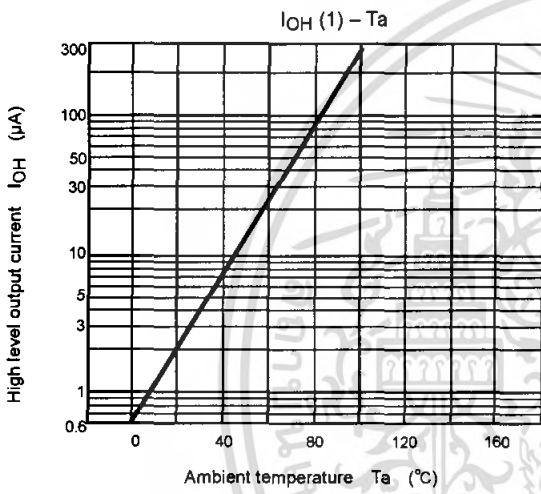
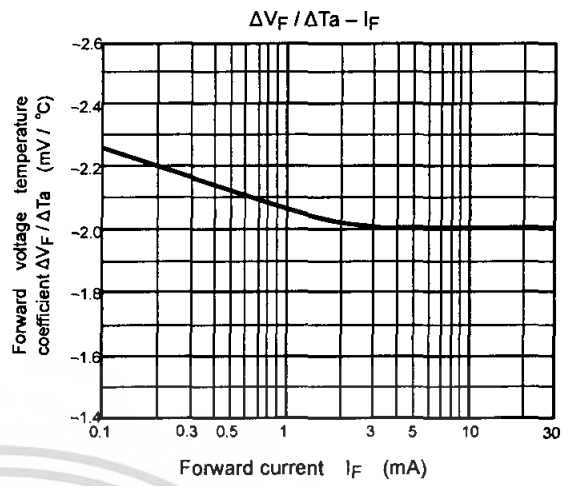
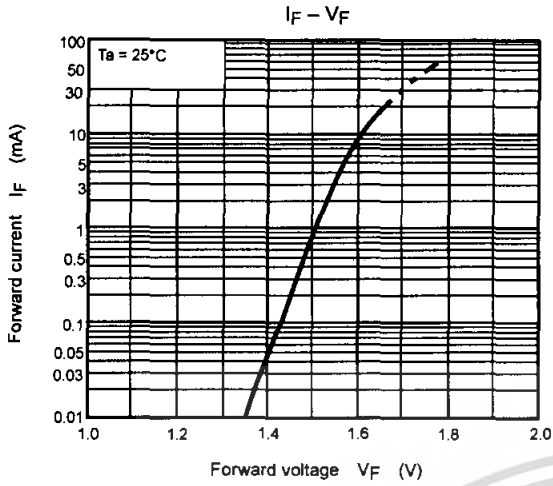
(Note 6) Device considered two-terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together and pin 5, 6, 7 and 8 shorted together.  
 (Note 7) Switching time test circuit.

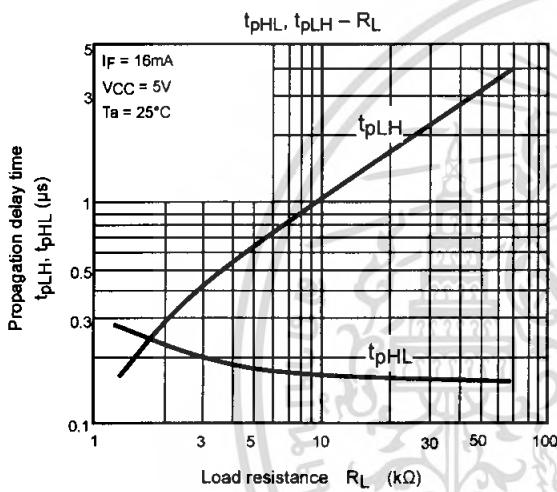
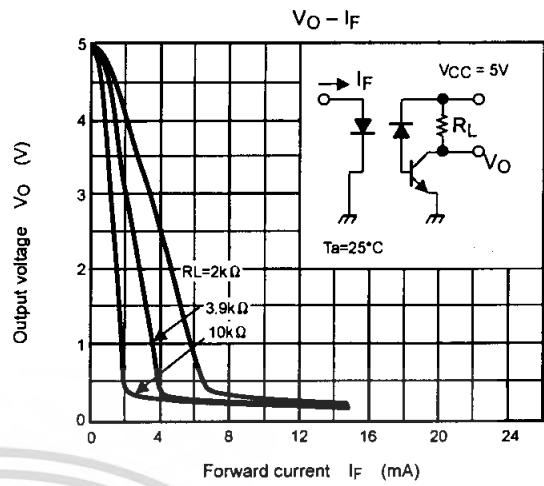
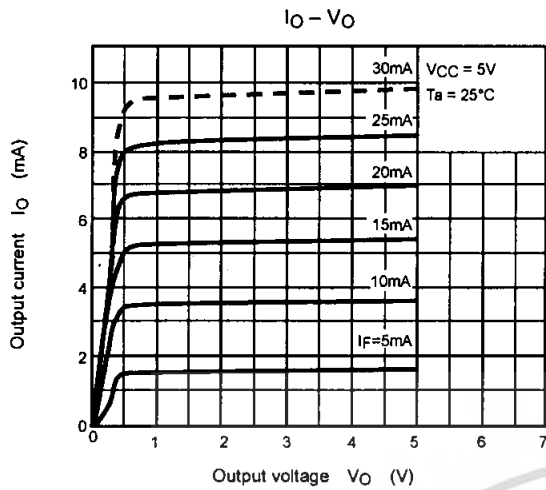


