

อินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน
HYBRID CONNECTED GRID INVERTER



นายธีรวัฒน์ ปอกเพชร
นายภราดร นุชอนงค์
นายอมรินทร์ พรมมณี
นายธีรวัฒน์ อยู่สุข

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....61918

วัน,เดือน,ปี...24 ก.ค. 2549

.....

.....

ปฏิญานិพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน
HYBRID CONNECTED GRID INVERTER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน

HYBRID CONNECTED GRID INVERTER

ผู้จัดทำ

1. นายธีรวัฒน์ ปอกเพชร รหัสประจำตัว 45015103
2. นายภาราดร นุชอนงค์ รหัสประจำตัว 45015116
3. นายอมรินทร์ พรหมมณี รหัสประจำตัว 45015133
4. นายธีรวัฒน์ อยู่สุข รหัสประจำตัว 45015155

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ร.อ. ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน

นาย ชีรวัฒน์ ปอกเพชร 45015103

นาย ภราดร นุชอนงค์ 45015116

นาย อมรินทร์ พรหมฤณี 45015133

นาย ชีรวัฒน์ อยู่สุข 45015155

รศ. ร.อ. ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบสร้างและทดสอบ อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียวรับพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ จ่ายกำลังไฟฟ้าต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยทำการดำเนินงานออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบด้วยวงจรกำลัง ระบบควบคุมและซอฟต์แวร์ ในส่วนของวงจรกำลังประกอบด้วย ไอจีบีที(IGBT) เป็นสวิตช์กำลังต่อแบบฟูลบริดจ์เพื่อจ่ายโหลดขนาด 300 วัตต์ แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ผ่านหม้อแปลงกำลังไฟฟ้าและต่อกับระบบไฟฟ้าโดยผ่านตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระบบควบคุมประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ของ Microchip เบอร์ 18F458 การกำเนิดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ใช้หลักการของเอสพีดับเบิลยูเอ็ม วิธีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้านี้กระทำโดยใช้หลักการเฟสล็อกคัล การควบคุมมุมกำลัง และควบคุมแรงดัน เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าในการจ่ายเข้าสู่ระบบให้อยู่ในพิสัยที่หุคของอุปกรณ์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้

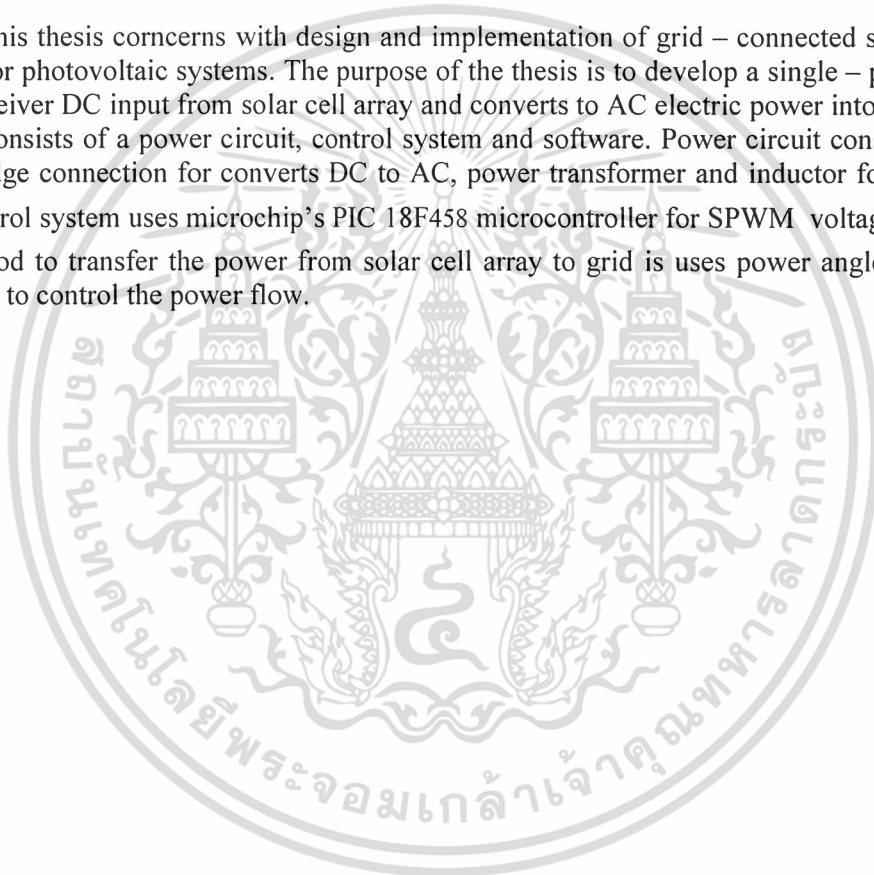
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hybrid Connected Grid Inverter

Teerawat	Pokphet		
Paradon	Nutanong		
Amarin	Prommunee		
Theerawat	Yoosuk		
Assoc.Prof.Dr. Werachet	Khan-ngern	Advisor	

ABSTRACT

This thesis concerns with design and implementation of grid – connected single – phase inverter for photovoltaic systems. The purpose of the thesis is to develop a single – phase inverter which receiver DC input from solar cell array and converts to AC electric power into the grid. The inverter consists of a power circuit, control system and software. Power circuit consists of IGBT full – bridge connection for converts DC to AC, power transformer and inductor for interface to grid. Control system uses microchip’s PIC 18F458 microcontroller for SPWM voltage generation. The method to transfer the power from solar cell array to grid is uses power angle and voltage controlled to control the power flow.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นอกจากจะทำให้ผู้จัดทำได้ประสบการณ์จากการปฏิบัติงานจริงและการทำงานเป็นคณะแล้ว การช่วยเหลือและน้ำใจไมตรีที่ผู้จัดทำได้รับเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ. ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน ที่คอยให้ความเอาใจใส่ แนะนำและช่วยเหลือให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณที่ ๆ ในห้อง EMC LAB ที่คอยให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำ

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ไม่ว่าจะด้วยประการใด ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บิดา- มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ เป็นห่วง เป็นใยและเป็นแรงผลักดันให้ผู้จัดทำเสมอ คุณค่า ประโยชน์และกุศลอันพึงได้จากปริญญาานิพนธ์นี้ ขอมอบแด่ผู้มีอุปการะคุณทุกท่าน

ผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 ที่มาและความสำคัญ	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ขอบเขตของการศึกษาโครงการ	3
1.6 ขั้นตอนการทำโครงการ	4
บทที่ 2 หลักการอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า	7
2.1 บทนำ	7
2.2 ส่วนประกอบอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า	7
2.3 หลักการของอินเวอร์เตอร์ ต่อกับระบบไฟฟ้า	8
2.4 หลักการของอินเวอร์เตอร์	13
2.5 หลักการของบัสคอนเวอร์เตอร์	29
2.6 อุปกรณ์สวิตชิง	36
2.7 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า	39
2.8 ฮาร์มอนิกและตัวประกอบกำลัง	40
บทที่ 3 การออกแบบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า	45
3.1 บทนำ	45
3.2 ส่วนประกอบวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรต่อกับระบบไฟฟ้า	45
3.3 ขนาดพิกัดอินเวอร์เตอร์	47
3.4 ขนาดพิกัดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง	50
3.5 ขนาดพิกัดหม้อแปลงกำลัง	54
3.6 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	54
3.7 ขนาดตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

3.8 การขั้วรีเลย์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	56
บทที่ 4 การออกแบบและการสร้างวงจรควบคุมและโปรแกรมการควบคุม	59
4.1 หลักการทำงานของระบบควบคุม	59
4.2 วงจรควบคุม	69
4.3 แนวคิดและหลักการออกแบบโปรแกรมระบบควบคุม	72
4.4 การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมพีดีบีลยูเอ็ม	72
4.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์	77
บทที่ 5 การทดลอง	
5.1 การทดลองที่ 1 การทดสอบหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ ที่จ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัดต่างๆ	86
5.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบรวม ที่จ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัดต่างๆ	89
5.3 การทดลองที่ 3 ผลการทดสอบการจ่ายโหลดหลอดไฟ ที่พิกัดต่างๆร่วมกับระบบการไฟฟ้า	91
บทที่ 6 บทวิจารณ์และสรุป	95
6.1 ข้อดีของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบได้	95
6.2 ข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบได้	95
6.3 ปัญหาในระหว่างการทำโครงการ	95
6.4 สิ่งที่ดีควรได้รับการพัฒนาต่อไปสำหรับโครงการนี้	96
ภาคผนวก ก. รูปวงจรการทดลอง	97
ภาคผนวก ข. โปรแกรม	106
ภาคผนวก ค. DATA SHEET	125
บรรณานุกรม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 1.1 ข้อกำหนดพิกัดอินพุตและเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์	3
ตารางที่ 1.2 ข้อกำหนดระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์	4
ตารางที่ 1.3 ข้อกำหนดในการแสดงผลและการป้องกันอินเวอร์เตอร์	4
ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขการสวิตชิง แรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้า ด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์	22
ตารางที่ 2.2 อัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์	25
ตารางที่ 2.3 อัตราขยายแรงดันของวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า D	33
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบความสามารถของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นิยมใช้งาน	38
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ กับโหลดหลอดไฟขนาด 100-300 วัตต์	88
ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบรวมทั้งจ่ายโหลดต่างๆ	91
ตารางที่ 5.3 แสดงเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์	93
ตารางที่ 5.4 แสดงเอาต์พุตของระบบการไฟฟ้า	93
ตารางที่ 5.5 แสดงเอาต์พุตของโหลด	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 1.1 แผนภาพสาริตระบบผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน	2
รูปที่ 1.2 แผนผังวิธีการทำโครงการงาน	5
รูปที่ 2.1 แผนผังส่วนประกอบอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสเซอร์แรงดันและกระแส	9
รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า	12
รูปที่ 2.5 สวิตช์โหมคอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	14
รูปที่ 2.6 สวิตช์โหมคอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกิ่ง	15
รูปที่ 2.7 การสร้างสัญญาณสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม	16
รูปที่ 2.8 พีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (sinusoidal pulsewidth modulation: SPWM)	17
รูปที่ 2.9 รูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชัน	19
รูปที่ 2.10 สเปคตร้าของรูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชัน เมื่อ	19
รูปที่ 2.11 การควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม โดยการปรับค่า	20
รูปที่ 2.12 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาร์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์	20
รูปที่ 2.13 การสวิตซ์แรงดันแบบไบโพลาร์	21
รูปที่ 2.14 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	23
รูปที่ 2.15 ค่าแรงดันระลอกคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	24
รูปที่ 2.16 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์	26
รูปที่ 2.17 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกรูปไซน์	28
รูปที่ 2.18 ค่าแรงดันผิดเพี้ยนเฉลี่ยจากผลของเดดไทม์	28
รูปที่ 2.19 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	29
รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลเมื่อสวิตซ์นำกระแส	30
รูปที่ 2.21 (ก) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (ข) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ	31
รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลเมื่อสวิตซ์ไม่นำกระแส	31
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับ D	34
รูปที่ 2.24 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (ก) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ	36
รูปที่ 2.25 มอสเฟตกำลัง (ก) สัญลักษณ์ (ข) คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (ค) คุณลักษณะในอุดมคติ	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่ 2.26 ไอจีบีที (ก) สัญลักษณ์ (ข) คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (ค) คุณลักษณะในอุดมคติ	38
รูปที่ 2.27 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแบบประมาณ	39
รูปที่ 2.28 จำลองการทำงาน แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่โหลดแบบเชิงเส้น	41
รูปที่ 2.29 จำลองการทำงาน แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่โหลดแบบไม่เชิงเส้น	42
รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกการทำงานของวงจรรีเลย์ต่อระบบไฟฟ้า	45
รูปที่ 3.2 วงจรรีเลย์และวงจรต่อกับระบบไฟฟ้า	46
รูปที่ 3.3 รูปคลื่นแรงดันชั่วขณะตกคร่อมไอจีบีที	49
รูปที่ 3.4 วงจรสับเบรคเกอร์ต่อกับไอจีบีที	50
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์	51
รูปที่ 3.6 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	52
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	54
รูปที่ 3.8 วงจรขับรีเลย์ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	57
รูปที่ 4.1 ฟังก์ชันการทำงานรวมของระบบ	59
รูปที่ 4.2 ฟังก์ชันการทำงานของระบบในโหมด Synchronize แบบอัตโนมัติ	61
รูปที่ 4.3 ฟังก์ชันการทำงานของระบบในโหมด Synchronize แบบทำงานด้วยมือ	62
รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันการทำงานของระบบในโหมด Un synchronize แบบอัตโนมัติ และแบบทำงานด้วยมือ	63
รูปที่ 4.5 วงจรควบคุมของระบบ	64
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการจัดขาของ PIC18F458	66
รูปที่ 4.7 บล็อกไดอะแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์	67
รูปที่ 4.8 วงจร Dead Time และ วงจรขับเกต	69
รูปที่ 4.9 วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์แรงดันระบบไฟฟ้า	70
รูปที่ 4.10 วงจรตรวจวัดแรงดันกระแสตรง	70
รูปที่ 4.11 วงจรตรวจวัดแรงดันระบบไฟฟ้า	71
รูปที่ 4.12 วงจรรีเลย์	71
รูปที่ 4.13 โฟลว์ชาร์ทการทำงานของโปรแกรมหลัก	73
รูปที่ 4.14 โฟลว์ชาร์ทการทำงานของโปรแกรมหลัก(ต่อ)	74
รูปที่ 4.15 โฟลว์ชาร์ทการทำงานของโปรแกรมเมื่อทำการซิงโครไนซ์	76
รูปที่ 4.16 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบหลักเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์	78
รูปที่ 4.17 แสดงกลไกการทำงานของสแต็กอย่างง่าย	82

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่ 4.18 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบพริ้นซ์ตัน หรือฟอน นิวแมน	83
รูปที่ 4.19 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์วาร์ด	84
รูปที่ 5.1 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์	86
รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 100 วัตต์	87
รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์	87
รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 300 วัตต์	88
รูปที่ 5.5 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบรวม	89
รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของระบบรวมเมื่อจ่ายโหลด 100 วัตต์	89
รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของระบบรวมเมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์	90
รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของระบบรวมเมื่อจ่ายโหลด 300 วัตต์	90
รูปที่ 5.9 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบจ่ายโหลดร่วมกับระบบการไฟฟ้า	91
รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ กับระบบการไฟฟ้ายังไม่ทำการชิ่งโครไนซ์	92
รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ กับระบบการไฟฟ้าเมื่อทำการชิ่งโครไนซ์	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องลงมาบนโลกนั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาและชีววิทยา ก่อให้เกิดการหมุนเวียนของระบบสิ่งมีชีวิต ส่งผลให้เกิดทรัพยากรจำพวกฟอสซิลเก็บสะสมไว้เป็นจำนวนมาก นานหลายล้านปี แต่หลังจากที่ผ่านมาก่อบสองร้อยปีจนถึงปัจจุบัน ความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและความต้องการใช้พลังงานของมนุษย์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ปริมาณทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้กระบวนการใช้ทรัพยากรฟอสซิลเป็นไปในลักษณะเผาไหม้ทางเคมี ส่งผลให้เกิดมลภาวะเป็นพิษในอากาศ และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศก็เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดบรรยากาศร้อนปกคลุมโลก ซึ่งจะเป็นภัยต่อการดำรงชีวิตอยู่ของสิ่งมีชีวิตบนโลก

พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาด มีอยู่โดยทั่วไปตามธรรมชาติ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นวิธีหนึ่งที่จะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่แปรรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งพลังงานไฟฟ้าสามารถที่จะส่งจ่ายไปที่อื่นๆ หรือแปรรูปเป็นพลังงานต่างๆ ต่อไปได้ง่าย พลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดการใช้พลังงานชนิดอื่นๆ และลดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

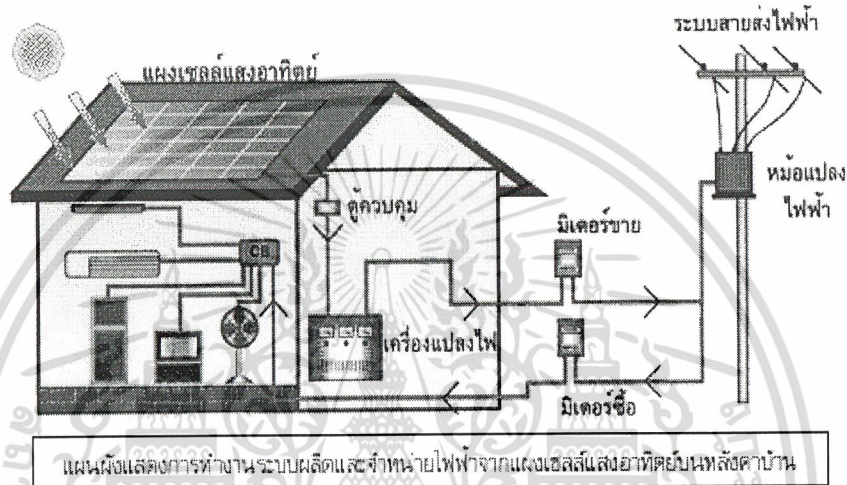
1.2 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของประเทศ ได้เปลี่ยนจากช่วงเวลากลางคืนเป็นช่วงเวลากลางวัน อันเป็นผลจากการขยายตัวทางอุตสาหกรรมและสูงขึ้นทุกปี พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ส่วนใหญ่มาจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันเตา เชื้อเพลิงเหล่านี้ในอนาคตราคาสูงขึ้นและจะหมดไปในที่สุดการสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ก็เกิดขึ้นได้ยากขึ้นเนื่องจากการต่อต้านจากกระแสอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเพื่อชะลอการก่อสร้างโรงไฟฟ้าแบบอื่นและลดการใช้งานเชื้อเพลิงดังกล่าวการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงมีความเหมาะสมที่จะช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้ากัระบบไฟฟ้า เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดช่วงเวลากลางวัน ไม่มีต้นทุนเชื้อเพลิง เป็นหน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถกระจายไปได้ทุกพื้นที่ และราคาแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มถูกลงไปเป็นลำดับ

การผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เพื่อต่อกับระบบไฟฟ้า จำเป็นต้องมีอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเรียกว่าอินเวอร์เตอร์ โดยอินเวอร์เตอร์ต้องมีคุณลักษณะเฉพาะ คือสามารถต่อกับระบบไฟฟ้าได้

ในประเทศนั้น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้นำอินเวอร์เตอร์จากต่างประเทศมาทดสอบใช้งานตามภูมิภาคต่างๆ ของประเทศ เช่น ที่สถานีพลังงานแสงอาทิตย์สันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ โรงไฟฟ้าคลองช่องกล้า จังหวัดปราจีนบุรี สถานีทดลองพลังงานทดแทนพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต ซึ่งอินเวอร์เตอร์เหล่านี้มีขนาดกำลังไฟฟ้า 8-20 กิโลวัตต์ อยู่ระหว่างทดสอบใช้งานและเก็บข้อมูลต่างๆ ส่วนอินเวอร์เตอร์

ขนาดเล็กที่ใช้ตามที่อยู่อาศัยทั่วไปนั้น สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีโครงการสาธิตระบบผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน เป็นโครงการส่งเสริมธุรกิจด้านการอนุรักษ์พลังงาน โดยนำอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่แปลงพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาบ้านให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยผ่านมิเตอร์ขายไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งขณะนี้กำลังอยู่ในระหว่างการทดสอบงานและเก็บข้อมูลต่างๆ และคาดว่าในอนาคตมีแนวโน้มที่จะนำไปใช้งานได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงการทำงานระบบผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน

แนวทางการศึกษา

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบสร้างอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้ารวมถึงการทดสอบในห้งานอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า เพื่อแก้ปัญหาดังต่อไปนี้

1. ภาคอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ออกแบบอินเวอร์เตอร์ให้มีคุณสมบัติสามารถรับไฟฟ้าได้โดยตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์ กำหนดช่วงแรงดันอินพุต 38-55 โวลต์
2. ภาคเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ออกแบบให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อกับระบบไฟฟ้า สามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีค่าตัวประกอบกำลังสูงกว่า 0.90 ขนาดแรงดันที่ต่อกับระบบไฟฟ้าคือ 220 โวลต์ ± 5 เฟอร์เซ็นต์ 50 เฮิร์ตซ์ ± 1 เฟอร์เซ็นต์
3. ระบบป้องกันต้องออกแบบให้มีความเชื่อถือได้สูง สามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.3.1 เพื่อออกแบบสร้างอินเวอร์เตอร์ให้สามารถจ่ายโหลดได้ในสภาวะ Islanding
- 1.3.2 เพื่อศึกษาการจ่ายโหลดร่วมกับระบบไฟฟ้า
- 1.3.3 เพื่อศึกษาการจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนให้คืนให้กับระบบไฟฟ้า
- 1.3.4 เพื่อออกแบบและจัดสร้างวงจรกำลังและระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์ให้มีคุณลักษณะต่อกับระบบไฟฟ้าได้
- 1.3.5 เพื่อพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในลักษณะจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อกับระบบไฟฟ้าโดยตรง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เรียนรู้และเข้าใจถึงหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์
- 1.4.2 เรียนรู้และเข้าใจถึงหลักการจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนให้กับระบบไฟฟ้า
- 1.4.3 อินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นสามารถต่อกับระบบไฟฟ้าได้และเป็นต้นแบบในการพัฒนาต่อไป
- 1.4.4 นำพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ไปใช้ประโยชน์ได้มากยิ่งขึ้น
- 1.4.5 เสริมสร้างศักยภาพทางเทคโนโลยีด้วยตัวเอง

1.5 ขอบเขตของการศึกษาโครงการ

ออกแบบและพัฒนาสร้างอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้าโดยสามารถเลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ ขนาดพิกัดไม่ต่ำกว่า 300 วัตต์ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ โดยมีข้อกำหนดการออกแบบตามตาราง

รายการ(Item)		ข้อกำหนด(Specification)
AC Voltage Rating	(Grid)	Single-phase 220 VAC ± 5 %
DC Voltage Rating	(Solar Cell Array and Battery)	38-55 VDC (48 VDC Normal)
Output Rating for Grid-Connected	Voltage	Single-phase 220 VAC ± 5 %
	Frequency	50Hz, ± 1 %
	Power (Max)	300W

ตารางที่ 1.1 ข้อกำหนดพิกัดอินพุตและเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการ(Item)		ข้อกำหนด(Specification)
Inverter Specification	Control System	SPWM(Sinusoidal)
	Switching Device	IGBT
	Voltage	Single-Phase 27 VAC
	Frequency	50Hz, $\pm 1\%$
	Isolation Method	Power Transformer 27/220 VAC
Function Operating		Grid-Connected

ตารางที่ 1.2 ข้อกำหนดระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์

รายการ(Item)		ข้อกำหนด(Specification)
Monitoring	Grid	Voltage, Current, Frequency Power
	DC Source	Voltage, Current
Detection for Islanding Operation		-Sudden Phase Shift Detection

ตารางที่ 1.3 ข้อกำหนดในการแสดงผลและการป้องกันอินเวอร์เตอร์

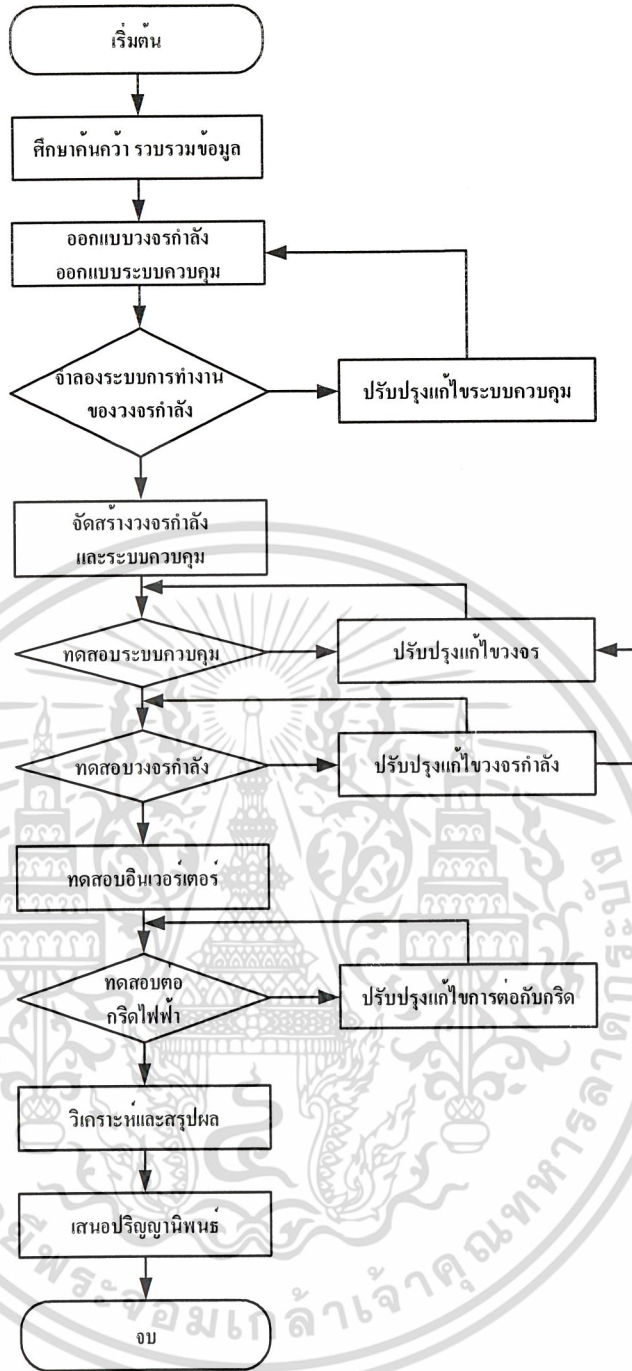
1.6 ขั้นตอนการทำโครงการ

ออกแบบสร้างและทดสอบการใช้งานอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้าแสดงเป็นแผนผังการทำโครงการในรูปที่ 1.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.6.1 ออกแบบสร้างวงจรกำลัง โดยมีส่วนที่สำคัญคืออินเวอร์เตอร์ใช้ไอจีบีที(IGBT)เป็นสวิตช์กำลัง ต่อแบบฟูลบริดจ์ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน หม้อแปลงกำลัง ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง วงจรยกระดับแรงดันไฟตรง ขั้นตอนนี้จะต้องศึกษา ออกแบบ และทดสอบวงจรกำลังขึ้นเองจนสามารถใช้งานได้

1.6.2 ออกแบบระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ การออกแบบระบบควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC 18F458 ขั้นตอนนี้จะต้องออกแบบระบบควบคุมขึ้นเอง และเขียนโปรแกรมระบบควบคุม จนสามารถใช้งานได้ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ การซิงโครไนซ์ต่อกับระบบไฟฟ้า การสร้างสัญญาณ SPWM โปรแกรมควบคุมกำลังไฟฟ้า โปรแกรมควบคุมตัวประกอบกำลัง โปรแกรมการเลือกโหมดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โปรแกรมตรวจสอบสถานะ Islanding

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 แผนผังวิธีการทำโครงการ

1.6.3 ทดสอบการใช้งานอินเวอร์เตอร์ มีการทดสอบดังนี้

1.6.3.1 ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่โหลดต่างๆ โดยใช้แรงดันกระแสตรงจากแบตเตอรี่ หรือเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกยกกระดับแรงดันจาก 15 โวลต์ ไปเป็น 48 โวลต์ ในการทดสอบจะใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงปรับค่าได้ ในกรณีที่ไม่สามารถจัดหาแบตเตอรี่หรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ตามพิกัด

1.6.3.2 ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับระบบไฟฟ้า โดยการปรับแรงดัน ความถี่ และมุมเฟสของอินเวอร์เตอร์ให้เท่ากัน

1.6.3.3 ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนให้กับระบบไฟฟ้า โดยการต่อตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงเพื่อให้เกิดมูมกำลังไฟฟ้า โดยแรงดันของอินเวอร์เตอร์นำหน้าแรงดันของระบบไฟฟ้า หรือ โดยการให้แรงดันของอินเวอร์เตอร์มากกว่าแรงดันของการไฟฟ้า

1.6.3.4 ทดสอบการควบคุมตัวประกอบกำลัง โดยการปรับแรงดันกระแสตรงหรือแรงดันระบบไฟฟ้าให้แตกต่างจากปกติ ตรวจสอบวัดค่าตัวประกอบกำลังของอินเวอร์เตอร์ที่ต่อกับระบบไฟฟ้า ต้องมีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับ 0.90 ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

1.6.3.5 นำข้อมูลที่ได้ออกแบบและพัฒนาสร้างและผลการทดสอบมาวิจารณ์ สรุปผล และเสนอโครงการงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า

2.1 บทนำ

เทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และเข้ามามีบทบาท สำคัญในภาคอุตสาหกรรม ตลอดจนถึงการนำพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพจนกระทั่งสามารถต่อกับระบบไฟฟ้าได้โดยตรง อินเวอร์เตอร์ ต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังได้รับการศึกษาและพัฒนาให้มีสมรรถนะและความเชื่อถือได้สูง สามารถใช้งานได้กว้างขวางยิ่งขึ้น

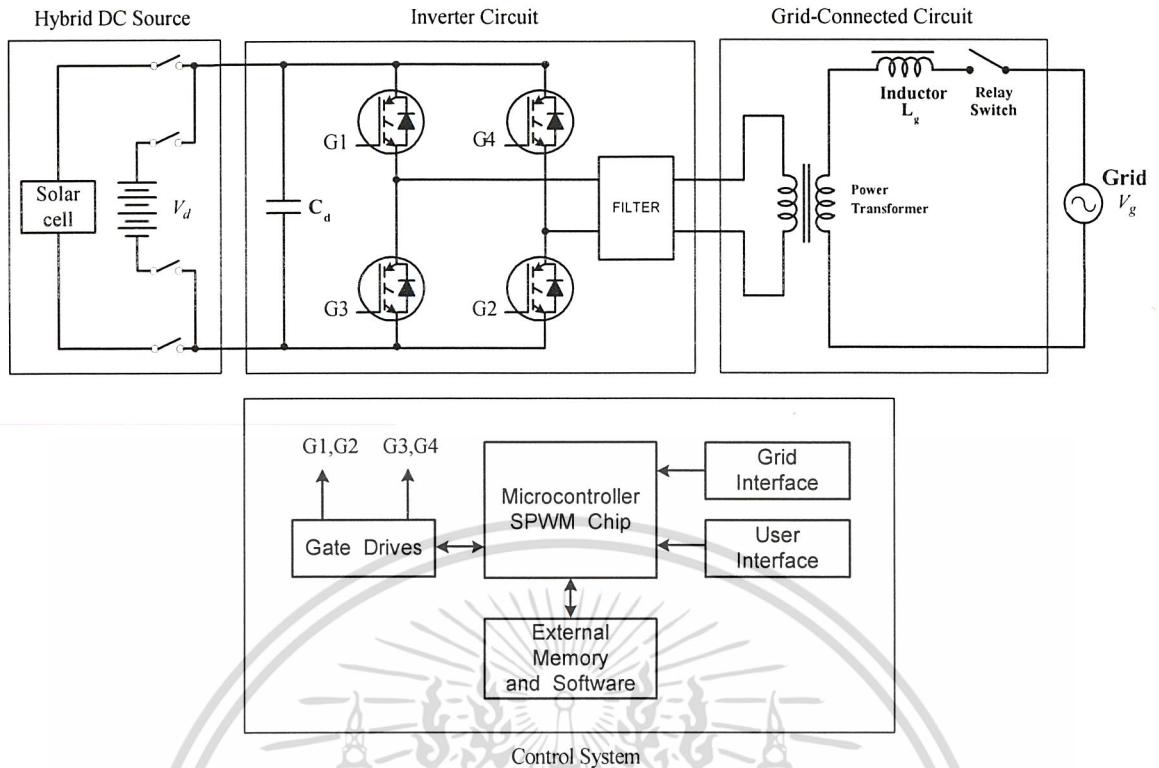
อินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า มีโครงสร้างและส่วนประกอบคล้ายกับอินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์กระแสสลับทั่วไป การพัฒนาให้อินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้าได้นั้น อินเวอร์เตอร์จะต้องมีคุณลักษณะเพิ่มขึ้นอีกหลายอย่าง เช่น การชิ่งโครโนซ์กับระบบไฟฟ้า การควบคุมกำลังไฟฟ้า และระบบป้องกันโดยวิธีเฉพาะ ดังจะกล่าวรายละเอียดในบทนี้

2.2 ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า

อินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่สองวงจรอินเวอร์เตอร์ ส่วนที่สามวงจรต่อกับระบบไฟฟ้า และส่วนที่สี่ระบบควบคุม ดังแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 2.1

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ทำการเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นด้วยวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์และแบตเตอรี่ วงจรอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ (C_d) เพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ และไอจีบีที (IGBT) ต่อแบบฟูลบริดจ์เฟสเดียวโดยรับแรงดันกระแสตรง (V_d) จากแผงเซลล์อาทิตย์ หรือแบตเตอรี่แปลงแรงดันกระแสตรงเป็นแรงดันกระแสสลับ ผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนวงจรต่อกับระบบไฟฟ้า ประกอบด้วยหม้อแปลงกำลังแบบเพิ่มแรงดันมีหน้าที่แปลงแรงดันกระแสสลับจากวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีขนาดแรงดันต่ำให้สูงขึ้นเท่ากับแรงดันระบบไฟฟ้า (V_g) ผ่านตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงซึ่งทำหน้าที่จำกัดกระแสและต่อกับระบบไฟฟ้าด้วยสวิตซ์รีเลย์

ระบบควบคุมประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือหน่วยประมวลผลโดยทั่วไปจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ในการเลือกโหมดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และควบคุมอินเวอร์เตอร์รวมถึงการชิ่งโครโนซ์กับระบบไฟฟ้า และยังมีส่วนกำเนิดสัญญาณขับเคลื่อนไอจีบีทีด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.4

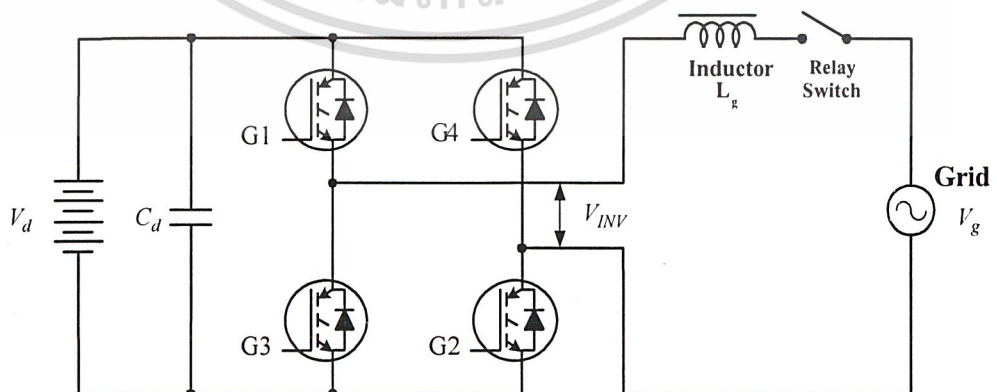


รูปที่ 2.1 แผนผังส่วนประกอบอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า

2.3 หลักการของอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า

วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.2 โดยตัดหม้อแปลงกำลังออกไปก่อน การต่อแรงดันอินเวอร์เตอร์กับแรงดันระบบไฟฟ้ามีข้อกำหนดสามประการ คือ

- ขนาดแรงดันเท่ากัน
- ความถี่แรงดันเท่ากัน
- มุมเฟสแรงดันเท่ากัน



รูปที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.2 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้าแบบเฟสเดียว มีส่วนประกอบดังนี้ แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง (V_d) สวิตช์กำลังความเร็วสูงใช้ไอจีบีทีที่ถูกควบคุมด้วยเทคนิคเอสพีดับเบิลยูเอ็ม ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง (L_g) และระบบไฟฟ้า

V_d = แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

i_d = กระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

V_{INV} = แรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์

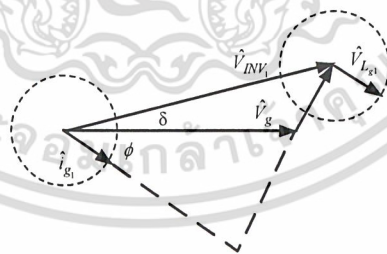
L_g = ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง

V_g = แรงดันระบบไฟฟ้า

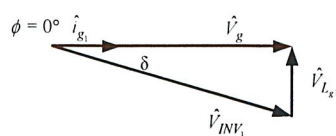
i_g = กระแสระบบไฟฟ้า

V_{L_g} = แรงดันตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง L_g

กำหนดให้ \hat{V}_g เป็นจุดอ้างอิงเฟสเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 วิเคราะห์หาความสัมพันธ์กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

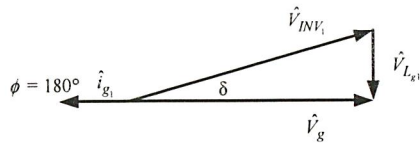


(ก) เฟสเซอร์คุณลักษณะการทำงานทั่วไป



(ข) เฟสเซอร์แสดงมุมกำลังเป็นบวก ตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) เฟสเซอร์แสดงมุมกำลังเป็นลบ ตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง

รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสเซอร์แรงดันและกระแส

$$v_g = \hat{V}_g \sin(\omega t + 0^\circ) \quad (2.1)$$

$$v_{INV} = \hat{V}_{INV} \sin(\omega t + 0^\circ) \quad (2.2)$$

$$\omega = 2\pi f_1$$

$$f_1 = \text{ความถี่แรงดันระบบไฟฟ้า (ความถี่หลักมูล)}$$

$$(\hat{V}_{L_g})_1 = \text{แรงดันตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่หลักมูล}$$

$$(\hat{i}_g)_1 = \text{กระแสระบบไฟฟ้าที่องค์ประกอบความถี่หลักมูล}$$

$$(\hat{V}_{INV})_1 = \text{แรงดันอินเวอร์เตอร์ที่องค์ประกอบความถี่หลักมูล}$$

$$v_g = v_{INV} + v_{L_g} \quad (2.3)$$

$$V_{L_g} = L_g \left(\frac{di_g}{dt} \right) \quad (2.4)$$

$$v_g = (\hat{V}_{INV})_1 + (\hat{V}_{L_g})_1 \quad (2.5)$$

$$(\hat{V}_{L_g})_1 = j\omega L_g (\hat{i}_g)_1 \quad (2.6)$$

$$(\hat{V}_{L_g})_1 \cos \phi = \omega L_g (\hat{i}_g)_1 \cos \phi = (\hat{V}_{INV})_1 \sin \delta \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_g - \omega L_g (\hat{i}_g)_1 \sin \phi = (\hat{V}_{INV})_1 \cos \delta \quad (2.8)$$

$$(\hat{i}_g)_1 = \frac{\hat{V}_g - (\hat{V}_{INV})_1}{j\omega L_g} \quad (2.9)$$

$$P_g = V_g (\hat{i}_g)_1 \cos \phi = \frac{\hat{V}_g \cdot (\hat{V}_{INV})_1}{\omega L_g} \sin \delta \quad (2.10)$$

$$Q_g = V_g (\hat{i}_g)_1 \sin \phi = \frac{1}{\omega L_g} \left[\hat{V}_g^2 - ((\hat{V}_{INV})_1 \cdot \hat{V}_g) \cos \delta \right] \quad (2.11)$$

$$Q_g = V_g (\hat{i}_g)_1 \sin \phi = \frac{\hat{V}_g^2}{\omega L_g} \left(1 - \frac{(\hat{V}_{INV})_1}{\hat{V}_g} \cos \delta \right) \quad (2.12)$$

δ = มุมกำลัง (Power angle) คือมุมระหว่างแรงดันระบบไฟฟ้ากับอินเวอร์เตอร์

ϕ = มุมระหว่างแรงดันและกระแสระบบไฟฟ้า (V_g, i_{g1})

S_g = กำลังปรากฏ (Apparent power) ระบบไฟฟ้า

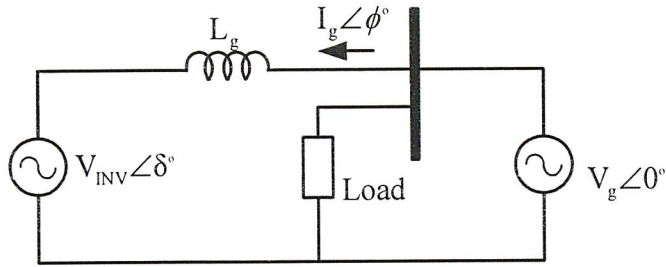
P_g = กำลังแอกทีฟ (Active power) ระบบไฟฟ้า

Q_g = กำลังรีแอกทีฟ (Reactive power) ระบบไฟฟ้า

2.3.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ของแรงดันและกระแส และรูปที่ 2.4 แสดงวงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า เขียนได้เป็นจากสมการที่ 2.3-2.12 จากสมการที่ 2.10 สมมติว่าแรงดันระบบไฟฟ้าและแรงดันอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ กำลังแอกทีฟที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามมุมกำลัง ถ้ามุมกำลังเป็นบวกหรือมุมเฟส $(\hat{V}_{INV})_1$ ล้าหลัง $(\hat{V}_g)_1$ กำลังแอกทีฟจะไหลจากระบบไฟฟ้าไปแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง ถ้ามุมกำลังมีค่าเป็นลบ คือมุมเฟสแรงดัน $(\hat{V}_{INV})_1$ นำหน้า $(\hat{V}_g)_1$ กำลังแอกทีฟจะไหลจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงไปยังระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า

2.3.2 การควบคุมตัวประกอบกำลัง

จากสมการที่ (2.10) และ (2.12) เป็นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า สมการที่ 2.12 สมมติว่าแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันระบบไฟฟ้ามีค่าคงที่ กำลังแอกทีฟจะแปรผันตามค่าไซน์ของมุมกำลัง ($\sin \delta$) เขียนได้เป็นสมการที่ 2.14 ถ้ามุมกำลังมีค่าเป็นบวกกำลังแอกทีฟจากระบบไฟฟ้าจะจ่ายเข้าสู่แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง ถ้ามุมกำลังมีค่าเป็นลบกำลังแอกทีฟจากแหล่งจ่ายกระแสตรงจะจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

$$P_g \propto \sin \delta \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 สมมติว่าแรงดันระบบไฟฟ้าและมุมกำลังมีค่าคงที่เป็น c_1 และ c_2 ตามลำดับเขียนได้สมการที่ 2.15 และ 2.16 กำลังรีแอกทีฟจะแปรผันตามแรงดันอินเวอร์เตอร์ หรือแปรผันตามอัตราส่วนระหว่างแรงดันอินเวอร์เตอร์กับแรงดันระบบไฟฟ้า

$$Q_g = c_1(1 + c_2 V_{INV1}/V_g) \quad (2.14)$$

$$Q_g \propto V_{INV1} \quad (2.15)$$

ดังนั้นการจ่ายกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์จะต้องควบคุมให้กำลังรีแอกทีฟมีค่าน้อยที่สุดและกำลังแอกทีฟมีค่ามากที่สุด ซึ่งจะเป็นผลทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุดกำลังแอกทีฟควบคุมด้วยการปรับมุมกำลัง ส่วนกำลังรีแอกทีฟควบคุมด้วยการปรับดัชนีมอดูเลต เพื่อให้แรงดันอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับแรงดันระบบไฟฟ้าเสมอแม้ว่าแรงดันกระแสตรงหรือแรงดันระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ควบคุมตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงใกล้เคียงหนึ่งผลที่ได้คือ ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าสูงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

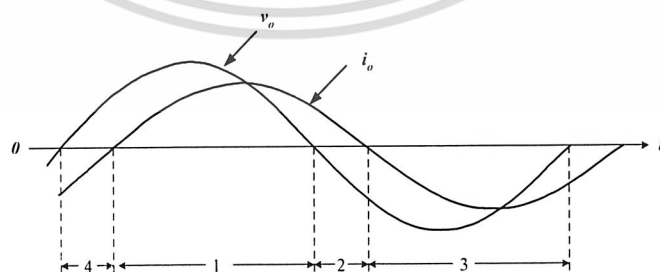
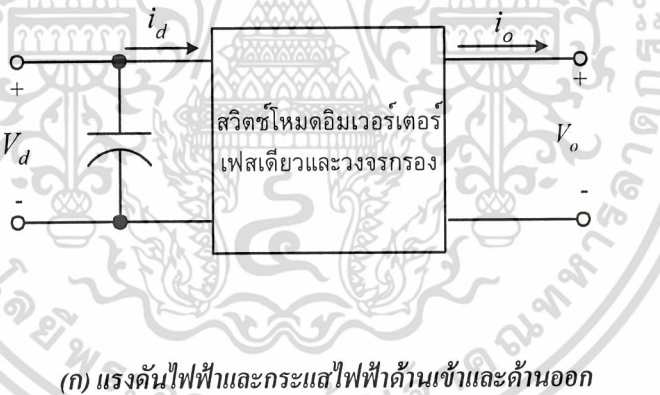
2.4 หลักการของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ ที่ทำการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มคือ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) กับ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI)

อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน มักจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันอาจจะแบ่งเป็นสองประเภทที่นิยมนำไปใช้งานคือ อินเวอร์เตอร์แบบพีดีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation inverter: PWM inverter) ส่วนอีกประเภทที่นิยมคืออินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (square-wave inverter) ซึ่งมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือขนาดของฮาร์มอนิกอันดับต่ำๆ จะมีค่าสูง

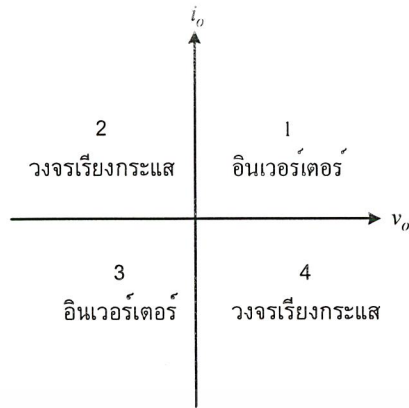
2.4.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในรูปแบบที่ 2.5 (ก) สมมติว่าแรงดันไฟฟ้าด้านออก (v_o) และกระแสไฟฟ้าด้านออก (i_o) ผ่านวงจรกรองความถี่สูงออกไป เหลือเฉพาะความถี่ต่ำ ดังนั้นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเป็นรูปไซน์ กรณีที่แสดงในรูปแบบที่ 2.5 (ก) โหลดจะเป็นค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะล่าหลังแรงดันไฟฟ้า สำหรับในรูปแบบที่ 2.5 (ข) กำลังไฟฟ้าด้านออก (p_o) จะพิจารณาเป็นผลคูณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกดังนี้



(ข) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปที่ โหมดการทำงานใน 4 จตุภาค

รูปที่ 2.5 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

โหมดที่ 1 โหมดอินเวอร์เตอร์

v_o เป็นบวก i_o เป็นบวก p_o เป็นบวก คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_d) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (V_o)

โหมดที่ 2 โหมดเรียงกระแส

v_o เป็นลบ i_o เป็นบวก p_o เป็นลบ คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (V_o) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_d)

โหมดที่ 3 โหมดอินเวอร์เตอร์

v_o เป็นลบ i_o เป็นลบ p_o เป็นบวก คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_d) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (V_o)

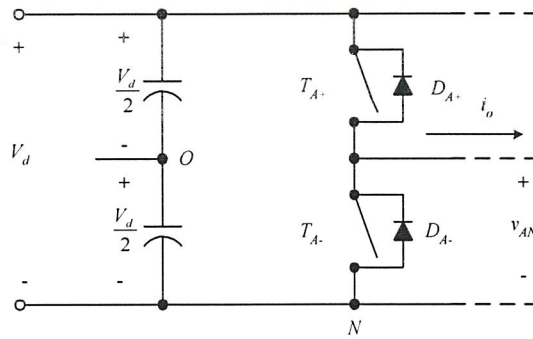
โหมดที่ 4 โหมดเรียงกระแส

v_o เป็นบวก i_o เป็นลบ p_o เป็นลบ คือกำลังไฟฟ้าถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (V_o) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_d)

สรุปรูปแบบในการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ค)

เพื่อความเข้าใจการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2.6 จะแสดงเพียงหนึ่งกิ่งของวงจร

อินเวอร์เตอร์ คือ กิ่ง A หรือ เฟส A ที่สมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าคงที่และกำหนดให้การสวิตช์ทำงานเป็นแบบพีดับเบิลยูเอ็ม



รูปที่ 2.6 สวิตช์โหมคอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกึ่ง

2.4.2 การสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ดังในรูปที่ 2.7 (ก) ความถี่ของการสวิตช์ (f_s) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม

คำย่อและความหมายที่สำคัญของการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม มีดังต่อไปนี้

v_{control} สัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก

v_{tri} สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตช์

f_1 ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์

f_s ความถี่ของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

m_a อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด

m_f อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

ถ้า m_a จะนิยามจากสมการที่ (2.16)

$$m_a = \frac{\hat{V}_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}} \quad (2.16)$$

เมื่อ \hat{V}_{control} คือค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์

