

สำนักงานคณะกรรมการ

การเชื่อมต่อระบบกริด
GRID CONNECTION



๔๖๖

๓ 423 ๗

9550

เลขานุการ.....
เลขทะเบียน..... **82967**
วัน,เดือน,ปี..... **30 ก.ค. 2551**

b. **11958285**
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การเชื่อมต่อบริการ
GRID CONNECTION



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

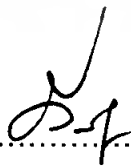
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเชื่อมต่อระบบกริด

ผู้จัดทำ



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อระบบกริด

นายอลงกรณ์	ปั้นเจริญ
นายอาทิตย์	ทองคำงาม
นายอนุภาพ	พิพิทภักดิ์
รศ.ดร. วีระเชษฐ์	ชั้นเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550	

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ขนาด 100 วัตต์ เข้ากับระบบการไฟฟ้า โดยทำการออกแบบอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส ซึ่งประกอบด้วยวงจรกำลังและระบบควบคุม โดยระบบควบคุมถูกประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC การกำเนิดแรงดันอาศัยหลักการเอสพีดับบลิวเอ็มป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านและนำไปยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นเป็น 220 โวลต์ การจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบการไฟฟ้าทำโดยการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า, ความถี่และการควบคุมมุมเฟส เพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบการไฟฟ้าให้อยู่ในพิกัดที่ชุดของอุปกรณ์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบอินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพมากกว่า 75 % และผลรวมค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์น้อยกว่า 5 %

GRID CONNECTION

Alongkom Panjaroen

Atit Thongkamngam

Anupap Pipitthapun

Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngem Advisor
2007**ABSTRACT**

This thesis proposes the 100 W inverter grid connected. The designed single phase consists of a power circuit and control system. The control system uses dsPIC microcontroller to generate the SPWM signal feed through inverter for converting the DC to AC. After that, the low pass filter is used to mitigate high frequency noises before boosting up the AC voltage to 220 V. To synchronize the power from the battery source to electrical power grid, the connecting method is used for controlling voltage, frequency and phase angle. The experimental result show the good connection performance such as over 75% of inverter and lower 5% of THDv.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยบุคคลต่างๆหลายท่านที่คอยช่วยเหลือ คอยให้คำปรึกษาอยู่ตลอดเวลา ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบคุณบุคคลเหล่านี้เป็นอย่างสูง

รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุม ที่คอยให้คำปรึกษา คอยให้ความเอาใจใส่ แนะนำและช่วยเหลือให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำ

พีธีรวัฒน์ ปอกเพชร และ พี ป.โท คนอื่นๆ ที่เป็นคนให้ข้อมูลในการทำโครงการ และให้คำปรึกษาดลอดการทำโครงการ

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ไม่ว่าจะด้วยประการใด ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันให้ผู้จัดทำเสมอ คุณค่า ประโยชน์และกุศลอันพึงได้จากปริญญาานิพนธ์นี้ ขอมอบแต่ผู้มีอุปการะคุณทุกท่าน

ผู้จัดทำ

IV
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 โครงงานที่นำเสนอ.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน.....	3
1.7 ระยะเวลาการดำเนินโครงงาน.....	4
1.8 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาในปฏิญญาฉบับนี้.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีอินเวอร์เตอร์.....	5
2.1.1 การสวิตชิงด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	5
2.1.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์ใช้เทคนิคการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบไปโพลาร์.....	13
2.1.3 ผลของเตดใหม่ต่อแรงดันไฟฟ้านอกของอินเวอร์เตอร์.....	15
2.2 ทฤษฎีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	18
2.2.1 กำลังไฟฟ้าในรูปคอมเพล็กซ์.....	18
2.2.2 การควบคุมการจ่ายไฟฟ้าระหว่างบัสสองบัส.....	19
2.3 หลักการของอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบการไฟฟ้า.....	25
2.3.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง.....	29
2.3.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนและตัวประกอบกำลัง.....	30
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานวงจรรองความถี่ต่ำผ่านด้านออก.....	30
2.4.1 ลักษณะวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบต่างๆ.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.2 ลำดับขั้นตอนการออกแบบวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน.....	32
บทที่ 3 การออกแบบ สร้างอินเวอร์เตอร์และวงจรรองความถี่ต่ำด้านนอก.....	35
3.1 ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า.....	35
3.2 ขนาดพิกัดของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า.....	36
3.2.1 การหาพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์.....	36
3.2.2 การหาขนาดพิกัดของตัวสวิตช์.....	38
3.2.3 การหาขนาดพิกัดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	38
3.2.4 การหาพิกัดขนาดของหม้อแปลงกำลัง.....	39
3.3 การออกแบบวงจรรองความถี่ต่ำผ่านด้านนอก.....	39
3.4 ระบบควบคุม.....	43
3.4.1 วงจรขั้วนำสวิตช์.....	43
3.4.2 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟตรง.....	43
3.4.3 วงจรตรวจวัดกระแสไฟตรง.....	44
3.4.4 วงจรตรวจวัดแรงดันระบบการไฟฟ้า.....	44
3.4.5 วงจรตรวจวัดกระแสระบบการไฟฟ้า.....	45
3.4.6 วงจรวัดจุดตัดศูนย์แรงดันระบบไฟฟ้า.....	45
3.4.7 การขับรีเลย์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.....	46
3.4.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	47
บทที่ 4 การจำลองระบบอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า.....	55
4.1 การสร้างแบบจำลอง.....	55
4.1.1 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส โดยมีโหลด เป็นความต้านทาน.....	56
4.1.2 การจำลองการทำงานของวงจรรองเพื่อหาประสิทธิภาพ ของวงจรรองที่ใช้งานจริง.....	58
4.1.2.1 การจำลองการทำงานของวงจรรองแบบ L.....	58
4.1.2.2 การจำลองการทำงานของวงจรรองแบบ T.....	60
4.1.3 การจำลองการทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์ร่วมวงจรรอง ต่อกับหม้อแปลง	62
4.1.4 การจำลองระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	64