(Note 8) Common mode transient immunity test circuit.



(Note 9) Maximum electrostatic discharge voltage for any pins: 100V (C = 200pF, R = 0)





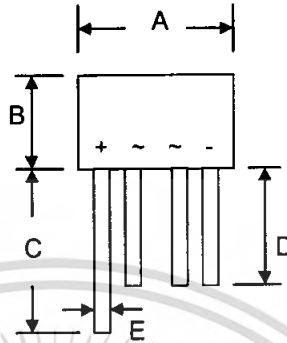
**RESTRICTIONS ON PRODUCT USE**

000707EAA

- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property. In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice

### Features

- Diffused Junction
- Low Forward Voltage Drop
- High Current Capability
- High Reliability
- High Surge Current Capability
- Ideal for Printed Circuit Boards
- UL Recognized File # E157705

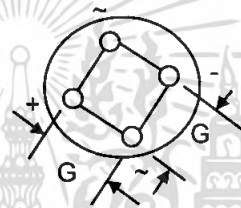


Dim	WOB	
	Min	Max
A	8.60	9.10
B	5.0	5.50
C	27.9	—
D	25.4	—
E	0.71	0.81
G	4.60	5.60

All Dimensions in mm

### Mechanical Data

- Case: Molded Plastic
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: As Marked on Body
- Weight: 1.1 grams (approx.)
- Mounting Position: Any
- Marking: Type Number



### Maximum Ratings and Electrical Characteristics @ $T_A=25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.  
For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristic	Symbol	W005M	W01M	W02M	W04M	W06M	W08M	W10M	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	VRRM								V
Working Peak Reverse Voltage	VRWM	50	100	200	400	600	800	1000	
DC Blocking Voltage	VR								
RMS Reverse Voltage	VR(RMS)	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current (Note 1)	IO				1.5				A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms Single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	IFSM				40				A
Forward Voltage (per element)	VFM				1.0				V
Peak Reverse Current	IRM				10				$\mu\text{A}$
At Rated DC Blocking Voltage					500				
Operating Temperature Range	Tj				-55 to +125				$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	TSTG				-55 to +150				$^\circ\text{C}$

Note: 1. Leads maintained at ambient temperature at a distance of 9.5mm from the case.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

