

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

อินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า  
กระแสตรงแรงดันต่ำ

**A HIGH EFFICIENCY MULTILEVEL INVERTER FOR  
LOW VOLTAGE DC DISTRIBUTION**



T119557



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **119557**  
วัน,เดือน,ปี. - **8 S.ค. 2554**

b. **10361699**  
i.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ปีการศึกษา 2553**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553

อินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

กระแสตรงแรงดันต่ำ

A HIGH EFFICIENCY MULTILEVEL INVERTER FOR  
LOW VOLTAGE DC DISTRIBUTION



โดย

กรรวัช ศรีเปลี่ยนจันทร์

จิณณวัตร แซ่ใจ้ว

บดินทร วัฒนะรัตน์

พงษ์ชนิน โชติพรรณพัฒน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย

รองศาสตราจารย์ประภาส ไพรสุวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบจำหน่าย  
ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ

ผู้จัดทำ

1. กรธวัช ศรีเปลี่ยนจันทร์
2. จิณณวัตร แซ่โจ้ว
3. บดินทร วัฒนะรัตน์
4. พงษ์ชนิน โชติพรรณพัฒน์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ประภาศ ไพรสุวรรณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# อินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันต่ำ

กรรวิช ศรีเปลี่ยนจันทร์  
จิณณวัตร แซ่โจ้ว  
บดีนทร วัฒนะรัตน์  
พงษ์ธนิน โชติพรรณพัฒน์  
ผศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.ประภาส ไพรสวรรณา อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2553

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้เสนอเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูง สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ (48 โวลต์) แบบอิสระ โดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ซึ่งมีการสูญเสียต่ำเนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันที่มีความผิดเพี้ยนต่ำ จึงไม่จำเป็นต้องใช้วงจรกรองของใหญ่ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองการสร้างสัญญาณเพื่อทำการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ก่อนที่จะทำการสร้างเครื่องต้นแบบขนาด 3 (kVA) โดยจากผลการจำลองและทดลองพบว่า เครื่องต้นแบบมีประสิทธิภาพสูงให้คุณภาพของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับคุณภาพดีกว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับทั่วไป และเหมาะสมสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ

# A HIGH EFFICIENCY MULTILEVEL INVERTER FOR A LOW VOLTAGE DC DISTRIBUTION

Mr.Korntawat      Sriphanchan  
Mr.Jinnawat      Sae-ngow  
Mr.Bodin      Wattanarat  
Mr.Phongtanin      Chotipanpat  
Asst.Prof.Dr.Surin      Khomfoi      Advisor  
Assc.Prof PraPart      Prisuwana      Advisor

2010

## ABSTRACT

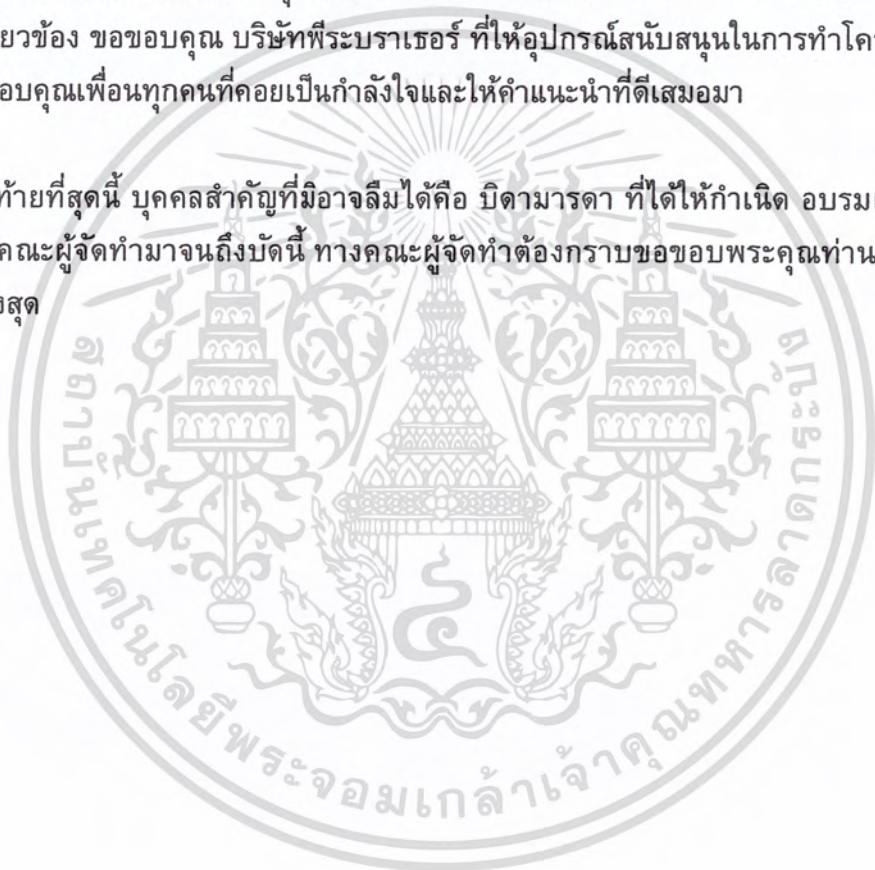
A high efficiency multilevel inverter for a low voltage DC distribution is presented in this paper. The multilevel inverter is used to interconnection between low voltage dc distribution (48V) and a load (220V<sub>ac</sub>). The multi-winding transformer multilevel inverter topology can operate high power quality waveform without filter with high efficiency. The MATLAB/Simulink program is used to simulate the operation of the proposed multilevel inverter topology. The 3 kVA prototype is developed for experimental validation. The experimental results are satisfactory and agree with simulation results. The results show that multi-winding transformer multilevel inverter can achieve high efficiency, high power quality waveform and, therefore, suitable for a low voltage dc distribution.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยของคณะผู้จัดทำสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี นั้นมาจากการได้รับการสนับสนุนด้านต่างๆ จาก รศ.ประภาส ไพรสวรรณา และ ผศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้และร่นพีปัญญาโททุกคน ที่ช่วยให้คำแนะนำให้โครงการวิจัยของคณะผู้จัดทำนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ประจำภาควิศวกรรมไฟฟ้า ที่คอยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดภายในห้องวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ขอขอบคุณ บริษัทพีระบราเธอร์ ที่ให้อุปกรณ์สนับสนุนในการทำโครงการวิจัย และขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา

ท้ายที่สุดนี้ บุคคลสำคัญที่มีอาจลิมได้คือ บิดามารดา ที่ได้ให้กำเนิด อบรมเลี้ยงดูและอุปถัมภ์คณะผู้จัดทำมาจนถึงบัดนี้ ทางคณะผู้จัดทำต้องกราบขอขอบพระคุณท่านด้วยความเคารพสูงสุด



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญรูป .....	VIII
สารบัญตาราง .....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	3
1.4 วิธีการดำเนินงาน .....	4
1.5 แผนการดำเนินงาน .....	5
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ.....	6
1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์ .....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว.....	8
2.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	9
2.3 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับประเภทต่างๆ.....	9
2.3.1 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคสแคด.....	9
2.3.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์.....	10
2.3.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วย หม้อแปลงหลายชุด.....	10
2.3.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วย ไฟฟ้ากระแสตรงสู่กระแสตรงสองทิศทาง.....	11
2.3.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง.....	12
2.3.6 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายแหล่งจ่าย.....	12
2.3.7 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด.....	13
2.4 การเลือกและเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 โครงสร้างและการทำงานของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	16
2.5.1 เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-bridge inverter).....	17
2.5.2 หม้อแปลงหลายขด (Multi-winding transformer).....	19
2.5.3 ชดเชย-ชอปเปอร์ (AC-Chopper).....	19
2.6 บทสรุป.....	23
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ.....	24
3.1 บทนำ.....	24
3.2 การออกแบบและสร้างชิ้นงานจริง.....	25
3.2.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply).....	25
3.2.2 เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-bridge inverter).....	26
3.2.3 หม้อแปลงชนิดหลายขด (Multi-winding Transformer).....	27
3.2.3.1 พิกัดของหม้อแปลงหลายขด.....	27
3.2.3.2 การออกแบบหม้อแปลงหลายขด.....	28
3.2.4 เอซี-ชอปเปอร์ (AC Chopper).....	33
3.2.5 การออกแบบวงจรขับเคลื่อน (Gate-drive).....	34
3.2.5.1 วงจรสำหรับการขับเคลื่อน (Gate-drive Circuit).....	34
3.2.5.2 วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Circuit).....	35
3.2.5.3 วงจรสัญญาณส่งจ่าย (Signal Transmission Circuit).....	35
3.2.5.4 วงจรกู้คืนสัญญาณ (Signal Recovery Circuit).....	35
3.2.5.5 วงจรขยายกระแสไฟฟ้า (Current Amplification Circuit).....	36
3.2.5.6 วงจรป้องกันไฟฟ้าดก (Under Voltage Lookout Circuit).....	36
3.2.5.7 วงจรส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Transmission Circuit).....	36
3.2.5.8 วงจรกู้คืนกำลังไฟฟ้า (Power Recovery Circuit).....	36
3.3 การออกแบบวงจรควบคุมและสัญญาณควบคุมการทำงานสวิตช์กำลัง.....	37
3.3.1 วงจรควบคุม.....	37
3.3.2 การออกแบบสัญญาณควบคุมการทำงานสวิตช์กำลัง.....	38
3.4 ขั้นตอนการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ 63 ระดับชนิดหม้อแปลง.....	40
หลายขด	
3.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดที่สมบูรณ์.....	42
3.6 บทสรุป.....	43

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง.....	44
4.1 บทนำ.....	44
4.2 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	44
4.2.1 วัตถุประสงค์การจำลอง.....	44
4.2.2 ขั้นตอนการจำลอง.....	44
4.3 ผลการทดลองแบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	48
4.3.1 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	49
4.3.2 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	49
โดยการปรับค่าดัชนีมอดดูเลต	
4.3.2.1 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	49
หลายระดับที่ดัชนีมอดดูเลต 0.84	
4.3.2.2 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	50
หลายระดับที่ดัชนีมอดดูเลต 0.88	
4.3.2.3 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	50
หลายระดับที่ดัชนีมอดดูเลต 1.00	
4.3.2.4 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	51
หลายระดับเมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด	
1 กิโลวัตต์	
4.3.2.5 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	52
หลายระดับเมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ขนาด 746 วัตต์	
ตัวประกอบกำลัง 0.8	
4.3.3 สรุปผลการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	53
4.4 การทดลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	54
4.4.1 วัตถุประสงค์.....	54
4.4.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	54
4.4.3 ผลการทดลอง.....	54
4.4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	54
4.5 การทดลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อปรับค่าดัชนีมอดดูเลต.....	56
4.5.1 วัตถุประสงค์.....	56
4.5.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	56
4.5.3 ผลการทดลอง.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	57
4.6 การทดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทาน...58	
4.6.1 วัดอุปกรณ์.....	58
4.6.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	58
4.6.3 ผลการทดลอง.....	59
4.6.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	66
4.7 การทดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์.....	67
4.7.1 วัดอุปกรณ์.....	67
4.7.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	67
4.7.3 ผลการทดลอง.....	67
4.7.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	69
4.8 บทสรุป.....	70
บทที่ 5 บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา.....	71
5.1 บทสรุป.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง.....	72
5.3 แนวทางการพัฒนา.....	73
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก. เครื่องต้นแบบที่จัดสร้างจริงในปฏิญานิพนธ์.....	76
ภาคผนวก ข. เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปฏิญานิพนธ์.....	80
ภาคผนวก ค. ลายวงจรและรายละเอียดอุปกรณ์.....	84
ภาคผนวก ง. ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในปฏิญานิพนธ์.....	94
ภาคผนวก จ. โปรแกรมที่ใช้ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	145
ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการ.....	159
ภาคผนวก ช. โปสเตอร์นำเสนอผลงาน.....	164
ประวัติผู้เขียน.....	166

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ก. วงจรฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge).....	8
ข. รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรถูกฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge).....	8
2.2 ก. วงจรฟูลบริดจ์ (Full-Bridge).....	9
ข. รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรถูกฟูลบริดจ์ (Full-Bridge).....	9
2.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (Diode-clamped).....	10
2.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ (Cascade H-bridge).....	11
2.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุด.....	11
(Cascade H-Bridge with multi-winding transformer)	
2.6 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงสู่กระแสตรง.....	12
สองทิศทาง (Cascade H-Bridge with bi-directional DC/DC converters)	
2.7 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง (Multiple-transformer).....	12
2.8 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายแหล่งจ่าย (Multiple-source).....	13
2.9 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding-transformer).....	13
2.10 โครงสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด.....	16
2.11 สัญญาณควบคุมมอสเฟตของชุดวงจรเอช-บริดจ์.....	17
2.12 การทำงานการสร้างแรงดันซีกบวก.....	18
2.13 การทำงานการสร้างแรงดันซีกลบ.....	18
2.14 วงจรเอซี-ชอปเปอร์.....	19
2.15 รูปเอซี-ชอปเปอร์จะต่ออนุกรมกันทั้งหมด 5 ชุด.....	19
2.16 รูปสัญญาณควบคุมสวิตช์ชุดเอซี-ชอปเปอร์.....	20
2.17 ลำดับการทำงานของสวิตช์กำลัง.....	22
2.17 ก. ช่วงที่ 1 .....	22
2.17 ข. ช่วงที่ 2 .....	22
2.17 ค. ช่วงที่ 3 .....	22
2.17 ง. ช่วงที่ 4.....	22
2.17 จ. ช่วงที่ 5.....	22
2.17 ฉ. ช่วงที่ 6.....	22
2.17 ช. ช่วงที่ 7.....	22
2.17 ซ. ช่วงที่ 8.....	22
3.1 รูปชิ้นงานเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	24
3.2 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 5 โวลต์.....	25

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์.....	25
3.4 วงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	26
3.5 ชี้นงานเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	26
3.6 หม้อแปลงทอรอยด์ที่ซำรุด.....	27
3.7 แกนหม้อแปลงพันผ้าพันหม้อแปลง.....	30
3.8 รูปการพันขดลวดทีละชั้น.....	30
3.9 รูปการทดสอบการทำงานของหม้อแปลงเมื่อทำการพันในแต่ละรอบ.....	31
3.10 หม้อแปลงหลายขด.....	31
3.11 ลักษณะขดลวดแต่ละขดของหม้อแปลง.....	32
3.12 ชี้นงานหม้อแปลงชนิดหลายขด (Multi-winding Transformer).....	32
3.13 วงเอซี-ชอปเปอร์ 1 เซลล์.....	33
3.14 ชี้นงานวงจรเอซี-ชอปเปอร์.....	33
3.15 บล็อกไดอะแกรมของชุดวงจรขับเคลื่อน.....	34
3.16 วงจรชุดขับเคลื่อน.....	35
3.17 รูปชี้นงานวงจรขับเคลื่อน.....	35
3.18 ก. สัญญาณที่ออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์.....	36
3.18 ข. สัญญาณที่ผ่านวงจรขับเคลื่อน.....	36
3.19 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431.....	37
3.20 รูปแสดงตัวอย่างการสร้างสัญญาณ $S_7$ .....	38
3.21 ชี้นงานวงจรควบคุมและจอแสดงผล LCD.....	39
3.22 แผนผังการทำงานของส่วนควบคุม.....	41
3.23 ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	42
3.24 การเชื่อมต่อโหลดเพื่อทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	42
4.1 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	44
4.2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับส่วนเอช-บริดจ์.....	45
4.3 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับส่วนเอซี-ชอปเปอร์.....	46
4.4 แบบจำลองการสร้างสัญญาณควบคุมส่วนเอช-บริดจ์.....	46
4.5 แบบจำลองการสร้างสัญญาณควบคุมส่วนเอซี-ชอปเปอร์.....	47
4.6 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับส่วนเอช-บริดจ์.....	48
4.7 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	48
4.8 ก. แรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ $m_i = 0.84/1.00$ .....	49

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ข. สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก $m_i = 0.84/1.00$ .....	49
4.8 ค. รูปขยายแกนตั้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก.....	49
4.9 ก. แรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ $m_i = 0.88/1.00$ .....	50
4.9 ข. สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก $m_i = 0.88/1.00$ .....	50
4.9 ค. รูปขยายแกนตั้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก.....	50
4.10 ก. แรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ $m_i = 1.00/1.00$ .....	51
4.10 ข. สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก $m_i = 1.00/1.00$ .....	51
4.10 ค. รูปขยายแกนตั้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก.....	51
4.11 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	52
เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 1 กิโลวัตต์	
4.12 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	52
เมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ขนาด 746 วัตต์	
4.13 ก. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมีอดตูล์กับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก.....	53
4.13 ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมีอดตูล์กับค่าเปอร์เซ็นต์ความ.....	53
ผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก	
4.14 รูปวงจรการทดลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับกรณีที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อเข้ากับ.....	55
ภาระทางไฟฟ้า	
4.15 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ กรณีไม่ใส่วงจรรอง.....	55
ความถี่ต่ำผ่าน	
4.16 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อใส่วงจรรอง.....	55
ความถี่ต่ำผ่าน	
4.17 รูปวงจรการทดลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อปรับค่าดัชนีมีอดตูล์.....	56
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมีอดตูล์กับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก.....	57
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมีอดตูล์กับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของ.....	57
แรงดันไฟฟ้า	
4.20 รูปวงจรการทดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้า.....	58
ชนิดความต้านทาน	
4.21 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับในขณะ.....	59
จ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	
4.22 ก. รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระ.....	60
ทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ X ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ข. สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	60
4.22 ค. รูปขยายแกนตั้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก	60
4.23 ก. รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	61
4.23 ข. สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	61
4.23 ค. รูปขยายแกนตั้งสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออก	61
4.24 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	62
4.25 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	62
4.26 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาออกของส่วนเอช-บริดจ์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	63
4.27 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วนเอช-ชอปเปอร์ เซลล์ 12 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	63
4.28 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วนเอช-ชอปเปอร์ เซลล์ 24 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	64
4.29 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วนเอช-ชอปเปอร์ เซลล์ 48 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	64
4.30 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วนเอช-ชอปเปอร์ เซลล์ 96 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	65
4.31 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วนเอช-ชอปเปอร์ เซลล์ 192 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์	65
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังไฟฟ้านอก	66
4.33 รูปวงจรการทดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์	67
4.34 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์	68
4.35 ก. รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์	68

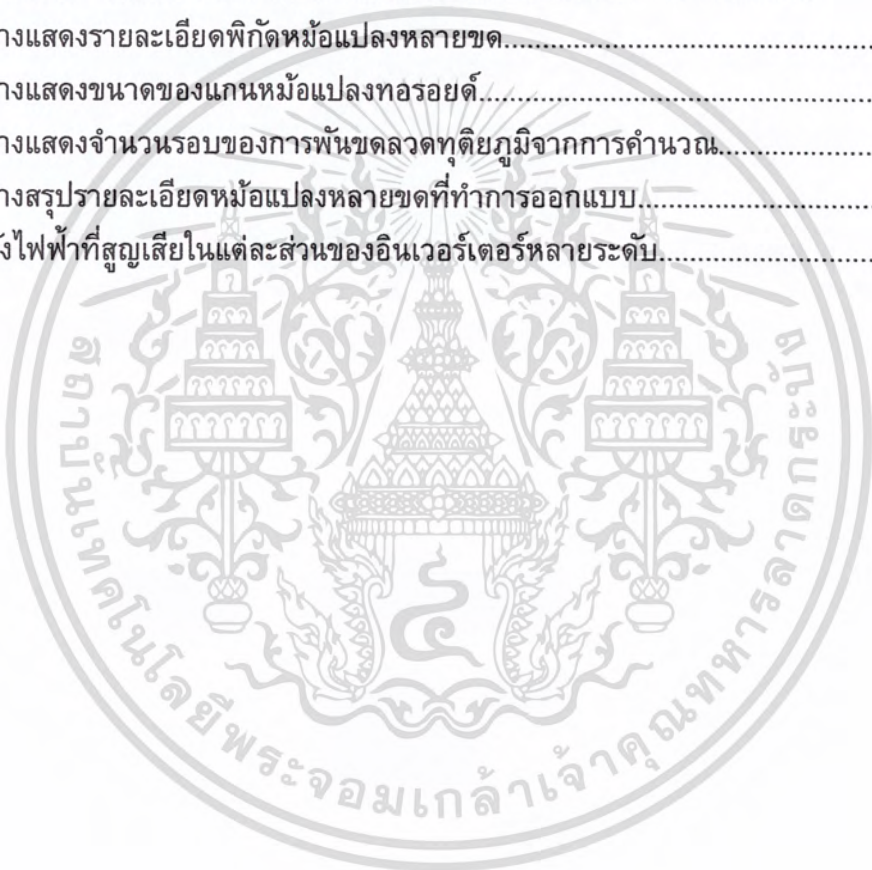
## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 ข. คลื่นสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	68
หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์	
4.35 ค. รูปขยายแกนตั้งสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก.....	68
4.36 ก. รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่าย.....	69
ภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์	
4.36 ข. คลื่นสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์.....	69
หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์	
4.36 ค. รูปขยายแกนตั้งสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออก.....	69



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนพัฒนาแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าปี พ.ศ.2551 - พ.ศ. 2554.....	1
1.2 แผนการดำเนินงาน.....	5
2.1 ตารางแสดงคุณลักษณะที่ต้องการใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง.....	14
แรงดันต่ำแบบอิสระ	
2.2 ตารางเปรียบเทียบคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับระบบ.....	14
ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำแบบอิสระ ตามโครงสร้างการทำงาน	
3.1 ตารางแสดงรายละเอียดพิกัดหม้อแปลงหลายชุด.....	27
3.2 ตารางแสดงขนาดของแกนหม้อแปลงทอรอยด์.....	28
3.3 ตารางแสดงจำนวนรอบของการพันขดลวดทุติยภูมิจากการคำนวณ.....	29
3.4 ตารางสรุปรายละเอียดหม้อแปลงหลายชุดที่ทำการออกแบบ.....	29
4.1 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแต่ละส่วนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	66



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญมากขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งในภาคอุตสาหกรรม ครุภัณฑ์ ผู้ใช้ไฟรายย่อย ระบบการสื่อสารโทรคมนาคม รวมทั้งเทคโนโลยีพลังงานทดแทนต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานคลื่นน้ำหรืออื่นๆ ซึ่งเป็นต้นกำเนิดพลังงานที่ไม่มีความแน่นอน จึงต้องอาศัยการเก็บสะสมพลังงานในรูปเซลล์ไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ เป็นต้น ทำให้สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือ โดยแหล่งกักเก็บพลังงานจะคืนพลังงานในรูปของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แต่การใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไปในปัจจุบัน จะถูกออกแบบให้ใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ จึงจำเป็นต้องใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อเป็นตัวกลางในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ด้วยเหตุนี้กำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่ง จึงเกิดการสูญเสียจากกระบวนการแปลงผันพลังงานดังกล่าว ทำให้สูญเสียพลังงานไปอย่างสิ้นเปลือง อีกทั้งอินเวอร์เตอร์ทั่วไปมีปัญหาคุณภาพของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้มีฮาร์โมนิกส์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่ได้รับผลของฮาร์โมนิกส์ ส่งผลโดยตรงต่อการทำงาน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์ และส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์ให้มีคุณภาพต่ำลง

พลังงานทดแทนและระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงในปัจจุบัน จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์ดังกล่าว ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงพลังงานที่สูญเสียไปในกระบวนการทำงานต่อผู้ใช้งานจำนวนมากที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน แล้วถือว่าเป็นพลังงานที่สูญเสียไปอย่างมหาศาล จากข้อมูลยุทธศาสตร์การพัฒนาด้านพลังงานทดแทน พ.ศ.2551- พ.ศ. 2554 กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้แสดงข้อมูลแผนพัฒนาแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าปี พ.ศ.2551- พ.ศ. 2554 (ด้วยเทคโนโลยี PV – photovoltaic และ Concentrating Solar Power; CSP) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1.1 แผนพัฒนาแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าปี พ.ศ.2551- พ.ศ. 2554

ปี พ.ศ.		2550	2551	2552	2553	2554
งบประมาณ(ล้านบาท)		193	252	214	331	416
เป้าหมาย สะสม (MW)	Off-grid	29	29	30	30	30
	On-grid	3	6	9	12	15
	รวม	32	35	39	42	45

ที่มา : ข้อมูลยุทธศาสตร์การพัฒนาด้านพลังงานทดแทน พ.ศ.2551- พ.ศ. 2554 กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้แสดงข้อมูลแผนพัฒนาแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าปี พ.ศ.2551- พ.ศ. 2554 (ด้วยเทคโนโลยี PV – photovoltaic และ Concentrating Solar Power; CSP) [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนของภาครัฐได้ให้ความสำคัญและมีแนวโน้มการใช้งานพลังงานจากแสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ ปี ข้อมูลเป้าหมายสะสมของปี พ.ศ. 2554 มีเป้าหมายสะสม 45MW เมื่ออ้างอิงจากข้อมูลนี้พบว่าประสิทธิภาพของการแปลงผันกำลังไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1% สามารถลดการสูญเสียพลังงานได้สูงถึง 450kW

ปัจจุบันมีแนวคิดการจัดการด้านพลังงานแนวใหม่ Net-Zero Energy Building (NZEBS) เป็นระบบจัดการด้านพลังงาน ที่ช่วยลดอัตราการเพิ่มของความต้องการพลังงาน ด้วยการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีแนวความคิดที่ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับพลังงานที่ทำได้และพลังงานที่เหลือยังสามารถขายคืนแก่การไฟฟ้า ซึ่งเหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand-alone) [2] และได้มีการส่งเสริมจากมติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) ในการประชุมครั้งที่ 2/2552 เรื่อง การกำหนดส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้าสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจากพลังงานหมุนเวียน กำหนดให้ ค่าไฟฟ้าจากการขายคืนต่อหน่วยที่จะได้รับจะประกอบด้วยค่าไฟฟ้าพื้นฐานประมาณ 3บาทต่อกิโลวัตต์รวมกับ ส่วนเพิ่ม(adder) จากกรมพลังงาน 8 บาทต่อกิโลวัตต์ [3],[4]

ทางคณะผู้จัดทำได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของปัญหาการสูญเสียพลังงานอย่างสิ้นเปลืองจากกระบวนการแปลงผันดังกล่าว จึงได้คิดโครงการงานวิจัยนี้ขึ้น โดยการนำเสนออินเวอร์เตอร์หลายระดับ(Multilevel Inverter) มาประยุกต์ใช้งานในระบบอิสระ (Stand alone) เพื่อใช้กับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างมีคุณภาพ โดยมีหลักการทำงาน คือ สร้างสัญญาณแรงดันขาออกด้วยการสับสวิตช์ สัญญาณแรงดันที่ได้เป็นลักษณะหลายระดับทำให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่คล้ายคลึงกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (sine wave) จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยวงจรกรอง(filter) ทำให้สามารถลดขนาดและราคาของอุปกรณ์ ด้วยเทคนิคการรวมรูปคลื่นแรงดันนี้ ทำให้ใช้สวิตช์กำลังน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบคลาสเคดทั่วไป จึงลดการสูญเสียที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทั่วไป โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับในงานวิจัยนี้ สามารถสร้างแรงดันได้มากถึง 63 ระดับ

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะเห็นได้ว่าเราสามารถนำเอาอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการสูญเสียพลังงานจากกระบวนการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั่วไปและปัญหาเรื่องคุณภาพกำลังไฟฟ้า(Power quality)ได้ ทำให้ประสิทธิภาพและคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ส่งจ่ายให้กับผู้ใช้สูงขึ้น สามารถแก้ปัญหาการสูญเสียพลังงานอย่างสิ้นเปลืองภายในวงจรกรอง และยังสามารถช่วยลดความเสี่ยงในการทำงานที่ผิดพลาด หรือความล้มเหลวของอุปกรณ์อันเนื่องมาจากปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย ซึ่งจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้สามารถทำงานและมีอายุการใช้งานที่เป็นปกติ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีความสำคัญ และมีความจำเป็นในการนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับ สำหรับการระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำซึ่งกำลังมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นให้มีประสิทธิภาพและคุณภาพกำลังไฟฟ้าสูง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาถึงลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter)
2. เพื่อพัฒนาอินเวอร์เตอร์หลายระดับเพื่อใช้ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าอิสระ (stand alone)
3. เพื่อเป็นมาตรฐานประสิทธิภาพของเครื่องอินเวอร์เตอร์ในอนาคต
4. เพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้ไปเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัย และพัฒนาเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) ให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ต่อไป
5. เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) สำหรับการใช้งานจริงต่อไป

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการวิจัยนี้เป็นการออกแบบและจัดสร้าง อินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ โดยมีโครงสร้างประกอบด้วย เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงชนิดหลายขดแรงดัน และชุดเอซี-ชอปเปอร์ ซึ่งชุดเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์จะแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ผ่านหม้อแปลงชนิดหลายขดได้แรงดันขาออกจากหม้อแปลง 5 ระดับ ส่งต่อสู่ชุดเอซี-ชอปเปอร์ที่ควบคุมด้วยสัญญาณชั้บเกิดแปลงลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ได้ และนำมารวมเป็นรูปคลื่นแรงดันหลายระดับ โดยเลือกใช้ มอสเฟต (Mofet) เป็นสวิตช์กำลัง

#### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพและการสูญเสียพลังงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีในปัจจุบัน สภาพปัญหาและผลกระทบที่เกิดจากปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า
2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) ชนิดต่าง ๆ และการพันขดลวดหม้อแปลงแกนทอรรอยด์
3. จำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink
4. จัดเตรียมเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตลอดจนศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ
5. ออกแบบ และดำเนินการสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter)
6. ทดลองเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) ที่สร้างขึ้น โดยการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า จ่ายพลังงานแก่ภาระไฟฟ้า
7. บันทึกข้อมูลจากผลการทดลอง
8. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
9. สรุปผลการทดลอง
10. รวบรวมข้อมูลการทดลอง และจัดทำรูปเล่มปริญาานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล และทำความเข้าใจในทฤษฎี ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การจัดสร้างชิ้นงาน การทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ซึ่งมีแผนการดำเนินงาน ดังนี้

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1				ภาคเรียนที่ 2			
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.
1. ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง								
2. ศึกษาวิจัยกระบวนการทำงานจำลองเปรียบเทียบการทำงานในรูปแบบต่างๆด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink								
3. รวบรวมผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล								
4. ทำการออกแบบสร้างแหล่งจ่ายและเครื่องต้นแบบเอช-บริดจ์								
5. เขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์								
6. สร้างเครื่องต้นแบบ AC-Chopper และทดสอบการเชื่อมต่อกับสัญญาณควบคุม								
7. ออกแบบและพันขดลวดหม้อแปลงทอรอยด์ เชื่อมต่ออุปกรณ์เข้าเป็นระบบ								
8. ทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับและบันทึกผล								
9. สรุปผลงานวิจัย นำเสนอโครงการ								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. โครงการวิจัยนี้จะทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter)
2. เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) ที่พัฒนาขึ้นสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีคุณภาพกำลังไฟฟ้าดีโดยไม่จำเป็นต้องใช้วงจรกรอง
3. โครงการวิจัยนี้เป็นการบูรณาการระหว่างวิทยาการทางด้านต่าง ๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบไฟฟ้ากำลัง และระบบควบคุมเข้าด้วยกัน ซึ่งย่อมก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ศึกษาค้นคว้าวิจัยในสาขาดังกล่าว
4. สร้างความเชื่อมั่นทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าและความน่าเชื่อถือให้กับระบบ ซึ่งคุณภาพกำลังไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อระบบไฟฟ้า
5. โครงการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้สามารถใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้จริงต่อไป

## 1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญาพันธ

ปฏิญญาพันธฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาสาระที่เกี่ยวข้องกับการนำเสนออินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ ซึ่งสามารถแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้

**บทที่ 1 บทนำ** ในบทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของโครงการ ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ รวมถึงวิธีการดำเนินงาน และแผนการดำเนินโครงการ ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยนี้

**บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่าง ๆ ทฤษฎีทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่เลือกนำมาใช้

**บทที่ 3 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ** ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ การสร้างเครื่องต้นแบบ สัญญาณขับเพื่อควบคุมสวิตช์กำลัง การออกแบบหม้อแปลงหลายชุด และจัดสร้างชิ้นงานจริง

**บทที่ 4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง** ในบทนี้จะนำเสนอผลการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink รวมถึงผลการทดลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดในสภาวะการทำงานเมื่อมีภาระไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ และผลการวิเคราะห์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

**บทที่ 5 บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา** ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการศึกษาค้นคว้า สรุปผลการทดลองที่ได้ ตลอดจนข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก สำหรับในส่วนของภาคผนวกนี้จะประกอบไปด้วยรูปถ่ายเครื่องต้นแบบที่จัดสร้างขึ้นจริง รายการเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดสร้างชิ้นงานต่างๆ รวมถึงโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ บทความวิชาการ ตลอดจนโปสเตอร์นำเสนอผลงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

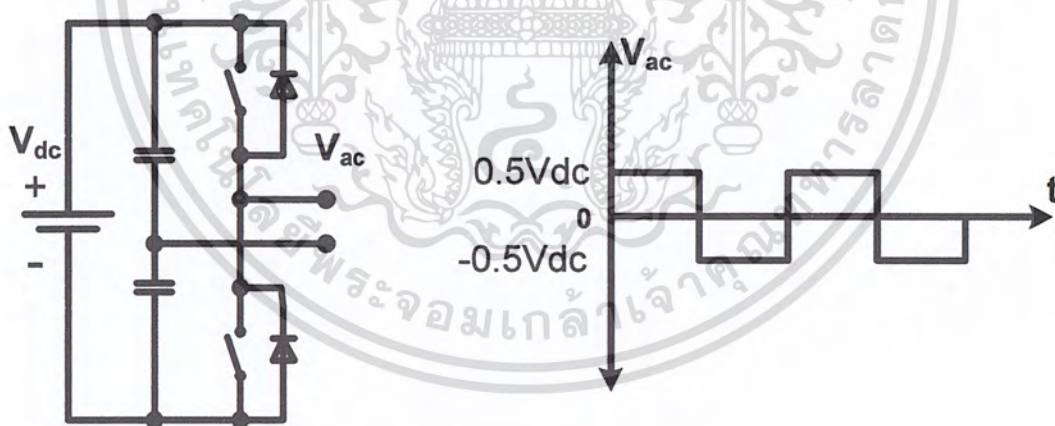
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

สำหรับบทนี้จะนำเสนอถึงทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์หลายระดับประเภทต่างๆ การเลือกอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำแบบอิสระ การทำงานของวงจรตามคำสั่งควบคุมสวิตช์กำลัง และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือแบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge) และแบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.1ก และ 2.2ก ตามลำดับ ซึ่งมีเงื่อนไขการทำงานที่สำคัญคือการทำงานของสวิตช์ในกึ่งเดียวกันจะต้องไม่ทำงานหรือนำกระแสพร้อมกัน ถ้าสวิตช์ในกึ่งเดียวกันนำกระแสพร้อมกันนั้น จะเป็นสาเหตุของการลัดวงจรระหว่างบัสด้านบนกับบัสด้านล่าง ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวสัญญาควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง จะต้องมีการกำหนดช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ซึ่งเป็นช่วงเวลาก่อนที่สวิตช์จะเปลี่ยนสถานะ โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชนิด มีลักษณะแรงดันดังรูปที่ 2.1ข และ 2.2ข ตามลำดับ

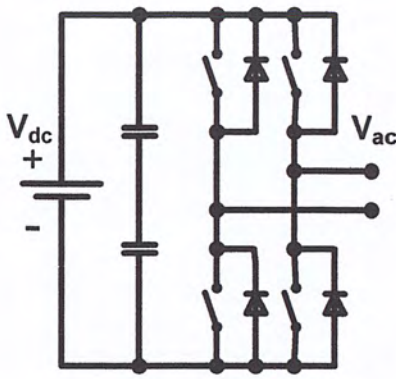


(ก)

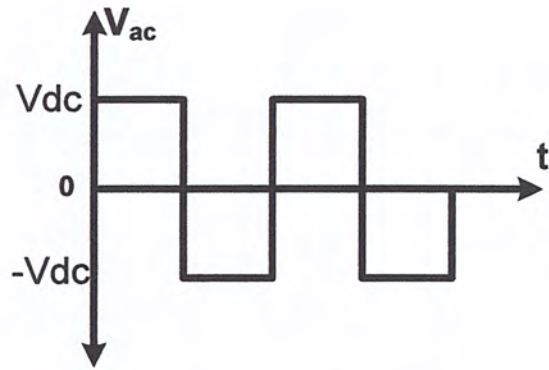
(ข)

รูปที่ 2.1 ก) วงจรฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge)

ข) รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรวงจรฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 ก) วงจรฟูลบริดจ์ (Full-Bridge)

ข) รูปคลื่นแรงดันขาออกวงจรถูกฟูลบริดจ์ (Full-Bridge)

## 2.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

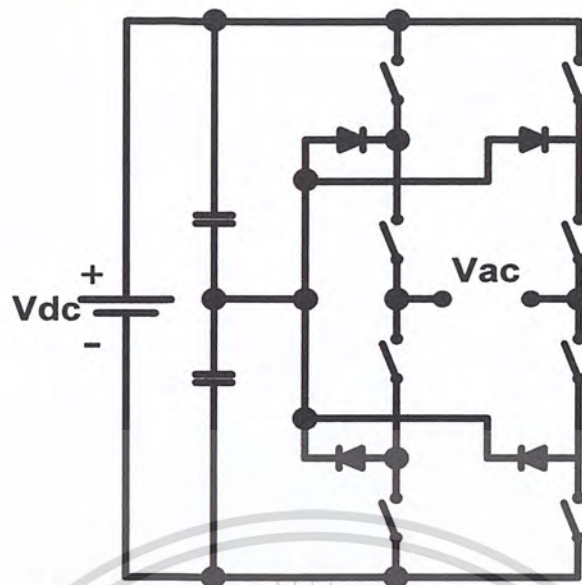
อินเวอร์เตอร์หลายระดับอาศัยการต่ออนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตช์เพื่อใช้ในการแบ่งแรงดัน และเพิ่มจำนวนระดับของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุต โดยมีจุดเด่นในการทำงานที่ระดับแรงดันสูง ซึ่งไม่สามารถหาสวิตช์กำลังที่มีพิกัดแรงดันสูงได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำอินเวอร์เตอร์หลายระดับมาประยุกต์ใช้งานในพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูง ทั้งนี้การที่จำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์มากขึ้นนั้น ทำให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ และทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันต่ำด้วย

## 2.3 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับประเภทต่าง ๆ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีจุดเด่นที่แตกต่างกันเพื่อความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานที่แตกต่าง โดยแบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้ดังนี้

### 2.3.1 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (Diode-clamped)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ เป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแรก ๆ ที่ได้รับความนิยม กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ซึ่งโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์นั้น มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยตัวเก็บประจุจะช่วยจ่ายแรงดันให้เกิดความสมดุล จึงทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ มีจุดเด่นสามารถส่งพลังงานได้สองทิศทาง



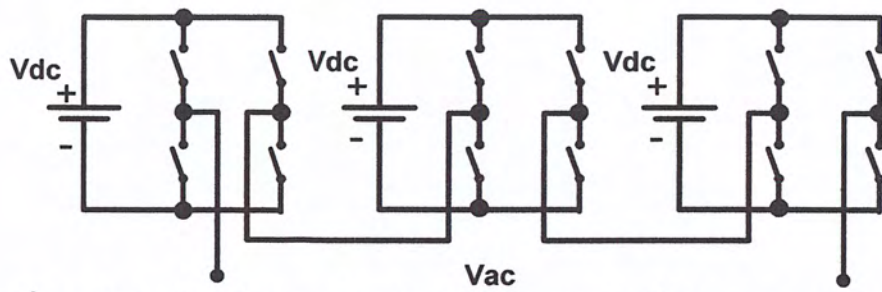
รูปที่ 2.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (Diode-clamped)

### 2.3.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ (Cascade H-bridge)

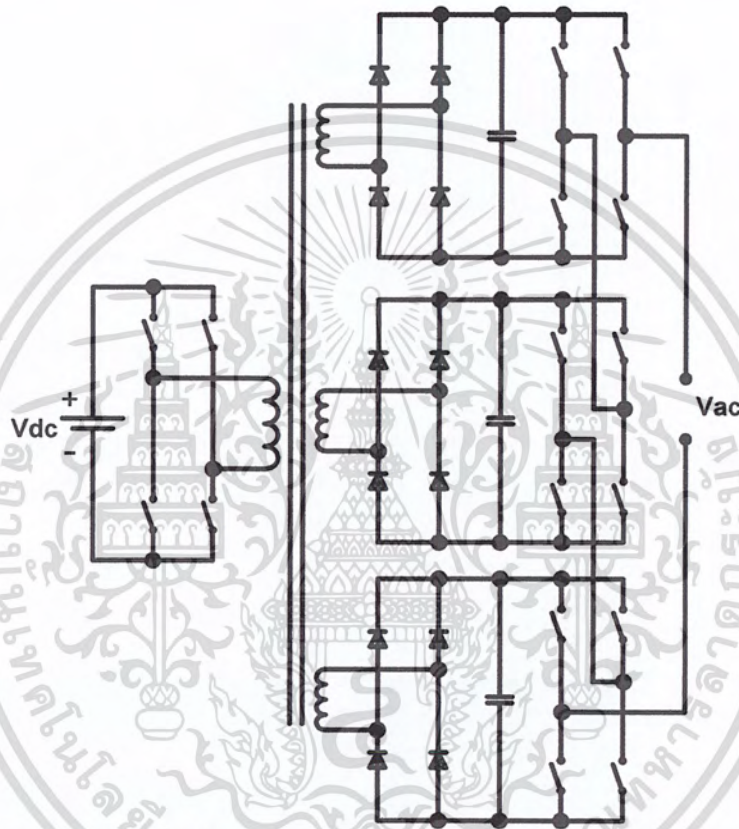
อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ ประยุกต์ขึ้นจาก การนำอินเวอร์เตอร์ โดยนำ เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์มาต่ออนุกรมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทำให้สามารถใช้แหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันต่างกันได้ และยังสามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันที่มีความละเอียด ได้ ทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอชบริดจ์ ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยก โดด (separated dc source) หลายชุด แต่ในการทำงานจริงในระบบ ส่วนใหญ่จะมีแหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสตรงเพียงแหล่งเดียว

### 2.3.3 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุด (Cascade H-Bridge with multi-winding transformer)

จากการที่อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์มีความต้องการแหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกโอด (separated dc source) มากกว่าหนึ่งแหล่ง จึงได้มีการพัฒนา เทคนิคในการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกหลายชุด โดยการแปลงแรงดันให้เป็น ไฟฟ้ากระแสสลับ และแยกเป็นระดับแรงดันต่างๆด้วยหม้อแปลงหลายชุดโดยผ่านวงจรเรียง กระแสเพื่อให้ได้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกที่มีระดับต่างกัน โดยเรียก อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดนี้ว่า อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อ แปลงหลายชุด (Cascade H-Bridge with multi-winding transformer) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แต่ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุดนี้ มีข้อเสียคือมีการ สูญเสียที่วงจรเรียงกระแสเกิดขึ้น และยังไม่สามารถส่งพลังงานได้ทั้งสองทิศทาง



รูปที่ 2.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ (Cascade H-bridge)

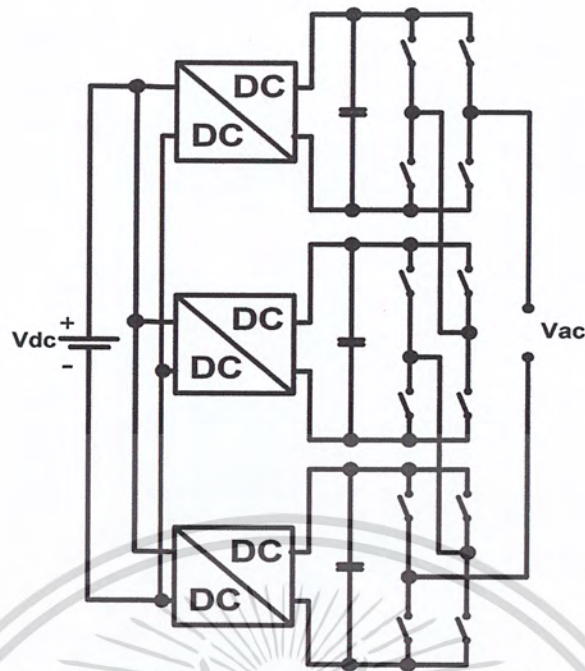


รูปที่ 2.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุด (Cascade H-Bridge with multi-winding transformer)

### 2.3.4 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงสู่กระแสตรงสองทิศทาง (Cascade H-Bridge with bi-directional DC/DC converters)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงสู่กระแสตรงสองทิศทางได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถส่งพลังงานได้ทั้งสองทิศทาง แต่ในทางกลับกัน อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดนี้ จำเป็นต้องใช้ การสวิตซ์ที่ความถี่สูง จึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการสวิตซ์ (switching losses) สูงขึ้นตามไปด้วย มีวงจรแสดงดังรูปที่ 2.6

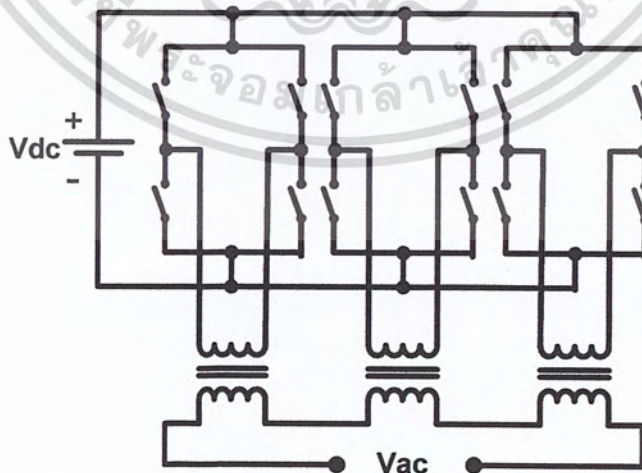
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงสู่กระแสตรงสองทิศทาง (Cascade H-Bridge with bi-directional DC/DC converters)

### 2.3.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง (Multiple-transformer)

เทคนิคชนิดหลายหม้อแปลง มีโครงสร้างคล้าย อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.7 โดยทางฝั่งขาออกของอินเวอร์เตอร์นั้นจะถูกแยกกราวด์กันทางไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า แทนที่จะเชื่อมต่อทางวงจร แบบเอช-บริดจ์ ทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดนี้มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่น แต่ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลงนี้คือต้องการหม้อแปลงความถี่ต่ำหลายตัว



รูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง (Multiple-transformer)

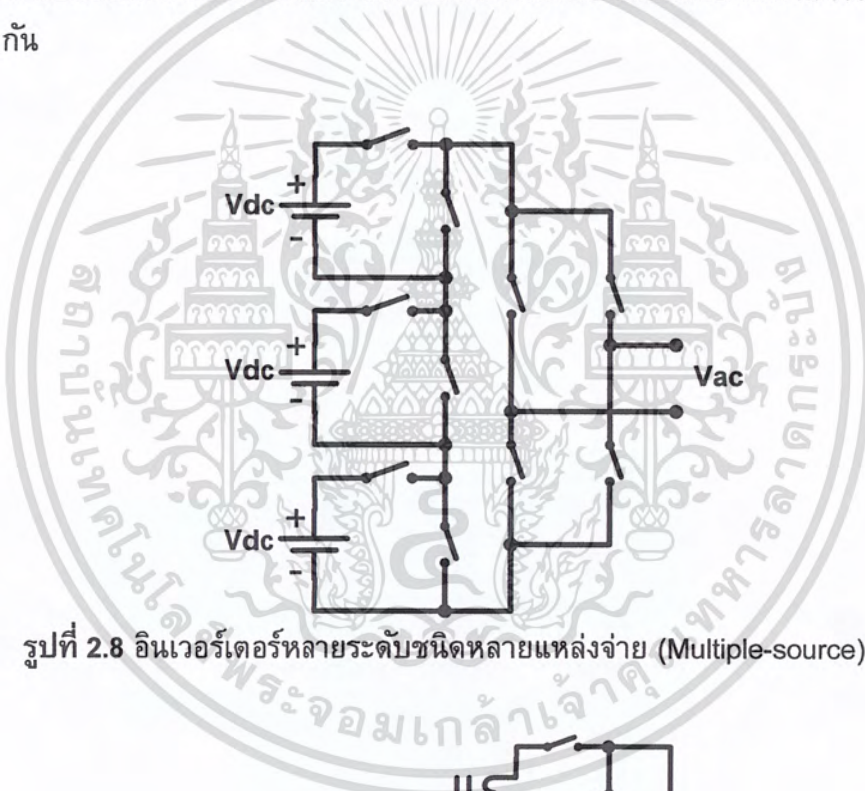
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.6 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายแหล่งจ่าย (Multiple-source)

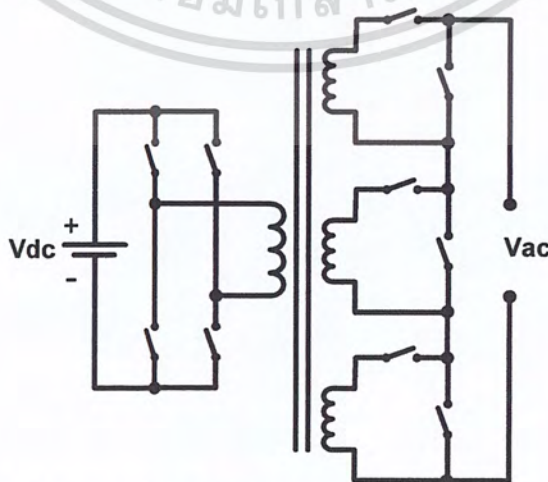
อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายแหล่งจ่าย ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกจำนวนหลายชุดดังรูปที่ 2.8 เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูง มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่น แต่ข้อเสียของเทคนิคนี้คือจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายจำนวนหลายชุด และด้านเข้าและออกของวงจรไม่มีการแยกกันทางไฟฟ้า

### 2.3.7 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding-transformer)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ประยุกต์โดยสร้างมาจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายแหล่งจ่าย แต่มีความแตกต่างตรงที่อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายชุดนี้มีความต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกเพียงแหล่งเดียว และใช้เพียงหม้อแปลงตัวเดียวก็สามารถทำงานได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.8 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายแหล่งจ่าย (Multiple-source)



รูปที่ 2.9 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding-transformer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การเลือกและเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ มีความจำเป็นต้องนำไปใช้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำแบบอิสระ(Stand-alone) ซึ่งคุณลักษณะต่างๆที่จำเป็นในการทำงาน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 และสรุปคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์หลายระดับตามโครงสร้างการทำงานดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณลักษณะที่ต้องการใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำแบบอิสระ

ข้อที่	คุณสมบัติ	ความสำคัญ
1	แหล่งจ่ายกำลังขาเข้าเดียว	จำเป็น
2	ความถี่สวิตซ์ต่ำ	จำเป็น
3	สามารถจ่ายโหลดด้วยองค์ประกอบกระแสตรง	จำเป็น
4	รูปคลื่นมีคุณภาพสูงใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์	จำเป็น
5	จ่ายพลังงานได้สองทิศทาง	คุณสมบัติเสริม
6	ด้านขาเข้าและขาออกมีการแยกกันทางไฟฟ้า	คุณสมบัติเสริม

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำแบบอิสระ ตามโครงสร้างการทำงาน

ชนิดของอินเวอร์เตอร์	รูปที่	1	2	3	4	5	6
Diode clamped	2.3	✓	✓	-	-	✓	-
Cascade H-bridge	2.4	✓	✓	-	-	✓	-
H-bridge with multiwinding transformer	2.5	✓	✓	✓	✓	-	✓
H-bridge with bi-directional DC/DC converter	2.6	✓	-	✓	✓	✓	✓
Multiple-transformer	2.7	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Multiple-source	2.8	-	✓	✓	✓	✓	✓
Multi-winding transformer	2.9	✓	✓	✓	✓	✓	✓

จากตารางที่ 2.2 พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีคุณลักษณะที่จำเป็นครบถ้วนสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำแบบอิสระมีอยู่ด้วยกันสามชนิดคือ คืออินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายขด (H-bridge with multiwinding transformer) อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง (Multiple-transformer) และอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด (Multi-winding transformer) เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบคุณสมบัติและลักษณะการทำงานของเทคนิคทั้งสามประเภทจะพบข้อแตกต่างที่สำคัญดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคลาสเคดเอช-บริดจ์ด้วยหม้อแปลงหลายชุด (Cascade H-Bridge with multi-winding transformer)

มีความยืดหยุ่นต่ำเนื่องจากจำเป็นต้องมีตัวเก็บประจุที่รองรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของภาระไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ไม่มีการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างด้านขาเข้าและขาออกของวงจร และประสิทธิภาพถูกจำกัดด้วยวงจรเรียงกระแส

- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายหม้อแปลง(Multiple-transformer)

มีการแยกกันทางไฟฟ้าของด้านขาเข้าและขาออกของวงจร จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงจำนวนมาก และหม้อแปลงแต่ละตัวต้องรับค่ากระแสของภาระไฟฟ้าตลอดเวลา

- อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding transformer)

มีการแยกกันทางไฟฟ้าของด้านขาเข้าและขาออกของวงจร ใช้หม้อแปลงเพียงตัวเดียวและกระแสของภาระไฟฟ้าจะถูกแบ่งไประหว่างขดลวดด้านออกและสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

จากการพิจารณาข้อมูลดังที่กล่าวมาพบว่า อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding transformer) มีคุณลักษณะที่สำคัญดังนี้

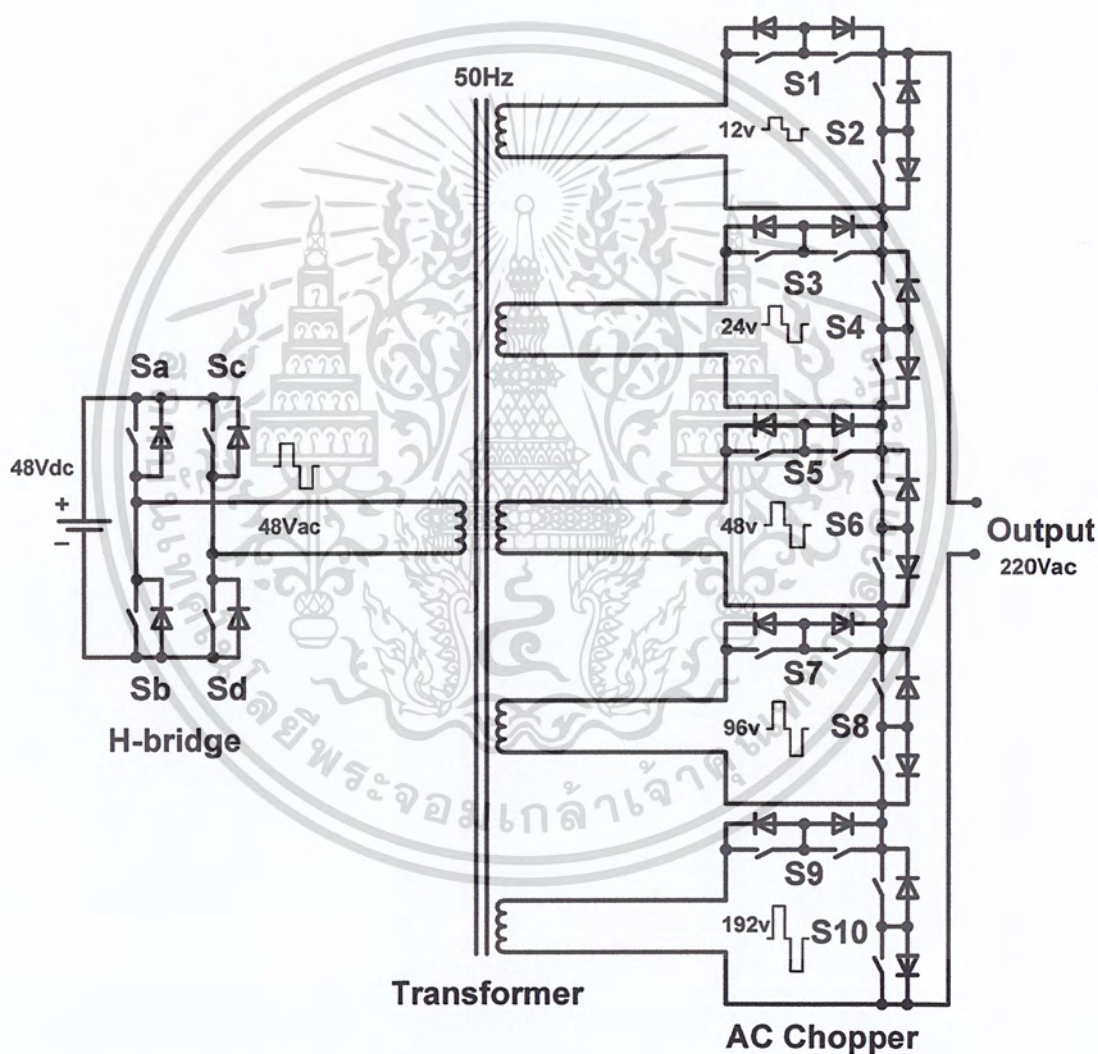
- ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพียงแหล่งเดียว
- มีการทำงานด้วยความถี่สวิตซ์ต่ำ
- สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันได้ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และมีความผิดเพี้ยนต่ำ
- สามารถส่งพลังงานได้สองทิศทาง
- ลักษณะโครงสร้างของวงจรมีการแยกกราวด์กันทางไฟฟ้าทางด้านขาเข้าและออก

ดังนั้นอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding transformer) จึงเป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่เหมาะสมที่สุด ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ

## 2.5 โครงสร้างและการทำงานของเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

เทคนิคการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ที่เลือกในประยุกต์ใช้ในงานวิจัยคือ เทคนิคหม้อแปลงหลายขด (Multi-winding transformer topology) แสดงดังรูปที่ 2.10 เป็นเทคนิคอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีความเหมาะสม มีส่วนประกอบหลักๆในการทำงานอยู่สามส่วนด้วยกันคือ

1. เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-bridge inverter)
2. หม้อแปลงหลายขด (Multiwinding transformer)
3. ชดเชยเอซี-ชอปเปอร์ (AC-Chopper)



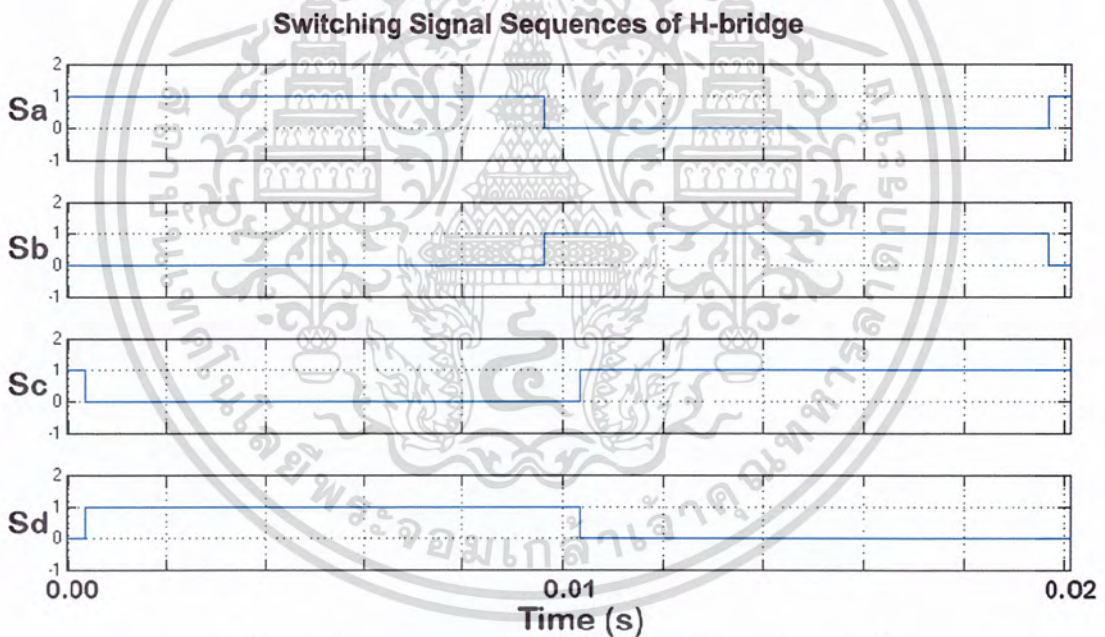
รูปที่ 2.10 โครงสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-bridge inverter)

เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวให้เป็น ไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม และส่งพลังงานที่ได้สู่มอเตอร์แปลงหลายขดต่อไป

ลักษณะโครงสร้างของวงจรเอช-บริดจ์ มีลักษณะวงจรแบบฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full-bridge inverter) ประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ มอสเฟต (Mosfet) 4 ชุดโดยรับสัญญาณควบคุมจากอุปกรณ์เกตไดรฟ์ (Gate drive) 4 สัญญาณเพื่อควบคุมให้ทำงานสวิตซ์ซึ่งตามโปรแกรมที่กำหนด สัญญาณควบคุมมอสเฟตจะถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรมคำสั่ง ที่เขียนลงไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ของชุดวงจรโดยมีรูปคลื่นสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 2.11 ส่งสัญญาณควบคุมเป็นลักษณะรูปคลื่นแรงดัน 5 โวลต์ เข้าสู่อุปกรณ์เกตไดรฟ์เพื่อขยายสัญญาณให้เป็น 15 โวลต์เพื่อควบคุมมอสเฟต

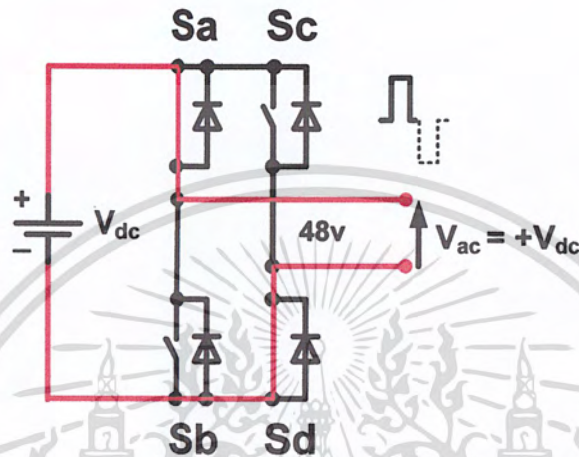


รูปที่ 2.11 สัญญาณควบคุมมอสเฟตของชุดวงจรเอช-บริดจ์

การทำงานของวงจรถูกแบ่งการทำงานได้เป็น 2 ช่วงหลักๆด้วยกัน โดยมีรายละเอียดการทำงานดังนี้

- ช่วงสร้างรูปคลื่นแรงดันซีกบวก

คำสั่งควบคุมจะสั่งให้สวิตช์  $S_a$  และสวิตช์  $S_d$  ทำงานโดยปิดวงจร ทำให้แรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ  $+V_{dc}$  โดยลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.12

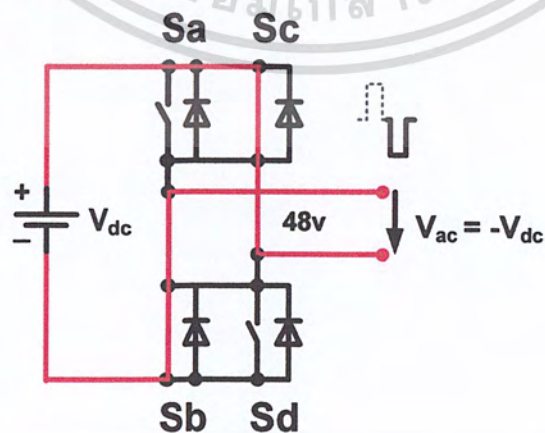


รูปที่ 2.12 การทำงานการสร้างแรงดันซีกบวก

- ช่วงสร้างรูปคลื่นแรงดันซีกลบ

คำสั่งควบคุมจะสั่งให้สวิตช์  $S_b$  และสวิตช์  $S_c$  ทำงานโดยปิดวงจรทำให้แรงดันขาออกมีค่า  $-V_{dc}$  โดยลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.13

สัญญาณควบคุมได้ถูกโปรแกรมให้ควบคุมมอสเฟตให้ทำงานสร้างแรงดันขาออกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) มีความถี่เท่ากับ 50 Hz



รูปที่ 2.13 การทำงานการสร้างแรงดันซีกลบ

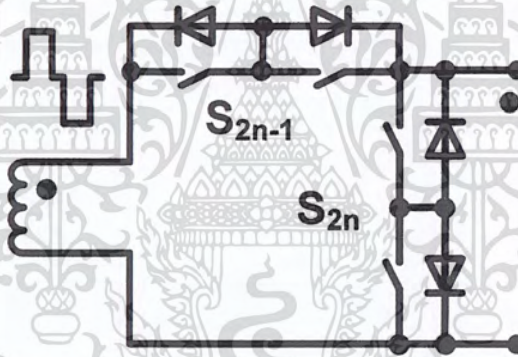
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 หม้อแปลงหลายขด (Multi-winding transformer)

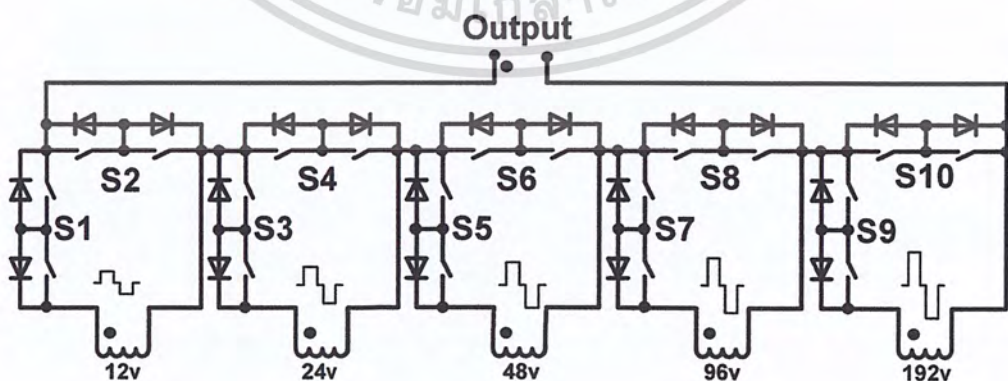
หม้อแปลงหลายขดที่ใช้เป็นหม้อแปลงชนิดแกนทอรอยด์โดยมีขดลวดทางด้านปฐมภูมิ 1 ขดพิกัด 48 โวลต์ ทุติยภูมิ 5 ขดพิกัดแรงดัน 12 ,24 ,48 ,96 ,192 โวลต์

### 2.5.3 ชดเชย-ชอปเปอร์ (AC-Chopper)

ชดเชย-ชอปเปอร์เป็นส่วนท้ายของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 2.14 เอซี-ชอปเปอร์แต่ละชดทำหน้าที่รับพลังงานที่ออกจากหม้อแปลงหลายขดในแต่ละระดับแรงดัน และตัดรูปคลื่นแรงดันตามลักษณะการสวิตซ์ซิงของมอสเฟต จากรูปที่ 2.14 จะมีเครื่องหมายจุด (dot) แสดงขั้วเชื่อมต่อกับขั้วของหม้อแปลง เพื่อป้องกันการกลับเฟสของรูปคลื่นแรงดัน ส่วนด้านเชื่อมต่อกับด้านขาออก (output) ต้องต่อเรียงอนุกรมกันโดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.15 สวิตซ์กำลังจะรับคำสั่งควบคุมที่ถูกกำหนดไว้ในวงจรควบคุมที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เช่นเดียวกับวงจรเอช-บริดจ์ วงจรเอซี-ชอปเปอร์แต่ละชดจะประกอบด้วยมอสเฟตสองชด รับสัญญาณควบคุมชดละสัญญาณ โดยเอซี-ชอปเปอร์จะต่ออนุกรมกันทั้งหมด 5 ชด โดยสัญญาณควบคุมสวิตซ์มีทั้งหมด 10 สัญญาณ มีลักษณะเป็นคู่สัญญาณกลับกันเป็นคู่จำนวน 5 คู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



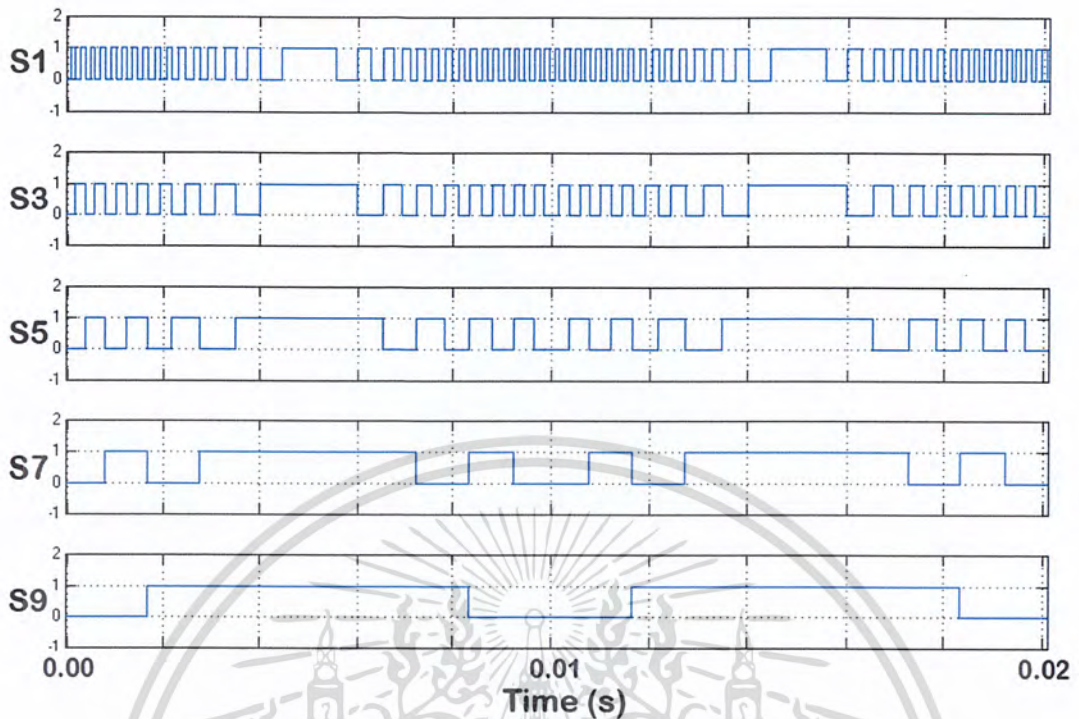
รูปที่ 2.14 วงจรเอซี-ชอปเปอร์



รูปที่ 2.15 รูปเอซี-ชอปเปอร์จะต่ออนุกรมกันทั้งหมด 5 ชด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Switching Signal Sequences of AC-Chopper



รูปที่ 2.16 รูปสัญญาณควบคุมสวิตช์ชุดเอซี-ชอปเปอร์

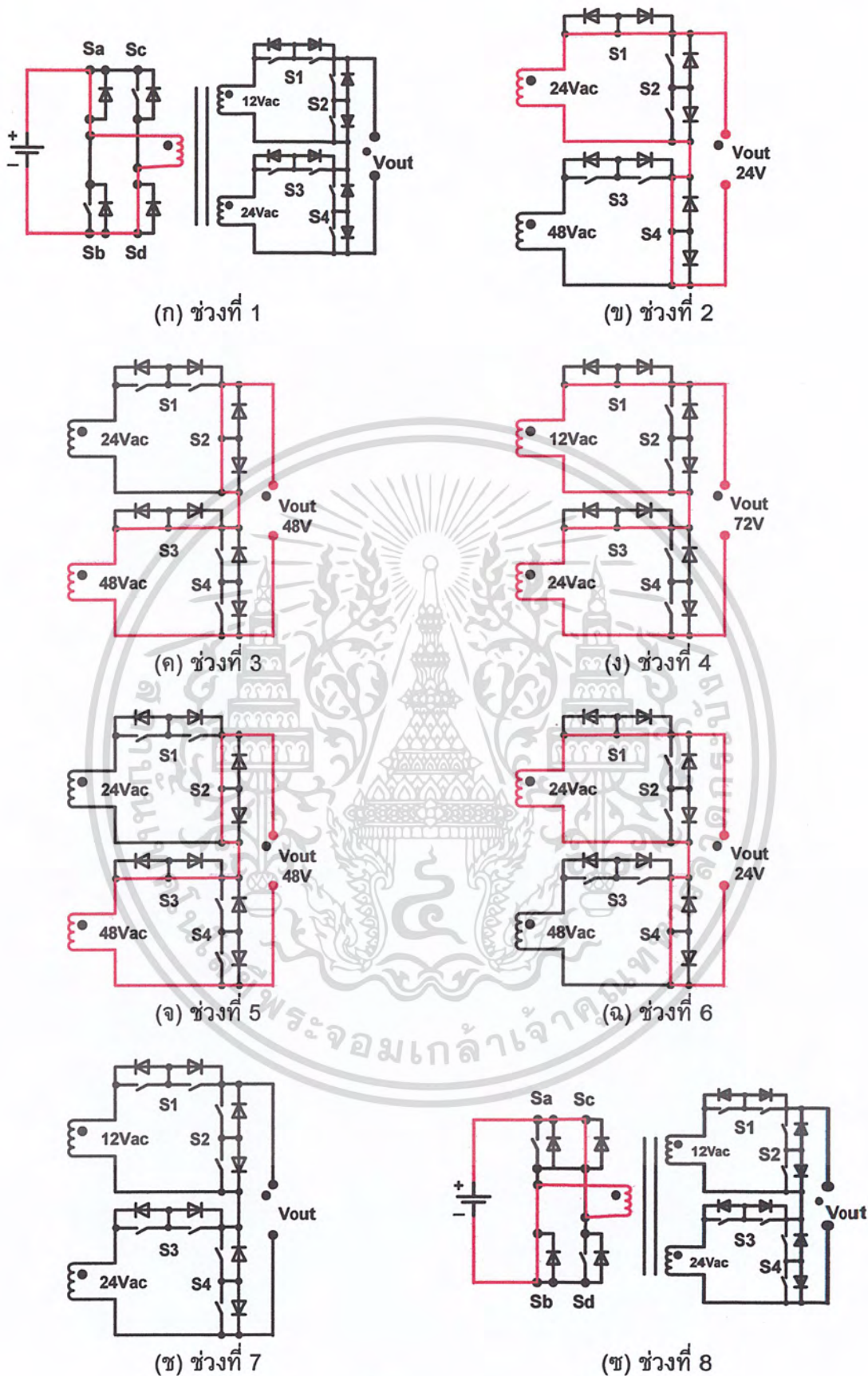
ชุดเอซี-ชอปเปอร์มีหลักการทำงานที่สามารถข้าม (bypass) การทำงานของชุดเอซี-ชอปเปอร์บางชุดที่ไม่ได้ใช้งานในเวลาขณะใดๆไปได้ สามารถอธิบายหลักการทำงานยกตัวอย่างการทำงานของชุดเอซี-ชอปเปอร์เพียงสองชุดต่อเนื่องกัน โดยการทำงานช่วงรูปคลื่นซีกบวก สวิตช์  $S_a$  และ  $S_c$  ของเอช-บริดจ์จะทำงาน การทำงานช่วงรูปคลื่นซีกลบสวิตช์  $S_b$  และ  $S_d$  ของเอช-บริดจ์จะทำงานสลับกันไปส่วนชุดเอซี-ชอปเปอร์มีลำดับการทำงานดังนี้

- ช่วงที่ 1 ส่วนเอช-บริดจ์สวิตช์  $S_a$  และสวิตช์  $S_d$ ทำงานโดยปิดวงจร ส่วนเอซี-ชอปเปอร์ยังไม่ทำงาน
- ช่วงที่ 2 ส่วนเอช-บริดจ์สวิตช์  $S_a$  และสวิตช์  $S_d$ ทำงานโดยปิดวงจร ส่วนเอซี-ชอปเปอร์สวิตช์  $S_1$  ทำงานโดยเชื่อมต่อแรงดันจากหม้อแปลงไปสู่ด้านออกของวงจร สวิตช์  $S_4$  ทำงานโดยข้าม (by pass) การเชื่อมต่อตัววงจรจากหม้อแปลงไปจึงได้แรงดันขาออก ณ จุดนั้นมีค่าเท่ากับ 24 V
- ช่วงที่ 3 ส่วนเอช-บริดจ์สวิตช์  $S_a$  และสวิตช์  $S_d$ ทำงานโดยปิดวงจร ส่วนเอซี-ชอปเปอร์สวิตช์  $S_2$  ทำงานโดยเชื่อมต่อแรงดันจากหม้อแปลงไปสู่ด้านออกของวงจร สวิตช์  $S_3$  ทำงานโดยข้าม (by pass) การเชื่อมต่อตัววงจรจากหม้อแปลงไปจึงได้แรงดันขาออก ณ จุดนั้นมีค่าเท่ากับ 48 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วงที่ 4 ส่วนเอช-บริดจ์สวิตช์  $S_a$  และสวิตช์  $S_d$  ทำงานโดยปิดวงจร ส่วนเอซี-ชอปเปอร์สวิตช์  $S_1$  และ  $S_3$  ทำงานโดยเชื่อมต่อแรงดันจากหม้อแปลงไปสู่ด้านออกของวงจร เอซี-ชอปเปอร์ทั้งสองชุดต่ออนุกรมกัน แรงดันที่ได้จะมีค่าเสรีเมกัน จึงได้แรงดันขาออก ณ จุดนั้นมีค่าเท่ากับ 72 V
- ช่วงที่ 5 ส่วนเอช-บริดจ์สวิตช์  $S_a$  และสวิตช์  $S_d$  ทำงานโดยปิดวงจรส่วนเอซี-ชอปเปอร์สวิตช์  $S_2$  และ สวิตช์  $S_3$  แรงดันขาออกที่ได้เริ่มลดลงมีแรงดันขาออก ณ จุดนั้นเท่ากับช่วงที่ 3 คือมีค่าเท่ากับ 48 V
- ช่วงที่ 6 ส่วนเอช-บริดจ์สวิตช์  $S_a$  และสวิตช์  $S_d$ ทำงานโดยปิดวงจร ส่วนเอซี-ชอปเปอร์สวิตช์  $S_1$  และ สวิตช์  $S_4$  แรงดันขาออกที่ได้ลดลงมีแรงดันขาออก ณ จุดนั้นเท่ากับช่วงที่ 2 คือมีค่าเท่ากับ 24 V
- ช่วงที่ 7 ส่วนเอช-บริดจ์สวิตช์  $S_a$  และสวิตช์  $S_d$ ทำงานโดยปิดวงจร ส่วนเอซี-ชอปเปอร์สวิตช์ทุกตัวหยุดทำงาน แรงดันขาออกที่ได้ ณ จุดนั้นจึงมีค่าเท่ากับ 0 V
- ช่วงที่ 8 ส่วนเอช-บริดจ์สวิตช์  $S_b$  และสวิตช์  $S_c$  ทำงานโดยปิดวงจรสร้างแรงดันชีกกลับ ส่วนเอซี-ชอปเปอร์ สวิตช์ทุกตัวยังหยุดทำงาน แรงดันขาออกที่ได้ เท่ากับ 0 V

การทำงานต่อจากช่วงที่ 8 ของส่วนเอซี-ชอปเปอร์จะทำงานเหมือนช่วงที่ 2 ถึงช่วงที่ 8 จนเปลี่ยนการทำงานเป็นการสร้างรูปคลื่นแรงดันชีกบวกเป็นเช่นนี้ต่อไป โดยการทำในของชุดเอซี-ชอปเปอร์ที่ต่ออนุกรมกัน 5 ชุดนั้น ก็มีลักษณะการทำงานในทำนองเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลำดับการทำงานของสวิตซ์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 บทสรุป

บทนี้ได้นำเสนอถึงทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์หลายระดับประเภทต่างๆ การเลือกอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำแบบอิสระ โดยพบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายขดมีความเหมาะสมที่สุด และแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานวงจรตามคำสั่งควบคุมสวิตช์กำลัง สำหรับการออกแบบชิ้นงานและการสร้างเครื่องต้นแบบจะนำเสนอในบทที่ 3 ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

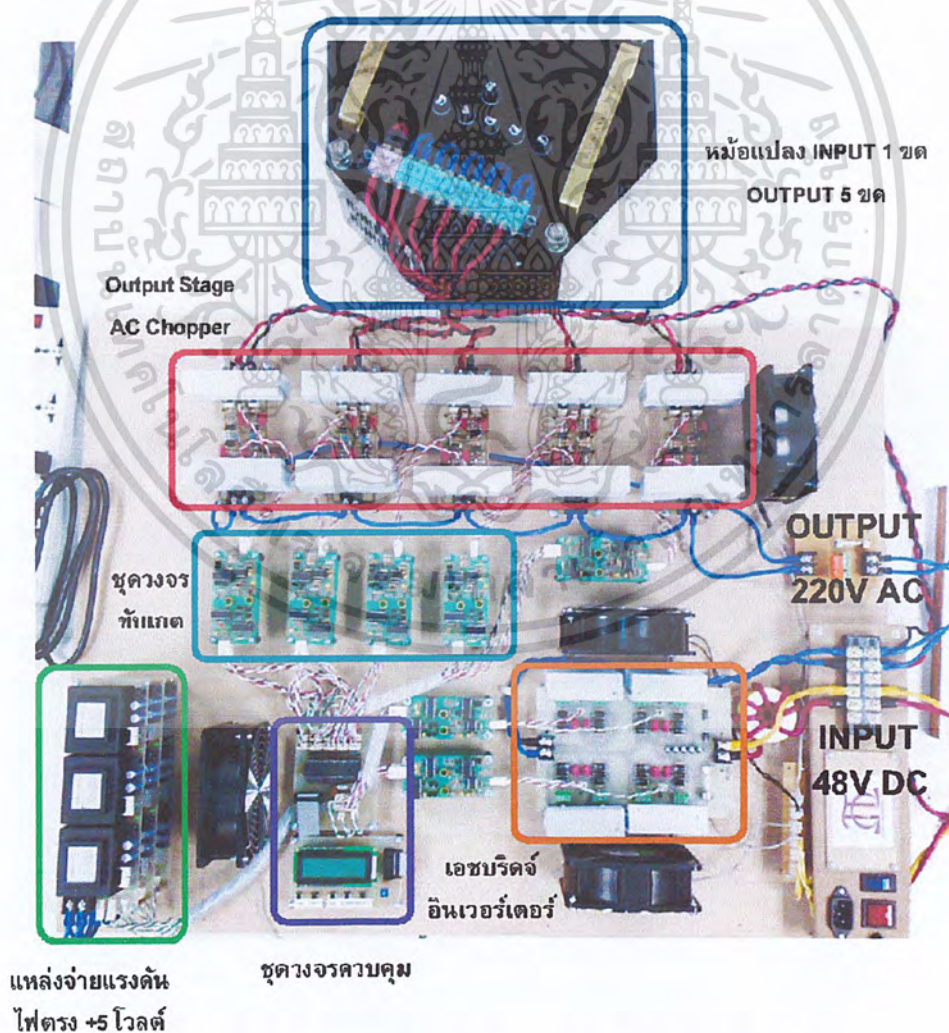
### การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

#### 3.1 บทนำ

สำหรับในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบและการสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ ชุดเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงหลายชุด ชุดเอซีชอปเปอร์ ชุดวงจรขับเกตและชุดวงจรควบคุม โดยการออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจถึงการทำงานและโครงสร้างโดยละเอียดของอุปกรณ์ในแต่ละส่วนที่นำมาต่อร่วมกัน เพื่อให้อุปกรณ์จะสามารถทำงานร่วมกัน และสามารถแก้ไขเมื่อเกิดปัญหาในการทำงานได้

#### 3.2 การออกแบบและสร้างชิ้นงานจริง

ชิ้นงานทั้งหมดที่ได้สร้างขึ้นนั้น ประกอบด้วยวงจรต่างๆ ดังนี้



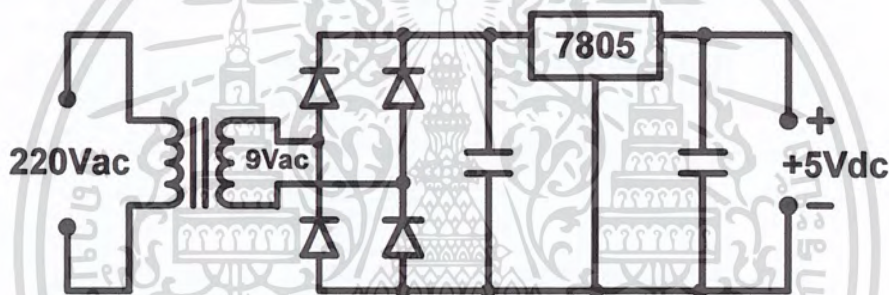
รูปที่ 3.1 รูปชิ้นงานเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply)

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ เป็นอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแก่วงจรควบคุม และชุดวงจรขับเกต 14 ชุด โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะมีทั้งหมด 8 ชุดเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้สำหรับวงจรขับเกต 2 วงจรต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1 ชุดและจ่ายให้กับวงจรควบคุมอีก 1 ชุด

สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ จะใช้หม้อแปลงแปลงแรงดันกระแสสลับจาก 220 โวลต์ ลดระดับลงเป็น 9 โวลต์ โดยเลือกใช้หม้อแปลงชนิดลงแรงวงจร เพื่อความสะดวกในการรวมลายแบบพิมพ์ของวงจรไว้ในแผ่นเดียวกัน ใช้ไอซีเรียงกระแสเบอร์ DB104G เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ลดค่าระลอกคลื่นของแรงดัน(ripple voltage) ด้วยตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ และโวลต์เตจเรกกูเรเตอร์ (Voltage Regulation) เบอร์ 7805 เพื่อรักษาระดับแรงดัน เนื่องจากต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาออกที่มีค่าถูกต้องและคงที่ตลอดเวลา โดยมีลักษณะวงจรและอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 5 โวลต์



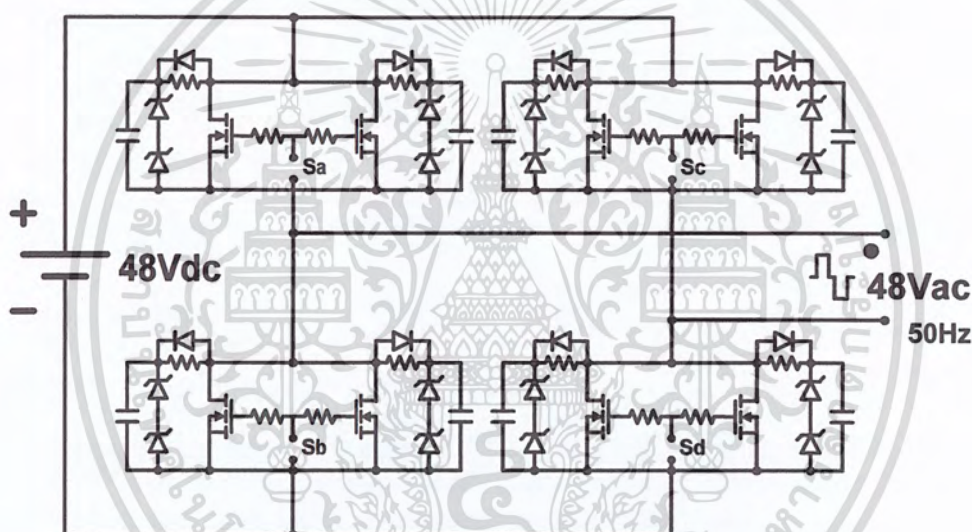
รูปที่ 3.3 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

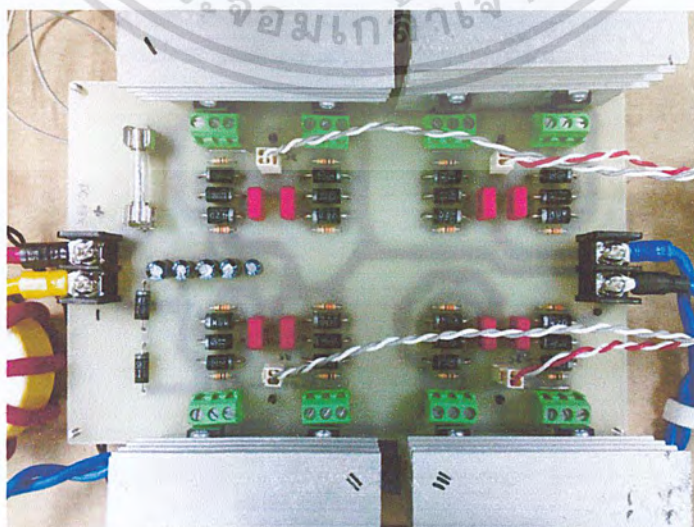
### 3.2.2 เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-bridge inverter)

วงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 48 โวลต์ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) 48 โวลต์ ที่ความถี่ 50 Hz และมีช่วงเวลาดำเนินระหว่างข้ามจุดแรงดันศูนย์ (hold-on-at-zero) 100  $\mu$ S เพื่อนำมาเป็นแหล่งจ่ายให้กับหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ

วงจรกำลังของเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.4 ประกอบไปอุปกรณ์สวิตช์กำลังชนิดมอสเฟต เบอร์ IRF3710 มีพิกัดแรงดัน 100 โวลต์ พิกัดกระแส 57 แอมป์ ต่อเป็น วงจรฟูลบริดจ์ โดยใช้มอสเฟตต่อขนานกัน 2 ตัวต่อหนึ่งสวิตช์ขาขึ้น เพื่อช่วยในการแบ่งกระแส และลดความต้านทานภายในขณะอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งทำงาน พร้อมด้วยวงจรสนับเบอร์ที่ประกอบด้วยซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1.5KE33A พิกัด 33 โวลต์ ต่ออนุกรมกันและตัวเก็บประจุขนาด 470 นาโนฟารัด พิกัดแรงดัน 100 โวลต์ โดยอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 วงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 หม้อแปลงชนิดหลายขด (Multi-winding Transformer)

หม้อแปลงหลายขดที่นำมาใช้ในงานวิจัยได้เลือกใช้แกนหม้อแปลงชนิดทอรอยด์ โดยได้นำแกนหม้อแปลงทอรอยด์ชนิดปรับค่าได้แบบ 1 เฟส (Variac 1 phase) ที่ซำรุต ดังแสดงในรูปที่ 3.6 มาประยุกต์ใช้ทำเป็นหม้อแปลงหลายขด ซึ่งได้ทำการถอดขดลวดของหม้อแปลงอันเดิมที่ซำรุตออกและทำการพันใหม่โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

#### 3.2.3.1 พิกัดของหม้อแปลงหลายขด

พิกัดของหม้อแปลงหลายขดที่ใช้เป็นส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีรายละเอียดโดยแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงรายละเอียดพิกัดหม้อแปลงหลายขด

พิกัดกำลัง	3000 VA
พิกัดแรงดันขดลวดปฐมภูมิ	48 Volt
พิกัดแรงดันขดลวดทุติยภูมิขดที่ 1	12 Volt
พิกัดแรงดันขดลวดทุติยภูมิขดที่ 2	24 Volt
พิกัดแรงดันขดลวดทุติยภูมิขดที่ 3	48 Volt
พิกัดแรงดันขดลวดทุติยภูมิขดที่ 4	96 Volt
พิกัดแรงดันขดลวดทุติยภูมิขดที่ 5	192 Volt
ชนิดแกนเหล็ก	แกนทอรอยด์ (Toroidal)



รูปที่ 3.6 หม้อแปลงทอรอยด์ที่ซำรุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3.2 การออกแบบหม้อแปลงหลายชุด

การออกแบบหม้อแปลงหลายชุดมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1. นำแกนเหล็กที่ได้มาทำการวัดหาขนาดโดยได้ขนาดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงขนาดของแกนหม้อแปลงทอรอยด์

ความกว้างวงนอก ( $R_1$ )	242.8 mm
ความกว้างวงใน ( $R_2$ )	133.4 mm
ความสูงแกน ( $h$ )	60.6 mm
ความกว้างวงแหวน ( $L$ )	54.7 mm

2. คำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กจากสมการที่ 3.1

$$\text{พื้นที่หน้าตัด}(A) = \text{ความกว้างวงแหวน } (L) \times \text{ความสูงแกน } (h) \quad (3.1)$$

จะได้ พื้นที่หน้าตัด( $A$ ) = 54.7 มิลลิเมตร  $\times$  60.6 มิลลิเมตร

$$= 3314.82 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

$$= 0.00331482 \text{ ตารางเมตร}$$

3. คำนวณหาจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ จากสมการที่ 3.2

$$E = 4.44 \cdot f \cdot N \cdot B \cdot A \quad (3.2)$$

$E$  คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

$f$  คือ ความถี่ไฟฟ้า (Hz)

$N$  คือ จำนวนรอบขดลวด (turn)

$B_m$  คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux intensity) (T)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก ( $m^2$ )

$$\text{จะได้ } 48 \text{ V} = 4.44(50) \cdot (N) \cdot (0.9) \cdot (0.00331482)$$

$$N = 72.47 \text{ turns}$$

$$\text{ขดลวดปฐมภูมิ } (N_{pri}) = 80 \text{ turns}$$

4. คำนวณหาจำนวนขดลวดทุติยภูมิและกระแสของแต่ละขดลวดจากสมการที่ 3.3

$$\frac{V_{pri}}{V_{sec}} = \frac{N_{pri}}{N_{sec}} = \frac{I_{sec}}{I_{pri}} \quad (3.3)$$

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงจำนวนรอบของการพันขดลวดทุติยภูมิจากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งขดลวด	พิกัดแรงดัน (V)	จำนวนรอบขดลวด จากการคำนวณ (รอบ)	จำนวนรอบขดลวดที่ พื้นที่หม้อแปลง (รอบ)
ปฐมภูมิ	48	72.47	80
ทุติยภูมิขดที่ 1	12	18.125	20
ทุติยภูมิขดที่ 2	24	36.25	40
ทุติยภูมิขดที่ 3	48	72.5	80
ทุติยภูมิขดที่ 4	96	145	160
ทุติยภูมิขดที่ 5	192	290	320

ตารางที่ 3.4 ตารางสรุปรายละเอียดหม้อแปลงหลายขดที่ทำการออกแบบ

ตำแหน่งขดลวด	พิกัดแรงดัน (V)	จำนวนรอบ ขดลวด (รอบ)	ค่าพิกัดกระแส ที่พิกัด 3kVA (A)	ขนาดเส้น ลวด (SWG)	V/turn
ปฐมภูมิ	48	80	63.5	6	0.6
ทุติยภูมิขดที่ 1	12	20	7.2	12	0.6
ทุติยภูมิขดที่ 2	24	40	7.5	12	0.6
ทุติยภูมิขดที่ 3	48	80	8	14	0.6
ทุติยภูมิขดที่ 4	96	160	8.5	14	0.6
ทุติยภูมิขดที่ 5	192	320	9.2	14	0.6

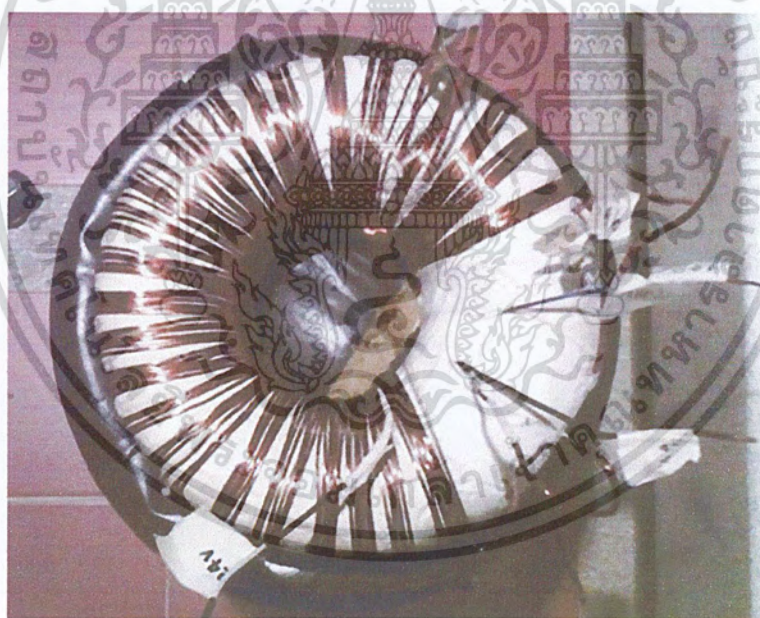
ค่าแรงดันปฐมภูมิ( $V_{pri}$ ) มีค่าเท่ากับ 48 โวลต์ จำนวนขดลวดปฐมภูมิ ( $N_{pri}$ ) มีค่าเท่ากับ 80 รอบ โดยจะได้จำนวนรอบของการพันขดลวดทุติยภูมิตั้งตารางที่ 3.3 และค่ากระแสของแต่ละขดลวดจากการคำนวณ สามารถนำไปเลือกขนาดของลวดทองแดงที่นำมาใช้ในการพัน โดยสรุปรายละเอียดได้ตั้งตารางที่ 3.4

5. จากข้อมูลที่ได้อาจการคำนวณนำไปพันหม้อแปลงหลายขดโดยเริ่มต้นจากการนำผ้าพันหม้อแปลงพันแกนเหล็กเพื่อป้องกันการเสียดสีของขดลวดกับเนื้อแกนเหล็กดังรูปที่ 3.7 จากนั้นทำการพันขดลวดทีละชั้นตามขนาดและจำนวนรอบของการพันขดลวดที่ทำการคำนวณดังรูปที่ 3.8 เมื่อพันขดลวดครบ 1 ชั้น จะทำการพันด้วยเทปกระดาษซ้อนทุกชั้นการพันเพื่อป้องกันการเสียดสีระหว่างชั้น และเมื่อพันขดลวดทุติยภูมิเสร็จเรียบร้อยแล้วในแต่ละขดจะต้องทำการทดสอบการขึ้นแรงดันว่าสามารถจ่ายแรงดันขาออกได้ตามที่ออกแบบ ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



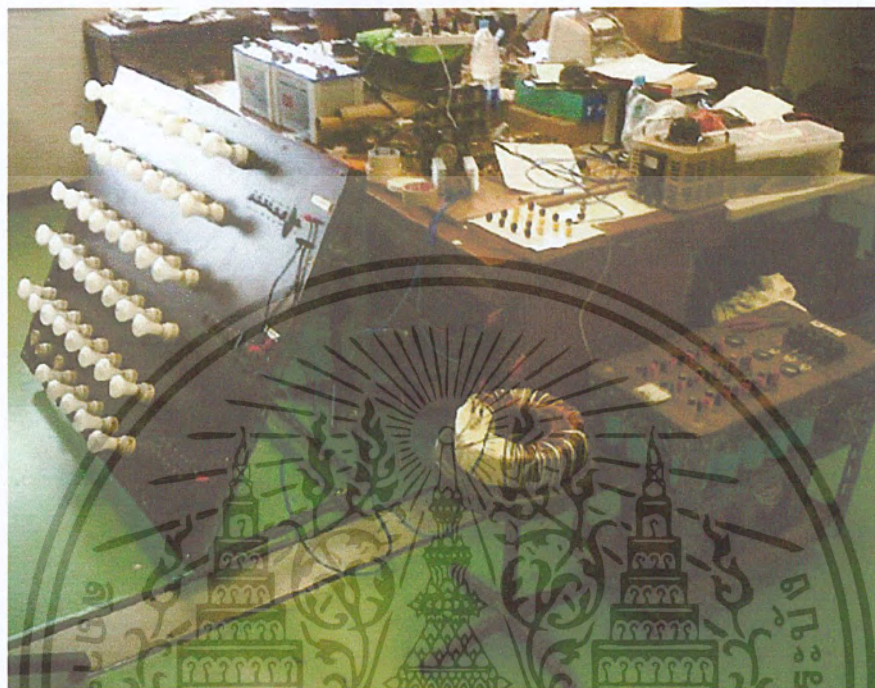
รูปที่ 3.7 แกนหม้อแปลงพันผ้าพันหม้อแปลง



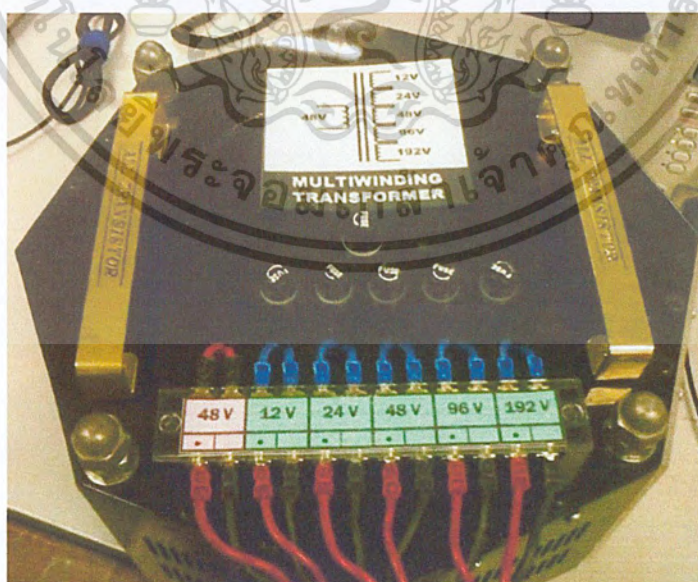
รูปที่ 3.8 รูปการพันขดลวดที่ละชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ต่อขั้วต่อสายต่อฟิวส์ป้องกันกระแสเกินและบรรจุลงกล่องหม้อแปลง โดยต่อขั้วต่อสายเพื่อความสะดวกในการเชื่อมต่อหม้อแปลงเข้ากับวงจร และฟิวส์แก่ขดลวดแต่ละขดเพื่อป้องกันกระแสเกินในการทำงานและบรรจุลงกล่องหม้อแปลง ได้เป็นหม้อแปลงหลายขดที่เสร็จสมบูรณ์ ดังรูปที่ 3.10



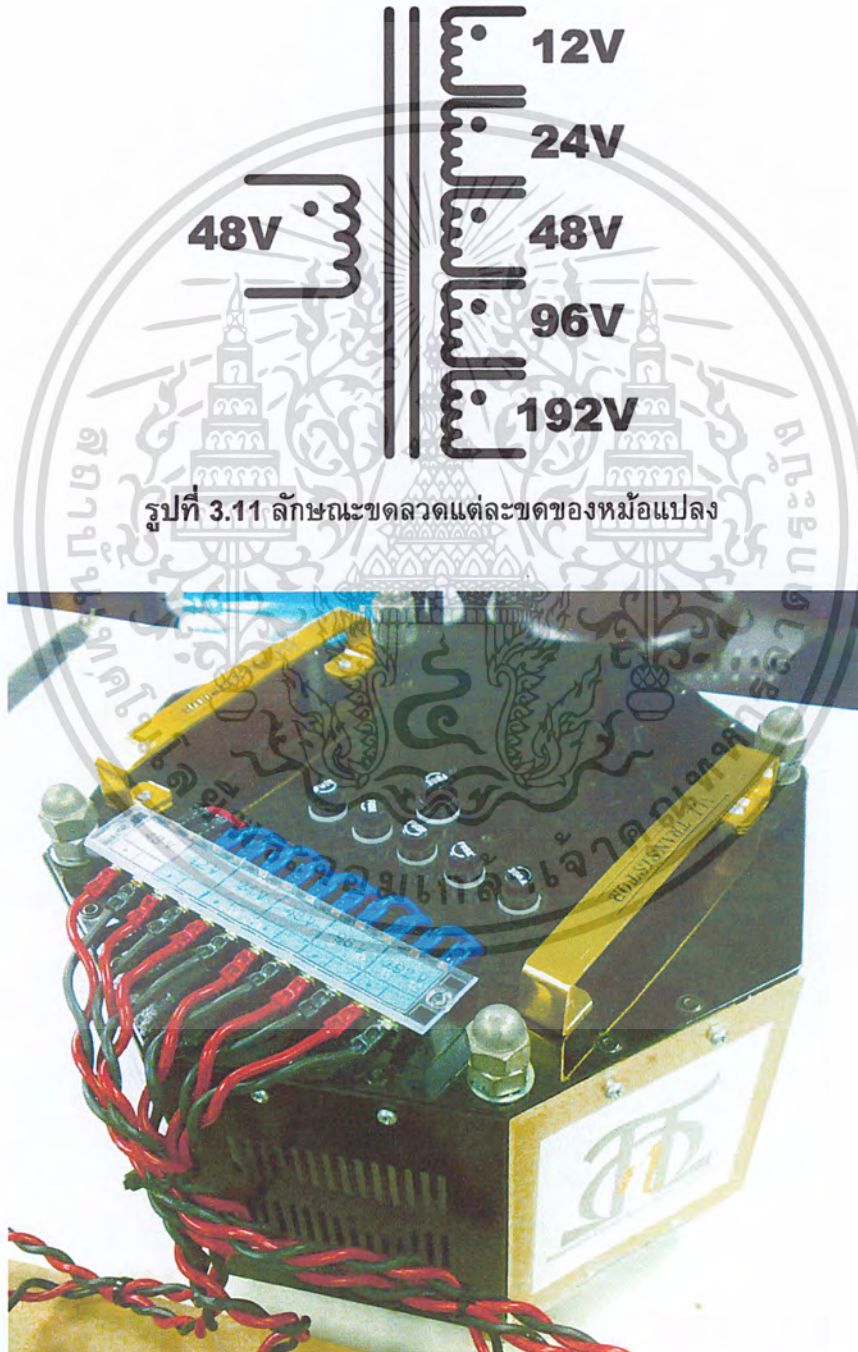
รูปที่ 3.9 รูปการทดสอบการทำงานของหม้อแปลงเมื่อทำการพันในแต่ละรอบ