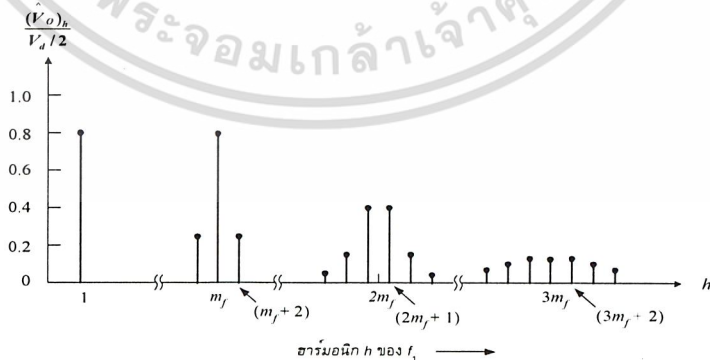
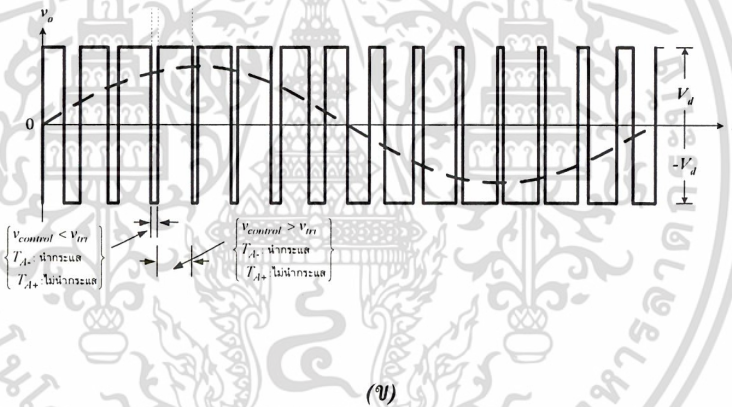
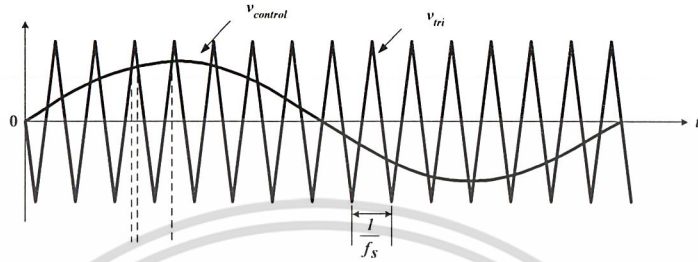
\hat{V}_{tri} คือค่ายอดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

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

ในกรณี $m_a > 1$ จะเป็นช่วงการควบคุมแบบโอเวอร์มอดูเลต ซึ่งผลของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกสูงกว่าช่วงการมอดูเลตเชิงเส้นสำหรับเงื่อนไขของการสร้างสัญญาณสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม คือ

$$v_{\text{control}} > v_{\text{tri}}, \quad T_{A+} \text{ จะนำกระแส} \quad v_{Ao} = \frac{1}{2}V_d \quad (2.17)$$

$$v_{\text{control}} < v_{\text{tri}}, \quad T_{A-} \text{ จะนำกระแส} \quad v_{Ao} = -\frac{1}{2}V_d \quad (2.18)$$



(ค)

รูปที่ 2.7 การสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบพีคดับเบิลยูเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของสวิตช์ T_{A+} และ T_{A-} จะขึ้นอยู่กับผลการเปรียบเทียบของ v_{control} กับ v_{tri} โดยจะมีเงื่อนไขดังสมการที่ (2.17) และ (2.18) และจะไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแส รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างเมื่อกำหนดเงื่อนไขที่ $m_a = 0.8$ และ $m_f = 15$ ฮาร์โมนิกสเปกตรัม (harmonic spectrum) ของ v_{Ao} โดยเขียนกราฟเทียบกับค่าแกนตั้ง $(\hat{V}_{Ao})_h / (V_d / 2)$ แสดงในรูปที่ 2.7 (ค) จะมีส่วนสำคัญสามส่วนคือ

1. ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล $(\hat{V}_{Ao})_1 = m_a (V_d / 2)$

โดยมีความสัมพันธ์จาก

$$V_{Ao} = \frac{v_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}} \cdot \frac{V_d}{2}, \quad v_{\text{control}} \leq \hat{V}_{\text{tri}} \quad (2.19)$$

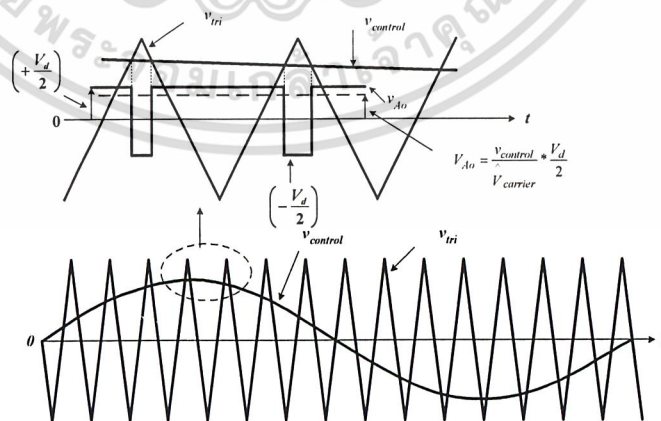
$$v_{\text{control}} = \hat{V}_{\text{control}} \sin \omega_1 t, \quad v_{\text{control}} \leq \hat{V}_{\text{tri}}$$

$$(v_{Ao})_1 = \left(\frac{\hat{V}_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}} \cdot \frac{V_d}{2} \right) \sin(\omega_1 t), \quad m_a \leq 1.0$$

$$(v_{Ao})_1 = m_a \cdot (V_d / 2) \sin \omega_1 t, \quad m_a \leq 1.0$$

$$(\hat{V}_{Ao})_1 = m_a \cdot (V_d / 2), \quad m_a \leq 1.0 \quad (2.20)$$

สมการที่ (2.20) พิจารณาประกอบจากรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลจะแปรผันเป็นเชิงเส้นกับค่า m_a ซึ่ง m_a จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1



รูปที่ 2.8 พัลส์เบรียเอ็มแบบไซน์ (sinusoidal pulsewidth modulation: SPWM)

ค่าไซด์แบนด์ฮาร์โมนิก (sideband harmonic) จะเกิดขึ้นรอบๆ $1m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$ ดังแสดงในสมการที่ (2.21) หรือ (2.22)

$$f_h = (jm_f \pm k)f_1 \quad (2.21)$$

$$h = j(m_f) \pm k \quad (2.22)$$

เมื่อ $h=1$ คือความถี่หลักมูล (fundamental frequency)

ถ้าค่า j เป็นเลขคี่ ค่าฮาร์โมนิกจะเท่ากับค่า k ที่เป็นเลขคู่

ถ้าค่า j เป็นเลขคู่ ค่าฮาร์โมนิกจะเท่ากับค่า k ที่เป็นเลขคี่

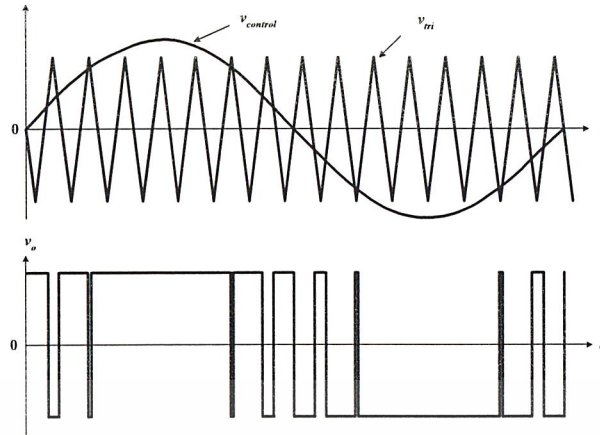
3. ค่า m_f ฮาร์โมนิกควรจะเป็นเลขคี่ เพราะถ้ากำหนดให้ค่า m_f เป็นเลขคี่ก็จะทำให้เกิดการสมมาตรเลขคี่ ซึ่งแสดงได้จากสมการ $f(-t) = -f(t)$ ผลที่ได้คือจะมีเพียงฮาร์โมนิกเลขคี่เท่านั้นที่ยังปรากฏอยู่ใน v_{Ao} ส่วนฮาร์โมนิกเลขคู่จะหักล้างกัน โดยในช่วง $m_f > 21$ จะถือว่า m_f มีค่ามากโดยที่ขนาดของฮาร์โมนิกย่อย (sub-harmonics) จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า m_f

สำหรับกรณีโอเวอร์มอดูเลชัน ($m_a > 1$) จะเกิดขึ้นเมื่อ $\hat{V}_{control} > \hat{V}_{tri}$ โดยค่ารูปคลื่นพีคดับเบิลยูเอ็มจะมีช่วงที่เป็นบวกหรือลบกว้างกว่าหนึ่งคาบการสวิตซ์ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 2.9 โอเวอร์มอดูเลชันมีข้อดีคือขนาดแรงดันไฟฟ้าของความถี่หลักมูลจะมีค่าสูงกว่าในกรณี $m_a \leq 1$ แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และช่วงแรงดันยอดทางด้านออกของความถี่หลักมูลจะมีค่าอยู่ระหว่าง $V_d/2$ ถึง $4V_d/2\pi$ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

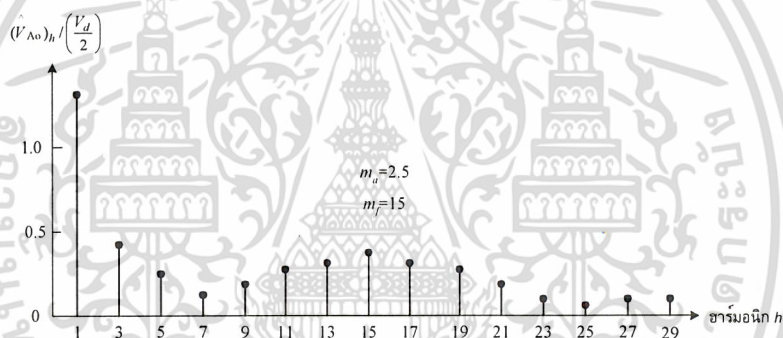
$$\frac{V_d}{2} < (\hat{V}_{Ao})_1 < \frac{4V_d}{\pi} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.23) ค่า $(\hat{V}_{Ao})_1$ จะอยู่ระหว่างค่าที่ทำงานในโหมดเชิงเส้นและโหมดรูปคลื่นสี่เหลี่ยม กรณีโหมดสี่เหลี่ยมจะเกิดจากการที่ $m_a \gg 1$ และต้องมีค่ามากพอ ในการที่จะบอกว่ามากพอเท่าใดจะขึ้นอยู่กับค่า m_f ด้วยหากค่า m_f มีค่ามาก m_a ก็จะต้องมีค่ามากไปด้วยที่จะทำให้ $v_{control}$ ไม่ตัดยอดของปลายสามเหลี่ยมของสัญญาณอ้างอิงเลย

อย่างไรก็ตามข้อเสียของกรณีโอเวอร์มอดูเลชันก็คือทำให้เกิดฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ที่อยู่ใกล้กับฮาร์โมนิกอันดับที่หนึ่งหรือความถี่หลักมูล เช่นฮาร์โมนิกอันดับที่ 3, 5, 7 เป็นต้น เช่นในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดผลเสียหากนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะฮาร์โมนิกอันดับที่ 3, 5, 7 จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและทำให้เกิดความเร็วหลายความเร็วในเวลาเดียวกันทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชัน

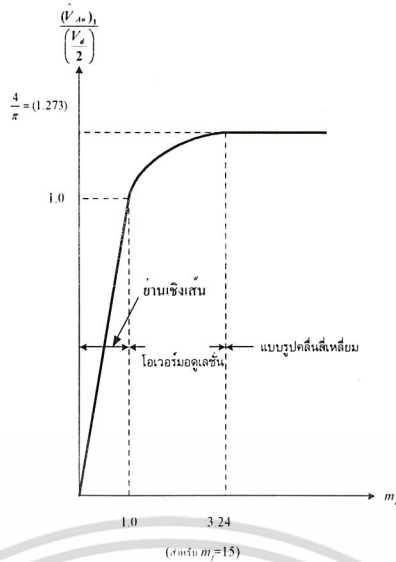


รูปที่ 2.10 สเปกตร้าของรูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชัน เมื่อ $m_a = 2.5$, $m_f = 15$

การเปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณในเงื่อนไขหาก $v_{control} > v_{tri}$ จะได้สัญญาณพัลส์เป็นบวก ในทำนองเดียวกันหาก $v_{control} < v_{tri}$ จะได้พัลส์เป็นลบ กรณีโอเวอร์มอดูเลชันในรูปที่ 2.9 ไซเคิลบวกของ $v_{control}$ จะมีช่วงขอดที่ $v_{control}$ มากกว่า v_{tri} จนถือว่าจะได้พัลส์บวกเป็นระยะเวลาหนึ่งเสมือนว่าไม่มีการสวิตซ์ ซึ่งเช่นเดียวกับการเกิดขึ้นที่ครึ่งไซเคิลลบของ $v_{control}$ ช่วง peak ล่างจะทำให้ค่าพัลส์เป็นลบหรือศูนย์เป็นช่วงขณะที่ไม่มีการสวิตซ์

ผลเสียที่จะเกิดเช่นในรูปที่ 2.10 คือเกิดฮาร์มอนิกที่ใกล้ๆ กับความถี่หลักมูลหรือฮาร์มอนิกอันดับหนึ่งและเกิดฮาร์มอนิกรอบๆ ความถี่ f_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

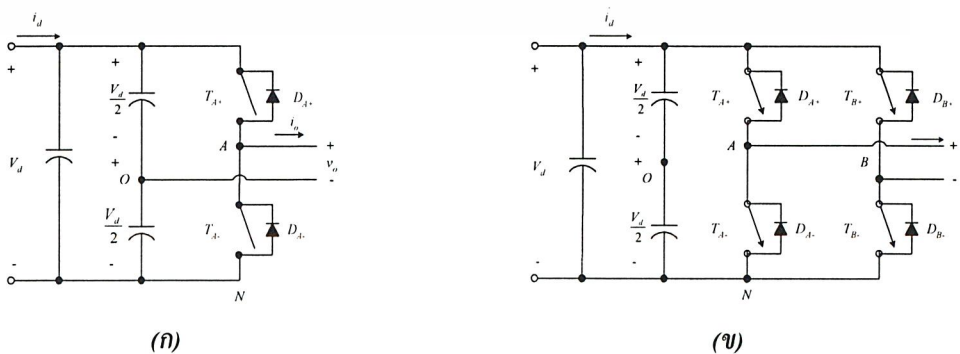


รูปที่ 2.11 การควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ดับเบิลยูเอ็มโดยการปรับค่า

2.4.3 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวจะแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ แบบฮาร์ฟบริดจ์ (half-bridge) และแบบฟูลบริดจ์ (full-bridge) ในแบบฮาร์ฟบริดจ์จะมีตัวเก็บประจุสองตัวต่อลำดับกันอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและหากกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุสองตัวมีค่าเท่ากัน จะทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากันคือ $V_d/2$ จุดกึ่งกลางแรงดันไฟฟ้า (จุด o ในรูปที่ 2.12 (ก)) จะมีค่าเท่ากับเมื่อเทียบกับบัสลบ (N) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เฟสเดียวจะประกอบไปด้วยสองกึ่ง คือ กึ่ง A และ กึ่ง B ในรูปที่ 2.12 (ข) โดยแบบฟูลบริดจ์จะมีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบฮาร์ฟบริดจ์สองเท่า จึงเหมาะที่จะเลือกใช้เมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าโหลดสูงขึ้น

เงื่อนไขสำคัญที่อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาร์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์ คือการทำงานของสวิตช์ T_{A+} และ T_{A-} ต้องไม่ทำงานพร้อมกันในทุกช่วงเวลา มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบ ในอุดมคติเวลาการสวิตช์ของ T_{A+} และ T_{A-} จะตรงข้ามกัน แต่ในทางปฏิบัติจะต้องการช่วงเวลาเวลาที่สวิตช์ทั้งคู่ไม่นำกระแส ซึ่งจะเรียกว่าเดดไทม์ (deadtime) โดยเดดไทม์จะอยู่ในช่วงเวลาก่อนจะเปลี่ยนสถานะการสวิตช์จากนำกระแสเป็นไม่นำกระแส หรือจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแส



รูปที่ 2.12 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาร์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.1 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (bipolar voltage switching) คือการควบคุมให้สวิตช์แบบบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ เช่น ในรูปที่ 2.12 (ข) การทำงานของสวิตช์ T_{A+} และ T_{B-} จะถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลา อีกคู่หนึ่งคือการทำงานของสวิตช์ T_{A-} และ T_{B+} ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง A จะเท่ากับ

$$v_{Ao} = \frac{1}{2}V_d \quad \text{เมื่อ } v_{\text{control}} > v_{\text{tri}}, \quad \text{สวิตช์ } T_{A+} \text{ และ } T_{B-} \text{ จะนำกระแส} \quad (2.24)$$

$$v_{Ao} = -\frac{1}{2}V_d \quad \text{เมื่อ } v_{\text{control}} < v_{\text{tri}}, \quad \text{สวิตช์ } T_{A-} \text{ และ } T_{B+} \text{ จะนำกระแส} \quad (2.25)$$

เมื่อคิดจากหนึ่งกิ่งของอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ แรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง B จะเท่ากับค่าลบของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง A คือ $v_{Bo} = -v_{Ao}$ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์หรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างกิ่ง A กับกิ่ง B คือ

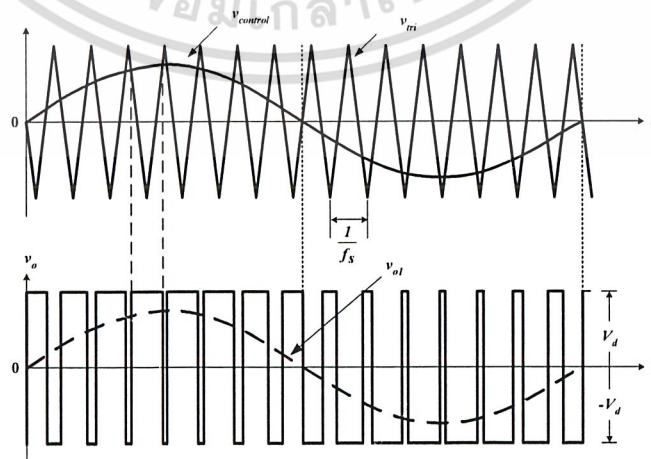
$$v_o = v_{Ao} - v_{Bo} = 2v_{Ao}$$

$$\hat{V}_{ol} = m_a V_d \quad \text{เมื่อ } m_a \leq 1.0 \quad (2.26)$$

$$V_d < \hat{V}_{ol} < \frac{4}{\pi}V_d \quad \text{เมื่อ } m_a > 1.0 \quad (2.27)$$

หรืออาจจะสรุปได้ว่าแรงดันไฟฟ้ายอดด้านออกจะเท่ากับสมการที่ (2.26) เมื่อ m_a อยู่ในย่านเชิงเส้น และแรงดันไฟฟ้ายอดด้านออกจะเท่ากับสมการที่ (2.27) เมื่อ m_a อยู่ในช่วงโอเวอร์มอดูเลชัน

โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะสวิตช์อยู่ระหว่าง $+V_d$ กับ $-V_d$ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ส่วนไซด์แบนฮาร์โมนิกจะเกิดขึ้นรอบๆ m_f , $2m_f$, $3m_f$, ... เช่น หากความถี่สวิตชิงเท่ากับ 20 kHz ไซด์แบนฮาร์โมนิกก็จะเกิดขึ้นที่ 20 kHz, 40 kHz และ 60 kHz เป็นต้น ดังเช่นที่ได้อธิบายในสมการที่ (2.21)



รูปที่ 2.13 การสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่ระบุว่าเป็นการสวิตช์แบบไบโพลาร์ คือ

1. มีการสวิตช์ของแรงดันระหว่างสาย v_o ระหว่างขั้วบัสบวกกับบัสลบ
2. ความถี่ของพัลส์ที่โหลดจะเท่ากับความถี่ของ v_{tri}
3. จะเกิดความถี่จากสเปคตราคือ เริ่มต้นที่รอบ ๆ f_s และจำนวนเท่าของ f_s

2.4.3.2 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

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

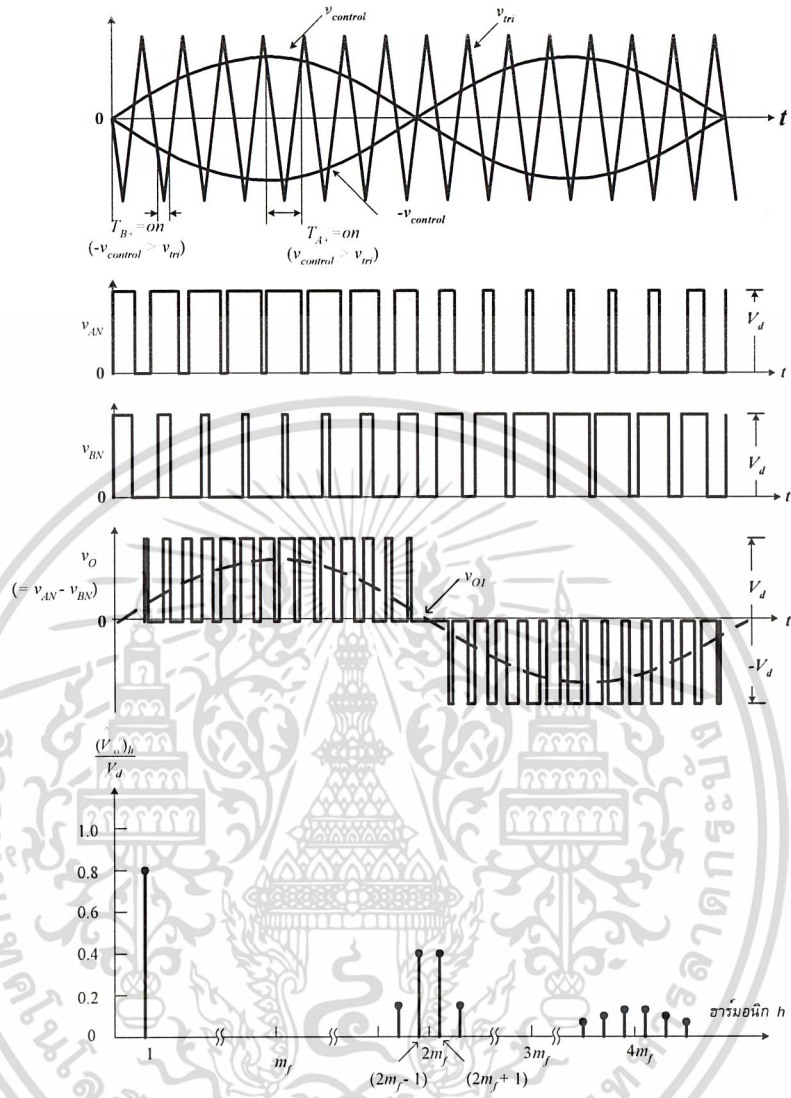
$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } v_{control} > v_{tri} : & \quad \text{สวิตช์ } T_{A+} \text{ จะนำกระแส } v_{AN} = V_d \\ \text{เมื่อ } v_{control} < v_{tri} : & \quad \text{สวิตช์ } T_{A-} \text{ จะนำกระแส } v_{AN} = 0 \\ \text{เมื่อ } -(v_{control}) > v_{tri} : & \quad \text{สวิตช์ } T_{B+} \text{ จะนำกระแส } v_{BN} = V_d \\ \text{เมื่อ } -(v_{control}) < v_{tri} : & \quad \text{สวิตช์ } T_{B-} \text{ จะนำกระแส } v_{BN} = 0 \end{aligned}$$

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

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขการสวิตช์แรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์

จากตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนสถานะของแรงดันระหว่างสาย (v_o หรือ v_{ab}) จะเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอยู่ระหว่างศูนย์ไปยังบวกหรือศูนย์ไปยังลบ จึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจากการสวิตช์สูงเช่น กรณีไบโพลาร์

จุดเด่นของยูนิโพลาร์คือการเกิดความถี่ด้านออกจะมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตช์ของแต่ละเฟสเช่น ความถี่สวิตช์ของอุปกรณ์เป็น 10 kHz หากเป็นการทำงานแบบยูนิโพลาร์ค่าแรงดันออกจะประกอบไปด้วยสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม ที่มีความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์มอนิกที่ 2 เท่าของแบบไบโพลาร์ที่ 20 kHz สอดคล้องกับสเปคตรารูปที่ 2.14 โดยเกิดความถี่ขึ้นรอบข้าง ผลของความถี่ที่โหลดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าทำให้การออกแบบวงจรองความถี่ เล็ก ง่ายและประหยัด



รูปที่ 2.14 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

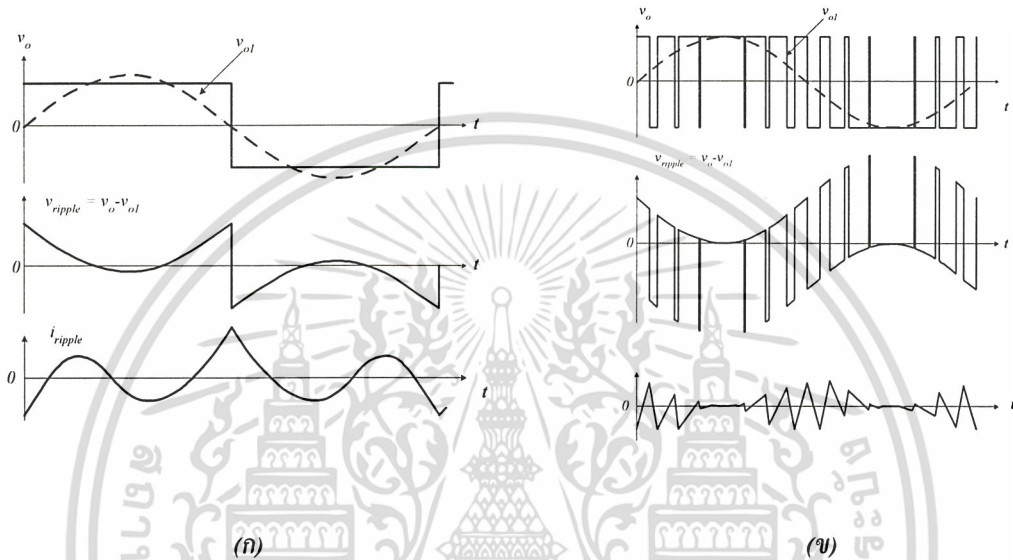
เงื่อนไขในการสร้างแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกตกคร่อมโหลด (v_o) แสดงในตารางที่

2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

รูปที่ 2.17 แสดงถึงตัวอย่างค่าแรงดันระลอกคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตซ์ซึ่งแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมกับแบบไบโพลาร์ โดยนิยามของค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าคือแรงดันไฟฟ้าด้านออกลบด้วยแรงดันไฟฟ้าด้านออกความถี่หลักมูล เช่นในรูปที่ 2.17 จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้าด้านออกของการสวิตซ์ซึ่งแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะมีค่ามากกว่าแบบไบโพลาร์ ซึ่งความต้องการในการออกแบบหรือประยุกต์ใช้งานต้องการค่าระลอกคลื่นที่ค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 2.15 ค่าแรงดันระลอกคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

(ก) การสวิตซ์ซึ่งแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (ข) การสวิตซ์ซึ่งแบบไบโพลาร์

2.4.6 การใช้ประโยชน์ของสวิตซ์ในอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

มีการใช้สวิตซ์ในอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่มีโหมดการทำงานหลายชนิด จึงได้เปรียบเทียบการทำงานของอินเวอร์เตอร์แต่ละแบบโดยสมมติให้วงจรเป็นแบบอุดมคติ และกระแสไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ เมื่ออัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตซ์หาได้จากกำลังไฟฟ้าที่ได้ต่อพิกัดของสวิตซ์ โดยแรงดันไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปผลคูณของค่ายอดของแรงดันและกระแสไฟฟ้า

$$SUR = \frac{V_{01} I_{o,max}}{q V_T I_T} \tag{2.28}$$

เมื่อ SUR มาจากคำว่า Switch Utilization Ratio คืออัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตซ์
 $MSUR$: Maximum Switch Utilization Ratio คืออัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตซ์สูงสุด
 V_T และ I_T คือค่าพิกัดของสวิตซ์ในรูปแรงดันไฟฟ้ายอดและกระแสไฟฟ้ายอดตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $V_{o1}I_{o,max}$ คือค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดัน-กระแสไฟฟ้าด้านออกที่ความถี่หลักมูล
- $V_{d,max}$ คือค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ที่ใช้กำหนดพิกัดแรงดันของสวิตช์
- q คือจำนวนสวิตช์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์

ตารางเปรียบเทียบอัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์แบบต่างๆ ที่สวิตช์ซึ่งแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.2

อินเวอร์เตอร์	V_T	I_T	$V_{o1,max}$	q	$MSUR$
ฮาร์ฟบริดจ์	$V_{d,max}$	$\sqrt{2}I_{o,max}$	$\frac{4}{\pi\sqrt{2}} \frac{V_{d,max}}{2}$	2	$\frac{1}{2\pi} = 0.16$
ฟูลบริดจ์	$V_{d,max}$	$\sqrt{2}I_{o,max}$	$\frac{4}{\pi\sqrt{2}} \frac{V_{d,max}}{2}$	4	$\frac{1}{2\pi} = 0.16$

ตารางที่ 2.2 อัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์

ในทางปฏิบัติค่าอัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตช์สูงสุดจะมีค่าน้อยกว่า 0.16 ทั้งนี้เพราะต้องออกแบบให้มีค่าความปลอดภัยโดยให้ทำงานไม่ถึงค่าสูงสุดและพิกัดกระแสไฟฟ้าของสวิตช์

สำหรับในกรณีที่ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏด้านออก (volt-amperes) จะมีค่าต่ำกว่าพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทางด้านออกมาก สำหรับการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มกรณีมอดูลเตตเชิงเส้น จะมีค่าน้อยกว่าแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมด้วยตัวประกอบ $(\pi/4)m_a$

$$MSUR_{PWM} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\pi}{4} m_a = \frac{1}{8} m_a \quad (2.29)$$

เมื่อ $m_a \leq 1.0$

ดังนั้นจะเห็นว่า ค่าอัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตช์สูงสุดของการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มกรณีมอดูลเตตเชิงเส้น จะเท่ากับ 0.125 เมื่อ $m_a = 1.0$ และมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราการใช้ประโยชน์ของสวิตช์สูงสุดแบบที่รูปคลื่นเป็นสี่เหลี่ยมซึ่งเท่ากับ 0.1

2.4.7 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์

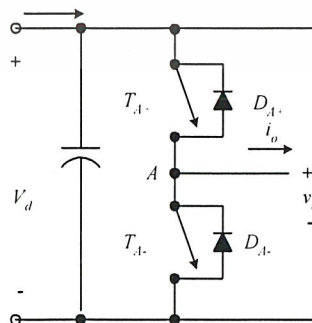
ในทางปฏิบัติ กิ่งใดๆของอินเวอร์เตอร์ สวิตช์ตัวบนและตัวล่างต้องไม่นำกระแสพร้อมกัน ดังนั้นจึงต้องการช่วงเวลาที่ยกสวิตช์ทั้งคู่หยุดนำกระแสก่อนที่สวิตช์จะเปลี่ยนสถานะ เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่าง บัสบวกกับบัสลบ ช่วงเวลานี้จะเรียกว่า เดดไทม์ (dead time หรือ blanking time) ซึ่งเวลาเดดไทม์ดังกล่าวจะต้องมีความเหมาะสม คือหากมีค่าน้อยเกินไปอาจทำให้มีโอกาสลัดวงจรได้ง่าย หรือถ้าหากมีค่ามากเกินไปก็อาจทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไป

สวิตช์ที่มีความเร็วในการเปลี่ยนสถานะคือมีช่วงเวลาดำเนินการนำกระแส และเริ่มหยุดนำกระแสสั้นๆ (เป็นหลักสิบของนาโนวินาที) เช่นสวิตช์ที่เป็นมอสเฟตจะมีค่าเดดไทม์น้อยๆ เช่น 1-2 ไมโครวินาที ส่วนสวิตช์ที่เป็นไทรสเตอร์มักจะต้องการค่าเดดไทม์ที่มากกว่าทั้งนี้เพราะช่วงเวลาดำเนินการนำกระแส และเริ่มหยุดนำกระแส ที่มากกว่า ดังนั้นเดดไทม์จะขึ้นอยู่กับชนิดของสวิตช์สารกึ่งตัวนำที่เลือกใช้

ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.16 โดยรูปที่ 2.16 (ก) เป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์หนึ่งกิ่งและ รูปที่ 2.16 (ข) เป็นแรงดันควบคุมเกตในอุดมคติ รูปที่ 2.16 (ค) คือแรงดันควบคุมเกตของสวิตช์ที่ได้ชดเชยผลของเดดไทม์แล้ว โดยมีหลักการง่ายๆ คือ ทุกๆช่วงของแรงดันควบคุมเกตให้คงที่ และทุกๆขาขึ้นให้หน่วงเวลาไปเท่ากับเดดไทม์ เพื่อไม่ให้สวิตช์ในกิ่งเดียวกันทำงานพร้อมกัน แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาเดดไทม์จะขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไหลลด กล่าวคือ

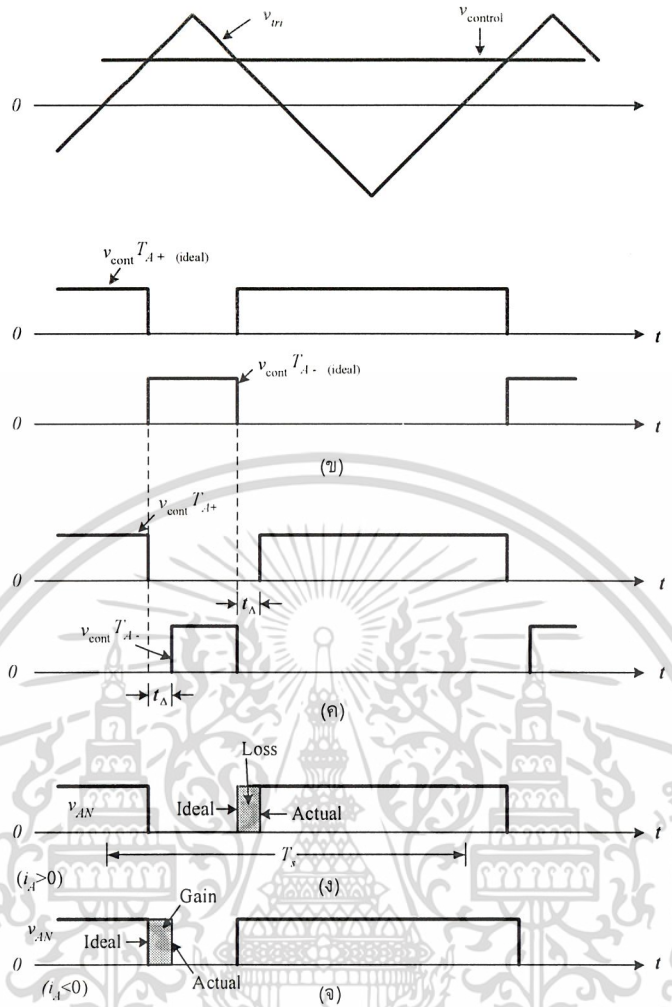
เมื่อกระแสไหลลดไฟฟ้าที่ไหลลเป็นบวก (i_A) มีทิศทางไหลออกจากจุด A ในรูปที่ 2.16 (ง) หากไหลลเป็นไหลลความเหนี่ยวนำและตัวต้านทานร่วมกัน เมื่อ $i_A > 0$ ช่วงเวลาเดดไทม์ของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าลดลงเพราะไดโอด D_{A-} จะนำกระแส ทำให้ v_{AN} ลดลงเป็นศูนย์เฉพาะในช่วงเวลาเดดไทม์ ทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ยของ v_{AN} ลดลง

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลลเป็นลบ (i_A) มีทิศทางไหลเข้าจุด A ในรูปที่ 2.16 (จ) เมื่อ $i_A < 0$ ช่วงเวลาเดดไทม์แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะไดโอด D_{A+} จะนำกระแส ทำให้ v_{AN} มีค่าเป็น $+v_d$ เฉพาะในช่วงเวลาเดดไทม์ ทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ยของ v_{AN} มีค่าเพิ่มขึ้น



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์

ค่าแรงดันผิดเพี้ยนจะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติลบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง เช่นที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.17 และมีค่าดังสมการที่ (2.30) และ (2.31) สรุปได้ว่าเดดไทม์มากมีผลให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไปด้วย

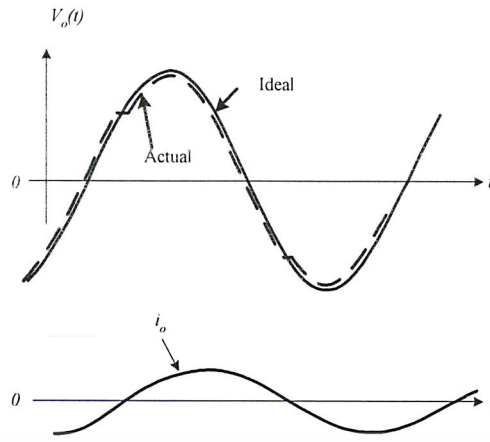
$$v_e = (v_{Ao})_{ideal} - (v_{Ao})_{actual} \tag{2.30}$$

$$v_e = \pm \frac{2 \cdot (\text{deadtime})}{T_s} \cdot V_d \tag{2.31}$$

ข้อดีของเดดไทม์คือการทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบ แต่หากมีค่าเดดไทม์มากเกินไป ก็จะมีผลต่อรูปคลื่นสัญญาณทางด้านออก โดยขึ้นอยู่กับทิศทางกระแสไหลของกระแสไหล

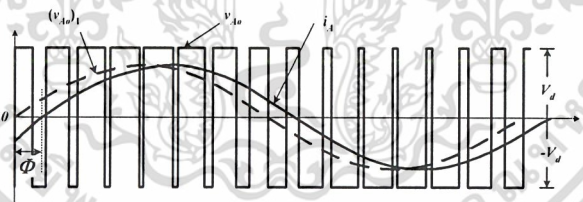
จึงสรุปข้อเสียของเดดไทม์คือการเกิดฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่รอบข้างความถี่สวิตชิ่งและเกิดความถี่ที่ฮาร์มอนิกลำดับต่ำๆ อันจะเป็นผลเสียต่อสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

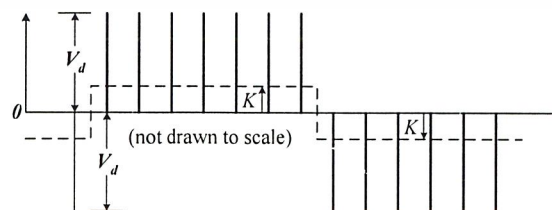


รูปที่ 2.17 ผลของเดคไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกรูปไซน์

เมื่อรูปคลื่นไซน์ในอุดมคติจะเป็นเส้นทึบและรูปคลื่นไซน์ในทางปฏิบัติจะเป็นเส้นประ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาที่กระแสเป็นบวกดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) รูปคลื่นไซน์เส้นประจะลดลงจากเส้นทึบ ในขณะที่ช่วงเวลาที่กระแสเป็นลบ รูปคลื่นไซน์เส้นประจะมากกว่าเส้นทึบ เปรียบเหมือนการนำค่าเฉลี่ยรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมาลบออกจากรูปคลื่นในอุดมคติเมื่อกระแสเป็นบวก และเหมือนการนำค่าเฉลี่ยรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมาบวกเพิ่มเข้าไปในรูปคลื่นในอุดมคติเมื่อกระแสเป็นลบ ค่าแรงดันไฟฟ้าผิดเพี้ยนจะเท่ากับแรงดันในอุดมคติลบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงเช่นที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.18 (ข)



(ก)



(ข)

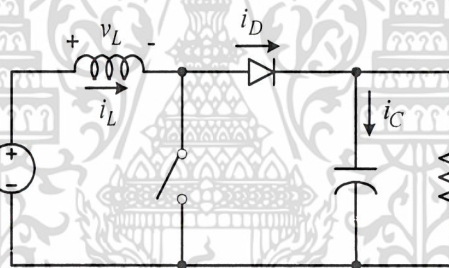
รูปที่ 2.18 ค่าแรงดันผิดเพี้ยนเฉลี่ยจากผลของเดคไทม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 หลักการของบวสต์คอนเวอร์เตอร์

วงจรทระดับแรงดันหรือวงจบบวสต์คอนเวอร์เตอร์ คือวงจรที่ทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ที่เรียกวจบบวสต์คอนเวอร์เตอร์ ก็เพราะแรงดันไฟฟ้าด้านออกสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้านั่นเอง การวิเคราะห์การทำงานของวงจบบวสต์คอนเวอร์เตอร์ในช่วงสภาวะอยู่ตัว จะมีการกำหนดเงื่อนไขในการทำงานของวงจบบวสต์คอนเวอร์เตอร์เช่นเดียวกับวงจบบั๊กคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบจะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ
2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลาในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์
3. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ทำให้แรงดันด้านออกมาคงที่
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็นหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์



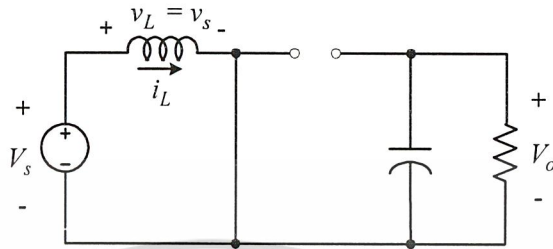
รูปที่ 2.19 วงจบบวสต์คอนเวอร์เตอร์

2.5.1 หลักการทำงานของวงจบบวสต์คอนเวอร์เตอร์

หลักการทำงานของวงจบบวสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามต้องการ จะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเลาจะเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยการวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัวดังนี้

2.5.1.1 ขณะสวิตช์นำกระแส

จากรูปที่ 2.19 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20 จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

$$-V_s + v_L = 0 \quad (2.32)$$

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.33)$$

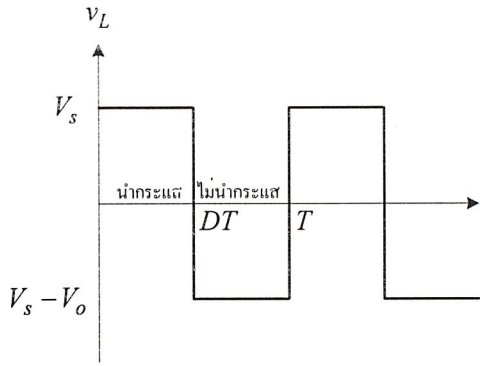
$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L}$$

ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่ อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

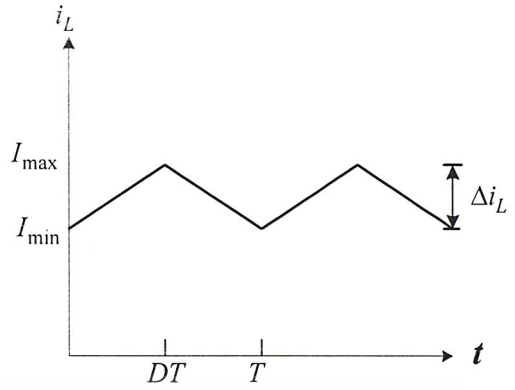
$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad (2.34)$$

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.35)$$

$\Delta i_{L,on}$ หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส



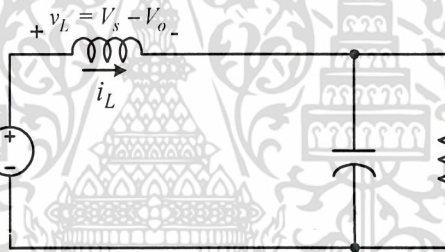
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.21 (ก) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (ข) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

2.5.1.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมติแรงดันไฟฟ้าที่ด้านออกมีค่าคงที่ กฎของเคอร์ชอฟจะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$-V_s + v_L + V_o = 0 \tag{2.36}$$

$$v_L = V_s - V_o$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \tag{2.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส $dt = (1-D)T$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และจะถือว่าการลดลงของกระแสเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 2.21 (ข) ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.38)$$

ที่สภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์จากสมการที่(2.35)และสมการที่(2.38) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.39)$$

$$\left(\frac{V_s}{L} \right) DT + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.40)$$

$$V_s D + (V_s - V_o)(1-D) = 0$$

$$V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0$$

$$V_s - V_o(1-D) = 0$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.41)$$

จากการหาความสัมพันธ์ ของอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าที่เรียกว่า อัตราการขยายแรงดัน สามารถหาได้โดยวิธีการง่ายๆ โดยใช้สมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบซึ่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และได้ผงเช่นเดียวกับสมการที่ (2.41) ดังนี้

$$V_{L,av} = v_{L,on}(t_{on}) + v_{L,off}(t_{off}) = 0 \quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.33)

$$v_{L,on} = V_s$$

และจากสมการที่ (2.37)

$$v_{L,off} = V_s - V_o$$

$$V_{L,av} = (V_s)(t_{on}) + (V_s - V_o)(t_{off}) = 0$$

$$(V_s)(DT) + (V_s - V_o)(1-D)T = 0$$

$$VD + (V - V)(1-D) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0$$

$$V_s - V_o(1 - D) = 0$$

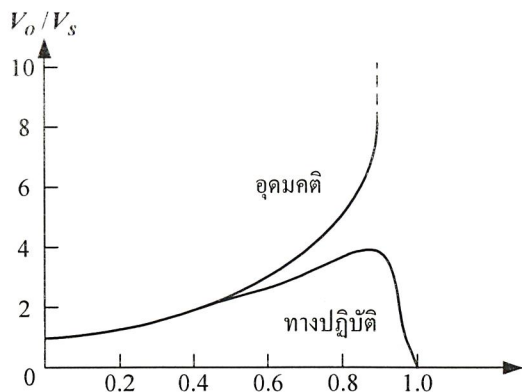
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.43)$$

การได้มาซึ่งสมการอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า จากสมการที่ (2.41) หรือ (2.43) แท้จริงแล้วมีหลักการเดียวกัน ทำให้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าได้จากการปรับค่า D ดังแสดงในตารางที่ 2.3

Duty ratio (D)	อัตราขยายแรงดัน (Voltage gain) (V_o/V_s)
0.0	1.00
0.1	1.10
0.2	1.25
0.3	1.43
0.4	1.67
0.5	2.00
0.6	2.50
0.7	3.33
0.8	5
0.9	10
1.0	Infinity

ตารางที่ 2.3 อัตราขยายแรงดันของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า D

จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.23 เมื่อค่า D เพิ่มขึ้นค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในทางปฏิบัตินิยมปรับอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 4 เท่า ทั้งนี้เพื่อให้วงจรมีความเสถียรภาพ โดยอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำที่สุดคือหนึ่งหรือแรงดันไฟฟ้าด้านออกเท่ากับกับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าตามทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเล็กน้อย เนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมไดโอด และตัวอุปกรณ์สวิตช์



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับ D

2.5.2 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

สมมติการสูญเสียภายในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ กำลังไฟฟ้าที่จากแหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ เงื่อนไขนี้ จะได้

$$P_s = P_o = \frac{V_o^2}{R} \tag{2.44}$$

$$P_s = V_s I_s = V_s I_L \tag{2.45}$$

$$V_s I_L = \frac{V_o^2}{R}$$

$$V_o = \frac{V_s}{1-D}$$

$$V_s I_L = \frac{\left(\frac{V_s^2}{1-D}\right)^2}{R}$$

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} \tag{2.46}$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุด หาได้จากค่าเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส ดังในสมการที่ (2.35)

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_s DT}{L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุดคือ

$$I_{L,max} = i_L + \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$I_{L,max} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{1}{2} \left(\frac{V_s DT}{L} \right) \quad (2.47)$$

$$I_{L,min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s DT}{L} \right) \quad (2.48)$$

สมมติให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและมีค่าเป็นบวก ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่ทำให้วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ทำงานได้ในขอบเขตระหว่างโหมคกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ได้จากการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ดังสมการที่ (2.49)

$$I_{L,min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s DT}{L} \right) = 0 \quad (2.49)$$

$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_s DT}{L} \right)$$

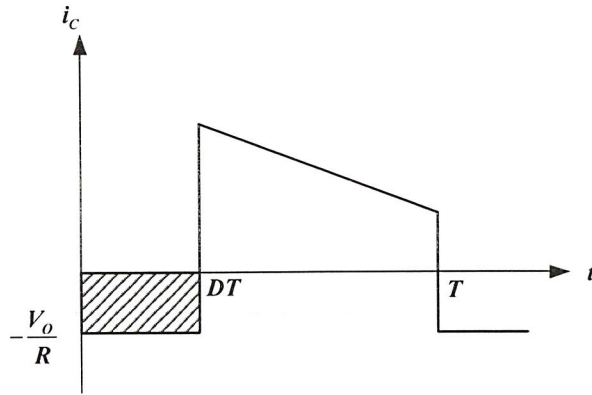
$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2.50)$$

การปรับค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด จากสมการที่ (2.50) สามารถทำได้โดยการปรับค่าที่ D หรือค่าความต้านทานโหลด R หรือความถี่สวิตซ์ f

2.5.3 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก

การที่มีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะสามารถรักษาให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มากๆ ได้เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสม และค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

การคำนวณหาค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากขอดถึงขอด สามารถหาได้จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (ก) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

$$|\Delta Q| = C\Delta V_o = I_o\Delta t_{on} \quad (2.51)$$

$$I_o = \frac{V_o}{R}$$

$$\Delta t_{on} = DT$$

$$\Delta V_o = \frac{I_o\Delta t_{on}}{C} = \frac{V_oDT}{RC}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT}{RC}$$

(2.52)

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf}$$

(2.53)

เมื่อต้องการจะลดอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะทำได้โดยการลดค่า D ให้เข้าใกล้ศูนย์ หรือการเพิ่มค่าโหลด หรือเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุหรือเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตช์ให้สูงขึ้น

2.6 อุปกรณ์สวิตชิง

อุปกรณ์สวิตชิงทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง กำลังได้รับการพัฒนาให้มีความเร็วในการสวิตชิงมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดการสูญเสียพลังงานขณะทำการสวิตชิง นอกจากนี้ยังออกแบบให้สามารถใช้นางมที่ ต้องการกำลังฟ้าสูงในการสวิตชิง โดยในบทนี้จะพูดถึงมอสเฟตกำลัง และไอจีบีที

2.6.1 มอสเฟตกำลัง (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)

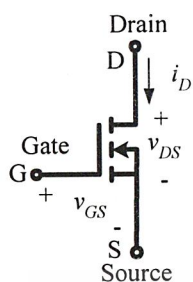
มอสเฟตกำลัง (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) ที่ใช้ในงานด้าน

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง กรณีที่เป็นมอสเฟตกำลังชนิดเอ็นชานเนล (N-channel) ในรูปที่ 2.25 (ก)-(ค) โดยจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