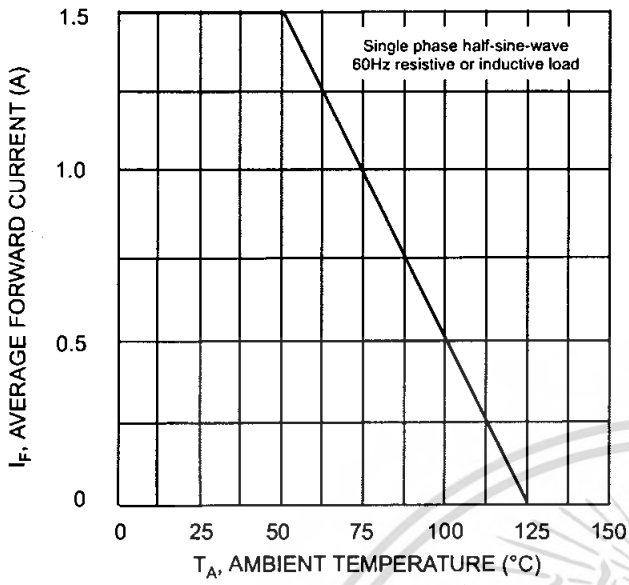


Fig. 1 Forward Current Derating Curve

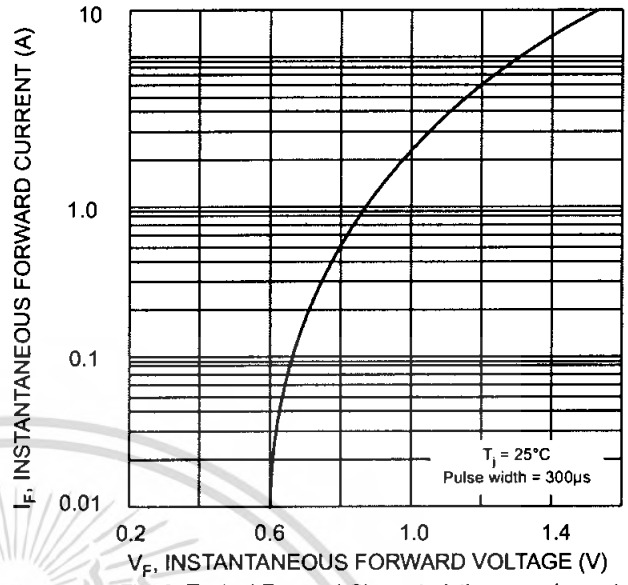


Fig. 2 Typical Forward Characteristics, per element

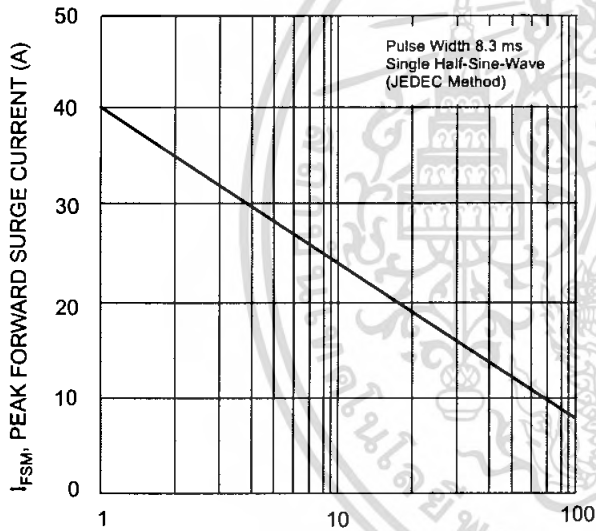


Fig. 3 Max Non-Repetitive Surge Current

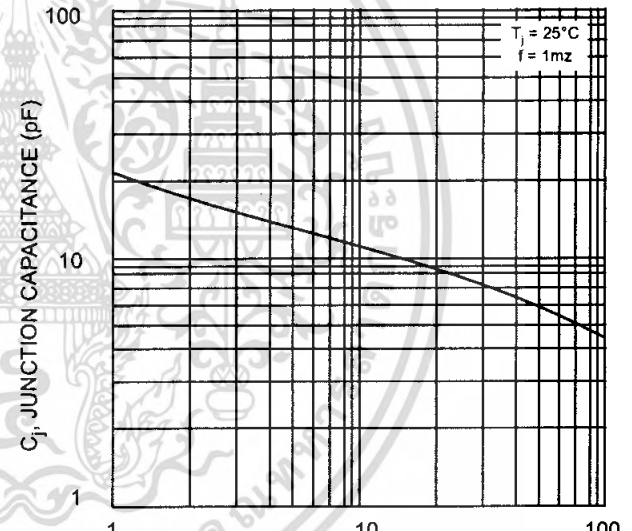


Fig. 4 Typical Junction Capacitance

## ORDERING INFORMATION

Product No.	Package Type	Shipping Quantity
W005M	Round Bridge	1000 Units/Box
W01M	Round Bridge	1000 Units/Box
W02M	Round Bridge	1000 Units/Box
W04M	Round Bridge	1000 Units/Box
W06M	Round Bridge	1000 Units/Box
W08M	Round Bridge	1000 Units/Box
W10M	Round Bridge	1000 Units/Box

Shipping quantity given is for minimum packing quantity only. For minimum order quantity, please consult the Sales Department.



Won-Top Electronics Co., Ltd (WTE) has checked all information carefully and believes it to be correct and accurate. However, WTE cannot assume any responsibility for inaccuracies. Furthermore, this information does not give the purchaser of semiconductor devices any license under patent rights to manufacturer. WTE reserves the right to change any or all information herein without further notice.

**WARNING:** DO NOT USE IN LIFE SUPPORT EQUIPMENT. WTE power semiconductor products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without the express written approval.

**Won-Top Electronics Co., Ltd.**

No. 44 Yu Kang North 3rd Road, Chine Chen Dist., Kaohsiung, Taiwan

Phone: 886-7-822-5408 or 886-7-822-5410

Fax: 886-7-822-5417

Email: sales@wontop.com

Internet: <http://www.wontop.com>

*We power your everyday.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า