รูปที่ 3.10 หม้อแปลงหลายขด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบหม้อแปลงจะได้จำนวนขดลวดในแต่ละขดที่ระดับแรงดันต่างๆ เมื่อนำมาพันบนแกนทอรอยด์ลักษณะดังรูปที่ 3.11 โดยที่ด้านปฐมภูมิพันจำนวน 80 รอบ และด้านทุติยภูมิ พันขดลวดจริงจำนวน 21, 41, 82, 162 และ 322 รอบ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าจำนวนขดทางด้านทุติยภูมิมากกว่าที่คำนวณได้เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากต้องมีการชดเชยแรงดันที่มีการสูญเสียภายในหม้อแปลงและอุปกรณ์อื่นๆ และได้มีการต่อฟิวส์ เข้ากับขดลวดแต่ละขดเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับขดลวดของหม้อแปลงดังรูปที่ 3.12



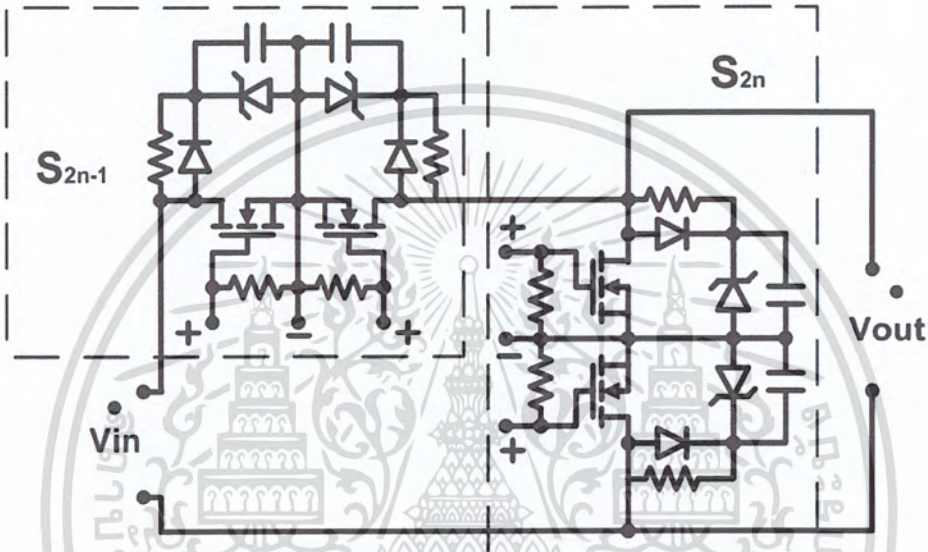
รูปที่ 3.11 ลักษณะขดลวดแต่ละขดของหม้อแปลง

รูปที่ 3.12 ชิ้นงานหม้อแปลงชนิดหลายขด (Multi-winding Transformer)

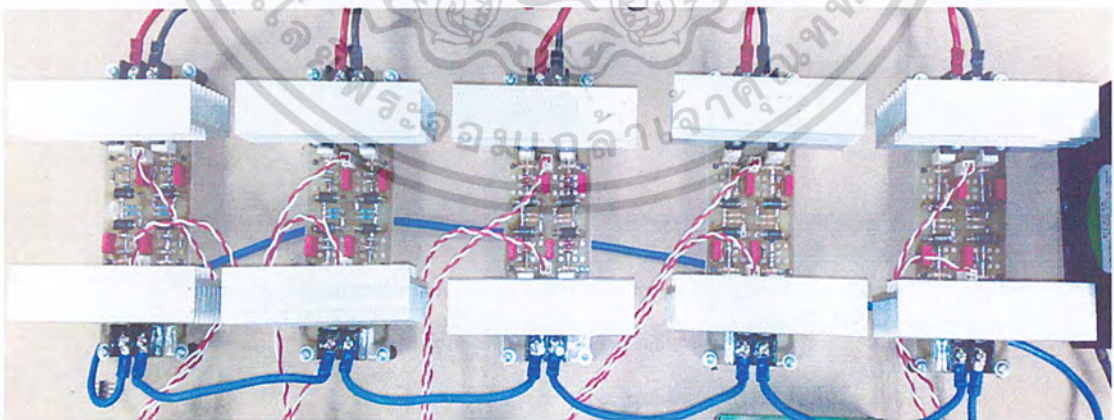
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 เอซี-ชอปเปอร์ (AC Chopper)

วงจรทางด้านขาออกจะประกอบด้วย วงจรเอซี-ชอปเปอร์จำนวน 5 เซลล์ต่ออนุกรมกัน ซึ่งแต่ละเซลล์นั้นจะรับแรงดันไฟสลับจากหม้อแปลงที่ระดับแรงดันต่างๆ กันเพื่อสร้างแรงดันขาออกที่เป็นระดับขั้นต่างๆ ตามสัญญาณควบคุม โดยสามารถสร้างได้สูงสุด 63 ระดับ สำหรับวงจรเอซี-ชอปเปอร์ในแต่ละเซลล์นั้น จะมีส่วนประกอบหลักเหมือนกันคือ อุปกรณ์สวิตซ์ชิ่ง และวงจรสับเบอร์ แต่ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์ก็จะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแรงดันและกระแสในเซลล์นั้นๆ โดยสามารถแสดงวงจรโดยทั่วไปและชิ้นงานได้ดังรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 วงเอซี-ชอปเปอร์ 1 เซลล์



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานวงจรเอซี-ชอปเปอร์

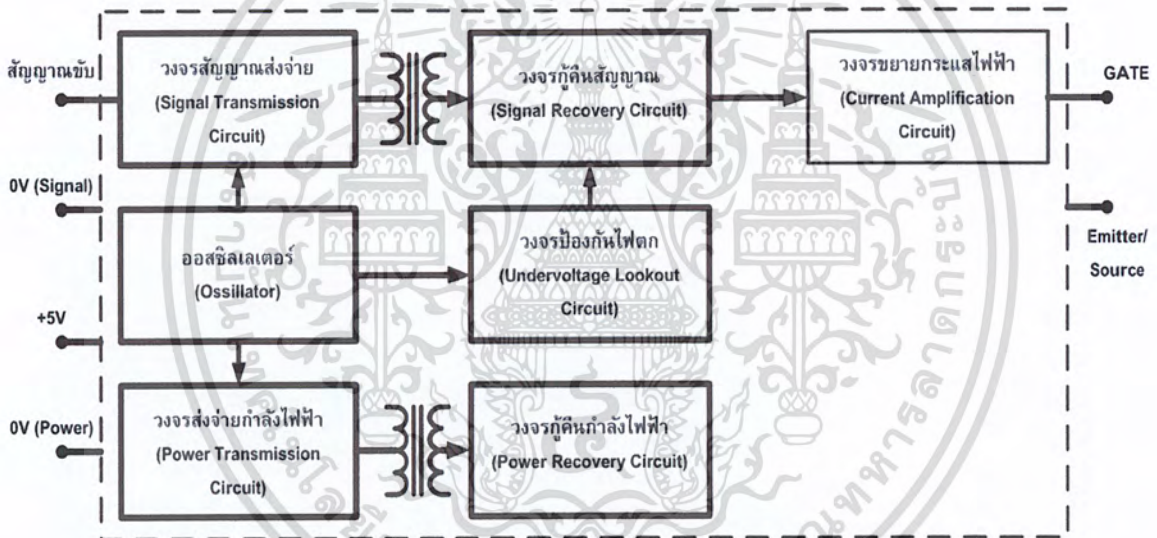
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.5 การออกแบบวงจรขับเกต (Gate-drive)

วงจรขับเกตเป็นวงจรที่จำเป็นสำหรับการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากสัญญาณที่ควบคุมอินเวอร์เตอร์นั้นต้องมีแรงดันตั้งแต่ 7-24 โวลต์ แต่สัญญาณที่ออกจากรีเลย์ควบคุมมีเพียง +5 โวลต์ จึงจำเป็นต้องใช้วงจรขับเกตขึ้นมา โดยบล็อกไดอะแกรมส่วนประกอบของการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.15 วงจรขับเกตแสดงดังรูปที่ 3.16 และรูปชิ้นงานวงจรขับเกตแสดงดังรูปที่ 3.17 โดยการออกแบบวงจรขับเกตจะประกอบไปด้วย 8 ส่วนด้วยกันดังนี้

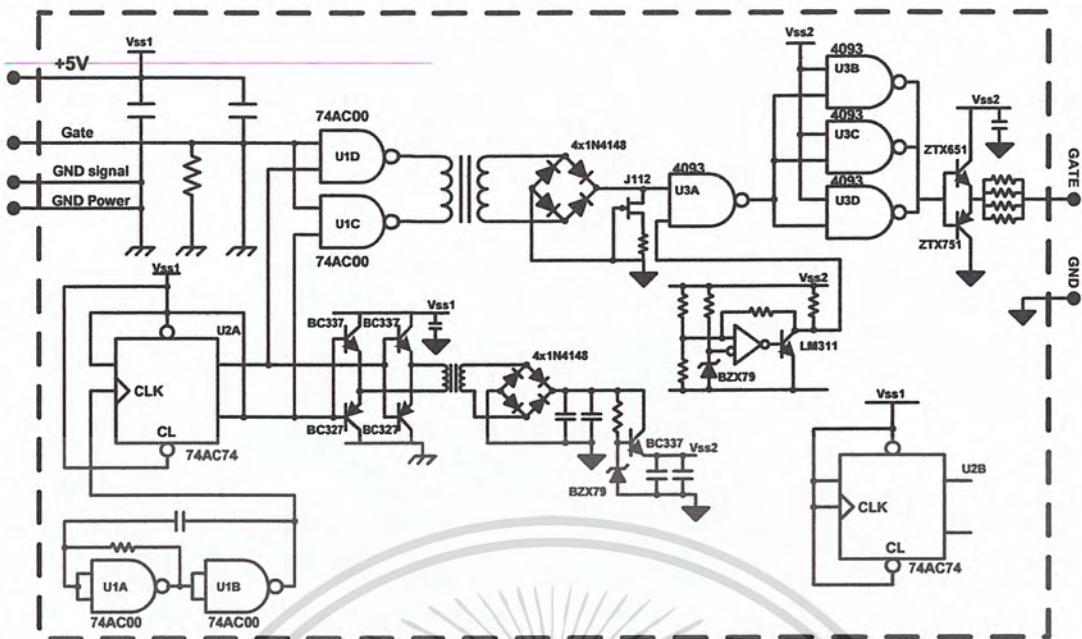
#### 3.2.5.1 วงจรสำหรับการขับเกต (Gate-drive Circuit)

วงจรขับเกตทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้รับจากวงจรควบคุมซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณควบคุม เป็นลักษณะแรงดัน 5 โวลต์ เพื่อขยายสัญญาณดังกล่าวให้เป็น 15 โวลต์สำหรับส่งไปควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง ซึ่งวงจรขับเกตจะมีการแยกกราวด์ทางไฟฟ้า (Isolation) ระหว่างวงจรควบคุมและวงจรถูกกำลังด้วยหม้อแปลงความถี่สูง โดยที่วงจรขับ 1 วงจร จะทำหน้าที่ขับเกตของมอสเฟตกำลัง 2 ตัวซึ่งใช้สัญญาณขับตัวเดียวกัน



รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมของชุดวงจรขับเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 วงจรชุดขับเกต



รูปที่ 3.17 รูปชิ้นงานวงจรขับเกต

### 3.2.5.2 วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Circuit)

สัญญาณที่ขาเกตของ U1A และ U1B จากตัวออสซิลเลเตอร์ที่ทำงานที่ความถี่ประมาณ 4 เมกกะเฮิร์ต ที่ด้านขาออกของตัวออสซิลเลเตอร์นี้จะถูกแบ่งครึ่งความถี่โดยตัว U2A เพื่อที่จะสร้างสัญญาณสำหรับขับ

### 3.2.5.3 วงจรสัญญาณส่งจ่าย (Signal Transmission Circuit)

สัญญาณขับ (active-high) ถูกใช้เพื่อที่จะสามารถทำงานได้ที่ 2 เมกกะเฮิร์ต ของสัญญาณขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงตัวที่สอง เพื่อใช้ในการยกระดับของสัญญาณควบคุม

### 3.2.5.4 วงจรกู้คืนสัญญาณ (Signal Recovery Circuit)

สัญญาณที่ 2 เมกกะเฮิร์ต จากวงจรสัญญาณส่งจ่ายจะถูกจัดเรียงเพื่อที่จะได้ระดับแรงดัน 15 โวลต์และเข้าไปที่ขา 1 ของ U3A ส่วนวงจรทรานซิสเตอร์ JFET ทำหน้าที่เหมือนความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นกับสัญญาณควบคุม ซึ่งการไม่เป็นเชิงเส้นนี้ทำให้มันทนต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวน และทำให้ตัวเก็บประจุใน U3A คายประจุได้อย่างรวดเร็วขณะหยุดการทำงาน (Turn Off) ส่งผลให้ค่าความสูญเสียในช่วงสถานะคงตัว (Steady-State) ตัวมีค่าน้อยกว่าการใช้ตัวต้านทานแบบเชิงเส้น

### 3.2.5.5 วงจรขยายกระแสไฟฟ้า (Current Amplification Circuit)

U3A, U3B, U3C, U3D และตัว ZTX651/751 ทำงานรวมกัน เพื่อรับและจ่ายกระแสสูงเพื่อทำให้ตัวเก็บประจุของไอจีบีที (IGBT) ชาร์จ และดีสชาร์จเร็วขึ้นทำให้สวิตช์ไอจีบีทีทำงาน และหยุดทำงานได้เร็วขึ้นและต่อตัวต้านเพิ่มที่ด้านออก เพื่อลดความร้อนในตัว ZTX651 เนื่องจากการรับและจ่ายกระแสสูง

### 3.2.5.6 วงจรป้องกันไฟฟ้ตก (Under Voltage Lookout Circuit)

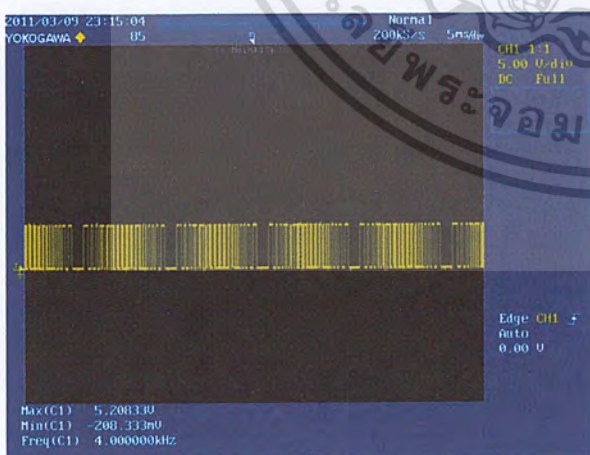
U4 จะยับยั้งการส่งจ่ายแรงดันของสัญญาณขับเคลื่อน ถ้าแรงดัน ( $V_{s2}$ ) ต่ำกว่าประมาณ 11.6 โวลต์ ซึ่งมันจะทำให้เกิด ฮิสเตอร์เรซิส (Hysteresis) จากการทดสอบทำให้ทรานซิสเตอร์  $Q_1$ - $Q_2$  ร้อน

### 3.2.5.7 วงจรส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Transmission Circuit)

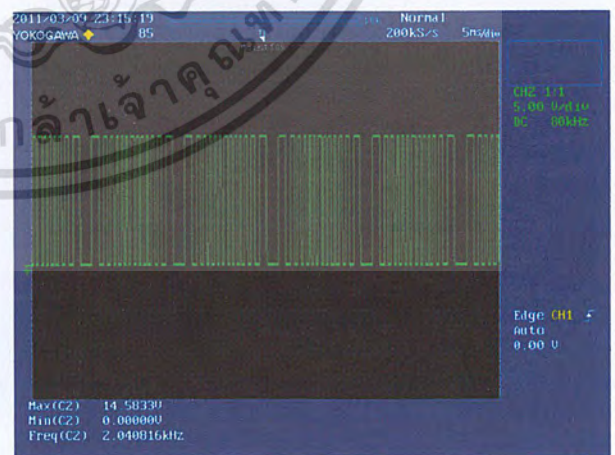
สัญญาณที่สมบูรณ์แล้วจากตัวขับออสซิลเลเตอร์ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงส่งจ่ายกำลังจะผ่านทางตัวทรานซิสเตอร์ที่ขยายกระแสไฟฟ้า

### 3.2.5.8 วงจรกู้คืนกำลังไฟฟ้า (Power Recovery Circuit)

สัญญาณที่ 2 เมกกะเฮิร์ต จากวงจรส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะถูกเรียงกระแสเพื่อได้แรงดันโดยประมาณที่ 18 โวลต์ ตัวตรวจจับแบบเชิงเส้นจะทำหน้าที่ลดแรงดันนี้ไปอยู่ที่ 15 โวลต์ และจากการทดสอบการทำงาน โดยรูปที่ 3.18(ก) เป็นสัญญาณขับเคลื่อนจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และรูปที่ 3.18(ข) เป็นรูปสัญญาณการขับเคลื่อนที่ผ่าน วงจรขับเคลื่อนแล้ว ซึ่งได้แรงดันประมาณ 15 โวลต์



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.18 (ก) สัญญาณที่ออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์

(ข) สัญญาณที่ผ่านวงจรขับเคลื่อน

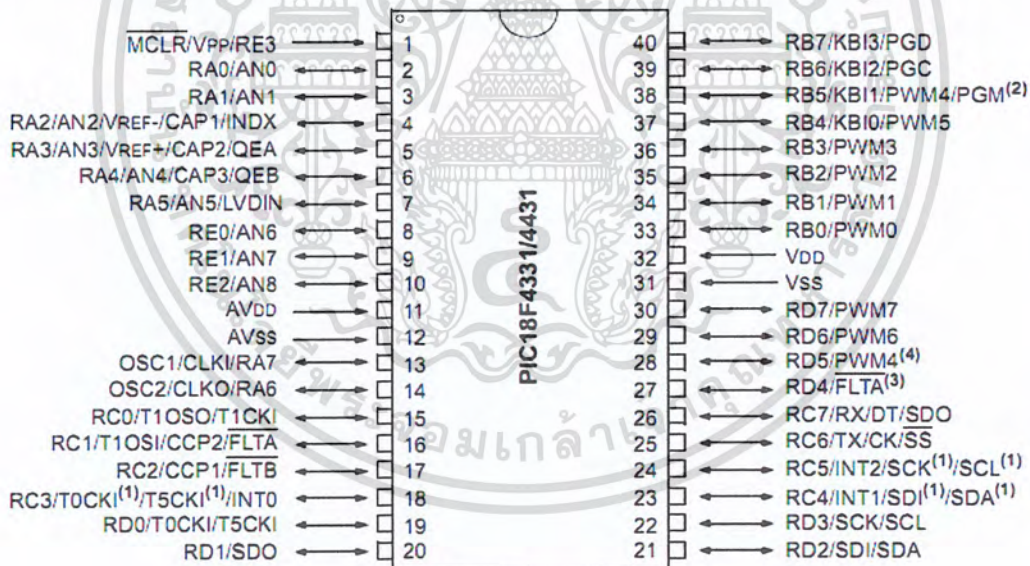
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบวงจรควบคุมและสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง

#### 3.3.1 วงจรควบคุม

การออกแบบวงจรควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณมาควบคุมการทำงานของมอเตอร์ทั้งในส่วนของเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ และในส่วนของวงจรเอช-ชอปเปอร์ทั้ง 5 เซลล์ รวมทั้งการแสดงผลทางหน้าจอแสดงผลแอลซีดี (LCD display) นั้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณทั้ง 14 สัญญาณโดยแบ่งเป็น สัญญาณควบคุมมอเตอร์ ในวงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ 4 สัญญาณ สัญญาณควบคุมชุดวงจรเอช-ชอปเปอร์เซลล์ละ 2 สัญญาณ รวมเป็น 10 สัญญาณ

หลักการทำงานของสัญญาณขับเคลื่อนจะเริ่มจากหน่วยประมวลผล (Control Processor Unit: CPU) โดยเลือกใช้ PIC (Peripheral Controller) เบอร์ 18F4431 ดังรูปที่ 3.19 แล้วทำการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี (C Language) เพื่อสร้างสัญญาณขับเคลื่อน รวมทั้งการควบคุมการเปิด-ปิด การเพิ่ม-ลดจำนวนขั้นของแรงดันเพื่อปรับแรงดันด้านขาออก และแสดงผลออกทางจอ LCD สาเหตุที่เลือกใช้ PIC เบอร์ 18F4431 เนื่องจากมีคุณสมบัติคือ มีพอร์ตให้เลือกใช้งานถึง 36 พอร์ตและมีหน่วยความจำข้อมูล 16 กิโลไบต์ ความถี่ในการใช้งาน 20 MHz สามารถเขียนและลบโปรแกรมได้มากถึง 100,000 ครั้ง



รูปที่ 3.19 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การออกแบบสัญญาณควบคุมการทำงานสวิตช์กำลัง

วงจรถ่าย-ชอปเปอร์ทำหน้าที่ในการสร้างแรงดันขาออกที่เป็นระดับขั้น โดยสามารถสร้างได้จากการนำวงจรถ่าย-ชอปเปอร์ต่ออนุกรมกันจำนวน 5 ชุดทางด้านทฤษฎีของหม้อแปลง ทำให้สามารถรวมเป็นรูปคลื่นแรงดันได้หลายระดับขั้น โดยเราสามารถสร้างระดับแรงดันที่แตกต่างกันได้มากที่สุดคำนวณได้จากสมการที่ 3.4 และสมการที่ 3.5 ซึ่งจำนวนแรงดันที่สามารถสร้างได้คือ 63 ระดับ

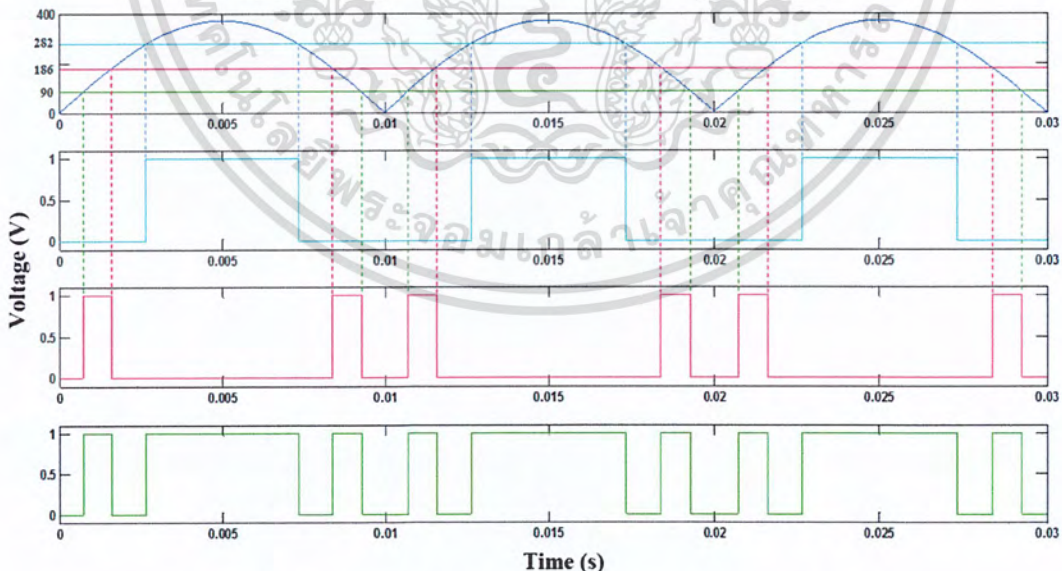
$$p = 2^n - 1 \quad (3.4)$$

$$n_{level} = (2 \times p) + 1 \quad (3.5)$$

$$m_i = \frac{V_{rms}}{V_{peak} / \sqrt{2}} \quad (3.6)$$

โดยที่

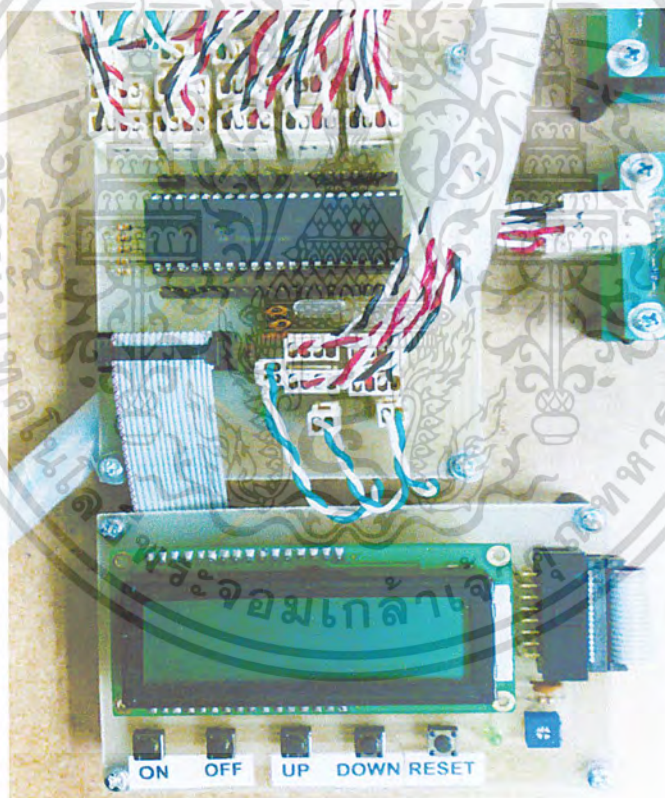
- $n$  คือ จำนวนชุดของหม้อแปลงทางด้านทฤษฎี  
 $p$  คือ จำนวนของระดับขั้นใน  $\frac{1}{4}$  ของ 1 ลูกคลื่น  
 $n_{level}$  คือ จำนวนของระดับขั้น  
 $V_{rms}$  คือ แรงดันขาออกอาร์เอ็มเอสที่ต้องการ  
 $V_{peak}$  คือ แรงดันขาออก peak ที่  $m_i=1$



รูปที่ 3.20 รูปแสดงตัวอย่างการสร้างสัญญาณ  $S_7$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างสัญญาณควบคุมชุดวงจรเอซี-ชอปเปอร์โดยยกตัวอย่างการสร้างสัญญาณ S<sub>7</sub> ที่มีอัตราเดューตีเท่ากับ 1.0/1.0 โดยสร้างรูปคลื่นไซน์สมบูรณ์ (Absolute sine wave) ที่มีขนาดแอมพลิจูดเท่ากับ 372 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต ตัดกับรูปคลื่นไฟตรงที่ระดับแรงดันทำงานของวงจรเอซี-ชอปเปอร์ชุดที่ 4 นั่นคือที่แรงดัน 90, 186 และ 282 โวลต์ และนำรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากแต่ละระดับมารวมกันเป็นสัญญาณเดียว จึงได้สัญญาณควบคุมวงจรดังรูปที่ 3.20 สาเหตุที่เลือกใช้ระดับแรงดันไฟตรงดังกล่าว แทนที่จะเป็น 96, 192 และ 288 โวลต์นั้น เนื่องจากรูปคลื่นแรงดันขาออกจะมีระดับขั้นแรงดันเปลี่ยนทุกๆ 12 โวลต์ ตามที่อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างขึ้นได้ จึงต้องทำการกำหนดให้ขอบของการเปลี่ยนแรงดันในแต่ละระดับอยู่ระหว่างระดับแรงดันนั้นๆ เช่น ที่ระดับ 96 โวลต์ จะมีขอบการเปลี่ยนระดับอยู่ที่ 90 และ 102 โวลต์ ตามลำดับ เพื่อที่จะทำให้รูปคลื่นแรงดันขาออกนั้น ใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากที่สุด โดยชิ้นงานวงจรควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.21



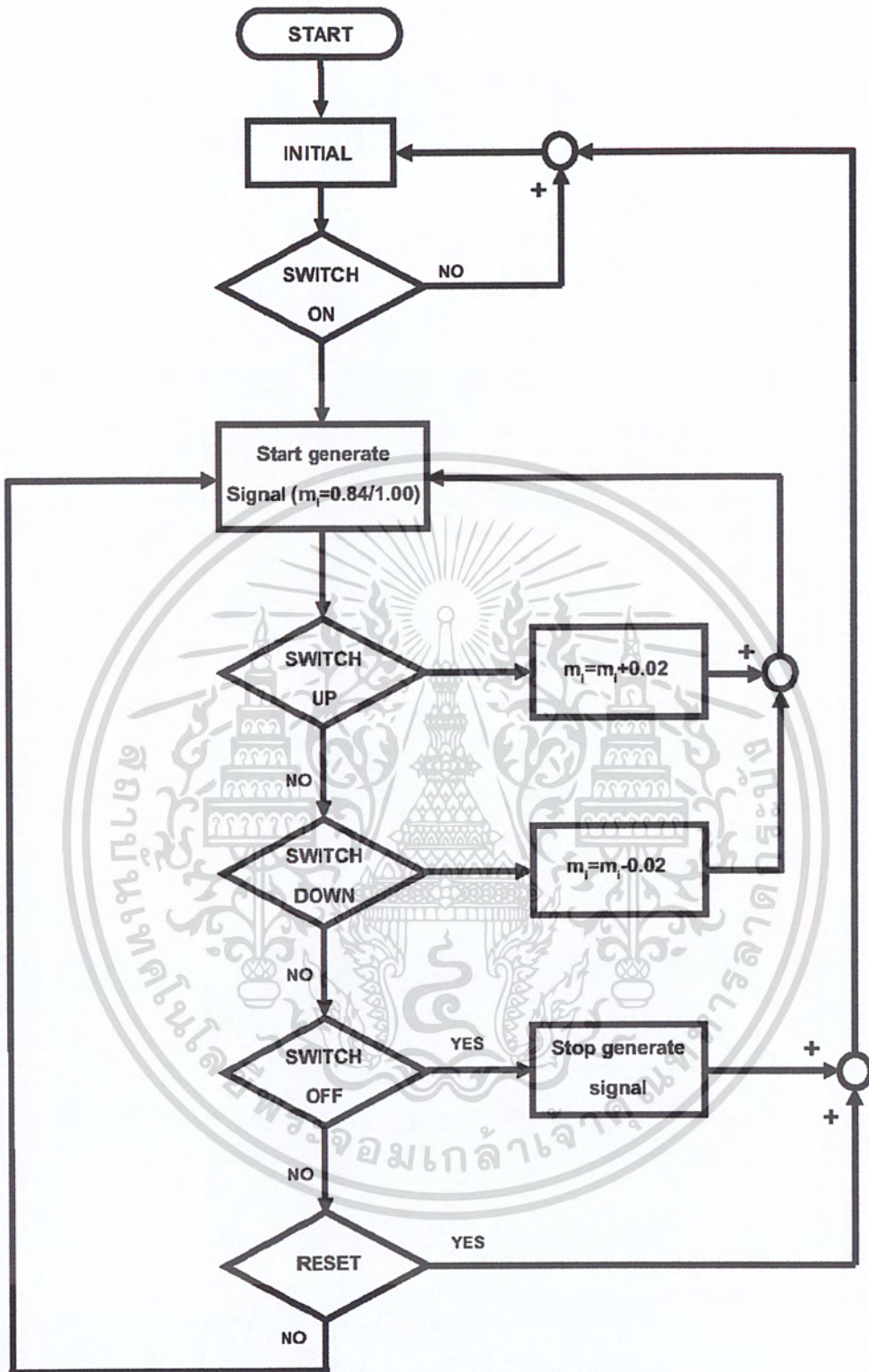
รูปที่ 3.21 ชิ้นงานวงจรควบคุมและจอแสดงผล LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ขั้นตอนการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ63 ระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด

สำหรับการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ 63 ระดับ มีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 3.22 คือ PIC 18F4431 จะรับคำสั่งจากการกดปุ่ม ON เพื่อเริ่มต้นการทำงานของวงจร LCD จะแสดงสถานะ เริ่มการทำงานโดยแสดงผลดัชนีมือคดดูเลต ( $m_i$ ) และจำนวนระดับขั้น P พร้อมกับจำนวนระดับแรงดันขาออก ซึ่งจะเริ่มต้นที่  $m_i=0.84/1.00$  ที่ระดับขั้น P=26 จำนวนระดับขั้นแรงดันขาออก 53 ระดับ ซึ่งจะทำการสร้างสัญญาณทั้งหมด 14 สัญญาณออกทางพอร์ต C และ B เพื่อสร้างแรงดันทางด้านขาออกเริ่มต้นที่ 220 โวลต์ จากนั้นจะรอรับคำสั่งต่อไป เช่น ในกรณีที่มีการเพิ่มภาระทางไฟฟ้า จะทำให้แรงดันทางด้านขาออกตกลงเล็กน้อย เนื่องจากมีกระแสไหลผ่านอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จึงเกิดแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซิ่งและอุปกรณ์อื่นๆ ในวงจร จึงต้องทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกโดยการกดปุ่ม UP เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับคำสั่ง ก็จะทำให้การเพิ่มดัชนีมือคดดูเลตขึ้นอีก 0.02 ที่ระดับขั้น P=27 ทำให้ได้แรงดันขาออกที่มีระดับแรงดันทั้งหมด 55 ระดับ โดยที่ชุดอินเวอร์เตอร์หลายระดับต้นแบบนี้ สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่มีระดับแรงดันได้สูงสุดถึง 63 ระดับ

ในขณะที่วงจรทำงานอยู่นั้น สามารถหยุดการทำงานได้โดยการกดปุ่ม OFF ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะหยุดการสร้างสัญญาณเพื่อไปขับมอสเฟตกำลัง และกลับเข้าสู่สถานะเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ดังนั้นเมื่อมีการเริ่มการทำงานใหม่ในครั้งต่อไป ก็จะมีการสร้างสัญญาณขั้นที่ดัชนีมือคดดูเลต  $m_i=0.84/1.00$  ทุกครั้ง

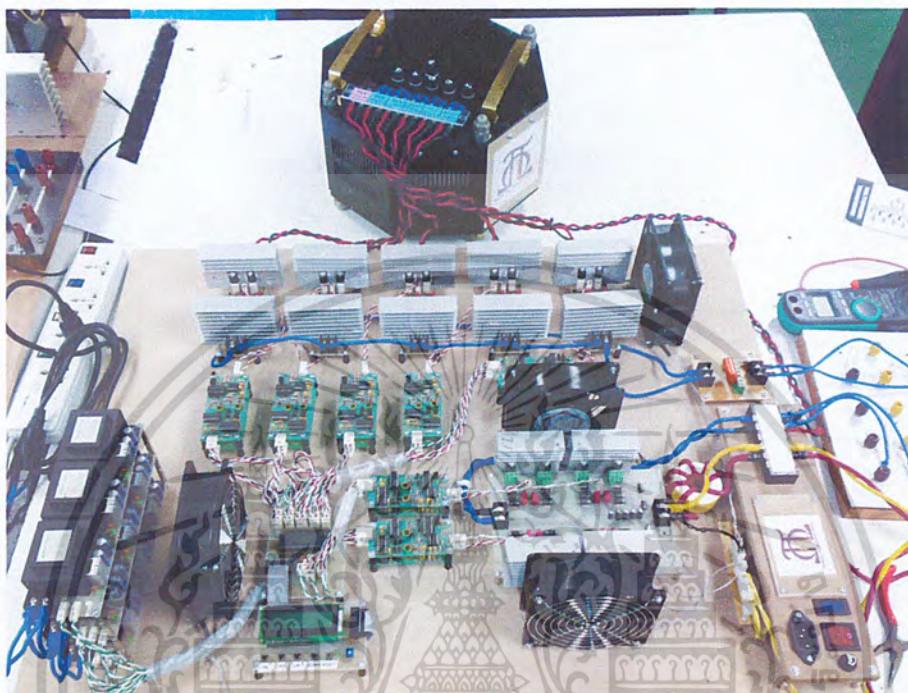


รูปที่ 3.22 แผนผังการทำงานของส่วนควบคุม

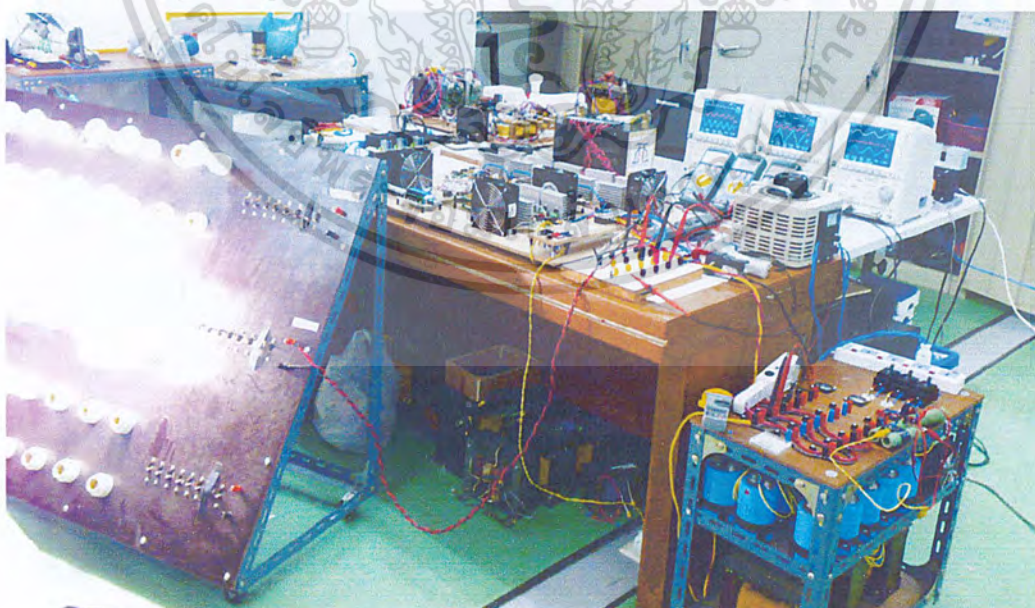
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดที่สมบูรณ์

เมื่อนำชิ้นงานแต่ละส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันแล้ว จะได้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ดังรูปที่ 3.23 และเมื่อทำการทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้าด้วยหลอดไฟ ดังรูป 3.24



รูปที่ 3.23 ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ



รูปที่ 3.24 การเชื่อมต่อโหลดเพื่อทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 บทสรุป

บทนี้ได้นำเสนอถึงการออกแบบและการสร้างชิ้นงานจริง โดยแยกตามการทำงาน ได้แก่ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงแบบหลายขด ส่วนวงจรเอซี-ชอปเปอร์ วงจรขับเคลื่อน และส่วนวงจรควบคุม ซึ่งได้แสดงรายละเอียด ของวงจร และชิ้นงานจริงที่ได้จัดทำขึ้น นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงขั้นตอนวิธีการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้า สำหรับผลการจำลองของแบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับ และผลการทดลองในการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่เป็นชิ้นงานจริง จะนำเสนอต่อไป ในบทที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

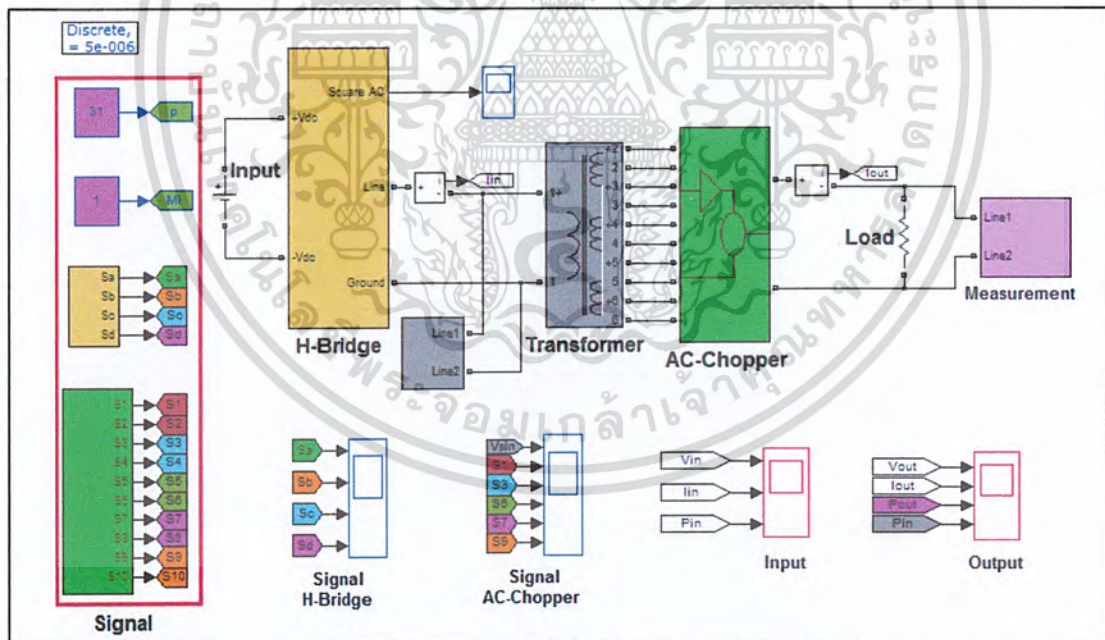
#### 4.1 บทนำ

สำหรับบทที่ 4 นี้ได้นำเสนอถึงผลการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเป็นการยืนยันถึงหลักการว่าถูกต้อง และเป็นไปตามทฤษฎี ก่อนที่นำไปสร้างชิ้นงานจริง และได้ นำเสนอผลการทดลองที่ได้จากเครื่องต้นแบบ

#### 4.2 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

##### 4.2.1 วัตถุประสงค์การจำลอง

เพื่อเป็นการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งเป็นการยืนยันถึงแนวความคิดว่าถูกต้องเป็นไปตามทฤษฎี และใช้เป็น แนวทางการดำเนินงานก่อนที่นำไปจัดสร้างชิ้นงานจริง สำหรับแผนผังการจำลองอินเวอร์เตอร์ หลายระดับแสดงในรูปที่ 4.1

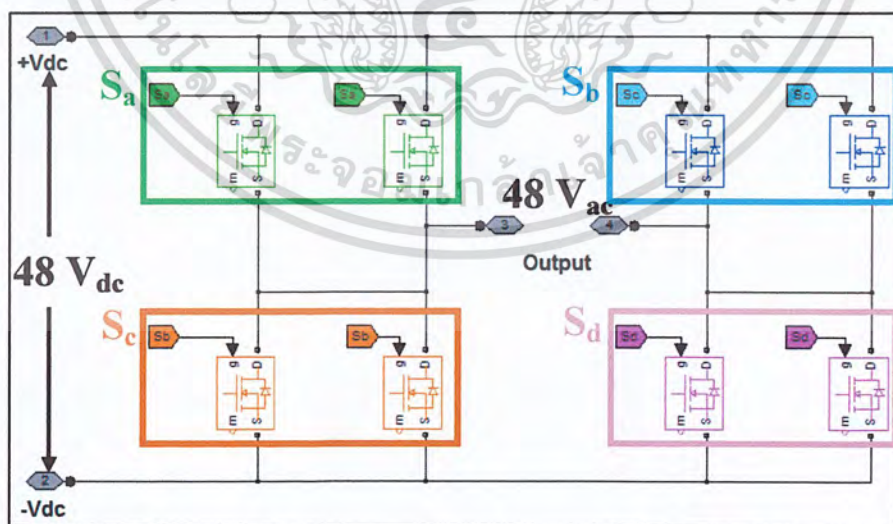


รูปที่ 4.1 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

##### 4.2.2 ขั้นตอนการจำลอง

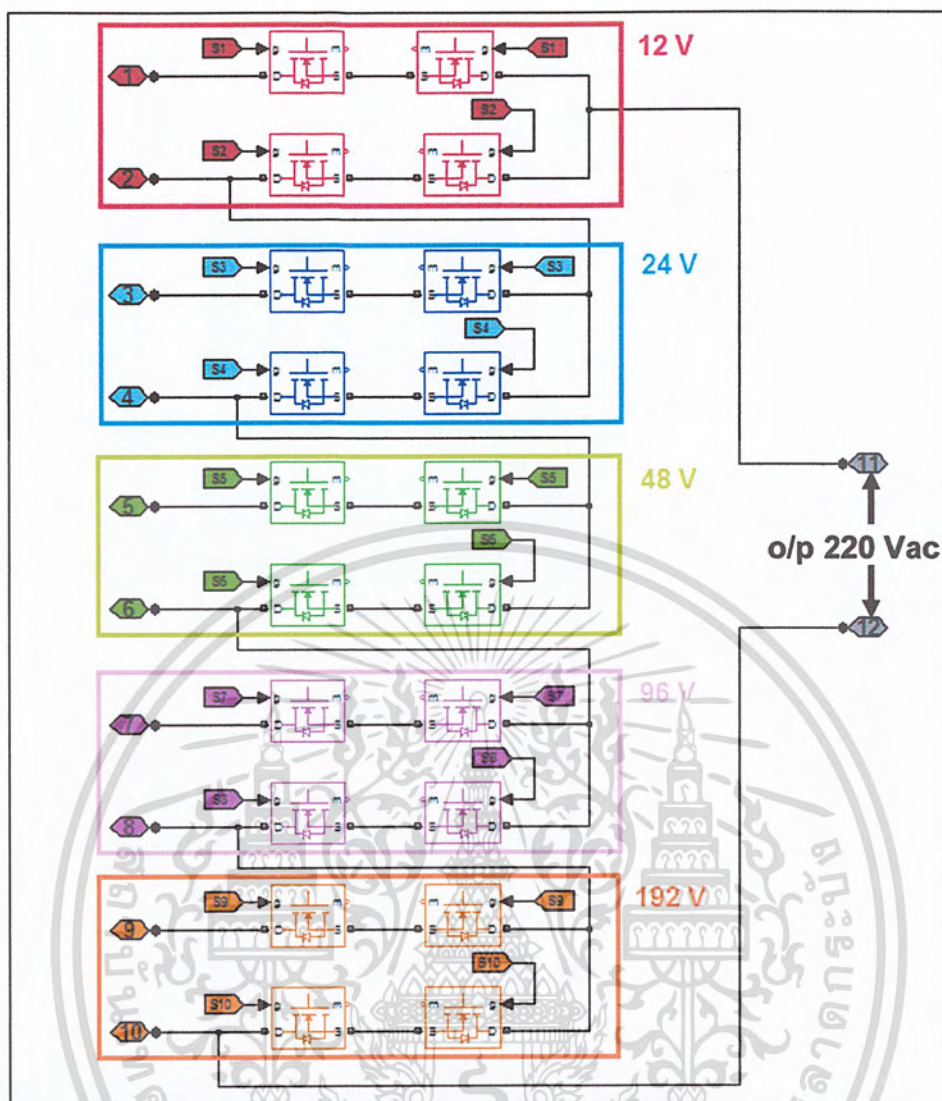
สำหรับขั้นตอนการสร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ และการสร้างแบบจำลองแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ใช้ควบคุม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ซึ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ เอช-บริดจ์ หม้อแปลงไฟฟ้า และเอซี-ชอปเปอร์ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ให้ตรงกับค่าของอุปกรณ์ที่ใช้จริง ซึ่งในรูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองในส่วนเอช-บริดจ์ ซึ่งมีลักษณะการทำงานเริ่มจากรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 48 โวลต์ จากนั้นให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำการเรียงแรงดันไฟฟ้าให้ได้รูปคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยมขนาด 48 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ โดยให้สวิตช์ชุดแรกคือ  $S_a$  กับ  $S_d$  ทำงานพร้อมกัน และสวิตช์ชุดสองคือ  $S_b$  และ  $S_c$  ทำงานพร้อมกัน โดยสองชุดนี้จะต้องไม่ทำงานพร้อมกัน หลังจากนั้นนำแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด 48 โวลต์ จ่ายให้กับหม้อแปลงด้านทฤษฎี เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด 12, 24, 48, 96, 192 โวลต์ และจ่ายเข้าสู่ส่วนเอซี-ชอปเปอร์ในแต่ละเซลล์ เพื่อให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในแต่ละเซลล์เรียงแรงดันไฟฟ้าให้ได้แบบที่ต้องการดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังรูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองในส่วนเอซี-ชอปเปอร์ การสร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นแบ่งเป็นสองส่วน คือสัญญาณที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์ในเอช-บริดจ์ และในเอซี-ชอปเปอร์ สัญญาณที่ป้อนให้กับเอช-บริดจ์ จะใช้สัญญาณ PWM ที่มีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ โดยแบ่งเป็นสองส่วนแรกคือป้อนให้ สวิตช์  $S_a$  และสวิตช์  $S_b$  ซึ่งสัญญาณจะมีลักษณะตรงข้ามกัน ส่วนที่สองคือสัญญาณที่ป้อนให้กับสวิตช์  $S_c$  และสวิตช์  $S_d$  ที่มีลักษณะตรงข้ามกันเช่นเดียวกัน ซึ่งสัญญาณ  $S_a$  จะช้ากว่าสัญญาณ  $S_c$  เป็นเวลา 0.035 มิลลิวินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ส่วนสัญญาณที่ป้อนให้กับ เอซี-ชอปเปอร์นั้นจะได้จากการนำรูปคลื่นไซน์ไปคูณกับค่าดัชนีมอดูเลตก่อน แล้วนำไปทำให้เป็นค่าสัมบูรณ์ก่อนที่จะนำไปเปรียบเทียบกับรูปคลื่นเส้นตรงที่ได้จากการคำนวณ ถ้าค่ารูปคลื่นไซน์สัมบูรณ์มากกว่ารูปคลื่นเส้นตรง ให้แสดงค่าเป็น 1 ถ้าน้อยกว่าให้แสดงค่าเป็น 0 และนำรูปคลื่นสัญญาณที่ได้ไปใช้ในการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เซลล์ต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.5

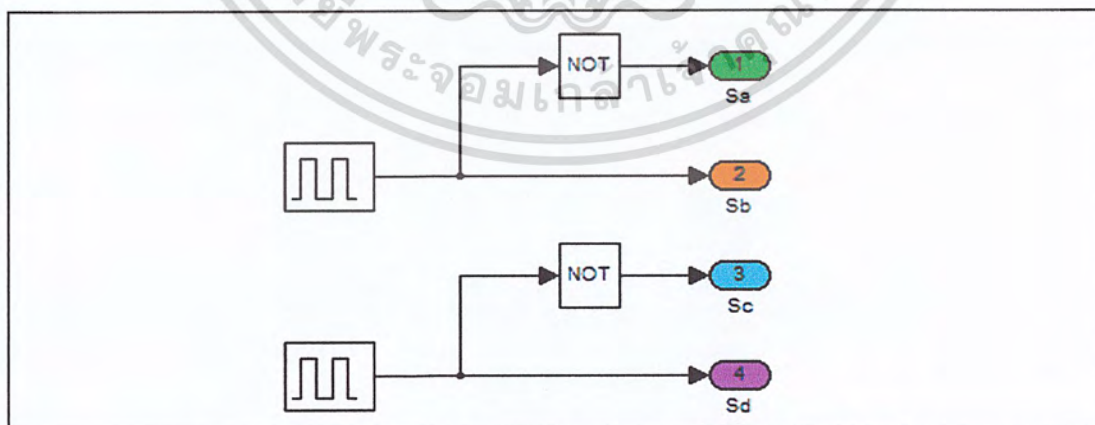


รูปที่ 4.2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับส่วนเอช-บริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

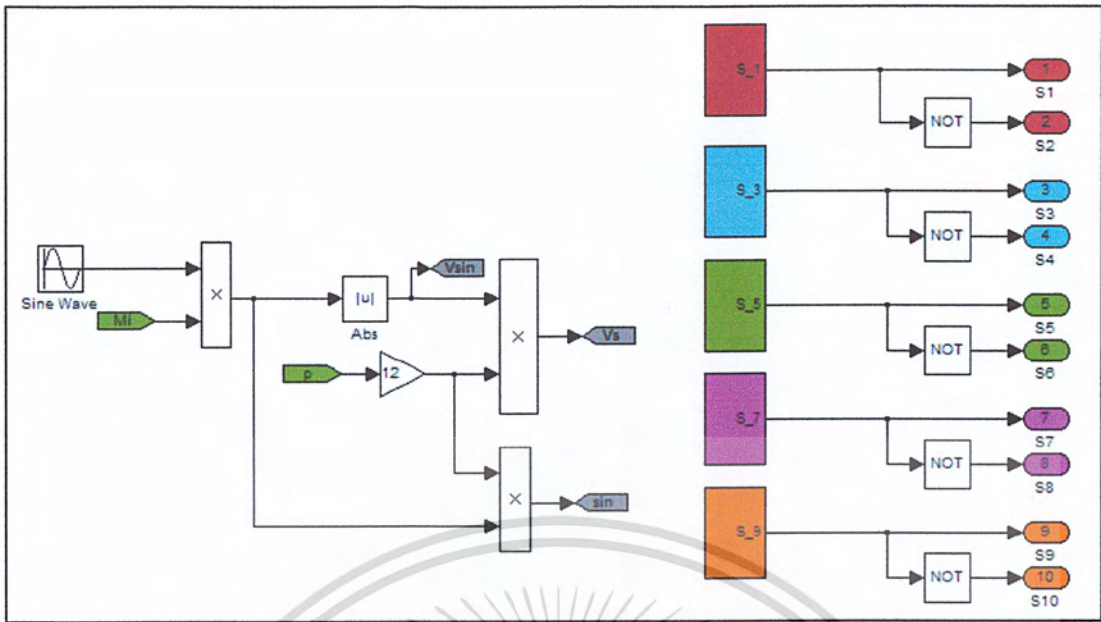


รูปที่ 4.3 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับส่วนเอซี-ชอปเปอร์