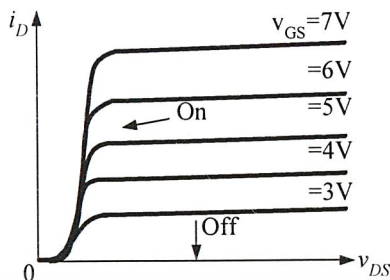
แสดงถึงสัญลักษณ์ของมอสเฟตกำลัง

คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัวและ

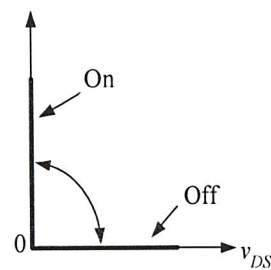
คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.25 มอสเฟตกำลัง (ก) สัญลักษณ์ (ข) คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (ค) คุณลักษณะในอุดมคติ

เมื่อต้องการให้มอสเฟตกำลังนำกระแสอย่างต่อเนื่อง จะต้องมีกร็อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างขาเกตกับขาซอส (V_{GS}) อย่างต่อเนื่องช่วงเวลาการสวิตช์ของมอสเฟตกำลังจะมีค่าอยู่ระหว่างหลักสิบของนาโนวินาทีถึงหลักร้อยนาโนวินาทีซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดพิกัดของมอสเฟตกำลัง

ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอส $R_{DS(on)}$ จะขึ้นอยู่กับพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้าหากแรงดันไฟฟ้าได้สูงก็ยิ่งทำให้ค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอสมีค่ามากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อกำลังสูญเสียจากการนำกระแส (conduction losses) เช่น มอสเฟตกำลังมีค่าพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้า 1,000 โวลต์ จะมีค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอส มากกว่ามอสเฟตกำลังมีค่าพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้า 200 โวลต์ ดังนั้นการสูญเสียจากการนำกระแสของมอสเฟตกำลังที่ทนได้ 1,000 โวลต์ จะมีกำลังสูญเสียที่เกิดจากการนำกระแสมากกว่าของมอสเฟตกำลังที่ทนแรงดันไฟฟ้าได้ 200 โวลต์

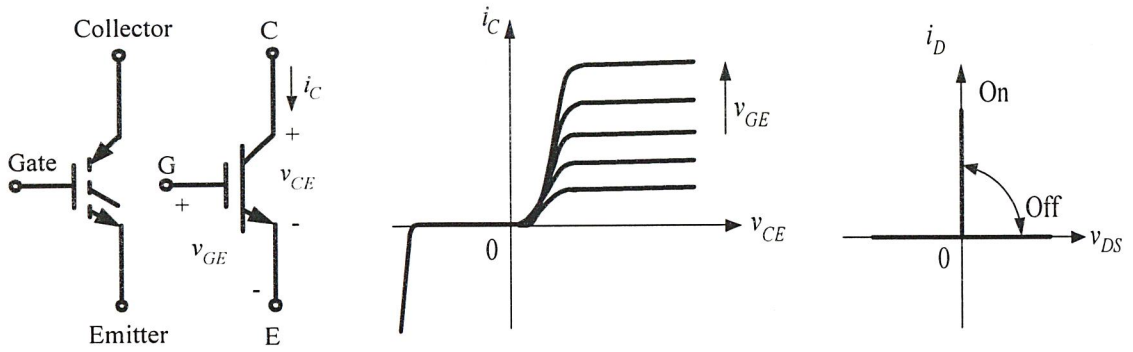
ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอสของมอสเฟตกำลังจะมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นบวก คือเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นความต้านทานก็จะมากขึ้น มอสเฟตกำลังจะสามารถนำมาต่อขนานกันได้ง่ายหากต้องการใช้งานที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ทั้งนี้มอสเฟตกำลังจะต้องมีคุณสมบัติต่าง ๆ เหมือนกันมากที่สุดจึงจะสามารถนำมาต่อขนานกันได้

ในปัจจุบันมีค่าพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 1,000 โวลต์ แต่มีพิกัดกระแสไฟฟ้าได้ไม่เกิน 100 แอมแปร์แต่จุดเด่นที่สุดของมอสเฟตกำลังคือการมีความถี่ของการสวิตช์มีค่ามากถึงหลักหลายกิโลเฮิร์ตซ์

2.6.2 ไอจีบีที (Isulated Gate Biopolar Transistors : IGBT)

ไอจีบีทีจัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถควบคุมให้นำกระแส และควบคุมให้หยุดนำกระแสได้โดยการควบคุมจากแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต ไอจีบีทีมีสัญลักษณ์และคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ไอจีบีที (ก) สัญลักษณ์ (ข) คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (ค) คุณลักษณะในอุดมคติ

ไอจีบีทีได้รวมข้อดีของมอสเฟตกำลัง ทรานซิสเตอร์ (บีเจที) และจีทีโอโรริสเตอร์มารวมอยู่ด้วยกันกล่าวคือ ไอจีบีทีจะมีค่าของอิมพีแดนซ์ขาเกตที่มีค่าสูงคล้ายมอสเฟตกำลัง ซึ่งต้องการพลังงานน้อยมากในการควบคุมการ สวิตช์ ควบคุมการนำและหยุดนำกระแสด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต รวมทั้งสามารถใช้งานการสวิตช์ซึ่งที่ความถี่สูง

ไอจีบีทีจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำกว่าทรานซิสเตอร์กำลังซึ่งมีค่า 2-3 โวลต์ สำหรับพิกัดแรงดันไฟฟ้า 1,000 โวลต์ นอกจากนั้น ไอจีบีทีจะออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้าด้านลบได้ คล้าย กับจีทีโอโรริสเตอร์

ไอจีบีทีจะมีช่วงเวลานำกระแสและหยุดนำกระแสมีค่าประมาณ 1 ไมโครวินาที มีขนาดพิกัดกระแส ไฟฟ้าถึง 2,000 แอมแปร์ และพิกัดแรงดันไฟฟ้าถึง 5,000 โวลต์

2.6.3 การเปรียบเทียบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

การเปรียบเทียบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถควบคุมการนำกระแสและหยุดนำกระแสได้ด้วยวงจร ควบคุม โดยคำนึงถึงขนาดพิกัดกำลังและความถี่ในการสวิตช์ซึ่ง ดังตารางที่ 2.4

อุปกรณ์	ความสามารถส่งผ่านกำลัง	ความเร็วในการสวิตช์	ความสามารถทนแรงดันไฟฟ้าด้านลบ	ชนิดการควบคุม
จีทีโอ	สูง	ต่ำ	ได้	กระแสไฟฟ้า
บีเจที	กลาง	กลาง	ไม่ได้	กระแสไฟฟ้า
ไอจีบีที	กลาง	กลางและค่อนข้างสูง	ได้	แรงดันไฟฟ้า
มอสเฟตกำลัง	ต่ำ	สูง	ไม่ได้	แรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบความสามารถของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นิยมใช้งาน

ในการเลือกใช้งานจีทีโอโรริสเตอร์เหมาะสมกับงานที่ต้องการพิกัดกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ ทนแรงดันไฟฟ้าด้านลบได้ ควบคุมการนำและหยุดนำกระแสโดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ขาเกตโดยการป้อนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าที่มีค่าเป็นบวกเพื่อนำกระแส และป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีค่าเป็นลบเพื่อให้จีโอโรริสเตอร์หยุดนำกระแส โดยที่ความถี่ในการสวิตช์ค่อนข้างต่ำ

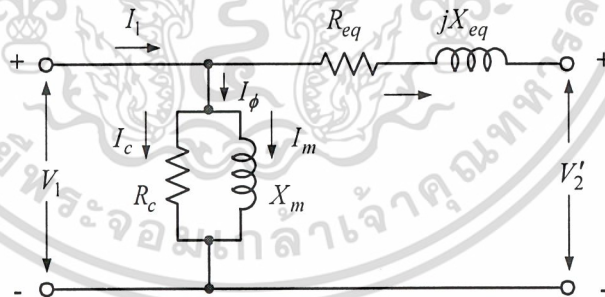
การเลือกใช้งานสำหรับทรานซิสเตอร์กำลังจะคล้ายกับจีโอโรริสเตอร์ ยกเว้นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุมให้ทรานซิสเตอร์กำลังหยุดนำกระแส สามารถทำให้ได้โดยการทำให้กระแสไฟฟ้าที่ขาเบสลดลงเป็นศูนย์ หรืออาจจะมีค่าเป็นลบเล็กน้อยและเมื่อต้องการให้ทรานซิสเตอร์บีเจทีนำกระแสและหยุดนำกระแสเป็นเวลาเท่าใด จะต้องควบคุมช่วงเวลาที่เกิดขึ้นเวลาเท่านั้น หากต้องการใช้งานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมค่อนข้างต่ำ ทรานซิสเตอร์กำลังจะเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ แต่เมื่อทำการสวิตช์จะไม่สามารถป้องกันแรงดันไฟฟ้าด้านลบได้

ไอจีบีทีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานหลากหลายที่คล้ายกับมอสเฟตกำลังแต่มีพิกัดกำลังที่ใหญ่กว่า และสามารถออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งด้านบวกและด้านลบ ไอจีบีทีจึงอาจเรียกได้ว่าเป็นอุปกรณ์ประเภทไม่จำเป็นต้องมีสแน็บเบอร์ (Snubberless) คือสามารถทนกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้มากจนอาจไม่ต้องการวงจรสแน็บเบอร์ ความเร็วในการสวิตช์ยังไม่เทียบเท่ามอสเฟตกำลัง

มอสเฟตกำลังคืออุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ความถี่สูงและไม่ต้องการกำลังสูง แต่ถ้าหากต้องการกำลังสูงขึ้นอาจออกแบบให้ใช้มอสเฟตกำลังมาต่อขนานกันเพื่อเพิ่มพิกัดกระแสไฟฟ้าในการออกแบบ มีข้อจำกัดคือมอสเฟตกำลังไม่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าด้านลบได้มากนัก

2.7 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าขณะที่ใช้งานอยู่จะเกิดการสูญเสียใน 2 ลักษณะคือ ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก P_c และค่าสูญเสียจากลวดทองแดง P_{cu}



รูปที่ 2.27 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแบบประมาณ

ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีการจ่ายภาระไฟฟ้า (no-load) จะเกิดการสูญเสียเฉพาะค่าสูญเสียในแกนเหล็กเท่านั้น เนื่องจากค่าสูญเสียจากลวดทองแดง $I_0^2 R_1$ จะมีค่าน้อยมากเพราะค่ากระแสกระตุ้นมีค่าต่ำ (ค่าไม่เกิน 5% ของกระแสพิกัด) และค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดด้านปฐมภูมิ R_1 มีค่าน้อย แต่ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายภาระไฟฟ้า (no-load) จะเกิดการสูญเสียทั้ง 2 ลักษณะกล่าวคือ ค่าสูญเสียในแกนเหล็กยังคงเกิดขึ้นเท่าเดิมเนื่องจากค่าสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กไม่มีการเปลี่ยนแปลงและค่าสูญเสียจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดทองแดงเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านขดลวดทางด้านปฐมภูมิ I_1 และด้านทุติยภูมิ I_2 จะทำให้เกิดค่าสูญเสียทางไฟฟ้าในรูปของความร้อนดังสมการ

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad , \quad P_{cu} = I_2^2 R_{eq} \quad (2.54)$$

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดกำลังไฟฟ้าจะสามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าสูญเสียต่างๆ ดังนี้

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{output}}{P_{input}} = \frac{P_{output}}{P_{output} + P_c + P_{cu}} = \frac{P_{input} - P_c - P_{cu}}{P_{input}} \quad (2.55)$$

จะเห็นได้ว่าขณะที่ไม่มีภาระไฟฟ้าค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อมีภาระไฟฟ้าค่าประสิทธิภาพนี้จะมีขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าให้ดีขึ้นสามารถกระทำได้โดยการลดค่าสูญเสียต่างๆ เช่นเลือกใช้สาร ferromagnetic ที่มีค่าสูญเสียในแกนเหล็กต่างๆ และออกแบบลวดตัวนำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งนี้เพราะค่า P_{cu} จะขึ้นอยู่กับค่ากระแสและค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด

2.8 ฮาร์โมนิกและตัวประกอบกำลัง

แรงดันอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการสวิตช์ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม ทำให้รูปคลื่นแรงดันอินเวอร์เตอร์ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์เนื่องจากมีฮาร์โมนิกปะปนมาด้วย ซึ่งเป็นผลทำให้รูปคลื่นกระแสระบบไฟฟ้าผิดเพี้ยนด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาฮาร์โมนิกและผลกระทบของฮาร์โมนิก

2.8.1 ฮาร์โมนิกและความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม

ฮาร์โมนิก (harmonics) หมายถึง ส่วนประกอบในรูปคลื่นไซน์ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล ตัวอย่างเช่น ส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่หลักมูลจะเรียกว่า ฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 (second harmonics) เป็นต้นดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่ารูปคลื่นของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปไซน์โดยสมบูรณ์ จะไม่มีฮาร์โมนิกรวมอยู่ด้วยในขณะที่รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนไปจากไซน์จะมีฮาร์โมนิกรวมอยู่ด้วยเสมอ การที่จะบอกว่ารูปคลื่นนั้นๆ ผิดเพี้ยนมากหรือน้อยไปจากรูปคลื่นไซน์จะต้องพิจารณาจากค่า ความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total-Harmonic Distortion : THD)

ความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion : THD) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสองของค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (rms) ของส่วนประกอบฮาร์โมนิก กับค่ากำลังสองเฉลี่ยของส่วนประกอบความถี่หลักมูล เทียบเป็นร้อยละดังแสดงในสมการที่ (2.61) และ (2.62) ค่า THD มีค่าน้อยจะหมายถึง สัญญาณฮาร์โมนิกรวมขนาดไม่มากปนกับความถี่หลักมูล

2.8.2 ค่าตัวประกอบกำลัง

ค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) มีนิยามคือ ค่าตัวประกอบกำลังจะเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยหารด้วยกำลังไฟฟ้าปรากฏหรือเขียนในรูปของสมการได้ดังสมการ (2.53)

$$PF = \frac{P_{avg}}{S} = \frac{P_{avg}}{V_{rms} I_{rms}} \quad (256)$$

โดย P_{avg} = กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย
 S = กำลังไฟฟ้าปรากฏ

ในทางปฏิบัติแล้วกระแสไฟฟ้าหรือโหลดทางไฟฟ้า จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบด้วยกันคือ แบบเชิงเส้น และแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งโหลดทั้งสองแบบนี้จะให้ค่าตัวประกอบกำลังที่แตกต่างกันในหัวข้อต่อไป เป็นการกล่าวถึงผลกระทบของโหลดทั้งสองแบบนี้ที่มีผลต่อค่าตัวประกอบกำลังตามลำดับ

2.8.3 ผลกระทบของฮาร์มอนิก

2.8.3.1 ผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังของโหลดแบบเชิงเส้น

เนื่องจากเป็นโหลดแบบเชิงเส้น ดังนั้นค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่โหลดจะเท่ากับ

$$v(t) = V_{P,I} \sin(\omega_o t + \delta_I) \quad (2.57)$$

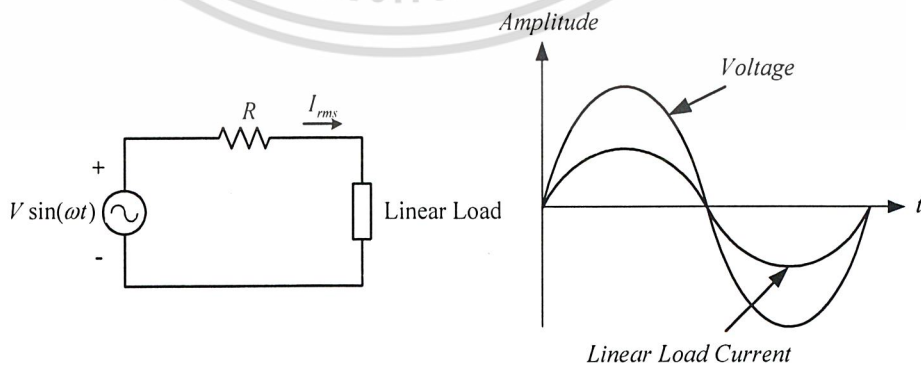
$$i(t) = I_{P,I} \sin(\omega_o t + \theta_I) \quad (2.58)$$

โดย $V_{P,I}$ = แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดสูงสุดที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์

$I_{P,I}$ = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดสูงสุดที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์

δ_I = ค่ามุมเฟสที่เปลี่ยนไปของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลด

θ_I = ค่ามุมเฟสที่เปลี่ยนไปของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด



รูปที่ 2.28 จำลองการทำงาน แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่โหลดแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าหาค่าตัวประกอบกำลังจากสมการ (2.59)

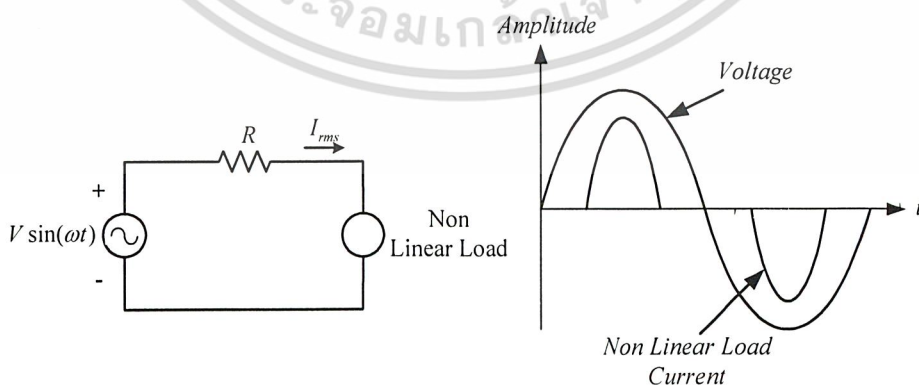
$$PF = PF_{disp} = \frac{P_{avg}}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{\frac{V_{p,l}}{\sqrt{2}} \frac{I_{p,l}}{\sqrt{2}} \cos(\delta_1 - \theta_1)}{\frac{V_{p,l}}{\sqrt{2}} \frac{I_{p,l}}{\sqrt{2}}} = \cos(\delta_1 - \theta_1) \quad (2.59)$$

โดย PF_{disp} = ค่าตัวประกอบกำลัง

ในกรณีโหลดที่เป็นเชิงเส้นค่าตัวประกอบกำลังจะหาได้จากค่า cosine ของมุมที่แตกต่างระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในสมการ (2.56) นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าในกรณีที่โหลดเป็นแบบเชิงเส้นในการแก้ค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นจะกระทั้งเข้าใกล้หนึ่งนั้นสามารถทำได้โดยการลดค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนให้เท่ากับศูนย์ในทำนองกลับกันถ้าค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบมีค่าสูงก็จะทำให้ระบบมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำนั่นเองดังนั้นโดยทั่วไปโหลดแบบรีแอกทีฟ จะถูกชดเชยด้วยการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนานเข้าไปในระบบซึ่งสำหรับกรณีโหลดแบบเชิงเส้นแล้วก็จะสามารถทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบสูงขึ้นได้

2.8.3.2 ผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังของโหลดแบบไม่เชิงเส้น

โหลดแบบไม่เชิงเส้น จะเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกโดยตรงและสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มด้วยกันคือ เกิดจากการอิมิตัวของอุปกรณ์ และเกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การเกิดฮาร์โมนิกจากการอิมิตัวของอุปกรณ์โดยมากจะเกิดจากการอิมิตัวของแกนเหล็ก ในหม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า และหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แบบแกนเหล็ก สาเหตุโดยส่วนใหญ่มักเกิดจากการที่ต้องการลดต้นทุนในการผลิต จึงนิยมที่จะออกแบบให้จุดทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้เลยจุดอิมิตัวของแกนเหล็กมาเล็กน้อย เป็นผลให้กระแสทำแม่เหล็กจะมีค่าสูงและมีฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ปนอยู่ด้วยมาก ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของเครื่องกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสเมื่อเกิดการอิมิตัวจะทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ที่มีขนาดประมาณ 30% ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล เป็นต้น



รูปที่ 2.29 จำลองการทำงาน แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่โหลดแบบไม่เชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ควบคุมไฟฟ้ากำลังด้วยการดึงกระแสไฟฟ้าเฉพาะเป็นบางช่วงของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ดึงโดยโหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์โดยสมบูรณ์ แต่จะมีลักษณะขาดเป็นช่วงๆ หรือแบนราบ ตัวอย่างของโหลดประเภทนี้ได้แก่แหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์พีคดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ เป็นต้น

ดังนั้นเมื่อพิจารณากรณีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะได้รูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไซน์โดยสมบูรณ์แต่จะมีฮาร์มอนิกปนอยู่ด้วย และฮาร์มอนิกที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเป็นอย่างมากจะได้แก่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 5 7 และเป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล 50 เฮิร์ตซ์ ไป จนกระทั่งถึงความถี่ในย่านที่หูคนได้ยิน อนุกรมฟูเรียร์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบฮาร์มอนิกในสภาวะอยู่ตัว ได้แสดงไว้ในสมการ (2.60) และ (2.61)

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h\omega_o t + \delta_h) \quad (2.60)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega_o t + \theta_h) \quad (2.61)$$

เขียนให้อยู่ในรูปของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยจะได้

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} \frac{V_h^2}{2}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h,rms}^2} \quad (2.62)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} \frac{I_h^2}{2}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{h,rms}^2} \quad (2.63)$$

ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสำหรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าสามารถนิยามได้ดังสมการ

$$THD_V(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h,rms}^2}}{V_{1,rms}} 100 \quad (2.64)$$

$$THD_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{h,rms}^2}}{I_{1,rms}} 100 \quad (2.65)$$

ในกรณีที่ไม่มีฮาร์มอนิกจะได้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมเท่ากับศูนย์ซึ่งจะหมายถึงรูปคลื่นดังกล่าวคือสัญญาณ ไซน์บริสุทธิ์ที่มีความถี่หลักมูลนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าตัวประกอบกำลัง จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ ดังนั้นค่าตัวประกอบกำลังสำหรับกรณีโหลดแบบไม่เชิงเส้นจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ

$$PF \leq PF_{dist} \leq \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \quad (2.66)$$

ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังสำหรับกรณีโหลดแบบไม่เชิงเส้นซึ่งจะมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำ นั้น จะไม่สามารถชดเชยได้ด้วยการต่อตัวเก็บประจุขนานเข้าไปในระบบ เพราะนั่นจะเป็นเพียงแค่การชดเชยค่าตัวประกอบกำลัง เท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้ว โหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยทั่วไปจะมีค่าตัวประกอบกำลังสูงแต่ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ ดังนั้นในการที่ทำการต่อตัวเก็บประจุขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังอีกนั้น กลับจะเป็นค่าเพิ่มปัญหาเรโซแนนซ์และเพิ่มค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้น ดังนั้นแนวทางในการแก้ปัญหาที่ถูกต้อง ควรที่จะทำการชดเชยโดยวงจรกรองแบบพาสซีฟหรือวงจรกรองแบบแอ็กทีฟ เพื่อเป็นตัวกำจัดค่าฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดแบบไม่เชิงเส้นดังกล่าว

2.8.3.3 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังหรือการไฟฟ้า

ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกต่อการไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้สองแบบด้วยกันคือ แบบระยะสั้นและแบบระยะยาว โดยแบบระยะสั้นผลกระทบจะสามารถเห็นได้ชัดและโดยมากมักจะอยู่ในรูปของ ความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ส่วนแบบระยะยาวจะตรวจสอบไม่ค่อยพบและมักจะอยู่ในรูปของความสูญเสียตัวต้านทานหรือแรงดันเกิน

ผลกระทบแบบระยะสั้นสามารถทำให้โหลดที่มีความไวสูงเกิดการทรिปีขึ้นได้เช่น โหลดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์จะไวต่อค่าความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าเป็นต้น

ในขณะที่ผลของฮาร์มอนิกจะทำให้ความเที่ยงตรงของเครื่องวัดไฟฟ้า ลดลงและนอกจากนั้นยังทำให้ฟิวส์ขาด และอาจจะทำให้ตัวเก็บประจุทำงานผิดพลาดเพราะแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกเกินที่ตัวเก็บประจุ ซึ่งค่าความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าประมาณ 5%-10% อาจมีผลทำให้ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสเพิ่มขึ้น 10%-50% และนอกจากนั้นยังอาจจะเกิดค่าแรงดันเกินที่ไดอิเล็กตริก (dielectric) ของตัวเก็บประจุอีกด้วย

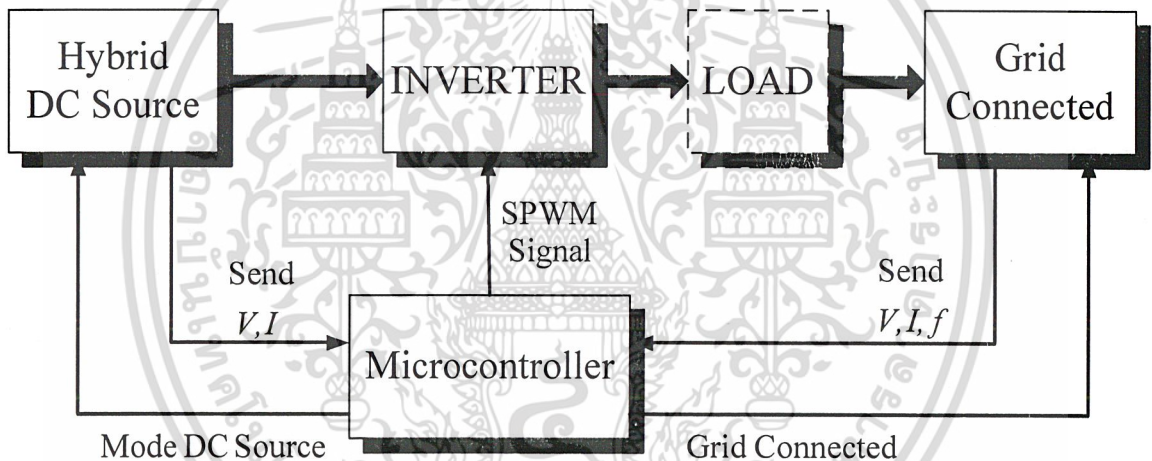
ฮาร์มอนิกยังอาจจะทำให้เกิดความร้อนเกิน (overheating) ที่หม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งจะพบบ่อยในกรณีที่หม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เชิงเส้นเป็นจำนวนมาก โดยที่ในกรณีดังกล่าวการคิดพิคคของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปจะนิยมคิดที่ค่าเท่ากับ 0.8 ของค่าที่พิคคของกำลังไฟฟ้าปรากฏ (kVA) และยังทำให้เกิดกระแสเกินที่สายนิวทรัล (neutral) อีกด้วย

บทที่ 3

การออกแบบสร้างอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า

3.1 บทนำ

จากคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์สำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้านั้น จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ วงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงแรงดันกระแสตรงเป็นกระแสสลับ และวงจรต่อกับระบบไฟฟ้า กล่าวคือในภาค อินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์จะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์หรือแบตเตอรี่ ใช้ไอจีบีที เป็นสวิตช์กำลังต่อแบบฟูลบริดจ์ ภาคเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยผ่าน วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านหม้อแปลงกำลังแบบขั้วแรงดันและมีตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวเชื่อมต่อกับระบบ ไฟฟ้า การเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าทำให้เกิดปัญหาในการออกแบบสร้างหลายประการ ในบทนี้จะนำเสนอ แนวทางการพัฒนาออกแบบสร้างและปัญหาอุปสรรคที่พบด้วย



รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อระบบไฟฟ้า

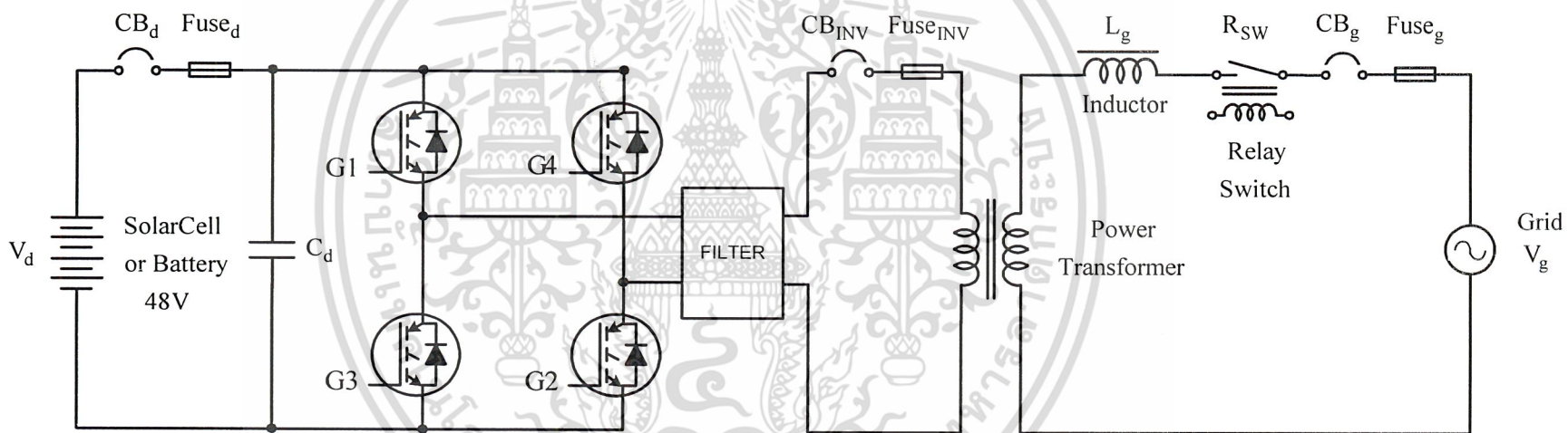
3.2 ส่วนประกอบวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรต่อกับระบบไฟฟ้า

วงจรอินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง V_d จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือ แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุ C_d วงจรอินเวอร์เตอร์ใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์กำลังต่อแบบฟูลบริดจ์เฟสเดียว ทางด้านเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ต่อกับวงจรระบบไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน หม้อแปลงกำลังแบบขั้วแรงดัน ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ให้สูงขึ้น เชื่อมต่อกับระบบ ไฟฟ้าโดยมีตัวเหนี่ยวนำ L_g เป็นตัวจำกัดกระแสของระบบไฟฟ้า สวิตช์ตัดต่อใช้ รีเลย์ อุปกรณ์ป้องกันการ ลัดวงจรด้านอินพุตและเอาต์พุต ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ (CB_d, CB_{INV}, CB_g) และฟิวส์

($Fuse_d, Fuse_{INV}, Fuse_g$) ส่วนประกอบของวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรต่อกับระบบไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรต่อกับระบบไฟฟ้า



3.3 ขนาดพิกัดอินเวอร์เตอร์

ส่วนนี้จะเป็นการออกแบบอินเวอร์เตอร์โดยเริ่มจากการคำนวณหาพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบหาขนาดของไอจีบีที, เซอร์คิตเบรกเกอร์ และฟิวส์ เป็นต้น

ต้องการออกแบบอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวต่อแบบฟูลบริดจ์ โดยวงจรมีการเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง (dc link) ขนาด 48V กำหนดค่ามอดูเลชัน $m_a = 0.8$ ความถี่สวิตซิ่ง 2 kHz การควบคุมด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มชนิด SPWM แบบไบโพลาร์และกำหนดให้สวิตช์ในอินเวอร์เตอร์เป็นแบบอุดมคติ จ่ายโหลดขนาด 300 วัตต์ กำหนดให้ อินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพ 80 เปอร์เซ็นต์ และค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.90

3.3.1 การหาขนาดพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์

เมื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง $V_d = 48V$ และค่ามอดูเลชัน $m_a = 0.8$ สามารถคำนวณหาค่าแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ได้ดังสมการที่ (2.26)

$$\hat{V}_{o1} = \hat{V}_{INV1} = m_a V_d \quad (3.1)$$

$$\hat{V}_{o1} = 0.8 \times 48 = 38.4V$$

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

เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ทำให้เกิดการ ทำงานในโหมดโอเวอร์มอดูเลชัน จะเกิดขึ้นเมื่อ $m_a > 1.0$ ดังนั้นเราสามารถหาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำสุดที่ไม่ทำให้เกิดเงื่อนไขการทำงานในโหมดโอเวอร์มอดูเลชันคือ

$$\hat{V}_{o1} = m_a V_d$$

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

เนื่องจากข้อเสียในกรณีการเกิดโอเวอร์มอดูเลชันก็คือทำให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับต่ำๆ ที่อยู่ใกล้กับฮาร์มอนิกอันดับที่หนึ่งหรือความถี่หลักมูล เช่นฮาร์มอนิกอันดับที่ 3,5,7 เป็นต้น ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดผลเสียมากหากนำไปใช้งาน

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.2)$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \times 100\% = \frac{300}{80\%} \times 100\% = 375W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบกำหนดค่า ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.90

$$p_m = V_{o1} \times i_{o1} \cos \phi \quad (3.3)$$

$$i_{o1} = \frac{p_m}{V_{o1} \times \cos \phi} = \frac{375}{27.153 \times 0.9} = 15.345A$$

$$\hat{i}_{o1} = \sqrt{2} \times i_{o1} = \sqrt{2} \times 15.345 = 21.7A$$

พิกัดแรงดันกระแสตรงของวงจรอินเวอร์เตอร์ กำหนดค่าไม่ต่ำกว่าค่ายอดคลื่นของด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงกำลัง กำลังแอกทีฟที่เอาต์พุต 300 วัตต์ ประสิทธิภาพประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ และตัวประกอบกำลัง 0.90 วงจรอินเวอร์เตอร์มีพิกัดต่างๆ โดยประมาณดังนี้ (V_d)

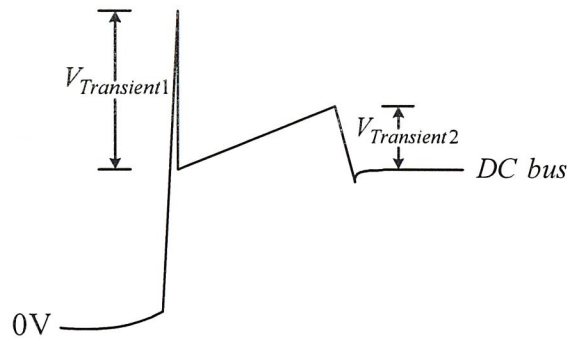
แรงดันอินพุต (V_d)	38-55	โวลต์ (เฉลี่ย)
กระแสอินพุต ($i_{d,max}$)	9.86	แอมแปร์ (เฉลี่ย)
กำลังปรากฏ (S_d)	375	วีเอ
แรงดันอินเวอร์เตอร์ (V_{o1})	27.153	โวลต์ (ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงกำลัง)
กระแสอินเวอร์เตอร์ (i_{o1})	15.345	แอมแปร์ (ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงกำลัง)

3.3.2 ขนาดพิกัดไอจีบีที

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ใช้ไอจีบีทีจำนวน 4 ตัว ต่อแบบฟูลบริดจ์เฟสเดียว เลือกพิกัดแรงดันไอจีบีทีที่ไม่ต่ำกว่าสองเท่าของแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์ คือ $2 \times 55 = 110$ โวลต์ และพิกัดกระแสไม่ต่ำกว่าสองเท่าของกระแสอินเวอร์เตอร์ $2 \times 21.7 = 43.4$ แอมแปร์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ไอจีบีทีเบอร์ IRG4PC50U ของบริษัท International Rectifier มีพิกัดแรงดัน 600 โวลต์ และพิกัดกระแส 55 แอมแปร์ รายละเอียดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ค.

3.3.3 ตัวเก็บประจุ C_d ที่บัสกระแสตรง

ในทางปฏิบัติไอจีบีที จะได้รับแรงดันชั่วขณะที่มีค่าสูงมาก ซึ่งเกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลา (di/dt) และค่าความเหนี่ยวนำที่บัสกระแสตรง (DC bus) ในขณะที่ไอจีบีที turn-off ถ้าไม่สามารถควบคุมแรงดันชั่วขณะให้ต่ำกว่าพิกัดแรงดันปิดกั้นของไอจีบีที ก็จะทำให้ ไอจีบีทีเสียหายได้



รูปที่ 3.3 รูปคลื่นแรงดันชั่วขณะตกรวมไอจีบีที

ในทางทฤษฎีเราสามารถคำนวณหาค่าแรงดันชั่วขณะครั้งที่ 1 ที่เกิดขึ้นที่บัสไฟฟ้ากระแสตรงได้ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4) แต่ในการหาค่า (L_d) นั้นไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นเราสามารถประมาณค่าของความเหนี่ยวนำ (L_d) ที่เกิดขึ้นได้

$$V_{TS1} = L_d \times di/dt \quad (3.4)$$

V_{TS1} = แรงดันชั่วขณะ (Transient voltage) ครั้งที่ 1

L_d = ความเหนี่ยวนำที่บัสกระแสตรง (Parasitic DC bus inductance)

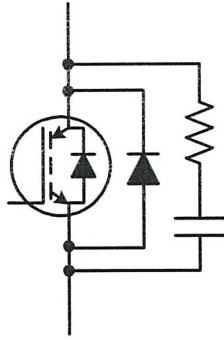
di/dt = อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลา

วิธีการลด (di/dt) ของไอจีบีที โดยการลดค่าความเหนี่ยวนำจากบัสกระแสตรง ซึ่งประกอบด้วย แบตเตอรี่หรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สายไฟฟ้า พิวส์ ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำภายในรวมกันเป็น L_d การลดค่า L_d ทำได้โดยต่อตัวเก็บประจุ C_d ที่บัสกระแสตรง โดยตัวเก็บประจุที่ใช้ต้องเป็นแบบที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำที่สุด จากการคำนวณดังสมการนั้นยังไม่สามารถแก้ปัญหาแรงดันชั่วขณะได้ ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบค่า C_d หลาย ๆ ค่ามาต่อเพื่อให้ได้ค่าแรงดันตกรวมชั่วขณะที่ต่ำที่สุด โดยในการออกแบบเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่า 10,000 μF พิกัดแรงดัน 100 โวลต์

3.3.4 วงจรสแน็บเบอร์สำหรับไอจีบีที

การประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลังต่อกับระบบไฟฟ้า ทำให้เกิดผลกระทบที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ เนื่องจากไอจีบีทีมีความถี่สวิตช์ 2 kHz ผลการทดสอบใช้งานไอจีบีทีพบว่าเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference : EMI) ไปยังความถี่มูลฐานของระบบไฟฟ้า ซึ่งทำให้ระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับสัญญาณรบกวนเป็นผลให้การทำงานผิดพลาด การลดสัญญาณรบกวนนี้ต้องต่อวงจรสแน็บเบอร์ให้กับไอจีบีทีแสดงในรูปที่ 3.3 วงจรสแน็บเบอร์จะลด (dv/dt) ของรูปคลื่นแรงดันที่สวิตช์ด้วยไอจีบีทีและรับการถ่ายเทพลังงานที่สะสมที่บัสกระแสตรงจากแรงดันชั่วขณะครั้งที่ 1 ผ่านวงจรสแน็บเบอร์เป็นแรงดันชั่วขณะครั้งที่ 2 ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจร snubber เบอร์ดักกับไอจีบีที

แต่จากการทดลอง สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference : EMI) ไปยังความถี่
 มูลฐานของระบบไฟฟ้าที่เกิดจากไมโครคอนโทรลเลอร์แทบจะไม่มีผลต่อแรงดันชั่วขณะเนื่องจากใช้ความถี่
 สวิตชิ่งที่ต่ำกว่าเล็กน้อย คือ 2 kHz ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องต่อ snubber ให้กับไอจีบีที และทั้งนี้ไอจีบีทียังมี
 พิกัดทนแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 600 โวลต์ จึงสามารถป้องกันแรงดันชั่วขณะได้ในระดับหนึ่ง

3.4 ขนาดพิกัดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง

เนื่องจากโครงงานนี้เป็นระบบที่สามารถเลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้จากสองแหล่งจ่ายคือ
 เซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทั้งสองแหล่งจ่ายให้
 สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอินเวอร์เตอร์ได้

3.4.1 พิกัดของแบตเตอรี่

การเลือกขนาดแบตเตอรี่ เลือกใช้แบบ Sealed Lead-Acid เนื่องจากมีขนาดเล็กกะทัดรัดและไม่ต้อง
 มีการบำรุงรักษามากนัก เช่นไม่ต้องเติมน้ำกลั่นเป็นต้น แต่มีข้อเสียคือมีอายุการใช้งานที่น้อยกว่าแบตเตอรี่
 แบบต้องเติมน้ำกลั่น โดยสามารถคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

ระยะเวลาที่จ่ายให้กับระบบไฟฟ้า	1	ชั่วโมง
กำลังของโหลดสูงสุด (P_d) =	300	วัตต์
ใช้แบตเตอรี่ระบบแรงดัน (V_d) =	48	โวลต์
ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ (η) =	80	เปอร์เซ็นต์

$$\text{กระแสที่จ่ายโหลด } i_d = \left(\frac{P_d}{V_d} \right) \times \left(\frac{100\%}{\eta} \right) = \left(\frac{300}{48} \right) \times \left(\frac{100\%}{80\%} \right) = 7.8125 \text{ A}$$

ดังนั้นขนาดความจุแบตเตอรี่	7.8	แอมแปร์-ชั่วโมง
----------------------------	-----	-----------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความจุของแบตเตอรี่ไม่คงที่ตลอดอายุการใช้งานดังนั้นจึงจำเป็นต้องคิดการสำรองกำลังงานของแบตเตอรี่ไว้ 25 เปอร์เซ็นต์ (IEEE 1884-1994) เพื่อรักษาเสถียรภาพของค่าความจุของแบตเตอรี่ไว้ในส่วนของการจ่ายกำลังงานให้กับวงจรควบคุมการสำรองกำลังงานจะถูกตั้งไว้ 10 เปอร์เซ็นต์สำหรับการเพิ่มขึ้นในส่วนที่ไม่ได้ถูกคาดหมายไว้ในระบบการทำงานของวงจร เพื่อชดเชยในกรณีที่ตัวแปรที่มีอยู่ในการทำงานต่ำลงหรือเปลี่ยนแปลงไปจากส่วนที่ได้คาดหมายไว้ และสำหรับการจ่ายกำลังงานซ้ำหลังจากระบบจ่ายกำลังงานถึงจุดแรงดันต่ำสุด (end voltage)(IEEE std 485-1983) และเพื่อชดเชยอุณหภูมิในการใช้งานของแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนไปจากการคำนวณ (25 องศาเซลเซียส) ดังนั้นค่าเผื่อไว้สำหรับการสำรองกำลังของทั้งสองส่วนนี้จึงคิดที่ 35 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นค่าที่เผื่อไว้สำหรับการสูญเสีย $Factor\ loss = 35$ เปอร์เซ็นต์
 เพราะฉะนั้นความจุของแบตเตอรี่ที่ใช้งาน $7.8 \times 1.35 = 10.53A$
 ดังนั้นเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 12AH จำนวน 4 ลูกต่ออนุกรมกัน

3.4.2 พิกัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในโครงการนี้ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 60 วัตต์ มีพิกัดแรงดัน 15 โวลต์ จ่ายกระแสสูงสุด 4 แอมแปร์ จำนวน 1 แผง แต่เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาสูงจึงไม่สามารถจัดหาได้ทั้งหมด ดังนั้นในโครงการนี้จึงใช้แบตเตอรี่ เป็นแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์



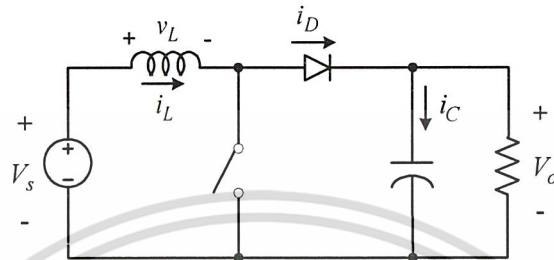
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 พิกัดวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

ในโครงการนี้นำเสนอการออกแบบวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สูงขึ้น เช่นในกรณีที่ใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีระดับแรงดันต่ำกว่า 48 โวลต์ โดยกำหนดค่าดังนี้

ออกแบบวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ 1 เฟส พิกัดกำลัง 60 วัตต์ เพิ่มแรงดันจาก 15 โวลต์ ขึ้นเป็น 48 โวลต์ โดยทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ความถี่ที่ความถี่ 50 kHz แรงดันระลอกไม่เกิน 0.01 เฟอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.6 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (3.5)$$

$$\frac{48}{15} = \frac{1}{1-D}$$

$$1-D = \frac{15}{48}$$

$$D = 1 - \left(\frac{15}{48}\right) = 0.6875$$

ดังนั้นออกแบบค่าตัวชี้ไซเคิลที่ 68.75 เฟอร์เซ็นต์ กำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้า 60 วัตต์ กำหนดหาค่าความต้านทาน เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad (3.6)$$

$$R = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{48^2}{60} = 38.4\Omega$$

หาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{min} = \frac{0.6875 \times (1 - 0.6875)^2 \times 38.4}{2 \times 50 \times 10^3} = 25.78 \mu\text{H}$$

ในการออกแบบเลือกค่า L_{min} ให้มีค่ามากกว่า ค่าที่คำนวณได้ $25.78 \mu\text{H}$ ดังนั้นจึงเลือกค่า L_{min} เท่า $100 \mu\text{H}$ เพื่อเป็นการเผื่อกรณีกระแสเกินพิกัด โดยในการออกแบบค่า L_{min} จะพูดถึงวิธีการออกแบบและคำนวณในส่วนต่อไป

การออกแบบหาตัวเก็บประจุที่ทำให้อัตราระลอกคลื่นเท่ากับ 0.01 เปอร์เซนต์

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (3.8)$$

$$C = \frac{D}{Rf \frac{\Delta V_o}{V_o}} = \frac{0.6875}{38.4 \times 50 \times 10^3 \times 0.01} = 35.8 \mu\text{F}$$

จากการคำนวณได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ $35.8 \mu\text{F}$ แต่ในทางปฏิบัติจะเลือกใช้ตัวเก็บประจุ $1000 \mu\text{F}$ ทั้งนี้เพื่อให้ค่าระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าเรียบมากขึ้น

การคำนวณหาจำนวนรอบการพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ

เลือกแกนชนิดผง โลหะอัด (Powder Core) แกนทอรอยด์ เบอร์ T130-26 ต้องการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ $100 \mu\text{H}$ โดยข้อมูลจาก Data Sheet ค่าแฟคเตอร์ในการคำนวณ $A_L = 78.5 \text{ nH}/N^2$

$$N^2 = \frac{L_{design}}{A_L} \quad (3.9)$$

$$N = \sqrt{\frac{L_{design}}{A_L}} = \sqrt{\frac{100000}{78.5}} = 35.69 \cong 36 \text{ รอบ}$$

คำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ โดยกำหนดค่า $J = 5 \text{ A}/\text{mm}^2$, $i = 4 \text{ A}$

$$a = \frac{i}{J} = \frac{4}{5} = 0.8 \text{ mm}^2$$

ดังนั้นเลือกขดลวด SWG เบอร์ 19 มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.082 mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ขนาดพิกัดหม้อแปลงกำลัง

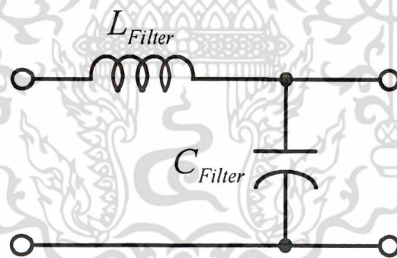
กำลังเอาต์พุตที่ได้กำหนดไว้คือ 300 วัตต์ ประมาณขนาดกำลังของหม้อแปลงกำลังสำหรับการทดสอบไว้ที่ 500 วีเอ แต่เนื่องจากการทดสอบพบว่ากระแสและกำลังไฟฟ้ามีโอกาสเกินพิกัดอยู่เสมอ จึงใช้ขนาดหม้อแปลงกำลัง 700 วีเอ

ขนาดหม้อแปลงกำลัง

พิกัดกำลังไฟฟ้า	700	วีเอ
พิกัดด้านแรงดันสูง (V_1)	220	โวลต์ 3.2 แอมแปร์
พิกัดด้านแรงดันต่ำ (V_2)	27.0	โวลต์ 26.0 แอมแปร์

3.6 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

การเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เพื่อใช้ในวงจรกรองสัญญาณมีความจำเป็นมาก ทั้งนี้เนื่องจากค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่เหมาะสม จะทำให้แรงดันที่ออกมาจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมีค่าฮาร์มอนิกไม่สูงจนเกินไป ซึ่งถ้าหากใช้ค่าที่ไม่เหมาะสมแล้วจะทำให้เกิดโอเวอร์ชูทหรือแรงดันค่าสูง อาจจะทำให้วงจรเกิดความเสียหายได้ และนอกจากนี้จะทำให้เกิดปัญหาในส่วนของกรควบคุมแรงดันอีกด้วย วงจรกรองสัญญาณจะรับแรงดันที่มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณสี่เหลี่ยม จากนั้นจะผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) ตัว จากนั้นก็จะนำมาผ่านตัวเก็บประจุ (C) ดังวงจรสมมูลข้างล่างสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจะเป็นสัญญาณไซน์ ซึ่งมีความถี่เท่ากับ ความถี่มูลฐาน



รูปที่ 3.7 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

สัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้มาจากการขับไอจีบีทีจะถูกกรองโดยอาศัยหลักการของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้เฉพาะความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) โดยกำหนดให้ความถี่ต่ำผ่านเท่ากับความถี่คัทออฟ (f_c) สัญญาณที่มีความถี่มากกว่าความถี่คัทออฟ จะไม่สามารถผ่านได้ ส่วนที่เป็นความถี่หลักมูล (Fundamental) หรือต่ำกว่าความถี่คัทออฟก็จะผ่านไปได้ เราจึงควรเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่สอดคล้องกับความถี่คัทออฟ ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังต่อไปนี้