รูปที่ 4.4 แบบจำลองการสร้างสัญญาณควบคุมส่วนเอช-บริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แบบจำลองการสร้างสัญญาณควบคุมส่วนเอซี-ชอปเปอร์

ขั้นตอนสุดท้าย คือ การจำลองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 48 โวลต์ ให้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ และการจำลองภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทาน และภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ไฟฟ้า

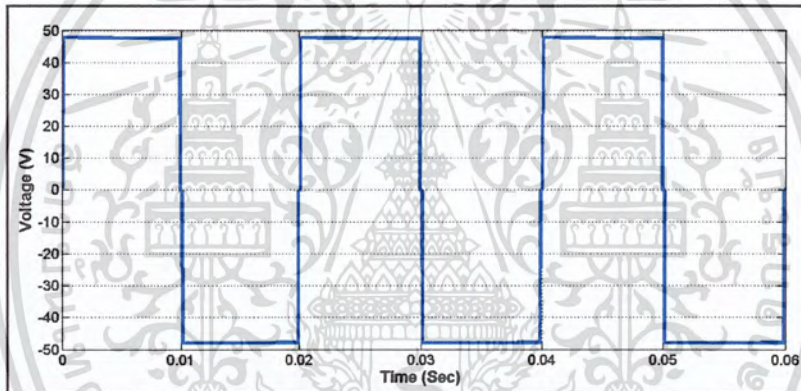
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการทดลองแบบจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

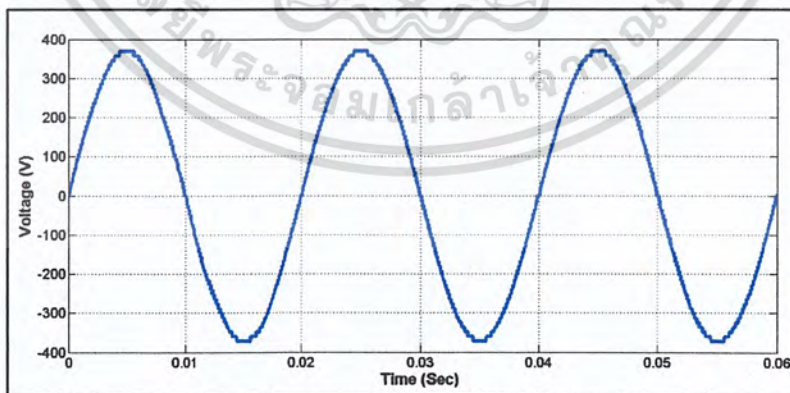
การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink สามารถจำลองการทำงานเพื่อศึกษารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า และค่าทางไฟฟ้า ก่อนนำไปสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้ผลเป็นดังนี้

#### 4.3.1 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

จากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่ารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกส่วนของเอช-บริดจ์ จะให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในลักษณะรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.6 จากนั้นทำการสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าลักษณะรูปคลื่นสี่เหลี่ยมให้มีแรงดันไฟฟ้าขนาด 12, 24, 48, 96, 192 โวลต์ ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ multi-winding และทำการรวมรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าให้ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าตามที่ต้องการโดยส่วนของเอช-ชอปเปอร์ ซึ่งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับนี้จะมีรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับส่วนเอช-บริดจ์



รูปที่ 4.7 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

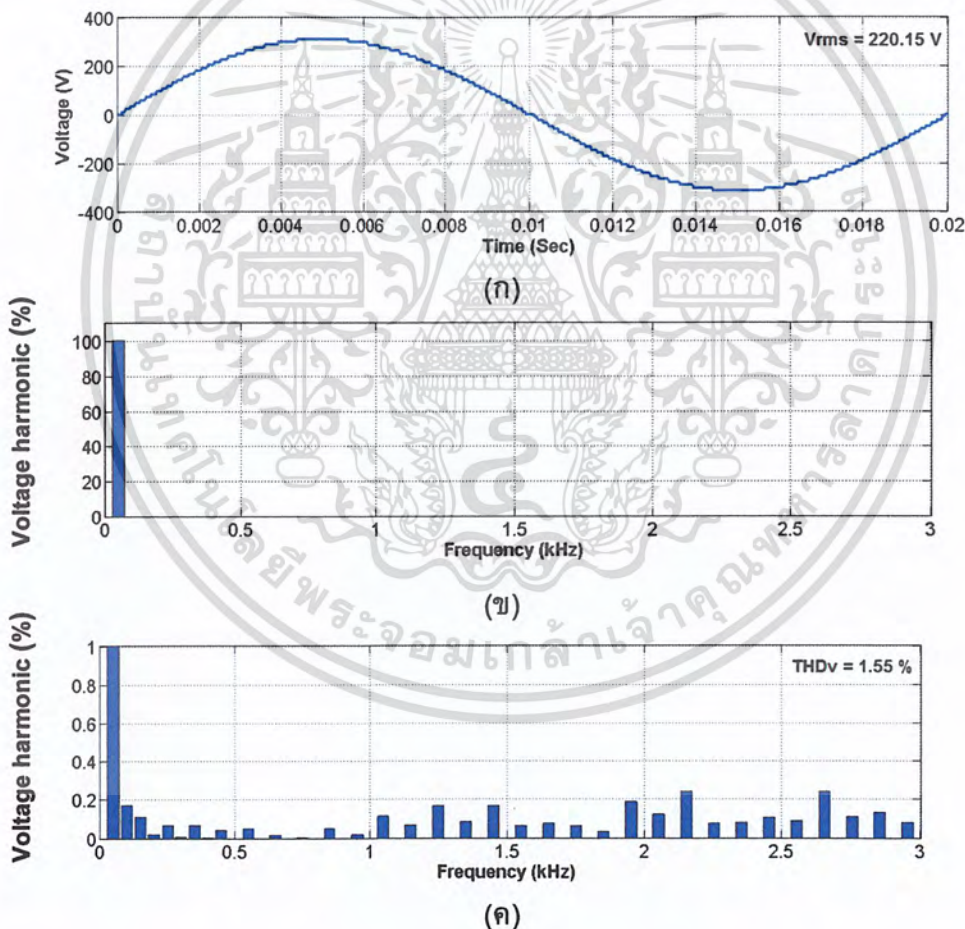
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับโดยการปรับค่าดัชนีมอดดูเลต

แรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยการปรับค่าดัชนีมอดดูเลต ซึ่งผลการจำลองต่อไปนี้เป็นการศึกษาผลของการปรับค่าดัชนีมอดดูเลตที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

##### 4.3.2.1 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ดัชนีมอดดูเลต 0.84

รูปที่ 4.8 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะเห็นได้ว่ามีรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ และให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 220.15 โวลต์ ซึ่งมีจำนวนรอบอยู่ที่ 53 ระดับ จากรูปที่ 4.8 (ข) แสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1.55 % ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ



รูปที่ 4.8 (ก) แรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ  $m_i = 0.84/1.00$   
 (ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก  $m_i = 0.84/1.00$   
 (ค) รูปขยายสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก

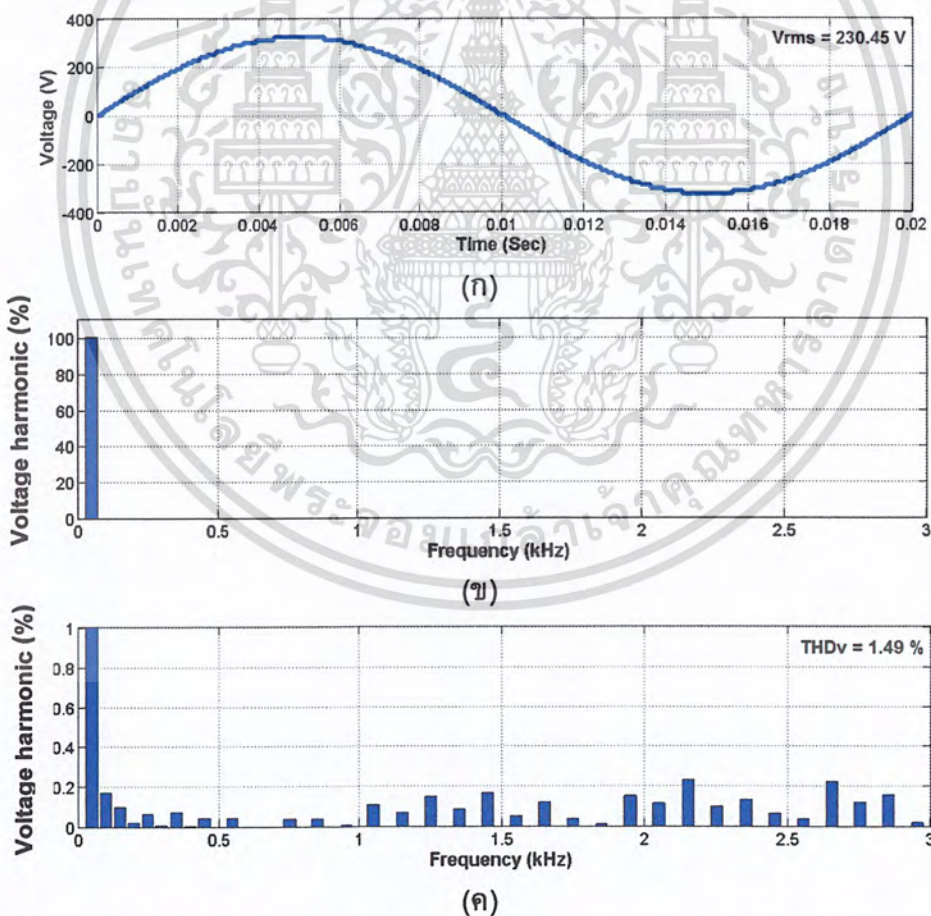
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2.2 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ ดัชนีมอดดูเลต 0.88

รูปที่ 4.9 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะเห็นได้ว่ามีรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ และให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 230.45 โวลต์ ซึ่งมีระดับขั้นอยู่ที่ 55 ระดับ จากรูปที่ 4.9 (ข) แสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนมีค่าเท่ากับ 1.49 %

#### 4.3.2.3 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ ดัชนีมอดดูเลต 1.00

รูปที่ 4.10 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะเห็นได้ว่ามีรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ และให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 262.27 โวลต์ ซึ่งมีระดับขั้นอยู่ที่ 63 ระดับ จากรูปที่ 4.10 (ข) แสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนมีค่าเท่ากับ 1.33 % ซึ่งดัชนีมอดดูเลตนี้เป็นค่าที่มากที่สุดที่สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าได้มากและใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ได้มากที่สุด

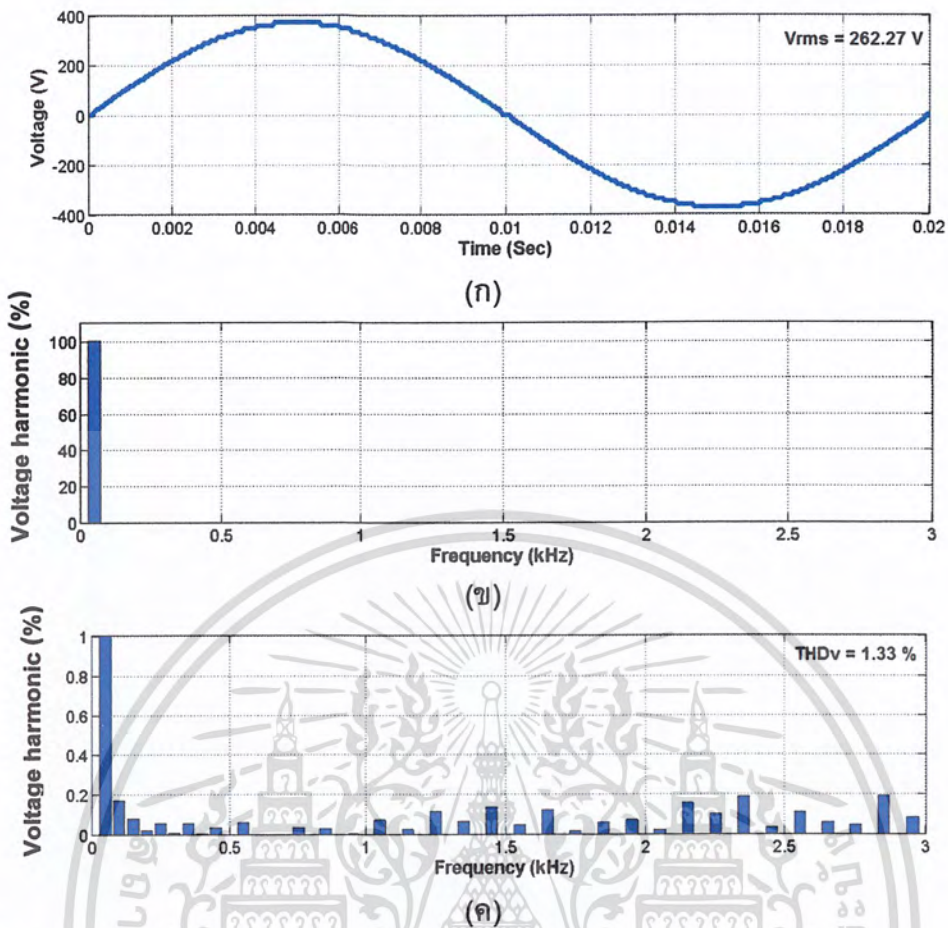


รูปที่ 4.9 (ก) แรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ  $m_i = 0.88/1.00$

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก  $m_i = 0.88/1.00$

(ค) รูปขยายแกนตั้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

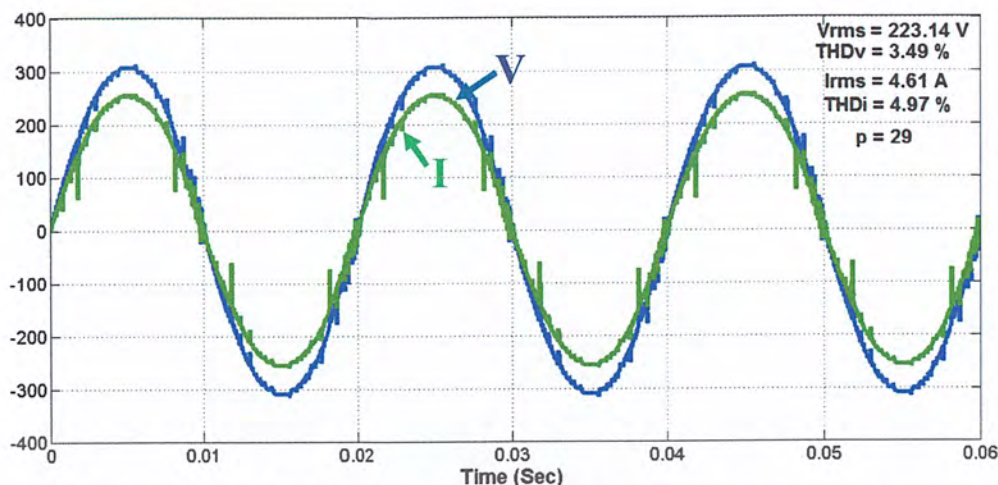


รูปที่ 4.10 (ก) แรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ  $m_f = 1.00/1.00$   
 (ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก  $m_f = 1.00/1.00$   
 (ค) รูปขยายแกนนตั้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก

#### 4.3.2.4 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 1 กิโลวัตต์

รูปที่ 4.11 แสดงแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามื้มเฟสตรงกัน และ ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 223.14 โวลต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันมีค่าเท่ากับ 3.49 % ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4.61 แอมป์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้ามื้ค่าเท่ากับ 4.97 % ที่ดัชนีมอดดูเลตเท่ากับ 0.98 ซึ่งพบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 86 % ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียในเอช-บริดจ์เท่ากับ 8.33 % เป็นค่าความสูญเสียในหม้อแปลงเท่ากับ 2 % และเป็นค่าความสูญเสียในเอซี-ชอปเปอร์เท่ากับ 4.27 %

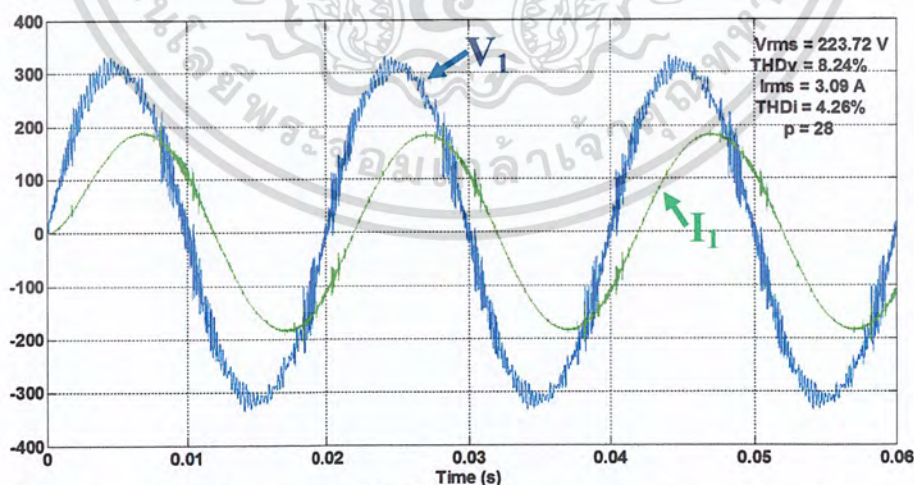
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ  
เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 1 กิโลวัตต์

#### 4.3.2.5 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ขนาด 746 วัตต์ ตัวประกอบกำลังล่าช้า 0.8

รูปที่ 4.12 แสดงแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ามีเฟสนำรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 223.72 โวลต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนทางแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 8.24 % ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.09 แอมป์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนทางไฟฟ้ามียค่าเท่ากับ 4.26 % ที่ดัชนีมีอดตุเลตเท่ากับ 0.90 และมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 90 % จากรูปคลื่นกระแสที่ได้จากการจำลอง สังเกตได้ว่าจะมีช่วงที่กระแสเกิดการ

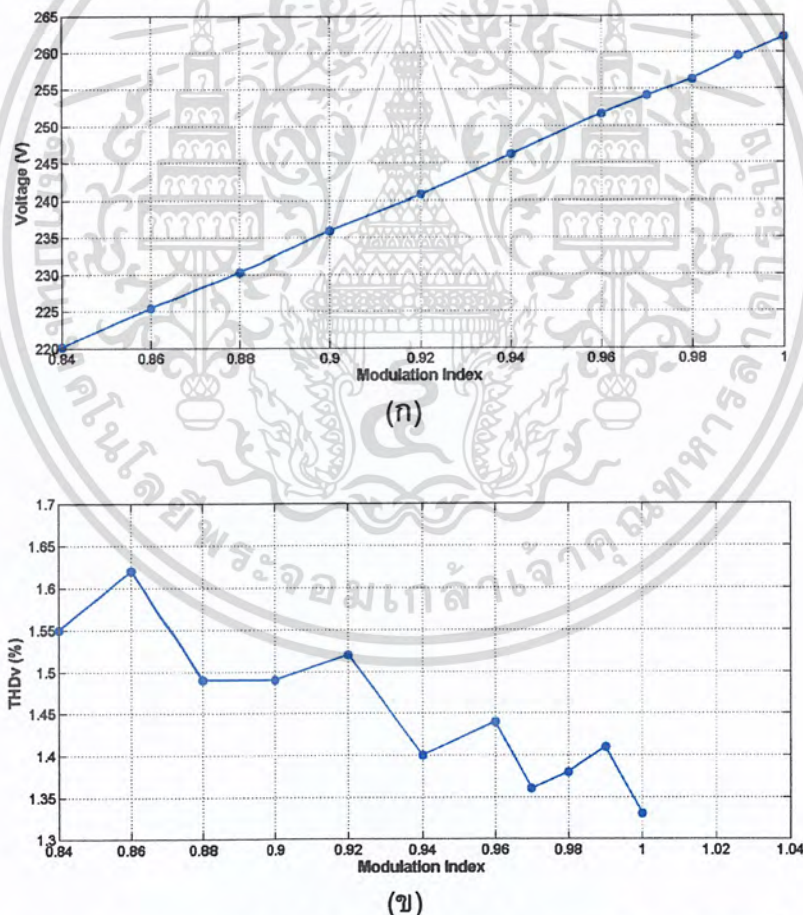


รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ  
เมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าชนิดมอเตอร์ขนาด 746 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 สรุปผลการจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากผลการจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถเปลี่ยนแปลง และใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ยิ่งขึ้น โดยการปรับค่าดัชนีมอดดูเลต ซึ่งการปรับค่าดัชนีมอดดูเลตเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเพิ่มขึ้น และรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าก็จะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากขึ้นด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.13 ที่สภาวะไร้อะการทางไฟฟ้า เมื่อเพิ่มดัชนีมอดดูเลตขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเพิ่มขึ้นด้วย และค่าความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าก็จะลดลงด้วยเช่นกัน เพื่อสำหรับการปรับแรงดันด้านขาออกให้คงที่ ในกรณีที่จ่ายโหลดมากขึ้น เนื่องจากจะทำให้เกิดแรงดันตก โดยค่าดัชนีมอดดูเลตเท่ากับ 0.84 นี้จะถูกทำไปใช้ในการตั้งเป็นค่าเริ่มต้นการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เพราะแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในขณะที่ไม่มีภาระไฟฟ้ามามีค่า 219.85 โวลต์ ซึ่งใกล้เคียงกับแรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในประเทศไทย และสามารถทำการเพิ่มแรงดันขึ้นได้ประมาณ 5 โวลต์ต่อการปรับเพิ่มดัชนีมอดดูเลต 0.02



รูปที่ 4.13 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดดูเลตกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก  
(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมอดดูเลตกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การทดลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

การทดลองการทดสอบเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีอุปกรณ์ประกอบการทดลองและเครื่องมือดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply)
2. หม้อแปลง 1 เฟสชนิดปรับค่าได้ (Variac 1 phase)
3. หม้อแปลงแยกกราวด์ 1:1 (Isolate ground transformer)
4. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 (YOKOGAWA Digital Oscilloscope DL1640)
5. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น PZ4000 (YOKOGAWA Digital Oscilloscope PZ4000)
6. มัลติมิเตอร์ (Multimeter)
7. แคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter)

##### 4.4.1 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ในกรณีที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า

##### 4.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุม วงจรแสดงผลจอ LCD วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. จ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 48 โวลต์
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 48 โวลต์ เข้ากับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

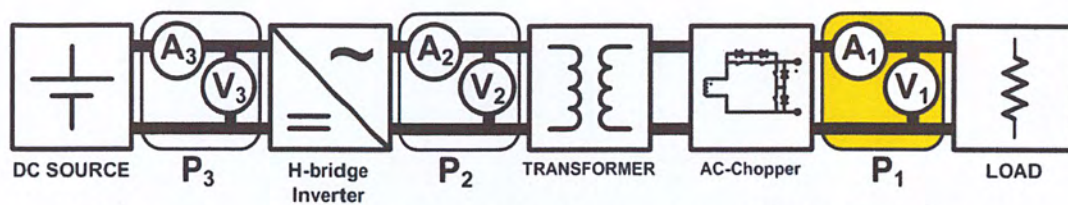
##### 4.4.3 ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า พบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 48 โวลต์ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 226.169 โวลต์ ขณะไม่ใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 225.722 โวลต์ ขณะใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก 53 ระดับ ที่มีลักษณะคล้ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ จากนั้นได้ทำการบันทึกรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก 53 ระดับที่ได้ ทั้งในกรณีที่ไม่ใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15

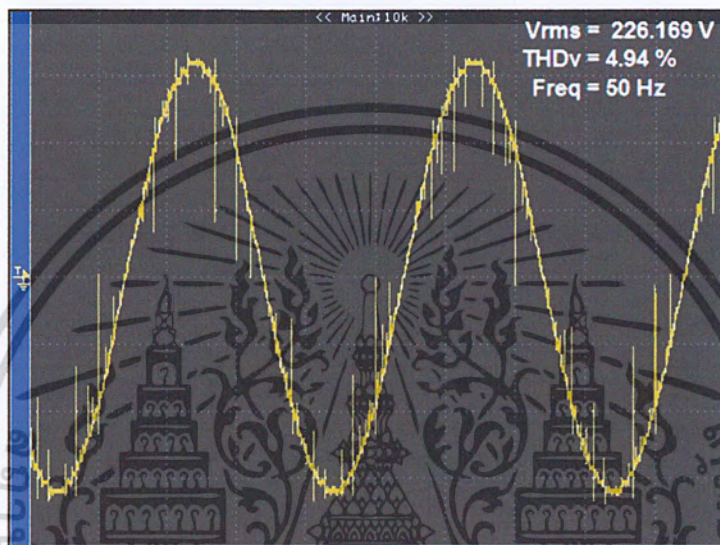
##### 4.4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันด้านขาออกมีค่าใกล้เคียงแรงดันของอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งมีรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงแรงดันรูปคลื่นไซน์ และมีจำนวนของระดับแรงดัน 53 ระดับ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีและผลการจำลองที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 และบทที่ 4 ทั้งนี้รูปคลื่นแรงดันขาออกที่ได้ย่อมจะมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันรูปคลื่นไซน์ต่อไป

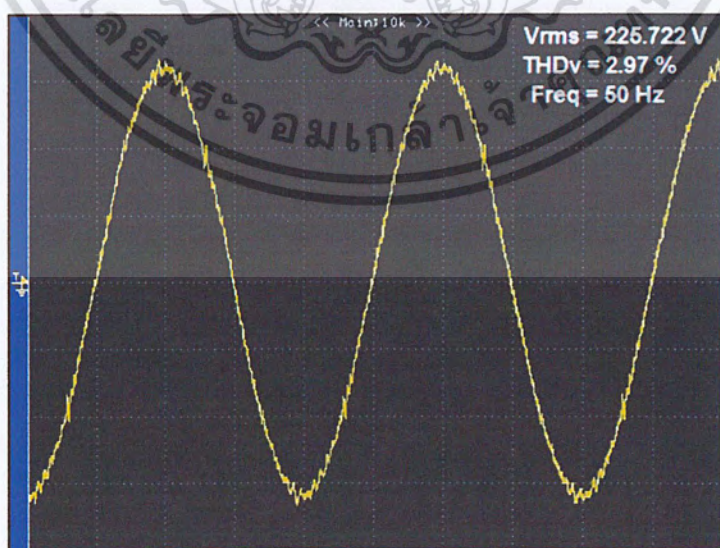
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 รูปวงจรการทดลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับกรณีที่ยังไม่มีการเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ กรณีไม่ใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 4.16 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 การทดลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อปรับค่าดัชนีมอดดูเลต

### 4.5.1 วัตถุประสงค์

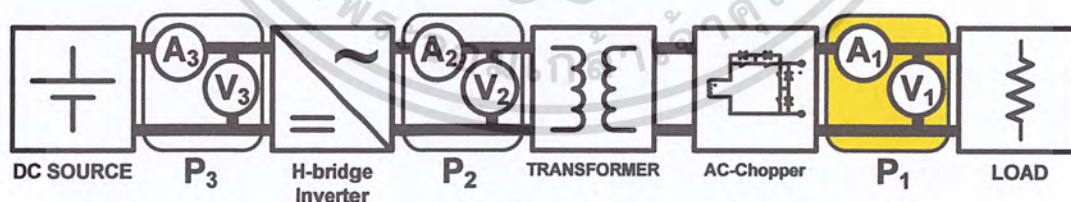
เพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ในกรณีที่ยังไม่มี การเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก และความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า

### 4.5.2 ขั้นตอนการทดลอง

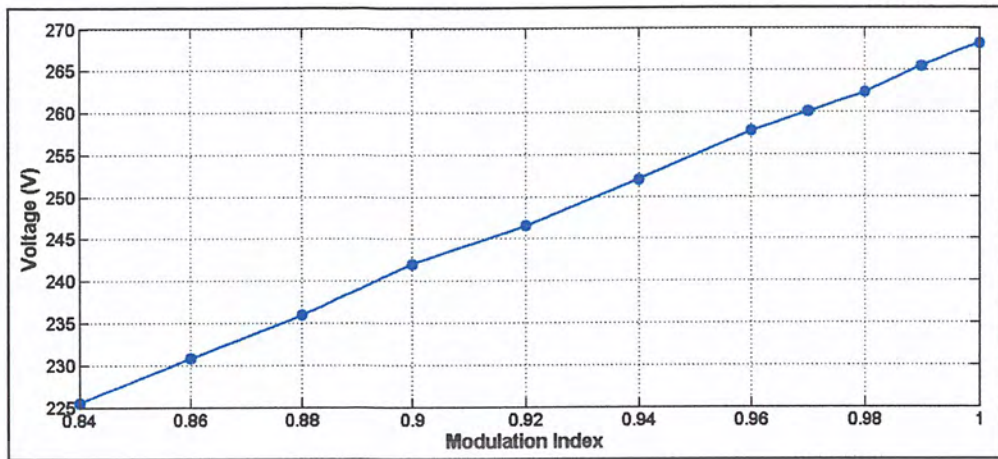
1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุม วงจรแสดงผลจอ LCD วงจรสัญญาณขับเคลื่อน
2. จ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 48 โวลต์
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 48 โวลต์ เข้ากับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
5. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง
6. ปรับดัชนีมอดดูเลตเพิ่มขึ้น แล้วทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลอง

### 4.5.3 ผลการทดลอง

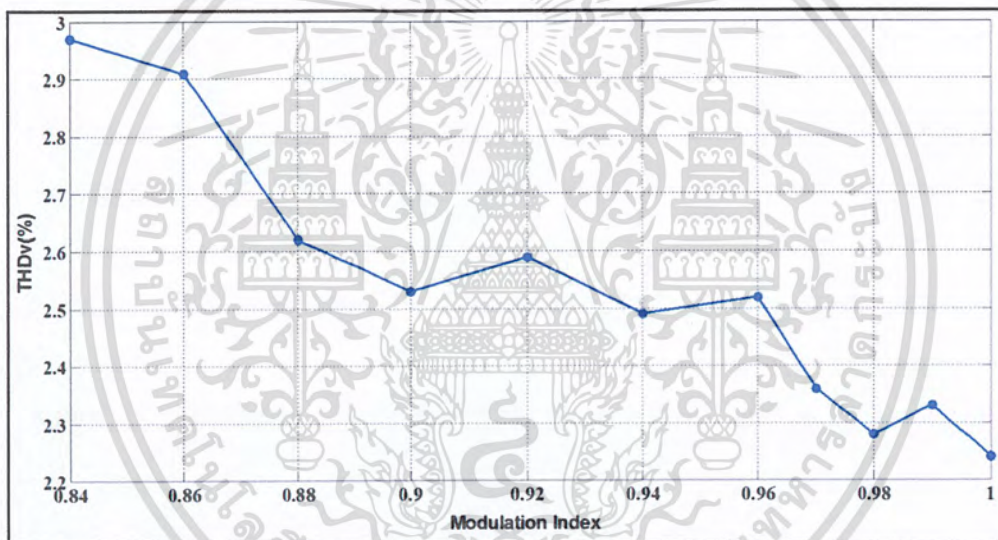
จากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในกรณีที่ไม่มี การเชื่อมต่อเข้ากับภาระทางไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก และความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า พบว่า การปรับดัชนีมอดดูเลตเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าลดลง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกได้ดังรูปที่ 4.18 และความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดดูเลตกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.17 รูปวงจรถ่ายการทดลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อปรับค่าดัชนีมอดดูเลต



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดูเลตกับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดูเลตกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า

#### 4.5.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้เพิ่มขึ้นได้ โดยการเปลี่ยนค่าดัชนีมอดูเลตเพิ่มขึ้น และการเพิ่มดัชนีมอดูเลตนี้จะทำให้ค่าความผิดเพี้ยนทางแรงดันไฟฟ้าลดลงด้วย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีและผลการจำลองที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 และบทที่ 4 โดยแรงดันที่วัดได้จะเป็นแรงดันขณะไม่มีการเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้า และจะเพิ่มขึ้นประมาณ 5 โวลต์โดยเฉลี่ยต่อการปรับเพิ่มดัชนีมอดูเลตขึ้น 0.02 สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับนี้ สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกได้สูงสุด 268.2 โวลต์ ที่ดัชนีมอดูเลต 1.00/1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.6 การทดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทาน

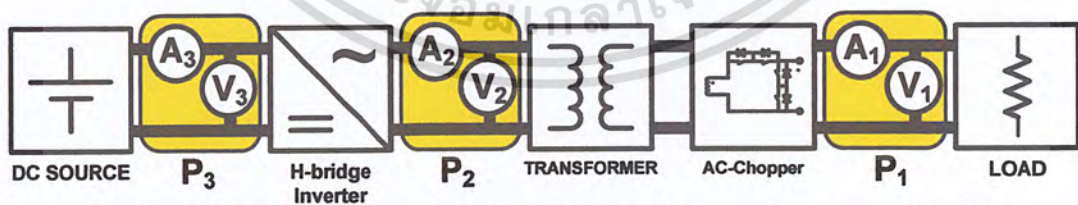
### 4.6.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาเข้า ค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ รวมถึงค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาออกของเอช-บริดจ์ และค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้า

2. เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทาน

### 4.6.2 ขั้นตอนการทดลอง

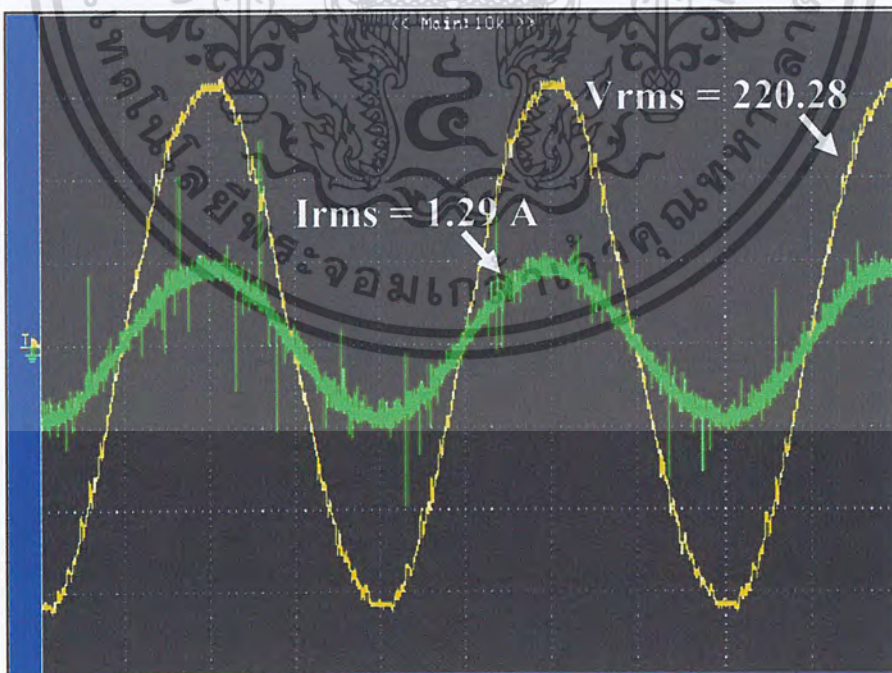
1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุม วงจรแสดงผลจอ LCD วงจรสัญญาณขั้วเบส
2. จ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 48 โวลต์
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 48 โวลต์ เข้ากับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
4. ใช้ ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น PZ4000 แบบ 8 ช่องสัญญาณ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า ค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาเข้า วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาออก ที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ รวมทั้งวัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาออก ในส่วนเอช-บริดจ์
5. ใช้ ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า และรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านขาเข้า ที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
6. ใช้ ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก และรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านขาออก ที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
7. ใช้ ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก และรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านขาออก ที่ได้ในส่วนเอช-บริดจ์ ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
8. ใช้ ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก และรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านขาออก ที่ได้ในส่วนหม้อแปลงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
9. เพิ่มภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขึ้น และวัดค่าตามข้อ 4 ถึงข้อ 6



รูปที่ 4.20 รูปวงจรการทดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทาน

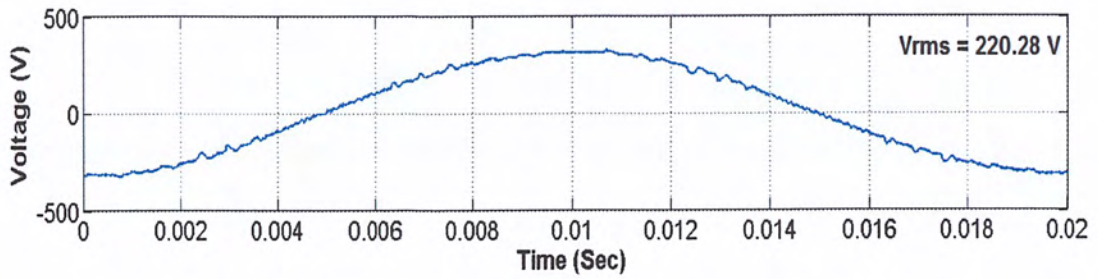
#### 4.6.3 ผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะพบว่าในสภาวะแรงดันไฟฟ้าปกติ อินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะทำงานที่  $m_f = 0.84/1.00$  และไม่เชื่อมต่อเข้ากับภาระไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าชนิดตัวต้านทานนั้นมีค่า 223.70 โวลต์ และเมื่อเพิ่มภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขึ้นจะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าชนิดตัวต้านทานลดลง จึงปรับจำเป็นต้องปรับค่าดัชนีมอดดูเลตเพิ่มขึ้นเพื่อให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าชนิดตัวต้านทานเพิ่มให้ได้ใกล้เคียง 220 โวลต์ โดยในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดความต้านทานขนาด 0.2846 กิโลวัตต์ สามารถบันทึกรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้ดังรูปที่ 4.21 ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 220.28 โวลต์ และมีค่าความผิดเพี้ยนทางแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3.54 % ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 1.29 แอมป์ ค่าความผิดเพี้ยนทางกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 12.93 % ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งวัดค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้เท่ากับ 0.303 กิโลวัตต์ กำลังไฟฟ้าขาออกของส่วนเอช-บริดจ์ มีค่าเท่ากับ 0.286 กิโลวัตต์ และวัดกำลังไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้เท่ากับ 0.2846 กิโลวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และสามารถวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าในจุดต่างๆได้ โดยด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้ดังรูปที่ 4.25 ด้านออกของส่วนเอช-บริดจ์แสดงดังรูปที่ 4.26 ด้านขาเข้าของส่วนเอ-ซี ซอปเปอร์ เซลล์ 12 โวลต์, เซลล์ 24 โวลต์, เซลล์ 48 โวลต์, เซลล์ 86 โวลต์ และเซลล์ 192 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ

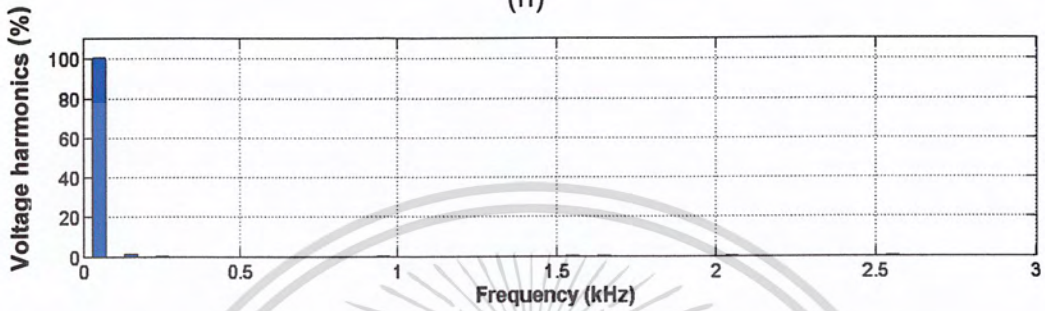


รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

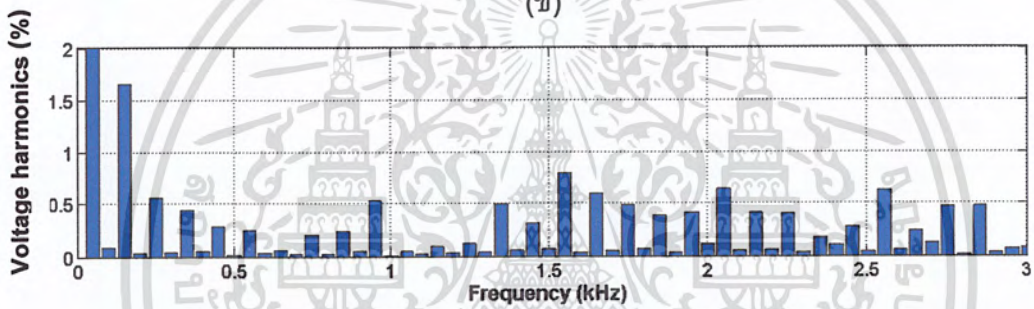
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

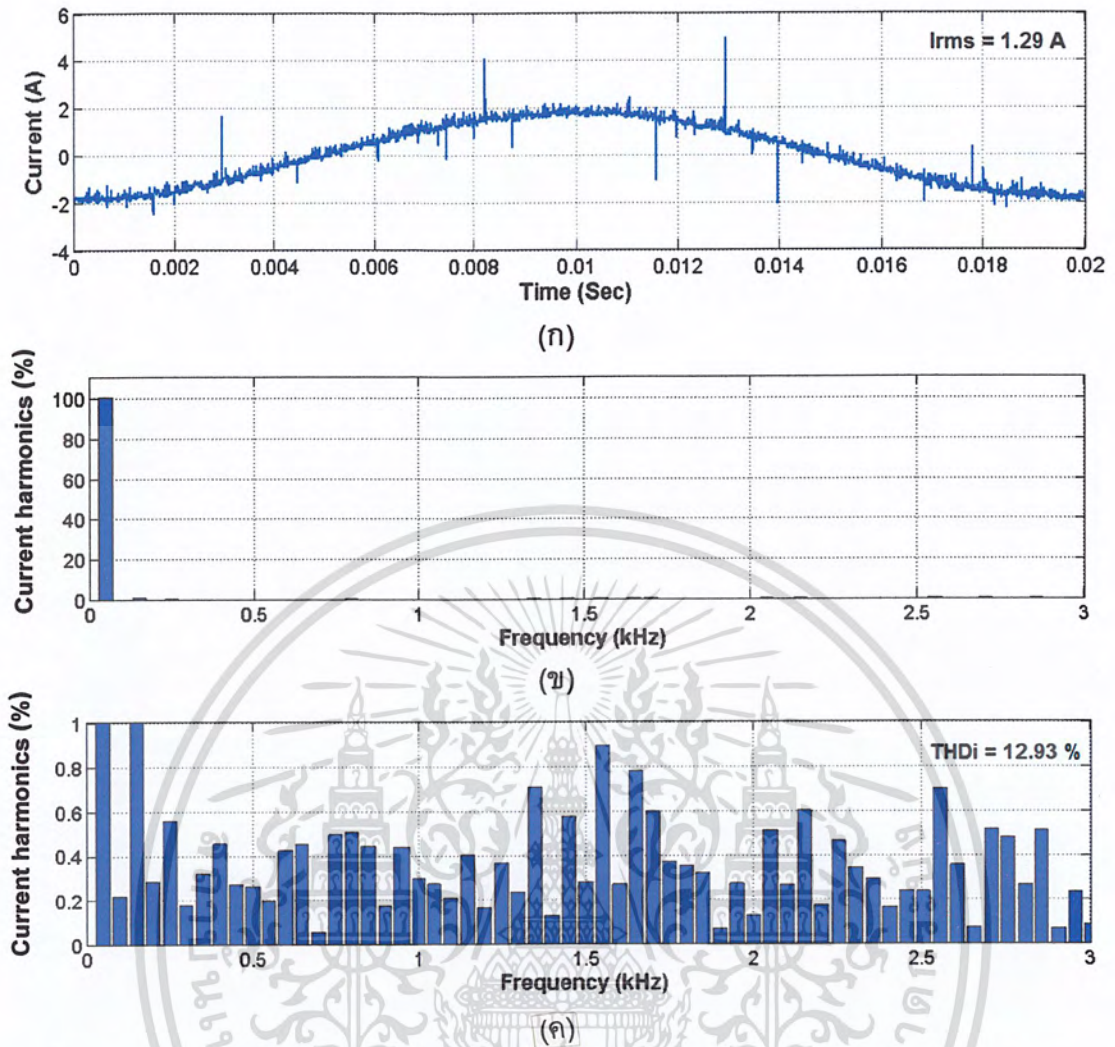


(ค)

รูปที่ 4.22 (ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

(ค) รูปขยายแกนด์จ้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก

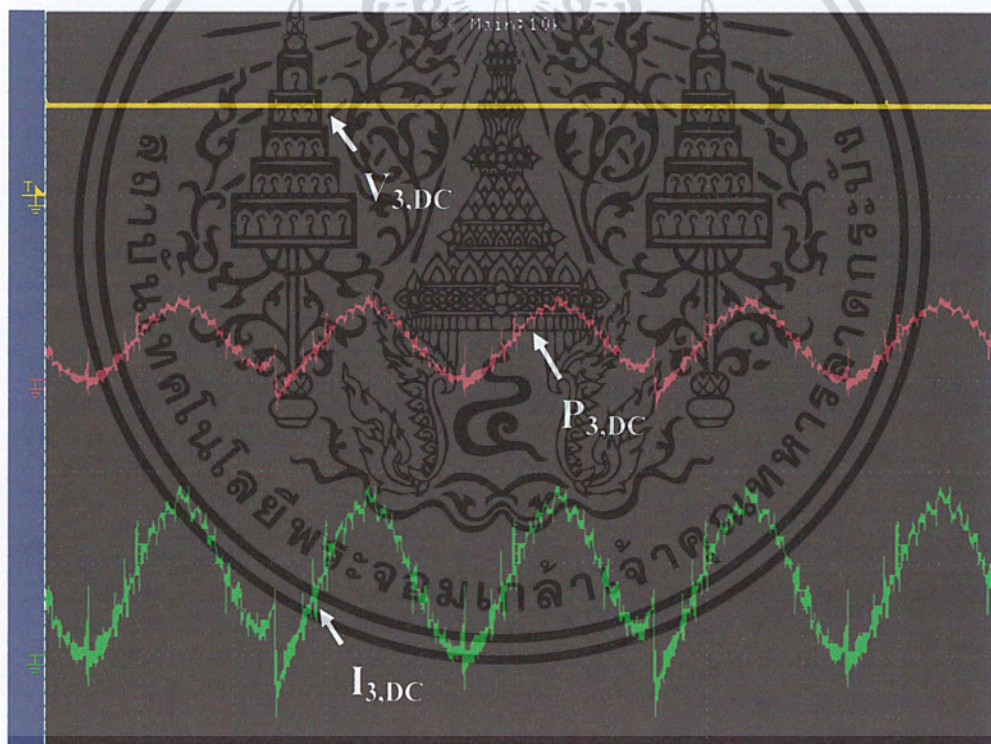


รูปที่ 4.23 (ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์  
 (ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์  
 (ค) รูปขยายแกนต์ตั้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

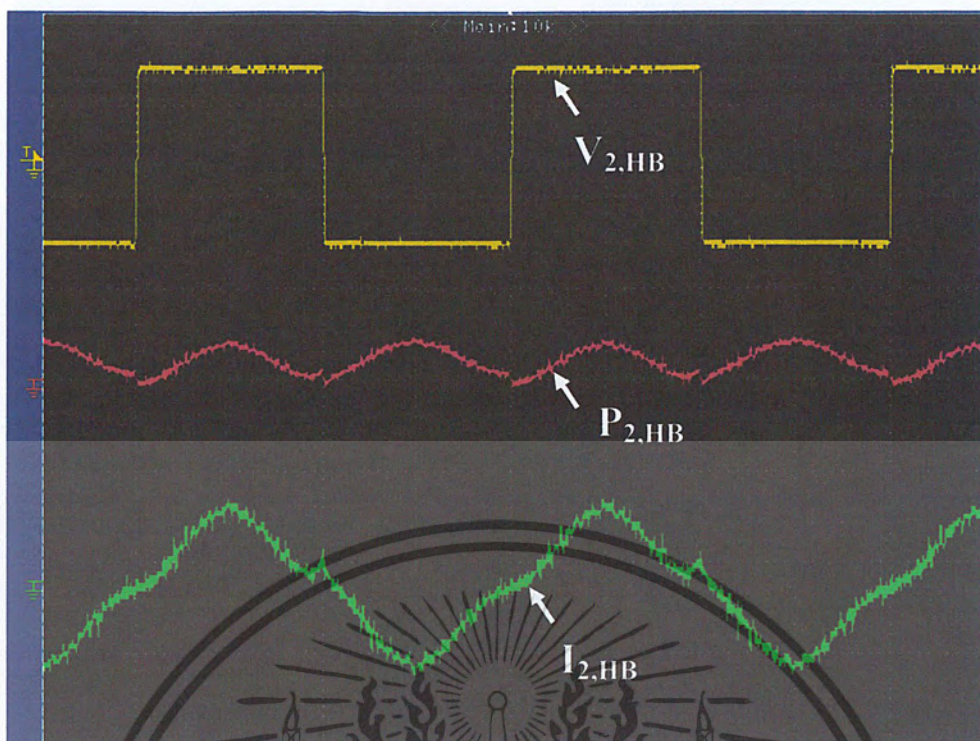
YOKOGAWA ◆		Uover: ■ ■ ■ ■		40ms	2.5MS/s
CH4 200mVpk		Iover: ■ ■ ■ ■		40ms	2.5MS/s
Urms1	220.28	v	P2	0.286	kW
Urms2	46.87	v	P3	0.303	kW
Urms3	47.65	v	---	---	
P1	0.2846	kW	---	---	

รูปที่ 4.24 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

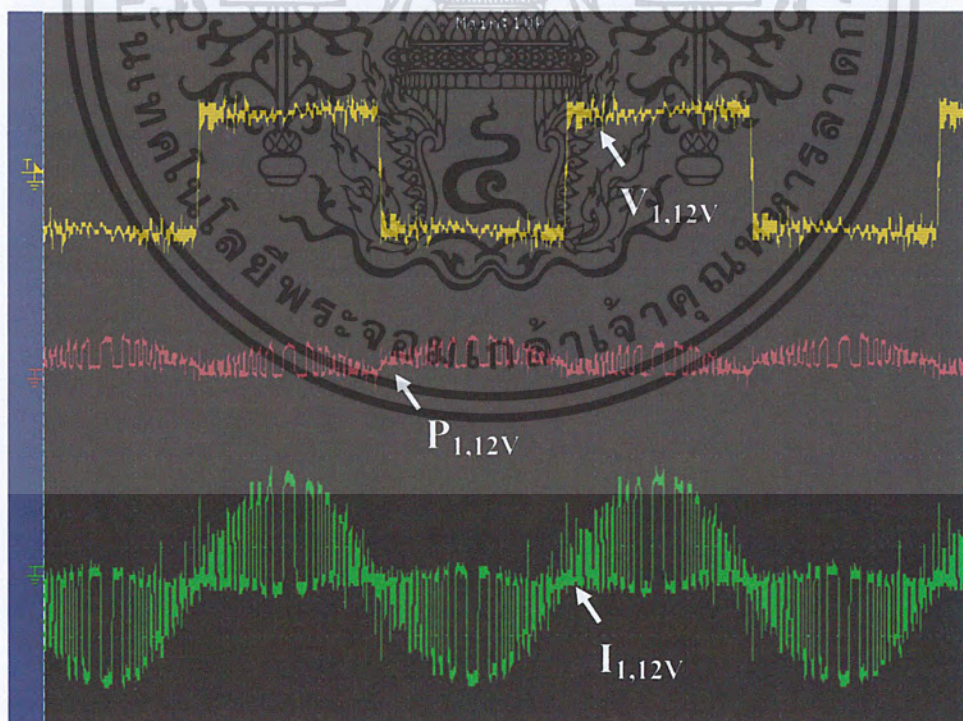


รูปที่ 4.25 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

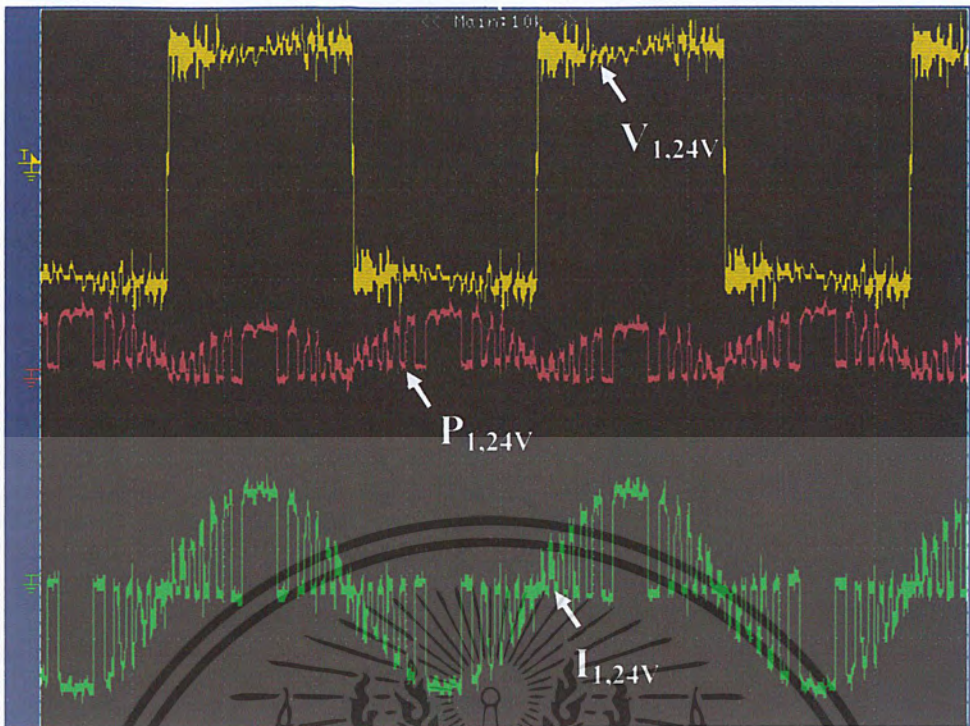


รูปที่ 4.26 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาออกของส่วน  
เอช-บริดจ์ ในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

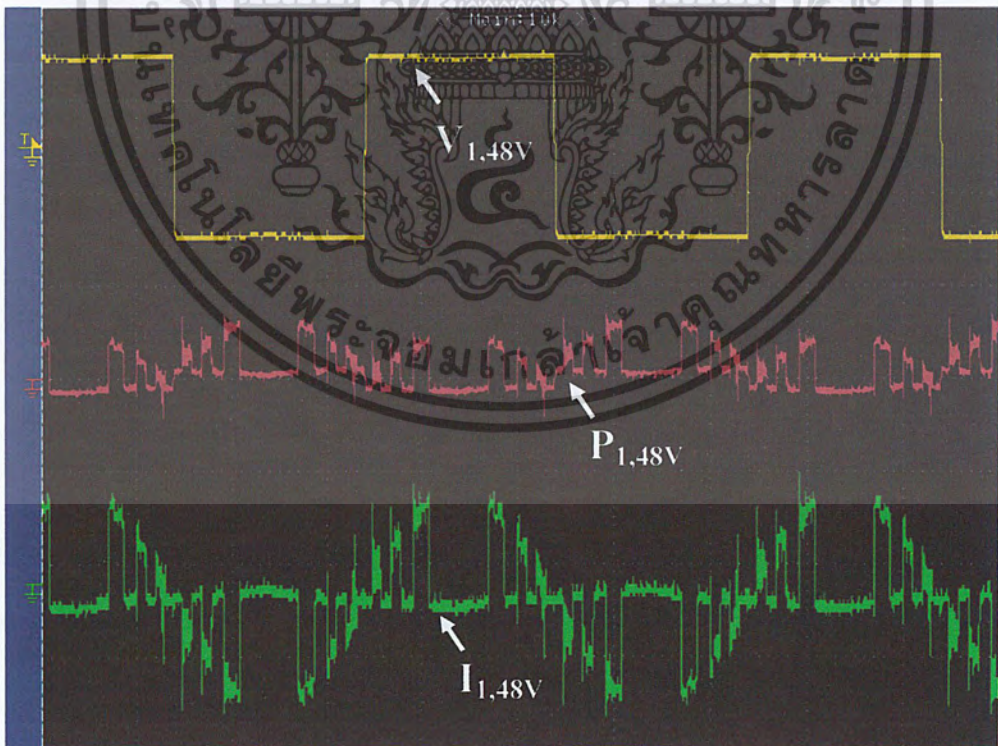


รูปที่ 4.27 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วน  
เอช-ชอปเปอร์ เซลล์ 12 โวลต์ ในขณะที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

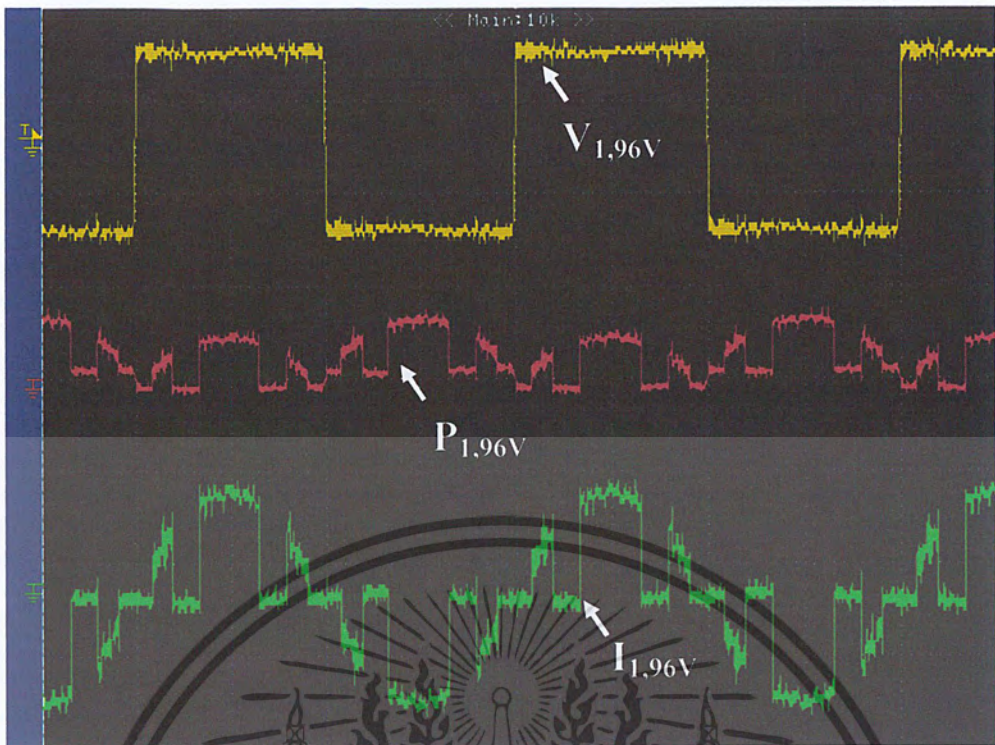


รูปที่ 4.28 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วน  
เอซี-ชอปเปอร์ เซลล์ 24 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

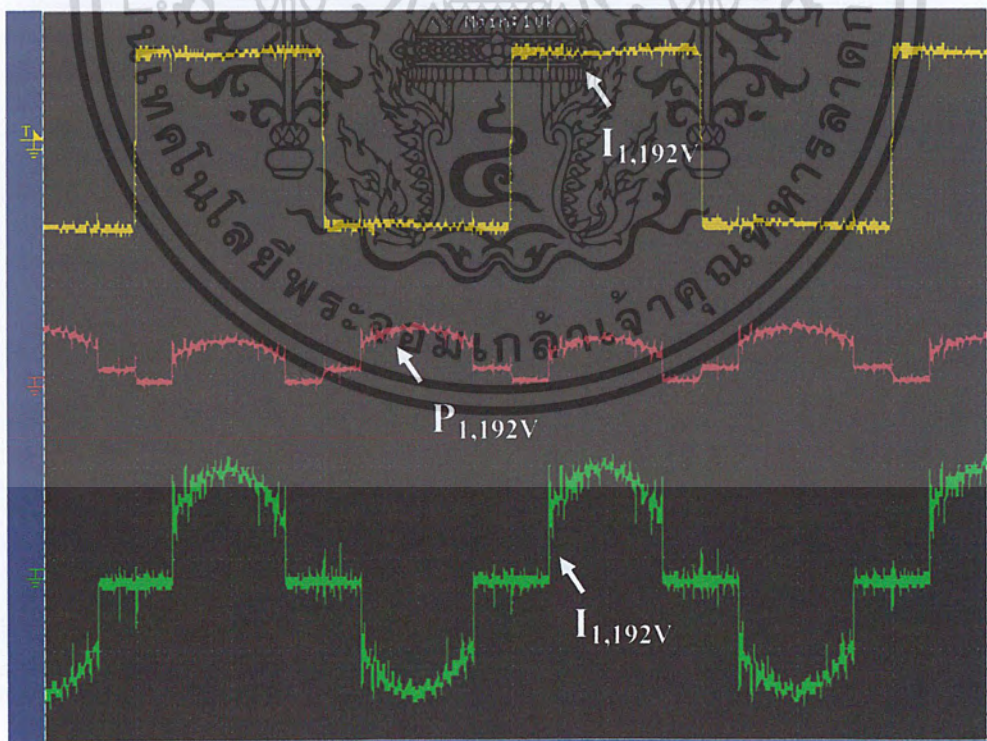


รูปที่ 4.29 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วน  
เอซี-ชอปเปอร์ เซลล์ 48 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วน  
เอซี-ชอปเปอร์ เซลล์ 96 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.31 รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้าส่วน

เอซี-ชอปเปอร์ เซลล์ 192 โวลต์ ในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

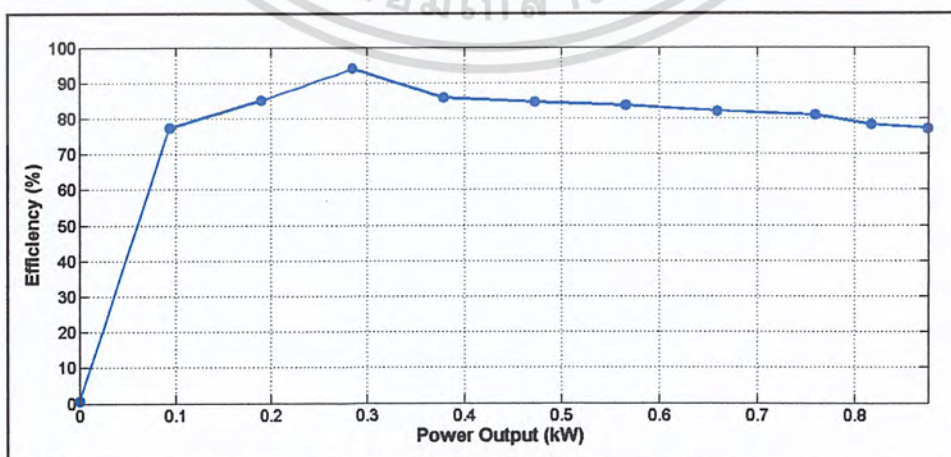
#### 4.6.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีประสิทธิภาพ 93 % โดยเป็นการสูญเสียในส่วนของเอช-บริดจ์ 5.2 % เมื่อทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าขนาด 0.2846 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากเป็นจุดที่ยังมีกระแสไหลไม่มากนัก ทำให้การสูญเสียต่ำ โดยกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแต่ละส่วนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแสดงดังตารางที่ 4 สำหรับผลการทดลองจะเห็นได้ว่าส่วนที่เกิดการสูญเสียมากคือส่วนของเอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากเป็นส่วนที่มีกระแสไหลผ่านมากที่สุด รองลงมาคือส่วนของหม้อแปลงและส่วนวงจรเอซีชอปเปอร์ โดยวัดออกมาเป็นกำลังสูญเสียรวมระหว่างหม้อแปลงและส่วนวงจรเอซีชอปเปอร์ เนื่องจากการวัดกำลังไฟฟ้าแยกออกในแต่ละส่วน จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดถึง 6 ชุดจึงจะสามารถวัดกำลังไฟฟ้าของแต่ละชุดวงจรซึ่งมีทั้งหมด 5 ชุดได้

เมื่อทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าจะทำให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 4.32 เนื่องจากมีกระแสไหลผ่านในแต่ละส่วนของวงจรมากขึ้น ทำให้เกิดกำลังสูญเสียภายในอุปกรณ์ต่างๆ มากขึ้น

ตารางที่ 4.1 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแต่ละส่วนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.2846 กิโลวัตต์

	H-Bridge	หม้อแปลง + AC-Chopper	Gate-drive	รวม
กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย (W)	16	3.8	2	21.8
ร้อยละของกำลังขาเข้า	5.2%	1.3%	0.7%	7.2%



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังไฟฟ้าด้านขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7 การทดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์

### 4.7.1 วัตถุประสงค์

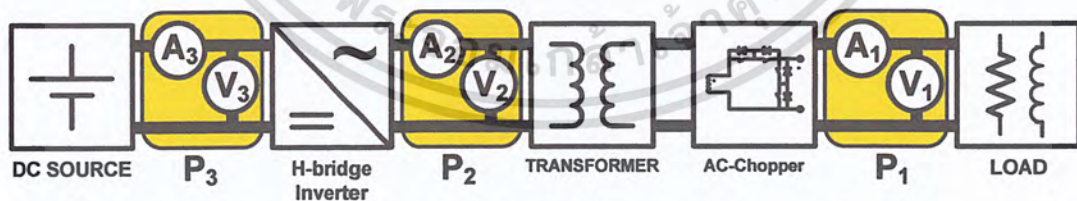
1. เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์
2. เพื่อเป็นการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาเข้า ค่ากำลังไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เมื่อจ่ายจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์

### 4.7.2 ขั้นตอนการทดลอง

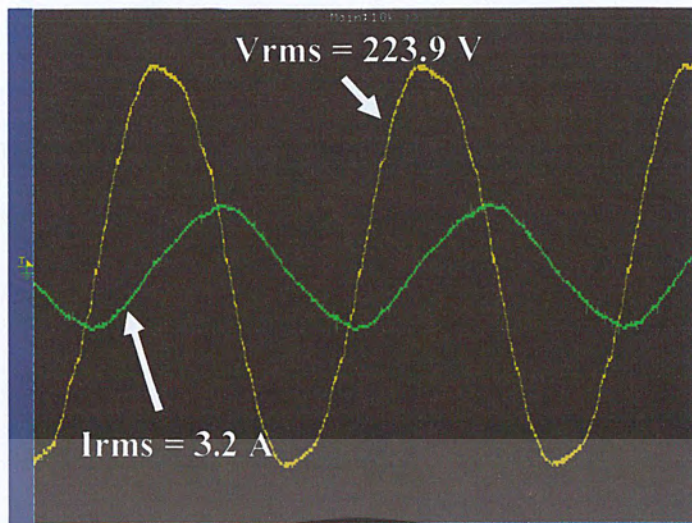
1. จ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุม วงจรแสดงผลจอ LCD วงจรสัญญาณขับเกต
2. จ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 48 โวลต์
3. เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 48 โวลต์ เข้ากับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
4. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น PZ4000 วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า ค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาเข้า วัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาออก ที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ รวมทั้งวัดค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าด้านขาออก ในส่วนเอช-บริดจ์
5. ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป รุ่น DL1640 วัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก และรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านขาออก ที่ได้ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

### 4.7.3 ผลการทดลอง

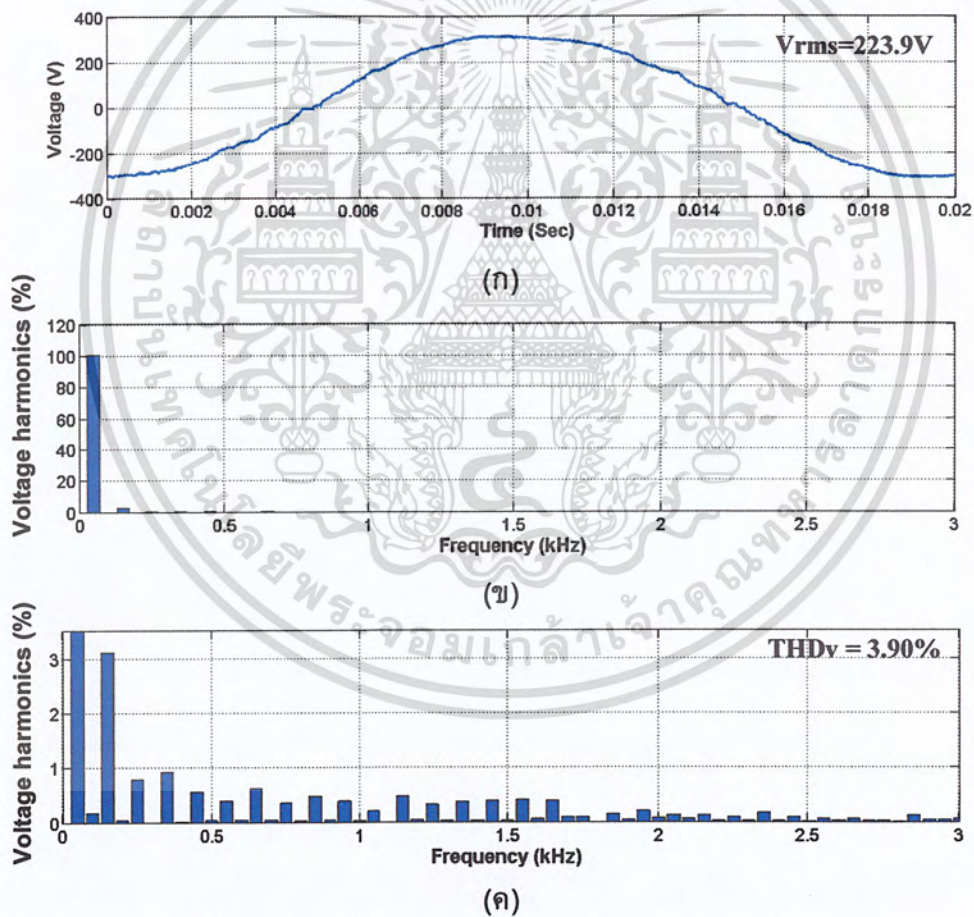
จากการทดลองพบว่ากำลังไฟฟ้าด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีค่าเท่ากับ 0.149 กิโลวัตต์ และมีกำลังไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีค่าเท่ากับ 0.1160 กิโลวัตต์ คิดเป็นประสิทธิภาพเท่ากับ 78% ซึ่งวัดรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแสดงดังรูปที่ 4.34 โดยที่มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 223.92 โวลต์ ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 3.90 % แสดงได้ดังรูปที่ 4.35 และมีค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.21 แอมป์ ค่าความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 6.17 % แสดงได้ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.33 รูปวงจรถดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์



รูปที่ 4.34 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์

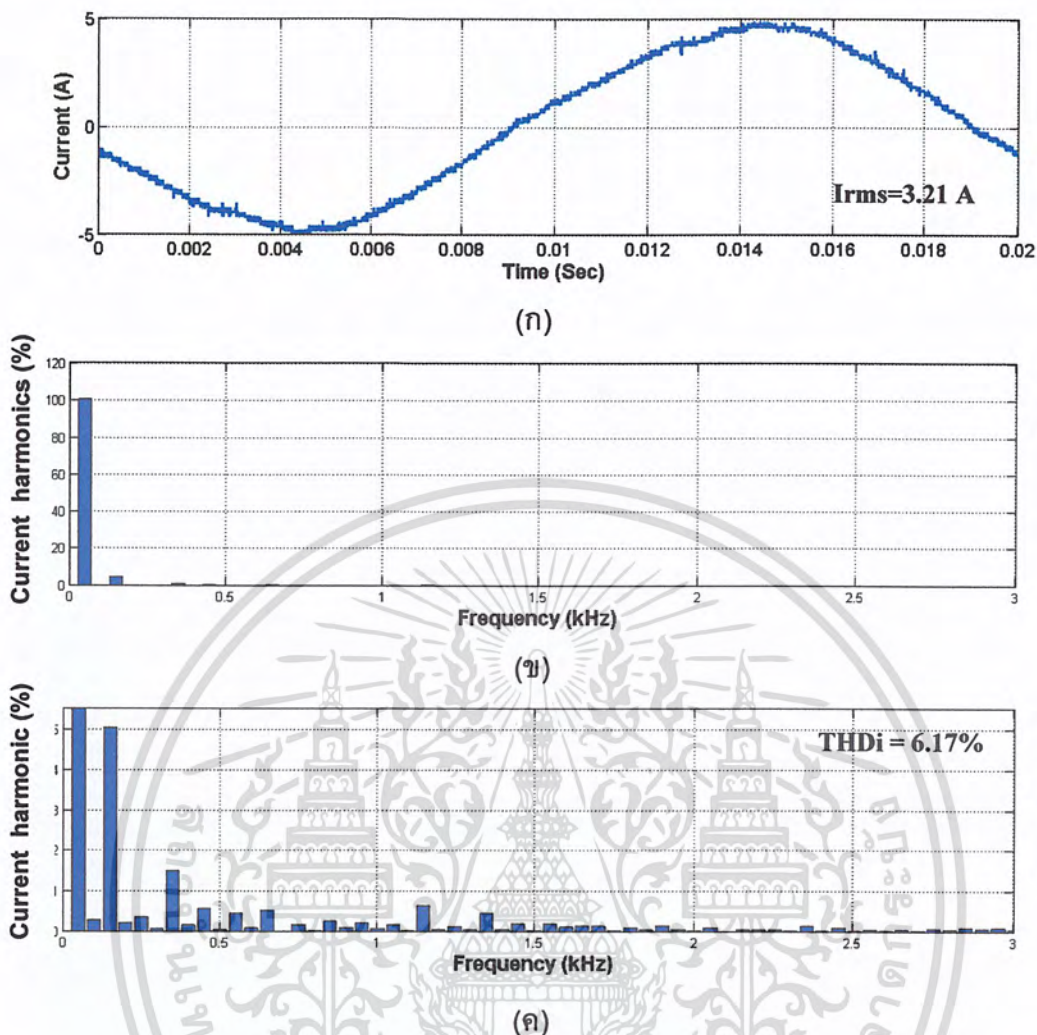


รูปที่ 4.35 (ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์

(ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์

(ค) รูปขยายแกนตั้งของสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 (ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์  
 (ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดมอเตอร์  
 (ค) รูปขยายแกนตั้งสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าขาออก

#### 4.7.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับจ่ายภาระทางไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ขนาด  $1/2$  HP (0.4kW) 4 ขั้วแม่เหล็ก และมอเตอร์ไม่ได้จ่ายภาระทางกลพบว่ารูปคลื่นกระแสจะตามหลังแรงดัน (lagging) และมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ โดยสังเกตได้จากค่า THD, ที่มีค่าสูงถึง 6.17% เนื่องจากเกิดฮาร์มอนิก ลำดับต่ำมากขึ้น สำหรับการทดลองนี้ จะใช้วิธีการค่อยๆ เพิ่มแรงดันเพื่อเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ เพื่อลดกระแสขณะมอเตอร์เริ่มทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอถึงผลจากการจำลองอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ทั้งในสภาวะที่ยังไม่จ่ายภาระทางไฟฟ้า และจ่ายภาระทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้ผลถูกต้องตามหลักการ และเป็นไปตามทฤษฎี นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลการทดลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่จัดสร้างขึ้น ซึ่งสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกที่มีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์จากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้า รวมถึงได้ทำการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ตลอดจนการวิเคราะห์หาค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันรูปคลื่นไซน์ และการวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่สร้างขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับสามารถที่จะนำมาใช้งานกับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำได้โดยจะนำเสนอไว้ในบทที่ 5 ซึ่งเป็นบทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

#### 5.1 บทสรุป

จากการศึกษาเทคโนโลยีของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel inverter) จึงได้ชนิดของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีความเหมาะสมนำมาประยุกต์ในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันต่ำแบบอิสระ (Stand-alone) โดยจำเป็นต้องมีอินเวอร์เตอร์หลายระดับเพื่อเชื่อมต่อแหล่งพลังงานที่อยู่ในรูปกำลังไฟฟ้ากระแสตรง จึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแบบอิสระ แหล่งจ่ายพลังงานทดแทน และหลักการของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ซึ่งจากการศึกษาค้นคว้าทำให้เห็นแนวทางในการนำอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด มาประยุกต์ใช้กับระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบอิสระ ซึ่งในปริณญาณิพนธ์นี้ได้ทำการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink และผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมดังกล่าวพบว่า อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดนี้ มีความเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำแบบอิสระ และได้ออกแบบและจัดสร้างเครื่องต้นแบบของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

จากการทำการทดลองพบว่า เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ที่ได้จัดสร้างขึ้นสามารถสร้างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์ มีค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันต่ำ และเมื่อนำไปจ่ายให้กับโหลด ซึ่งเป็นหลอดไฟพบว่า รูปคลื่นสัญญาณแรงดันยังคงมีลักษณะเช่นเดิมไม่ แต่ขนาดของแรงดันลดลงเล็กน้อยโดยสามารถชดเชยได้ด้วยการเพิ่มระดับขั้นของแรงดัน โดยขณะที่ไม่มีภาระไฟฟ้า จะมีระดับขั้นแรงดัน 53 ขั้นและจะสามารถชดเชยขึ้นไปได้สูงสุดถึง 63 ขั้น เมื่อทำการวิเคราะห์ ขนาดของแรงดันและกระแสขณะจ่ายโหลดแบบ FFT เพื่อหาค่าความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณอ้างอิงไซน์ (Total Harmonic Distortion : THD<sub>v</sub>) พบว่ามีค่า THD<sub>v</sub>=2.97% และทำการวัดค่าสูญเสียภายในวงจรค่าความสูญเสียในเอช-บริดจ์เท่ากับ 5.6% เป็นค่าความสูญเสียในหม้อแปลงเท่ากับ 2 % และเป็นค่าความสูญเสียในเอซี-ชอปเปอร์เท่ากับ 2 % เมื่อนำไปคิดประสิทธิภาพรวมของระบบจะได้อยู่ที่ประมาณ 90% โดยเราสามารถทำการเพิ่มประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับให้มากขึ้น โดยการออกแบบหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดการสูญเสียภายในหม้อแปลง รวมทั้งการออกแบบวงจรกำลังของเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์และส่วนเอาต์พุตเอซี-ชอปเปอร์ โดยใช้สวิตช์กำลังที่มีการสูญเสียต่ำ หรือมีค่าความต้านทานขณะทำงานต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปใช้ในระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำแบบอิสระ โดยมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่จัดทำขึ้นนี้มีค่าการสูญเสียต่ำ ทำให้ลดการสูญเสียภายในกระบวนการทำงานของอินเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป มีคุณภาพของกำลังไฟฟ้าที่ดีกว่าอินเวอร์เตอร์ทั่วไป ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้สามารถทำงานได้อย่างเต็มที่และมีประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง

จากการดำเนินการทดลองตลอดโครงการวิจัยนี้พบว่า มีข้อควรเสนอแนะและข้อควรระวัง ดังต่อไปนี้

1. สวิตช์กำลังของวงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ต้องการการทำงานการ on off ของสวิตช์กำลังในกิ่งเดียวกันไม่พร้อมกัน จึงต้องมีการเพิ่มช่วงเวลาเดดไทม์จากคำสั่งควบคุมเพื่อให้สวิตช์กำลังในกิ่งนั้นๆทำการ off ก่อนการ on สวิตช์กำลังอีกตัวในกิ่งเดียวกันเพื่อป้องกันการลัดวงจร
2. ในส่วนของลายวงจรของวงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ต้องมีลายวงจรที่ใหญ่พอและไม่วางอุปกรณ์ชิดกันเกินไป เนื่องจากวงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์มีพิกัดแรงดันต่ำ เมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าที่พิกัดกำลังสูงจะมีกระแสไหลในวงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์สูง อาจทำให้ลายวงจรขาดได้
3. การทำงานของมอสเฟตในอินเวอร์เตอร์แต่ละตัวจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนอย่างเหมาะสม เพื่อรักษาอายุการใช้งานของอินเวอร์เตอร์ให้ยาวนานยิ่งขึ้น
4. เมื่อทำการจ่ายโหลดมอเตอร์และทำการเพิ่มค่ามอดดูเลชัน อาจทำให้เกิดการลัดวงจรและส่งผลกระทบให้ชุดอุปกรณ์เกิดความเสียหายได้จึงควรปรับค่าให้เหมาะสมก่อนทำการจ่ายโหลด
5. ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงชนิดหลายชุดจากการออกแบบและการคำนวณในบทที่ 3 เมื่อเทียบตารางขดลวดต้องใช้ขดลวดขนาด 6 SWG แต่ในทางปฏิบัติใช้ขดลวดที่ได้จากโรงงานซึ่งมีขนาด 12 SWG หม้อแปลงจึงไม่สามารถทำงานเพื่อรับค่ากระแสได้ตามพิกัดที่คำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 แนวทางการพัฒนา

โครงการวิจัยนี้สามารถทำการพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานให้มีประสิทธิภาพ และความหลากหลายในการใช้งานมากขึ้น ดังต่อไปนี้

1. การปรับค่ามอดดูเลตเพื่อชดเชยแรงดันขาออก โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับในโครงการวิจัยนี้ เป็นการควบคุมแบบเปิด (open loop) ยังไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้แบบอัตโนมัติด้วยตัวของอินเวอร์เตอร์เอง แต่เป็นการปรับค่ามอดดูเลตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยการใช้ปุ่มกดปรับค่ามอดดูเลชันเพิ่มขึ้น หรือปรับค่าลดลง ดังนั้นหากต้องการให้มีการปรับเปลี่ยนได้แบบอัตโนมัติจะต้องมีการพัฒนาในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมเพิ่มเติม

2. วงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ ในโครงการวิจัยนี้มักจะเสียหายบ่อยครั้ง จึงควรทำการพัฒนาออกแบบวงจรกำลัง และวงจรขับสัญญาณเกดให้มีเสถียรภาพ โดยพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรก็ส่งผลกระทบต่อการทำงาน เพื่อความคงทนในการทำงานเพิ่มมากขึ้น รวมถึงพิกัดการทำงานที่สูงขึ้นด้วย เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความน่าเชื่อถือ

3. หม้อแปลงชนิดหลายขดที่จัดทำในโครงการวิจัยได้จัดทำขึ้นด้วยผู้ทำการวิจัยเอง โดยการพันขดลวดและการพันฉนวนด้วยมือ จึงอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวหม้อแปลงการสั่นและเสียงขณะทำงาน หม้อแปลงที่พันจากโรงงานหรือพันโดยเครื่องพันหม้อแปลงน่าจะมีประสิทธิภาพและการทำงานที่ดีกว่า

## บรรณานุกรม

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, ข้อมูลยุทธศาสตร์การพัฒนาพลังงานทดแทน พ.ศ.2551- พ.ศ. 2554
- [2] ผศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย, “สมาร์ทกริดและการใช้พลังงานของที่อยู่อาศัยโดยมวลรวมเป็นศูนย์”, บทความภาควิศวกรรมไฟฟ้า 50ปี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553
- [3] การไฟฟ้านครหลวง, ประกาศการไฟฟ้านครหลวงที่ 32/2552, การกำหนดส่วนเพิ่มราคารับซื้อสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจากพลังงานหมุนเวียน, มีนาคม 2552
- [4] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ประกาศการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, การกำหนดส่วนเพิ่มราคารับซื้อสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากจากพลังงานหมุนเวียนตามมติคณะกรรมการนโยบายแห่งชาติ, มีนาคม 2552
- [5] Sérgio Daher, Jürgen Schmid, and Fernando L. M. Antunes. Multilevel Inverter Topologies for Stand-Alone PV System. **IEEE Transactions on Power Electronics**. vol.55, No.7, Jul. 2008. pp 2703-2711
- [6] Sérgio Daher. “Analysis, Design and Implementation of a High Efficiency Multilevel Converter for Renewable Energy Systems”, **Ph.D. dissertation**, University of Kassel, Brazil, 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาคผนวก ก.**  
**เครื่องต้นแบบที่จัดสร้างขึ้นจริงในปริญญานิพนธ์**

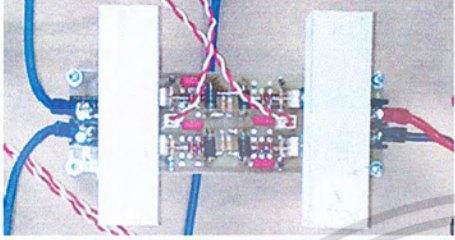

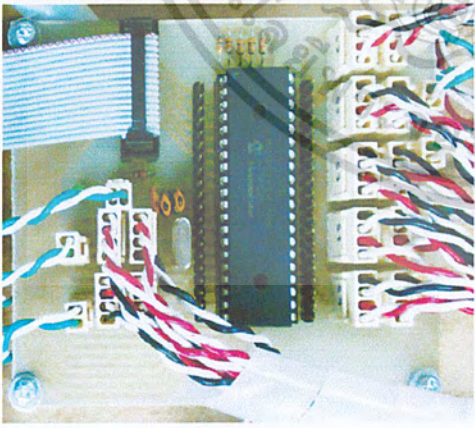
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องต้นแบบที่จัดสร้างจริงในปริญญาโท

รูปเครื่องต้นแบบ	รายละเอียด
	<p>แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5V (DC Supply 5 volt)</p> <p>Input : 220VAC Output : 5VDC</p>
	<p>ชุดวงจรเฮซ-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-bridge inverter)</p> <p>Input : 48VDC Output : 48VAC (Square wave)</p>
	<p>หม้อแปลงหลายขด (Multi-winding transformer)</p>

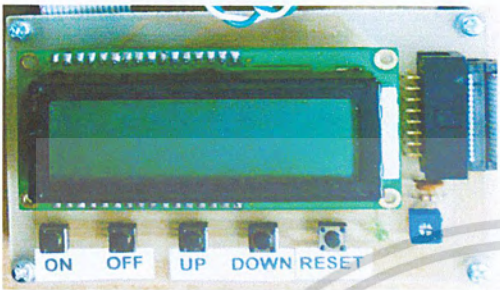
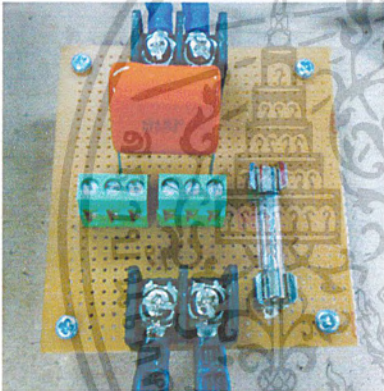
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องต้นแบบที่จัดสร้างจริงในปริญญาโท (ต่อ)

รูปเครื่องต้นแบบ	รายละเอียด
	<p>ชุดวงจรเอซี-ชอปเปอร์ (AC-Chopper)</p>
	<p>ชุดวงจรขับ (Gate drive)</p>
	<p>ชุดวงจรควบคุม (Control board)</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องต้นแบบที่จัดสร้างจริงในปริญญาโท (ต่อ)

รูปเครื่องต้นแบบ	รายละเอียด
	<p>ชุดแผงควบคุมและแสดงผล (LCD display and Control panel)</p>
	<p>ชุดวงจรกรอง (Filter)</p>


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาคผนวก ข.**  
**เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใหม่ปริญาโท**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใหม่ปริญญาโท

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>มัลติมิเตอร์ (Multi Meter)</p>
	<p>ดิจิตอล ออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope DL 1640)</p>
	<p>PZ4000 POWER ANALYZER</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์ (ต่อ)

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter)</p>
	<p>หม้อแปลง 1:1 Isolate ground Transformer</p>
	<p>หม้อแปลงแรงดัน 1 เฟส ชนิดปรับค่าได้ (Variac 1 phase)</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใหม่ปริญญาโท (ต่อ)

รูปเครื่องต้นแบบ	รายละเอียด
	<p>แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply)</p>
	<p>ชุดโหลด R (Load R)</p>
	<p>ชุดโหลด L (โหลด L)</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



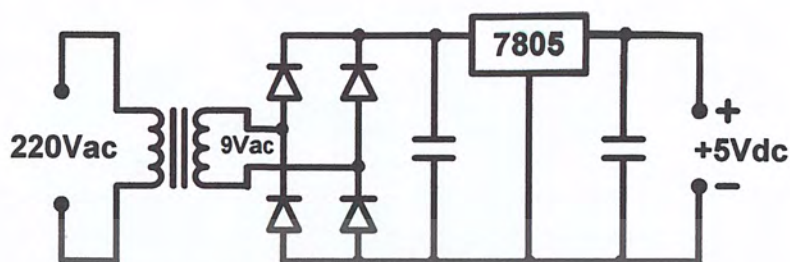
# ภาคผนวก ค.

## ลายวงจรและรายละเอียดอุปกรณ์

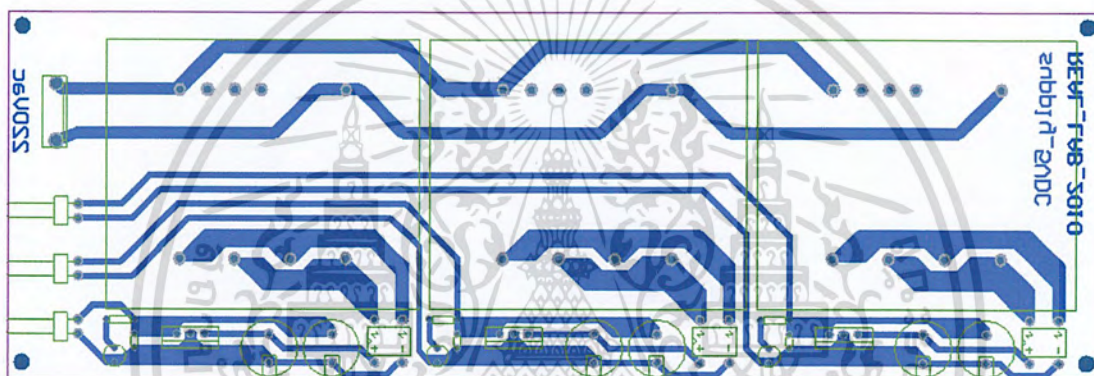
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ลายวงจรและรายละเอียดอุปกรณ์

### 1. แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 5 โวลต์



รูปวงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 5 โวลต์



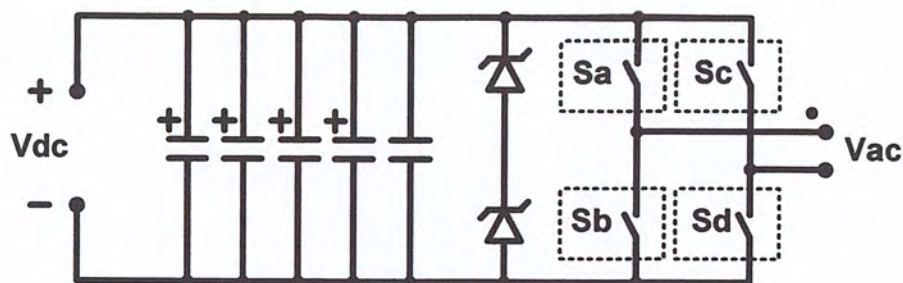
รูปลายวงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 5 โวลต์

### ตารางแสดงรายละเอียดอุปกรณ์วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 5 โวลต์

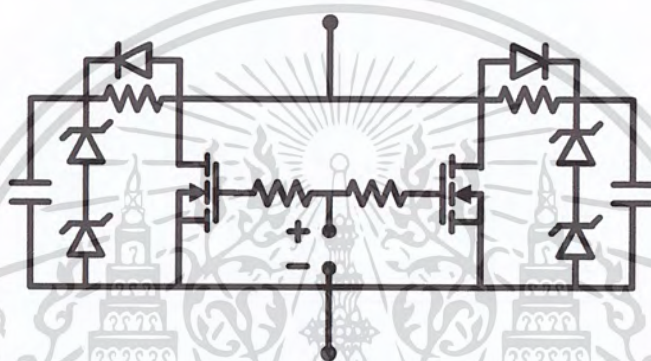
ลำดับที่	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียดอุปกรณ์	พิกัด	จำนวน
1	Capacitor	Electrolyte	1uF 63V	2
2	Regulator	7805		1
3	LED	5mm สีเขียว		1
4	Resistors	Carbon film	330R 5% 1/4w	1
5	Transformer	ชนิดลงแผ่นวงจร	220/9V 1A	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

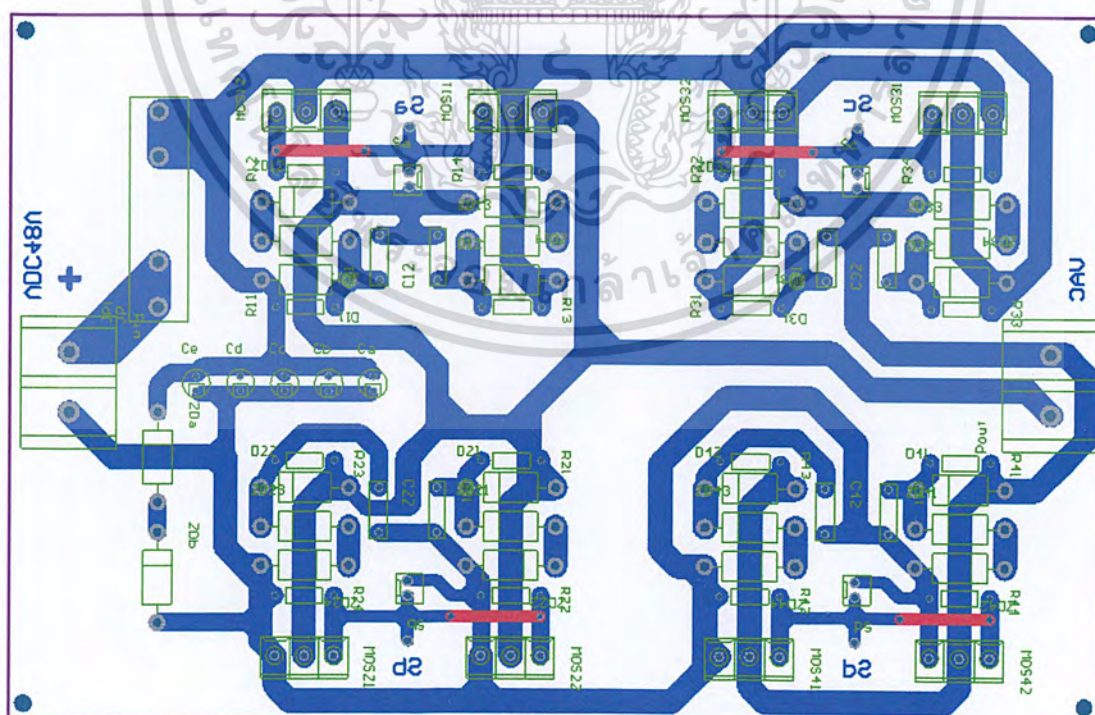
## 2. เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปวงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปที่วงจรสวิตช์



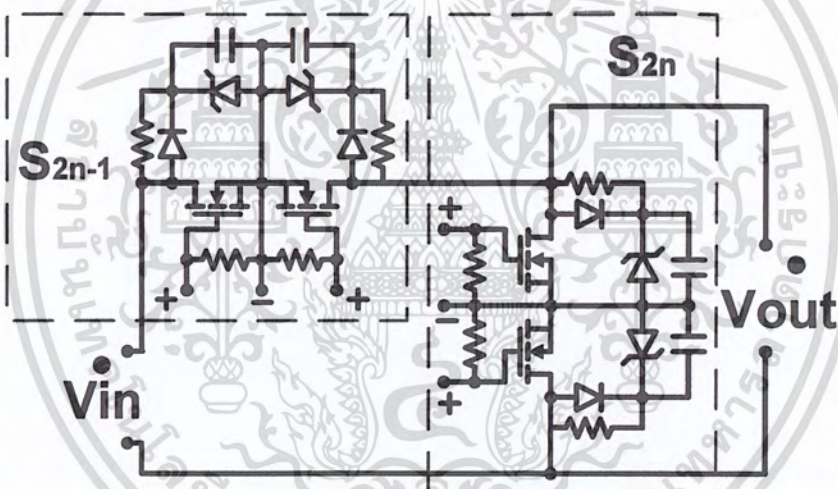
รูปลายวงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

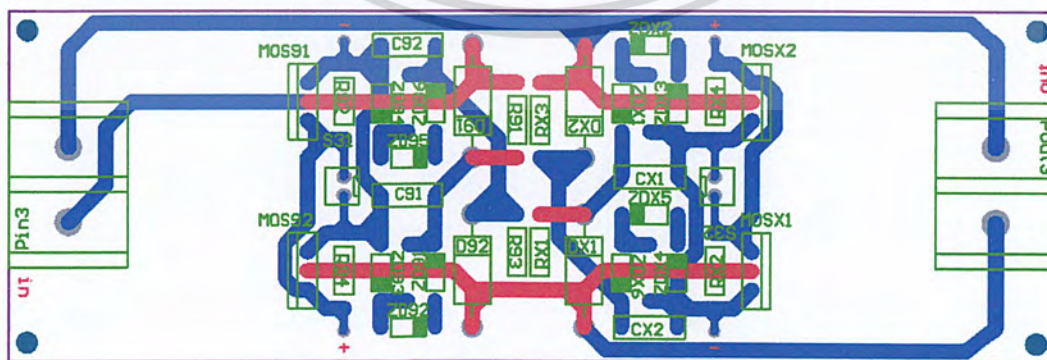
ตารางแสดงรายละเอียดอุปกรณ์เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์

ลำดับที่	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียดอุปกรณ์	พิกัด	จำนวน
1	Capacitor	Electrolyte	1uF 63V	4
		bipolar	2.2 uF	1
		WIMA	470nF 100V	8
2	Zenor Diode	1.5KE33A		18
3	Diode	MUR420		8
4	Resistors	Carbon film	330R 5% 1/4w	8
		Carbon film	10K 5% 1/4w	8
5	Mosfet	IRF3710		8

3. เอช-ชอปเปอร์



รูปวงจรเอช-ชอปเปอร์ 1 เซลล์



รูปลายวงจรเอช-ชอปเปอร์ 1 เซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงรายละเอียดอุปกรณ์วงจรเอซี-ชอปเปอร์ เซลล์ที่ 1 ถึงเซลล์ที่ 5

เซลล์	ลำดับ	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียดอุปกรณ์	พิกัด	จำนวน
1	1	Capacitors	WIMA	47nF250V	4
	2	Zener diode	1N4748	22V	4
	3	Diode	MUR460		4
	4	Resistors	120	Carbon film	4
			10K	Carbon film	4
5	MOSFET	STB55NF06	50A 60V	4	
2	1	Capacitors	WIMA	47nF250V	4
	2	Zener diode	1N4752	33V	4
	3	Diode	MUR460		4
	4	Resistors	330	Carbon film	4
			10K	Carbon film	4
5	MOSFET	STB55NF06	50A 60V	4	
3	1	Capacitors	WIMA	47nF250V	4
	2	Zener diode	1N4752	33V	8
	3	Diode	MUR460		4
	4	Resistors	330	Carbon film	4
			10K	Carbon film	4
5	MOSFET	IRF530N	17A 100V	4	
4	1	Capacitors	WIMA	47nF250V	4
	2	Zener diode	1N4760	66V	8
	3	Diode	MUR460		4
	4	Resistors	470	Carbon film	4
			10K	Carbon film	4
5	MOSFET	FQP630	9A 200V	4	
5	1	Capacitors	WIMA	47nF250V	4
	2	Zener diode	1N4762	82V	12
	3	Diode	MUR460		4
	4	Resistors	470	Carbon film	4
			10K	Carbon film	4
5	MOSFET	IRF840B	8A 500V	4	

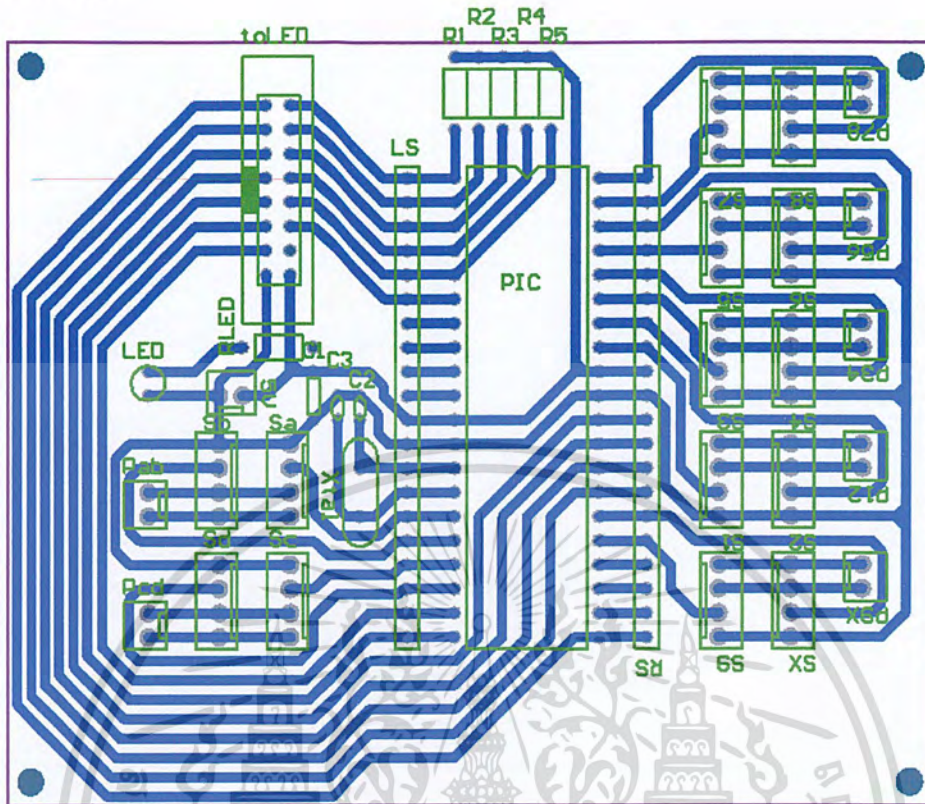
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางสรุปอุปกรณ์ของชุดวงจรเอซี-ชอปเปอร์

ลำดับ	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียดอุปกรณ์	พิกัด	จำนวน
1	Capacitors	WIMA	47nF250V	20
2	Zener diode	1N4748	22V	4
		1N4752	33V	12
		1N4760	66V	8
		1N4762	82V	12
3	Diode	MUR460		20
4	Resistors	120	Carbon film	4
		330	Carbon film	8
		470	Carbon film	8
		10K	Carbon film	20
5	MOSFET	STB55NF06	50A 60V	8
		IRF530N	17A 100V	4
		FQP630	9A 200V	4
		IRF840B	8A 500V	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4. วงจรควบคุม



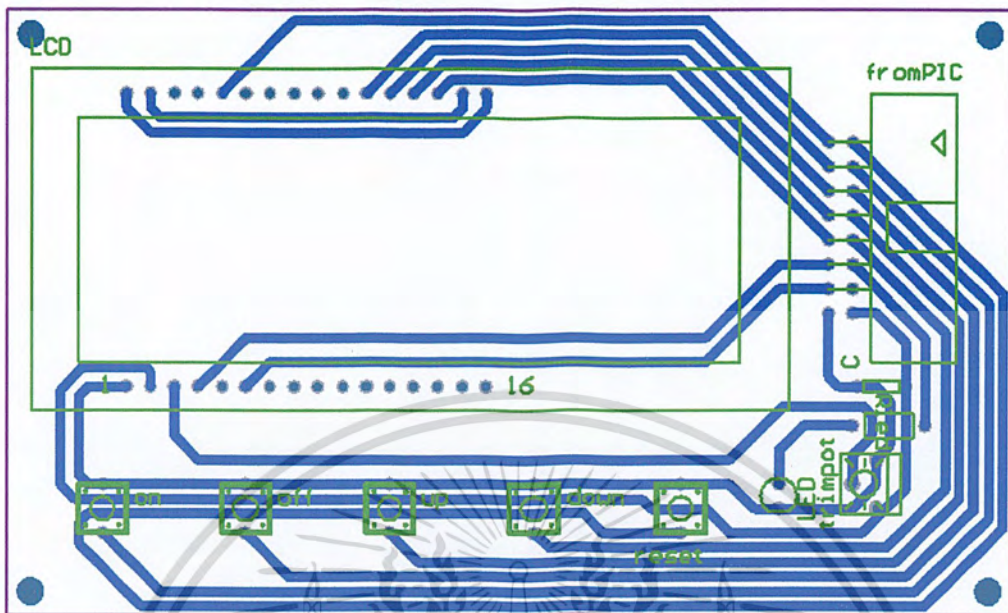
รูปลายวงจรควบคุม

## ตารางแสดงรายละเอียดอุปกรณ์วงจรควบคุม

ลำดับ	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียดอุปกรณ์	พิกัด	จำนวน
1	Microcontroller	PIC18F4431		1
2	LED LAMP	สีเขียว	3 mm	1
3	Resistors	carbon film	30k 5% 1/8w	5
		carbon film	330	1
4	Capacitors	ceramic	30pF	2
		ceramic	0.1uF	1
		Multilayer	0.1uF	9
5	X-tal		20MHz	1
6	สายแพ	IDC16E	16pins	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. วงจรแสดงผล



รูปถ่ายวงจรแสดงผล

## ตารางแสดงรายละเอียดอุปกรณ์วงจรแสดงผล

ลำดับ	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียดอุปกรณ์	พิกัด	จำนวน
1	LCD Display			1
2	LED LAMP	สีเขียว	3 mm	1
3	Switch	Push button		5
4	Capacitors	ceramic	0.1uF	1
		Multilayer	0.1uF	2
5	Resistors	Trim pot	1k	1
6	X-tal		20MHz	1
7	สายแพ	IDC16E_L แบบนอน	16pins	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



6	Core toroid	Enamelled Cu wire	0.4mm DIA	2
7	NAND GATE	74AC00		1
8	Flip-Flop	74AC74		1
9	LM311	Voltage Comparator		1
10	HCF4093BE	NAND Schmidt trigger		1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาคผนวก ง.**  
**ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




---

# PIC18F2331/2431/4331/4431 Data Sheet

28/40/44-Pin Enhanced Flash  
Microcontrollers with nanoWatt Technology,  
High-Performance PWM and A/D

**Note the following details of the code protection feature on Microchip devices:**

- Microchip products meet the specification contained in their particular Microchip Data Sheet.
- Microchip believes that its family of products is one of the most secure families of its kind on the market today, when used in the intended manner and under normal conditions.
- There are dishonest and possibly illegal methods used to breach the code protection feature. All of these methods, to our knowledge, require using the Microchip products in a manner outside the operating specifications contained in Microchip's Data Sheets. Most likely, the person doing so is engaged in theft of intellectual property.
- Microchip is willing to work with the customer who is concerned about the integrity of their code.
- Neither Microchip nor any other semiconductor manufacturer can guarantee the security of their code. Code protection does not mean that we are guaranteeing the product as "unbreakable."