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้กับสัญญาณไฟกระแสสลับค่อนข้างจะหาได้ยากจึงกำหนดค่าจะจกลงไป ส่วนค่าของตัวเหนี่ยวนำเราสามารถหาค่าได้ตามค่าที่เราต้องการ กำหนดค่าในการคำนวณดังนี้

$$C = 220 \mu\text{F}, f_C = 400 \text{ kHz}$$

$$L = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f_C}\right)^2}{C} = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \times 400}\right)^2}{220 \times 10^3} = 720 \mu\text{H}$$

การคำนวณหาจำนวนรอบการพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ

เลือกแกนชนิดผงโลหะอัด (Powder Core) แกนทอรอยด์ เบอร์ T300-26 ต้องการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ $720 \mu\text{H}$ โดยข้อมูลจาก Data Sheet ค่าแฟกเตอร์ในการคูณ $A_L = 80 \text{ nH/N}^2$

$$N^2 = \frac{L_{\text{design}}}{A_L}$$

$$N = \sqrt{\frac{L_{\text{design}}}{A_L}} = \sqrt{\frac{720000}{80}} = 94.86 \cong 95 \text{ รอบ}$$

คำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ โดยกำหนดค่า $J = 10 \text{ A/mm}^2$, $i = 21.7 \text{ A}$

$$a = \frac{i}{J} = \frac{21.7}{10} = 2.17 \text{ mm}^2$$

ดังนั้นเลือกขดลวด SWG เบอร์ 16 มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.709 mm^2

3.7 ขนาดตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง L_g

ตัวเหนี่ยวนำ L_g มีผลต่อมูมกำลังและความคิดเฟี้ยนของกระแสระบบไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำ L_g ที่เหมาะสมจะทำให้ได้มูมกำลังที่เหมาะสมและรูปคลื่นกระแสระบบไฟฟ้าใกล้เคียงไซน์มากที่สุดที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่งด้วย

จากสมการที่ (2.3) และ (2.12) คำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ มูมกำลัง กำลังไฟฟ้า และตัวประกอบกำลัง

แรงดันกริตระบบไฟฟ้า (V_g)	220	โวลต์
แรงดันอินเวอร์เตอร์ (V_{INV})	220	โวลต์
ความถี่ (f_1)	50	เฮิรตซ์
กำลังเอาต์พุต (P_g)	300	วัตต์
ตัวประกอบกำลัง (PF)	>0.90	
มูมกำลัง (δ)	10	องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของตัวเหนี่ยวนำใช้เชื่อมโยงระบบจากสมการที่ (2.13) โดยพิจารณาให้ค่า R มีค่าน้อยมาก

$$P_g = \frac{\hat{V}_g \cdot (\hat{V}_{INV})_1}{\omega L_g} \sin \delta \quad (3.11)$$

$$\omega L_g = \frac{\hat{V}_g \cdot (\hat{V}_{INV})_1}{P_g} \sin \delta$$

$$\omega L_g = \frac{(220) \cdot (220)}{300} \sin 10^\circ = 28.015 \Omega$$

$$\omega L_g = 2\pi f_1 L_g \quad (3.12)$$

$$L_g = \frac{\omega L_g}{2\pi f_1} = \frac{28.015}{2\pi \times 50} = 89.17 \text{mH}$$

ผลการคำนวณตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง L_g ได้ค่าประมาณ 89.17mH จากสมการที่ (2.12)

$$(\hat{i}_g)_1 = \frac{\hat{V}_g \angle 8^\circ - (\hat{V}_{INV})_1 \angle 0^\circ}{j\omega L_g} \quad (3.13)$$

$$(\hat{i}_g)_1 = \frac{220 \angle 10^\circ - 220 \angle 0^\circ}{28.015} = 1.368 \text{A}$$

คำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ โดยกำหนดค่า $J = 5 \text{ A/mm}^2$, $i = 1.368 \text{A}$

$$a = \frac{i}{J} = \frac{1.368}{5} = 0.2736 \text{ mm}^2$$

ดังนั้นเลือกขดลวด SWG เบอร์ 23 มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน 0.665 mm^2

3.8 การขั้วรีเลย์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

การควบคุมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งในบ้านหรือโรงงานอุตสาหกรรมดูเหมือนว่ารีเลย์จะเป็นอุปกรณ์สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ถูกหยิบมาใช้กันอย่างมาก โดยเฉพาะรีเลย์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำมาเป็นสวิตช์ตัดต่อให้แก่วงจรหรืออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าภายนอก ซึ่งอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กและเป็นผลให้หน้าสัมผัสรีเลย์แตะหรือแยกจากกัน เมื่อมีกระแสไหลผ่านคอยล์รีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการของรีเลย์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าคือ ใช้กระแสต่ำไม่กี่ไมโครแอมป์หรือมิลลิแอมป์มาควบคุมการปิดเปิดหรือตัดต่อเหมือนเป็นสวิตช์ตัวหนึ่ง เพื่อให้โหลดสามารถใช้กระแสสูงๆ เป็นแอมแปร์หรือหลายๆแอมป์ได้ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของรีเลย์นั้นๆ ว่าต้องทนแรงดันขนาดเท่าใด คอยล์รีเลย์ต้องการกระแสเท่าไรและมีความต้านทานมากน้อยขนาดไหนซึ่งค่าเหล่านี้ต้องให้ความสนใจ เพราะเป็นเรื่องสำคัญในการใช้รีเลย์

วงจรคอนโทรลหรือวงจรควบคุมที่เป็นวงจรแบบดิจิทัล มีจำนวนไม่น้อยเช่นกันที่มีรีเลย์แบบแม่เหล็กไฟฟ้ามาเป็นสวิตช์ตัดต่อ โดยใช้พัลส์เอาต์พุตที่ออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์หรือไอซีดิจิทัลเกตเพื่อควบคุมรีเลย์ให้ทำงานแต่กระแสที่จ่ายออกมามีค่าน้อยจึงต้องใช้ทรานซิสเตอร์มาขยายกระแส เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของคอยล์รีเลย์



รูปที่ 3.8 วงจรขับรีเลย์ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ในรูปที่ 3.8 เป็นวงจรขับรีเลย์โดยจะต้องทราบ กระแสคอยล์รีเลย์ i_c และกระแสอินพุตที่ออกมาจากเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนค่าตัวต้านทานจำกัดกระแส R_B สามารถคำนวณได้จากแรงดัน V_B และกระแสทางอินพุต i_B ดังนั้นคำนวณหา R_B ได้ดังนี้

ออกแบบคอยล์รีเลย์ที่ แรงดันตกคร่อมคอยล์รีเลย์ 5 โวลต์ มีข้อมูลดังนี้

ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ PN2222A $i_{c(max)} = 1A$, $h_{FE} = 75$

แรงดันตกคร่อมคอยล์รีเลย์ (V_{coil}) = 5 โวลต์

ความต้านทานคอยล์รีเลย์ (R_{coil}) = 47 โอห์ม

$$i_{coil} = \frac{V_{coil}}{R_{coil}} = \frac{5}{47} = 106 \text{ mA}$$

$$i_B = \frac{i_c}{h_{FE}} = \frac{106 \times 10^{-3}}{75} = 1.42 \text{ mA}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{coil} = \frac{V_{coil} - V_{BE}}{i_B} = \frac{5 - 0.6}{1.42 \times 10^{-3}} = 3.1 \text{ k}\Omega$$

ออกแบบคอยล์ได้ที่ แรงดันตกคร่อมคอยล์ได้ 15 โวลต์ มีข้อมูลดังนี้

ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ PN2222A $i_{c(max)} = 1 \text{ A}$, $h_{FE} = 75$

แรงดันตกคร่อมคอยล์ได้ (V_{coil}) = 15 โวลต์

ความต้านทานคอยล์ได้ (R_{coil}) = 85 โอห์ม

$$i_{coil} = \frac{V_{coil}}{R_{coil}} = \frac{15}{85} = 141 \text{ mA}$$

$$i_B = \frac{i_c}{h_{FE}} = \frac{141 \times 10^{-3}}{75} = 1.88 \text{ mA}$$

$$R_{coil} = \frac{V_{coil} - V_{BE}}{i_B} = \frac{15 - 0.6}{1.88 \times 10^{-3}} = 6.1 \text{ k}\Omega$$

จากวงจรทั้งหมดที่กล่าวมาจะสังเกตเห็นว่ามีไดโอดต่อคร่อมคอยล์อยู่ ทั้งนี้เพื่อมีไว้ป้องกันแรงดันย้อนกลับที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของรีเลย์ ซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์เกิดความเสียหายได้ ไดโอดที่ใช้กันส่วนมากจะเป็นไดโอดที่ใช้ในวงจรเรกติไฟร์ทั่วไปคือเบอร์ 1N4001 เป็นต้น

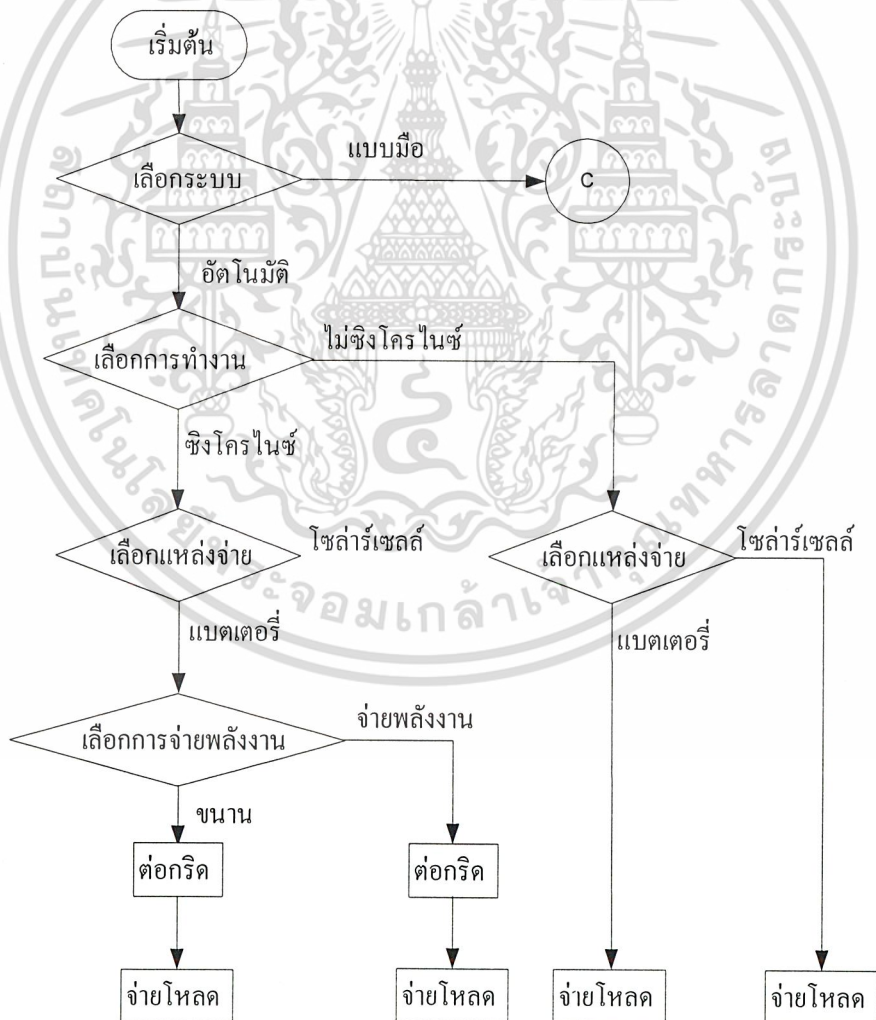
วงจรขั้วรีเลย์ทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นการใช้พัลส์เอาต์พุตจากวงจรดิจิทัล มาควบคุมให้ทรานซิสเตอร์ทำงานและขั้วรีเลย์เป็นสวิตช์ตัดต่อให้กับวงจรหรืออุปกรณ์ภายนอกต่อไป

บทที่ 4

การออกแบบสร้างวงจรควบคุมและโปรแกรมการควบคุม

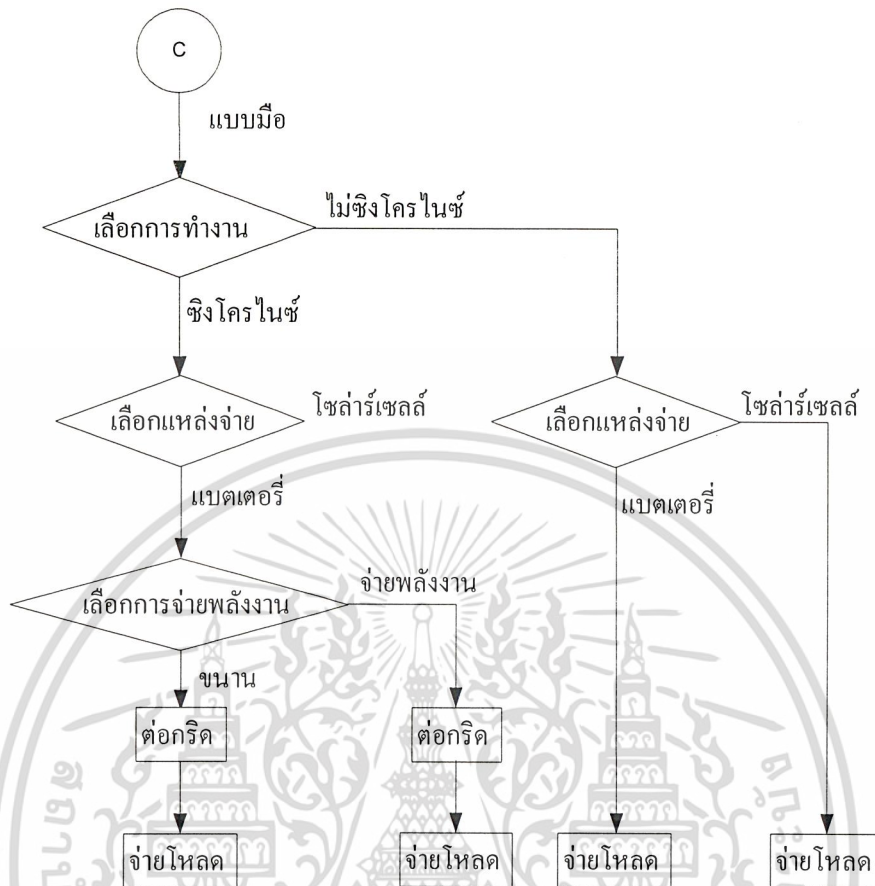
4.1 หลักการทำงานของระบบควบคุม

หลักการในการทำงานของระบบควบคุมจะแสดงในรูปแบบโพลีซาร์ทซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1 จะแสดงผังการทำงานของรวมระบบ รูปที่ 4.2 จะแสดงผังการทำงานของระบบในโหมด Synchronize แบบอัตโนมัติ ส่วนรูปที่ 4.3 จะแสดงผังการทำงานของระบบในโหมด Synchronize แบบทำงานด้วยมือและรูปที่ 4.4 จะแสดงผังการทำงานของระบบในโหมด Unsynthesize แบบอัตโนมัติและแบบทำงานด้วยมือ ส่วนในการเชื่อมต่อวงจรควบคุมจะเป็นดังรูปที่ 4.5 และในส่วนของปฏิญานิพนธ์นี้ได้จัดทำในส่วนของระบบโหมด Unsynthesize และโหมด Synchronize แบบทำงานด้วยมือเพื่อเป็นกรณีศึกษาที่จะทำในส่วนที่ระบบทำงานแบบอัตโนมัติต่อไป



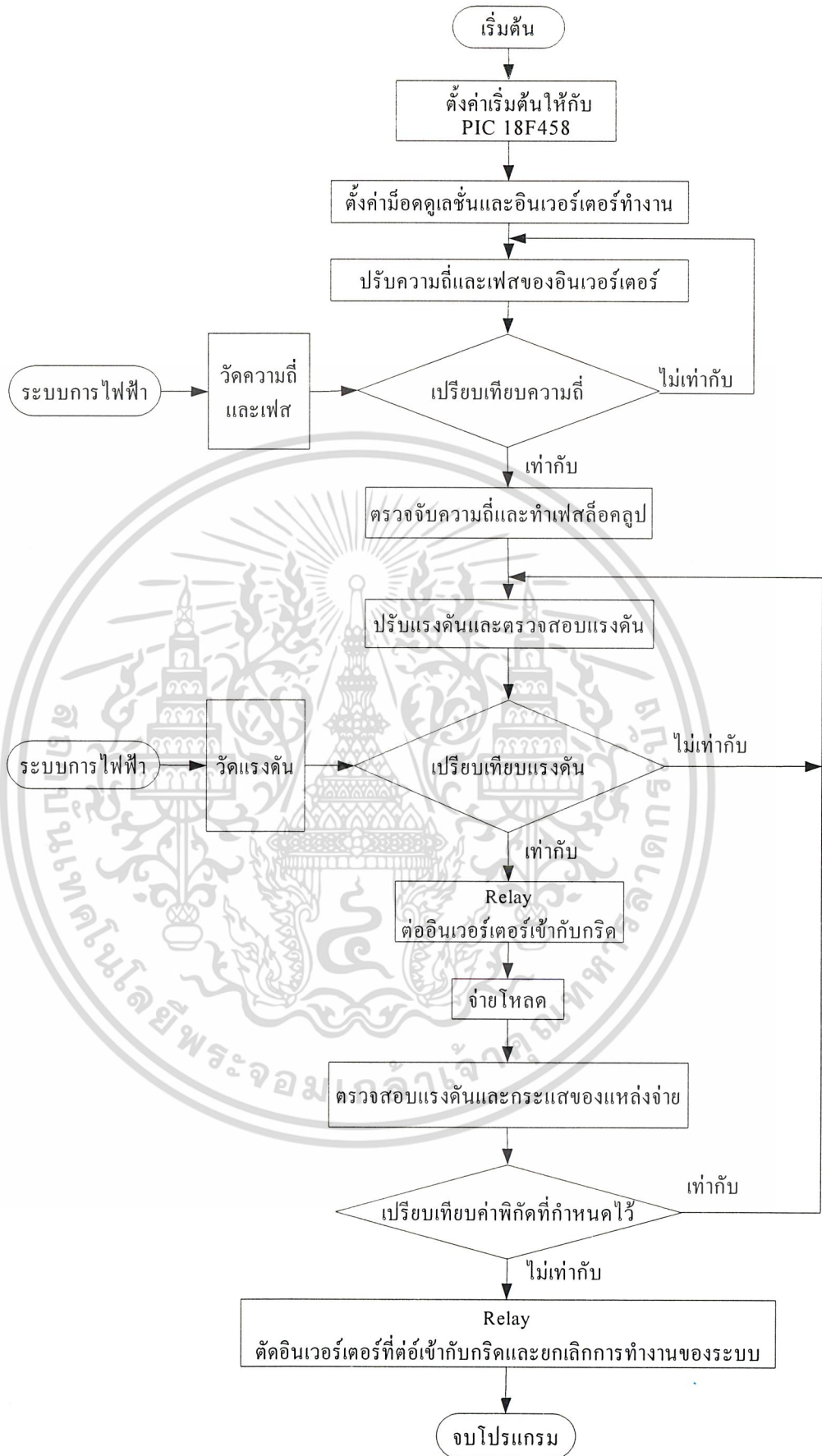
รูปที่ 4.1 ผังการทำงานของรวมระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



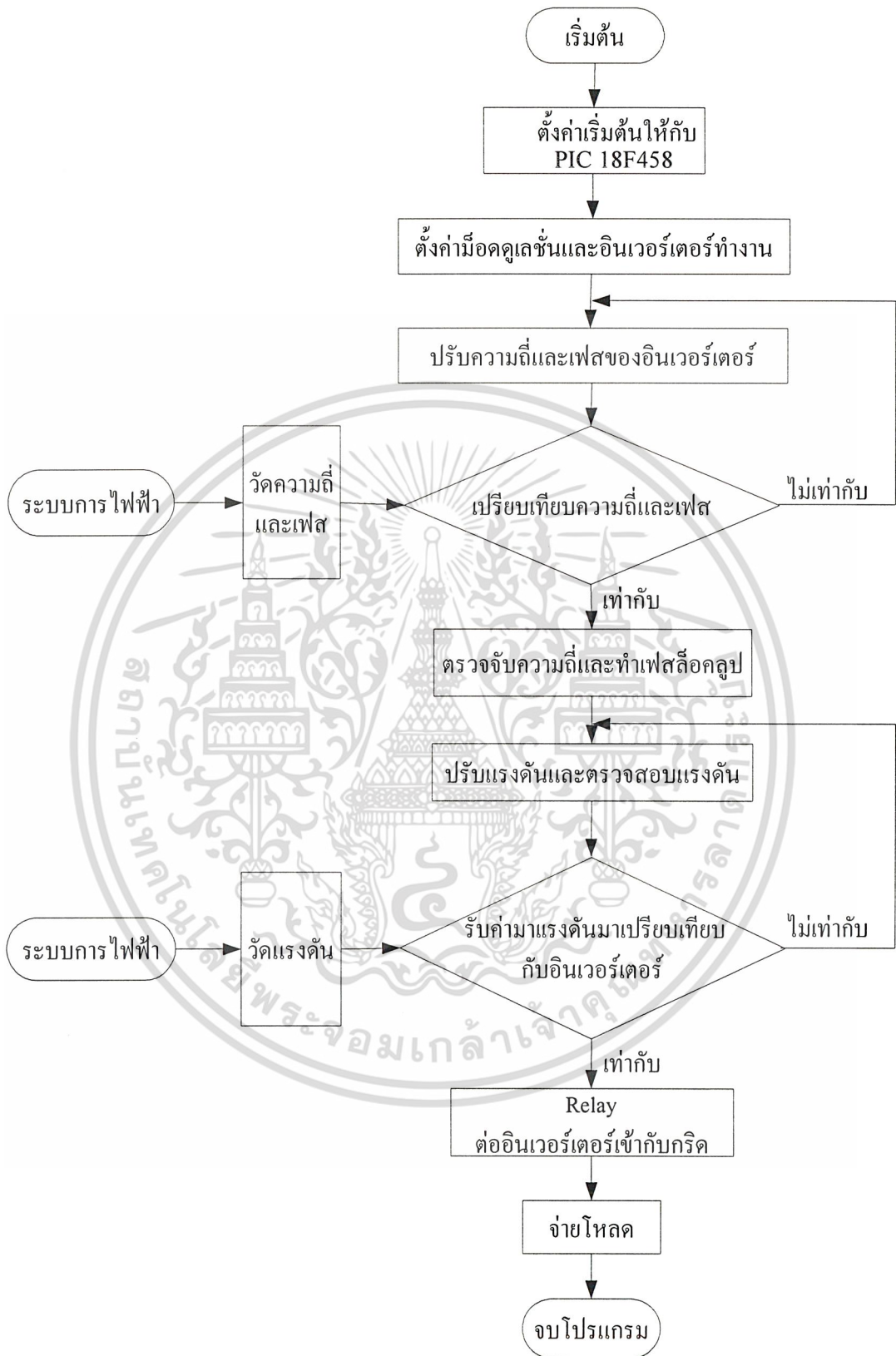
รูปที่ 4.1 (ต่อ) ผังการทำงานรวมของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



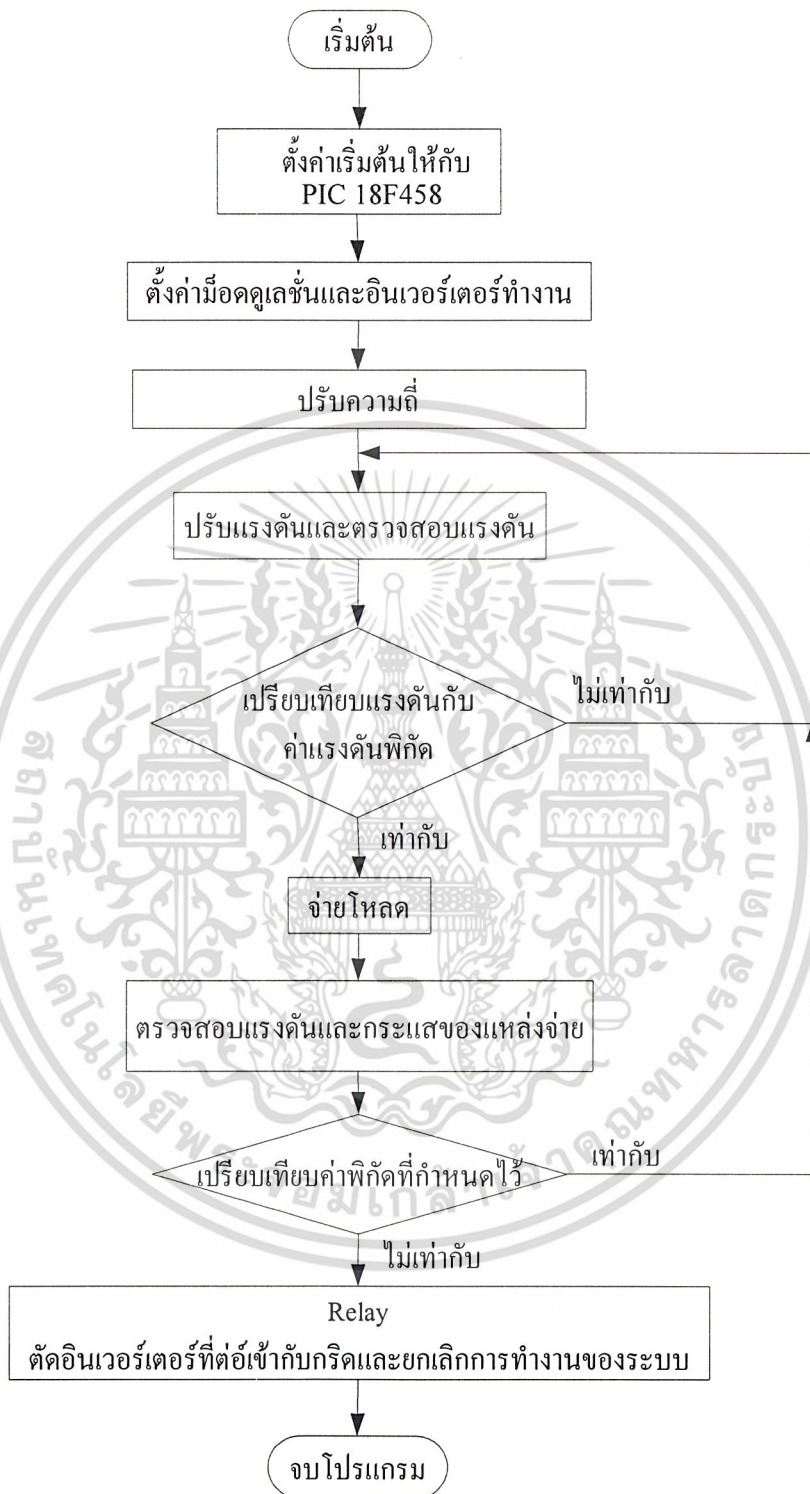
รูปที่ 4.2 ฟังก์การทำงานของระบบในโหมด Synchronize แบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



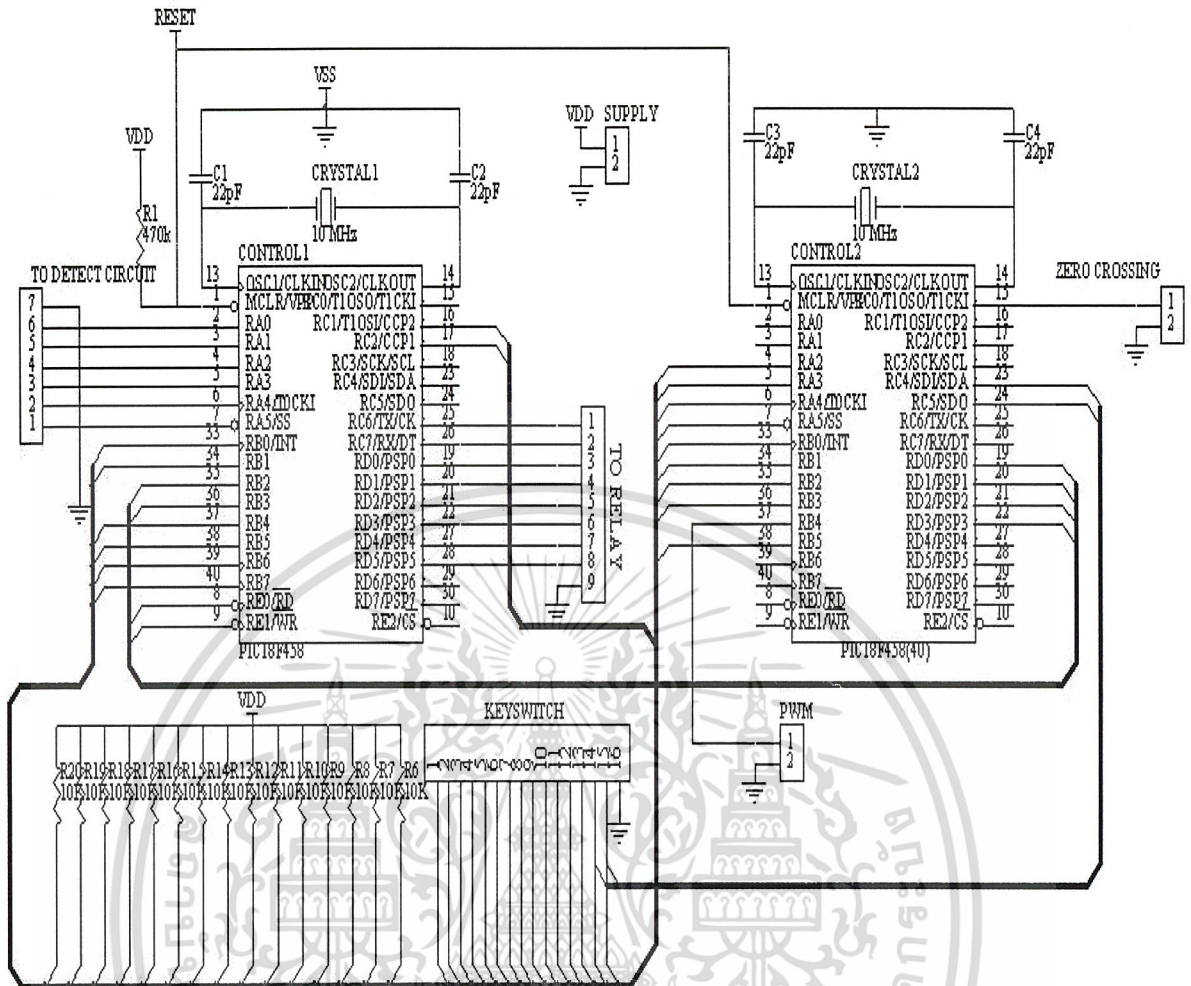
รูปที่ 4.3 ผังการทำงานของระบบในโหมด *Synchronize* แบบทำงานด้วยมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผังการทำงานของระบบในโหมด *Unsyncronize* แบบอัตโนมัติและแบบทำงานด้วยมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 วงจรควบคุมของระบบ

ในส่วนของระบบควบคุมนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 18F458 โดยในปริณญา นิพนธ์นี้จะใช้ 2 ตัว ซึ่งแต่ละตัวทำหน้าที่ดังนี้คือ ตัวที่หนึ่งทำหน้าที่ในการรับสัญญาณคำสั่งจากภายนอก และ แปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล แล้วส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของตัวที่สอง ส่วนตัวที่สองจะทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มแล้วรับสัญญาณคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่หนึ่งแล้วทำการ ประมวลผลโดยคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้มีดังนี้

4.1.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เป็นที่รู้จักกันดีในบรรดาผู้ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่มี ผู้ใช้งานจำนวนมากประสบปัญหาด้านข้อจำกัดบางประการในไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นก่อน แต่สำหรับ ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC 18F458 ได้เพิ่มขีดความสามารถต่าง ๆ ให้ผู้ใช้ได้ใช้งานได้สะดวกมากยิ่งขึ้น

4.1.2 คุณสมบัติทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F458

- ซีพียู RISC สมรรถนะสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชุดคำสั่งเพียง 75 คำสั่ง
 - ชุดคำสั่งใช้คาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาเพียงหนึ่งไซเคิล ยกเว้นคำสั่งการกระโดดใช้สองไซเคิล
 - ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา : ย่าน ดีซี 40 เมกะเฮิร์ตซ์ เวลาในแต่ละไซเคิลของคำสั่งสูงสุด 100 นาโนวินาที
 - หน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลชขนาด 32 กิโลเวิร์ด
 - หน่วยความจำแรม 1536 ไบต์
 - หน่วยความจำอีอีพรอม 256 ไบต์
 - สามารถตอบสนองอินเตอร์รัปต์ได้สูงถึง 21 เงื่อนไข
 - สแต็กทางฮาร์ดแวร์ 31 ระดับ
 - มีการอ้างแอดเดรสแบบโดยตรง , ทางอ้อมและแบบสัมพันธ์
 - มีเพาเวอร์ออฟไทมเมอร์ (PWRT)
 - มีเพาเวอร์ออสซิลเลเตอร์ (OST)
 - วอตช์ด็อกไทมเมอร์มีวงจรออสซิลเลเตอร์แบบ RC ภายใน
 - สามารถป้องกันการอ่านข้อมูลโดยการกำหนดรหัสป้องกันได้
 - เลือกวจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาได้ 4 แบบ
 - สามารถโปรแกรมข้อมูลแบบอนุกรมโดยใช้แรงดันต่ำได้(LVP)
 - สามารถโปรแกรมข้อมูลแบบอนุกรม 3 สาย โดยใช้แรงดันไฟสูง
 - สามารถแก้ไขข้อมูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ขณะอยู่ในวงจรผ่านสายเพียง 2 เส้น
 - ย่านแรงดันไฟเลี้ยง 2 – 5.5 โวลต์
 - กระแสซิงค์และซอร์ส 25 มิลลิแอมป์
 - กินกระแสเพียง 2 มิลลิแอมป์ ขณะใช้งานที่ไฟเลี้ยง +5 โวลต์ ความถี่สัญญาณนาฬิกา 4 เมกะเฮิร์ตซ์ และเพียง 1 ไมโครแอมป์ในขณะสแตนด์บาย
- 4.1.3 คุณสมบัติของเพอร์เฟอริล
- Timer 0 : ประกอบด้วย ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 8 บิต และปริสเกลเลอร์ขนาด 8 บิต
 - Timer 1 : ประกอบด้วย ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ และปริสเกลเลอร์ขนาด 16 บิต
 - Timer 2 : ประกอบด้วย ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 8 บิต และรีจิสเตอร์เก็บคาบเวลา , ปริสเกลเลอร์ และโพสต์สเกลเลอร์ขนาด 8 บิต
 - มีโมดูลแคปเจอร์ , วงจรเปรียบเทียบ และPWM
 - วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต สูงถึง 8 ช่อง
 - มีพอร์ตสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบอนุกรม 2 รูปแบบคือ SPI และ I²C
 - มีพอร์ตสเลฟแบบขนาน (parallel slave port) เพื่อใช้ในการติดต่อกับบัสของไมโครโปรเซสเซอร์ หรือ อาจใช้ในการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกได้
 - สามารถตรวจจับการสูญหายของไฟเลี้ยง (Brown-out circuitry) เพื่อการรีเซตแบบบราวน์เอาต์ (BOR)

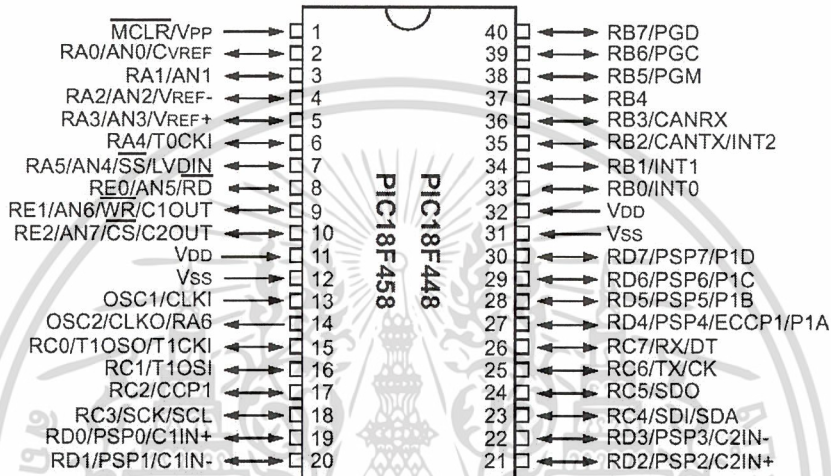
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การจัดขาของ PIC 18F458

1. ขาพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต มี 33 ขา ใช้งานเป็นทั้งพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต , อินพุตของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC) , ขาสำหรับโปรแกรมทั้งแบบ 2 และ 3 สาย ขาสำหรับสื่อสารข้อมูลอนุกรมและขารับสัญญาณอินเตอร์รัปต์

2. ขาต่อกับแหล่งจ่ายไฟ จำนวน 4 ขา คือ ขาต่อไฟเลี้ยง 3 ขา (เป็นกราวด์ 2 ขา) และขาต่อกับแรงดันที่ใช้ในการโปรแกรมอีก 1 ขา และที่ขานี้ยังใช้เป็นขาเรซีตด้วย

3. ขาสำหรับป้อนสัญญาณนาฬิกา มีด้วยกัน 2 ขา คือ OSC1 และ OSC2



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการจัดขาของ PIC18F458

4.1.5 พอร์ตของ PIC18F458

พอร์ต A

มีขนาด 6 บิต เป็นพอร์ตแบบ 2 ทิศทางจึงสามารถใช้งานเป็นพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตได้อย่างอิสระ และที่เป็นจุดเด่นของพอร์ต A ก็ทำหน้าที่เป็นขาอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิตถึง 8 ช่อง โดยสามารถใช้เป็นขาอินพุตรับแรงดันอ้างอิง ขาอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลจะลดลงเหลือ 3 ช่อง

พอร์ต B

มีขนาด 8 บิต เป็นพอร์ต 2 ทิศทางสามารถใช้งานเป็นพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตได้อย่างอิสระ เช่นเดียวกับพอร์ต A ขา RB6 และ RB7 สามารถใช้ในการโปรแกรมข้อมูลลงในหน่วยความจำภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยที่ขา RB3 ใช้เป็นขาที่กำหนดให้ PIC18F458 เข้าสู่การโปรแกรมด้วยแรงดันต่ำ (low voltage programming)

พอร์ต C

มีขนาด 8 บิต เป็นพอร์ต 2 ทิศทางเช่นเดียวกัน สามารถกำหนดให้เป็นพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตได้อย่างอิสระนอกจากนั้นยังสามารถใช้งานในฟังก์ชันพิเศษอื่นได้อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

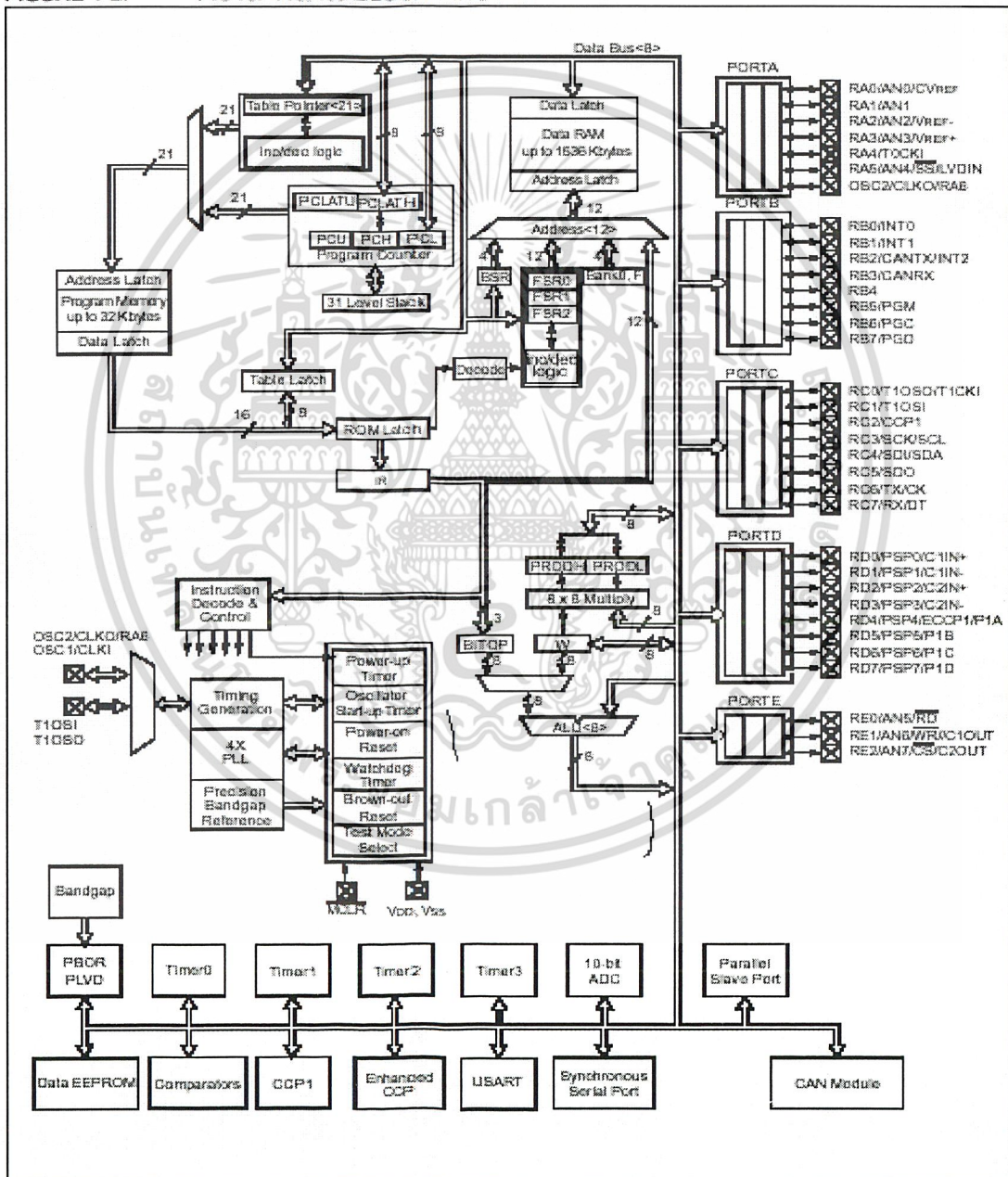
พอร์ตD

มีขนาด 8 บิต เป็นพอร์ต 2 ทิศทางเช่นเดียวกัน สามารถกำหนดให้เป็นพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตได้อย่างอิสระ สามารถใช้เป็น Slave Port กรณีติดต่อกับระบบบัสของไมโครโปรเซสเซอร์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานในฟังก์ชันพิเศษอื่นได้อีก

พอร์ตE

มีขนาด 3 บิต เป็นพอร์ต 2 ทิศทาง ขาสัญญาณควบคุมการอ่านและการเขียนในการติดต่อแบบ Parallel Slave Port ขาสัญญาณอินพุตอนุาลอก

FIGURE 1-2: PIC18F448/458 BLOCK DIAGRAM



รูปที่ 4.7 Block Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 การเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมหรือ SPI

PIC 18F458 สามารถกำหนดให้ทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แบบอนุกรมหรือ Serial Peripheral Interfacing (SPI) เพื่อติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกในลักษณะอนุกรมแบบซิงโครนัส (synchronous) โดยมีขาใช้งาน 4 ขาคือ ขาข้อมูลออกแบบอนุกรม (Serial Data Out : SDO) , ขาข้อมูลเข้าแบบอนุกรม (Serial Data In : SDI) , ขาสัญญาณนาฬิกาอนุกรม (Serial Clock : SCK) และขาเลือกอุปกรณ์สเลฟ (Slave Select : SS) ในการใช้งานปกติจะใช้ 3 ขาคือ SDA , SDI และ SCK สำหรับขา SS จะใช้งานก็ต่อเมื่อ PIC18F458 ถูกกำหนดให้เป็นอุปกรณ์สเลฟหรืออุปกรณ์ตัวลูก

การทำงานในโหมดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อนุกรมมีด้วยกัน 2 ลักษณะคือเป็นอุปกรณ์ตัวแม่หรือมาสเตอร์ (master)และอุปกรณ์ตัวลูกหรือสเลฟ(slave) อัตราของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการถ่ายทอดข้อมูลของ SPI สามารถเลือกได้ตั้งแต่ ความถี่สัญญาณนาฬิกาหลักหาร 4 ($F_{osc}/4$) , หาร 16 ($F_{osc}/16$) , หาร 64 ($F_{osc}/64$) และที่ค่าเอาต์พุตของไทมเมอร์ 2 หาร 2 (Timer2 output/2) มีอัตราสูงสุด 5 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ความถี่สัญญาณนาฬิกาหลักสูงสุด 20 เมกะเฮิร์ตซ์

การเชื่อมต่อในโหมด SPI นี้ต้องต่อขา SDO ของอุปกรณ์มาสเตอร์เข้ากับขา SDI ของอุปกรณ์ สเลฟ ส่วนขา SDI ของมาสเตอร์จะต่อเข้ากับขา SDO ของสเลฟและขา SCK ของอุปกรณ์มาสเตอร์และ สเลฟจะต่อถึงกันโดยตรงนอกจากนั้นยังสามารถใช้งานขา SDO และ SDI ในการสื่อสารข้อมูลแบบ 2 เส้นได้ด้วยกัน เมื่อมีการรับข้อมูลขา SDO จะถูกกำหนดให้เป็นขาอินพุต ทำให้การส่งข้อมูลออกทางขา SDO ได้รับการคิเสเบิลโดยอัตโนมัติ

4.1.7 USART ใน PIC18F458

USART ย่อมาจาก Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter หรือ วงจรสื่อสารข้อมูลอนุกรม (Serial Communication Interface : SCI) เป็นระบบการสื่อสารข้อมูลอนุกรมที่ได้รับ การบรรจุอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 ด้วยโดยสามารถกำหนดให้ทำงานในลักษณะฟูลดูเพล็กซ์ (full duplex) กล่าวคือสามารถรับและส่งข้อมูลได้ในคราวเดียวกันอาทิ การติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS-232 และในลักษณะนี้จะต้องผลิตกันรับและส่งข้อมูลอาทิ การติดต่อกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอะนาล็อกและวงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลหรือการติดต่อกับหน่วยความจำอีพีรอมอนุกรม เป็นต้น

USART ใน PIC18F458 สามารถกำหนดให้ทำงานได้หลายโหมดดังนี้

- โหมดอะซิงโครนัส มีลักษณะการส่งผ่านข้อมูลแบบฟูลดูเพล็กซ์
- โหมดซิงโครนัส-มาสเตอร์มีลักษณะการส่งผ่านข้อมูลแบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์
- โหมดซิงโครนัส-สเลฟมีลักษณะการส่งผ่านข้อมูลแบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์

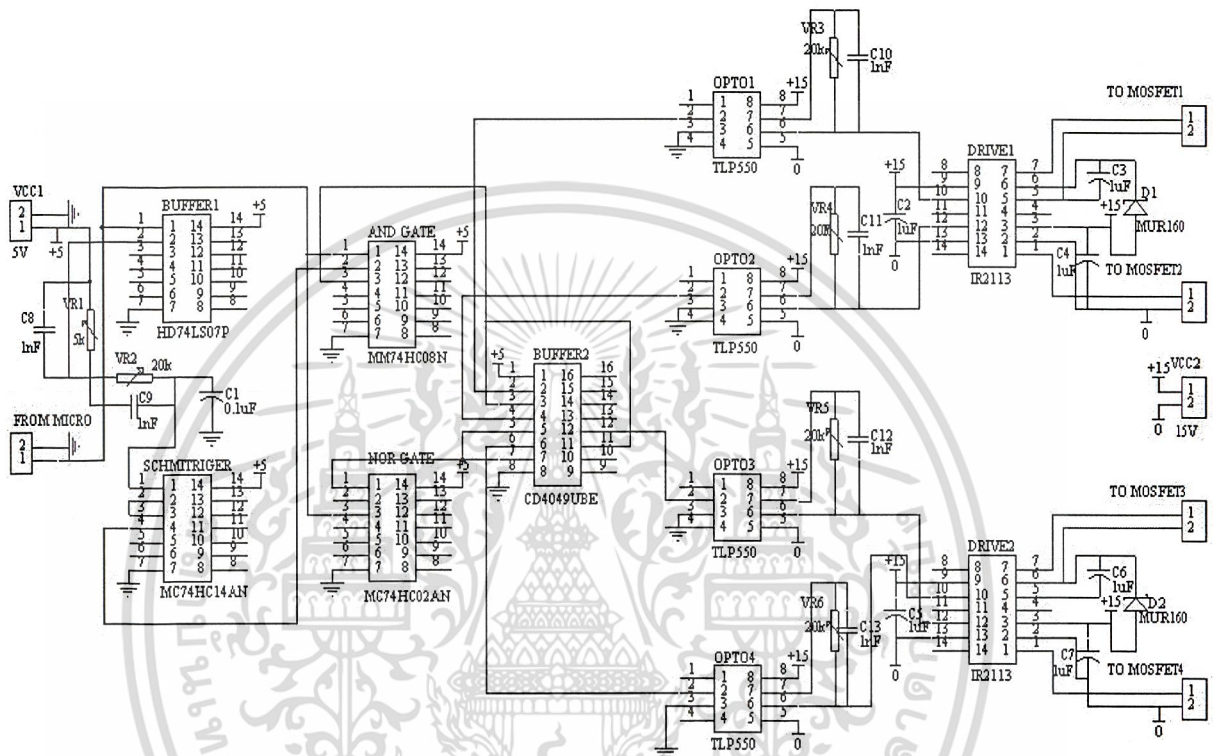
ด้วยความสามารถของ USART จึงสามารถสร้างระบบแบบมัลติโปรเซสเซอร์ได้ โดยมีการตรวจจับ แอดเดรสแบบ 9 บิต (9-bit address detection) ภายใน USART ของ PIC18F458 มีวงจรกำเนิดอัตราบอด (baud rate generator) ขนาด 8 บิต สามารถควบคุมได้ด้วยการปรับค่าทางซอฟต์แวร์ และเลือกอัตราบอดได้ ระหว่าง 19.53-5,000 กิโลบิตต่อวินาที ในโหมดซิงโครนัสโดยใช้คริสตอลความถี่ 20 เมกะเฮิร์ตซ์ในการกำเนิดสัญญาณนาฬิกา ส่วนในโหมดอะซิงโครนัส USART ใช้รูปแบบการติดต่อสื่อสารตามมาตรฐาน NRZ(non-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

return-zero)ซึ่งมีรูปแบบคือ บิตเริ่มต้น 1 บิต สำหรับจำนวนของข้อมูล และบิตหยุด 1 บิต , 8 บิต ในการรับและส่งข้อมูล USART ใน PIC18F458 จะกระทำกับข้อมูลในบิต LSB ก่อน ซึ่งขาสำหรับใช้งานในการสื่อสารอนุกรมคือขา RC6/TX เป็นขาสำหรับส่งข้อมูลและขา RC7/RX สำหรับรับข้อมูล