Code protection is constantly evolving. We at Microchip are committed to continuously improving the code protection features of our products. Attempts to break Microchip's code protection feature may be a violation of the Digital Millennium Copyright Act. If such acts allow unauthorized access to your software or other copyrighted work, you may have a right to sue for relief under that Act.

Information contained in this publication regarding device applications and the like is provided only for your convenience and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. MICROCHIP MAKES NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES OF ANY KIND WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, WRITTEN OR ORAL, STATUTORY OR OTHERWISE, RELATED TO THE INFORMATION, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ITS CONDITION, QUALITY, PERFORMANCE, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR PURPOSE. Microchip disclaims all liability arising from this information and its use. Use of Microchip devices in life support and/or safety applications is entirely at the buyer's risk, and the buyer agrees to defend, indemnify and hold harmless Microchip from any and all damages, claims, suits, or expenses resulting from such use. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, under any Microchip intellectual property rights.

**Trademarks**

The Microchip name and logo, the Microchip logo, Accuron, dsPIC, KEELoc, KEELoc logo, microID, MPLAB, PIC, PICmicro, PICSTART, PRO MATE, rPIC and SmartShunt are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.


AmpLab, FilterLab, Linear Active Thermistor, Migratable Memory, MXDEV, MXLAB, SEEVAL, SmartSensor and The Embedded Control Solutions Company are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

Analog-for-the-Digital Age, Application Maestro, CodeGuard, dsPICDEM, dsPICDEM.net, dsPICworks, ECAN, ECONOMONITOR, FanSense, FlexROM, fuzzyLAB, In-Circuit Serial Programming, ICSP, ICEPIC, Mindi, MiWi, MPASM, MPLAB Certified logo, MPLIB, MPLINK, PICkit, PICDEM, PICDEM.net, PICLAB, PICtail, PowerCal, PowerInfo, PowerMate, PowerTool, REAL ICE, rLAB, Select Mode, Smart Serial, SmartTel, Total Endurance, UNI/O, WiperLock and ZENA are trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.

SQTP is a service mark of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

All other trademarks mentioned herein are property of their respective companies.

© 2007, Microchip Technology Incorporated, Printed in the U.S.A., All Rights Reserved.

 Printed on recycled paper.

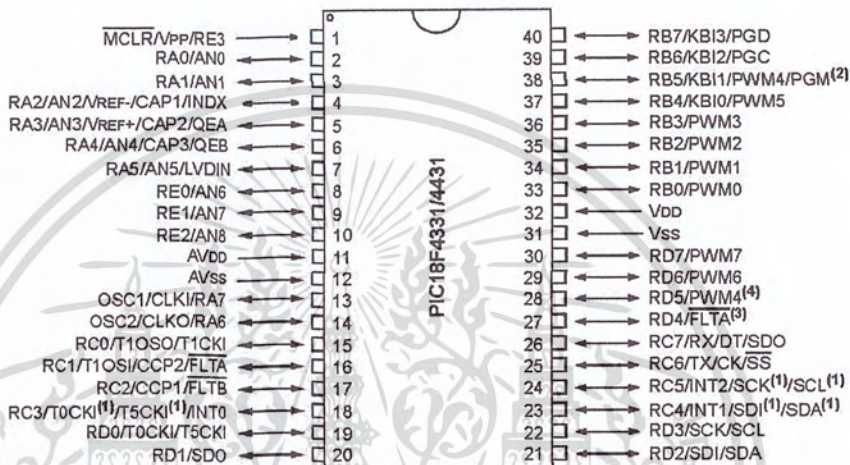
*Microchip received ISO/TS-16949:2002 certification for its worldwide headquarters, design and wafer fabrication facilities in Chandler and Tempe, Arizona, Gresham, Oregon and design centers in California and India. The Company's quality system processes and procedures are for its PIC® MCUs and dsPIC® DSCs, KEELoc® code hopping devices, Serial EEPROMs, microperipherals, nonvolatile memory and analog products. In addition, Microchip's quality system for the design and manufacture of development systems is ISO 9001:2000 certified.*

**QUALITY MANAGEMENT SYSTEM  
CERTIFIED BY DNV  
== ISO/TS 16949:2002 ==**

# PIC18F2331/2431/4331/4431

## Pin Diagrams (Continued)

40-Pin PDIP



- Note 1:** RC3 is the alternate pin for T0CKI/T5CKI; RC4 is the alternate pin for SDI/SDA; RC5 is the alternate pin for SCK/SCL.
- 2:** Low-Voltage Programming must be enabled.
- 3:** RD4 is the alternate pin for  $\overline{FLTA}$ .
- 4:** RD5 is the alternate pin for PWM4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PIC18F2331/2431/4331/4431

## 10.0 I/O PORTS

Depending on the device selected and features enabled, there are up to five ports available. Some pins of the I/O ports are multiplexed with an alternate function from the peripheral features on the device. In general, when a peripheral is enabled, that pin may not be used as a general purpose I/O pin.

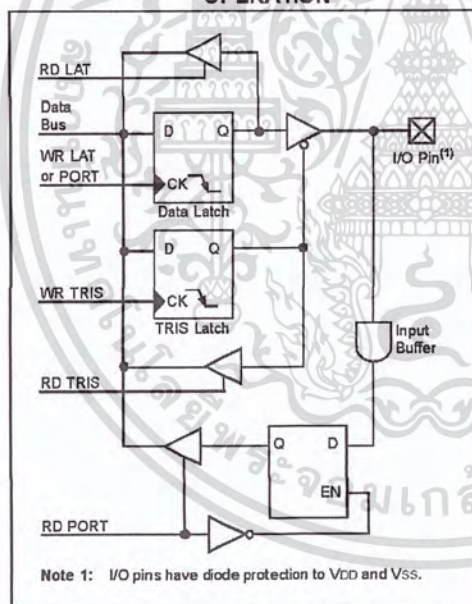
Each port has three registers for its operation. These registers are:

- TRIS register (Data Direction register)
- PORT register (reads the levels on the pins of the device)
- LAT register (Data Latch)

The Data Latch (LAT register) is useful for read-modify-write operations on the value that the I/O pins are driving.

A simplified model of a generic I/O port without the interfaces to other peripherals is shown in Figure 10-1.

**FIGURE 10-1: GENERIC I/O PORT OPERATION**



## 10.1 PORTA, TRISA and LATA Registers

PORTA is an 8-bit wide, bidirectional port. The corresponding data direction register is TRISA. Setting a TRISA bit (= 1) will make the corresponding PORTA pin an input (i.e., put the corresponding output driver in a high-impedance mode). Clearing a TRISA bit (= 0) will make the corresponding PORTA pin an output (i.e., put the contents of the output latch on the selected pin).

Reading the PORTA register reads the status of the pins, whereas writing to it, will write to the port latch.

The Data Latch register (LATA) is also memory mapped. Read-modify-write operations on the LATA register read and write the latched output value for PORTA.

The RA<2:4> pins are multiplexed with three input capture pins and Quadrature Encoder Interface pins. Pins RA6 and RA7 are multiplexed with the main oscillator pins. They are enabled as oscillator or I/O pins by the selection of the main oscillator in Configuration Register 1H (see Section 22.1 "Configuration Bits" for details). When they are not used as port pins, RA6 and RA7 and their associated TRIS and LAT bits are read as '0'.

The other PORTA pins are multiplexed with analog inputs, the analog VREF+ and VREF- inputs and the comparator voltage reference output. The operation of pins RA3:RA0 and RA5 as A/D Converter inputs is selected by clearing/setting the control bits in the ANSEL0 and ANSEL1 registers.

**Note 1:** On a Power-on Reset, RA5:RA0 are configured as analog inputs and read as '0'.  
**Note 2:** RA5 I/F is available only on 40-pin devices (PIC18F4331/4431).

The TRISA register controls the direction of the RA pins, even when they are being used as analog inputs. The user must ensure the bits in the TRISA register are maintained set when using them as analog inputs.

### EXAMPLE 10-1: INITIALIZING PORTA

```

CLRF  PORTA  ; Initialize PORTA by
              ; clearing output
              ; data latches
CLRF  LATA   ; Alternate method
              ; to clear output
              ; data latches
MOVLW 0x3F  ; Configure A/D
MOVWF ANSEL0 ; for digital inputs
MOVLW 0xCF  ; Value used to
              ; initialize data
              ; direction
MOVWF TRISA ; Set RA<3:0> as inputs
              ; RA<5:4> as outputs
    
```

## PIC18F2331/2431/4331/4431

**TABLE 10-1: PORTA FUNCTIONS**

Name	Bit #	Buffer	Function
RA0/AN0	bit 0	TTL	Input/output or analog input.
RA1/AN1	bit 1	TTL	Input/output or analog input.
RA2/AN2/VREF-/CAP1/INDX	bit 2	TTL/ST	Input/output, analog input, VREF-, capture input or QE1 index input.
RA3/AN3/VREF+/CAP2/QEA	bit 3	TTL/ST	Input/output, analog input, VREF+, capture input or Quadrature Channel A input.
RA4/AN4/CAP3/QEB	bit 4	TTL/ST	Input/output, analog input, capture input or Quadrature Channel B input.
RA5/AN5/LVDIN <sup>(1)</sup>	bit 5	TTL	Input/output, analog input or Low-Voltage Detect input.
OSC2/CLKO/RA6	bit 6	TTL	OSC2, clock output or I/O pin.
OSC1/CLKI/RA7	bit 7	TTL	OSC1, clock input or I/O pin.

Legend: TTL = TTL input, ST = Schmitt Trigger input

Note 1: Only available on PIC18F4331/4431 devices.

**TABLE 10-2: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH PORTA**

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on POR, BOR	Value on all other Resets
PORTA	RA7 <sup>(1)</sup>	RA6 <sup>(1)</sup>	RA5	RA4	RA3	RA2	RA1	RA0	xx0x 0000	uu0u 0000
LATA	LATA7 <sup>(1)</sup>	LATA6 <sup>(1)</sup>	LATA Data Output Register						xxxx xxxx	uuuu uuuu
TRISA	TRISA7 <sup>(1)</sup>	TRISA6 <sup>(1)</sup>	PORTA Data Direction Register						1111 1111	1111 1111
ADCON1	VCFG1	VCFG0	—	FIFOEN	BFEMT	BFOVFL	ADPNT1	ADPNT0	00-0 0000	00-1 0000
ANSEL0	ANS7 <sup>(2)</sup>	ANS6 <sup>(2)</sup>	ANS5 <sup>(2)</sup>	ANS4	ANS3	ANS2	ANS1	ANS0	1111 1111	1111 1111
ANSEL1	—	—	—	—	—	—	—	ANS8 <sup>(2)</sup>	---- -1	---- -1

Legend: x = unknown, u = unchanged, — = unimplemented, read as '0'. Shaded cells are not used by PORTA.

Note 1: RA7:RA6 and their associated latch and data direction bits are enabled as I/O pins based on oscillator configuration; otherwise, they are read as '0'.

2: ANS5 through ANS8 are available only on the PIC18F4331/4431 devices.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PIC18F2331/2431/4331/4431

### 10.2 PORTB, TRISB and LATB Registers

PORTB is an 8-bit wide, bidirectional port. The corresponding Data Direction register is TRISB. Setting a TRISB bit (= 1) will make the corresponding PORTB pin an input (i.e., put the corresponding output driver in a high-impedance mode). Clearing a TRISB bit (= 0) will make the corresponding PORTB pin an output (i.e., put the contents of the output latch on the selected pin).

The Data Latch register (LATB) is also memory mapped. Read-modify-write operations on the LATB register read and write the latched output value for PORTB.

#### EXAMPLE 10-2: INITIALIZING PORTB

```

CLRF  PORTB  ; Initialize PORTB by
              ; clearing output
              ; data latches
CLRF  LATB   ; Alternate method
              ; to clear output
              ; data latches
MOVLW 0x0CF ; Value used to
              ; initialize data
              ; direction
MOVWF TRISB ; Set RB<3:0> as inputs
              ; RB<5:4> as outputs
              ; RB<7:6> as inputs
  
```

Each of the PORTB pins has a weak internal pull-up. A single control bit can turn on all the pull-ups. This is performed by clearing bit RBPU (INTCON2<7>). The weak pull-up is automatically turned off when the port pin is configured as an output. The pull-ups are disabled on a Power-on Reset.

Four of the PORTB pins (RB7:RB4) have an interrupt-on-change feature. Only pins configured as inputs can cause this interrupt to occur (i.e., any RB7:RB4 pin configured as an output is excluded from the interrupt-on-change comparison). The input pins (of RB7:RB4) are compared with the old value latched on the last read of PORTB. The "mismatch" outputs of RB7:RB4 are ORed together to generate the RB port change interrupt with flag bit, RBIF (INTCON<0>).

This interrupt can wake the device from Sleep. The user, in the Interrupt Service Routine, can clear the interrupt in the following manner:

- Any read or write of PORTB (except with the MOVFF (ANY), PORTB instruction). This will end the mismatch condition.
- Clear flag bit RBIF.

A mismatch condition will continue to set flag bit RBIF. Reading PORTB will end the mismatch condition and allow flag bit RBIF to be cleared.

The interrupt-on-change feature is recommended for wake-up on key depression operation and operations where PORTB is only used for the interrupt-on-change feature. Polling of PORTB is not recommended while using the interrupt-on-change feature.

RB<0:3> and RB4 pins are multiplexed with the 14-bit PWM module for PWM<0:3> and PWM5 output. The RB5 pin can be configured by the Configuration bit PWM4MX as the alternate pin for PWM4 output.

# PIC18F2331/2431/4331/4431

**TABLE 10-3: PORTB FUNCTIONS**

Name	Bit #	Buffer	Function
RB0/PWM0	bit 0	TTL <sup>(1)</sup>	Input/output pin or PCPWM output PWM0. Internal software programmable weak pull-up.
RB1/PWM1	bit 1	TTL <sup>(1)</sup>	Input/output pin or PCPWM output PWM1. Internal software programmable weak pull-up.
RB2/PWM2	bit 2	TTL <sup>(1)</sup>	Input/output pin or PCPWM output PWM2. Internal software programmable weak pull-up.
RB3/PWM3	bit 3	TTL <sup>(1)</sup>	Input/output pin or PCPWM output PWM3. Internal software programmable weak pull-up.
RB4/KBI0/PWM5	bit 4	TTL	Input/output pin (with interrupt-on-change) or PCPWM output PWM5. Internal software programmable weak pull-up.
RB5/KBI1/PWM4/ PGM <sup>(3)</sup>	bit 5	TTL/ST <sup>(2)</sup>	Input/output pin (with interrupt-on-change) or PCPWM output PWM4. Internal software programmable weak pull-up. Low-Voltage ICSP™ enable pin. <sup>(3)</sup>
RB6/KBI2/PGC	bit 6	TTL/ST <sup>(2)</sup>	Input/output pin (with interrupt-on-change). Internal software programmable weak pull-up. Serial programming clock.
RB7/KBI3/PGD	bit 7	TTL/ST <sup>(2)</sup>	Input/output pin (with interrupt-on-change). Internal software programmable weak pull-up. Serial programming data.

**Legend:** TTL = TTL input, ST = Schmitt Trigger input

**Note 1:** This buffer is a TTL input when configured as digital I/O.

**2:** This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode.

**3:** Low-Voltage Programming must be enabled.

**TABLE 10-4: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH PORTB**

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on POR, BOR	Value on all other Resets
PORTB	RB7	RB6	RB5	RB4	RB3	RB2	RB1	RB0	xxxx xxxx	xxxx xxxx
LATB	LATB Data Output Register								xxxx xxxx	xxxx xxxx
TRISB	PORTB Data Direction Register								1111 1111	1111 1111
INTCON	GIE/GIEH	PEIE/GIEL	TMR0IE	INT0IE	RBIE	TMR0IF	INT0IF	RBFIF	0000 000x	0000 000u
INTCON2	RBPUP	INTEDG0	INTEDG1	INTEDG2	—	TMR0IP	—	RBIP	1111 -1-1	1111 -1-1
INTCON3	INT2IP	INT1IP	—	INT2IE	INT1IE	—	INT2IF	INT1IF	11-0 0-00	11-0 0-00

**Legend:** x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented, read as '0'.

Shaded cells are not used by PORTB.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PIC18F2331/2431/4331/4431

## 10.3 PORTC, TRISC and LATC Registers

PORTC is an 8-bit wide, bidirectional port. The corresponding Data Direction register is TRISC. Setting a TRISC bit (= 1) will make the corresponding PORTC pin an input (i.e., put the corresponding output driver in a high-impedance mode). Clearing a TRISC bit (= 0) will make the corresponding PORTC pin an output (i.e., put the contents of the output latch on the selected pin).

The Data Latch register (LATC) is also memory mapped. Read-modify-write operations on the LATC register read and write the latched output value for PORTC.

PORTC is multiplexed with several peripheral functions (Table 10-5). The pins have Schmitt Trigger input buffers.

When enabling peripheral functions, care should be taken in defining TRIS bits for each PORTC pin. Some peripherals override the TRIS bit to make a pin an output, while other peripherals override the TRIS bit to make a pin an input. The user should refer to the corresponding peripheral section for the correct TRIS bit settings.

**Note:** On a Power-on Reset, these pins are configured as digital inputs.

The contents of the TRISC register are affected by peripheral overrides. Reading TRISC always returns the current contents, even though a peripheral device may be overriding one or more of the pins.

External interrupts, IN0, INT1 and INT2, are placed on RC3, RC4 and RC5 pins, respectively.

SSP alternate interface pins, SDI/SDA, SCK/SCL and SDO are placed on RC4, RC5 and RC7 pins, respectively.

These pins are multiplexed on PORTC and PORTD by using the SSPMX bit in the CONFIG3L register.

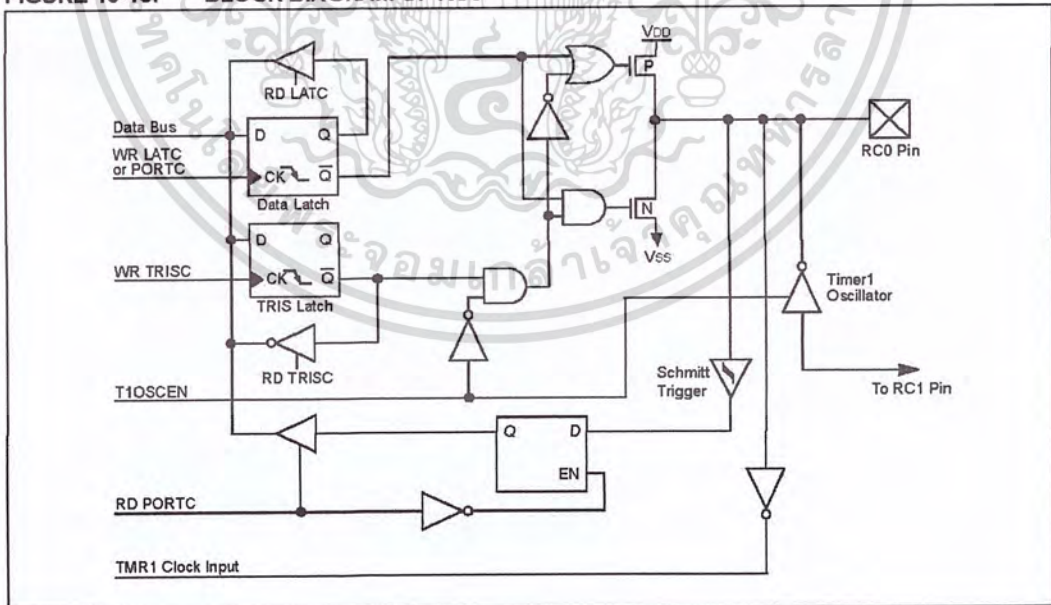
EUSART pins RX/DT and TX/CK are placed on RC7 and RC6 pins, respectively.

The alternate Timer5 external clock input, T5CKI, and the alternate TMR0 external clock input, T0CKI, are placed on RC3 and are multiplexed with the PORTD (RD0) pin using the EXCLKMX Configuration bit in CONFIG3H. Fault inputs to the 14-bit PWM module, FLTA and FLTB, are located on RC1 and RC2. FLTA input on RC1 is multiplexed with RD4 using the FLTAMX bit.

### EXAMPLE 10-3: INITIALIZING PORTC

```
CLRF   PORTC   ; Initialize PORTC by
             ; clearing output
             ; data latches
CLRF   LATC    ; Alternate method
             ; to clear output
             ; data latches
MOVLW 0xCF    ; Value used to
             ; initialize data
             ; direction
MOVWF  TRISC   ; Set RC<3:0> as inputs
             ; RC<5:4> as outputs
             ; RC<7:6> as inputs
```

FIGURE 10-13: BLOCK DIAGRAM OF RC0



# PIC18F2331/2431/4331/4431

**TABLE 10-5: PORTC FUNCTIONS**

Name	Bit #	Buffer Type	Function
RC0/T1OSO/T1CKI	bit 0	ST	Input/output port pin or Timer1 oscillator output/Timer1 clock input.
RC1/T1OSI/CCP2/FLTA	bit 1	ST/CMOS	Input/output port pin, Timer1 oscillator input, Capture2 input/Compare2 output/PWM output when CCP2Mx bit is disabled or FLTA input.
RC2/CCP1/FLTB	bit 2	ST	Input/output port pin, Capture1 input/Compare1 output/PWM1 output or FLTB input.
RC3/T0CKI/T5CKI/INT0	bit 3	ST	Input/output port pin, Timer0 and Timer5 alternate clock input or external interrupt 0.
RC4/INT1/SDI/SDA	bit 4	ST	Input/output port pin, SPI data in, I <sup>2</sup> C™ data I/O or external interrupt 1.
RC5/INT2/SCK/SCL	bit 5	ST	Input/output port pin, Synchronous Serial Port clock I/O or external interrupt 2.
RC6/TX/CK/SS	bit 6	ST	Input/output port pin, EUSART asynchronous transmit, EUSART synchronous clock or SPI slave select input.
RC7/RX/DT/SDO	bit 7	ST	Input/output port pin, EUSART asynchronous receive, EUSART synchronous data or SPI data out.

Legend: ST = Schmitt Trigger input

**TABLE 10-6: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH PORTC**

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on POR, BOR	Value on all other Resets
PORTC	RC7	RC6	RC5	RC4	RC3	RC2	RC1	RC0	xxxx xxxx	uuuu uuuu
LATC	LATC Data Output Register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
TRISC	PORTC Data Direction Register								1111 1111	1111 1111
INTCON	GIE/GIEH	PEIE/GIEL	TMR0IE	INT0IE	RBIE	TMR0IF	INT0IF	RBIF	0000 000x	0000 000u
INTCON2	RBPU	INTEDG0	INTEDG1	INTEDG2	—	TMR0IP	—	RBIP	1111 -1-1	1111 -1-1
INTCON3	INT2IP	INT1IP	—	INT2IE	INT1IE	—	INT2IF	INT1IF	11-0 0-00	11-0 0-00

Legend: x = unknown, u = unchanged, - = unimplemented, read as '0'.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PIC18F2331/2431/4331/4431

## 10.4 PORTD, TRISD and LATD Registers

**Note:** PORTD is only available on PIC18F4331/4431 devices.

PORTD is an 8-bit wide, bidirectional port. The corresponding Data Direction register is TRISD. Setting a TRISD bit (= 1) will make the corresponding PORTD pin an input (i.e., put the corresponding output driver in a high-impedance mode). Clearing a TRISD bit (= 0) will make the corresponding PORTD pin an output (i.e., put the contents of the output latch on the selected pin).

The Data Latch register (LATD) is also memory mapped. Read-modify-write operations on the LATD register read and write the latched output value for PORTD.

All pins on PORTD are implemented with Schmitt Trigger input buffers. Each pin is individually configurable as an input or output.

**Note:** On a Power-on Reset, these pins are configured as digital inputs.

PORTD includes PWM<7:6> complementary fourth channel PWM outputs. PWM4 is the complementary output of PWM5 (the third channel), which is multiplexed with the RB5 pin. This output can be used as the alternate output using the PWM4MX Configuration bit in CONFIG3H when the Low-Voltage Programming pin (PGM) is used on RB5.

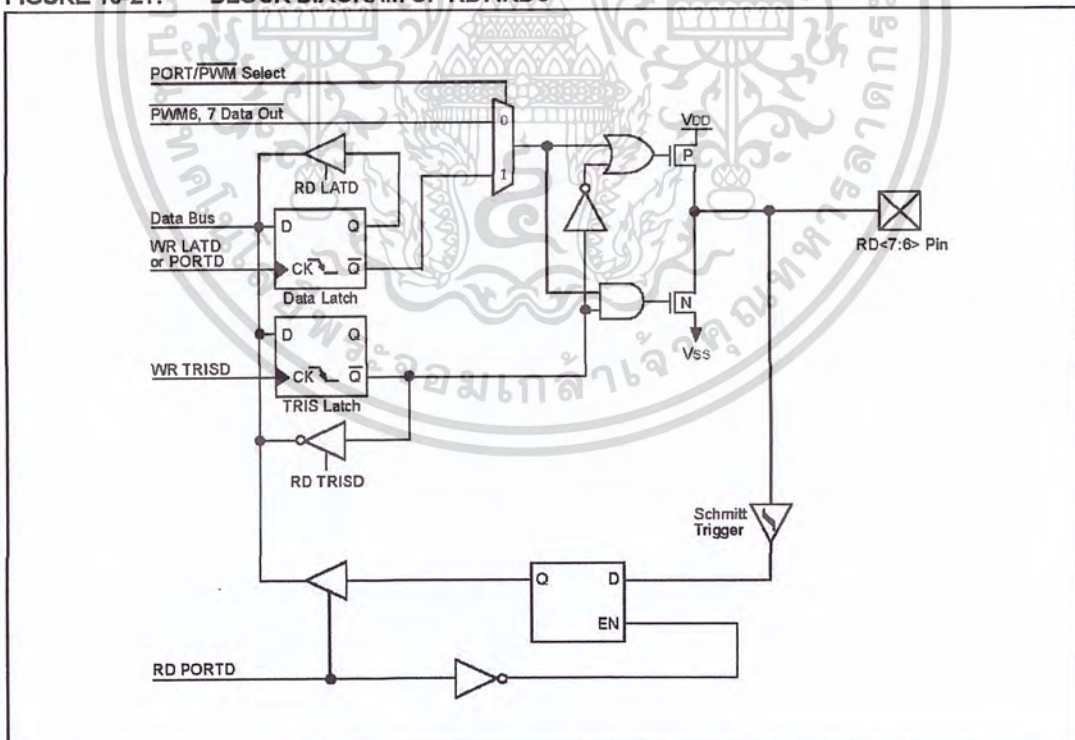
RD1, RD2 and RD3 can be used as the alternate output for SDO, SDI/SDA and SCK/SCL using the SSPMX Configuration bit in CONFIG3H.

RD4 can be used as the alternate output for  $\overline{\text{FLTA}}$  using the FLTAMX Configuration bit in CONFIG3H.

### EXAMPLE 10-4: INITIALIZING PORTD

```
CLRF PORTD ; Initialize PORTD by
             ; clearing output
             ; data latches
CLRF LATD  ; Alternate method
             ; to clear output
             ; data latches
MOVLW 0xCF ; Value used to
             ; initialize data
             ; direction
MOVWF TRISD ; Set RD<3:0> as inputs
             ; RD<5:4> as outputs
             ; RD<7:6> as inputs
```

FIGURE 10-21: BLOCK DIAGRAM OF RD7:RD6



# PIC18F2331/2431/4331/4431

**TABLE 10-7: PORTD FUNCTIONS**

Name	Bit #	Buffer Type	Function
RD0/T0CKI/T5CKI	bit 0	ST	Input/output port pin.
RD1/SDO	bit 1	ST	Input/output port pin.
RD2/SDI/SDA	bit 2	ST	Input/output port pin.
RD3/SCK/SCL	bit 3	ST	Input/output port pin.
RD4/FLTA <sup>(1)</sup>	bit 4	ST	Input/output port pin.
RD5/PWM4 <sup>(2)</sup>	bit 5	ST	Input/output port pin or PCPWM output PWM4.
RD6/PWM6	bit 6	ST	Input/output port pin or PCPWM output PWM6.
RD7/PWM7	bit 7	ST	Input/output port pin or PCPWM output PWM7.

Legend: ST = Schmitt Trigger input, TTL = TTL input

Note 1: RD4 is the alternate pin for FLTA.

2: RD5 is the alternate pin for PWM4.

**TABLE 10-8: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH PORTD**

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on POR, BOR	Value on all other Resets
PORTD	RD7	RD6	RD5	RD4	RD3	RD2	RD1	RD0	xxxx xxxx	nnnn nnnn
LATD	LATD Data Output Register								xxxx xxxx	nnnn nnnn
TRISD	PORTD Data Direction Register								1111 1111	1111 1111

Legend: x = unknown, n = unchanged, - = unimplemented, read as '0'.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PIC18F2331/2431/4331/4431

## 10.5 PORTE, TRISE and LATE Registers

**Note:** PORTE is only available on PIC18F4331/4431 devices.

PORTE is a 4-bit wide bidirectional port. Three pins (RE0/AN6, RE1/AN67 and RE2/AN8) are individually configurable as inputs or outputs. These pins have Schmitt Trigger input buffers. When selected as an analog input, these pins will read as '0's.

The corresponding Data Direction register is TRISE. Setting a TRISE bit (= 1) will make the corresponding PORTE pin an input (i.e., put the corresponding output driver in a high-impedance mode). Clearing a TRISE bit (= 0) will make the corresponding PORTE pin an output (i.e., put the contents of the output latch on the selected pin).

TRISE controls the direction of the RE pins, even when they are being used as analog inputs. The user must make sure to keep the pins configured as inputs when using them as analog inputs.

**Note:** On a Power-on Reset, RE2:RE0 are configured as analog inputs.

The Data Latch register (LATE) is also memory mapped. Read-modify-write operations on the LATE register read and write the latched output value for PORTE.

The fourth pin of PORTE ( $\overline{\text{MCLR}}/\text{VP}/\text{RE3}$ ) is an input only pin. Its operation is controlled by the MCLRE Configuration bit in Configuration Register 3H (CONFIG3H<7>). When selected as a port pin (MCLRE = 0), it functions as a digital input-only pin. As such, it does not have TRIS or LAT bits associated with its operation. Otherwise, it functions as the device's master clear input. In either configuration, RE3 also functions as the programming voltage input during programming.

**Note:** On a Power-on Reset, RE3 is enabled as a digital input only if Master Clear functionality is disabled.

### EXAMPLE 10-5: INITIALIZING PORTE

```
CLRF   PORTE           ; Initialize PORTE by
                        ; clearing output
                        ; data latches
CLRF   LATE            ; Alternate method
                        ; to clear output
                        ; data latches
MOVLW  0x3F           ; Configure A/D
MOVWF  ANSEL0         ; for digital inputs
BCF    ANSEL1, 0      ;
MOVLW  0x03           ; Value used to
                        ; initialize data
                        ; direction
MOVWF  TRISE          ; Set RE<0> as input
                        ; RE<1> as output
                        ; RE<2> as input
```

#### 10.5.1 PORTE IN 28-PIN DEVICES

For PIC18F2331/2431 devices, PORTE is only available when master clear functionality is disabled (CONFIG3H<7> = 0). In these cases, PORTE is a single bit, input-only port comprised of RE3 only. The pin operates as previously described.

# PIC18F2331/2431/4331/4431

**REGISTER 10-1: TRISE REGISTER**

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	R/W-1	R/W-1	R/W-1
—	—	—	—	—	TRISE2	TRISE1	TRISE0
bit 7							bit 0

**Legend:**

R = Readable bit                      W = Writable bit                      U = Unimplemented bit, read as '0'  
 -n = Value at POR                      '1' = Bit is set                      '0' = Bit is cleared                      x = Bit is unknown

bit 7-3                      **Unimplemented:** Read as '0'  
 bit 2                      **TRISE2:** RE2 Direction Control bit  
                                  1 = Input  
                                  0 = Output  
 bit 1                      **TRISE1:** RE1 Direction Control bit  
                                  1 = Input  
                                  0 = Output  
 bit 0                      **TRISE0:** RE0 Direction Control bit  
                                  1 = Input  
                                  0 = Output

**TABLE 10-9: PORTE FUNCTIONS**

Name	Bit #	Buffer Type	Function
RE0/AN6	bit 0	ST	Input/output port pin or analog input.
RE1/AN7	bit 1	ST	Input/output port pin or analog input.
RE2/AN8	bit 2	ST	Input/output port pin or analog input.
MCLR/VPP/RE3	bit 3	ST	Input only port pin or programming voltage input (if MCLR is disabled); Master Clear input or programming voltage input (if MCLR is enabled).

Legend: ST = Schmitt Trigger input

**TABLE 10-10: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH PORTE**

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on POR, BOR	Value on all other Resets
PORTE	—	—	—	—	RE3 <sup>(1)</sup>	RE2	RE1	RE0	---- q000	---- q000
LATE	—	—	—	—	—	LATE Data Output Register			---- -xxx	---- -uuu
TRISE	—	—	—	—	—	PORTE Data Direction Register			---- -111	---- -111
ANSEL0	ANS7 <sup>(2)</sup>	ANS6 <sup>(2)</sup>	ANS5 <sup>(2)</sup>	ANS4	ANS3	ANS2	ANS1	ANS0	1111 1111	1111 1111
ANSEL1	—	—	—	—	—	—	—	ANS6 <sup>(2)</sup>	---- ---1	---- ---1

Legend: x = unknown, u = unchanged, - = unimplemented, read as '0', q = value depends on condition. Shaded cells are not used by PORTE.

Note 1: Implemented only when Master Clear functionality is disabled (CONFIG3H<7> = 0).

Note 2: ANS5 through ANS8 are available only on PIC18F4331/4431 devices.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

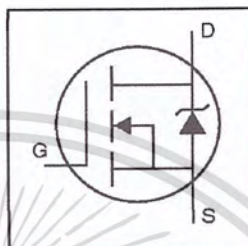
International  
**IR** Rectifier

PD - 91309B

**IRF3710**

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



$V_{DS} = 100V$

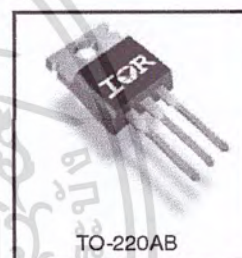
$R_{DS(on)} = 23m\Omega$

$I_D = 57A$

**Description**

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



TO-220AB

**Absolute Maximum Ratings**

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	57	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	40	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	230	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	200	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$I_{AR}$	Avalanche Current ②	28	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy ②	20	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.8	V/ns
$T_J$	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
$T_{STG}$	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case )	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

**Thermal Resistance**

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.75	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com

1

03/24/05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## IRF3710

International  
IGOR RectifierElectrical Characteristics @  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.13	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	23	m $\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 28A$ ③
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	32	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 28A$ ④
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	$\mu A$	$V_{DS} = 100V, V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = 80V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	130	nC	$I_D = 28A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	26	nC	$V_{DS} = 80V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	43	nC	$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	12	—	ns	$V_{DD} = 50V$
$t_r$	Rise Time	—	58	—	ns	$I_D = 28A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	45	—	ns	$R_G = 2.5\Omega$
$t_f$	Fall Time	—	47	—	ns	$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 10 ⑤
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
$L_S$	Internal Source Inductance	—	7.5	—	nH	
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	3130	—	pF	$V_{GS} = 0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	410	—	pF	$V_{DS} = 25V$
$C_{rss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	72	—	pF	$f = 1.0\text{MHz}$ , See Fig. 5
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy ⑥	—	1060	280	mJ	$I_{AS} = 28A, L = 0.70\text{mH}$

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	57	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	230	A	
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	1.2	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 28A, V_{GS} = 0V$ ④
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	140	220	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 28A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	—	670	1010	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S+L_D$ )				

## Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting  $T_J = 25^\circ\text{C}, L = 0.70\text{mH}$   
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 28A, V_{GS} = 10V$  (See Figure 12)
- ③  $I_{SD} \leq 28A, di/dt \leq 380A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width  $\leq 400\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .
- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑥ This is a calculated value limited to  $T_J = 175^\circ\text{C}$ .

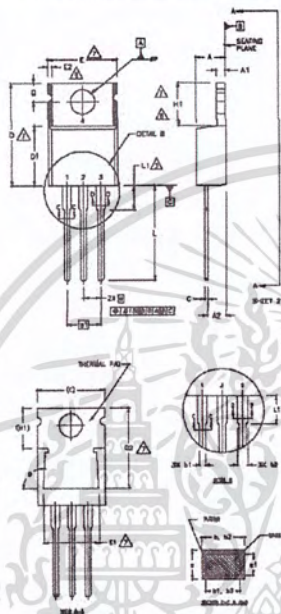
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IRF3710

## TO-220AB Package Outline

Dimensions are shown in millimeters (inches)

International  
**IR** Rectifier



- NOTES:
- 1 DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5 M-1994.
  - 2 DIMENSIONS ARE SHOWN IN INCHES (MILLIMETERS).
  - 3 LEAD DIMENSION AND FINISH UNCONTROLLED IN L1.
  - 4 DIMENSION D & C DO NOT INCLUDE SOLDER FLASH. SOLDER FLASH SHALL NOT EXCEED .002" (0.127) PER SIDE. THESE DIMENSIONS ARE MEASURED AT THE OUTERMOST EXTREMES OF THE PLASTIC BODY.
  - 5 DIMENSION H1 & e1 APPLY TO THESE METAL ONLY.
  - 6 CONTROLLING DIMENSION - INCHES.
  - 7 THERMAL PAD CONTOUR OPTIONAL WITHIN DIMENSIONS E1, E2 & E1.
  - 8 DIMENSION E2 X H1 DEFINE A ZONE WHERE STAMPING AND SINGLETON IRREGULARITIES ARE ALLOWED.

LEAD ASSIGNMENTS

- NOTES:
- 1 - GATE
  - 2 - SOURCE
  - 3 - DRAIN

METAL GAGES

- 1 - GATE
- 2 - COLLECTOR
- 3 - EMITTER

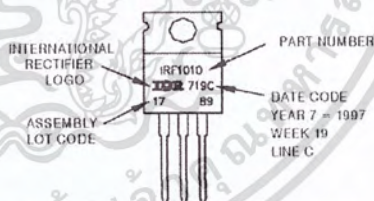
NOTES

- 1 - GATE/OPEN
- 2 - OFFICE
- 3 - ANODE

SYMBOL	DIMENSIONS				NOTES
	MILLIMETERS		INCHES		
A	3.56	4.82	.140	.190	
A1	0.81	1.40	.020	.055	
A2	2.04	2.92	.080	.115	
b	0.38	1.01	.015	.040	5
b1	0.38	0.86	.015	.030	
b2	1.19	1.27	.046	.070	
b3	1.15	1.75	.045	.088	
c	0.36	0.81	.014	.024	
c1	0.36	0.56	.014	.022	5
D	14.22	16.51	.560	.650	4
D1	6.36	8.02	.250	.315	
D2	12.19	12.88	.480	.509	7
C	8.66	10.66	.340	.420	4, 7
C1	8.36	8.86	.330	.350	7
e	2.54		.100		
e1	2.54		.100		
H1	6.05	6.05	.230	.270	7, 8
L	12.70	14.73	.500	.580	
L1	-	8.35	-	.350	5
RP	3.54	4.20	.139	.161	
Q	2.54	3.42	.100	.135	
Ø	Ø 2.54		Ø .100		

## TO-220AB Part Marking Information

EXAMPLE: THIS IS AN IRF1010  
 LOT CODE 1789  
 ASSEMBLED ON WW 19, 1997  
 IN THE ASSEMBLY LINE 'C'  
 Note: "P" in assembly line position indicates "Lead Free"



Data and specifications subject to change without notice.  
 This product has been designed and qualified for the Automotive [Q101] market.  
 Qualification Standards can be found on IR's Web site.

International  
**IR** Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105  
 TAC Fax: (310) 252-7903

Visit us at [www.irf.com](http://www.irf.com) for sales contact information.03/05

[www.irf.com](http://www.irf.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## STB55NF06 - STB55NF06-1 STP55NF06 - STP55NF06FP

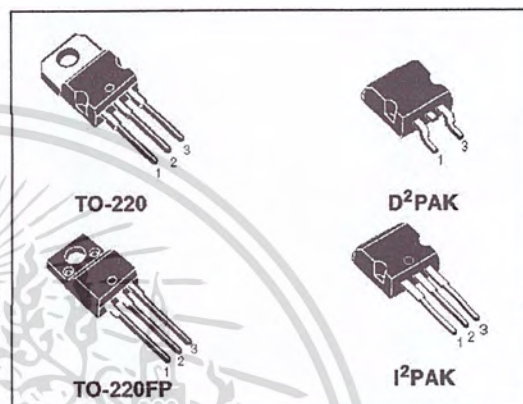
N-channel 60V - 0.015Ω - 50A - D<sup>2</sup>PAK/I<sup>2</sup>PAK/TO-220/TO-220FP  
STripFET™ II Power MOSFET

### General features

Type	V <sub>DSS</sub>	R <sub>DS(on)</sub>	I <sub>D</sub>
STB55NF06	60V	<0.018Ω	50A
STB55NF06-1	60V	<0.018Ω	50A
STP55NF06	60V	<0.018Ω	50A
STP55NF06FP	60V	<0.018Ω	50A <sup>(1)</sup>

1. Refer to soa for the max allowable current value on FP-type due to R<sub>th</sub> value

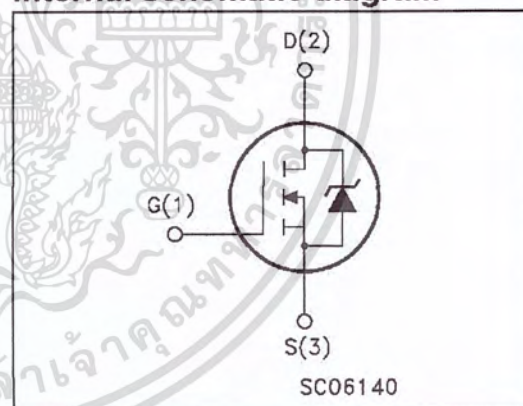
- 100% avalanche tested
- Exceptional dv/dt capability



### Description

This Power MOSFET is the latest development of STMicroelectronics unique "Single Feature Size™" strip-based process. The resulting transistor shows extremely high packing density for low on-resistance, rugged avalanche characteristics and less critical alignment steps therefore a remarkable manufacturing reproducibility.

### Internal schematic diagram



### Applications

- Switching application

### Order codes

Part number	Marking	Package	Packaging
STB55NF06T4	B55NF06	D <sup>2</sup> PAK	Tape & reel
STB55NF06-1	B55NF06	I <sup>2</sup> PAK	Tube
STP55NF06FP	P55NF06FP	TO-220FP	Tube
STP55NF06	P55NF06	TO-220	Tube

## 1 Electrical ratings

Table 1. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter	Value		Unit
		TO-220 D <sup>2</sup> PAK I <sup>2</sup> PAK	TO-220FP	
V <sub>DS</sub>	Drain-source voltage (V <sub>GS</sub> = 0)	60		V
V <sub>GS</sub>	Gate- source voltage	± 20		V
I <sub>D</sub>	Drain current (continuous) at T <sub>C</sub> = 25°C	50	50 <sup>(1)</sup>	A
I <sub>D</sub>	Drain current (continuous) at T <sub>C</sub> = 100°C	35	35 <sup>(1)</sup>	A
I <sub>DM</sub> <sup>(2)</sup>	Drain current (pulsed)	200	200 <sup>(1)</sup>	A
P <sub>tot</sub>	Total dissipation at T <sub>C</sub> = 25°C	110	30	W
	Derating Factor	0.73	0.20	W/°C
E <sub>AS</sub> <sup>(3)</sup>	Single pulse avalanche energy	340		mJ
dv/dt <sup>(4)</sup>	Peak diode recovery voltage slope	7		V/ns
V <sub>ISO</sub>	Insulation withstand voltage (DC)	-	2500	V
T <sub>stg</sub>	Storage temperature	-55 to 175		°C
T <sub>j</sub>	Max. operating junction temperature			

1. Refer to soa for the max allowable current value on FP-type due to R<sub>th</sub> value
2. Pulse width limited by safe operating area.
3. Starting T<sub>J</sub> = 25°C, V<sub>DD</sub> = 30V, I<sub>D</sub> = 25A
4. I<sub>SD</sub> ≤ 50A, dv/dt ≤ 400A/μs, V<sub>DD</sub> ≤ V<sub>(BR)DSS</sub>, T<sub>J</sub> ≤ T<sub>JMAX</sub>

Table 2. Thermal data

		TO-220 D <sup>2</sup> PAK I <sup>2</sup> PAK	TO-220FP	
R <sub>thj-case</sub>	Thermal resistance junction-case max	1.36	5	°C/W
R <sub>thj-amb</sub>	Thermal resistance junction-ambient max	62.5		°C/W
T <sub>J</sub>	Maximum lead temperature for soldering purpose <sup>(1)</sup>	300		°C

1. for 10 sec, 1.6mm from case

## 2 Electrical characteristics

( $T_{CASE}=25^{\circ}C$  unless otherwise specified)

**Table 3. On/off states**

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{(BR)DSS}$	Drain-source breakdown voltage	$I_D = 250\mu A, V_{GS} = 0$	60			V
$I_{DSS}$	Zero gate voltage drain current ( $V_{GS} = 0$ )	$V_{DS} = \text{max ratings}$ $V_{DS} = \text{max ratings}, T_C = 125^{\circ}C$			1 10	$\mu A$ $\mu A$
$I_{GSS}$	Gate-body leakage current ( $V_{DS} = 0$ )	$V_{GS} = \pm 20V$			$\pm 100$	nA
$V_{GS(th)}$	Gate threshold voltage	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$	2	3	4	V
$R_{DS(on)}$	Static drain-source on resistance	$V_{GS} = 10V, I_D = 27.5A$		0.015	0.018	$\Omega$

**Table 4. Dynamic**

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$g_{fs}^{(1)}$	Forward transconductance	$V_{DS} = 15V, I_D = 27.5A$		18		S
$C_{iss}$	Input capacitance	$V_{DS} = 25V, f = 1MHz,$ $V_{GS} = 0$		1300		pF
$C_{oss}$	Output capacitance			300		pF
$C_{rss}$	Reverse transfer capacitance			105		pF
$t_{d(on)}$	Turn-on delay time	$V_{DD} = 30V, I_D = 27.5A$ $R_G = 4.7\Omega, V_{GS} = 10V$ (see Figure 14)		20		ns
$t_r$	Rise time			50		ns
$t_{d(off)}$	Turn-off delay time			36		ns
$t_f$	Fall time			15		ns
$Q_g$	Total gate charge	$V_{DD} = 48V, I_D = 55A,$ $V_{GS} = 10V$ (see Figure 15)		44.5	60	nC
$Q_{gs}$	Gate-source charge			10.5		nC
$Q_{gd}$	Gate-drain charge			17.5		nC

1. Pulsed: Pulse duration = 300  $\mu s$ , duty cycle 1.5 %.

Table 5. Source drain diode

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$I_{SD}$ $I_{SDM}^{(1)}$	Source-drain current Source-drain current (pulsed)				50 200	A A
$V_{SD}^{(2)}$	Forward on voltage	$I_{SD} = 50A, V_{GS} = 0$			1.5	V
$t_{rr}$ $Q_{rr}$ $I_{RRM}$	Reverse recovery time Reverse recovery charge Reverse recovery current	$I_{SD} = 50A,$ $dI/dt = 100A/\mu s,$ $V_{DD} = 30V, T_j = 150^\circ C$ (see Figure 16)		75 170 4.5		ns nC A

1. Pulse width limited by safe operating area.

2. Pulsed: Pulse duration = 300  $\mu s$ , duty cycle 1.5 %

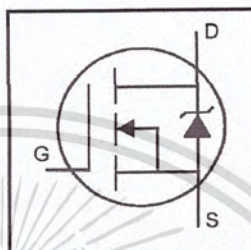
International  
**IR** Rectifier

PD - 91351

**IRF530N**

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



$$V_{DSS} = 100V$$

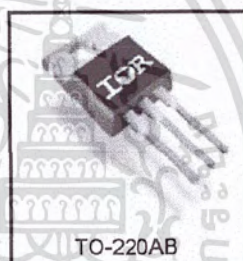
$$R_{DS(on)} = 90m\Omega$$

$$I_D = 17A$$

### Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



TO-220AB

### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units	
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	17	A	
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	12		
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	60		
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	70	W	
	Linear Derating Factor	0.47	W/°C	
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V	
$I_{AR}$	Avalanche Current ①	9.0	A	
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy ①	7.0	mJ	
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ②	7.4	V/ns	
$T_J$	Operating Junction and	-55 to + 175	°C	
$T_{STG}$	Storage Temperature Range			
	Soldering Temperature, for 10 seconds			300 (1.6mm from case )
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw			10 lbf•in (1.1N•m)

### Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	2.15	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com

1

3/16/01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## IRF530N

International  
IOR RectifierElectrical Characteristics @  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.11	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	90	m $\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 9.0A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	12	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 9.0A$ ④
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	$\mu A$	$V_{DS} = 100V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 80V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	37	nC	$I_D = 9.0A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	7.2		$V_{DS} = 80V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	11		$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	9.2	—		$V_{DD} = 50V$
$t_r$	Rise Time	—	22	—	ns	$I_D = 9.0A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	35	—		$R_G = 12\Omega$
$t_f$	Fall Time	—	25	—		$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 10 ④
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package
$L_S$	Internal Source Inductance	—	7.5	—		and center of die contact
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	920	—	pF	$V_{GS} = 0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	130	—		$V_{DS} = 25V$
$C_{riss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	19	—		$f = 1.0\text{MHz}$ , See Fig. 5
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy ②	—	340 ⑤	93 ⑥	mJ	$I_{AS} = 9.0A, L = 2.3\text{mH}$

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	17	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	60		
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 9.0A, V_{GS} = 0V$ ④
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	93	140	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 9.0A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	—	320	480	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S+L_D$ )				

## Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting  $T_J = 25^\circ\text{C}, L = 2.3\text{mH}$   
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 9.0A, V_{GS} = 10V$  (See Figure 12)
- ③  $I_{SD} \leq 9.0A, di/dt \leq 410A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width  $\leq 400\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .
- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑥ This is a calculated value limited to  $T_J = 175^\circ\text{C}$ .

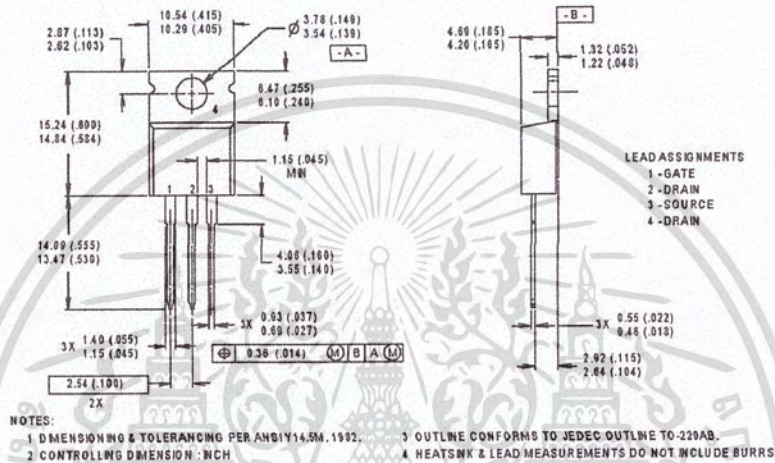
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IRF530N

International  
**IR** Rectifier

## Package Outline TO-220AB

Dimensions are shown in millimeters (inches)

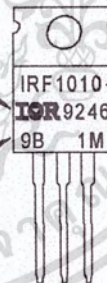


## Part Marking Information TO-220AB

EXAMPLE: THIS IS AN IRF1010  
WITH ASSEMBLY  
LOT CODE 9B1M

INTERNATIONAL  
RECTIFIER  
LOGO

ASSEMBLY  
LOT CODE



PART NUMBER

DATE CODE  
(YYWW)  
YY = YEAR  
WW = WEEK

Data and specifications subject to change without notice.  
This product has been designed and qualified for the Industrial market.  
Qualification Standards can be found on IR's Web site.

International  
**IR** Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105  
TAC Fax: (310) 252-7903

Visit us at [www.irf.com](http://www.irf.com) for sales contact information.3/01

[www.irf.com](http://www.irf.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



April 2000

QFET™

## FQP630

### 200V N-Channel MOSFET

#### General Description

These N-Channel enhancement mode power field effect transistors are produced using Fairchild's proprietary, planar stripe, DMOS technology.

This advanced technology has been especially tailored to minimize on-state resistance, provide superior switching performance, and withstand high energy pulse in the avalanche and commutation mode. These devices are well suited for high efficiency switching DC/DC converters, switch mode power supply, DC-AC converters for uninterrupted power supply, motor control.

#### Features

- 9A, 200V,  $R_{DS(on)} = 0.4\Omega$  @  $V_{GS} = 10V$
- Low gate charge (typical 19 nC)
- Low  $C_{rss}$  (typical 35 pF)
- Fast switching
- 100% avalanche tested
- Improved dv/dt capability



#### Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	FQP630	Units
$V_{DSS}$	Drain-Source Voltage	200	V
$I_D$	Drain Current - Continuous ( $T_C = 25^\circ\text{C}$ ) - Continuous ( $T_C = 100^\circ\text{C}$ )	9	A
		5.7	A
$I_{DM}$	Drain Current - Pulsed (Note 1)	36	A
$V_{GSS}$	Gate-Source Voltage	$\pm 25$	V
$E_{AS}$	Single Pulsed Avalanche Energy (Note 2)	162	mJ
$I_{AR}$	Avalanche Current (Note 1)	9	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy (Note 1)	7.8	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt (Note 3)	5.5	V/ns
$P_D$	Power Dissipation ( $T_C = 25^\circ\text{C}$ ) - Derate above $25^\circ\text{C}$	78	W
		0.62	W/ $^\circ\text{C}$
$T_J, T_{STG}$	Operating and Storage Temperature Range	-55 to +150	$^\circ\text{C}$
$T_L$	Maximum lead temperature for soldering purposes, 1/8" from case for 5 seconds	300	$^\circ\text{C}$

#### Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Typ	Max	Units
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance, Junction-to-Case	--	1.61	$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta CS}$	Thermal Resistance, Case-to-Sink	0.5	--	$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	--	62.5	$^\circ\text{C/W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Electrical Characteristics**T<sub>C</sub> = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Units
<b>Off Characteristics</b>						
BV <sub>DSS</sub>	Drain-Source Breakdown Voltage	V <sub>GS</sub> = 0 V, I <sub>D</sub> = 250 μA	200	–	–	V
ΔBV <sub>DSS</sub> / ΔT <sub>J</sub>	Breakdown Voltage Temperature Coefficient	I <sub>D</sub> = 250 μA, Referenced to 25°C	–	0.20	–	V/°C
I <sub>DSS</sub>	Zero Gate Voltage Drain Current	V <sub>DS</sub> = 200 V, V <sub>GS</sub> = 0 V	–	–	1	μA
		V <sub>DS</sub> = 160 V, T <sub>C</sub> = 125°C	–	–	10	μA
I <sub>GSSF</sub>	Gate-Body Leakage Current, Forward	V <sub>GS</sub> = 25 V, V <sub>DS</sub> = 0 V	–	–	100	nA
I <sub>GSSR</sub>	Gate-Body Leakage Current, Reverse	V <sub>GS</sub> = -25 V, V <sub>DS</sub> = 0 V	–	–	-100	nA
<b>On Characteristics</b>						
V <sub>GS(th)</sub>	Gate Threshold Voltage	V <sub>DS</sub> = V <sub>GS</sub> , I <sub>D</sub> = 250 μA	2.0	–	4.0	V
R <sub>DS(on)</sub>	Static Drain-Source On-Resistance	V <sub>GS</sub> = 10 V, I <sub>D</sub> = 4.5 A	–	0.34	0.4	Ω
g <sub>FS</sub>	Forward Transconductance	V <sub>DS</sub> = 40 V, I <sub>D</sub> = 4.5 A (Note 4)	–	4.4	–	S
<b>Dynamic Characteristics</b>						
C <sub>iss</sub>	Input Capacitance	V <sub>DS</sub> = 25 V, V <sub>GS</sub> = 0 V,	–	420	550	pF
C <sub>oss</sub>	Output Capacitance	f = 1.0 MHz	–	85	110	pF
C <sub>rss</sub>	Reverse Transfer Capacitance		–	35	45	pF
<b>Switching Characteristics</b>						
t <sub>d(on)</sub>	Turn-On Delay Time	V <sub>DD</sub> = 100 V, I <sub>D</sub> = 9 A,	–	8	30	ns
t <sub>r</sub>	Turn-On Rise Time	R <sub>G</sub> = 25 Ω	–	75	160	ns
t <sub>d(off)</sub>	Turn-Off Delay Time		–	47	110	ns
t <sub>f</sub>	Turn-Off Fall Time	(Note 4, 5)	–	64	140	ns
Q <sub>g</sub>	Total Gate Charge	V <sub>DS</sub> = 160 V, I <sub>D</sub> = 9 A,	–	19	25	nC
Q <sub>gs</sub>	Gate-Source Charge	V <sub>GS</sub> = 10 V	–	3	–	nC
Q <sub>gd</sub>	Gate-Drain Charge	(Note 4, 5)	–	9.5	–	nC
<b>Drain-Source Diode Characteristics and Maximum Ratings</b>						
I <sub>S</sub>	Maximum Continuous Drain-Source Diode Forward Current		–	–	9	A
I <sub>SM</sub>	Maximum Pulsed Drain-Source Diode Forward Current		–	–	36	A
V <sub>SD</sub>	Drain-Source Diode Forward Voltage	V <sub>GS</sub> = 0 V, I <sub>S</sub> = 9 A	–	–	1.5	V
t <sub>rr</sub>	Reverse Recovery Time	V <sub>GS</sub> = 0 V, I <sub>S</sub> = 9 A,	–	150	–	ns
Q <sub>rr</sub>	Reverse Recovery Charge	di <sub>F</sub> / dt = 100 A/μs (Note 4)	–	0.68	–	μC

**Notes:**

1. Repetitive Rating : Pulse width limited by maximum junction temperature
2. L = 3mH, I<sub>S</sub> = 9A, V<sub>DD</sub> = 50V, R<sub>G</sub> = 25 Ω, Starting T<sub>J</sub> = 25°C
3. I<sub>SD</sub> < 9A, di/dt < 300μA/s, V<sub>DD</sub> < BV<sub>DSS</sub>, Starting T<sub>J</sub> = 25°C
4. Pulse Test : Pulse width < 300μs, Duty cycle < 2%
5. Essentially independent of operating temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## TRADEMARKS

The following are registered and unregistered trademarks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

ACEx™	HiSeC™	SuperSOT™-8
Bottomless™	ISOPLANAR™	SyncFET™
CoolFET™	MICROWIRE™	TinyLogic™
CROSSVOLT™	POP™	UHC™
E <sup>2</sup> CMOS™	PowerTrench®	VCX™
FACT™	QFET™	
FACT Quiet Series™	QS™	
FAST®	Quiet Series™	
FASTr™	SuperSOT™-3	
GTO™	SuperSOT™-6	

## DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

## LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

## PRODUCT STATUS DEFINITIONS

### Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative or In Design	This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	This datasheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
No Identification Needed	Full Production	This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
Obsolete	Not In Production	This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild semiconductor. The datasheet is printed for reference information only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

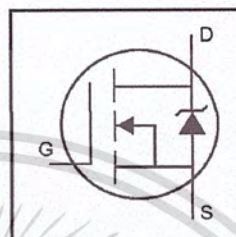
International  
**IR** Rectifier

PD - 91811

# IRFB9N60A

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Fast Switching
- Ease of Paraleling
- Simple Drive Requirements



$$V_{DS} = 600V$$

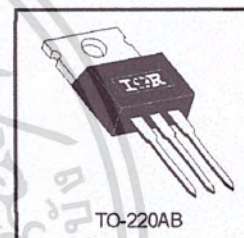
$$R_{DS(on)} = 0.75\Omega$$

$$I_D = 9.2A$$

## Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



## Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	9.2	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	5.8	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	37	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	170	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 30$	V
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy ②	290	mJ
$I_{AR}$	Avalanche Current ③	9.2	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy ④	17	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ⑤	5.0	V/ns
$T_J$	Operating Junction and	-55 to + 150	°C
$T_{STG}$	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case )	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1N·m)	

## Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.75	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com

1

10/7/98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## IRFB9N60A

International  
IR RectifierElectrical Characteristics @  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	600	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.66	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.75	$\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 5.5A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	5.5	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 5.5A$
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	$\mu A$	$V_{DS} = 600V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250	$\mu A$	$V_{DS} = 480V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{DS} = 30V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -30V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	49	nC	$I_D = 9.2A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	13	nC	$V_{DS} = 400V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	20	nC	$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	—	13	ns	$V_{DD} = 300V$
$t_r$	Rise Time	—	—	25	ns	$I_D = 9.2A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	—	30	ns	$R_G = 9.1\Omega$
$t_f$	Fall Time	—	—	22	ns	$R_D = 35.5\Omega$ , See Fig. 10 ④
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	—	4.5	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
$L_S$	Internal Source Inductance	—	—	7.5	nH	
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	—	1400	pF	$V_{GS} = 0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	—	180	pF	$V_{DS} = 25V$
$C_{rss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	—	7.1	pF	$f = 1.0\text{MHz}$ , See Fig. 5
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	—	1957	pF	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 1.0V, f = 1.0\text{MHz}$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	—	49	pF	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 480V, f = 1.0\text{MHz}$
$C_{oss\ eff.}$	Effective Output Capacitance ⑤	—	—	96	pF	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 0V$ to 480V

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	9.2	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	37	A	
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	1.5	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 9.2A, V_{GS} = 0V$ ④
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	530	800	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 9.2A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	—	3.0	4.4	$\mu C$	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$ )				

## Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. ( See fig. 11 )
- ② Starting  $T_J = 25^\circ\text{C}$ ,  $L = 6.8\text{mH}$ ,  $R_G = 25\Omega$ ,  $I_{AS} = 9.2A$ . (See Figure 12)
- ③  $I_{SD} \leq 9.2A$ ,  $di/dt \leq 50A/\mu s$ ,  $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$ ,  $T_J \leq 150^\circ\text{C}$

- ④ Pulse width  $\leq 300\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .

- ⑤  $C_{oss\ eff.}$  is a fixed capacitance that gives the same charging time as  $C_{oss}$  while  $V_{DS}$  is rising from 0 to 80%  $V_{DSS}$

2

www.irf.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

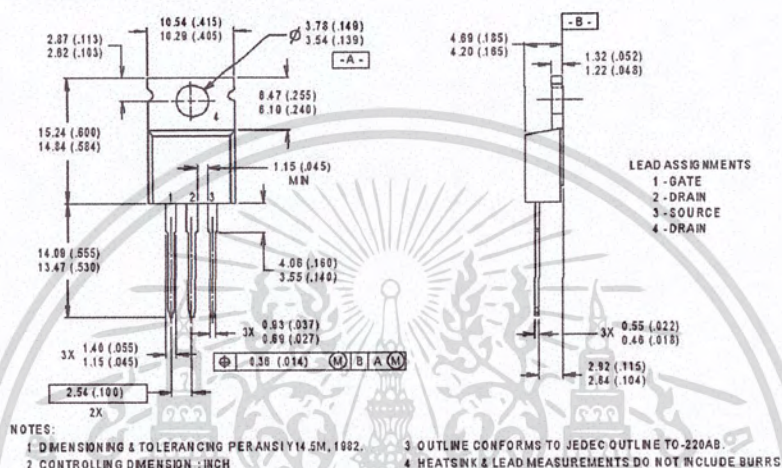
# IRFB9N60A

International  
**IR** Rectifier

## Package Outline

### TO-220AB Outline

Dimensions are shown in millimeters (inches)

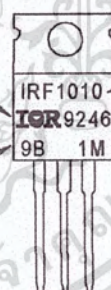


## Part Marking Information

### TO-220AB

EXAMPLE: THIS IS AN IRF1010  
WITH ASSEMBLY  
LOT CODE 9B1M

INTERNATIONAL  
RECTIFIER  
LOGO  
ASSEMBLY  
LOT CODE



PART NUMBER  
DATE CODE  
(YYWW)  
YY = YEAR  
WW = WEEK

International  
**IR** Rectifier

**WORLD HEADQUARTERS:** 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, Tel: (310) 322 3331

**IR GREAT BRITAIN:** Hurst Green, Oxted, Surrey RH8 9BB, UK Tel: ++ 44 1883 732020

**IR CANADA:** 15 Lincoln Court, Brampton, Ontario L6T3Z2, Tel: (905) 453 2200

**IR GERMANY:** Saalburgstrasse 157, 61350 Bad Homburg Tel: ++ 49 6172 96590

**IR ITALY:** Via Liguria 49, 10071 Borgaro, Torino Tel: ++ 39 11 451 0111

**IR FAR EAST:** K&H Bldg., 2F, 30-4 Nishi-Ikebukuro 3-Chome, Toshima-Ku, Tokyo Japan 171 Tel: 81 3 3983 0086

**IR SOUTHEAST ASIA:** 1 Kim Seng Promenade, Great World City West Tower, 13-11, Singapore 237994 Tel: ++ 65 838 4630

**IR TAIWAN:** 16 Fl. Suite D. 207, Sec. 2, Tun Haw South Road, Taipei, 10673, Taiwan Tel: 886-2-2377-9936

<http://www.irf.com/> Data and specifications subject to change without notice. 10/98

[www.irf.com](http://www.irf.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**1.5KE6V8A/440A**  
**1.5KE6V8CA/440CA**

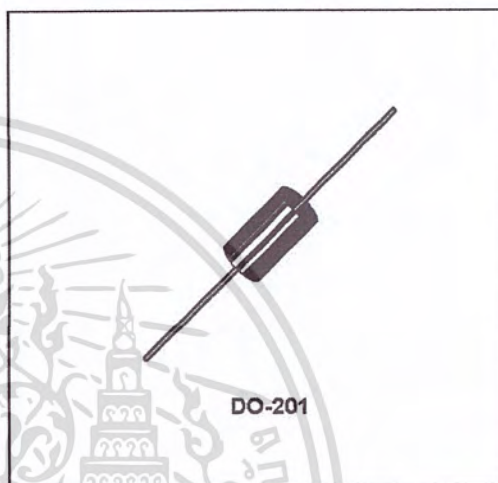
**TRANSIL™**

#### FEATURES

- PEAK PULSE POWER : 1500 W (10/1000 $\mu$ s)
- BREAKDOWN VOLTAGE RANGE :  
From 6.8V to 440 V
- UNI AND BIDIRECTIONAL TYPES
- LOW CLAMPING FACTOR
- FAST RESPONSE TIME
- UL RECOGNIZED

#### DESCRIPTION

Transil diodes provide high overvoltage protection by clamping action. Their instantaneous response to transient overvoltages makes them particularly suited to protect voltage sensitive devices such as MOS Technology and low voltage supplied IC's.



#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$ )

Symbol	Parameter	Value	Unit
$P_{PP}$	Peak pulse power dissipation (see note 1)	$T_j \text{ initial} = T_{amb}$ 1500	W
$P$	Power dissipation on infinite heatsink	$T_{amb} = 75^{\circ}\text{C}$ 5	W
$I_{FSM}$	Non repetitive surge peak forward current for unidirectional types	$t_p = 10\text{ms}$ $T_j \text{ initial} = T_{amb}$ 200	A
$T_{stg}$ $T_j$	Storage temperature range Maximum junction temperature	-65 to +175 175	$^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$
$T_L$	Maximum lead temperature for soldering during 10s at 5mm from case	230	$^{\circ}\text{C}$

Note 1 : For a surge greater than the maximum values, the diode will fail in short-circuit.

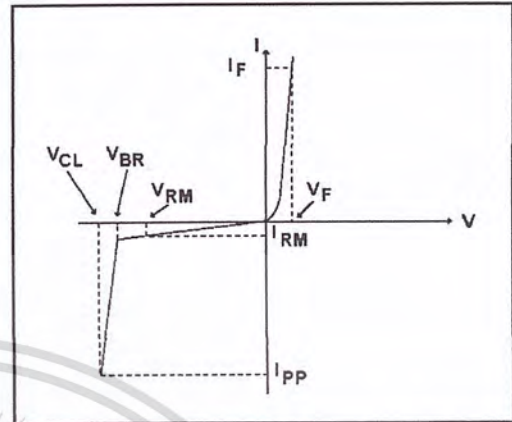
#### THERMAL RESISTANCES

Symbol	Parameter	Value	Unit
$R_{th(j-l)}$	Junction to leads	20	$^{\circ}\text{C/W}$
$R_{th(j-a)}$	Junction to ambient on printed circuit. $L_{lead} = 10\text{ mm}$	75	$^{\circ}\text{C/W}$

## 1.5KExx

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$ )

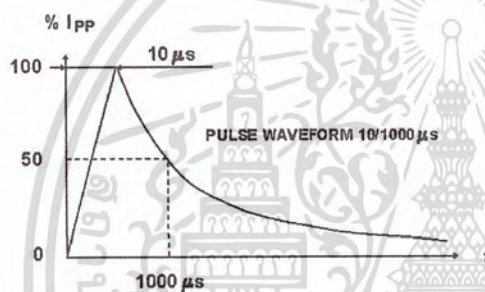
Symbol	Parameter
$V_{RM}$	Stand-off voltage
$V_{BR}$	Breakdown voltage
$V_{CL}$	Clamping voltage
$I_{RM}$	Leakage current @ $V_{RM}$
$I_{PP}$	Peak pulse current
$\alpha_T$	Voltage temperature coefficient
$V_F$	Forward voltage drop



Types		$I_{RM} @ V_{RM}$ max		$V_{BR} @ I_R$ min nom max note2				$V_{CL} @ I_{PP}$ max 10/1000 $\mu$ s		$V_{CL} @ I_{PP}$ max 8/20 $\mu$ s		$\alpha_T$ max note3	C typ note4
Unidirectional	Bidirectional	$\mu$ A	V	V	V	V	mA	V	A	V	A	$10^{-1}/^{\circ}\text{C}$	pF
1.5KE6V8A	1.5KE6V8CA	1000	5.8	6.45	6.8	7.14	10	10.5	143	13.4	746	5.7	9500
1.5KE7V5A	1.5KE7V5CA	500	6.4	7.13	7.5	7.88	10	11.3	132	14.5	690	6.1	8500
1.5KE10A	1.5KE10CA	10	8.55	9.5	10	10.5	1	14.5	100	18.6	538	7.3	7000
1.5KE12A	1.5KE12CA	5	10.2	11.4	12	12.6	1	16.7	90	21.7	461	7.8	6000
1.5KE15A	1.5KE15CA	1	12.8	14.3	15	15.8	1	21.2	71	27.2	368	8.4	5000
1.5KE18A	1.5KE18CA	1	15.3	17.1	18	18.9	1	25.2	59.5	32.5	308	8.8	4300
1.5KE22A	1.5KE22CA	1	18.8	20.9	22	23.1	1	30.6	49	39.3	254	9.2	3700
1.5KE24A	1.5KE24CA	1	20.5	22.8	24	25.2	1	33.2	45	42.8	234	9.4	3500
1.5KE27A	1.5KE27CA	1	23.1	25.7	27	28.4	1	37.5	40	48.3	207	9.6	3200
1.5KE30A	1.5KE30CA	1	25.6	28.5	30	31.5	1	41.5	36	53.5	187	9.7	2900
1.5KE33A	1.5KE33CA	1	28.2	31.4	33	34.7	1	45.7	33	59.0	169	9.8	2700
1.5KE36A	1.5KE36CA	1	30.8	34.2	36	37.8	1	49.9	30	64.3	156	9.9	2500
1.5KE39A	1.5KE39CA	1	33.3	37.1	39	41.0	1	53.9	28	69.7	143	10.0	2400
1.5KE47A	1.5KE47CA	1	40.2	44.7	47	49.4	1	64.8	23.2	84	119	10.1	2050
1.5KE56A	1.5KE56CA	1	47.8	53.2	56	58.8	1	77	19.5	100	100	10.3	1800
1.5KE62A	1.5KE62CA	1	53.0	58.9	62	65.1	1	85	17.7	111	90	10.4	1700
1.5KE68A	1.5KE68CA	1	58.1	64.6	68	71.4	1	92	16.3	121	83	10.4	1550
1.5KE82A	1.5KE82CA	1	70.1	77.9	82	86.1	1	113	13.3	146	69	10.5	1350
1.5KE100A	1.5KE100CA	1	85.5	95.0	100	105	1	137	11	178	56	10.6	1150
1.5KE120A	1.5KE120CA	1	102	114	120	126	1	165	9.1	212	47	10.7	1000
1.5KE150A	1.5KE150CA	1	128	143	150	158	1	207	7.2	265	38	10.8	850
1.5KE180A	1.5KE180CA	1	154	171	180	189	1	246	6.1	317	31.5	10.8	725

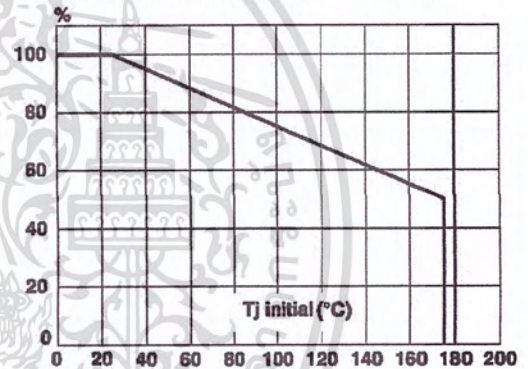
## 1.5KExx

Types		$I_{RM} @ V_{RM}$ max		$V_{BR} @ I_R$ min nom max note2				$V_{CL} @ I_{PP}$ max 10/1000 $\mu$ s		$V_{CL} @ I_{PP}$ max 8/20 $\mu$ s		$\alpha T$ max note3	C typ note4
Unidirectional	Bidirectional	$\mu$ A	V	V	V	V	mA	V	A	V	A	$10^{-1}/^{\circ}$ C	pF
1.5KE200A	1.5KE200CA	1	171	190	200	210	1	274	5.5	353	28	10.8	675
1.5KE220A	1.5KE220CA	1	188	209	220	231	1	328	4.6	388	26	10.8	625
1.5KE250A	1.5KE250CA	1	213	237	250	263	1	344	5.0	442	23	11	560
1.5KE300A	1.5KE300CA	1	256	285	300	315	1	414	5.0	529	19	11	500
1.5KE350A	1.5KE350CA	1	299	332	350	368	1	482	4.0	618	16	11	430
1.5KE400A	1.5KE400CA	1	342	380	400	420	1	548	4.0	706	14	11	390
1.5KE440A	1.5KE440CA	1	376	418	440	462	1	603	3.5	776	13	11	360



Note 2 : Pulse test:  $t_p < 50$  ms.  
 Note 3 :  $\Delta V_{BR} = \alpha T * (T_{amb} - 25) + V_{BR}(25^{\circ}C)$ .  
 Note 4 :  $V_R = 0$  V,  $F = 1$  MHz. For bidirectional types, capacitance value is divided by 2.

Fig. 1: Peak pulse power dissipation versus initial junction temperature (printed circuit



# 1N4728A - 1N4764A

## Zeners



DO-41 Glass case  
 COLOR BAND DENOTES CATHODE

### Absolute Maximum Ratings \* $T_s = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
$P_D$	Power Dissipation @ $T_L \leq 50^\circ\text{C}$ , Lead Length = 3/8"	1.0	W
	Derate above $50^\circ\text{C}$	6.67	mW/ $^\circ\text{C}$
$T_J, T_{STG}$	Operating and Storage Temperature Range	-65 to +200	$^\circ\text{C}$

\* These ratings are limiting values above which the serviceability of the diode may be impaired.

### Electrical Characteristics $T_s = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Device	$V_Z$ (V) @ $I_Z$ (Note 1)			Test Current $I_Z$ (mA)	Max. Zener Impedance			Leakage Current	
	Min.	Typ.	Max.		$Z_Z$ @ $I_Z$ ( $\Omega$ )	$Z_{ZK}$ @ $I_{ZK}$ ( $\Omega$ )	$I_{ZK}$ (mA)	$I_R$ ( $\mu\text{A}$ )	$V_R$ (V)
1N4728A	3.315	3.3	3.465	76	10	400	1	100	1
1N4729A	3.42	3.6	3.78	69	10	400	1	100	1
1N4730A	3.705	3.9	4.095	64	9	400	1	50	1
1N4731A	4.085	4.3	4.515	58	9	400	1	10	1
1N4732A	4.465	4.7	4.935	53	8	500	1	10	1
1N4733A	4.845	5.1	5.355	49	7	550	1	10	1
1N4734A	5.32	5.6	5.88	45	5	600	1	10	2
1N4735A	5.89	6.2	6.51	41	2	700	1	10	3
1N4736A	6.46	6.8	7.14	37	3.5	700	1	10	4
1N4737A	7.125	7.5	7.875	34	4	700	0.5	10	5
1N4738A	7.79	8.2	8.61	31	4.5	700	0.5	10	6
1N4739A	8.645	9.1	9.555	28	5	700	0.5	10	7
1N4740A	9.5	10	10.5	25	7	700	0.25	10	7.6
1N4741A	10.45	11	11.55	23	8	700	0.25	5	8.4
1N4742A	11.4	12	12.6	21	9	700	0.25	5	9.1
1N4743A	12.35	13	13.65	19	10	700	0.25	5	9.9
1N4744A	14.25	15	15.75	17	14	700	0.25	5	11.4
1N4745A	15.2	16	16.8	15.5	16	700	0.25	5	12.2
1N4746A	17.1	18	18.9	14	20	750	0.25	5	13.7
1N4747A	19	20	21	12.5	22	750	0.25	5	15.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Electrical Characteristics**  $T_C = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted

Device	$V_Z$ (V) @ $I_Z$ (Note 1)			Test Current $I_Z$ (mA)	Max. Zener Impedance			Leakage Current	
	Min.	Typ.	Max.		$Z_Z$ @ $I_Z$ ( $\Omega$ )	$Z_{ZK}$ @ $I_{ZK}$ ( $\Omega$ )	$I_{ZK}$ (mA)	$I_R$ ( $\mu\text{A}$ )	$V_R$ (V)
1N4748A	20.9	22	23.1	11.5	23	750	0.25	5	16.7
1N4749A	22.8	24	25.2	10.5	25	750	0.25	5	18.2
1N4750A	25.65	27	28.35	9.5	35	750	0.25	5	20.6
1N4751A	28.5	30	31.5	8.5	40	1000	0.25	5	22.8
1N4752A	31.35	33	34.65	7.5	45	1000	0.25	5	25.1
1N4753A	34.2	36	37.8	7	50	1000	0.25	5	27.4
1N4754A	37.05	39	40.95	6.5	60	1000	0.25	5	29.7
1N4755A	40.85	43	45.15	6	70	1500	0.25	5	32.7
1N4756A	44.65	47	49.35	5.5	80	1500	0.25	5	35.8
1N4757A	48.45	51	53.55	5	95	1500	0.25	5	38.8
1N4758A	53.2	56	58.8	4.5	110	2000	0.25	5	42.6
1N4759A	58.9	62	65.1	4	125	2000	0.25	5	47.1
1N4760A	64.6	68	71.4	3.7	150	2000	0.25	5	51.7
1N4761A	71.25	75	78.75	3.3	175	2000	0.25	5	56
1N4762A	77.9	82	86.1	3	200	3000	0.25	5	62.2
1N4763A	86.45	91	95.55	2.8	250	3000	0.25	5	69.2
1N4764A	95	100	105	2.5	350	3000	0.25	5	76

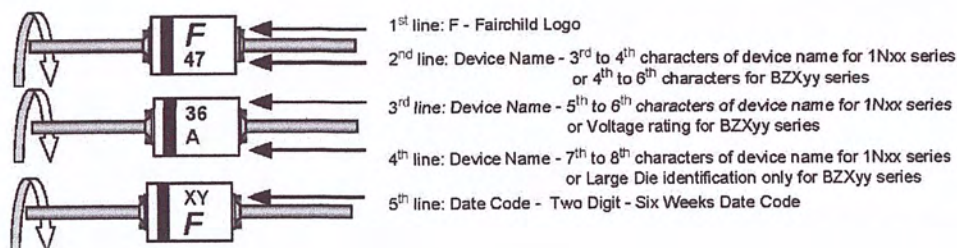
**Notes:**1. Zener Voltage ( $V_Z$ )The zener voltage is measured with the device junction in the thermal equilibrium at the lead temperature ( $T_L$ ) at  $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  and 3/8" lead length.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Top Mark Information

Device	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5
1N4728A	LOGO	47	28	A	XY
1N4729A	LOGO	47	29	A	XY
1N4730A	LOGO	47	30	A	XY
1N4731A	LOGO	47	31	A	XY
1N4732A	LOGO	47	32	A	XY
1N4733A	LOGO	47	33	A	XY
1N4734A	LOGO	47	34	A	XY
1N4735A	LOGO	47	35	A	XY
1N4736A	LOGO	47	36	A	XY
1N4737A	LOGO	47	37	A	XY
1N4738A	LOGO	47	38	A	XY
1N4739A	LOGO	47	39	A	XY
1N4740A	LOGO	47	40	A	XY
1N4741A	LOGO	47	41	A	XY
1N4742A	LOGO	47	42	A	XY
1N4743A	LOGO	47	43	A	XY
1N4744A	LOGO	47	44	A	XY
1N4745A	LOGO	47	45	A	XY
1N4746A	LOGO	47	46	A	XY
1N4747A	LOGO	47	47	A	XY
1N4748A	LOGO	47	48	A	XY
1N4749A	LOGO	47	49	A	XY
1N4750A	LOGO	47	50	A	XY
1N4751A	LOGO	47	51	A	XY
1N4752A	LOGO	47	52	A	XY
1N4753A	LOGO	47	53	A	XY
1N4754A	LOGO	47	54	A	XY
1N4755A	LOGO	47	55	A	XY
1N4756A	LOGO	47	56	A	XY
1N4757A	LOGO	47	57	A	XY
1N4758A	LOGO	47	58	A	XY
1N4759A	LOGO	47	59	A	XY
1N4760A	LOGO	47	60	A	XY
1N4761A	LOGO	47	61	A	XY
1N4762A	LOGO	47	62	A	XY
1N4763A	LOGO	47	63	A	XY
1N4764A	LOGO	47	64	A	XY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Top Mark Information** (Continued)**General Requirements:**

- 1.0 Cathod Band
- 2.0 First Line: F - Fairchild Logo
- 3.0 Second Line: Device name - For 1Nxx series: 3<sup>rd</sup> to 4<sup>th</sup> characters of the device name.  
For BZxx series: 4<sup>th</sup> to 6<sup>th</sup> characters of the device name.
- 4.0 Third Line: Device name - For 1Nxx series: 5<sup>th</sup> to 6<sup>th</sup> characters of the device name.  
For BZXyy series: Voltage rating
- 5.0 Third Line: Device name - For 1Nxx series: 7<sup>th</sup> to 8<sup>th</sup> characters of the device name.  
(the 8th character is the large die identification)  
For BZXyy series: Large Die Identification character
- 6.0 Fourth Line: Date Code - Two Digit - Six Weeks Date Code  
Where: X represents the last digit of the calendar year  
Y represents the Six weeks numeric code
- 7.0 Devices shall be marked as required in the device specification (PID or FSC Test Spec).
- 8.0 Maximum no. of marking lines: 5
- 9.0 Maximum no. of digits per line: 3
- 10.0 FSC logo must be 20 % taller than the alphanumeric marking and should occupy the 2 characters of the specified line.
- 11.0 Marking Font: Arial (Except FSC Logo)
- 12.0 First character of each marking line must be aligned vertically

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TRADEMARKS**

The following are registered and unregistered trademarks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

ACEx™	FAST®	IntelliMAX™	POP™	SPM™
ActiveArray™	FASTr™	ISOPLANAR™	Power247™	Stealth™
Bottomless™	FPS™	LittleFET™	PowerEdge™	SuperFET™
CoolFET™	FRFET™	MICROCOUPLER™	PowerSaver™	SuperSOT™-3
CROSSVOLT™	GlobalOptoisolator™	MicroFET™	PowerTrench®	SuperSOT™-6
DOME™	GTO™	MicroPak™	QFET®	SuperSOT™-8
EcoSPARK™	HiSeC™	MICROWIRE™	QS™	SyncFET™
E <sup>2</sup> CMOS™	i <sup>2</sup> C™	MSX™	QT Optoelectronics™	TinyLogic®
EnSigna™	i-Lo™	MSXPro™	Quiet Series™	TINYOPTO™
FACT™	ImpliedDisconnect™	OCX™	RapidConfigure™	TruTranslation™
FACT Quiet Series™		OCXPro™	RapidConnect™	UHC™
Across the board. Around the world.™		OPTOLOGIC®	µSerDes™	UltraFET®
The Power Franchise®		OPTOPLANAR™	SILENT SWITCHER®	UniFET™
Programmable Active Droop™		PACMAN™	SMART START™	VCX™

**DISCLAIMER**

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

**LIFE SUPPORT POLICY**

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.



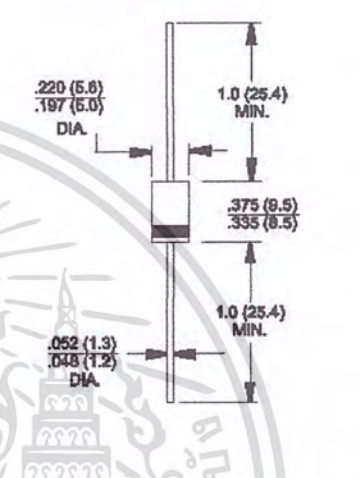
**PRODUCT STATUS DEFINITIONS**

**Definition of Terms**

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative or In Design	This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	This datasheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
No Identification Needed	Full Production	This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
Obsolete	Not In Production	This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild semiconductor. The datasheet is printed for reference information only.

Rev 115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		<h2 style="text-align: center;">MUR420 THRU MUR460</h2> <h3 style="text-align: center;">4.0 AMPS. Ultrafast Glass Passivated Rectifiers</h3>			
		<b>Voltage Range</b> 200 to 600 Volts <b>Current</b> 4.0 Amperes <b>DO-201AD</b>			
<b>Features</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Ideally suited for use in very high frequency switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes</li> <li>❖ Ultrafast recovery time for high efficiency</li> <li>❖ Excellent high temperature switching</li> <li>❖ Glass passivated junction</li> </ul>					
<b>Mechanical Data</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Cases: Molded plastic</li> <li>❖ Epoxy: UL 94V-0 rate flame retardant</li> <li>❖ Lead: Axial leads, solderable per MIL-STD-202, Method 208 guaranteed</li> <li>❖ Polarity: Color band denotes cathode end</li> <li>❖ High temperature soldering guaranteed: 260°C/10 seconds/.375"(.9.5mm) lead lengths at 5 lbs.(2.3kg) tension</li> <li>❖ Mounting position: Any</li> <li>❖ Weight: 1.2 grams, 0.045oz.</li> </ul>					
<b>Maximum Ratings and Electrical Characteristics</b> Rating at 25°C ambient temperature unless otherwise specified. Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load. For capacitive load, derate current by 20%					
Type Number	Symbol	MUR420	MUR440	MUR460	Units
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	$V_{RRM}$	200	400	600	V
Maximum RMS Voltage	$V_{RMS}$	140	280	420	V
Maximum DC Blocking Voltage	$V_{DC}$	200	400	600	V
Maximum Average Forward Rectified Current .375"(.9.5mm) Lead Length (See Fig. 1)	$I_{(AV)}$	4.0			A
Peak Forward Surge Current, 8.3 ms Single Half Sine-wave Superimposed on Rated Load (JEDEC method)	$I_{FSM}$	125	70		A
Maximum Instantaneous Forward Voltage @ 4.0A	$V_F$	0.89	1.28		V
Maximum DC Reverse Current @ $T_c=25^\circ\text{C}$ at Rated DC Blocking Voltage @ $T_c=150^\circ\text{C}$ (Note 4)	$I_R$	5.0 150	10 250		$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$
Maximum Reverse Recovery Time ( Note 2 )	$T_{rr}$	25	50		nS
Typical Junction Capacitance ( Note 1 ) $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Fig. 5)	$C_J$	65			pF
Typical Thermal Resistance (Note 3)	$R_{\theta JA}$	28			$^\circ\text{C}/\text{W}$
Operating Temperature Range	$T_J$	-65 to +175			$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{STG}$	-65 to +175			$^\circ\text{C}$

- Notes:**
1. Measured at 1 MHz and Applied Reverse Voltage of 4.0 Volts D.C.
  2. Reverse Recovery Test Conditions:  $I_F=0.5\text{A}$ ,  $I_R=1.0\text{A}$ ,  $I_{RR}=0.25\text{A}$
  3. Thermal Resistance from Junction to Ambient, Lead Length = 1/2" on P.C. Board with 0.2" x 0.2" Copper Surface.
  4. Pulse test:  $t_p = 300 \mu\text{s}$ , Duty Cycle < 2%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



RATINGS AND CHARACTERISTIC CURVES (MUR420 THRU MUR460)

FIG.1- MAXIMUM FORWARD CURRENT DERATING CURVE

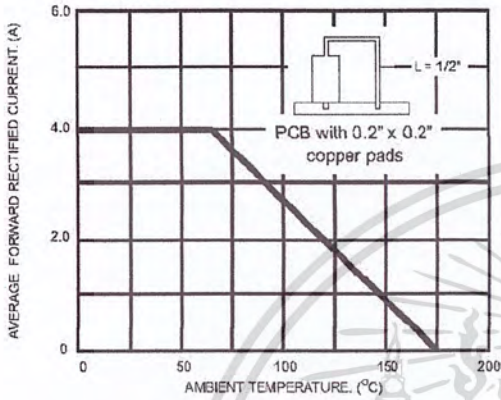


FIG.2- MAXIMUM NON-REPETITIVE FORWARD SURGE CURRENT

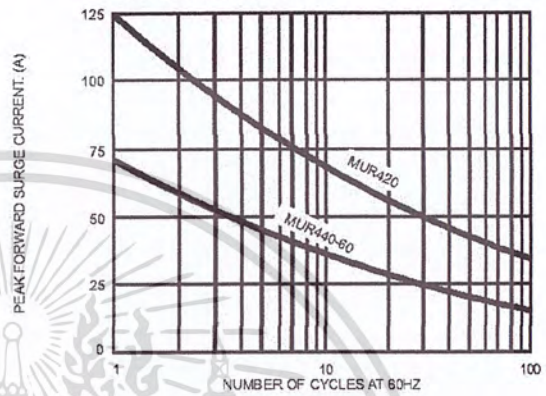


FIG.3- TYPICAL INSTANTANEOUS FORWARD CHARACTERISTICS

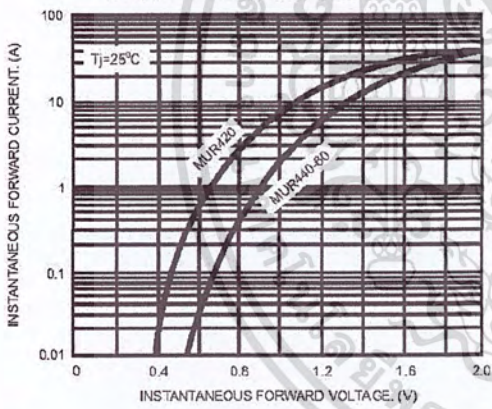


FIG.4- TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS

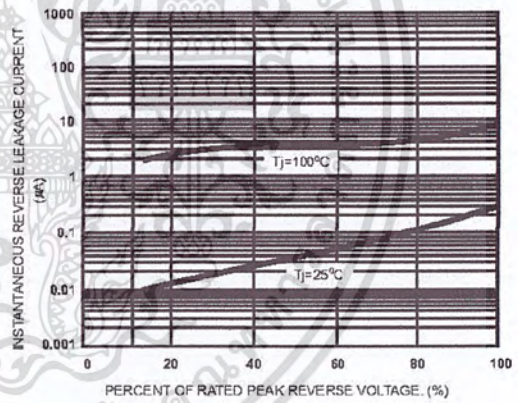
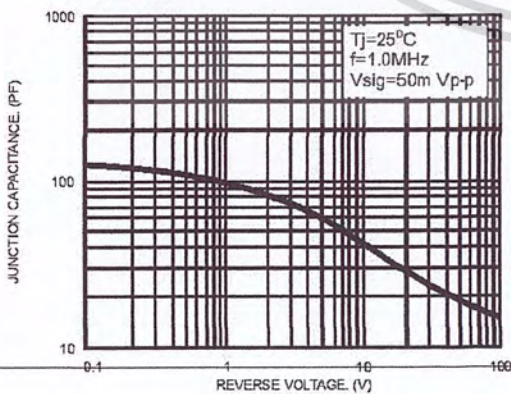


FIG.5- TYPICAL JUNCTION CAPACITANCE PER LEG





# 深圳市秋田视佳实业有限公司

## SHENZHEN AV-DISPLAY CO.,LTD.

深圳秋田视佳实业有限公司  
地址：深圳市华侨城东部工业区文昌街东北 C-7 栋

电话:(086)0755-26919178 传真:(086)0755-26911092  
网址：[Http://www.av-display.com.cn](http://www.av-display.com.cn)

SHENZHEN AV-DISPLAY CO.,LTD  
Address: North East C-7 Building, Wenchang Street  
Eastern District, OCT, ShenZhen, China  
TEL: (086)0755-26919178 FAX: (086)0755-26911092  
[Http://www.av-display.com.cn](http://www.av-display.com.cn)

## SPECIFICATION FOR LCM MODULE

MODULE NO.: ABC016002A10-GHW-R  
DOC.REVISION: 00

Customer Approval:

--

	SIGNATURE	DATE
PREPARED BY (RD ENGINEER)		NOV-10-2006
PREPARED BY (QA ENGINEER)		
CHECKED BY		
APPROVED BY		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



深圳市秋田视佳实业有限公司  
SHENZHEN AV-DISPLAY CO.,LTD.

## 1. FUNCTIONS & FEATURES

1.1. Format	: 16x2 characters
1.2. LCD mode	: STN / Positive /Transflective Mode / Grey
1.3. Viewing direction	: 6 o'clock
1.4. Driving scheme	: 1/16 Duty , 1/5 Bias
1.5. Power supply voltage (V <sub>DD</sub> )	: 5.0V
1.6. LCD driving voltage(V <sub>op</sub> )	: 4.2V
1.7. Operation temp	: -20~70℃
1.8. Storage temp	: -30~80℃
1.9. Backlight	: White (Edge)
1.10. RoHS compliant.	

## 2. MECHANICAL SPECIFICATIONS

2.1. Module size	: 80.0mm(L)*36.0mm(W)*14.5(H) max mm
2.2. Viewing area	: 62.2mm(L)*17.9mm(W)
2.3. Character pitch	: 3.55mm(L)*5.95mm(W)
2.4. Character size	: 2.95mm(L)*5.55mm(W)
2.5. Dot pitch	: 0.55mm(L)*0.65mm(W)
2.6. Dot size	: 0.60mm(L)*0.70mm(W)
2.7. Weight	: Approx.

## 3. BLOCK DIAGRAM

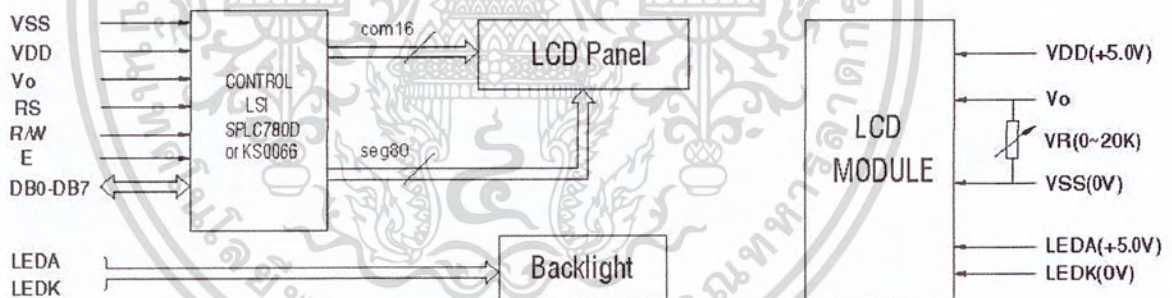


Figure1. Block diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



深圳市秋田视佳实业有限公司  
SHENZHEN AV-DISPLAY CO.,LTD.

4. DIMENSIONAL OUTLINE

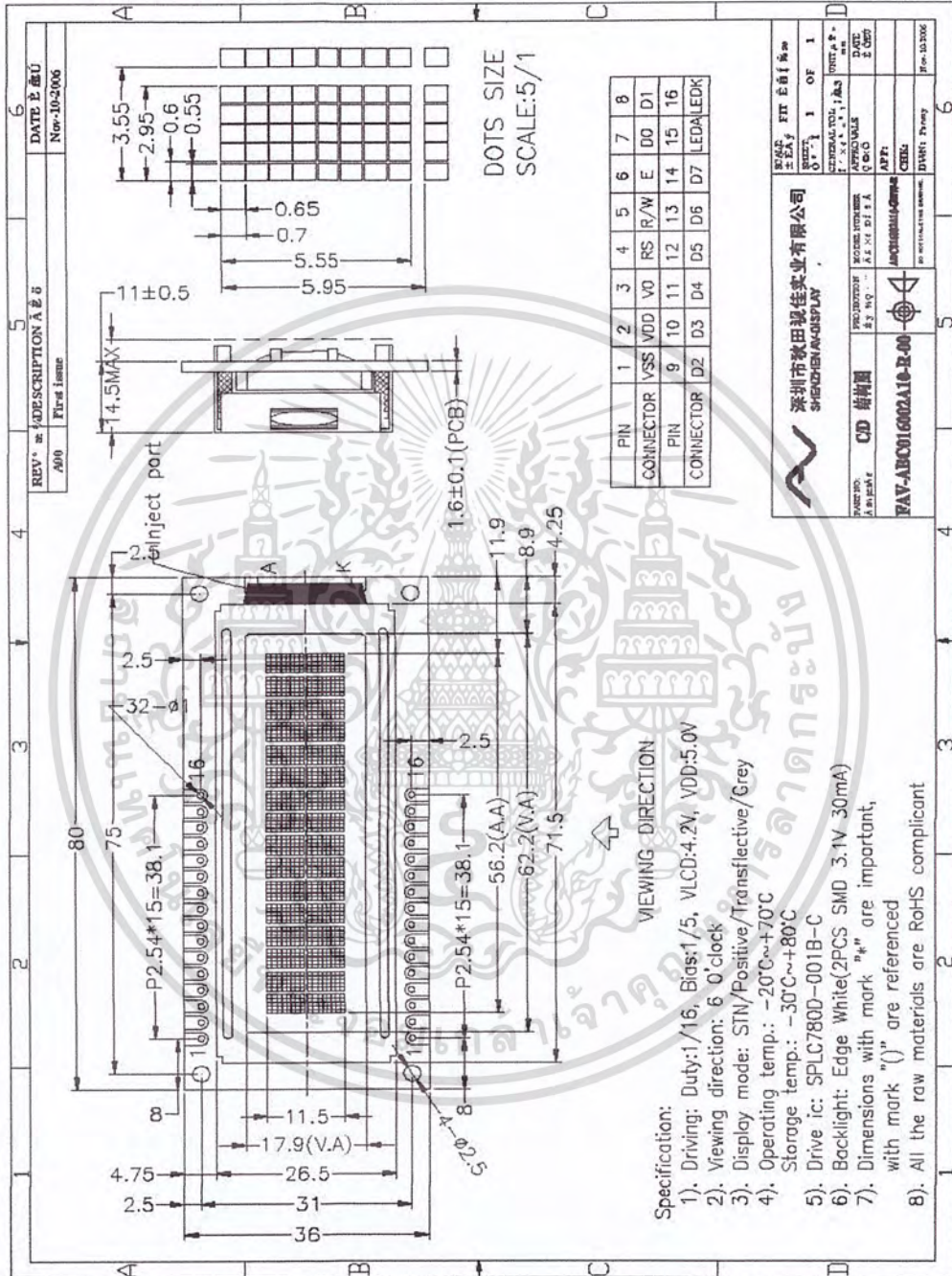


Figure 2. Dimensional outline

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Edited by Foxit Reader  
 Copyright(C) by Foxit Software Company,2005-2007  
 For Evaluation Only  
 深圳市秋田视佳实业有限公司  
 SHENZHEN AV-DISPLAY CO.,LTD.

## 5. PIN DESCRIPTION

No.	Symbol	Function
1-2	VDD	Power supply for Logic(+5V)
2-1	VSS	GND(0V)
3	V0	Power supply for LCD drive
4	RS	Register selection (H: Data register, L: Instruction register)
5	R/W	Read/write selection (H: Read, L: Write)
6	E	Enable signal for LCM
7~14	DB0~DB7	Data Bus line
15	LEDA	Power supply for Backlight(+5.0V)
16	LEDK	Power supply for Backlight(0V)

## 6. MAXIMUM ABSOLUTE LIMIT

### Maximum Absolute Power Ratings

Characteristic	Symbol	Unit	Value
Power Supply Voltage	$V_{DD}$	V	-0.3 to +7.0
Operating Voltage	$V_{LCD}$	V	$V_{DD}-15.0$ to $V_{DD}+0.3$
Input Voltage	$V_{IN}$	V	-0.3 to $V_{DD}+0.3$

NOTE: Voltage greater than above may damage the circuit.  
 $V_{DD} > V1 > V2 > V3 > V4 > V5$

### Temperature Characteristics

Characteristic	Symbol	Unit	Value
Operating Temperature	$T_{CPR}$	°C	-30 to +85
Storage Temperature	$T_{STG}$	°C	-55 to +125



深圳市秋田视佳实业有限公司  
SHENZHEN AV-DISPLAY CO.,LTD.

## 7. ELECTRICAL CHARACTERISTICS

### 7.1 DC CHARACTERISTICS

(V<sub>DD</sub> = 4.5V ~ 5.5V, T<sub>a</sub> = -30°C ~ +85°C)

Characteristic	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Operating Voltage	V <sub>DD</sub>	–	4.5	–	5.5	V
Operating Current	I <sub>DD</sub>	Internal oscillation or external clock (V <sub>DD</sub> = 5.0V, f <sub>osc</sub> = 270kHz)	–	0.35	0.6	mA
Input Voltage (1) (except OSC1)	V <sub>IH1</sub>	–	2.2	–	V <sub>DD</sub>	V
	V <sub>IL1</sub>	–	-0.3	–	0.6	
Input Voltage (2) (OSC1)	V <sub>IH2</sub>	–	V <sub>DD</sub> -1.0	–	V <sub>DD</sub>	V
	V <sub>IL2</sub>	–	-0.2	–	1.0	
Output Voltage (1) (DB0 to DB7)	V <sub>OH1</sub>	I <sub>OH</sub> = -0.205mA	2.4	–	–	V
	V <sub>OL1</sub>	I <sub>OL</sub> = 1.2mA	–	–	0.4	
Output Voltage (2) (except DB0 to DB7)	V <sub>OH2</sub>	I <sub>O</sub> = -40μA	0.9V <sub>DD</sub>	–	–	V
	V <sub>OL2</sub>	I <sub>O</sub> = 40μA	–	–	0.1V <sub>DD</sub>	
Voltage Drop	V <sub>dCOM</sub>	I <sub>O</sub> = ±0.1mA	–	–	1	V
	V <sub>dSEG</sub>		–	–	1	
Input Leakage Current	I <sub>LKG</sub>	V <sub>IN</sub> = 0V to V <sub>DD</sub>	-1	–	1	μA
Input Low Current	I <sub>L</sub>	V <sub>IN</sub> = 0V, V <sub>DD</sub> = 5V (pull up)	-50	-125	-250	
Internal Clock (external Rf)	f <sub>OSC1</sub>	Rf = 91kΩ ± 2% (V <sub>DD</sub> = 5V)	190	270	350	kHz
External Clock	f <sub>OSC</sub>	–	125	270	350	kHz
	duty		45	50	55	%
	t <sub>R</sub> , t <sub>F</sub>		–	–	0.2	μA
LCD Driving Voltage	V <sub>LCD</sub>	V <sub>DD</sub> -V5 (1/5, 1/4 bias)	3.0	–	13.0	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 深圳市秋田视佳实业有限公司 SHENZHEN AV-DISPLAY CO.,LTD.