4.2 วงจรควบคุม

4.2.1 วงจรปรับช่วงเวลา Dead Time และวงจรขับเคลื่อน

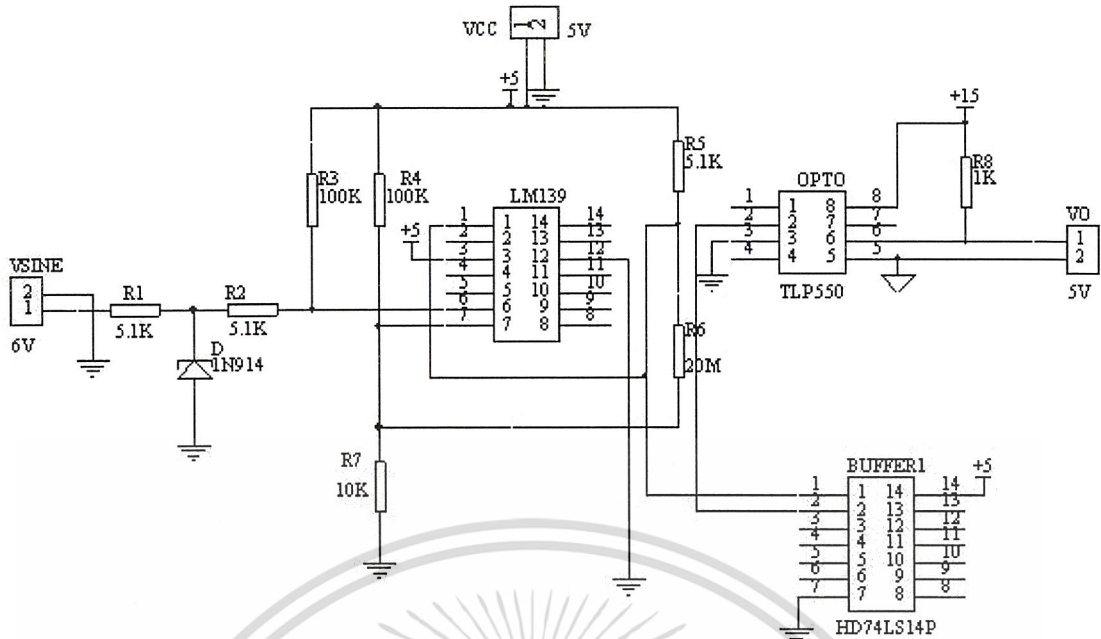


รูปที่ 4.8 วงจร Dead Time และวงจรขับเคลื่อน

ส่วนของวงจรขับเคลื่อนและวงจรปรับช่วงเวลาจะรับสัญญาณขับเคลื่อนจากไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งสัญญาณที่ใช้จะเป็นแบบ SPWM (Sinusoidal Pulse-width Modulation) แล้วทำการขยายสัญญาณด้วย IR2113 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 จากนั้นจึงส่งเข้าขาเกตของ ไอจีบีทีต่อไป ส่วนรูปคลื่นสัญญาณจะแสดงในภาคผนวก ก

4.2.2 วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์แรงดันระบบไฟฟ้า

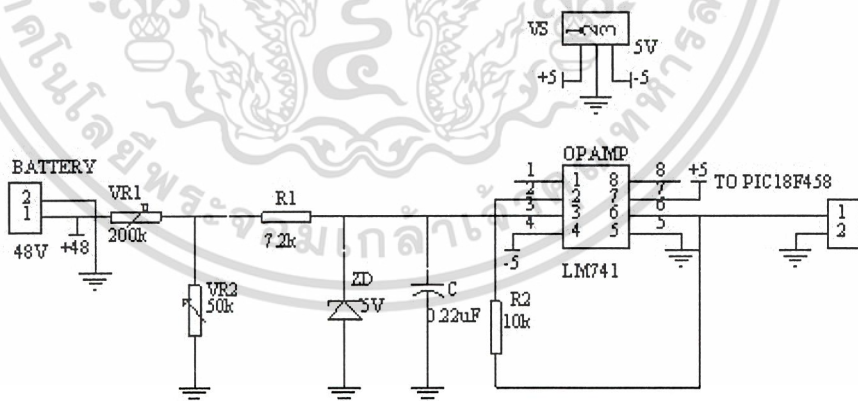
แรงดันระบบไฟฟ้าจะต้องถูกตรวจวัดจุดตัดศูนย์ เพื่อเป็นมุมเฟสอ้างอิงที่ศูนย์องศาสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สัญญาณจุดตัดศูนย์จะต่อเข้าขา RC0 (input) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ช่องศูนย์ วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์ออกแบบโดยใช้ LM139 เป็นตัวเปรียบเทียบแรงดัน ดังในรูปที่ 4.9 และรูปคลื่นสัญญาณจะแสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.9 วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์แรงดันระบบไฟฟ้า

4.2.3 วงจรตรวจวัดแรงดันกระแสตรง

วงจรตรวจวัดแรงดันกระแสตรง ซึ่งเป็นแรงดันอินพุต ออกแบบโดยลดทอนแรงดันด้วยตัวต้านทาน จากแรงดัน 40-48 โวลต์ ลดทอนเป็น 2-4.5 โวลต์ แล้วผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรขยายโดยใช้ออปแอมป์ แล้วเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงวงจรในรูปที่ 4.10

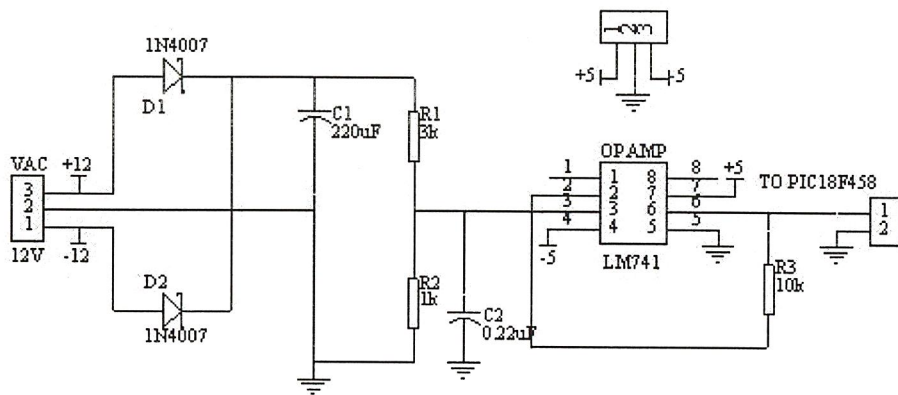


รูปที่ 4.10 วงจรตรวจวัดแรงดันกระแสตรง

4.2.4 วงจรตรวจวัดแรงดันระบบไฟฟ้า

วงจรตรวจวัดแรงดันระบบไฟฟ้า ซึ่งตรวจวัดค่าแรงดันกระแสสลับที่มีความถี่ 50เฮิรตซ์ ออกแบบโดยใช้หม้อแปลงลดแรงดันจาก 230 โวลต์ เป็นแรงดัน 12 โวลต์ ผ่านไดโอดเรียงกระแส ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และขยายสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์และเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงวงจรในรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 วงจรตรวจตรวจวัดแรงดันระบบไฟฟ้า

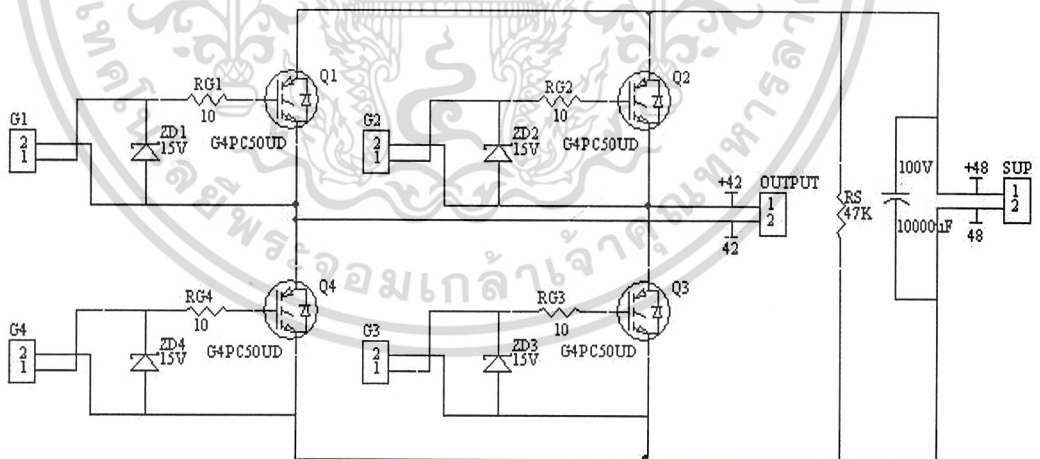
4.2.5 วงจรตรวจวัดกระแสไฟตรง

วงจรตรวจวัดกระแสไฟตรง ซึ่งเป็นกระแสด้านอินพุต ใช้หลักการแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานแปรผันตามกระแสที่ไหลผ่าน โดยใช้ Current Transducer จึงเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์

4.2.6 วงจรตรวจวัดกระแสระบบไฟฟ้า

วงจรตรวจวัดกระแสระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระแสด้านเอาต์พุต ใช้หลักการแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานแปรผันตามกระแสที่ไหลผ่าน โดยใช้ Current Transducer แล้วผ่านไดโอดเรียงกระแสตรงแล้ว จึงเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์

4.2.7 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.12 วงจรอินเวอร์เตอร์

ในโครงการนี้เลือกใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตซ์ ซึ่งคุณสมบัติของไอจีบีทีแสดงในภาคผนวก ค และต่อแบบ पुलบริดจ์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12 เลือกการสวิตซ์แบบไบโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 แนวคิดและหลักการออกแบบโปรแกรมระบบควบคุม

ระบบควบคุมประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนที่แน่นอน โดยโปรแกรมไว้ในหน่วยความจำ โปรแกรมระบบควบคุมจะต้องพัฒนาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานที่ต้องการและมีสมรรถนะที่เชื่อถือได้ การพัฒนาโปรแกรมจึงต้องมีเครื่องมืออุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่าย สะดวกและรวดเร็ว ในปฏิญานิพนธ์นี้เลือกใช้ ภาษา ภาษาแอสเซมบลี เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องของความเร็วซึ่งจะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลได้รวดเร็ว จากการทดสอบโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมในปฏิญานิพนธ์นี้ พบว่ามีความเร็วในการประมวลผลเพียงพอ

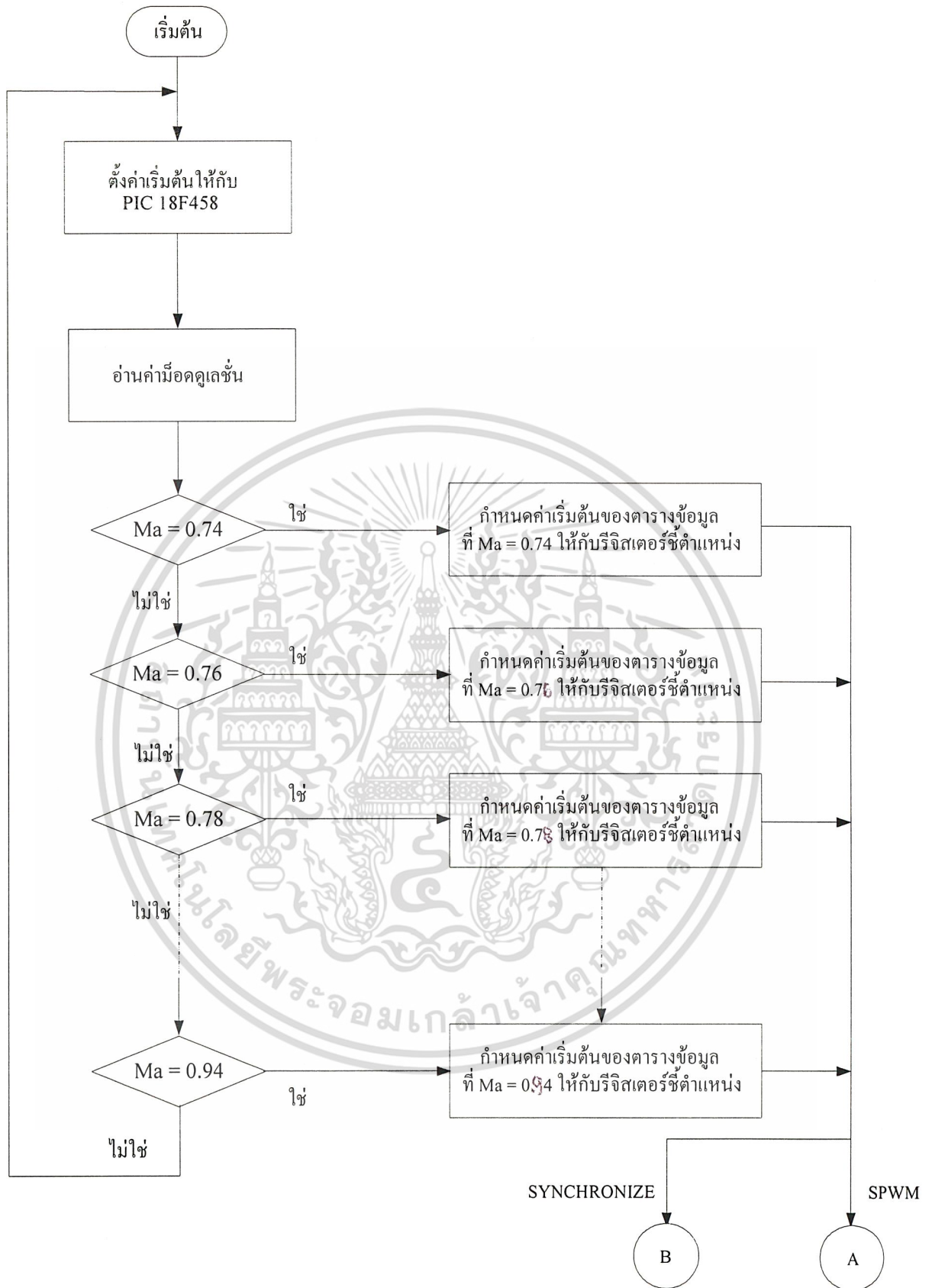
4.4 การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมพีดีบีเบิลยูเอ็ม

4.4.1 วิธีการสร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็ม

ในการสร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มจะใช้ทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วมาใช้ในการสร้าง โดยจะใช้โปรแกรม Pspice ในการสร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็ม ซึ่งสัญญาณจะมีค่าในระดับลอจิก คือ 0 กับ 1 นำมาเก็บไว้ในรูปเลขฐาน 16 ซึ่งจะถูกเขียนเป็นไฟล์อักขระ (Text files) หลังจากนั้นไฟล์อักขระจะถูกนำไปใช้ ซึ่งจะถูกรวมเข้าไปในการเขียนโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 18F458 โดยไฟล์อักขระของสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มที่ได้จากโปรแกรม Pspice จะถูกเก็บเป็นตาราง (Lookup Table) ซึ่งในแต่ละตารางจะเป็นสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มที่ค่ามีอดคูละชันต่างๆ (ma) และในแต่ละตารางจะถูกเรียกใช้โดยการกดคีย์สั่งเข้าไปในไมโครคอนโทรลเลอร์และถูกส่งออกมาโดยชุดคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ และสำหรับการควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะเลือกรูปแบบของสัญญาณควบคุมโดยการกดคีย์ที่ได้กำหนดไว้ โดยสัญญาณจะส่งออกไปที่พุดของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อส่งออกไปยังวงจรขับเคลื่อนต่อไป

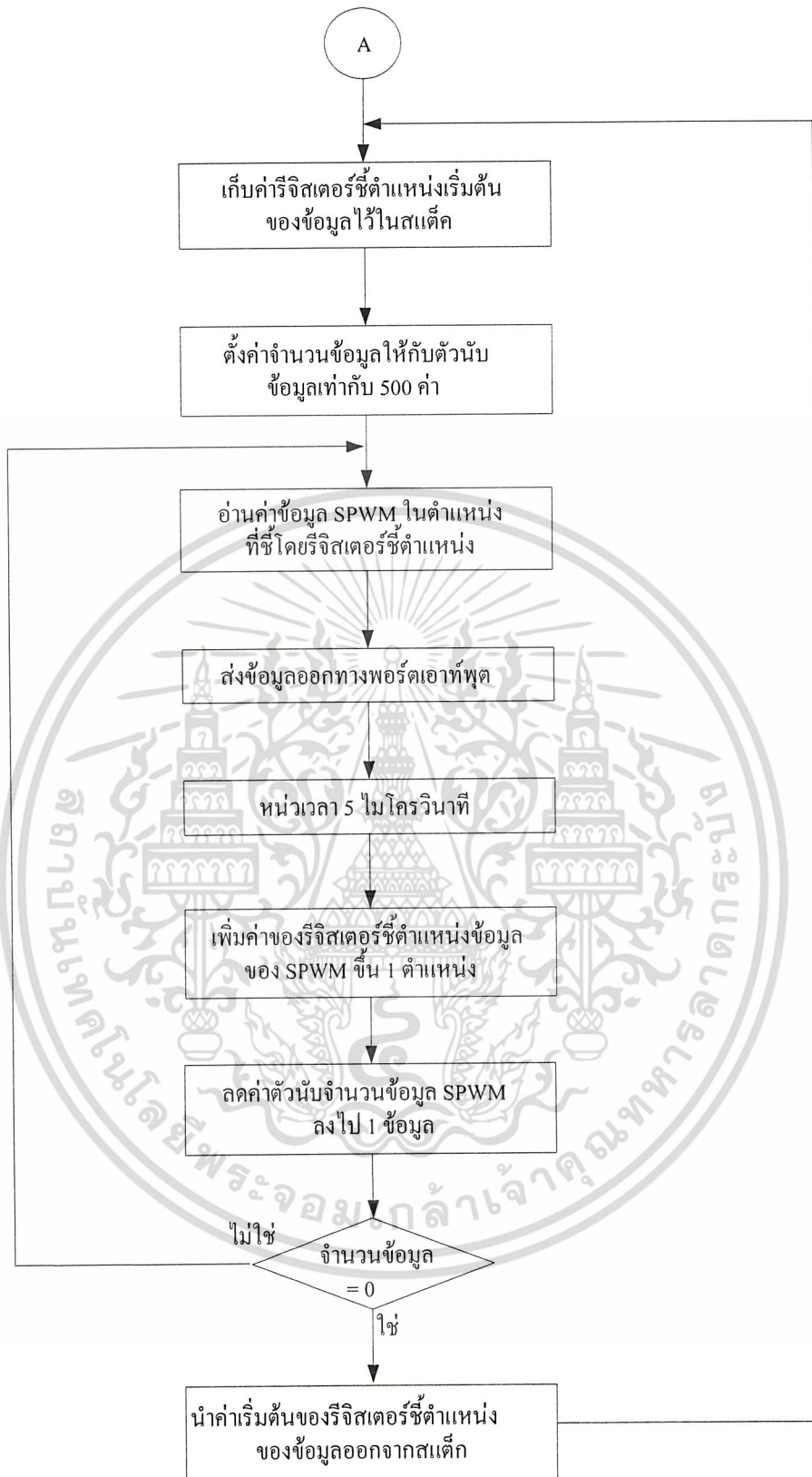
4.4.2 โปรแกรมสร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็ม

ในโปรแกรมย่อยสำหรับสร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็ม จากที่แบ่งข้อมูลของสัญญาณควบคุมออกเป็น 4000 ค่าใน 1 คาบการทำงาน และในการส่งข้อมูลออกพอร์ตในแต่ละครั้งของไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องคงค่านั้นไว้เท่ากับ $\left(\frac{20 \text{ ms}}{4000}\right) 5$ ไมโครวินาที ดังนั้นภายในช่วงเวลานี้ไมโครคอนโทรลเลอร์ จะต้องทำงานตามคำสั่งในการอ่านคำสั่งออกพอร์ตให้เสร็จภายในเวลาดังกล่าว โปรแกรมสร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มที่ค่ามีอดคูละชันต่างๆสามารถแสดงโพล์วชาร์ตของโปรแกรมหลักได้ดังรูปที่ 4.13 โดยจะเริ่มต้นจากการตั้งค่าเริ่มต้นให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F458 โดยกำหนดพอร์ต B เป็นเอาต์พุตที่จะส่งสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็ม การทำงานคือเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์รับคำสั่งอินพุตค่ามีอดคูละชันเข้ามา แล้วทำการตรวจสอบค่ามีอดคูละชันที่รับเข้ามาว่าจะให้สร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มที่ค่ามีอดคูละชันเท่าไร เมื่อรู้ค่ามีอดคูละชันแล้วจะทำการกำหนดตำแหน่ง (Address) เริ่มต้นของตารางข้อมูลให้กับรีจิสเตอร์ชี้ตำแหน่งข้อมูล หลังจากนั้นจะทำการส่งค่าข้อมูลในตารางออกไปยังพอร์ตเอาต์พุต โดยหน่วงเวลา 5 ไมโครวินาที เมื่อค่าข้อมูลออกไปที่พอร์ตจนครบ 4000 ค่าแล้ว ก็จะไปเริ่มต้นรับค่าข้อมูลในตำแหน่งเริ่มต้นใหม่อีกครั้งแล้วก็จะทำซ้ำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ รอคำสั่งให้หยุดการทำงาน



รูปที่ 4.13 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ไฟล์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมหลัก(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 วิธีการปรับค่ามอดดูเลชันของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

ในการปรับระดับแรงดันเอาต์พุตจะอาศัยการปรับค่ามอดดูเลชันที่ค่าตั้งแต่ 0.74, 0.78, ..., 0.94 ซึ่งหลักการในการปรับค่ามอดดูเลชันนี้สามารถทำได้โดยการปรับความกว้างของสัญญาณเกท ในส่วนนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าจากการกดคีย์ที่ได้กำหนดไว้ แล้วตรวจสอบว่าเป็นค่ามอดดูเลชันเท่าไร ก็จะส่งค่าข้อมูลที่ค่ามอดดูเลชันนั้นออกมาทางพอร์ตเอาต์พุต

4.4.4 วิธี การปรับความถี่ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

ในการปรับความถี่ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจะทำการคงค่ามอดดูเลชันไว้ที่ 0.8(ma) จากนั้นก็จะทำการปรับความถี่ที่ 25 Hz, 50 Hz และ 100 Hz โดยในการปรับความถี่นี้จะใช้ลักษณะการรับสัญญาณจากการกดคีย์เช่นเดียวกัน ซึ่งการส่งค่าข้อมูลออกมาทางพอร์ตเอาต์พุตจะกระทำเหมือนกับการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มหลักเพียงแต่ที่ความถี่ 25 Hz จะส่งข้อมูลแต่ละค่าออกมาซ้ำกัน 1 ครั้ง (ข้อมูลที่ส่งจะเพิ่มเป็น 8000 ค่า) ส่วนที่ความถี่ 100 Hz จะส่งข้อมูลออกมาในลักษณะกระโดดข้ามข้อมูล 1 ครั้ง (ข้อมูลที่ส่งจะเหลือเพียง 2000ค่า)

4.4.5 วิธีการควบคุมสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเมื่อทำการชิงโครไนซ์

ในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อทำการชิงโครไนซ์ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มหลักที่ความถี่ 50 Hz และค่ามอดดูเลชันเท่ากับ 0.8 ซึ่งแสดงโปรแกรมการทำงาน ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมเมื่อทำการชิงโครไลน์

จากนั้นจะรับค่าสัญญาณ ไซนจากการไฟฟ้าเข้ามาซึ่งในการรับค่าสัญญาณ ไซนมานี้จะต้องมาผ่านวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์ แล้วทำการแยกกราวนด์ (เนื่องจากว่าสัญญาณ ไซนจากการไฟฟ้าจะรบกวนการทำงานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

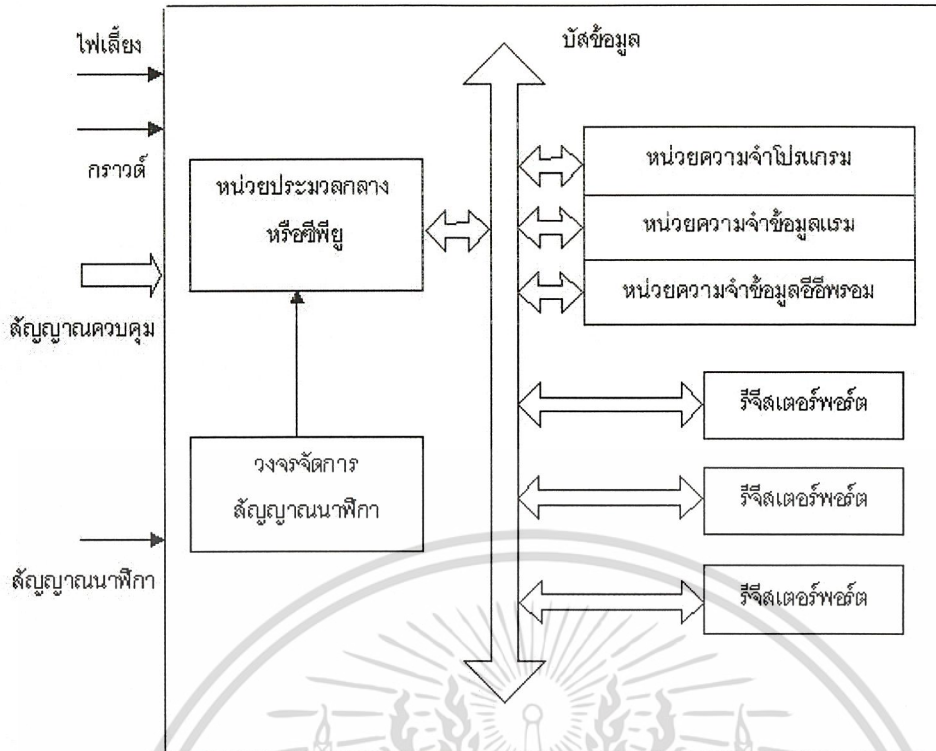
ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำงานผิดพลาดได้) จากนั้นจึงส่งเข้า

ไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำการตรวจสอบว่าค่าที่ส่งเข้ามาเป็นลอจิก 1 หรือไม่ ถ้าพบว่าเป็นลอจิก 1 เมื่อไร ไมโครคอนโทรลเลอร์ ก็จะเริ่มต้นสร้างสัญญาณพีคดับเบิ้ลยูเอ็มที่ความถี่ 50 Hz โดยใช้เวลาในช่วงการทำงานนี้ เท่ากับ 0.3 ไมโครวินาที และเลิกตรวจสอบสัญญาณจากการไฟฟ้า จนเมื่อสร้างสัญญาณพีคดับเบิ้ลยูเอ็มได้ 10 ms ก็จะวนมาตรวจสอบสัญญาณจากการไฟฟ้าอีกครั้งแล้วก็จะทำซ้ำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ เป็นหลักการเฟลลือคคูลูป และรอคำสั่งให้หยุดการทำงาน

ในระหว่างการทำงานนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีกตัวก็จะรับค่าแรงดันระหว่าง การไฟฟ้ากับ อินเวอร์เตอร์แปลงจากอะนาล็อกเป็นดิจิตอลมาเปรียบเทียบกันถ้าพบว่าเท่ากันก็จะสั่งให้รีเลย์ทำงานเพื่อ ชิงโครไนซ์ ซึ่งการชิงโครไนซ์แบบนี้จะเป็นการจ่ายโหลดรวมกันระหว่างอินเวอร์เตอร์กับระบบการไฟฟ้า แต่ถ้าในกรณีที่ตรวจสอบพบว่าแรงดันระหว่างอินเวอร์เตอร์กับการไฟฟ้าไม่เท่ากันก็จะทำการปรับค่านี้อดดู เลชั่นของอินเวอร์เตอร์จนได้แรงดันระหว่างอินเวอร์เตอร์กับระบบการไฟฟ้าที่เท่ากันจึงจะทำการชิงโครไนซ์ และในระหว่างการชิงโครไนซ์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะทำการตรวจสอบแรงดันและปรับค่านี้อดดูเลชั่น แบบนี้ไปเรื่อยๆ ในระหว่างนี้ก็จะทำการตรวจสอบกระแสของอินเวอร์เตอร์ไปด้วย ถ้าพบว่ากระแสของ อินเวอร์เตอร์ต่ำกว่าพิกัดที่กำหนดไว้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะทำการสั่งรีเลย์ให้หยุดการทำงานตัดการ ชิงโครไนซ์ออกและสั่งอินเวอร์เตอร์ให้หยุดทำงานซึ่งในส่วนนี้ของโปรแกรมทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข

4.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์(Microcontroller) หมายถึงอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก แต่ในตัวอุปกรณ์ขนาดเล็กนี้ได้บรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ที่คน โดยส่วนใหญ่คุ้นเคย กล่าวคือ ภายใน ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู หน่วยความจำและพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบ คอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยบรรจุรวมกันอยู่ภายใต้ตัวถังเดียวกัน ในรูปที่ 4.16 แสดงส่วนประกอบหลักที่ สำคัญและกลไกการทำงานเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.16 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบหลักเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์

ซีพียูจะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมเพื่ออ่านคำสั่งที่ระบุไว้ โดยต้องทำการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำผ่านสายสัญญาณที่เรียกว่า บัสแอดเดรส (address bus) แล้วทำการอ่านข้อมูลคำสั่งออกมาจากหน่วยความจำโปรแกรมในแอดเดรสนั้น ๆ จากนั้นทำการประมวลผล โดยมีหน่วยความจำข้อมูลแรมเป็นที่พักของข้อมูลที่อยู่ในระหว่างการประมวลผล หรืออาจมองว่าหน่วยความจำข้อมูลแรมเป็นเสมือนกระดานทดในการคำนวณก็ได้ ข้อมูลในการประมวลผลจะส่งผ่านสายสัญญาณที่เรียกว่าบัสข้อมูล (data bus) แล้วส่งต่อไปยังอุปกรณ์ภายนอกผ่านทางขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุต

4.5.1 หน่วยประมวลผลกลาง

เป็นเสมือนมันสมองของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยซีพียูนี้ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลที่เข้ามาในระบบ แล้วทำการส่งต่อไปยังส่วนต่าง ๆ เพื่อควบคุมการทำงานต่อไปหัวใจหลักของซีพียูคือหน่วยคำนวณคณิตศาสตร์และลอจิก (ALU : Arithmetic and logic unit) ซึ่งได้รับการกำหนดจังหวะการทำงานจากส่วนควบคุมลำดับการทำงาน โดยจังหวะการทำงานนั้นจะสัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกา เมื่อซีพียูทำการติดต่อหน่วยความจำ สิ่งที่ปรากฏขึ้นบนบัสข้อมูลภายในซีพียูคือ รหัสคำสั่ง (instruction code) ต้องผ่านการทำงานของส่วนถอดรหัสคำสั่ง (instruction decoder) เสียก่อน จะได้เป็นข้อมูลคำสั่งที่ซีพียูเข้าใจและสามารถดำเนินการต่อไปได้ หลังจากที่หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิกประมวลผลแล้วก็จะส่งข้อมูลมายังส่วนเชื่อมต่อรีจิสเตอร์ภายในซีพียู เพื่อติดต่อกับส่วนอื่น ๆ ต่อไป

การทำงานของซีพียูมีด้วยกัน 2 จังหวะคือ เฟตช์ (fetch) และเอ็กซีคิวต์ (executed) โดยการทำงานจะเริ่มจากการเฟตช์ ซึ่งก็คือการเรียกหรือการเข้าถึงคำสั่ง แล้วทำการถอดรหัสเป็นภาษาเครื่องเพื่อเตรียมประมวลผล จากนั้นจะเป็นจังหวะของการเอ็กซีคิวต์ ซึ่งก็คือการกระทำตามคำสั่งที่กำหนดให้จนเสร็จสิ้น

การที่จะระบุว่าไมโครคอนโทรลเลอร์มีขีดความสามารถในการประมวลผลเป็นอย่างไรจะพิจารณาที่ความสามารถในการประมวลผลข้อมูลของซีพียู หากซีพียูสามารถประมวลผลข้อมูลได้สูงสุด 8 บิต นั่นคือไมโครคอนโทรลเลอร์นี้เป็นแบบ 8 บิต (8-bit core) แต่ซีพียูในไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่บางตัวมีขนาด 8 บิตแต่สามารถประมวลผลกับข้อมูล 16 บิตได้ ทำให้ในบางครั้งผู้ผลิตจึงระบุออกมาว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนี้ทำงานกับข้อมูล 16 บิต อาจกล่าวได้ว่าเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิตเทียม เพราะถ้าหากเป็นแบบ 16 บิตแท้ ซีพียูต้องรองรับข้อมูลได้เต็ม 16 บิตหรือถ้าอ่านในเอกสารข้อมูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนั้น ๆ จะต้องระบุว่าเป็น 16-bit core ดังนั้นจึงต้องพิจารณารายละเอียดตรงส่วนนี้ให้ดี

4.5.2 หน่วยความจำ

ในไมโครคอนโทรลเลอร์จะประกอบด้วยหน่วยความจำ 3 แบบคือ หน่วยความจำโปรแกรม (program memory) , หน่วยความจำข้อมูลแรม (RAM data memory) และหน่วยความจำข้อมูลอีพรอม (EEPROM data memory)

4.5.3 หน่วยความจำโปรแกรม

หน่วยความจำโปรแกรมเป็นที่สำหรับเก็บข้อมูลคำสั่งของโปรแกรมควบคุมที่ผู้พัฒนาเขียนขึ้นหรือเรียกว่า โปรแกรมมอนิเตอร์ (monitor program) ซีพียูจะเข้ามาติดต่อเพื่ออ่านข้อมูลรหัสคำสั่งจากหน่วยความจำในส่วนนี้แล้วนำไปประมวลผลเพื่อควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดต่อไป เรียกได้ว่ามีความสำคัญเท่า ๆ กับซีพียูเลยทีเดียว หน่วยความจำโปรแกรมนี้มักมีขนาดใหญ่ และถ้ายังมีขนาดมากเท่าใด ก็จะสามารถบรรจุโปรแกรมที่มีความซับซ้อนหรือสามารถเก็บตารางข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลได้มากตาม โดยทั่วไปมีความจุไม่น้อยกว่า 512 ไบต์ แต่จะให้ดีกว่ามีความจุ 1 กิโลไบต์ขึ้นไป จึงจะช่วยให้การเขียนโปรแกรมควบคุมอิสระเพิ่มมากขึ้น ขนาดของหน่วยความจำโปรแกรมจะแปรตามความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี มีการพัฒนาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์มีความจุของหน่วยความจำโปรแกรมสูงขึ้นเรื่อย ๆ เป็น 4 , 8 16 , 32 และ 64 กิโลไบต์ และยังไม่สิ้นสุดเท่านี้ เชื่อว่าต้องมีการพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความจุของหน่วยความจำโปรแกรมสูงเป็นหลักร้อยกิโลไบต์หรือหลักเมกะไบต์ในที่สุด

ชนิดของหน่วยความจำโปรแกรมที่ใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์(นับถึงปี 2002) มีอยู่ 3 แบบที่นิยมกันคือ แบบอีพรอม (EPROM : Erasable Programmable Read-Only Memory) , แบบอีอีพรอม (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) และแบบแฟลช (flash) ความแตกต่างอยู่ที่จำนวนครั้งในการลบและเขียนข้อมูลทับลงไปใหม่ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

แบบอีพรอม ยังแบ่งเป็น 2 แบบคือแบบโปรแกรมได้หลายครั้งและแบบโปรแกรมได้ครั้งเดียวถ้าหากเป็นแบบโปรแกรมได้หลายครั้งบนตัวถังของไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีหน้าตาต่างกระจกติดอยู่สามารถมองเห็นชิปภายในได้ เวลาลบต้องลบด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต จำนวนรอบในการโปรแกรมใหม่อยู่ระหว่าง 10-100

ครั้ง แต่ถ้าเป็นแบบโปรแกรมได้ครั้งเดียวหรือ OTP (One-Time Programmable) จะไม่สามารถลบได้ ตัวถังของมันจะปิดมิดชิดเหมือนกับไอซีธรรมดา

แบบอีอีพรอม หน่วยความจำแบบนี้จะลบและเขียนใหม่ได้ด้วยสัญญาณไฟฟ้า ในอดีตเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากสามารถลบและเขียนใหม่ได้เป็นหลักร้อยรอบขึ้นไป ในบางตระกูลถึง 1 ล้านครั้ง แต่ในปัจจุบันแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วเนื่องจากต้นทุนสูง

แบบแฟลช หน่วยความจำโปรแกรมชนิดนี้สามารถลบและเขียนได้ด้วยสัญญาณไฟฟ้า แตกต่างกับแบบอีอีพรอมในเชิงการใช้งานตรงที่กระบวนการลบข้อมูลจะต้องลบทั้งหมด หน่วยความจำโปรแกรมแบบนี้ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากราคาไม่สูง และสามารถโปรแกรมได้เป็นร้อยครั้งขึ้นไป แต่โดยปกติมักเริ่มที่ 1,000 ครั้งในบางรุ่นสูงเป็นหมื่นครั้งและเป็นแสนครั้งก็มีขึ้นอยู่กับแรงดันที่ใช้ในการโปรแกรมขนาดข้อมูลของหน่วยความจำโปรแกรมขึ้นอยู่กับผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ ยกตัวอย่างในไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 , 68HC05 , 68HC08 , 68HC11 ขนาดของหน่วยความจำโปรแกรมเป็น 8 บิต ถ้าเป็นตระกูล PIC จะเป็น 12 และ 14 บิต ถ้าเป็นตระกูล AVR , 68HC12 จะเป็นขนาด 16 บิต แต่ขนาดของหน่วยความจำโปรแกรมไม่ได้เป็นตัวระบุความสามารถในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ ยกตัวอย่าง PIC กับ AVR ต่างมีขนาดของหน่วยความจำโปรแกรมสูงกว่า 8 บิต แต่ทั้งคู่ต่างเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ทั้งนี้เพราะซีพียูเป็นแบบ 8 บิต ขนาดของหน่วยความจำจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการของหน่วยความจำโปรแกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นั้น ๆ

4.5.4 หน่วยความจำข้อมูลแรม

เป็นหน่วยความจำที่ต้องมีในไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกตัว เพราะใช้เป็นพื้นที่สำหรับเก็บข้อมูลทั้งในระหว่างและหลังจากการประมวลผล ยังมีมากยิ่งช่วยให้การทำงานสะดวก เพราะหน่วยความจำแรมมีอัตราเร็วในการอ่านเขียนสูงมาก และไม่จำกัดจำนวนรอบในการอ่านเขียน ในพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลแรมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของข้อมูลทั่วไปสำหรับเก็บค่าตัวแปร และส่วนของรีจิสเตอร์ โดยปกติแล้วหน่วยความจำข้อมูลแรมจะมีความจุไม่มากเมื่อเทียบกับหน่วยความจำโปรแกรมในบางตัวอยู่ในหลักสิบบิต แต่ถ้าไมโครคอนโทรลเลอร์มีความสามารถสูงขึ้น ความจุของหน่วยความจำข้อมูลแรมจะเพิ่มมากขึ้นตาม ทั้งนี้เพราะต้องเพิ่มในส่วนของรีจิสเตอร์ตามความสามารถที่สูงขึ้นของไมโครคอนโทรลเลอร์

4.5.5 หน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม

เป็นหน่วยความจำข้อมูลพิเศษที่อยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์บางเบอร์ บางรุ่น บางตระกูลไม่มี ใช้สำหรับเก็บข้อมูลที่ต้องการรักษาไว้เมื่อไม่มีการจ่ายไฟเลี้ยงให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ การติดต่อเพื่ออ่านเขียนจะมีลักษณะเป็นพิเศษขึ้นอยู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละเบอร์ ขนาดของหน่วยความจำแบบนี้มักเท่ากับ 8 บิต ส่วนความจุก็จะแตกต่างกันไป มีตั้งแต่ไม่กี่สิบบิตจนถึงเป็นกิโลบิตการอ่านเขียนหน่วยความจำแบบนี้จะใช้สัญญาณไฟฟ้าทั้งหมด และสามารถรักษาข้อมูลล่าสุดไว้ แม้ว่าจะไม่มีการจ่ายไฟเลี้ยงให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วก็ตาม สำหรับจำนวนรอบในการเขียนโดยปกติอยู่ในหลักล้านครั้งขึ้นไป

4.5.6 รีจิสเตอร์ (Register)

เป็นหน่วยความจำข้อมูลพิเศษที่มีบทบาทสูงมากในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถที่จะอ่านและเขียนข้อมูลได้ตลอดเวลา จนกว่าจะหยุดจ่ายไฟเลี้ยงให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ หน้าที่หลักคือ ใช้เก็บข้อมูลในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยข้อมูลที่เก็บนี้มีทั้งข้อมูลแสดงสถานะการทำงาน ข้อมูลสำหรับควบคุมการทำงาน โมดูลย่อยต่าง ๆ ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อมูลที่รับเข้ามาจากพอร์ตอินพุต ข้อมูลที่ต้องการส่งออกไปยังอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตเอาต์พุต โดยข้อมูลแต่ละประเภทก็จะถูกจัดเก็บลงในรีจิสเตอร์ที่แตกต่างกันตามหน้าที่การทำงาน หน่วยความจำที่นำมาใช้เป็นรีจิสเตอร์มีด้วยกัน 2 ลักษณะขึ้นอยู่กับสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ หากเป็นแบบพรินซ์ตัน (Princeton) รีจิสเตอร์จะมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน ส่วนแรกจะอยู่ร่วมกับซีพียูหรือเรียกว่า รีจิสเตอร์ซีพียู ส่วนที่สองจะอยู่แยกต่างหาก ซึ่งมักเป็นรีจิสเตอร์ควบคุมพอร์ตอินพุตเอาต์พุตและรีจิสเตอร์แสดงสถานะ แต่ในสถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด (Harvard) จะใช้บางส่วนของหน่วยความจำข้อมูลรวมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์

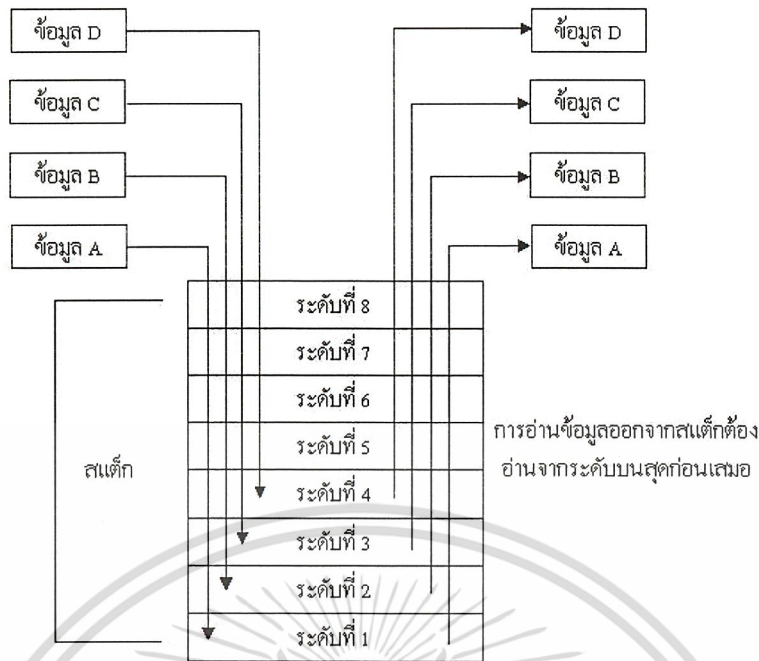
อย่างไรก็ตาม ข้อมูลในรีจิสเตอร์จะคงอยู่ตราบเท่าที่ยังจ่ายไฟเลี้ยงให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ซีพียูสามารถอ่านเขียนรีจิสเตอร์ได้ตลอดเวลาเท่ากับอายุการใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์อาจกล่าวได้ว่ารีจิสเตอร์คือหน่วยความจำข้อมูลที่มีการระบุชื่อชัดเจน มีแอดเดรสและฟังก์ชันการทำงานที่เฉพาะเจาะจงตามที่กำหนดโดยผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์

4.5.7 รีจิสเตอร์ตัวนับโปรแกรมหรือโปรแกรมเคาน์เตอร์ (PC)

การที่ซีพียูสามารถติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมเพื่ออ่านข้อมูลคำสั่งได้อย่างถูกต้องเป็นผลมาจากรีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษตัวหนึ่งคือ รีจิสเตอร์ตัวนับโปรแกรม หรือ PC (Program Counter) โดย PC จะเป็นตัวชี้ตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำโปรแกรมที่ซีพียูจะต้องไปกระทำในลำดับถัดไป โดยปกติแล้วค่าของ PC จะเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติขึ้นอยู่กับผลการทำงานที่เกิดขึ้นในไมโครคอนโทรลเลอร์บางตระกูลสามารถเข้าถึงรีจิสเตอร์ PC เพื่อทำการอ่านเขียนได้ ในบางตระกูลก็ไม่สามารถทำได้ขนาดของรีจิสเตอร์ PC ขึ้นอยู่กับความจุของหน่วยความจำโปรแกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ยกตัวอย่างใน MCS-51 สามารถมีหน่วยความจำโปรแกรมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์ หรือ 65,536 ตำแหน่ง ขนาดของรีจิสเตอร์ PC จึงมีได้เท่ากับ 16 บิต ส่วนในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC อนุกรม 14 บิต มีหน่วยความจำโปรแกรมได้สูงสุด 8 กิโลเวิร์ด หรือ 8,192 ตำแหน่ง รีจิสเตอร์ PC จึงมีขนาด 13 บิต

4.5.8 สแต็กในไมโครคอนโทรลเลอร์

สแต็ก(stack) เป็นหน่วยความจำส่วนพิเศษที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกตัวต้องมี โดยหน้าที่ของมันคือเก็บข้อมูลที่ยังต้องการอยู่ของรีจิสเตอร์ และเมื่อข้อมูลนั้นถูกนำมาเก็บไว้ในสแต็กแล้วก็สามารถที่จะเปลี่ยนข้อมูลในรีจิสเตอร์ตัวนั้น ๆ ได้ทันที หลังจากที่ทำงานเรียบร้อยแล้วจึงกลับมาอ่านข้อมูลเดิมกลับจากสแต็ก ดังมีกระบวนการทำงานแสดงในรูปที่ 4.17 การเก็บข้อมูลของสแต็กจะมีลักษณะเป็นระดับหรือเป็นชั้น ข้อมูลที่เก็บเข้ามาก่อนจะต้องอ่านออกทีหลังหรือเป็นแบบ FILO(First In Last Out) และจำนวนระดับหรือจำนวนชั้นของสแต็กก็มีจำกัด



รูปที่ 4.17 แสดงกลไกการทำงานของสเด็กอย่างง่าย

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ส่วนใหญ่จะมีความจุของสเด็กไม่น้อยกว่า 8 ระดับ การที่ยังมีขนาดของสเด็กมาก หรือมีจำนวนระดับมาก ก็จะช่วยทำให้การทำงานสะดวกขึ้น เพราะในการประมวลผลมีโอกาสมากที่ต้องพักข้อมูลในรีจิสเตอร์หลักที่สำคัญเพื่อไปทำงานอื่นก่อน หลังจากนั้นจึงจะกลับมาทำงานต่อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานที่มีการอินเทอร์รัปต์หรือขัดจังหวะ ซึ่พียู บ่อยๆ รวมถึงงานที่มีการกระโดดไปทำงานที่โปรแกรมย่อยจำนวนมาก เพราะเมื่อต้องกระโดดออกจากโปรแกรมหลักไปทำงานที่โปรแกรมย่อย ก็ต้องเก็บข้อมูลของรีจิสเตอร์หลักที่ทำงานค้างอยู่ใน สเด็ก หลังจากนั้นกระโดดไปที่โปรแกรมย่อยที่มีความต้องการเขียนข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ตัวเดียวกันนี้ หลังจากทำงานแล้วจึงกลับมาที่โปรแกรมหลัก แล้วอ่านค่าเดิมก่อนหน้านี้กลับมาทำงานต่อ ทว่า ในงานบางลักษณะมีการกระโดดไปทำงานยังโปรแกรมย่อยซ้อนกัน 2-3 ชั้นทำให้ต้องมีการเก็บข้อมูลไว้ในสเด็กมากขึ้นหากความจุของ สเด็กมีน้อยก็จะไม่สามารถรองรับการทำงานในลักษณะนี้ได้

ขนาดของสเด็กโดยปกติจะต้องเท่ากับขนาดของรีจิสเตอร์ตัวนับโปรแกรม หรือ PC เพราะมีโอกาสที่จะต้องเก็บค่าของ PC ไว้ในสเด็กด้วย

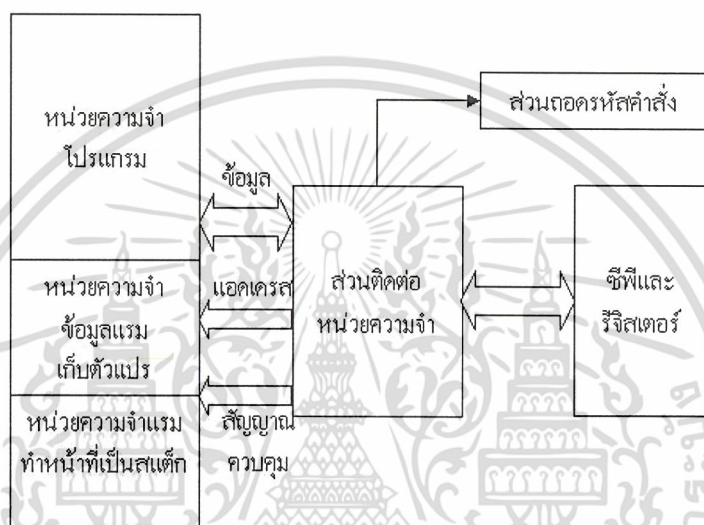
4.5.9 สถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์