### 7.2 AC Characteristics

(VDD = 4.5V ~ 5.5V, Ta = -30 °C ~ +85 °C)

Mode	Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Write Mode (refer to Figure-6)	E Cycle Time	$t_c$	500	-	-	ns
	E Rise / Fall Time	$t_{R, F}$	-	-	20	
	E Pulse Width (High, Low)	$t_w$	230	-	-	
	RW and RS Setup Time	$t_{su1}$	40	-	-	
	RW and RS Hold Time	$t_{H1}$	10	-	-	
	Data Setup Time	$t_{su2}$	80	-	-	
	Data Hold Time	$t_{H2}$	10	-	-	
Read Mode (refer to Figure-7)	E Cycle Time	$t_c$	500	-	-	ns
	E Rise / Fall Time	$t_{R, F}$	-	-	20	
	E Pulse Width (High, Low)	$t_w$	230	-	-	
	RW and RS Setup Time	$t_{su}$	40	-	-	
	RW and RS Hold Time	$t_H$	10	-	-	
	Data Output Delay Time	$t_{D}$	-	-	120	
	Data Hold Time	$t_{DH}$	5	-	-	

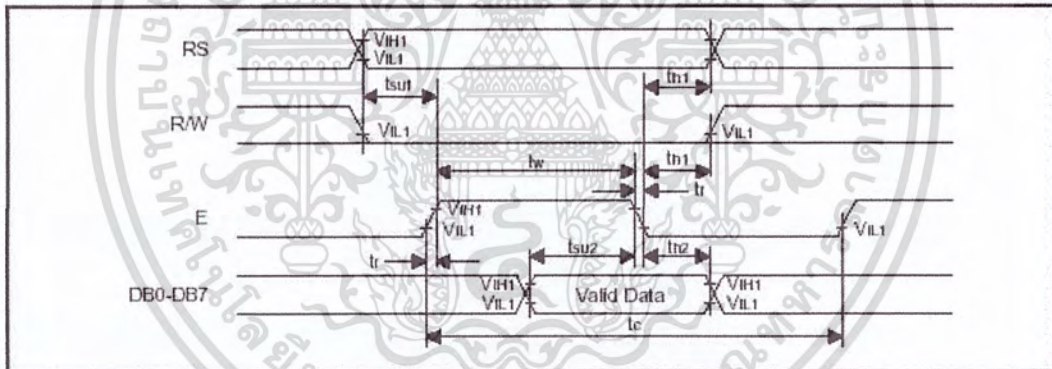


Figure 6. Write Mode Timing Diagram

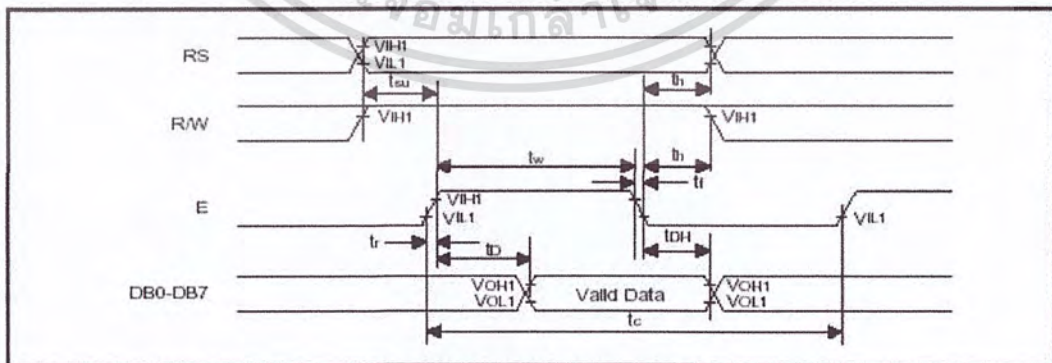


Figure 7. Read Mode Timing Diagram



深圳市秋田视佳实业有限公司  
SHENZHEN AV-DISPLAY CO.,LTD.

## 8. CONTROL AND DISPLAY INSTRUCTION

Instruction	Instruction Code										Description Instruction Code	Execution time (f <sub>soc</sub> =270kHz)
	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0		
Clear Display	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Write "20H" to DDRAM, and set DDRAM address to "00H" from AC.	1.53ms
Return Home	0	0	0	0	0	0	0	0	1	X	Set DDRAM address to "00H" from AC and return cursor to its original position if shifted. The contents of DDRAM are not changed.	1.53ms
Entry Mode Set	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	SH	Assign cursor moving direction and make shift of entire display enable.	30μs
Display ON/OFF Control	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	Set display(D), cursor(C), and blinking of cursor(B) on/off control bit.	30μs
Cursor or Display Shift	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	X	X	Set cursor moving and display shift control bit, and the direction, without changing DDRAM data.	30μs
Function Set	0	0	0	0	1	DL	N	F	X	X	Set interface data length (DL : 4-bit/8-bit), numbers of display line (N : 1-line/2-line), display font type (F : 5 X 8 dots/ 5 X 11 dots)	30μs
Set CGRAM Address	0	0	0	1	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0	Set CGRAM address in address counter.	30μs
Set DDRAM Address	0	0	1	AC6	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0	Set DDRAM address in address counter.	30μs
Read Busy Flag and Address	0	1	BF	AC6	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0	Whether during internal operation or not can be known by reading BF. The contents of address counter can also be read.	0μs
Write Data to RAM	1	0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Write data into internal RAM (DDRAM/CGRAM).	43μs
Read Data from RAM	1	1	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Read data from internal RAM (DDRAM/CGRAM).	43μs

NOTE: When an MPU program with checking the Busy Flag (DB7) is made, it must be necessary 1/2 F<sub>soc</sub> is necessary for executing the next instruction by the falling edge of the 'E' signal after the Busy Flag (DB7) goes to "Low".



深圳市秋田视佳实业有限公司  
SHENZHEN AV-DISPLAY CO.,LTD.

9. CHARACTER GENERATOR ROM

Upper 4 bit Lower 4 bit	LLLL	LLLH	LLHL	LLHH	LHLL	LHLH	LHHL	LHHH	HLLL	HLLH	HLHL	HLHH	HHLL	HHLH	HHHL	HHHH
LLLL	士	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
LLLH	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
LLHL	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
LLHH	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
LHLL	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
LHLH	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
LHHL	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
LHHH	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
HLLL	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
HLLH	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
HLHL	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
HLHH	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
HHLL	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
HHLH	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
HHHL	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目
HHHH	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目	目

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

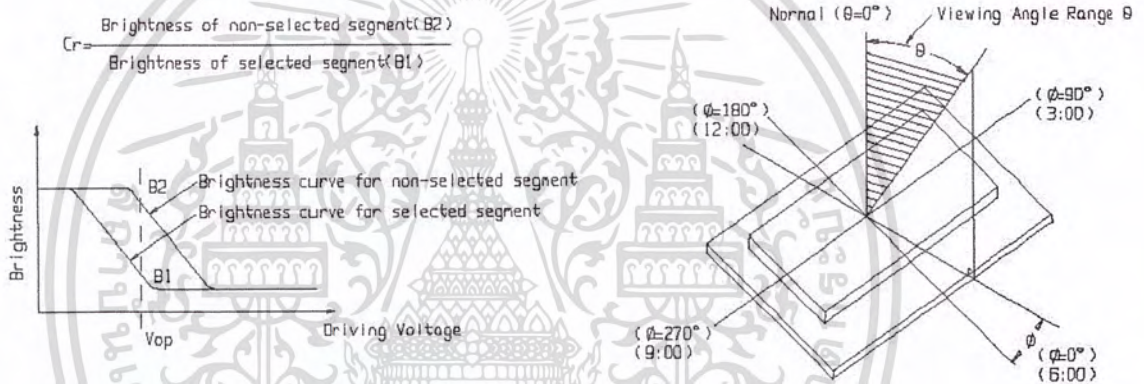


深圳市秋田视佳实业有限公司  
SHENZHEN AV-DISPLAY CO.,LTD.

## 10. ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS

( $V_{DD} = 5.0V$ ,  $T_a = 25^\circ C$ )

Item	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Operating Voltage Of LCD	Vop	$T_a = -20^\circ C$	4.6	4.8	5.0	V
		$T_a = 25^\circ C$	4.0	4.2	4.5	
		$T_a = 70^\circ C$	3.7	3.8	4.0	
Response time	Tr	$T_a = 25^\circ C$	---	185	---	ms
	Tf		---	200	---	ms
Contrast	Cr	$T_a = 25^\circ C$	---	4	---	---
Viewing angle range	$\theta$	$Cr \geq 2$	-40	---	+40	deg
	$\phi$		-40	---	+40	deg



## 11. BACKLIGHT CHARACTERISTICS

LCD Module with edge LED Backlight  
ELECTRICAL RATINGS

$T_a = 25^\circ C$

Item	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Forward Voltage	VF	IF=30mA	2.8	3.1	3.3	V
Reverse Current	IR	VR=5V	---	30	--	$\mu A$
Luminous Intensity (With LCD dots off)	IV	IF=30mA	---	20	---	$Cd/m^2$
Wave length	$\lambda_p$	IF=30mA	---	--	---	nm
Color	White					



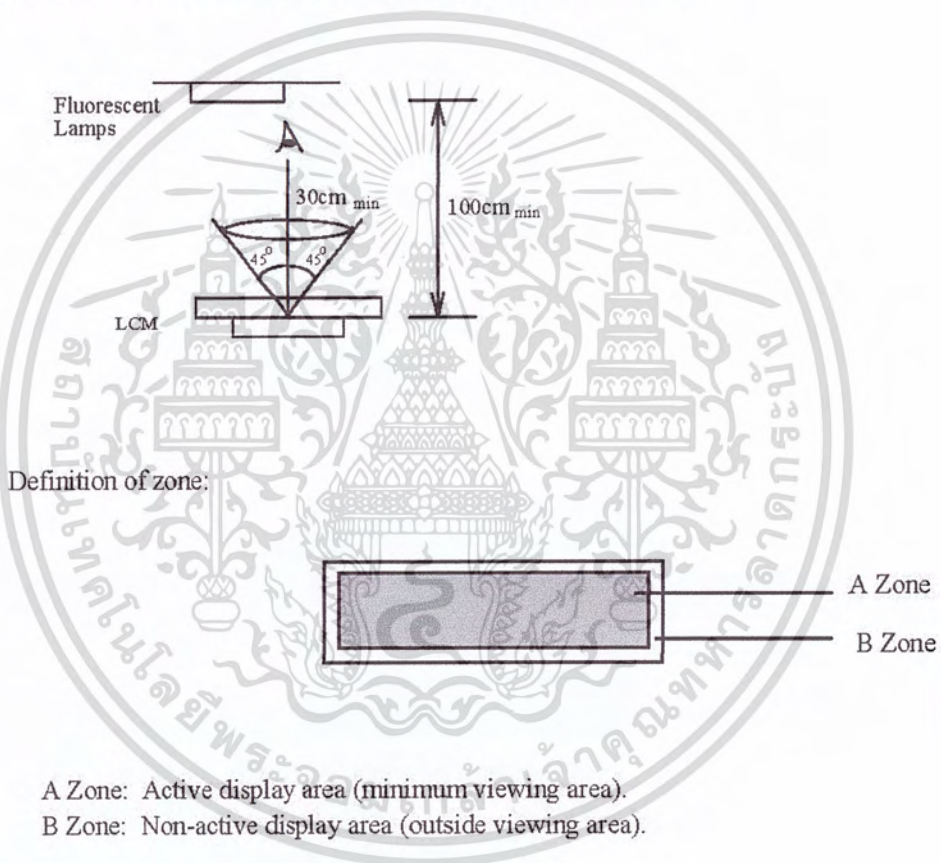
深圳市秋田视佳实业有限公司  
SHENZHEN AV-DISPLAY CO.,LTD.

## 12. QUALITY SPECIFICATIONS

### 12.1 Standard of the product appearance test

Manner of appearance test: The inspection should be performed in using 20W x 2 fluorescent lamps. Distance between LCM and fluorescent lamps should be 100 cm or more. Distance between LCM and inspector eyes should be 30 cm or more.

Viewing direction for inspection is  $45^\circ$  from vertical against LCM.



### 12.2 Specification of quality assurance

AQL inspection standard

Sampling method: MIL-STD-105E, Level II, single sampling



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

////////////////////////////////////
////      High Efficiency      ////
////  Multilevel Inverter 63 level  ////
////////////////////////////////////

```

```

/*****
FILE      : signal.c
Year      : 2011
Purpose   : Project
Compiler  : CCS C Compiler
Target    : PIC18f4431
Programmed by : Bosz, bossk125@hotmail.com
Renewable Energy Application Laboratory , ECC406
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

```

```

*****/

```

```

/* PORT CONNECTION:

```

```

****Switch****

```

```

PORTA.0 = SW_ON
PORTA.1 = SW_OFF
PORTA.2 = SW_UP
PORTA.3 = SW_DOWN

```

```

****H-Bridge****

```

```

PORTC.0 = SA
PORTC.1 = SB
PORTC.2 = SC
PORTC.3 = SD

```

```

***Output Stage***

```

```

PORTB.0 = S1
PORTB.1 = S2
PORTB.2 = S3
PORTB.3 = S4
PORTB.4 = S5
PORTB.5 = S6
PORTB.6 = S7
PORTB.7 = S8
PORTC.6 = S9
PORTC.7 = S10 */

```

```

////////////////////////////////////

```

```

#include <18f4431.h> //Using PIC 18F4431
#fuses HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP
#use delay (clock=20000000) //Clock frequency 20MHz
#include <LCD.c> //Using LCD display

```

```

int i=0,a,b,x;

```

```

int p[11]={26 27 27 28 29 29 30 30 30 31 31};

```

```

int j[11]={53 55 55 57 59 59 61 61 61 63 63};

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int dt=2;

//Dead Time (us)
float m[11]={0.84 0.86 0.88 0.90 0.92 0.94 0.961 0.97 0.98 0.99 1.00};
int D[11][32]={

    15,104,106,108,109,111,112,113,115,116,118,121,124,127,131,
    136,141,148,154,184,175,191,214,237,303,436,632,0,0,0,0,
    16,105,105,106,106,107,109,110,111,113,115,117,120,123,126,
    131,135,141,148,156,157,180,197,222,261,333,579,332,0,0,0,0,
    22,102,102,103,104,105,106,106,108,110,111,114,116,119,122,
    126,129,134,141,149,155,165,182,202,229,276,377,745,0,0,0,0,
    20,96,98,99,100,101,103,104,105,107,108,110,112,115,118,
    121,125,129,133,141,150,158,170,185,209,243,302,468,522,0,0,0,
    18,94,95,97,98,99,100,101,102,104,105,107,109,111,114,
    116,121,125,131,136,143,151,161,172,190,214,258,337,720,100,0,0,
    15,93,94,95,96,97,97,99,100,101,102,104,106,108,111,
    113,117,121,125,129,135,143,152,161,173,195,228,278,390,651,0,0,
    15,92,93,94,95,95,96,96,97,98,100,101,103,104,107,
    110,113,116,120,125,131,135,142,150,164,180,202,240,304,0,0,0,
    15,90,91,92,93,93,94,95,96,97,98,100,101,103,106,109,
    111,113,116,123,127,134,140,150,158,176,194,226,0,0,0,0,
    17,91,91,91,92,92,93,94,96,96,97,98,100,102,104,
    107,109,113,116,120,125,128,134,146,154,170,185,212,0,0,0,0,
    15,89,90,90,91,91,92,93,93,95,96,97,99,101,103,
    105,108,112,114,118,123,125,131,140,148,159,180,201,242,0,0,0,
    15,89,89,89,90,90,91,91,92,93,96,96,97,99,101,
    103,104,107,112,116,121,123,129,138,144,158,173,194,224,0,0,0};

int16 T[11][4]={239,303,434,1272,
                262,334,578,676,
                274,375,1504,0,
                245,303,458,1055,
                255,336,716,224,
                277,386,1310,0,
                303,488,816,0,
                274,396,1203,0,
                248,340,1504,0,
                298,521,680,0,
                272,403,1120,0};

void main()
{
    setup_adc(ADC_OFF); // OFF ADC
    set_tris_a(0x00); // Set PORTA for output
    set_tris_b(0x00); // Set PORTB for output
    set_tris_c(0x00); // Set PORTC for output
    set_tris_d(0x00); // Set PORTD for output

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

while(TRUE)
{
    delay_ms(100);
    lcd_init(); // LCD initialize
wait : if(input(PIN_A0)==0)
    {
run :    output_high(PIN_A4);
        lcd_putc("\n");
        lcd_gotoxy(6,1);
        printf(lcd_putc,"Mi=%f\n",m[i]);
        printf(lcd_putc," P=%d (%d level)",p[i],l[i]);
        goto pos;
    }
    output_low(PIN_A4);
    lcd_putc("\n");
    lcd_putc("High Efficiency Multilevel inverter");
    lcd_gotoxy(6,2); // start 2nd line
    lcd_putc("***** Press Switch ON *****");
    delay_ms(500);
for(b=0; b<23; b++){
    if(input(PIN_A0)==0)goto run;
    lcd_send_byte(0,0x18); //shift left display
    delay_ms(250);}
    goto wait;
check : if(input(PIN_A1) == 0)
    {
        i=0;
        x=0;
        output_low(PIN_A4);
        output_b(00000000);
        output_c(00000000);
        goto wait;
    }
    if(x>20)
    {
        x=20;
        if(input(PIN_A2)==0&&i<10){
            x=0;
            i++;
            lcd_putc("\n");
            lcd_gotoxy(6,1);
            printf(lcd_putc,"Mi=%f\n",m[i]);
            printf(lcd_putc," P=%d (%d level)",p[i],l[i]);}
        if(input(PIN_A3)==0&&i>0){
            x=0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        i--;
        lcd_putc("\n");
        lcd_gotoxy(6,1);
        printf(lcd_putc,"Mi=%fn",m[i]);
        printf(lcd_putc," P=%d (%d level)",p[i],l[i]);
    }
    goto pos;
pos :    x++;

        output_low(PIN_C1);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_C0);
        delay_us(100);
        output_low(PIN_C2);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_C3);
        a=0;
        goto signal;
neg :    output_low(PIN_C0);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_C1);
        delay_us(100);
        output_low(PIN_C3);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_C2);
        a++;
        goto signal;
signal:  output_low(PIN_B0);           // 0V
        output_low(PIN_B2);
        output_low(PIN_B4);
        output_low(PIN_B6);
        output_low(PIN_C6);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B1);
        output_high(PIN_B3);
        output_high(PIN_B5);
        output_high(PIN_B7);
        output_high(PIN_C7);
        delay_us(D[i][0]);
        output_low(PIN_B1);           // 12V
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B0);
        delay_us(D[i][1]);
        output_low(PIN_B0);           // 24V
        output_low(PIN_B3);
        delay_us(dt);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][2]);
output_low(PIN_B1); // 12+24=36V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][3]);
output_low(PIN_B0); // 48V
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B5);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B3);
output_high(PIN_B4);
delay_us(D[i][4]);
output_low(PIN_B1); // 12+48=60V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][5]);
output_low(PIN_B0); // 24+48=72V
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][6]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+48=84V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][7]);
output_low(PIN_B0); // 96V
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B7);
output_high(PIN_B6);
output_low(PIN_B4);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B5);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][8]);
output_low(PIN_B1); // 12+96=108V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][9]);
output_low(PIN_B0); // 24+96=120V
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][10]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+96=132V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][11]);
output_low(PIN_B0); // 48+96=144V
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B5);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B3);
output_high(PIN_B4);
delay_us(D[i][12]);
output_low(PIN_B1); // 12+48+96=156V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][13]);
output_low(PIN_B0); // 24+48+96=168V
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][14]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+48+96=180V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][15]); // 192V
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B4);
output_low(PIN_C7);
output_high(PIN_C6);
output_low(PIN_B6);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B7);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B5);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][16]);
output_low(PIN_B1); // 12+192=204V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][17]);
output_low(PIN_B0); // 24+192=216V

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][18]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+192=228V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][19]);
output_low(PIN_B0); // 48+192=240V
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B5);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B3);
output_high(PIN_B4);
delay_us(D[i][20]);
output_low(PIN_B1); // 12+48+192=252V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(D[i][21]);
output_low(PIN_B0); // 24+48+192=264V
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][22]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+48+192=276V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
if(i==0)delay_us(T[i][0]);
if(i>0) delay_us(D[i][23]);
output_low(PIN_B0); // 96+192=288V
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B7);
output_high(PIN_B6);
output_low(PIN_B4);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B5);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B3);
if(i==0)delay_us(T[i][1]);
if(i==1)delay_us(T[i][0]);
if(i>1) delay_us(D[i][24]);
output_low(PIN_B1); // 12+96+192=300V****p=25
delay_us(dt);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_high(PIN_B0);
if(i==0)delay_us(T[i][2]);
if(i==1)delay_us(T[i][1]);
if(i==2)delay_us(T[i][0]);
if(i==3)delay_us(T[i][0]);
if(i>3) delay_us(D[i][25]);
output_low(PIN_B0); // 24+96+192=312V*****p=26
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
if(i==0){
    delay_us(T[i][3]);
    goto p26;}
if(i==1)delay_us(T[i][2]);
if(i==2)delay_us(T[i][1]);
if(i==3)delay_us(T[i][1]);
if(i==4)delay_us(T[i][0]);
if(i>4) delay_us(D[i][26]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+96+192=324V*****p=27
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
if(i==1){
    delay_us(T[i][3]);
    goto p27;}
if(i==2){
    delay_us(T[i][2]);
    goto p27;}
if(i==3)delay_us(T[i][2]);
if(i==4)delay_us(T[i][1]);
if(i==5)delay_us(T[i][0]);
if(i>5) delay_us(D[i][27]);
output_low(PIN_B0); // 48+96+192=336V*****p=28
output_low(PIN_B2);
output_low(PIN_B5);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B3);
output_high(PIN_B4);
if(i==3){
    delay_us(T[i][3]);
    goto p28;}
if(i==4)delay_us(T[i][2]);
if(i==5)delay_us(T[i][1]);
if(i==6)delay_us(T[i][0]);
if(i==7)delay_us(T[i][0]);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(i==8)delay_us(T[i][0]);
if(i>8) delay_us(D[i][28]);
output_low(PIN_B1); // 12+48+96+192=348V*****p=29
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
if(i==4){
    delay_us(T[i][3]);
    goto p29;}
if(i==5){
    delay_us(T[i][2]);
    goto p29;}
if(i<9)delay_us(T[i][1]);
if(i>8)delay_us(T[i][0]);
output_low(PIN_B0); // 24+48+96+192=360V*****p=30
output_low(PIN_B3);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
output_high(PIN_B2);
if(i<9){
    delay_us(T[i][2]);
    goto p30;}
delay_us(T[i][1]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+48+96+192=372V*****p=31
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
delay_us(T[i][2]);
////////////////////////////////////

output_low(PIN_B0); // 24+48+96+192=360V*****p=30
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(T[i][1]);

p30: output_low(PIN_B1); // 12+48+96+192=348V*****p=29
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
if(i<9)delay_us(T[i][1]);
if(i>8)delay_us(T[i][0]);

p29: output_low(PIN_B0); // 48+96+192=336V*****p=28
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
if(i==4)delay_us(T[i][2]);
if(i==5)delay_us(T[i][1]);
if(i==6)delay_us(T[i][0]);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        if(i==7)delay_us(T[i][0]);
        if(i==8)delay_us(T[i][0]);
        if(i>8) delay_us(D[i][28]);
p28:   output_low(PIN_B1); // 12+24+96+192=324V*****p=27
        output_low(PIN_B3);
        output_low(PIN_B4);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B0);
        output_high(PIN_B2);
        output_high(PIN_B5);
        if(i==3)delay_us(T[i][2]);
        if(i==4)delay_us(T[i][1]);
        if(i==5)delay_us(T[i][0]);
        if(i>5) delay_us(D[i][27]);
p27:   output_low(PIN_B0); // 24+96+192=312V*****p=26
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B1);
        if(i==1)delay_us(T[i][2]);
        if(i==2)delay_us(T[i][1]);
        if(i==3)delay_us(T[i][1]);
        if(i==4)delay_us(T[i][0]);
        if(i>4) delay_us(D[i][26]);
p26:   output_low(PIN_B1); // 12+96+192=300V*****p=25
        output_low(PIN_B2);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B0);
        output_high(PIN_B3);
        if(i==0)delay_us(T[i][2]);
        if(i==1)delay_us(T[i][1]);
        if(i==2)delay_us(T[i][0]);
        if(i==3)delay_us(T[i][0]);
        if(i>3) delay_us(D[i][25]);
p25:   output_low(PIN_B0); // 96+192=288V
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B1);
        if(i==0)delay_us(T[i][1]);
        if(i==1)delay_us(T[i][0]);
        if(i>1) delay_us(D[i][24]);
        output_low(PIN_B1); // 12+24+48+192=276V
        output_low(PIN_B3);
        output_low(PIN_B6);
        output_high(PIN_B7);
        output_low(PIN_B5);
        delay_us(dt);
        output_high(PIN_B4);
        output_high(PIN_B0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_high(PIN_B2);
if(i==0)delay_us(T[i][0]);
    else delay_us(D[i][23]);
output_low(PIN_B0); // 24+48+192=264V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][22]);
output_low(PIN_B1); // 12+48+192=252V
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][21]);
output_low(PIN_B0); // 48+192=240V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][20]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+192=228V
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B4);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B2);
output_high(PIN_B5);
delay_us(D[i][19]);
output_low(PIN_B0); // 24+192=216V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][18]);
output_low(PIN_B1); // 12+192=204V
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][17]);
output_low(PIN_B0); // 192V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][16]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+48+96=180V
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B5);
output_low(PIN_C6);
output_high(PIN_C7);
output_low(PIN_B7);
delay_us(dt);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output_high(PIN_B6);
output_high(PIN_B4);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][15]);
output_low(PIN_B0); // 24+48+96=168V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][14]);
output_low(PIN_B1); // 12+48+96=156V
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][13]);
output_low(PIN_B0); // 48+96=144V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][12]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+96=132V
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B4);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B2);
output_high(PIN_B5);
delay_us(D[i][11]);
output_low(PIN_B0); // 24+96=120V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][10]);
output_low(PIN_B1); // 12+96=108V
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][9]);
output_low(PIN_B0); // 96V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][8]);
output_low(PIN_B1); // 12+24+48=84V
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B6);
output_high(PIN_B7);
output_low(PIN_B5);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay_us(dt);
output_high(PIN_B4);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B2);
delay_us(D[i][7]);
output_low(PIN_B0); // 24+48=72V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][6]);
output_low(PIN_B1); // 12+48=60V
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][5]);
output_low(PIN_B0); // 48V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][4]);
output_low(PIN_B1); // 12+24=36V
output_low(PIN_B3);
output_low(PIN_B4);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B2);
output_high(PIN_B5);
delay_us(D[i][3]);
output_low(PIN_B0); // 24V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][2]);
output_low(PIN_B1); // 12V
output_low(PIN_B2);
delay_us(dt);
output_high(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
delay_us(D[i][1]);
output_low(PIN_B0); // 0V
delay_us(dt);
output_high(PIN_B1);
delay_us(D[i][0]);
if (a<1)goto neg;
goto check;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# อินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ

## A High Efficiency Multilevel Inverter for A Low Voltage DC Distribution

กรวิช ศรีเปลี่ยนจันทร์ จิณฉัตร แซ่โจ้ว บดินทร วัฒนะรัตน์ และพงษ์ชนิน โชติพรรณพัฒน์  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขที่ 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร. 02-329-8331

### บทคัดย่อ

ปริญญาณิพนธ์นี้ได้เสนอเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูง สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ(48 โวลต์) แบบอิสระ โดยใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด ซึ่งมีการสูญเสียต่ำเนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันที่มีความคิดเห็นต่ำ จึงไม่จำเป็นต้องใช้วงจรกรองของใหญ่ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองการสร้างสัญญาณเพื่อทำการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ก่อนที่จะทำการสร้างเครื่องต้นแบบขนาด 3 (kVA) โดยจากผลการจำลองและทดลองพบว่า เครื่องต้นแบบมีประสิทธิภาพสูงให้คุณภาพของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับคุณภาพดีกว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับทั่วไป และเหมาะสมสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์หลายระดับ, อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุด

### Abstract

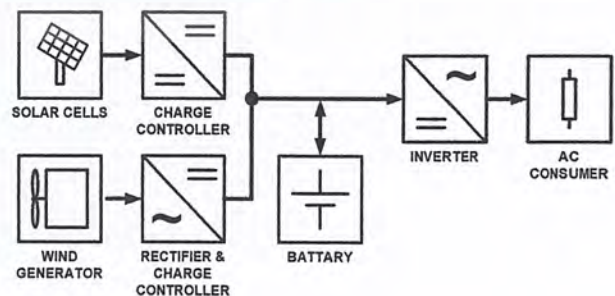
A high efficiency multilevel inverter for a low voltage DC distribution is presented in this paper. The multilevel inverter is used to interconnection between low voltage dc distribution (48V) and a load (220V<sub>ac</sub>). The multi-winding transformer multilevel inverter topology can operate high power quality waveform without filter with high efficiency. The MATLAB/Simulink program is used to simulate the operation of the proposed multilevel inverter topology. The 3 kVA prototype is developed for experimental validation. The experimental results are satisfactory and agree with simulation results. The results show that multi-winding transformer multilevel inverter can achieve high efficiency, high power quality waveform and, therefore, suitable for a low voltage dc distribution.

Keyword: Multilevel inverter, Multi-winding transformer multilevel inverter

### 1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์มีความจำเป็นสำหรับระบบพลังงานทดแทน ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน หรือจากแบตเตอรี่ที่เก็บพลังงานดังกล่าว แปลงเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับจ่ายภาระไฟฟ้าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์ทั่วไปที่ใช้ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ มีปัญหาทางด้านการสูญเสียพลังงานในการแปลงผันพลังงาน เนื่องจากคุณภาพของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีฮาร์มอนิกเป็นส่วนประกอบ ซึ่งส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่ได้รับผลของฮาร์มอนิกส่งผลกระทบต่อการทำงาน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์ และส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์ให้มีคุณภาพต่ำลง

บทความฉบับนี้ นำเสนอการนำเอาอินเวอร์เตอร์หลายระดับมาประยุกต์ใช้งานในระบบอิสระ (Stand alone) เพื่อใช้กับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ หรือระบบการสื่อสารโทรคมนาคมที่ใช้แรงดันกระแสตรง 48 โวลต์ เพื่อแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นระบบกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างมีคุณภาพ โดยมีหลักการการทำงาน คือ สร้างสัญญาณแรงดันขาออกด้วยการสับสวิทช์ สัญญาณแรงดันที่ได้เป็นลักษณะหลายระดับทำให้รูปคลื่นแรงดันที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณรูปคลื่นไซน์อย่างมาก ด้วยเทคนิคการรวมรูปคลื่นแรงดันทำให้ใช้สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำนวนน้อย จึงลดการสูญเสียที่จะเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการโดยทั่วไป โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับในงานวิจัยนี้ สามารถสร้างแรงดันได้มากถึง 63 ระดับ

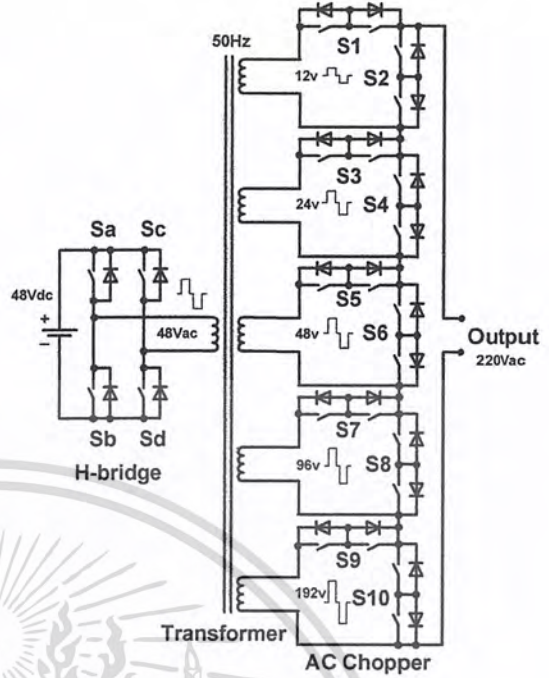


รูปที่ 1 แผนผังการต่ออินเวอร์เตอร์หลายระดับสำหรับการส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในงานระบบอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่แปลงต้นกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถใช้ในระบบที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันขาออกที่เป็นระดับขั้น โดยหลักการของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ คือ การรวมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นขั้นๆ จำนวนระดับขั้นที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้รูปคลื่นแรงดันที่ได้มีลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal waveform) ทำให้ได้สัญญาณแรงดันที่มีความผิดเพี้ยนลดลง คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์แต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่างๆ มีคุณลักษณะความสามารถที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2 จากตารางพบว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ multi-winding transformer มีประสิทธิภาพและคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ ซึ่งโครงสร้างแบ่งเป็นสามส่วนคือตัววงจรเอช-บริดจ์ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ ต่อทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) กับ เอซี-ชอปเปอร์ (AC-Chopper) ทั้ง 5 ชุดต่ออนุกรมกันทางด้านทุติยภูมิ ทำหน้าที่รวมรูปคลื่นแรงดันทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันขาออกที่เป็นลักษณะลำดับขั้นถึง 63 ขั้น ให้มีค่าความผิดเพี้ยน (Total harmonics distortions) ของรูปคลื่นแรงดันที่ต่ำ โดยไม่ต้องใช้วงจรกรองขนาดใหญ่



รูปที่ 2 Multi-winding transformer ชนิด 63 ระดับ

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ Multi-winding transformer แสดงดังรูปที่ 2 โดยสามารถสร้างแรงดันได้ถึง 63 ระดับขั้น โดยมีสัญญาณซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

ตารางที่ 1 ตารางแสดงคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์

ข้อที่	คุณสมบัติ	ความสำคัญ
1	แหล่งจ่ายกำลังขาเข้าเดียว	จำเป็น
2	ความถี่สวิตช์ต่ำ	จำเป็น
3	สามารถจ่ายโหลดด้วยองค์ประกอบกระแสตรง	จำเป็น
4	รูปคลื่นมีคุณภาพสูงใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์	จำเป็น
5	จ่ายพลังงานได้สองทิศทาง	คุณสมบัติเสริม
6	ด้านขาเข้าและขาออกมีการแยกกันทางไฟฟ้า	คุณสมบัติเสริม

เอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-Bridge Inverter)

วงจรเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) ที่มีความถี่ 50 Hz และมีช่วงเวลาเดทไทม์ที่หนึ่งช่วงเวลาขณะแรงดันเปลี่ยนจากแรงดันด้านบวกเป็นแรงดันด้านลบ 100  $\mu$ s เพื่อนำมาเป็นแหล่งจ่ายให้กับหม้อ

หม้อแปลงหลายชุด (Multi-winding transformer)

หม้อแปลงหลายชุดทำหน้าที่แปลงแรงดันออกเป็น 5 ระดับด้วยขดลวดทุติยภูมิ 5 ขดได้แรงดันขาออกเป็น 12, 24, 48, 96, 192 โวลต์ตามลำดับเพื่อจ่ายแรงดันที่ได้ให้กับชุดวงจรเอซี-ชอปเปอร์ต่อไป

เอซี-ชอปเปอร์ (AC-Chopper)

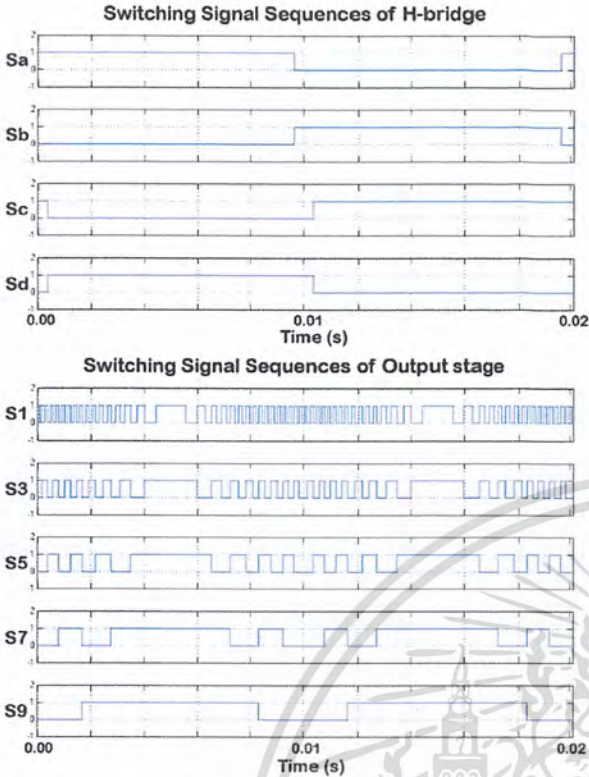
วงจร เอซี-ชอปเปอร์ทำหน้าที่ในการสร้างแรงดันขาออกที่เป็นระดับขั้น โดยสามารถสร้างได้จากการนำวงจรเอซี-ชอปเปอร์ต่ออนุกรมกันจำนวน 5 ชุดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ทำให้สามารถรวมเป็นรูปคลื่นแรงดันได้หลายระดับขั้น โดยเราสามารถสร้างระดับแรงดันที่แตกต่างกันได้มากที่สุดคำนวณได้จากสมการที่ 1 และสมการที่ 2 ซึ่งจำนวนแรงดันที่สามารถสร้างได้คือ 63 ระดับ โดยสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังแสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบความสามารถของอินเวอร์เตอร์

ชนิดของอินเวอร์เตอร์	1	2	3	4	5	6
Diode clamped	✓	✓	-	-	✓	-
Cascade H-bridge	✓	✓	-	-	✓	-
H-bridge with multiwinding transformer	✓	✓	✓	✓	-	✓
H-bridge with bi-directional DC/DC	✓	-	✓	✓	✓	✓
Multi-winding transformer	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ = มีคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 สัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง

$$p = 2^n - 1 \tag{1}$$

$$n_{level} = (2 \times p) + 1 \tag{2}$$

$$m_i = \frac{V_{rms}}{V_{peak} / \sqrt{2}} \tag{3}$$

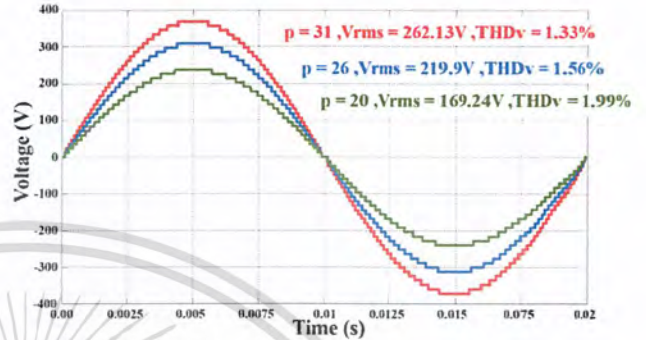
โดยที่	$n$	คือ จำนวนขดของหม้อแปลงทางคานทุติยภูมิ
	$p$	คือ จำนวนของระดับขั้นใน 1/4 ของ 1 ลูกคลื่น
	$n_{level}$	คือ จำนวนของระดับขั้น
	$V_{rms}$	คือ แรงดันเอาท์พุท rms ที่ต้องการ
	$V_{peak}$	คือ แรงดันเอาท์พุท peak ที่ $m_i = 1$

### 3. การควบคุมแรงดันด้านออก

การรักษาระดับแรงดันหรือการควบคุมแรงดันด้านออก จะใช้วิธีการเปลี่ยนจำนวนขั้นของแรงดัน ซึ่งแรงดันขาออกจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนระดับขั้น โดยจะให้แรงดันขาออกสูงสุดที่ 63 ขั้น แรงดันขดที่ 372 V ขณะไม่มีโหลด และจะลดลงเมื่อจำนวนระดับขั้นของแรงดันลดลง แต่จะส่งผลทำให้ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน (THD<sub>v</sub>) มีค่ามากขึ้นด้วย สำหรับการควบคุมแรงดันนั้นจะใช้การควบคุมวงเปิด (Open loop) โดยการรับคำสั่งเพิ่มหรือลดระดับแรงดันจากภายนอก และแสดงผลออกทางจอแสดงผล

### 4. การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูง ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้ผลการจำลองจากโปรแกรมดังรูปที่ 7 เป็นรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถ สร้างระดับขั้นของแรงดันได้ถึง 63 ระดับขั้น



รูปที่ 4 แรงดันขาออกที่ p = 31, 26, 20 จากการจำลองด้วย

โปรแกรม MATLAB/Simulink

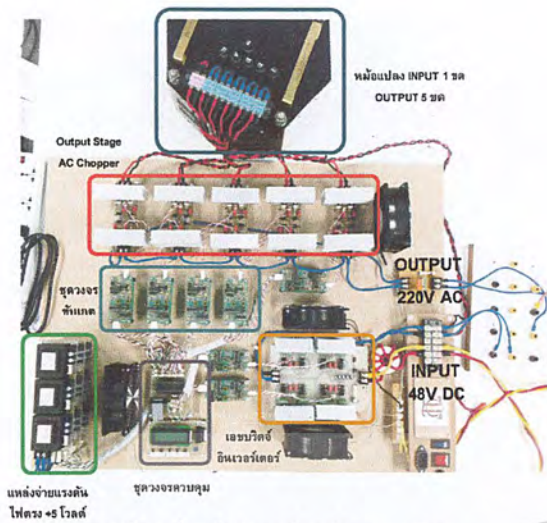
จากผลการจำลองพบว่าเมื่อปรับจำนวนระดับขั้นของแรงดันที่ p=31 จะได้แรงดัน  $V_{rms} = 262.1$  V ที่ p=26 ได้แรงดัน  $V_{rms} = 219.9$  V และที่ p=20 จะได้แรงดัน  $V_{rms} = 169.24$  V ที่ดัชนีมอดูเลต  $m_i = 1.0/1.0$  ดังรูปที่ 7 และจากการจำลองยังพบว่าเมื่อเปลี่ยนค่าดัชนีมอดูเลต  $m_i$  ลดลงจะทำให้ค่า THD<sub>v</sub> สูงขึ้น ดังรูปที่ 8 ดังนั้นเมื่อพิจารณาระหว่างแรงดันขาออกกับความผิดเพี้ยนที่ได้ จึงเลือกใช้งานอินเวอร์เตอร์ที่ระดับขั้นแรงดัน p=26 และ  $m_i = 1.0/1.0$  คงที่ไปใช้งานเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าขาออก เท่ากับระบบไฟฟ้าในประเทศไทย และมีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันต่ำ โดยที่สามารถทำการปรับเปลี่ยนแรงดันขาออกได้โดยการเพิ่มลดระดับขั้น p ตั้งแต่ p=25 ถึง p=31

### 5. การทดลองและผลการทดลอง

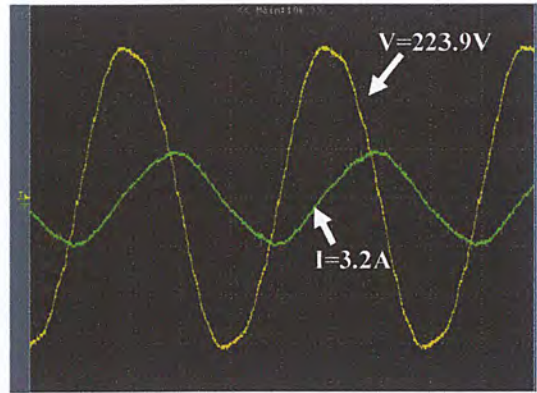
เมื่อทำการรวมส่วนต่างๆของชิ้นงานเข้าด้วยกัน เพื่อเตรียมจ่ายภาระทางไฟฟ้าจะได้เครื่องต้นแบบดังรูปที่ 5 โดยจะรับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟตรง 48 โวลต์ ผ่านวงจรถ่าย-บริดจ์อินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงให้เป็นแรงดันไฟสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเข้าสู่หม้อแปลงหลายขด จะได้แรงดันออกมาทั้งหมด 5 ระดับและเข้าสู่ตัววงจรเอาท์พุทเอชซีชอปเปอร์เพื่อสร้างแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์ความถี่ 50 เฮิร์ต อินเวอร์เตอร์หลายระดับเครื่องต้นแบบนี้ มีพิกัด 1 กิโลวัตต์

การทดลองจ่ายภาระทางไฟฟ้ารูปที่ 6 คลื่นแรงดันเอาท์พุทขณะจ่ายโหลดหลอดไฟขนาด 200 วัตต์ ที่ดัชนีมอดูเลต 0.86/1.0 จะได้แรงดัน 220.28 โวลต์ กระแส 1.29 แอมป์ เมื่อทำการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันพบว่า มีค่า THD<sub>v</sub> เท่ากับ 3.54% และ ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแส THD<sub>i</sub> เท่ากับ 12.93% ดังรูปที่ 7

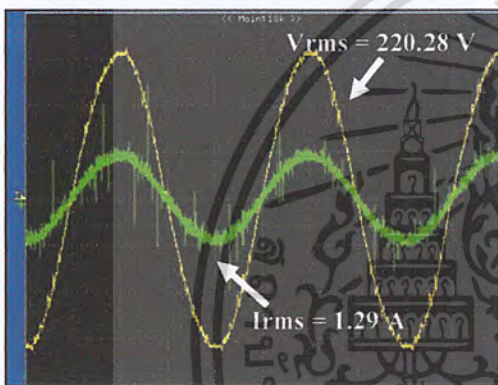
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



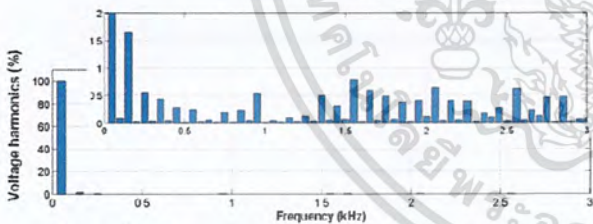
รูปที่ 5 เครื่องต้นอินเวอร์เตอร์หลายระดับ



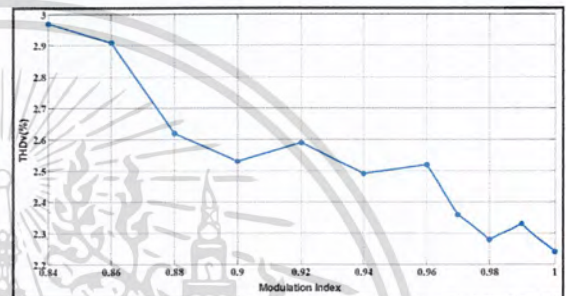
รูปที่ 8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะจ่ายโหลดมอเตอร์ 0.5 แรงม้า



รูปที่ 6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะจ่ายโหลดโหลดไฟ 200 วัตต์



รูปที่ 7 รูปคลื่นสเปกตรัมฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้าขาออก



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมอดูเลตกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการเลือกใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีประสิทธิภาพสูง ทฤษฎีพื้นฐานและวิธีการสร้าง โดยได้เลือกอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดเพื่อทำการสร้างเครื่องต้นแบบและทำการทดลองทั้งในส่วนของการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลจากเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่า อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหม้อแปลงหลายชุดนี้ สามารถนำไปใช้งานจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้จริงโดยให้ประสิทธิภาพสูงถึง 93% และสามารถสร้างแรงดันสูงขณะไม่จ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 220 ถึง 268 โวลต์ โดยที่มิตความผิดเพี้ยนของแรงดันต่ำกว่า 3% ที่ความถี่ 50 เฮิร์ต และคาดหวังว่าอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะเป็นเครื่องต้นแบบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Sérgio Daher, Jürgen Schmid, and Fernando L. M. Antunes. Multilevel Inverter Topologies for Stand-Alone PV System. IEEE Transactions on Power Electronics. vol.55, No.7, Jul. 2008. pp 2703-2711

[2] Sérgio Daher. "Analysis, Design and Implementation of a High Efficiency Multilevel Converter for Renewable Energy Systems", Ph.D. dissertation, University of Kassel, Brazil, 2005.

ตารางที่ 3 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแต่ละส่วนขณะจ่ายโหลด 200 วัตต์

	H-Bridge	หม้อแปลง + AC-Chopper	Gate-drive	รวม
กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย (W)	16	3.8	2	21.8
ร้อยละของกำลังขาเข้า	5.2%	1.3%	0.7%	7.2%

การทดลองจ่ายโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสขนาด 0.5 แรงม้า (0.4 กิโลวัตต์) รูปที่ 12 คลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 223.9 โวลต์ ที่ดัชนีมอดูเลต 0.88/1.0 ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 3.9 % และมีค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.2 แอมป์ ค่าความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 6.17%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# ภาคผนวก ข.

## โปสเตอร์นำเสนอผลงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# โปสเตอร์นำเสนอผลงาน

## อินเวอร์เตอร์หลายระดับประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ A High Efficiency Multilevel inverter for Low Voltage DC Distribution



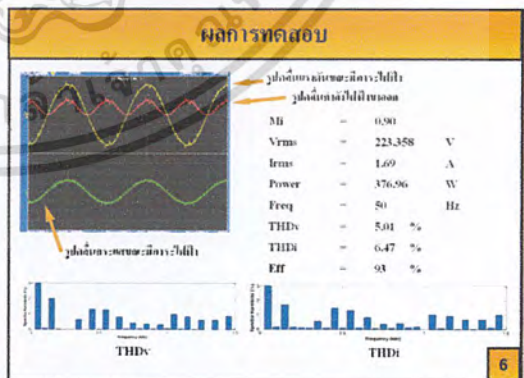
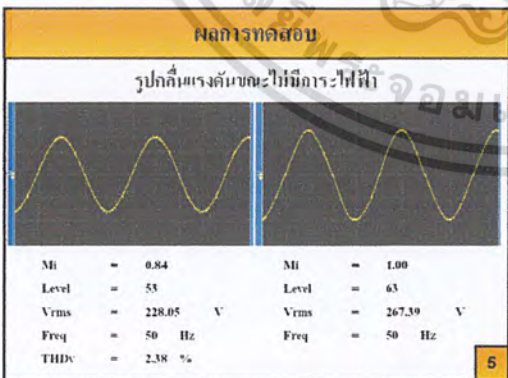
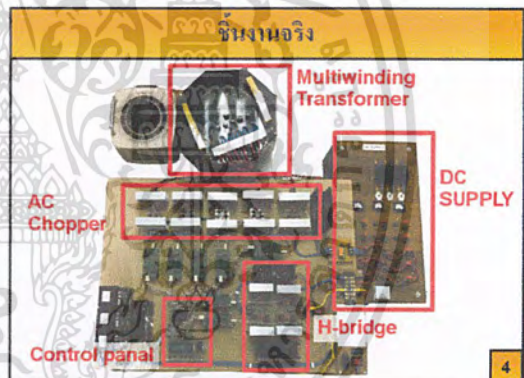
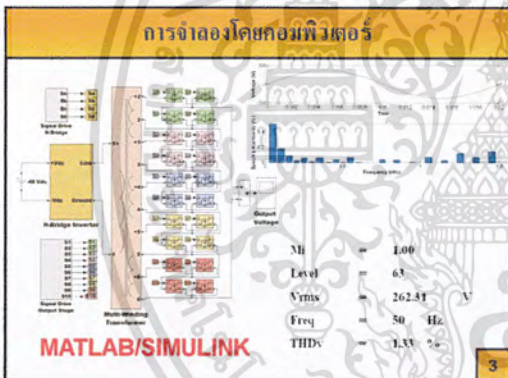
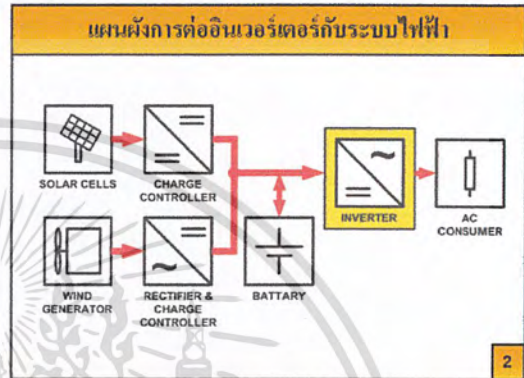
ดร.รัช ศรีเปลี่ยนอักษร จิณฉัตร แซ่จิว บดินทร วัฒนรัตน์ และพงษ์ธนิ โชติธรรมทัศน์  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)



### วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาค้นคว้าการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
- เพื่อพัฒนาอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ให้กับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าอิสระ (stand alone)
- รูปคลื่นแรงดันที่กำเนิดขึ้นแต่ค่าโดยไม่ต้องการกรอง
- สามารถส่งพลังงานได้สองทิศทาง (bi-directional)

1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายกรวัช ศรีเปลี่ยนจันทร์

เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2531

ที่อยู่ 25/999 หมู่ 3 ซอย 14/6 ตำบลบางหญ้าแพรก อำเภอเมือง  
จังหวัดสมุทรสาคร

## ประวัติการศึกษา

**ปีการศึกษา 2549** สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน  
สวนกุหลาบวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร

**ปีการศึกษา 2553** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่** การไฟฟ้านครหลวง  
ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2553 ถึง 31 พฤษภาคม 2553



นายจิณฉัตร แซ่โจ้ว

เกิดเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2531

ที่อยู่ 45/942 หมู่ 7 ถนนกาญจนาภิเษก เขตบางบอน  
กรุงเทพมหานคร 10150

## ประวัติการศึกษา

**ปีการศึกษา 2549** สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน  
สวนกุหลาบวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร

**ปีการศึกษา 2553** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่** บริษัท นำแสง เอ็นจิเนียริง จำกัด  
ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2553 ถึง 31 พฤษภาคม 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นายบดินทร วัฒนะรัตน์

เกิดเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2531

ที่อยู่ 29/128 หมู่ 2 ซอยเรวัติ52 ถนนเรวัติ ตำบลตลาดขวัญ

อำเภอเมือง จ.นนทบุรี 11000

### ประวัติการศึกษา

**ปีการศึกษา 2549** สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน

สวนกุหลาบวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร

**ปีการศึกษา 2553** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่** ฝ่ายปฏิบัติการเขตนครหลวง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2553 ถึง 31 พฤษภาคม 2553



นายพงษ์ธริน โชติพรณพัฒน์

เกิดเมื่อวันที่ 29 ตุลาคม พ.ศ. 2531

ที่อยู่ 881 ถนนลาดหญ้า ซอยลาดหญ้า21 แขวงคลองสาน

เขตคลองสาน กรุงเทพมหานคร 10600

### ประวัติการศึกษา

**ปีการศึกษา 2549** สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน

สวนกุหลาบวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร

**ปีการศึกษา 2553** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่** บริษัท พาวเวอร์ไลน์เอ็นจิเนียริง จำกัด (มหาชน)

ระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2553 ถึง 31 พฤษภาคม 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้