เป็นที่ยอมรับกันว่าสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์มีด้วยกัน 2 แบบ คือ ฟรินซ์ตัน หรือ ฟอนนิวแมน (Von Neumann) และฮาร์วาร์ด ดังในรูปที่ 4.18 และ 4.19 แสดงการจัดสรรหน่วยความจำและรีจิสเตอร์ในสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้ง 2 แบบพิจารณาดังในรูปที่ 4.18 ก่อนเป็นการจัดสรรในสถาปัตยกรรมแบบฟรินซ์ตัน จะเห็นได้ว่ามีโครงสร้างที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน ส่วนของหน่วยความจำโปรแกรมกับหน่วยความจำข้อมูลจะได้รับการจัดสรรให้อยู่รวมกัน ติดต่อกับ CPU ผ่านส่วนจัดการเชื่อมต่อ

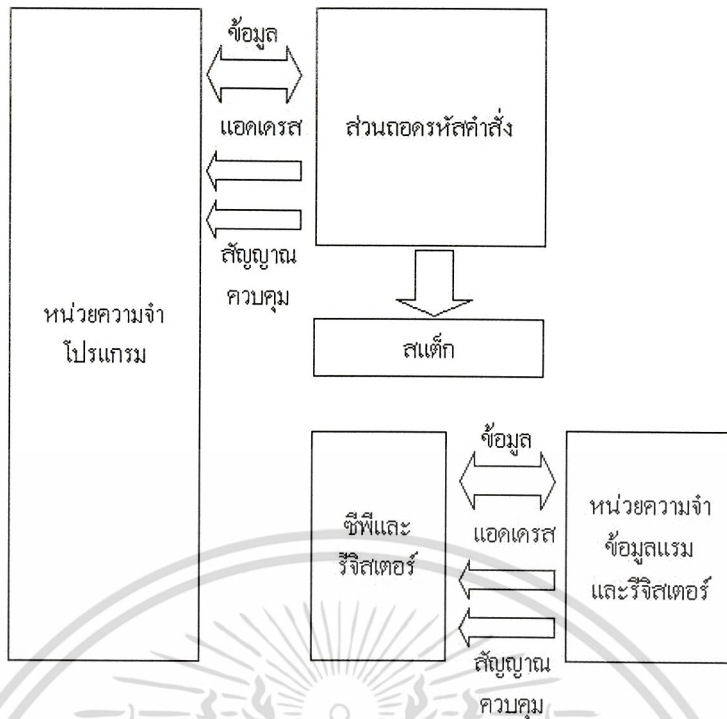
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยความจำ และภายใน CPU จะมีรีจิสเตอร์บรรจุอยู่ ข้อดีของสถาปัตยกรรมคือ ออกแบบง่าย เพราะหน่วยความจำทั้งหมดอยู่รวมกัน สามารถเข้าถึงได้ง่าย หน่วยความจำแรมหากมีขนาดใหญ่เพียงพอจะสามารถเก็บได้ทั้งโปรแกรมควบคุมการทำงานและข้อมูลของตัวแปรในการประมวลผล ข้อดีของสถาปัตยกรรมนี้คือ ความเร็วในการประมวลผล

เนื่องจากหน่วยความจำอยู่รวมกันจึงต้องติดต่อหน่วยความจำ โปรแกรมสลับกับหน่วยความจำข้อมูลส่งผล CPU ต้องใช้จำนวนไซเคิลในการทำงานมากแต่ข้อดีนี้สามารถชดเชยได้ หากไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำงานกับสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่สูงมากได้



รูปที่ 4.18 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบพริ้นต์ดีนหรือฟอน นิวแมน



รูปที่ 4.19 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์วาร์ด

ในขณะที่สถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 4.19 จะแยกส่วนของหน่วยความจำข้อมูลและ รีจิสเตอร์ออกจากหน่วยความจำโปรแกรมทำให้ไซเกิลการทำงานลดลงเนื่องจากสามารถติดต่อหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลได้เร็วกว่า นั่นคือการทำงานได้เร็วกว่าแบบ ฟรินชด์ัน นอกจากนั้นสถาปัตยกรรมแบบนี้ในขณะที่ CPU กำลังเอ็กซิคิวต์คำสั่งในปัจจุบันอยู่สามารถที่จะเฟตซ์คำสั่งถัดไปได้ ยังเป็นการเพิ่มความเร็วในการทำงานให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

4.5.10 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถทำงานได้เมื่อจ่ายไฟเลี้ยงและต่อวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้แก่นั่น จากนั้น CPU ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ จะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมเพื่ออ่านข้อมูลคำสั่งที่บรรจุอยู่ในหน่วยความจำโปรแกรม

นั่นหมายความว่าต้องมีการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำโปรแกรมก่อน โดยไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละเบอร์จะมีรูปแบบของข้อมูลคำสั่งที่แตกต่างกัน ซึ่งจะต้องอาศัยกระบวนการเขียนโปรแกรม ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมสามารถแบ่งได้ 2 ระดับ คือ ภาษาสูง (high language) และภาษาแอสเซมบลี (assembly language) โดยปกติไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาแอสเซมบลี เนื่องจากสามารถทำงานได้รวดเร็วผ่านกระบวนการแปลงข้อมูลคำสั่งเป็นข้อมูลเลขฐานสิบหกเพื่อทำงานตามคำสั่งเพียง 1 ขั้นตอนคือ แปลงจากภาษาแอสเซมบลีเป็นข้อมูลเลขฐานสิบหก หรือที่เรียกว่า ออปโค้ด (Opcode) แต่ข้อเสียของการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลีคือ ผู้เขียนต้องทำความเข้าใจในชุดคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นั้นๆ และเมื่อเปลี่ยนเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็ต้องทำการเรียนรู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทำความเข้าใจชุดคำสั่งใหม่ ซึ่งอาจทำให้เสียเวลามาก และการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา แอสเซมบลี ผู้เขียนต้องมีทักษะในการเขียนโปรแกรมสูงพอสมควร และเข้าใจถึงสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอย่างดี

ในขณะที่การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาสูง อย่าง ภาษาซี ภาษาเบสิก ต้องผ่านกระบวนการที่เรียกว่า คอมไพล์ (compile) เพื่อแปลงภาษาระดับสูงเหล่านั้นเป็นภาษาเครื่องหรือออปโค้ดของไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์นั้นๆเสียก่อน และโปรแกรมที่ใช้ในการคอมไพล์นั้นเรียกว่า คอมไพเลอร์ (compiler) มักจะมีราคาแพง เมื่อใช้เครื่องมือทาง software ตัวนี้ ทำให้ผู้เขียนโปรแกรมอาจไม่จำเป็นต้องศึกษาสถาปัตยกรรมและชุดคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นั้นอย่างลึกซึ้งเท่ากับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลี ทั้งนี้เพราะคอมไพเลอร์ จะทำหน้าที่ในส่วนนี้แทน ดังนั้นเมื่อผู้ใช้งานเปลี่ยนเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็เพียงแต่จัดหาโปรแกรมคอมไพเลอร์ที่เหมาะสมมาใช้งาน และศึกษาสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ใหม่อีกเพียงเล็กน้อยก็สามารถใช้งานได้ แต่ข้อเสียของการใช้คอมไพเลอร์คือ ราคาแพง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

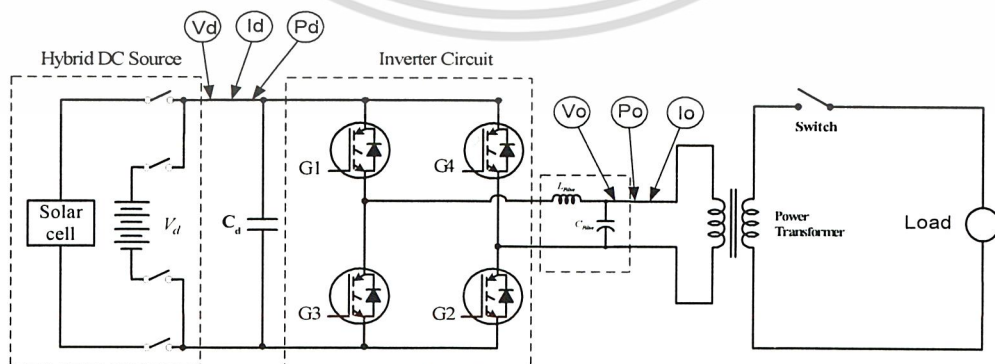
ระบบที่ใช้ในการเชื่อมโยงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับระบบการไฟฟ้า คืออินเวอร์เตอร์โดยใช้สัญญาณควบคุมแบบเอสพีดับเบิ้ลยูเอ็ม ที่ได้ออกแบบไว้เป็นการเชื่อมโยงชุดแบตเตอรี่ 48 โวลต์ 12 แอมแปร์-ชั่วโมง เข้ากับระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต เพื่อทำการช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดร่วมกับระบบการไฟฟ้า ซึ่งในการทดลองจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. การทดสอบหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัดต่างๆ
2. การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบรวมทั้งจ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัดต่างๆ
3. ผลการทดสอบจ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัดต่างๆร่วมกับระบบการไฟฟ้า

ซึ่งในการทดลองใช้เครื่องมือดังนี้

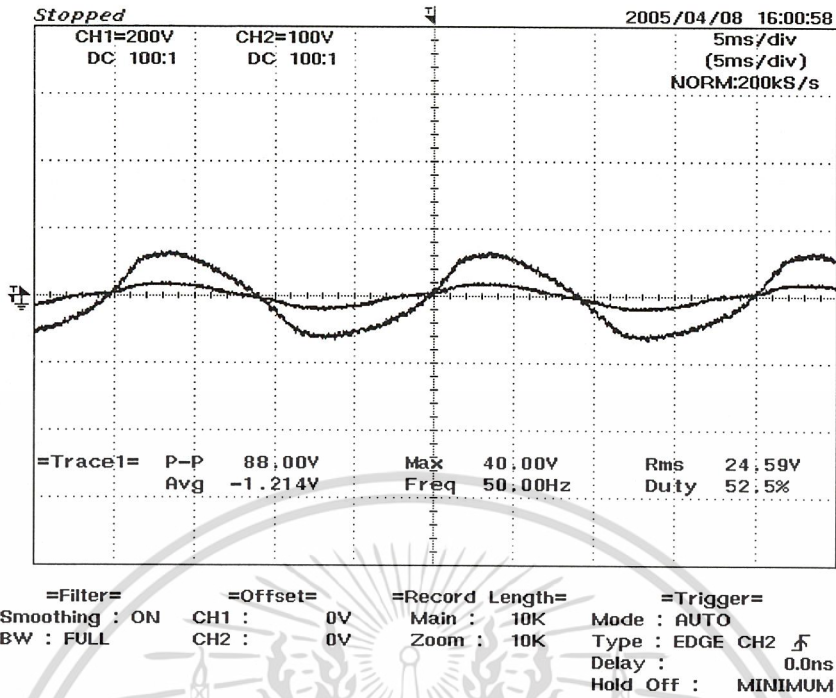
1. ดิจิตอลออสซิลโลสโคปรุ่น DL 8 bit 200 Ms/s 150 MHz YOGOGAWA ใช้ในการวัดรูปคลื่นสัญญาณการทดลอง
2. FLUKE 39 POWER ใช้ในการบันทึกค่า กระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังในส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับและรูปคลื่นที่ได้จากอินเวอร์เตอร์
3. MULTIMETER รุ่น 973 A ของ HEWLETT PACKARD ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านไฟตรง
4. DIFFERENTIAL PROBE MODEL 700925 ใช้ในการวัดเฟสของการไฟฟ้าและเฟสของอินเวอร์เตอร์
5. Professional Digital Multimeter UNI-T-UT70A ใช้ในการวัดค่ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

5.1 การทดลองที่ 1 การทดสอบหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์กับโหลดหลอดไฟขนาด 100,200 และ 300 ซึ่งมีวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.1 และผลการทดลองดังต่อไปนี้

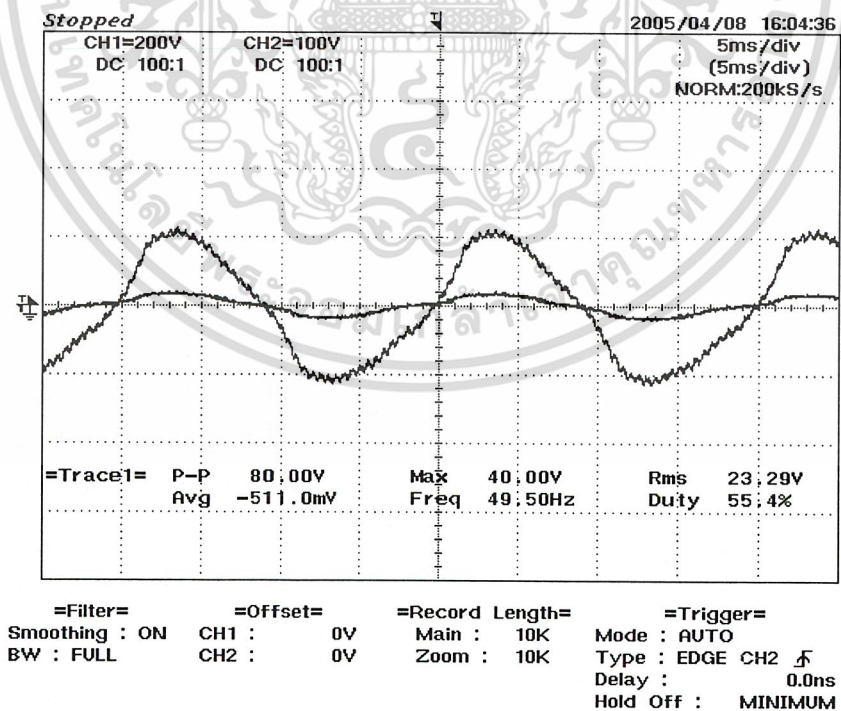


รูปที่ 5.1 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

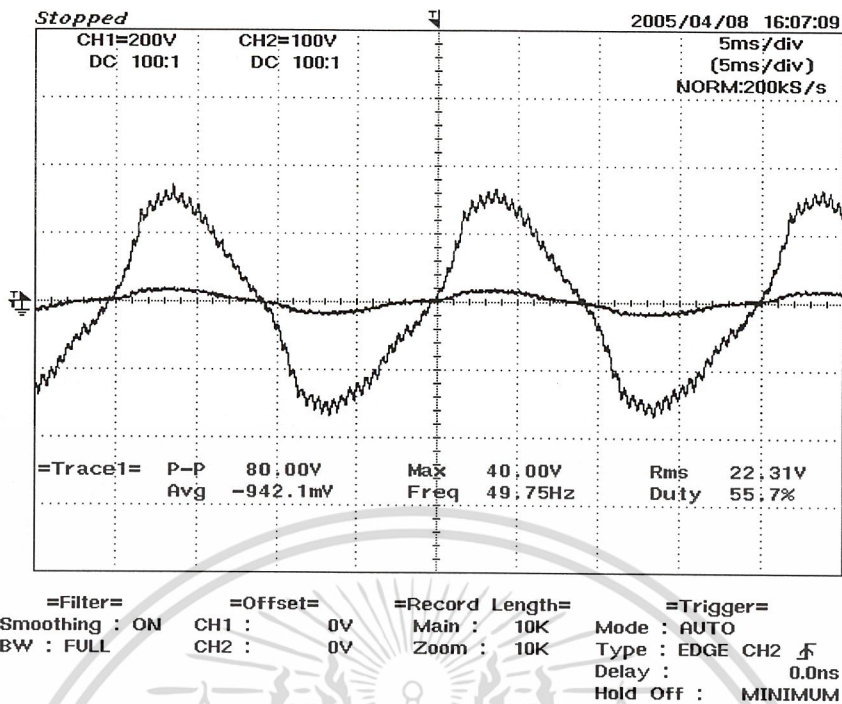


รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 100 วัตต์



รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่อินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 300 วัตต์

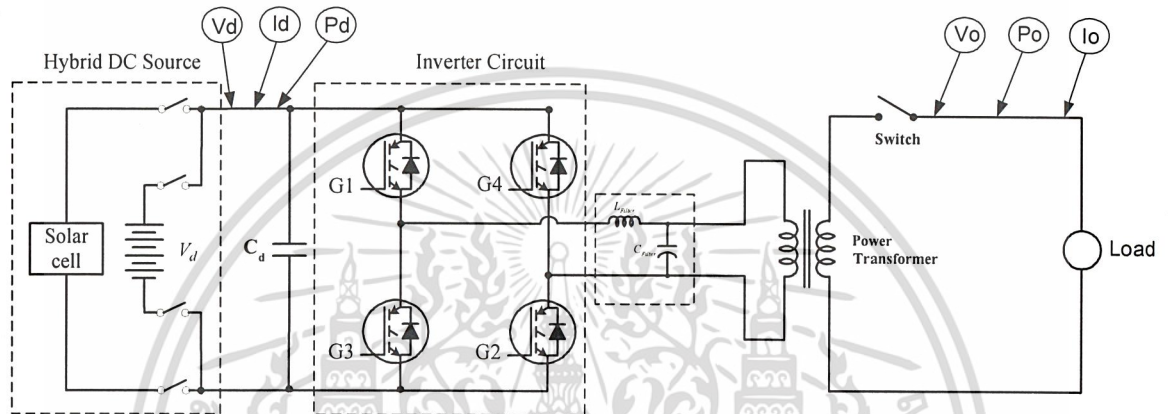
โหลด	100 วัตต์	200 วัตต์	300 วัตต์
V_d (V)	49.8	49.8	49.8
I_d (A)	2.72	4.30	5.97
P_d (W)	135.5	214.1	297.3
V_{INV} (V)	24.32	23.04	22.09
I_{INV} (A)	4.26	7.26	10.36
P_{INV} (W)	100.5	166	226
THD_i (%)	12.7	13.2	14.7
THD_v (%)	9.9	12.2	13.9
P_{loss} (W)	35	48.1	71.3
S_o (VA)	104	167	229
PF.	0.97	0.99	0.99
η (%)	74.2	77.5	80.5

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์กับโหลดหลอดไฟขนาด 100-300 วัตต์

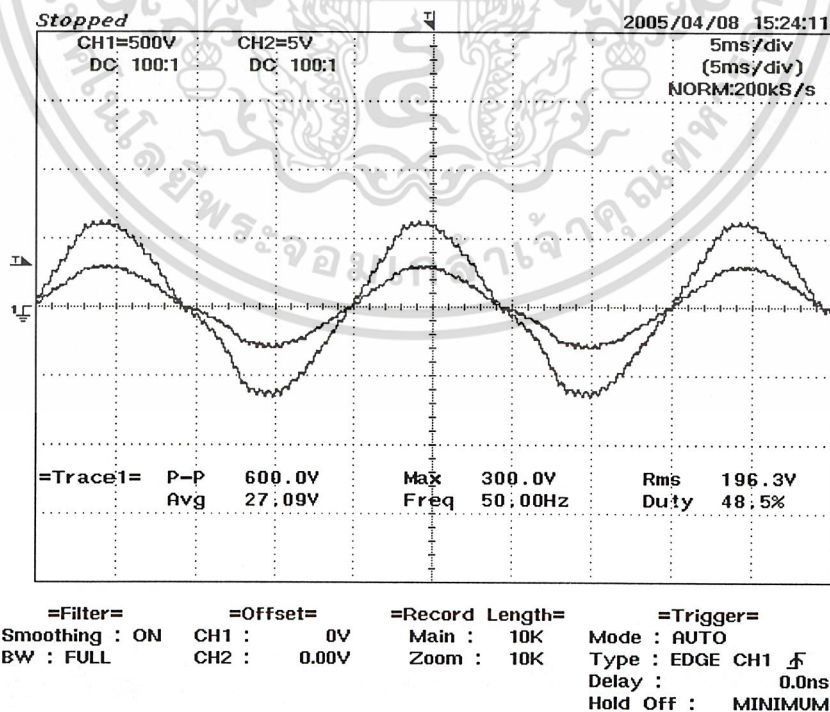
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังเอาต์พุต กำหนดให้แรงดันอินพุตมีค่าคงที่เพื่อทดสอบหาค่ากำลังเอาต์พุต ตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ ทดสอบที่พิกัดโหลด 100 200 และ 300 วัตต์ จากการทดสอบสรุปได้ว่า ค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงขึ้นเมื่อจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นเนื่องจากว่าพิกัดของหม้อแปลงที่ใช้ในการยกกระด้นแรงดันทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงเกินกว่าความจำเป็นที่จะต้องใช้ในการจ่ายโหลดของอินเวอร์เตอร์จึงอาจทำให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นตามโหลดด้วย และค่าของฮาร์มอนิกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนตัวประกอบกำลังก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

5.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบรวมทั้งจ่ายโหลดต่างๆ

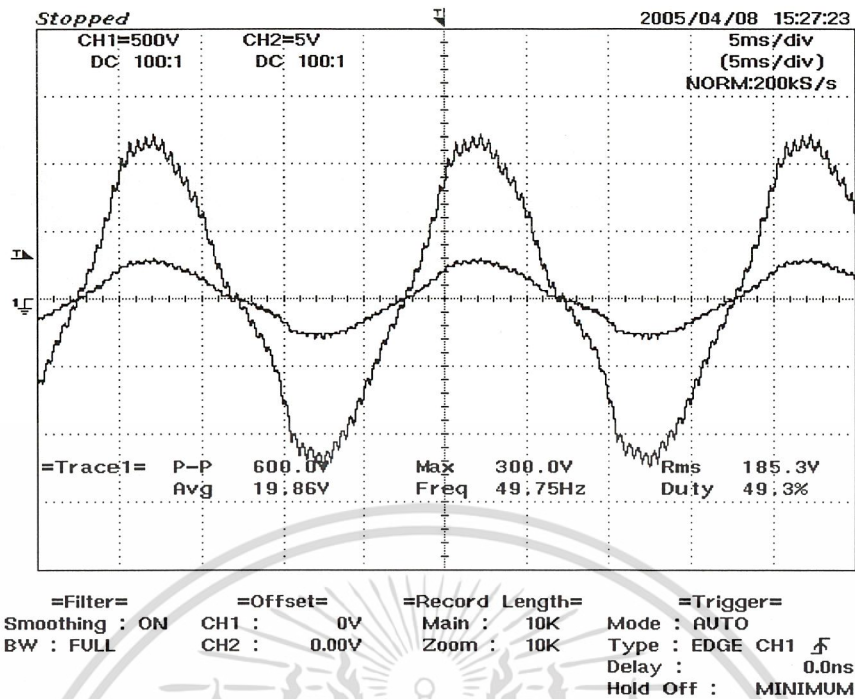


รูปที่ 5.5 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบ

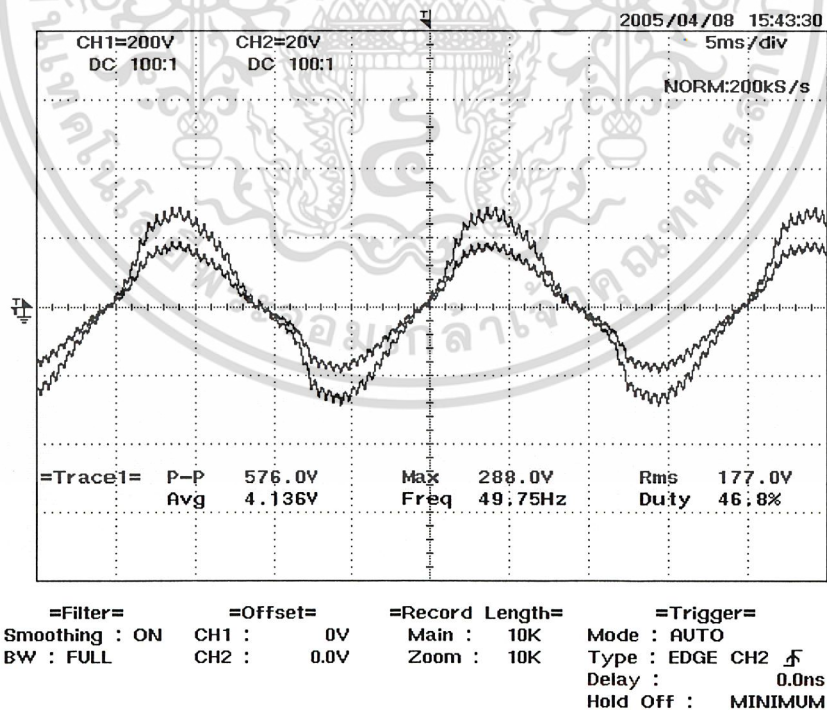


รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของระบบรวมทั้งจ่ายโหลด 100 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของระบบรวมเมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์



รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของระบบรวมเมื่อจ่ายโหลด 300 วัตต์

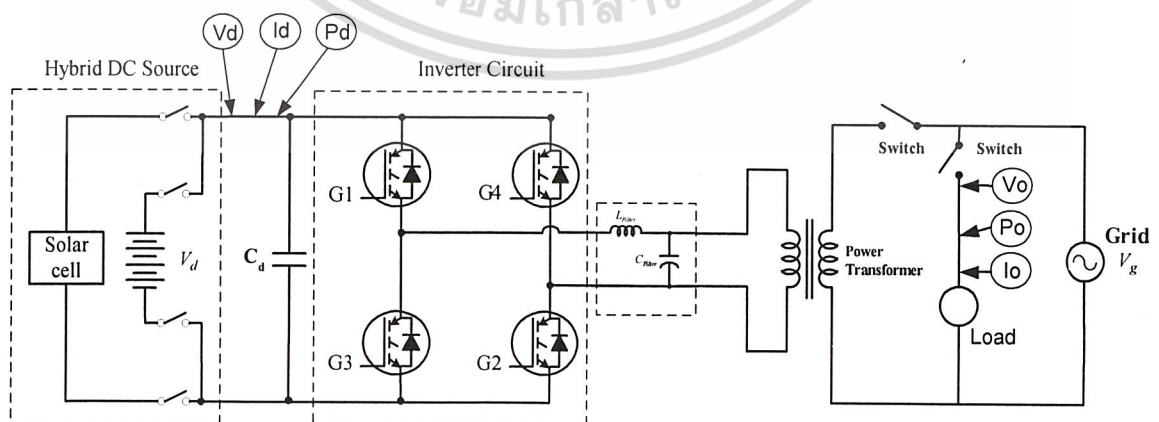
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลด	100 วัตต์	200 วัตต์	300 วัตต์
V_d (V)	49.8	49.8	49.8
I_d (A)	2.72	4.30	5.97
P_d (W)	135.5	214.1	297.3
V_o (V)	198.7	187.6	177.7
I_o (A)	0.39	0.78	1.14
P_o (W)	77.5	146.3	202.6
THD_i (%)	8.7	10.5	12.9
THD_v (%)	9.8	12.2	14.1
P_{loss} (W)	58	67.8	94.7
S_o (VA)	77.5	146.3	202.6
PF.	1	1	1
η (%)	57.2	68.3	71.2

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบรวมทั้งจ่ายโหลดต่างๆ

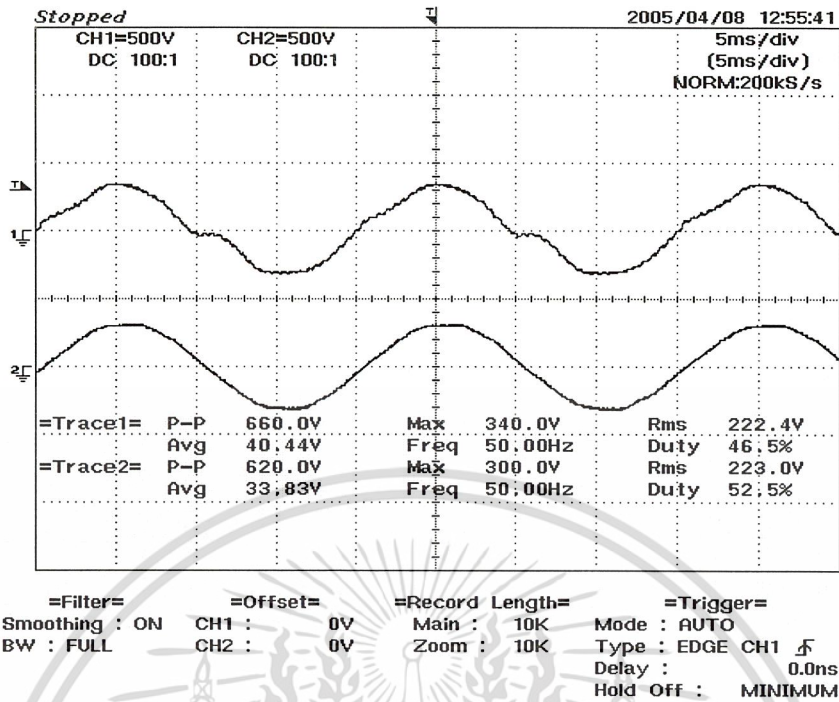
การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบรวม กำหนดให้แรงดันอินพุตมีค่าคงที่เพื่อทดสอบหาค่ากำลังเอาต์พุต ตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพของระบบรวม ทดสอบที่พิกัดโหลด 100, 200 และ 300 วัตต์ จากการทดสอบสรุปได้ว่าค่าประสิทธิภาพของระบบรวมมีค่าสูงขึ้นแต่ค่าของฮาร์มอนิกมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติอาจเกิดจากการสูญเสียต่าง ๆ เช่นเกิดการสูญเสียที่หม้อแปลงหรืออาจเกิดการสูญเสียที่มาจากการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไม่ดีพอจึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบรวมค่อนข้างต่ำประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์

5.3 การทดลองที่ 3 ผลการทดสอบจ่ายโหลดร่วมกับระบบการไฟฟ้า

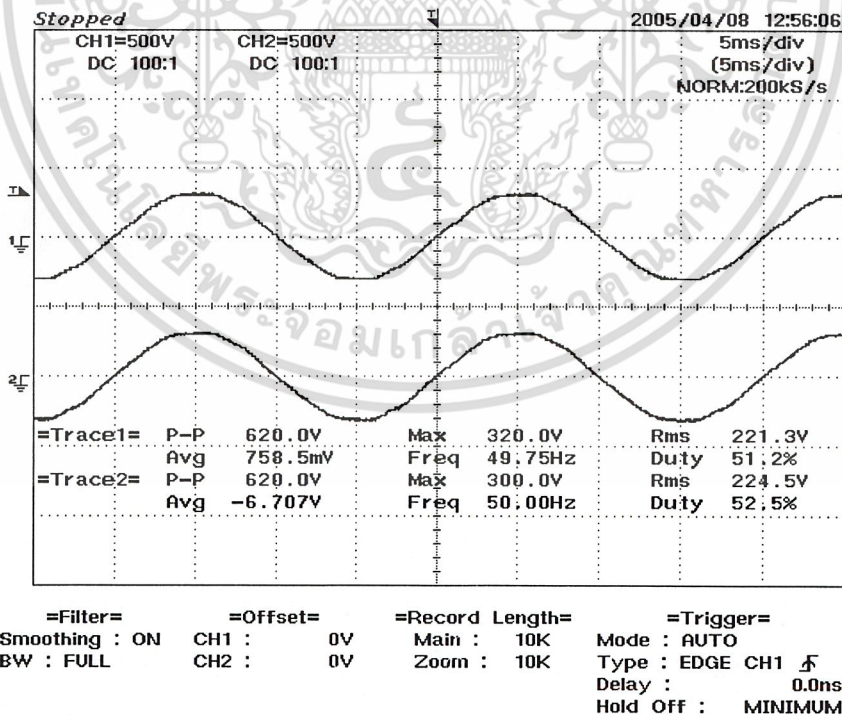


รูปที่ 5.9 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบจ่ายโหลดร่วมกับระบบการไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กับระบบการไฟฟ้ายังไม่ทำการซิงโครไนซ์



รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กับระบบการไฟฟ้าเมื่อทำการซิงโครไนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลด	100 วัตต์	200 วัตต์	300 วัตต์
V_o (V)	221	221	221
I_o (A)	0.018	0.046	0.106
P_o (W)	4	10	23
Q_o (VAR)	0.83	2.02	4.62
S_o (VA)	4.08	10.2	23.46
PF.	0.98	0.98	0.98
THD _v (%)	1.1	1.2	1.3
THD _i (%)	23.6	24.7	25.6

ตารางที่ 5.3 แสดงเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

จากการทดลองวัดค่าต่าง ๆ ของเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในขณะที่เชื่อมโยงกับระบบการไฟฟ้าเพื่อช่วยจ่ายโหลด 100, 200 และ 300 วัตต์ จะพบว่าค่าฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นและกำลังเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าต่ำมาก สรุปได้ว่าสามารถจ่ายโหลดร่วมกับระบบการไฟฟ้าได้จริงแต่สามารถจ่ายโหลดร่วมกับระบบการไฟฟ้าได้ต่ำ การที่เกิฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นอาจจะเป็นผลมาจากค่าฮาร์มอนิกที่มาจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าฮาร์มอนิกรวมเพิ่มขึ้นตาม

โหลด	100 วัตต์	200 วัตต์	300 วัตต์
V_{sys} (V)	220	220	220
I_{sys} (A)	0.396	0.72	1.084
P_{sys} (W)	87	160	238
Q_{sys} (VAR)	4.57	7.2	15.12
S_{sys} (VA)	87.12	160.2	238.48
THD _v (%)	1	1	1
THD _i (%)	5	5	6

ตารางที่ 5.4 แสดงเอาต์พุตของระบบการไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองวัดค่าต่าง ๆ ของเอาต์พุตของระบบการไฟฟ้าในขณะที่เชื่อมโยงกับเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ เพื่อช่วยจ่ายโหลด 100 , 200 และ 300 วัตต์ จะพบว่าค่าฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นและกำลังเอาต์พุตของระบบการไฟฟ้ามีค่าสูงมากใกล้เคียงกับค่าโหลดรวมเป็นผลมาจากประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ต่ำทำให้เมื่อทำการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างสองระบบไม่สมดุลกัน ส่วนการที่เกิดฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นอาจจะเป็นผลมาจากค่าฮาร์มอนิกที่มาจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าฮาร์มอนิกรวมเพิ่มขึ้นตาม

โหลด	100 วัตต์	200 วัตต์	300 วัตต์
V_{sys} (V)	221	221	221
I_{sys} (A)	0.41	0.76	1.181
P_{sys} (W)	91	170	261
Q_{sys} (VAR)	9.55	10.25	12.52
S_{sys} (VA)	91.5	170.2	261.3
THD_v (%)	1	1.2	1.1
THD_i (%)	2.3	2.5	3

ตารางที่ 5.5 แสดงเอาต์พุตของโหลด

จากการวัดค่าต่าง ๆ ของโหลดหลอดไฟฟักัด 100, 200 และ 300 วัตต์ ในขณะที่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ทำการเชื่อมโยงอยู่กับระบบการไฟฟ้า จะพบว่าเมื่อทำการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างสองระบบอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายโหลดได้ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และระบบการไฟฟ้าจ่ายโหลดประมาณ 85 เปอร์เซ็นต์และเกิดการสูญเสียประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 6

บทวิจารณ์และสรุป

จากวัตถุประสงค์และทฤษฎีเบื้องต้น ได้ทำการออกแบบระบบที่ใช้ในการเชื่อมโยงแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงเข้ากับระบบการไฟฟ้าที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ และได้ทำการทดสอบชุดเชื่อมโยงแบบเตอร์รี 48 โวลต์ เข้ากับระบบการไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ จากผลการทดลองและผลการดำเนินงานของโครงการทั้งหมดสรุปได้ว่า ในส่วนของโปรแกรมจะสามารถที่จะเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณ SPWM เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนของวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสได้จริง และสามารถนำสัญญาณดังกล่าวนี้ผ่านวงจร Dead Time และวงจรขับเคลื่อนไปทริก IGBT ทั้ง 4 ตัวได้ โดยมี Dead-Time 4 μs ได้รูปคลื่นไซน์ที่มีฮาร์มอนิกสูงนำไปผ่านวงจรฟิลเตอร์เพื่อกรองฮาร์มอนิก ได้รูปคลื่นไซน์ที่มีฮาร์มอนิก 6.5 % จากนั้นนำไปผ่านหม้อแปลงเพื่อเพิ่มแรงดันให้ได้ 220 โวลต์ เพื่อให้แรงดันมีค่าเท่ากับระบบการไฟฟ้า ทำการตรวจสอบเฟสของอินเวอร์เตอร์และเฟสของระบบการไฟฟ้า เมื่อมีเฟสตรงกันก็ทำการเชื่อมโยงเข้ากับระบบการไฟฟ้า

จากผลการพิสูจน์ทั้งหมดนี้สรุปได้ว่า สามารถทำโครงการนี้ให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามเป้าหมายได้ โดยสามารถที่จะจ่ายโหลดร่วมกับระบบการไฟฟ้าได้ ซึ่งในอนาคตสามารถที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์และสัญญาณรูปคลื่นไซน์ให้อยู่ในมาตรฐานการไฟฟ้าต่อไป

6.1 ข้อดีของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบได้

6.1.1 สามารถต่อกับระบบการไฟฟ้าได้

6.1.2 มีประสิทธิภาพประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัด

6.2 ข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบได้

6.2.1 การสร้างวงจรสัญญาณขับเคลื่อนมีความยุ่งยากและซับซ้อนและเกิดปัญหาในการขับ IGBT

6.2.2 ในการเชื่อมโยงเข้ากับระบบการไฟฟ้ามีขั้นตอนที่ยุ่งยากโดยต้องคำนึงถึงเรื่องขนาดแรงดันและมุมเฟสก่อนทำการเชื่อมโยง

6.3 ปัญหาในระหว่างการทำโครงการ

6.3.1 ด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากผู้ร่วมงานไม่ค่อยมีประสบการณ์ทางด้านในการต่อวงจร จึงทำให้มีปัญหาเกิดขึ้นในช่วงแรก แต่ก็สามารถทำการแก้ไขสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6.3.2 ด้านไมโครคอนโทรลเลอร์เนื่องจากขาดประสบการณ์ในด้านการเขียนโปรแกรมมาก่อนจึงทำให้ช่วงแรกเกิดปัญหาคขึ้น แต่ก็สามารถแก้ไขให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6.3.3 ค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนค่อนข้างมากประมาณ 6.5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 สิ่งที่ต้องการได้รับการพัฒนาต่อไปสำหรับโครงการนี้

- 6.4.1 ควรมีการเพิ่มพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ให้สามารถจ่ายโหลดได้สูงขึ้น
- 6.4.2 ควรมีการเพิ่มความถี่สวิตซ์ซิ่งของสัญญาณ SPWM ให้มากขึ้นเพื่อลดเสียงที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ในวงจร (มากกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่ต้องคำนึงถึงความไวในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์)
- 6.4.3 สามารถที่จะปรับเปลี่ยนมุมที่ใช้ในการเชื่อมโยงกับระบบการไฟฟ้าได้
ควรมีการออกแบบให้สามารถต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยตรงตลอดเวลาโดยนำเสนอเทคนิค Maximum Power Point Tracking
- 6.4.4 ควรมีการเพิ่มอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ของวงจรเพื่อความปลอดภัย
- 6.4.5 ควรจะพัฒนารูปคลื่นไซน์ของเอาต์พุตให้มีค่าฮาร์มอนิกน้อยกว่า 5 %



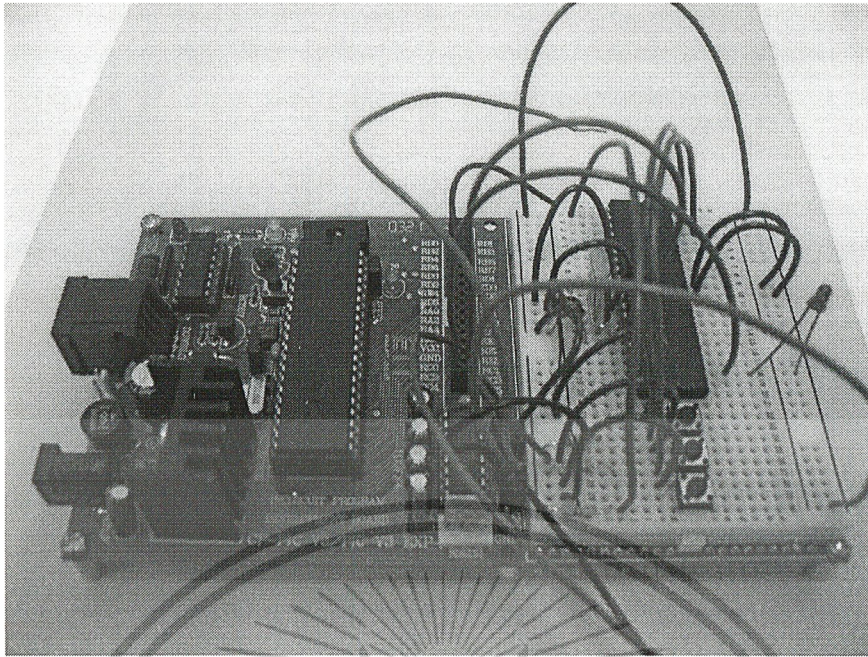
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



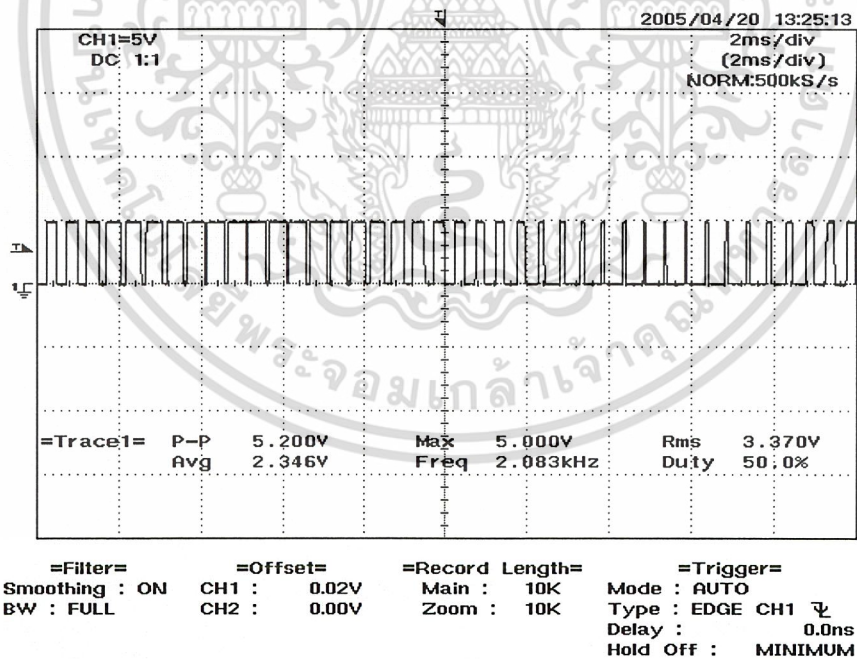
ภาคผนวก ก.

รูปวงจรถอดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

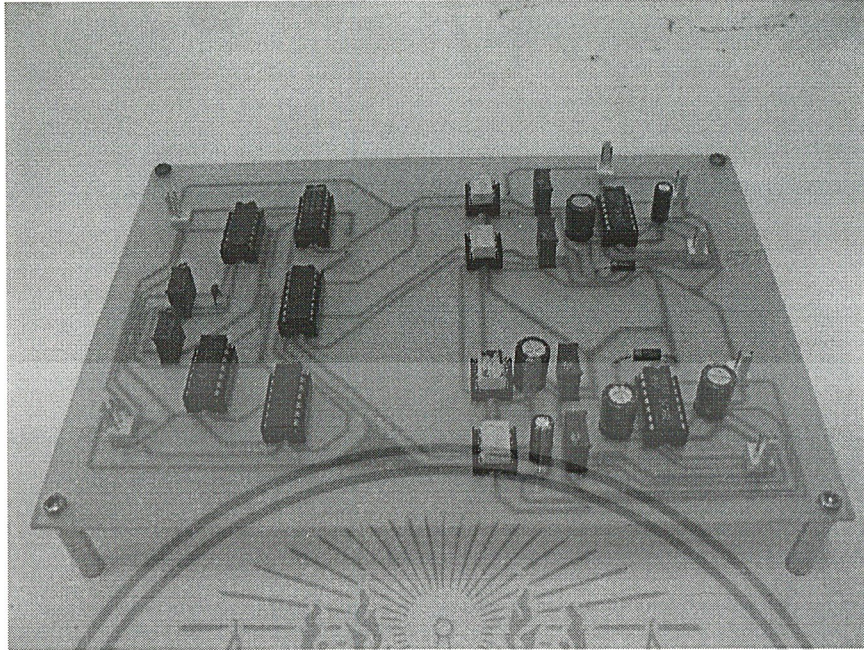


รูปที่ ก-1 รูปวงจรควบคุมรวมของระบบอินเวอร์เตอร์ต่อระบบไฟฟ้า

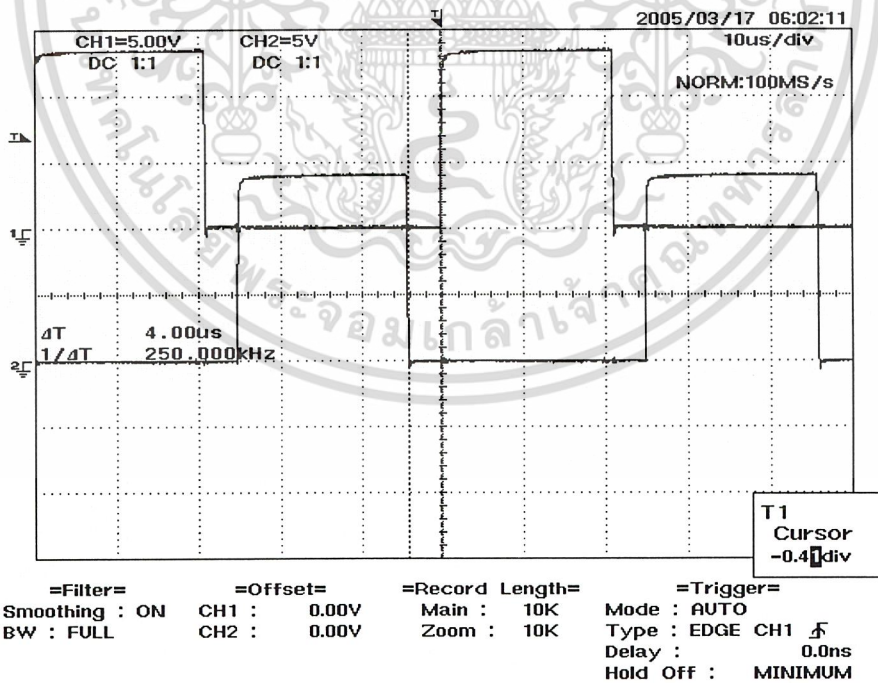


รูปที่ ก-2 สัญญาณอสที่ดับเบิสยูเอ็มที่กำเนิดสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

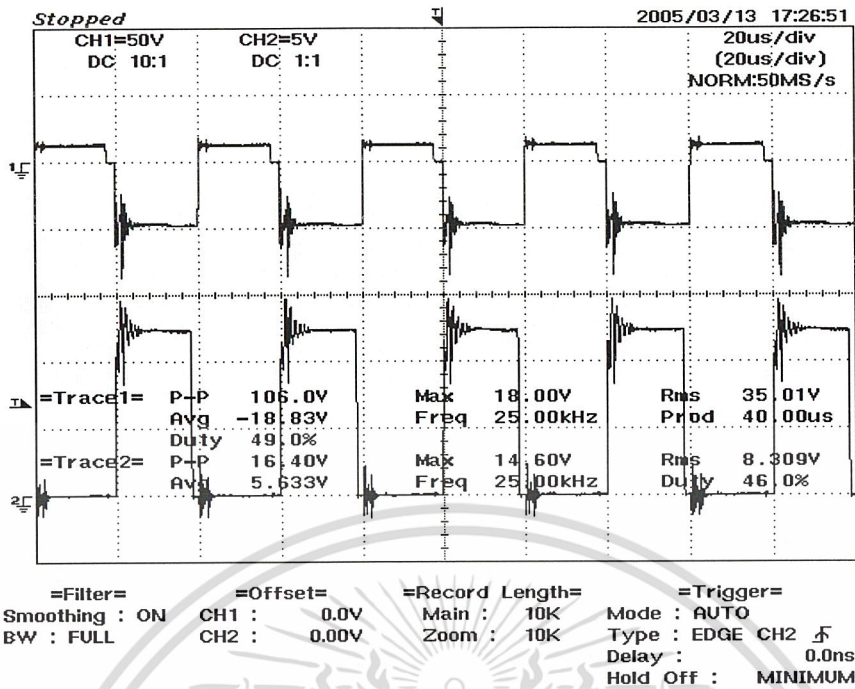


รูปที่ ก-3 วงจร Dead Time และวงจร ขั้วเกิด

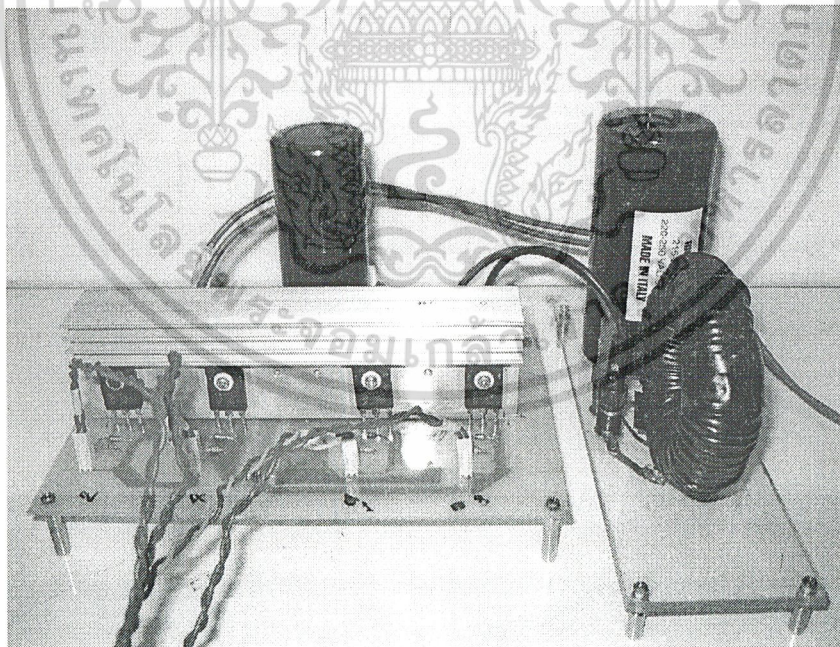


รูปที่ ก-4 สัญญาณขั้วเกิดที่ปรับค่า Dead Time 4 ไมโครวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

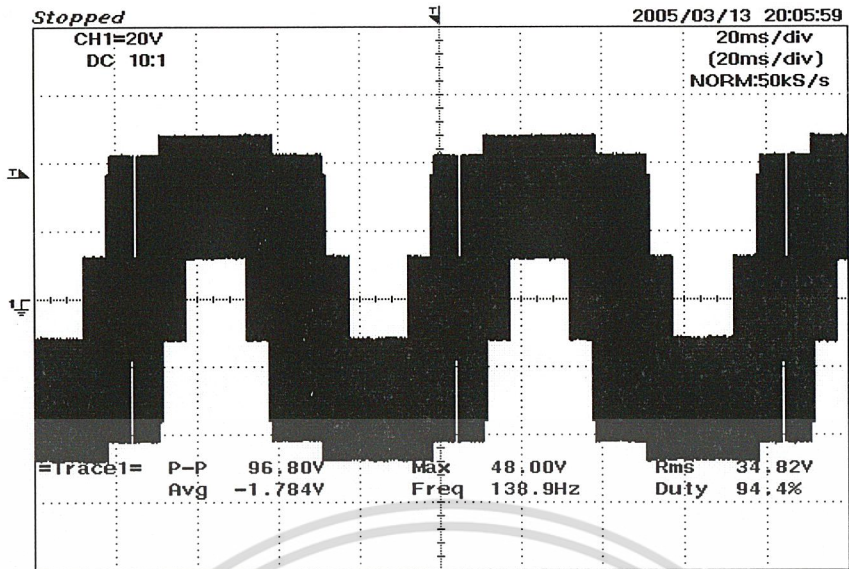


รูปที่ ก-5 สัญญาณที่ออกจากวงจรจับเกต



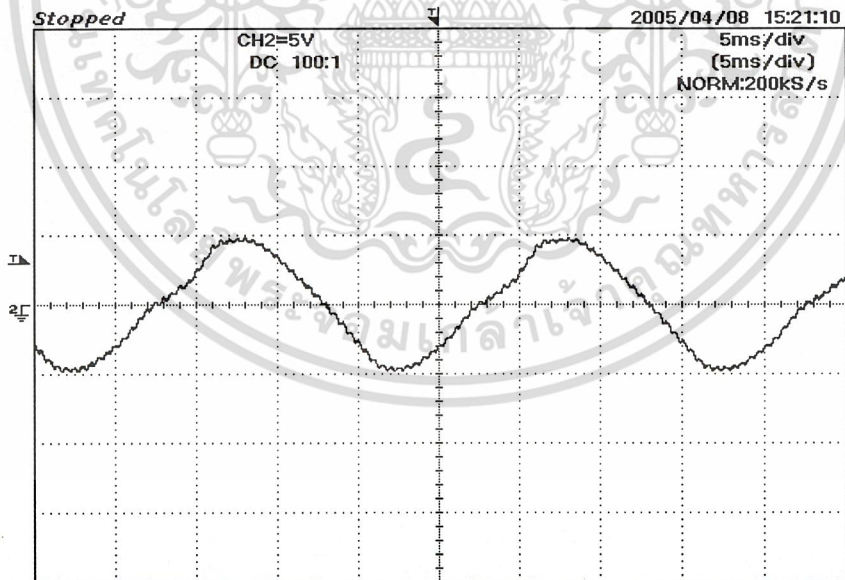
รูปที่ ก-6 วงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0.0V
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 2.5K
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

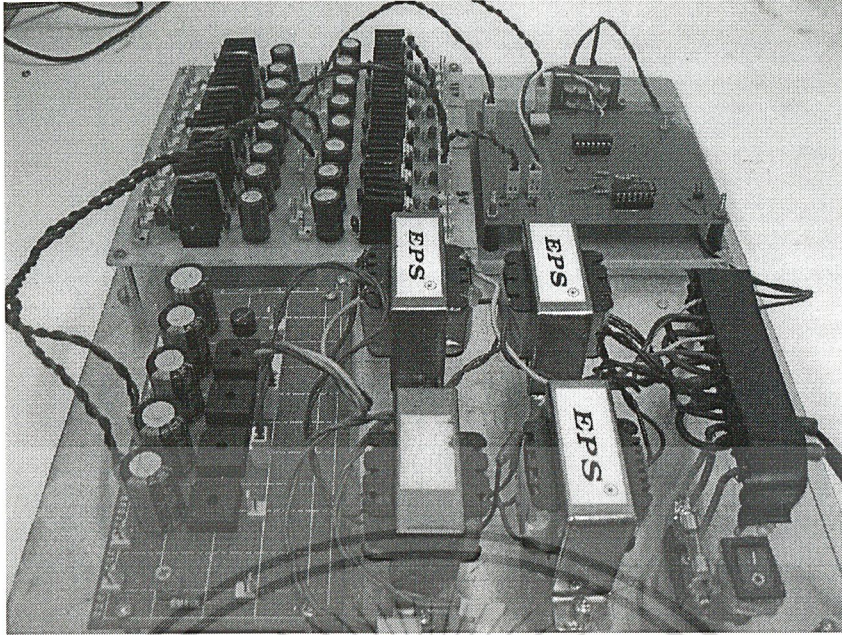
รูปที่ ก-7 สัญญาณที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ไม่ผ่านฟิลเตอร์



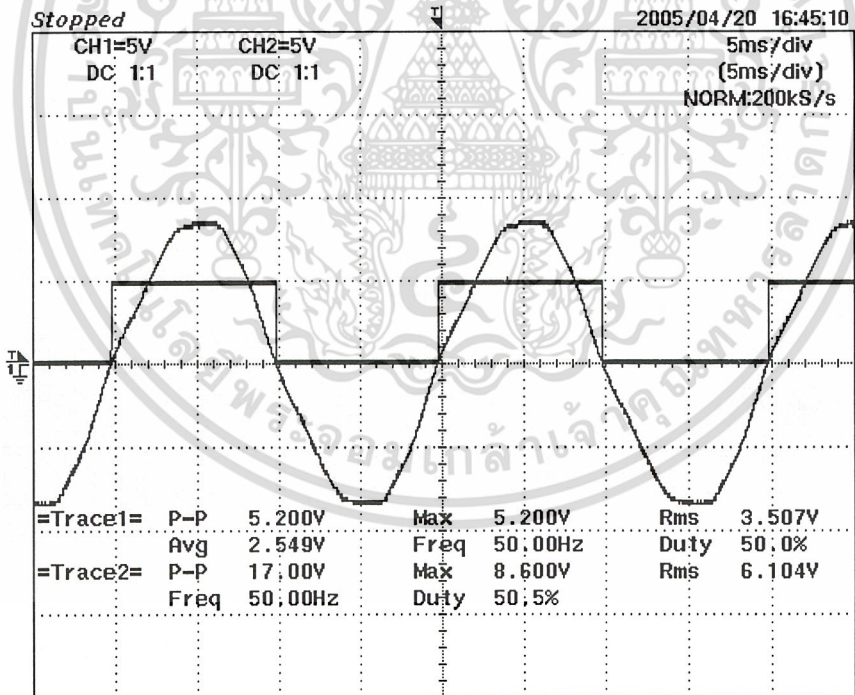
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
 =Offset= CH1 : 0V CH2 : 0.00V
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ ก-8 สัญญาณที่ออกจากอินเวอร์เตอร์เมื่อผ่านฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



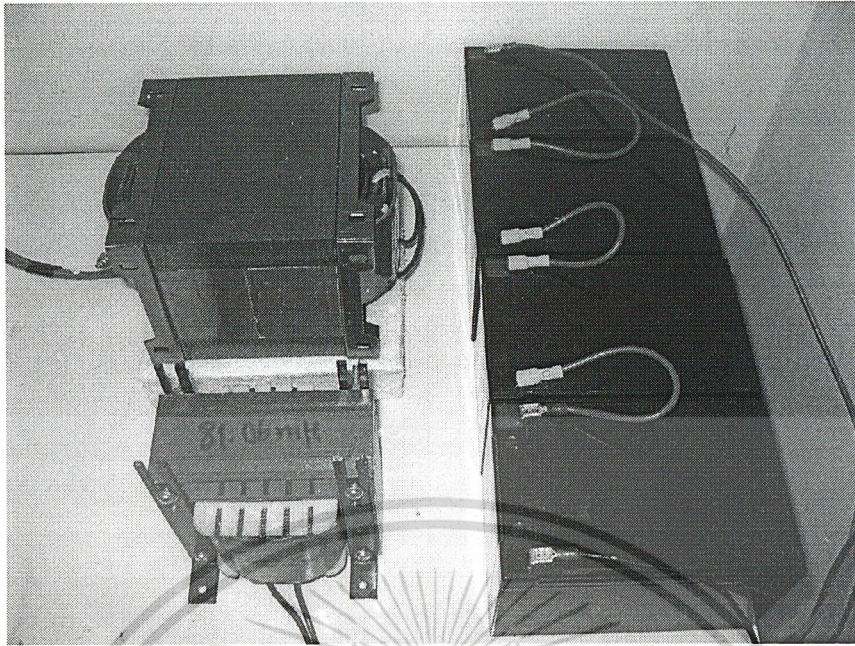
รูปที่ ก-9 ชุดไฟเลี้ยงและชุดตรวจจับแรงดันศูนย์



=Filter=	=Offset=	=Record Length=	=Trigger=
Smoothing : OFF	CH1 : 0.00V	Main : 10K	Mode : AUTO
BW : FULL	CH2 : 0.00V	Zoom : 10K	Type : EDGE CH2 \uparrow
			Delay : 0.0ns
			Hold Off : MINIMUM

รูปที่ ก-10 สัญญาณเอาต์พุตของชุดตรวจจับแรงดันศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

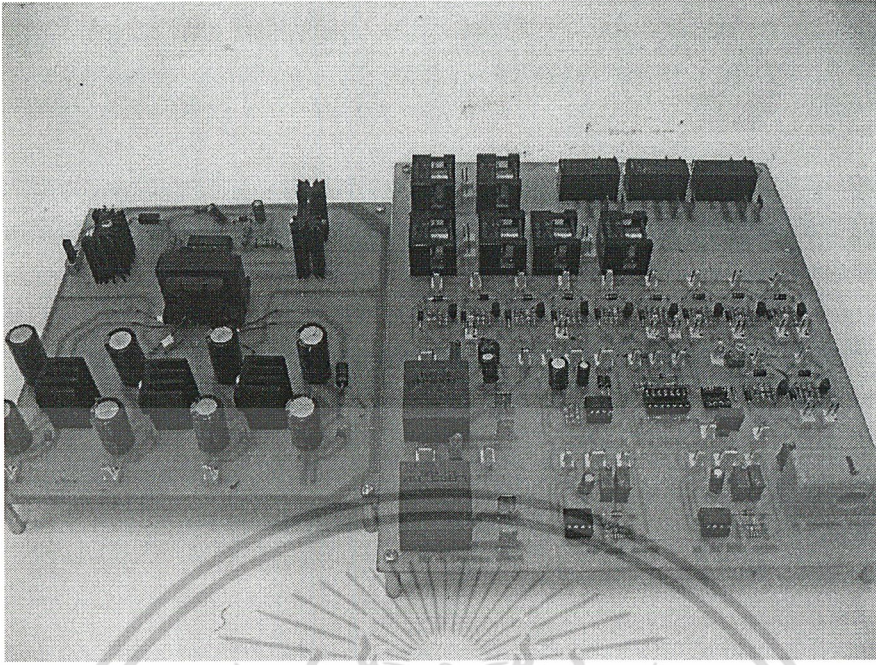


รูปที่ ก-11 หม้อแปลงแรงดัน, ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง, และแบตเตอรี่

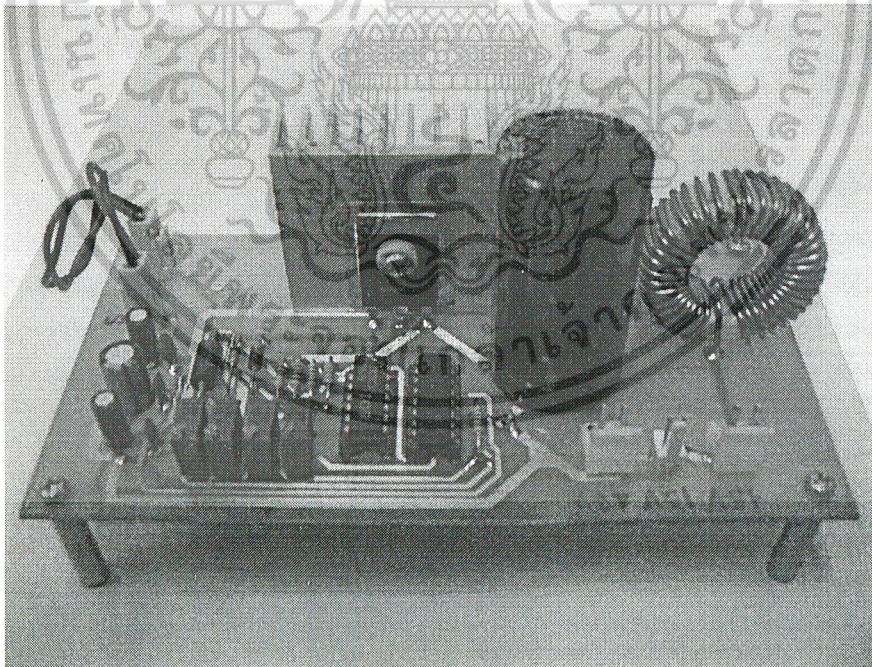


รูปที่ ก-12 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 60 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

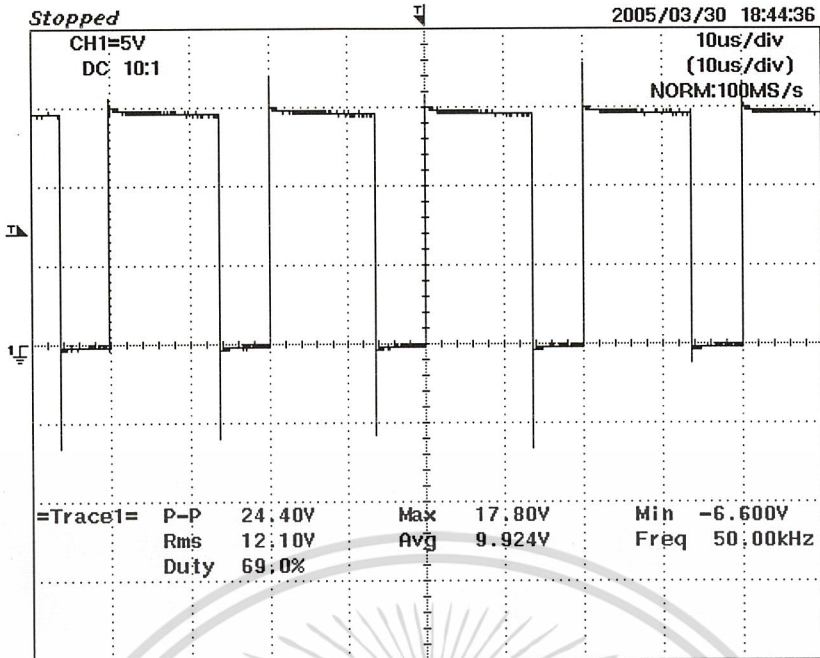


รูปที่ ก-13 ชุดตรวจจับสัญญาณกระแส, แรงดันกระแสตรงและกระแสสลับ และวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์



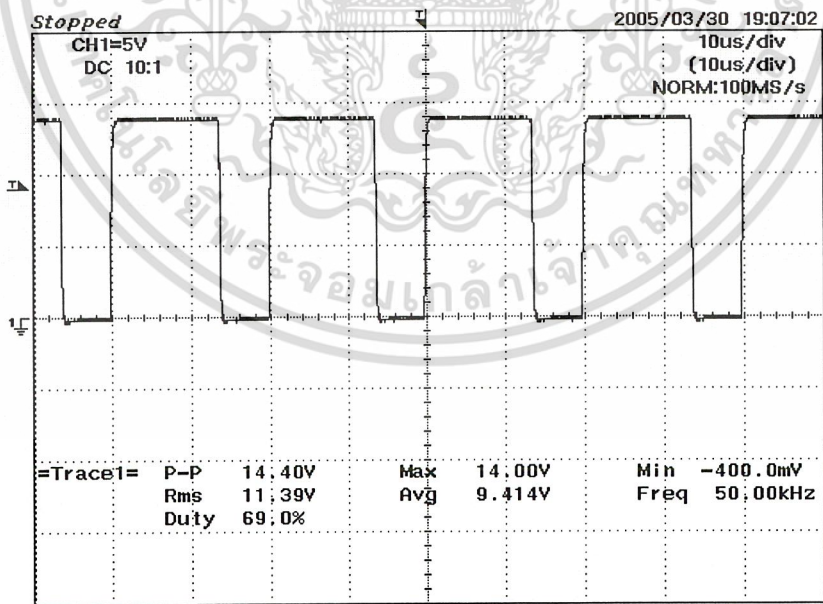
รูปที่ ก-14 ชุดวงจรมูสท์คอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

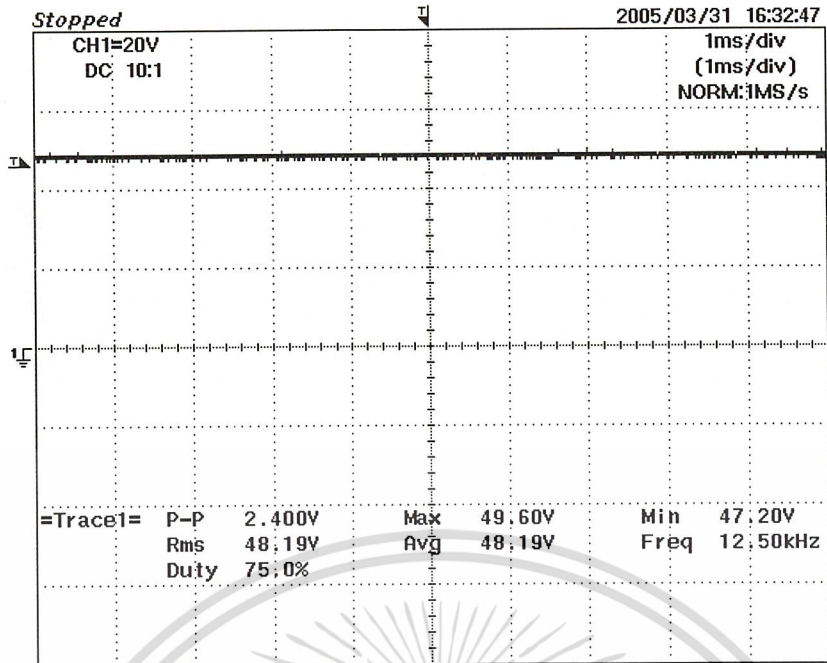
รูปที่ ก-15 สัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็มจาก SG3524 ที่คิวตี้ไซเคิล 69 %



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

รูปที่ ก-16 สัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็มจาก SG3524 ที่คิวตี้ไซเคิล 69 % วัดที่ขาเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter=	=Offset=	=Record Length=	=Trigger=
Smoothing : OFF	CH1 : 0.0V	Main : 10K	Mode : AUTO
BW : FULL	CH2 : 0.00V	Zoom : 500	Type : EDGE CH1 <input checked="" type="checkbox"/>
			Delay : 0.0ns
			Hold Off : MINIMUM

รูปที่ ก-17 แร่งดันเอาต์พุตจากอินเวอร์เตอร์ 48 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

โปรแกรมการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้การสร้างสัญญาณเอสพีดับเบิลยูเอ็ม

```

;***** ;1
; Program : PWM *
; CPU Control : PIC 18F458 *
; Assembler : MPASM *
;***** ;5
list p=18f458,W=-302 ; list directive to define processor
#include <p18f458.inc> ; processor specific variable definitions
#DEFINE PWM PORTB,4
CBLOCK 0x20
MANUA,COUNT1,TABLE,REPEAT
ENDC

ORG 0x0000 ;reset vector
MAIN CLRf PWM
CLRf TBLPTRH
CLRf TBLPTRL
CLRf TABLAT
CLRf COUNT1
CLRf TABLE
CLRf REPEAT
MOVLW 0x07
MOVWF TRISB
BCF INTCON2,RBPU ;enable pull up
;*****START*****
MOVLW 0x01 ;1
MOVWF TBLPTRH ;1
MOVLW 0x1C ;1
MOVWF TBLPTRL ;1
GOTO START
MANU NOP
NOP
NOP
TBLRD*+;
START MOVLW .250
MOVWF TABLE
MAIN1 TBLRD*+; ;2
MOVf TABLAT,F ;1
MOVLW .8
MOVWF REPEAT
SUB1 RLNCF TABLAT ;1
BTFSS TABLAT,0 ;1;12
GOTO JUMP1 ;2
MOVLW .8
MOVWF COUNT1
DECFSZ COUNT1,1 ;3
GOTO $-1 ;2
BSF PWM ;1
DECFREPEAT
TSTFSZ REPEAT
GOTO SMALL1
DCFSNZ TABLE
GOTO MANU1
NOP
NOP
NOP
NOP

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

NOP
GOTO MAIN1
JUMP1  MOV LW .8
MOVWF  COUNT1
DECFSZ COUNT1,1 ;3
GOTO  $-1 ;2
BCF  PWM ;1
DEC FREPEAT
TSTFSZ REPEAT
GOTO  SMALL1
DCFSNZ TABLE
GOTO  MANU1 ;2
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
GOTO  MAIN1
SMALL1 MOV LW .3
MOVWF  COUNT1
DECFSZ COUNT1,1 ;3
GOTO  $-1 ;2
NOP
NOP
GOTO  SUB1
*****INVERSE*****
MANU1  NOP
NOP
NOP
TBLRD*-,;
START11 MOV LW .250
MOVWF  TABLE
MAIN11  TBLRD*-,;2
MOVF  TABLAT,F ;1
MOVLW .8
MOVWF  REPEAT
SUB11  RRNCF TABLAT ;1
BTFS  TABLAT,7 ;1;12
GOTO  JUMP11 ;2
MOVLW .8
MOVWF  COUNT1
DECFSZ COUNT1,1 ;3
GOTO  $-1 ;2
BCF  PWM ;1
DEC FREPEAT
TSTFSZ REPEAT
GOTO  SMALL11
DCFSNZ TABLE
GOTO  MANU
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
GOTO  MAIN11
JUMP11 MOV LW .8
MOVWF  COUNT1
DECFSZ COUNT1,1 ;3
GOTO  $-1 ;2
BSF  PWM ;1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

#DEFINE      PWM      PORTB,4
#DEFINE      ZERO     PORTC,0
#DEFINE      DUTY_UP  PORTC,1
#DEFINE      DUTY_DOWNPORTC,2
CBLOCK      0x20
MANUA,COUNT1,TABLE,REPEAT,TEE,DUTY,PLUS
ENDC

                ORG    0x0000                ;reset vector
;*****INITIAL*****
MAIN CLR F    PWM
CLR F    TBLPTRH
CLR F    TBLPTRL
CLR F    TABLAT
CLR F    COUNT1
CLR F    TABLE
CLR F    REPEAT
    MOVLW    0x00
    MOVWF    TRISB
    MOVLW    0xFF
    MOVWF    TRISC
    BCF     INTCON2,RBPU ;enable pull up
;*****START*****
    MOVLW    .8
    MOVWF    DUTY
    GOTO    STEADY
BEGIN  BSF     PWM
;*****CONDITION*****
CHECK_UP  DECF   DUTY
          MOVLW  .7
          MOVWF  PLUS
          CPFSEQ DUTY
          GOTO  CHECK_DOWN
    MOVLW  0x03 ;1
    MOVWF  TBLPTRH ;1
    MOVLW  0x0E ;1
    MOVWF  TBLPTRL ;1
    GOTO  START
CHECK_DOWN INCF  DUTY
          MOVLW  .9
          MOVWF  PLUS
          CPFSEQ DUTY
          GOTO  STEADY
          MOVLW  0x05 ;1
          MOVWF  TBLPTRH ;1
          MOVLW  0x08 ;1
          MOVWF  TBLPTRL ;1
          GOTO  START
STEADY  MOVLW  .8
        MOVWF  PLUS
        CPFSEQ DUTY
        GOTO  NEW
NEW     MOVLW  0x04 ;1
        MOVWF  TBLPTRH ;1
        MOVLW  0x0A ;1
        MOVWF  TBLPTRL ;1
        GOTO  START
MANU    NOP
        NOP

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

NOP
TBLRD*+;
START  MOVLW  .251
        MOVWF  TABLE
MAIN1  TBLRD*+;          ;2
        MOVF   TABLAT,F      ;1
        MOVLW  .8
        MOVWF  REPEAT
SUB1    RLNCF  TABLAT        ;1
        BTFSS  TABLAT,0      ;1;12
        GOTO   JUMP1         ;2
        MOVLW  .8
        MOVWF  COUNT1
        DECFSZ COUNT1,1      ;3
        GOTO   $-1           ;2
        BSF    PWM           ;1
        DECFREPEAT
        TSTFSZ REPEAT
        GOTO   SMALL1
        DCFSNZ TABLE
        GOTO   MANU1
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        GOTO  MAIN1
JUMP1  MOVLW  .8
        MOVWF  COUNT1
        DECFSZ COUNT1,1      ;3
        GOTO   $-1           ;2
        BCF    PWM           ;1
        DECFREPEAT
        TSTFSZ REPEAT
        GOTO   SMALL1
        DCFSNZ TABLE
        GOTO  MANU1         ;2
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        GOTO  MAIN1
SMALL1 MOVLW  .3
        MOVWF  COUNT1
        DECFSZ COUNT1,1      ;3
        GOTO   $-1           ;2
        NOP
        NOP
        GOTO  SUB1
;*****INVERSE*****
MANU1   NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
START11 MOVLW  .100
        MOVWF  TABLE
MAIN11  TBLRD*-;          ;2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    MOVF   TABLAT,F    ;1
    MOVLW  .8
    MOVWF  REPEAT
SUB11    RRNCF  TABLAT    ;1
        BTFSS  TABLAT,7  ;1;12
        GOTO   JUMP11    ;2
        MOVLW  .8
    MOVWF  COUNT1
        DECFSZ COUNT1,1    ;3
        GOTO   $-1        ;2
    BCF   PWM          ;1
    DECFREPEAT
    TSTFSZ REPEAT
    GOTO   SMALL11
    DCFSNZ TABLE
    GOTO   MANU2
    BTFSS  DUTY_UP
    GOTO   MA_UP
    BTFSS  DUTY_DOWN
    GOTO   MA_DOWN
    GOTO   MAIN11
JUMP11  MOVLW  .8
        MOVWF  COUNT1
        DECFSZ COUNT1,1    ;3
        GOTO   $-1        ;2
    BSF   PWM          ;1
    DECFREPEAT
    TSTFSZ REPEAT
    GOTO   SMALL11
    DCFSNZ TABLE
    GOTO   MANU2        ;2
    BTFSS  DUTY_UP
    GOTO   MA_UP
    BTFSS  DUTY_DOWN
    GOTO   MA_DOWN
    GOTO   MAIN11
SMALL11 MOVLW  .3
        MOVWF  COUNT1
        DECFSZ COUNT1,1    ;3
        GOTO   $-1        ;2
    NOP
    NOP
    GOTO   SUB11
;*****
MANU2
START12 MOVLW  .152
        MOVWF  TABLE
MAIN12  TBLRD*-,;2
        MOVF   TABLAT,F    ;1
        MOVLW  .8
        MOVWF  REPEAT
SUB12   RRNCF  TABLAT    ;1
        BTFSS  TABLAT,7  ;1;12
        GOTO   JUMP12    ;2
        MOVLW  .4
        MOVWF  COUNT1
WAIT1   BTFSS  ZERO
        GOTO   WAIT2
        GOTO   BEGIN
WAIT2   DECFSZ COUNT1,1    ;3

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        GOTO    WAIT1        ;2
BCF     PWM          ;1
DECFSZ  REPEAT
TSTFSZ  REPEAT
GOTO    SMALL12
DCFSNZ  TABLE
GOTO    MANU
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
GOTO    MAIN12
JUMP12  MOVLW    .4
        MOVWF   COUNT1
WAIT3   BTSS     ZERO
        GOTO    WAIT4
        GOTO    BEGIN
WAIT4   DECFSZ  COUNT1,1    ;3
        GOTO    WAIT3      ;2
        BSF     PWM          ;1
        DECFSZ  REPEAT
        TSTFSZ  REPEAT
        GOTO    SMALL12
        DCFSNZ  TABLE
        GOTO    MANU        ;2
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        GOTO    MAIN12
SMALL12 MOVLW    .3
        MOVWF   COUNT1
        DECFSZ  COUNT1,1    ;3
        GOTO    $-1        ;2
        NOP
        NOP
        GOTO    SUB12
;*****DUTY UP*****
MA_UP  NOP
        NOP
STAR1  MOVLW    .152
        MOVWF   TABLE
MAI1   TBLRD*-, ;2
        MOVF    TABLAT,F    ;1
        MOVLW   .8
        MOVWF   REPEAT
SU1    RRNCF   TABLAT      ;1
        BTSS    TABLAT,7    ;1;12
        GOTO    JMP1        ;2
        MOVLW   .4
        MOVWF   COUNT1
WAI1   BTSS    ZERO
        GOTO    WAI2
        GOTO    BEGIN
WAI2   DECFSZ  COUNT1,1    ;3
        GOTO    WAI1        ;2
        BCF     PWM          ;1
        DECFSZ  REPEAT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TSTFSZ    REPEAT
GOTO      SML1
DCFSNZ    TABLE
GOTO      CHECK_UP
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
GOTO      MAI1
JMP1      MOVLW    .4
          MOVWF    COUNT1
WAI3      BTFSS    ZERO
          GOTO     WAI4
          GOTO     BEGIN
WAI4      DECFSZ   COUNT1,1    ;3
          GOTO     WAI3        ;2
          BSF      PWM        ;1
          DECFREPEAT
          TSTFSZ    REPEAT
          GOTO      SML1
          DCFSNZ    TABLE
          GOTO      CHECK_UP    ;2
          NOP
          NOP
          NOP
          NOP
          GOTO      MAI1
SML1      MOVLW    .3
          MOVWF    COUNT1
          DECFSZ   COUNT1,1    ;3
          GOTO     $-1          ;2
          NOP
          NOP
          GOTO     SU1
;*****DUTY DOWN*****
MA_DOWN
STAR2     MOVLW    .152
          MOVWF    TABLE
MAI2      TBLRD*-, ;2
          MOVF     TABLAT,F    ;1
          MOVLW    .8
          MOVWF    REPEAT
SU2       RRNCF   TABLAT      ;1
          BTFSS   TABLAT,7    ;1;12
          GOTO    JMP2        ;2
          MOVLW    .4
          MOVWF    COUNT1
KOI1      BTFSS   ZERO
          GOTO    KOI2
          GOTO    BEGIN
KOI2      DECFSZ   COUNT1,1    ;3
          GOTO    KOI1        ;2
          BCF     PWM        ;1
          DECFREPEAT
          TSTFSZ    REPEAT
          GOTO      SML2
          DCFSNZ    TABLE
          GOTO      CHECK_DOWN

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

CLRF PLUS
CLRF DEL

        CLRF MANUAL
        CLRF AUTO
CLRF ACTIVE
CLRF START
CLRF SOLAR
CLRF BATT
        CLRF OVER1
        CLRF UNDER1
        CLRF OVER2
        CLRF UNDER2

CLRF RZRC
CLRF RSOLAR

        CLRF RBATT
        CLRF RSGRID
        CLRF RSSOLAR
        CLRF RSBATT
        CLRF RGRID
        CLRF RINV
        CLRF UNSYNC
        CLRF SYNCH

JUMP  BTFSS  START
      GOTO  WAIT
      GOTO  JUMP
WAIT  BTFSS  MANUAL
      GOTO  M_MODE
      BTFSS  AUTO
      GOTO  A_MODE
      GOTO  WAIT
M_MODE BTFSS  SYNCH          ;synchronize & unsynchronize manual mode
      GOTO  MS_MODE
      BTFSS  UNSYNC
      GOTO  USM_MODE
      GOTO  M_MODE

A_MODE BTFSS  SYNCH          ;synchronize & unsynchronize auto mode
      GOTO  AS_MODE
      BTFSS  UNSYNC
      GOTO  UAS_MODE
      GOTO  A_MODE
;*****MANUAL MODE*****
MS_MODE BTFSS  SOLAR          ;synchronize manual mode
      GOTO  SOS_MODE          ;select solar cell or battery supply
      BTFSS  BATT
      GOTO  SBM_MODE
      GOTO  MS_MODE

USM_MODE BTFSS  SOLAR          ;unsynchronize manual mode
      GOTO  USOS_MODE         ;select solar cell or battery supply
      BTFSS  BATT
      GOTO  UBM_MODE
      GOTO  USM_MODE
;*****CONDITION*****
SOS_MODE          ;synchronize & solar cell supply manual mode
      MOVLW          .1
      MOVWF          DEL

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DECFSZ      DEL,1
GOTO $-1
MOVLW      .1
MOVWF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO SOS_MODE
BSF  RSOLAR
DELAY1      MOVLW      .1
MOVWF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO $-1
MOVLW      .1
MOVWF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO DELAY1
BSF  RZRC
BSF  RSSOLAR
BSF  RSGRID
GOTO SOLARSYNC
SBM_MODE      ;synchronize & battery supply manual mode
MOVLW      .1
MOVWF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO $-1
MOVLW      .1
MOVWF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO SBM_MODE
BSF  RBATT
DELAY2      MOVLW      .255
MOVWF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO $-1
MOVLW      .255
MOVWF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO DELAY2
BSF  RZRC
BSF  RSSOLAR
BSF  RSGRID
GOTO BATTERYSYNC
USOS_MODE      ;UNsynchronize & solar cell supply manual mode
MOVLW      .255
MOVWF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO $-1
MOVLW      .255
MOVWF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO USOS_MODE
BSF  RSOLAR
GOTO $
UBM_MODE      ;UNsynchronize & battery supply manual mode
MOVLW      .255
MOVWF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO $-1
MOVLW      .255
MOVWF      DEL
DECFSZ      DEL,1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

GOTO UBM_MODE
BSF RBATT
GOTO $

;*****AUTO MODE*****
AS_MODE      BTFS SOLAR      ;synchronize auto mode
              GOTO SOSA_MODE ;select solar cell or battery supply
              BTFS BATT
              GOTO SBSA_MODE
              GOTO AS_MODE

UAS_MODE     BTFS SOLAR      ;unsynchronize auto mode
              GOTO USOA_MODE ;select solar cell or battery supply
              BTFS BATT
              GOTO USBA_MODE
              GOTO UAS_MODE

SOSA_MODE    ;synchronize & solar cell supply manual mode
MOV LW      .255
MOV WF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO $-1
MOV LW      .255
MOV WF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO SOSA_MODE
BSF RSOLAR
DELAY3      MOV LW      .255
              MOV WF      DEL
              DECFSZ      DEL,1
              GOTO $-1
              MOV LW      .255
              MOV WF      DEL
              DECFSZ      DEL,1
              GOTO DELAY3
              BSF RZRC
              BSF RSGRID
              MOV LW      0xFF
              MOV WF      TEST
              GOTO SOLARSYNC

SBSA_MODE    ;synchronize & solar cell supply manual mode
MOV LW      .255
MOV WF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO $-1
MOV LW      .255
MOV WF      DEL
DECFSZ      DEL,1
GOTO SBSA_MODE
BSF RSOLAR
DELAY4      MOV LW      .255
              MOV WF      DEL
              DECFSZ      DEL,1
              GOTO $-1
              MOV LW      .255
              MOV WF      DEL
              DECFSZ      DEL,1
              GOTO DELAY4
              BSF RZRC
              BSF RSGRID
              MOV LW      0xFF

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOVWF TEST
GOTO BATTERYSYNC
USOA_MODE MOVLW .255
MOVWF DEL
DECFSZ DEL,1
GOTO $-1
MOVLW .255
MOVWF DEL
DECFSZ DEL,1
GOTO USOA_MODE
BSF RSOLAR
DELAY5 MOVLW .255
MOVWF DEL
DECFSZ DEL,1
GOTO $-1
MOVLW .255
MOVWF DEL
DECFSZ DEL,1
GOTO DELAY5
MOVLW .5
MOVWF PLUS
BSF RSSOLAR
GOTO SOLARSYNC
USBA_MODE MOVLW .255
MOVWF DEL
DECFSZ DEL,1
GOTO $-1
MOVLW .255
MOVWF DEL
DECFSZ DEL,1
GOTO USBA_MODE
BSF RSOLAR
DELAY6 MOVLW .255
MOVWF DEL
DECFSZ DEL,1
GOTO $-1
MOVLW .255
MOVWF DEL
DECFSZ DEL,1
GOTO DELAY6
MOVLW .5
MOVWF PLUS
BSF RSBATT
GOTO BATTERYSYNC

```

```

;*****SOLAR

```

SYNCHRONIZE

```

MODE*****

```

```

SOLARSYNC

```

```

ASOLAR

```

```

VSOLAR

```

```

MOVLW .4 ;1

```

```

MOVWF MANUA ;1

```

```

MOVLW .4 ;1

```

```

MOVWF MANUB ;1

```

```

CLRF ADCON1

```

```

BCF ADCON1,7 ; ADFM = 0, AN0-AN7 is analog input

```

```

MOVLW 10010001

```

```

MOVWF ADCON0 ; Clock=Fosc/32, ADC operate, Channel 2

```

```

BSF ADCON0,2 ; start conversion

```

```

BTFSC ADCON0,2 ; GO/DONE

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

GOTO $-1 ; DONE = 1 conversion not complete
; DONE = 0 conversion is complete
MOVF ADRESH,W ; W
MOVWF MANA
CPFSLT MANUA
GOTO INTERVAL1
BSF OVER1
RESET
INTERVAL1 CPFSGT MANUB
GOTO UNDERA
GOTO CSOLAR
UNDERA BSF UNDER1
RESET
;*****
CSOLAR MOVLW .4 ;1
MOVWF MANUA ;1
MOVLW .4 ;1
MOVWF MANUB ;1
CLRF ADCON1
BCF ADCON1,7 ; ADFM = 0, AN0-AN7 is analog input
MOVLW 10011001
MOVWF ADCON0 ; Clock=Fosc/32, ADC operate, Channel 3
;***** start conversion *****
BSF ADCON0,2 ; start conversion
BTFSC ADCON0,2 ; GO/DONE
GOTO $-1 ; DONE = 1 conversion not complete
; DONE = 0 conversion is complete
MOVF ADRESH,W ; W
MOVWF MANA
CPFSLT MANUA
GOTO INTERVAL2
BSF OVER1
RESET
INTERVAL2 CPFSGT MANUB
GOTO UNDERB
GOTO VGRIDA
UNDERB BSF UNDER1
RESET
;*****
VGRIDA MOVLW .4 ;1
MOVWF MANUA ;1
CLRF ADCON1
BCF ADCON1,7 ; ADFM = 0, AN0-AN7 is analog input
MOVLW 10100001
MOVWF ADCON0 ; Clock=Fosc/32, ADC operate, Channel 4
;***** start conversion *****
BSF ADCON0,2 ; start conversion
BTFSC ADCON0,2 ; GO/DONE
GOTO $-1 ; DONE = 1 conversion not complete
; DONE = 0 conversion is complete
MOVF ADRESH,W ; W
MOVWF MANA
CPFSEQ MANUA
GOTO INTERVAL3
GOTO CGRIDA
INTERVAL3 CPFSGT MANUA
GOTO OVERA
BSF UNDER2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

OVERA      GOTO VSOLAR
           BSF  OVER2
           GOTO VSOLAR

;*****
CGRIDA          MOVLW  .4          ;1
                MOVWF  MANUA      ;1
                CLRF  ADCON1
                BCF  ADCON1,7 ; ADFM = 0, AN0-AN7 is analog input
                MOVLW 10101001
                MOVWF  ADCON0      ; Clock=Fosc/32, ADC operate, Channel 5

;***** start conversion *****
                BSF  ADCON0,2 ; start conversion
                BTFSC ADCON0,2 ; GO/DONE
                GOTO  $-1 ; DONE = 1 conversion not complete
                ; DONE = 0 conversion is complete
                MOVF  ADRESH,W ; W
                MOVWF  MANA
                CPFSEQ  MANUA
                GOTO  INTERVAL4
                TSTFSZTEST
                GOTO  AUTO1
                GOTO  MANUAL1
AUTO1 MOVLW  .5
                MOVWF  TEST2
                CPFSEQ  PLUS
                GOTO  TOY1
                GOTO  VSOLAR
TOY1  BSF  RGRID
                GOTO  VSOLAR
MANUAL1 BTFSS  ACTIVE
                BSF  RGRID
                GOTO  VSOLAR
INTERVAL4 CPFSGT  MANUA
                GOTO  OVERB
                BSF  UNDER2
                GOTO  VSOLAR
OVERB  BSF  OVER2
                GOTO  VSOLAR
;*****BATT SYNC & UNSYNC MODE:CHECK CURRENT &
VOLTAGE*****
BATTERYSYNC
VBATT          MOVLW  .4          ;1
                MOVWF  MANUA      ;1
                MOVLW  .4          ;1
                MOVWF  MANUB      ;1
                CLRF  ADCON1
                BCF  ADCON1,7 ; ADFM = 0, AN0-AN7 is analog input
                MOVLW 10000001
                MOVWF  ADCON0      ; Clock=Fosc/32, ADC operate, Channel 0

                BSF  ADCON0,2 ; start conversion
                BTFSC ADCON0,2 ; GO/DONE
                GOTO  $-1 ; DONE = 1 conversion not complete
                ; DONE = 0 conversion is complete
                MOVF  ADRESH,W ; W
                MOVWF  MANA
                CPFSLTMANUA
                GOTO  INTERVAL5

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

BSF   OVER1
RESET
INTERVAL5  CPFSGT      MANUB
           GOTO UNDERC
           GOTO CBATT
UNDERC    BSF   UNDER1
           RESET
;*****
;CBATT          MOVLW   .4      ;1
                MOVWF   MANUA   ;1
                MOVLW   .4      ;1
                MOVWF   MANUB   ;1
                CLRF   ADCON1
BCF   ADCON1,7 ; ADFM = 0, AN0-AN7 is analog input
MOVLW 10001001
MOVWF ADCON0 ; Clock=Fosc/32, ADC operate, Channel 1

;***** start conversion *****
BSF   ADCON0,2 ; start conversion
BTFSC ADCON0,2 ; GO/DONE
GOTO  $-1 ; DONE = 1 conversion not complete
        ; DONE = 0 conversion is complete
MOVF  ADRESH,W ; W
MOVWF MANA
CPFSLTMANUA
GOTO INTERVAL6
BSF   OVER1
RESET
INTERVAL6  CPFSGT      MANUB
           GOTO UNDERD
           GOTO VGRIDB
UNDERD    BSF   UNDER1
           RESET
;*****
;VGRIDB          MOVLW   .4      ;1
                MOVWF   MANUA   ;1
                CLRF   ADCON1
BCF   ADCON1,7 ; ADFM = 0, AN0-AN7 is analog input
MOVLW 10100001
MOVWF ADCON0 ; Clock=Fosc/32, ADC operate, Channel 4

;***** start conversion *****
BSF   ADCON0,2 ; start conversion
BTFSC ADCON0,2 ; GO/DONE
GOTO  $-1 ; DONE = 1 conversion not complete
        ; DONE = 0 conversion is complete
MOVF  ADRESH,W ; W
MOVWF MANA
CPFSEQ MANUA
GOTO INTERVAL7
GOTO CGRIDB
INTERVAL7  CPFSGT      MANUA
           GOTO OVERC
           BSF   UNDER2
           GOTO VBATT
OVERC    BSF   OVER2
           GOTO VBATT
;*****
;CGRIDB          MOVLW   .4      ;1
                MOVWF   MANUA   ;1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        CLRFB   ADCON1
BCF     ADCON1,7 ; ADFM = 0, AN0-AN7 is analog input
MOVLW  10101001
MOVWF  ADCON0   ; Clock=Fosc/32, ADC operate, Channel 5

;***** start conversion *****
BSF    ADCON0,2 ; start conversion
BTFSC  ADCON0,2 ; GO/DONE
GOTO   $-1      ; DONE = 1 conversion not complete
        ; DONE = 0 conversion is complete
MOVF   ADRESH,W ; W
        MOVWF  MANA
        CPFSEQ  MANUA
        GOTO   INTERVAL8
        TSTFSZ TEST
        GOTO   AUTO2
        GOTO   MANUAL2
AUTO2  MOVLW   .5
        MOVWF  TEST2
        CPFSEQ  PLUS
        GOTO   TOY2
        GOTO   VBATT
TOY2   BSF    RGRID
        GOTO   VBATT
MANUAL2  BTFSS ACTIVE
        BSF    RGRID
        GOTO   VBATT
INTERVAL8  CPFSGT  MANUA
        GOTO   OVERD
        BSF    UNDER2
        GOTO   VBATT
OVERD  BSF    OVER2
        GOTO   VBATT
END

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

DATA SHEET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

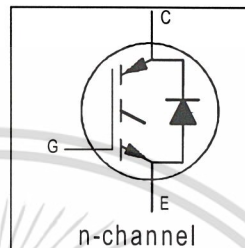
IRG4PC50UD

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH
ULTRAFAST SOFT RECOVERY DIODE

UltraFast CoPack IGBT

Features

- UltraFast: Optimized for high operating frequencies 8-40 kHz in hard switching, >200 kHz in resonant mode
- Generation 4 IGBT design provides tighter parameter distribution and higher efficiency than Generation 3
- IGBT co-packaged with HEXFRED™ ultrafast, ultra-soft-recovery anti-parallel diodes for use in bridge configurations
- Industry standard TO-247AC package



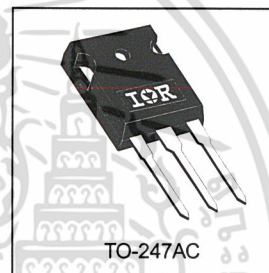
$$V_{CES} = 600V$$

$$V_{CE(on)} \text{ typ.} = 1.65V$$

$$@V_{GE} = 15V, I_C = 27A$$

Benefits

- Generation 4 IGBT's offer highest efficiencies available
- IGBT's optimized for specific application conditions
- HEXFRED diodes optimized for performance with IGBT's . Minimized recovery characteristics require less/no snubbing
- Designed to be a "drop-in" replacement for equivalent industry-standard Generation 3 IR IGBT's



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
V_{CES}	Collector-to-Emitter Voltage	600	V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Collector Current	55	A
$I_C @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Collector Current	27	
I_{CM}	Pulsed Collector Current ①	220	
I_{LM}	Clamped Inductive Load Current ②	220	
$I_F @ T_C = 100^\circ C$	Diode Continuous Forward Current	25	
I_{FM}	Diode Maximum Forward Current	220	
V_{GE}	Gate-to-Emitter Voltage	± 20	V
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Maximum Power Dissipation	200	W
$P_D @ T_C = 100^\circ C$	Maximum Power Dissipation	78	
T_J	Operating Junction and	-55 to +150	$^\circ C$
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 sec.	300 (0.063 in. (1.6mm) from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 Screw.	10 lbf·in (1.1 N·m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case - IGBT	-----	-----	0.64	$^\circ C/W$
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case - Diode	-----	-----	0.83	
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, flat, greased surface	-----	0.24	-----	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient, typical socket mount	-----	-----	40	
W_t	Weight	-----	6 (0.21)	-----	g (oz)

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
V _{(BR)CES}	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage ^③	600	----	----	V	V _{GE} = 0V, I _C = 250μA
ΔV _{(BR)CES} /ΔT _J	Temperature Coeff. of Breakdown Voltage	----	0.60	----	V/°C	V _{GE} = 0V, I _C = 1.0mA
V _{CE(on)}	Collector-to-Emitter Saturation Voltage	----	1.65	2.0	V	I _C = 27A
		----	2.0	----		I _C = 55A
		----	1.6	----		I _C = 27A, T _J = 150°C
V _{GE(th)}	Gate Threshold Voltage	3.0	----	6.0		V _{CE} = V _{GE} , I _C = 250μA
ΔV _{GE(th)} /ΔT _J	Temperature Coeff. of Threshold Voltage	----	-13	----	mV/°C	V _{CE} = V _{GE} , I _C = 250μA
g _{fe}	Forward Transconductance ^④	16	24	----	S	V _{CE} = 100V, I _C = 27A
I _{CES}	Zero Gate Voltage Collector Current	----	----	250	μA	V _{GE} = 0V, V _{CE} = 600V
		----	----	6500		V _{GE} = 0V, V _{CE} = 600V, T _J = 150°C
V _{FM}	Diode Forward Voltage Drop	----	1.3	1.7	V	I _C = 25A
		----	1.2	1.5		I _C = 25A, T _J = 150°C
I _{GES}	Gate-to-Emitter Leakage Current	----	----	±100	nA	V _{GE} = ±20V

Switching Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions	
Q _g	Total Gate Charge (turn-on)	----	180	270	nC	I _C = 27A	
Q _{ge}	Gate - Emitter Charge (turn-on)	----	25	38		V _{CC} = 400V	
Q _{gc}	Gate - Collector Charge (turn-on)	----	61	90		V _{GE} = 15V	
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	----	46	----	ns	T _J = 25°C	
t _r	Rise Time	----	25	----		I _C = 27A, V _{CC} = 480V	
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	----	140	230		V _{GE} = 15V, R _G = 5.0Ω	
t _f	Fall Time	----	74	110		Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	
E _{on}	Turn-On Switching Loss	----	0.99	----		mJ	See Fig. 9, 10, 11, 18
E _{off}	Turn-Off Switching Loss	----	0.59	----			
E _{ts}	Total Switching Loss	----	1.58	1.9			
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	----	44	----	ns	T _J = 150°C, See Fig. 9, 10, 11, 18	
t _r	Rise Time	----	27	----		I _C = 27A, V _{CC} = 480V	
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	----	240	----		V _{GE} = 15V, R _G = 5.0Ω	
t _f	Fall Time	----	130	----		Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	
E _{ts}	Total Switching Loss	----	2.3	----	mJ		
L _E	Internal Emitter Inductance	----	13	----	nH	Measured 5mm from package	
C _{ies}	Input Capacitance	----	4000	----	pF	V _{GE} = 0V	
C _{oes}	Output Capacitance	----	250	----		V _{CC} = 30V	
C _{res}	Reverse Transfer Capacitance	----	52	----		f = 1.0MHz	
t _{rr}	Diode Reverse Recovery Time	----	50	75	ns	T _J = 25°C See Fig. 14	
		----	105	160		T _J = 125°C	
I _{rr}	Diode Peak Reverse Recovery Current	----	4.5	10	A	T _J = 25°C See Fig. 15	
		----	8.0	15		T _J = 125°C	
Q _{rr}	Diode Reverse Recovery Charge	----	112	375	nC	T _J = 25°C See Fig. 16	
		----	420	1200		T _J = 125°C	
di _(rec) M/dt	Diode Peak Rate of Fall of Recovery During t _p	----	250	----	A/μs	T _J = 25°C	
		----	160	----		T _J = 125°C	

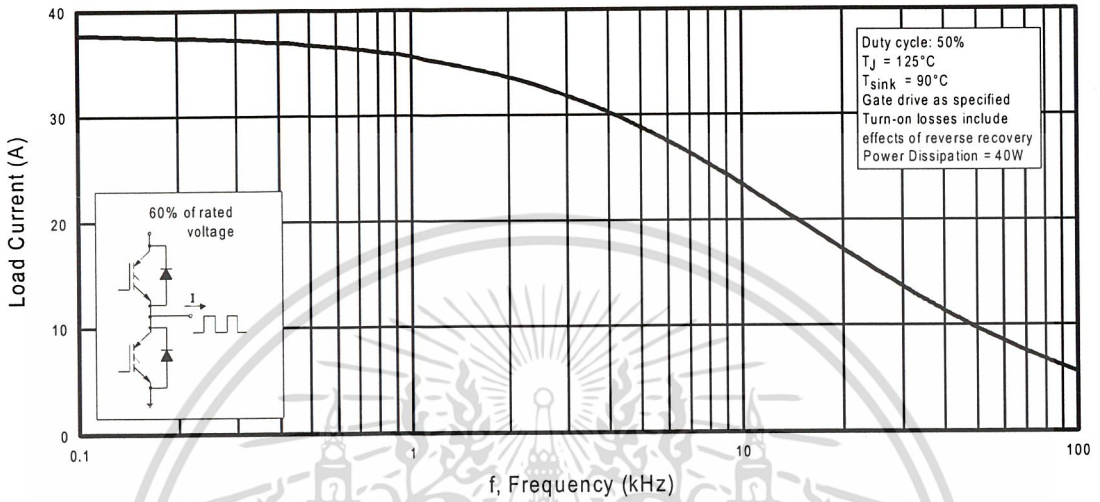


Fig. 1 - Typical Load Current vs. Frequency
(Load Current = I_{RMS} of fundamental)

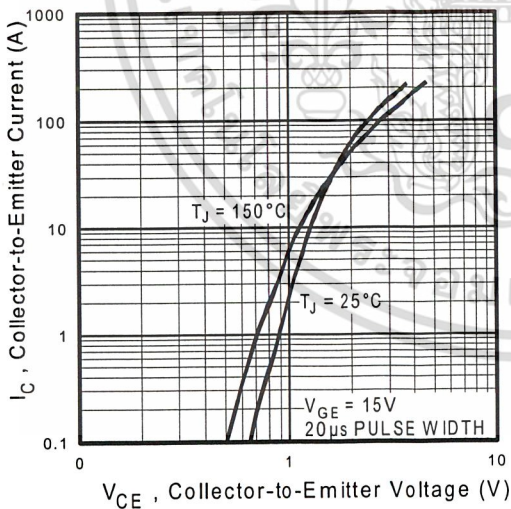


Fig. 2 - Typical Output Characteristics

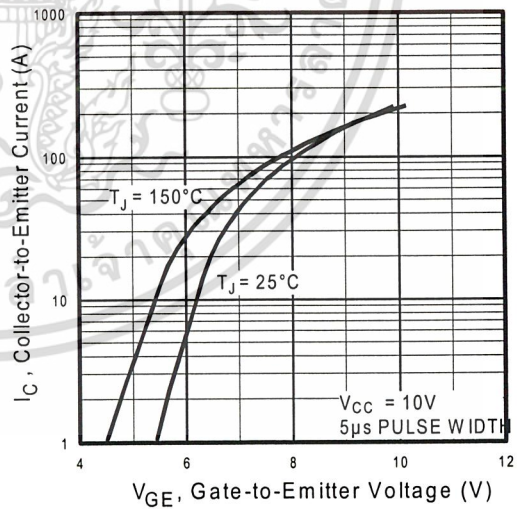


Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics

IRG4PC50UD

International
IR Rectifier

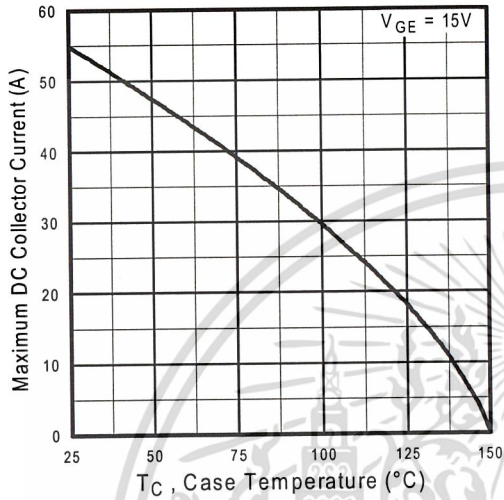


Fig. 4 - Maximum Collector Current vs. Case Temperature

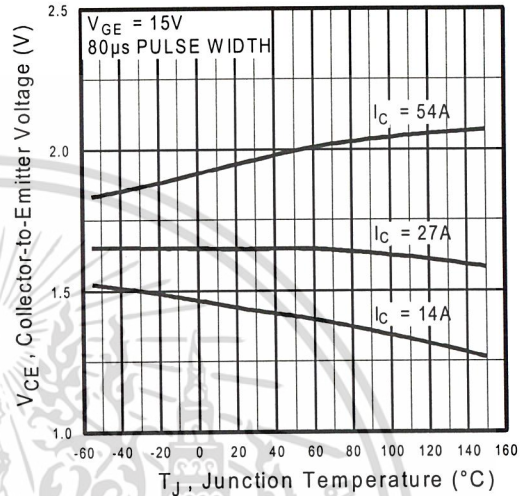


Fig. 5 - Typical Collector-to-Emitter Voltage vs. Junction Temperature

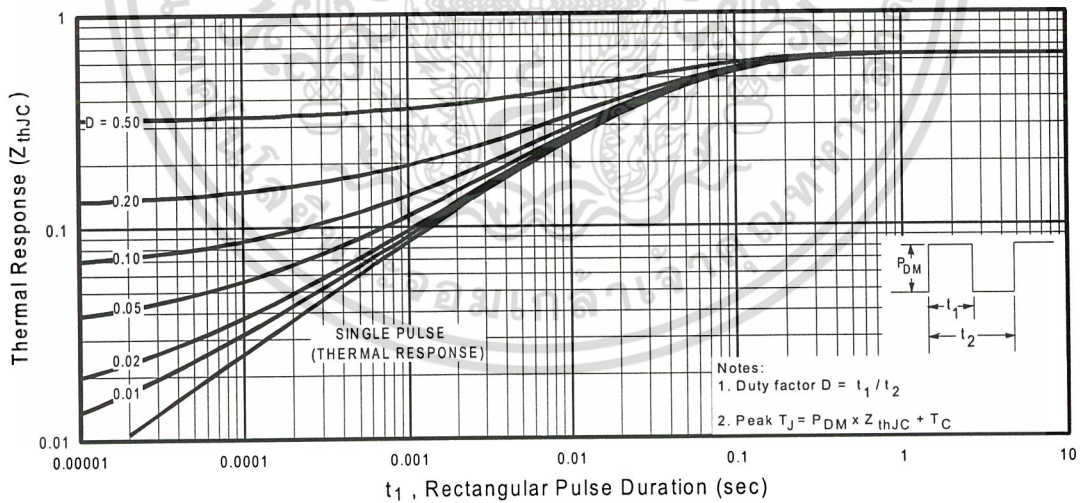


Fig. 6 - Maximum IGBT Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

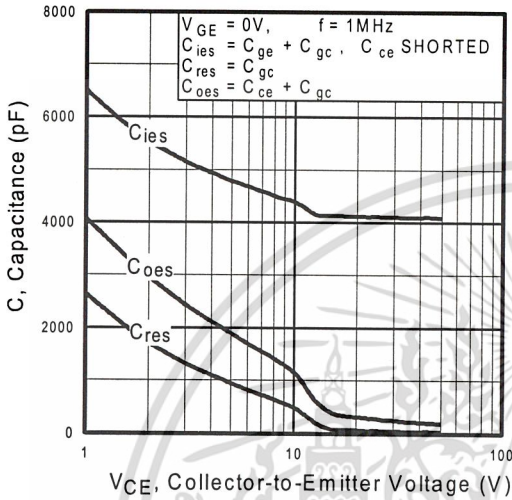


Fig. 7 - Typical Capacitance vs. Collector-to-Emitter Voltage

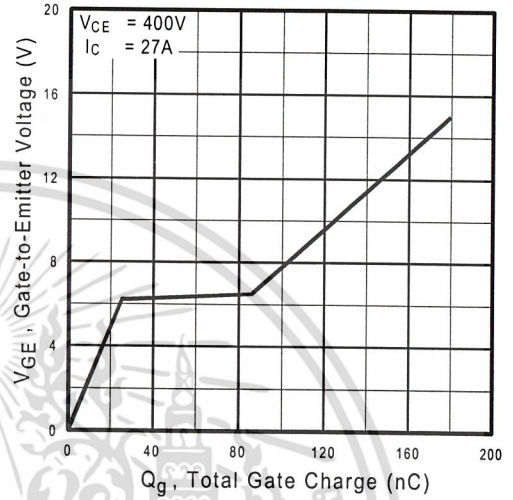


Fig. 8 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Emitter Voltage

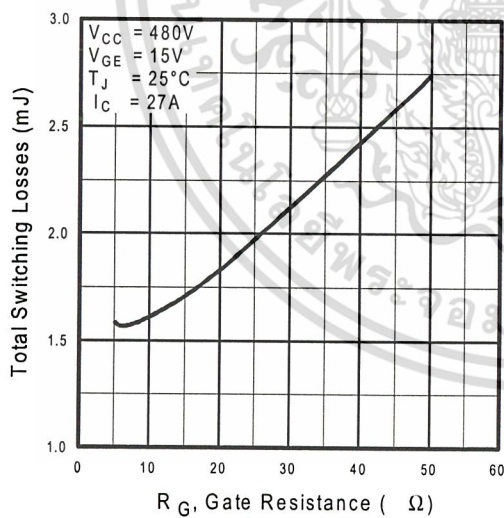


Fig. 9 - Typical Switching Losses vs. Gate Resistance

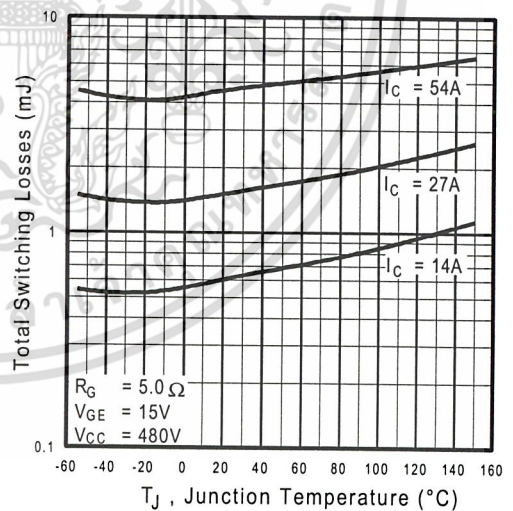


Fig. 10 - Typical Switching Losses vs. Junction Temperature

IRG4PC50UD

International
IR Rectifier

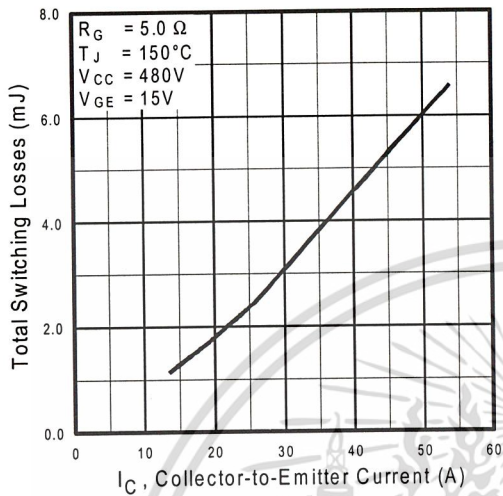


Fig. 11 - Typical Switching Losses vs. Collector-to-Emitter Current

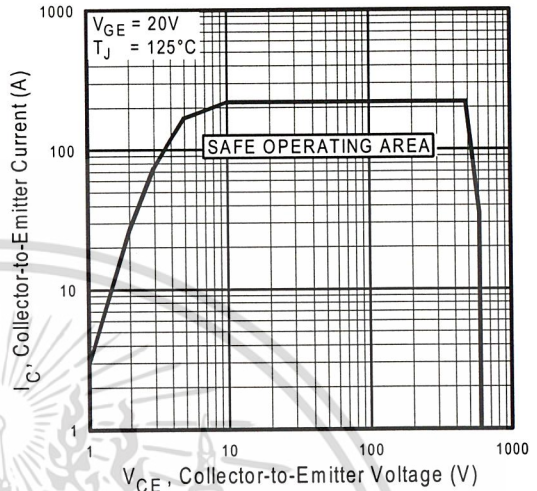


Fig. 12 - Turn-Off SOA

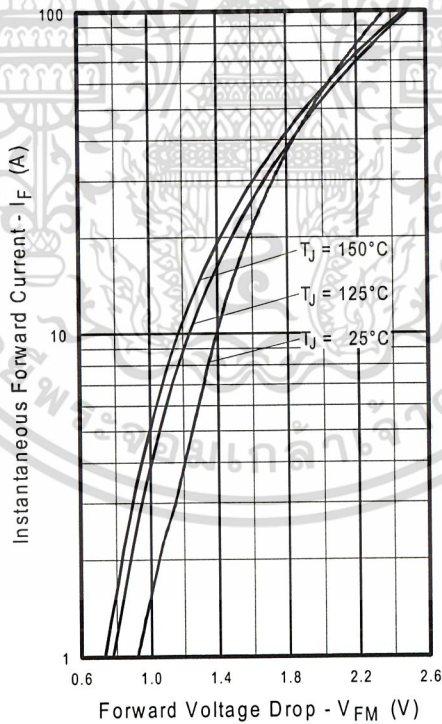


Fig. 13 - Maximum Forward Voltage Drop vs. Instantaneous Forward Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

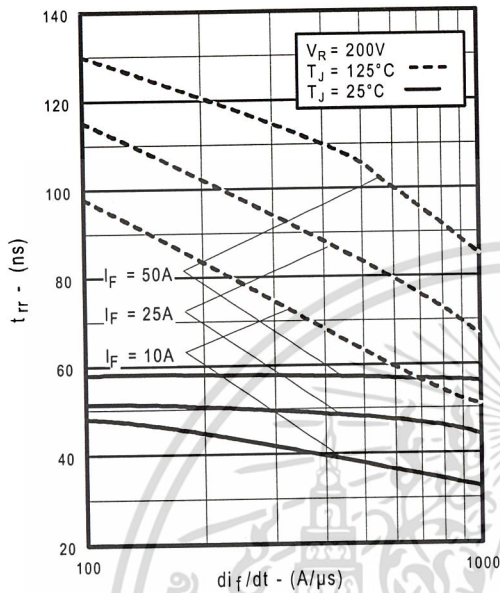


Fig. 14 - Typical Reverse Recovery vs. di/dt

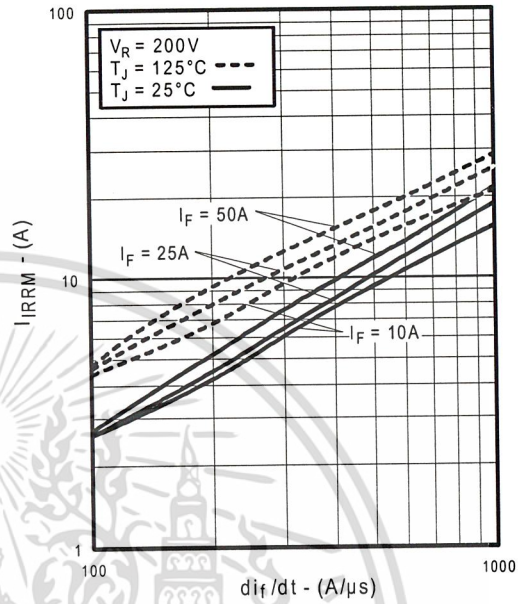


Fig. 15 - Typical Recovery Current vs. di/dt

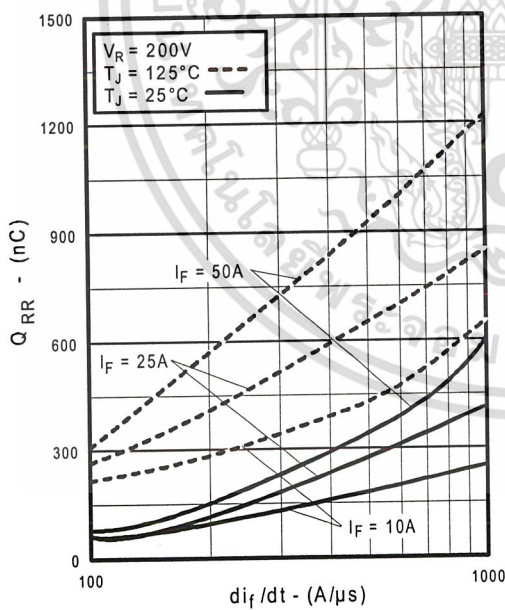


Fig. 16 - Typical Stored Charge vs. di/dt

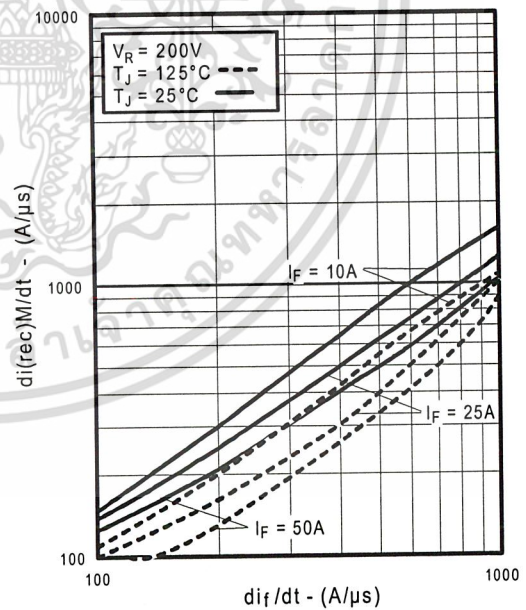


Fig. 17 - Typical $di_{(rec)}M/dt$ vs. di/dt

IRG4PC50UD

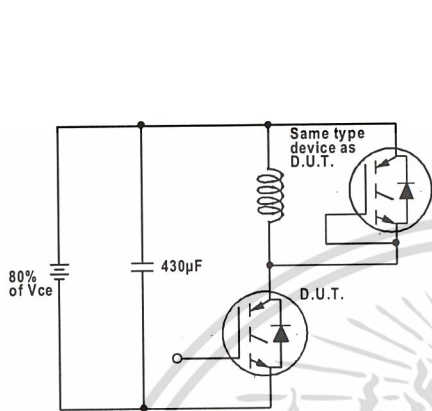


Fig. 18a - Test Circuit for Measurement of I_{LM} , E_{on} , $E_{off}(\text{diode})$, t_{rr} , Q_{rr} , I_{rr} , $t_{d(on)}$, t_r , $t_{d(off)}$, t_f

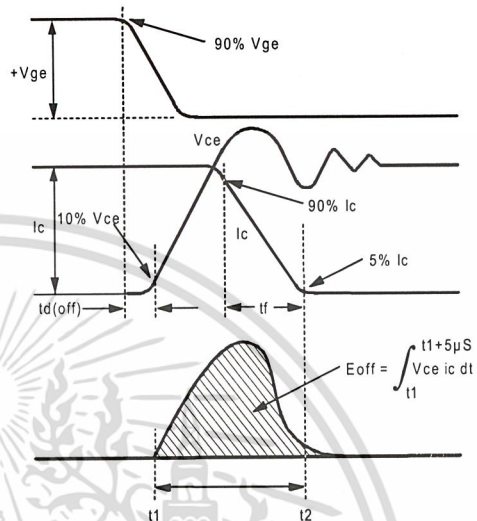


Fig. 18b - Test Waveforms for Circuit of Fig. 18a, Defining E_{off} , $t_{d(off)}$, t_f

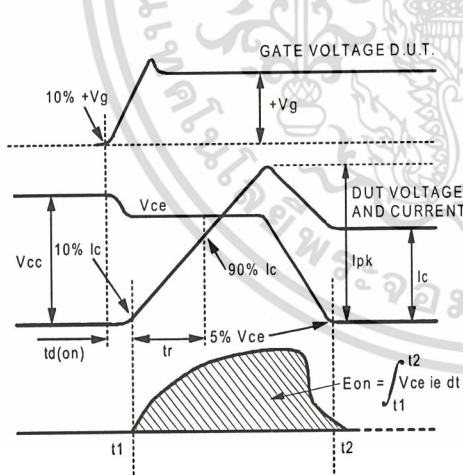


Fig. 18c - Test Waveforms for Circuit of Fig. 18a, Defining E_{on} , $t_{d(on)}$, t_r

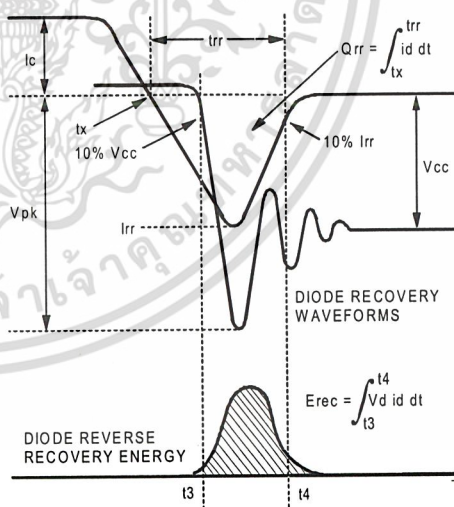


Fig. 18d - Test Waveforms for Circuit of Fig. 18a, Defining E_{rec} , t_{rr} , Q_{rr} , I_{rr}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

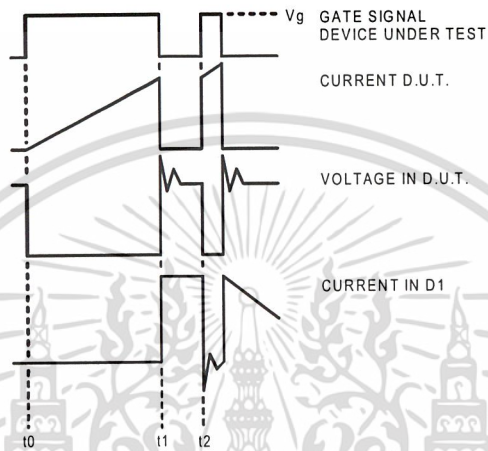


Figure 18e. Macro Waveforms for Figure 18a's Test Circuit

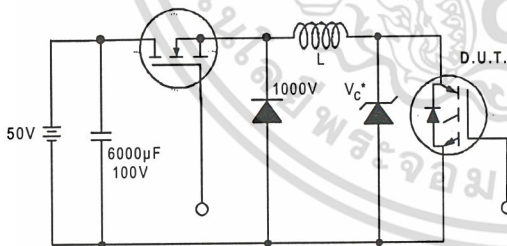


Figure 19. Clamped Inductive Load Test Circuit

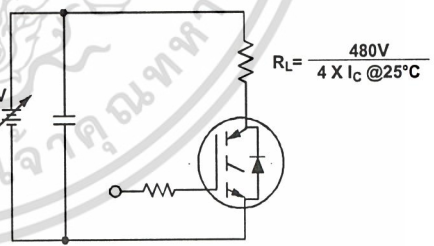


Figure 20. Pulsed Collector Current Test Circuit

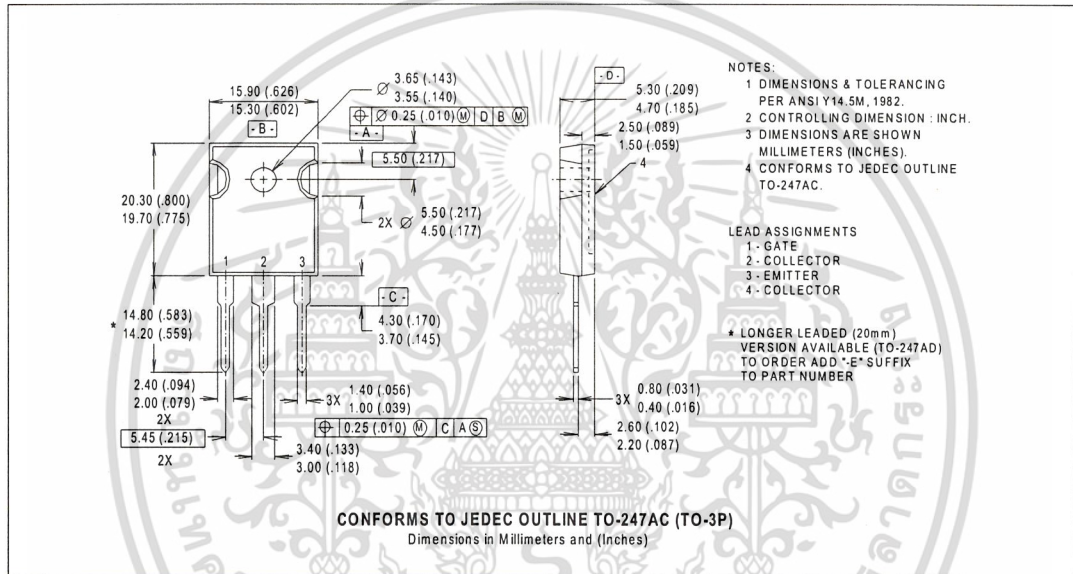
IRG4PC50UD

International
IR Rectifier

Notes:

- ① Repetitive rating: $V_{GE} = 20V$; pulse width limited by maximum junction temperature (figure 20)
- ② $V_{CC} = 80\%(V_{CES})$, $V_{GE} = 20V$, $L = 10\mu H$, $R_G = 5.0\Omega$ (figure 19)
- ③ Pulse width $\leq 80\mu s$; duty factor $\leq 0.1\%$.
- ④ Pulse width $5.0\mu s$, single shot.

Case Outline — TO-247AC



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 for sales contact information.
Data and specifications subject to change without notice. 12/00

High Performance, 28/40-Pin Enhanced FLASH Microcontrollers with CAN

High Performance RISC CPU:

- Linear program memory addressing up to 2 Mbytes
- Linear data memory addressing to 4 Kbytes
- Up to 10 MIPS operation
- DC - 40 MHz clock input
- 4 MHz - 10 MHz osc./clock input with PLL active
- 16-bit wide instructions, 8-bit wide data path
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single Cycle Hardware Multiplier

Peripheral Features:

- High current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupt pins
- Timer0 module: 8-bit/16-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler
- Timer1 module: 16-bit timer/counter
- Timer2 module: 8-bit timer/counter with 8-bit period register (time-base for PWM)
- Timer3 module: 16-bit timer/counter
- Secondary oscillator clock option - Timer1/Timer3
- Capture/Compare/PWM (CCP) modules CCP pins can be configured as:
 - Capture input: 16-bit, max resolution 6.25 ns
 - Compare: 16-bit, max resolution 100 ns (T_{CY})
 - PWM output: PWM resolution is 1- to 10-bit
Max. PWM freq. @:8-bit resolution = 156 kHz
10-bit resolution = 39 kHz
- Enhanced CCP module which has all the features of the standard CCP module, but also has the following features for advanced motor control:
 - 1, 2, or 4 PWM outputs
 - Selectable PWM polarity
 - Programmable PWM deadtime
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) with two modes of operation:
 - 3-wire SPI™ (Supports all 4 SPI modes)
 - I²C™ Master and Slave mode
- Addressable USART module: Supports Interrupt on Address bit

Advanced Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital Converter module (A/D) with:
 - Conversion available during SLEEP
 - Up to 8 channels available
- Analog Comparator Module:
 - Programmable input and output multiplexing
- Comparator Voltage Reference Module
- Programmable Low Voltage Detection (LVD) module
 - Supports interrupt on low voltage detection
- Programmable Brown-out Reset (BOR)

CAN bus Module Features:

- Message bit rates up to 1 Mbps
- Conforms to CAN 2.0B ACTIVE Spec with:
 - 29-bit Identifier Fields
 - 8-byte message length
 - 3 Transmit Message Buffers with prioritization
 - 2 Receive Message Buffers
 - 6 full 29-bit Acceptance Filters
 - Prioritization of Acceptance Filters
 - Multiple Receive Buffers for High Priority Messages to prevent loss due to overflow
 - Advanced Error Management Features

Special Microcontroller Features:

- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT), and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options, including:
 - 4X Phase Lock Loop (of primary oscillator)
 - Secondary Oscillator (32 kHz) clock input
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins

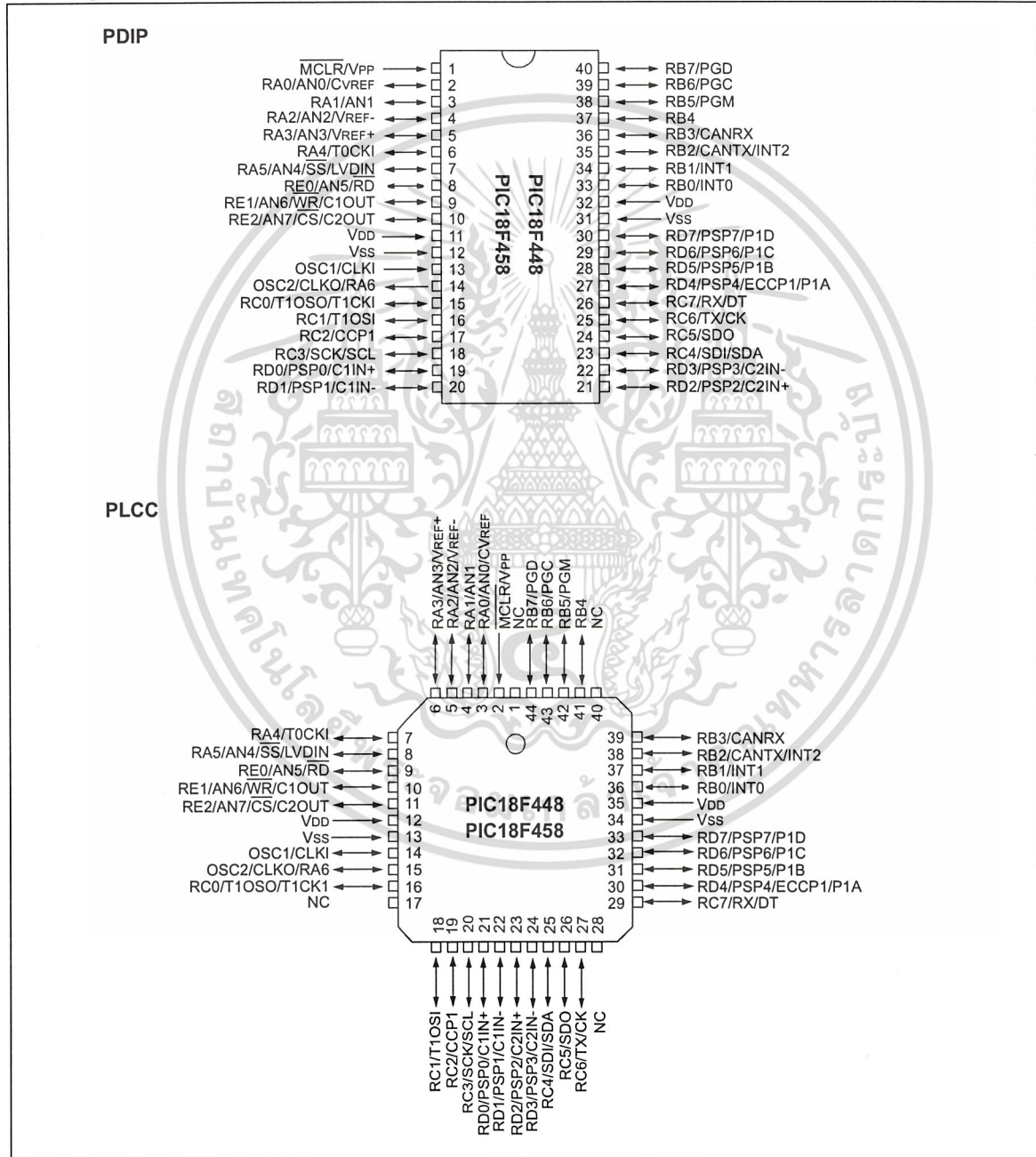
FLASH Technology:

- Low power, high speed Enhanced FLASH technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges

PIC18FXX8

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	Comparators	CCP/ ECCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit
	FLASH (bytes)	# Single Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I ² C		
PIC18F248	16K	8192	768	256	22	5	—	1/0	Y	Y	Y	1/3
PIC18F258	32K	16384	1536	256	22	5	—	1/0	Y	Y	Y	1/3
PIC18F448	16K	8192	768	256	33	8	2	1/1	Y	Y	Y	1/3
PIC18F458	32K	16384	1536	256	33	8	2	1/1	Y	Y	Y	1/3

Pin Diagrams



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.0 DEVICE OVERVIEW

This document contains device specific information for the following devices:

1. PIC18F248
2. PIC18F258
3. PIC18F448
4. PIC18F458

These devices are available in 28-pin, 40-pin and 44-pin packages. They are differentiated from each other in four ways:

1. PIC18FX58 devices have twice the FLASH program memory and data RAM of PIC18FX48 devices (32 Kbytes and 1536 bytes vs. 16 Kbytes and 768 bytes, respectively).

2. PIC18F2X8 devices implement 5 A/D channels, as opposed to 8 for PIC18F4X8 devices.
3. PIC18F2X8 devices implement 3 I/O ports, while PIC18F4X8 devices implement 5.
4. Only PIC18F4X8 devices implement the Enhanced CCP module, analog comparators and the Parallel Slave Port.

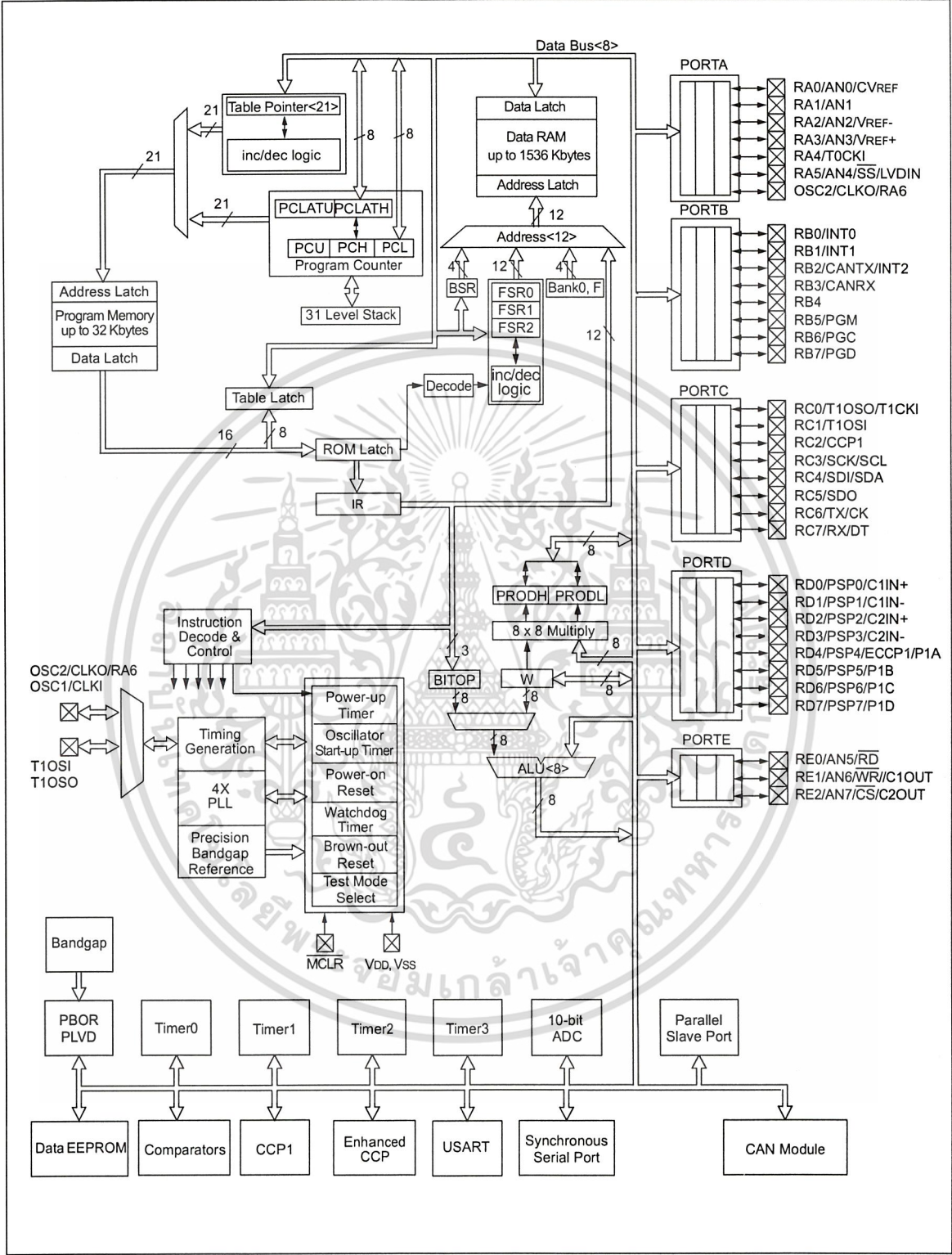
All other features for devices in the PIC18FXX8 family, including the serial communications modules, are identical. These are summarized in Table 1-1.

Block diagrams of the PIC18F2X8 and PIC18F4X8 devices are provided in Figure 1-1 and Figure 1-2, respectively. The pinouts for these device families are listed in Table 1-2.

TABLE 1-1: PIC18FXX8 DEVICE FEATURES

Features	PIC18F248	PIC18F258	PIC18F448	PIC18F458
Operating Frequency	DC - 40 MHz	DC - 40 MHz	DC - 40 MHz	DC - 40 MHz
Internal Program Memory	Bytes	16K	32K	16K
	# of Single Word Instructions	8192	16384	8192
Data Memory (Bytes)	768	1536	768	1536
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	17	17	21	21
I/O Ports	Ports A, B, C	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4
Capture/Compare/PWM Modules	1	1	1	1
Enhanced Capture/Compare/PWM Modules	—	—	1	1
Serial Communications	MSSP, CAN, Addressable USART	MSSP, CAN, Addressable USART	MSSP, CAN, Addressable USART	MSSP, CAN, Addressable USART
Parallel Communications (PSP)	No	No	Yes	Yes
10-bit Analog-to-Digital Converter	5 input channels	5 input channels	8 input channels	8 input channels
Analog Comparators	No	No	2	2
Analog Comparators VREF Output	N/A	N/A	Yes	Yes
RESETS (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST)
Programmable Low Voltage Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes
CAN Module	Yes	Yes	Yes	Yes
In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)	Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions	75 Instructions	75 Instructions	75 Instructions
Packages	28-pin SPDIP 28-pin SOIC	28-pin SPDIP 28-pin SOIC	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP

FIGURE 1-2: PIC18F448/458 BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC18FXX8

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258	PIC18F448/458					
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
MCLR/VPP MCLR VPP	1	1	18	2	I P	ST —	Master Clear (input) or programming voltage (output). Master Clear (Reset) input. This pin is an active low RESET to the device. Programming voltage input.
NC	—	—	12, 13, 33, 34	1, 17, 28, 40	—	—	These pins should be left unconnected.
OSC1/CLKI OSC1 CLKI	9	13	30	14	I I	CMOS/ST CMOS	Oscillator crystal or external clock input. Oscillator crystal input or external clock source input. ST buffer when configured in RC mode. Otherwise CMOS. External clock source input. Always associated with pin function OSC1 (see OSC1/CLKI, OSC2/CLKO pins).
OSC2/CLKO/RA6 OSC2 CLKO RA6	10	14	31	15	O O I/O	— — TTL	Oscillator crystal or clock output. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKO, which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate. General purpose I/O pin.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels Analog = Analog input
 I = Input O = Output
 P = Power OD = Open Drain (no P diode to VDD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258		PIC18F448/458				
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
RA0/AN0/CVREF RA0 AN0 CVREF	2	2	19	3	I/O I O	TTL Analog Analog	PORTA is a bi-directional I/O port. Digital I/O. Analog input 0. Comparator voltage reference output.
RA1/AN1 RA1 AN1	3	3	20	4	I/O I	TTL Analog	Digital I/O. Analog input 1.
RA2/AN2/VREF- RA2 AN2 VREF-	4	4	21	5	I/O I I	TTL Analog Analog	Digital I/O. Analog input 2. A/D reference voltage (Low) input.
RA3/AN3/VREF+ RA3 AN3 VREF+	5	5	22	6	I/O I I	TTL Analog Analog	Digital I/O. Analog input 3. A/D reference voltage (High) input.
RA4/T0CKI RA4 T0CKI	6	6	23	7	I/O I	TTL/OD ST	Digital I/O - open drain when configured as output. Timer0 external clock input.
RA5/AN4/SS/LVDIN RA5 AN4 SS LVDIN	7	7	24	8	I/O I I I	TTL Analog ST Analog	Digital I/O. Analog input 4. SPI slave select input. Low voltage detect input.
RA6							See the OSC2/CLKO/RA6 pin.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels Analog = Analog input
 I = Input O = Output
 P = Power OD = Open Drain (no P diode to VDD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC18FXX8

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258	PIC18F448/458					
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
RB0/INT0 RB0 INT0	21	33	8	36	I/O I	TTL ST	PORTB is a bi-directional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs. Digital I/O. External interrupt 0.
RB1/INT1 RB1 INT1	22	34	9	37	I/O I	TTL ST	Digital I/O. External interrupt 1.
RB2/CANTX/INT2 RB2 CANTX INT2	23	35	10	38	I/O O I	TTL TTL ST	Digital I/O. Transmit signal for CAN bus. External interrupt 2.
RB3/CANRX RB3 CANRX	24	36	11	39	I/O I	TTL TTL	Digital I/O. Receive signal for CAN bus.
RB4	25	37	14	41	I/O	TTL	Digital I/O. Interrupt-on-change pin.
RB5/PGM RB5 PGM	26	38	15	42	I/O I	TTL ST	Digital I/O. Interrupt-on-change pin. Low voltage ICSP programming enable.
RB6/PGC RB6 PGC	27	39	16	43	I/O I	TTL ST	Digital I/O. In-Circuit Debugger pin. Interrupt-on-change pin. ICSP programming clock.
RB7/PGD RB7 PGD	28	40	17	44	I/O I/O	TTL ST	Digital I/O. In-Circuit Debugger pin. Interrupt-on-change pin. ICSP programming data.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels Analog = Analog input
 I = Input O = Output
 P = Power OD = Open Drain (no P diode to VDD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258	PIC18F448/458					
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
RC0/T1OSO/T1CKI RC0 T1OSO T1CKI	11	15	32	16	I/O O I	ST — ST	PORTC is a bi-directional I/O port. Digital I/O. Timer1 oscillator output. Timer1/Timer3 external clock input.
RC1/T1OSI RC1 T1OSI	12	16	35	18	I/O I	ST CMOS	Digital I/O. Timer1 oscillator input.
RC2/CCP1 RC2 CCP1	13	17	36	19	I/O I/O	ST ST	Digital I/O. Capture1 input/Compare1 output/PWM1 output.
RC3/SCK/SCL RC3 SCK SCL	14	18	37	20	I/O I/O I/O	ST ST ST	Digital I/O. Synchronous serial clock input/output for SPI mode. Synchronous serial clock input/output for I ² C mode.
RC4/SDI/SDA RC4 SDI SDA	15	23	42	25	I/O I I/O	ST ST ST	Digital I/O. SPI data in. I ² C data I/O.
RC5/SDO RC5 SDO	16	24	43	26	I/O O	ST —	Digital I/O. SPI data out.
RC6/TX/CK RC6 TX CK	17	25	44	27	I/O O I/O	ST — ST	Digital I/O. USART asynchronous transmit. USART synchronous clock (see RX/DT).
RC7/RX/DT RC7 RX DT	18	26	1	29	I/O I I/O	ST ST ST	Digital I/O. USART asynchronous receive. USART synchronous data (see TX/CK).

Legend: TTL = TTL compatible input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels
 I = Input
 P = Power
 CMOS = CMOS compatible input or output
 Analog = Analog input
 O = Output
 OD = Open Drain (no P diode to V_{DD})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC18FXX8

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258	PIC18F448/458					
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
RD0/PSP0/C1IN+ RD0 PSP0 C1IN+	—	19	38	21	I/O I/O I	ST TTL Analog	PORTD is a bi-directional I/O port. These pins have TTL input buffers when external memory is enabled. Digital I/O. Parallel slave port data. Comparator 1 input.
RD1/PSP1/C1IN- RD1 PSP1 C1IN-	—	20	39	22	I/O I/O I	ST TTL Analog	Digital I/O. Parallel slave port data. Comparator 1 input.
RD2/PSP2/C2IN+ RD2 PSP2 C2IN+	—	21	40	23	I/O I/O I	ST TTL Analog	Digital I/O. Parallel slave port data. Comparator 2 input.
RD3/PSP3/C2IN- RD3 PSP3 C2IN-	—	22	41	24	I/O I/O I	ST TTL Analog	Digital I/O. Parallel slave port data. Comparator 2 input.
RD4/PSP4/ECCP1/P1A RD4 PSP4 ECCP1 P1A	—	27	2	30	I/O I/O I/O O	ST TTL ST —	Digital I/O. Parallel slave port data. ECCP1 capture/compare. ECCP1 PWM output A.
RD5/PSP5/P1B RD5 PSP5 P1B	—	28	3	31	I/O I/O O	ST TTL —	Digital I/O. Parallel slave port data. ECCP1 PWM output B.
RD6/PSP6/P1C RD6 PSP6 P1C	—	29	4	32	I/O I/O O	ST TTL —	Digital I/O. Parallel slave port data. ECCP1 PWM output C.
RD7/PSP7/P1D RD7 PSP7 P1D	—	30	5	33	I/O I/O O	ST TTL —	Digital I/O. Parallel slave port data. ECCP1 PWM output D.

Legend: TTL = TTL compatible input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels
 I = Input
 P = Power
 CMOS = CMOS compatible input or output
 Analog = Analog input
 O = Output
 OD = Open Drain (no P diode to VDD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC18FXX8

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258		PIC18F448/458				
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
RE0/AN5/RD RE0 AN5 RD	—	8	25	9	I/O I I	ST Analog TTL	PORTC is a bi-directional I/O port. Digital I/O. Analog input 5. Read control for parallel slave port (see WR and CS pins).
RE1/AN6/WR/C1OUT RE1 AN6 WR C1OUT	—	9	26	10	I/O I I O	ST Analog TTL Analog	Digital I/O. Analog input 6. Write control for parallel slave port (see CS and RD pins). Comparator 1 output.
RE2/AN7/CS/C2OUT RE2 AN7 CS C2OUT	—	10	27	11	I/O I I O	ST Analog TTL Analog	Digital I/O. Analog input 7. Chip select control for parallel slave port (see RD and WR pins). Comparator 2 output.
Vss	19, 8	12, 31	6, 29	13, 34	—	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	20	11, 32	7, 28	12, 35	—	—	Positive supply for logic and I/O pins.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels Analog = Analog input
 I = Input O = Output
 P = Power OD = Open Drain (no P diode to VDD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน., วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์. *อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics)*. พิมพ์ครั้งที่ 1 , 2547.
- [2] สุรศักดิ์ อยู่สวัสดิ์. *การพัฒนาอินเวอร์เตอร์ต่อกับกริดระบบไฟฟ้าระบบโพลีโวลตาอิก*. พฤษภาคม 2542.
- [3] สมยศ จุณณะปิยะ. *การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์*. พิมพ์ครั้งที่ 5 , พฤษภาคม 2546.
- [4] Daniel W. Hart, "Introduction to Power Electronics", Prentice Hall, 1st edition, 1997
- [5] HEXFET design's Manual, International Rectifier, Volume III, 1993
- [6] John, Kassakian G., Martin, Schlecht F ., George, Verghese C. *Principles of Power Electronics* , John Wiley & Sons, Inc, pp. 185-188, 1995.
- [7] Kenneth C. Smith., Adel S. Sedra. *Microelectronic Circuits* , CBS College Publishing All rights reserved, 1982.
- [8] Lander Cyril W. *Power Electronics*, McGRAW-HILL International Edition, pp. 114-120, 1993.
- [9] M D Singh., K B Khanchandani. *Power Electronics* , Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2000.
- [10] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications", Prentice Hall, 3rd edition, 2004.
- [11] Ned Mohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Application, and Design", John Wiley & Sons, 2nd edition, 1995.
- [12] P. C.Sen. *Principles of Electric Machines and Power Electronics* , John Wiley & Sons. Inc, 1989.
- [13] Rashid. *Microelectronic Circuit Analysis and Design* , PWS Publishing Company, 1999.
- [14] Richard Valentine. *Power Control Electronics Handbook* , McGraw-Hill, 1998.
- [15] Robert D.Chute., George M.Chute. *Electronic in Industry* , McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1981.
- [16] S. B.Dewan., G. R.Slemon., A. Straughen. *Power Semiconductor Drives* , John Wiley & Sons. Inc, 1984.

www.mag-inc.com