VI
สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	65
5.1 การทดลองหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดหลอดไฟ.....	65
5.2 การทดลองทำการชิ่งโครไนซ์ร่วมกับระบบการไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด.....	74
5.3 การทดลองจ่ายโหลดที่พิกัดต่างๆร่วมกับระบบการไฟฟ้า.....	71
บทที่ 6 สรุปผลและวิจารณ์.....	76
6.1 ข้อดีของอินเวอร์เตอร์ที่ได้ออกแบบ.....	76
6.2 ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์ที่ได้ออกแบบ.....	76
6.3 ปัญหาระหว่างการทำโครงการ.....	77
6.4 สิ่งที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไปสำหรับโครงการนี้.....	77
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก ก รูปวงจรการทดลอง.....	79
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดลอง.....	88
ภาคผนวก ค โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม dsPIC.....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VII
สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
รูปที่ 2.1 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกิ่ง.....	6
รูปที่ 2.2 การสร้างสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม.....	8
รูปที่ 2.3 พีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์.....	9
รูปที่ 2.4 รูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลตชั่น.....	11
รูปที่ 2.5 สเปคตร้าของรูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลตชั่น เมื่อ $m_a = 2.5$ $m_f = 15$	11
รูปที่ 2.6 การควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านของอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม โดยการปรับค่าดัชนีการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด.....	12
รูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์.....	13
รูปที่ 2.8 การสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์.....	14
รูปที่ 2.9 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์.....	17
รูปที่ 2.10 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันด้านออกรูปไซน์.....	18
รูปที่ 2.11 แรงดันไฟฟ้าและกระแสที่แกนอ้างอิงใดๆ.....	18
รูปที่ 2.12 การส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างสองบัส.....	19
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในหน่วยเปอร์เซ็นต์ ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่บัสสอง.....	24
รูปที่ 2.14 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบการไฟฟ้า.....	25
รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า.....	25
รูปที่ 2.16 แผนภาพเฟสเซอร์แรงดันและกระแส.....	27
รูปที่ 2.17 ทิศทางและรูปคลื่นกระแส, แรงดันที่จุดเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า.....	29
รูปที่ 2.18 การกั้นสัญญาณของวงจรกรองแบบอุดมคติ.....	30
รูปที่ 2.19 การกั้นสัญญาณของวงจรกรองแบบปฏิบัติ.....	31
รูปที่ 3.1 แผนผังส่วนประกอบอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบการไฟฟ้า.....	36
รูปที่ 3.2 วงจรกรองที่ได้จากการออกแบบ.....	41
รูปที่ 3.3 วงจรขั้วนำสวิตช์.....	43
รูปที่ 3.4 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟตรง.....	44
รูปที่ 3.5 วงจรตรวจวัดกระแสไฟตรง.....	44
รูปที่ 3.6 วงจรตรวจวัดแรงดันระบบการไฟฟ้า.....	45

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 วงจรตรวจวัดกระแสระบบการไฟฟ้า.....	45
รูปที่ 3.8 วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์แรงดันระบบการไฟฟ้า.....	46
รูปที่ 3.9 วงจรรีเลย์ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.....	46
รูปที่ 3.10 ไตอะแกรมการทำงานและส่วนประกอบทั้งหมดของ dsPIC4011.....	48
รูปที่ 3.11 โครงสร้างทางโปรแกรม (Program's model) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC.....	54
รูปที่ 4.1 ลำดับขั้นตอนการจำลอง.....	55
รูปที่ 4.2 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส โดยมีโหลดเป็นความต้านทาน.....	57
รูปที่ 4.3 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสต่อกับวงจรกรองแบบแอล.....	59
รูปที่ 4.4 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสต่อกับวงจรกรองแบบที่.....	61
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์ร่วมวงจรกรองต่อกับหม้อแปลง.....	63
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับการไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	64
รูปที่ 5.1 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์.....	65
รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 100 วัตต์....	66
รูปที่ 5.3 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ เมื่อจ่ายโหลด 100 วัตต์.....	66
รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์...67	67
รูปที่ 5.5 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ เมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์.....	67
รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 300วัตต์....68	68
รูปที่ 5.7 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ เมื่อจ่ายโหลด 300 วัตต์.....	68
รูปที่ 5.8 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองจ่ายโหลดหลอดไฟร่วมกับระบบการไฟฟ้า.....	69
รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 100 วัตต์...70	70
รูปที่ 5.10 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ เมื่อจ่ายโหลด 100 วัตต์.....	70
รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์..71	71
รูปที่ 5.12 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ เมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์.....	71
รูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 300 วัตต์..72	72

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.14 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ เมื่อจ่ายโหลด 300 วัตต์.....	72
รูปที่ 5.15 สัญญาณแรงดันอินเวอร์เตอร์(บน)กับสัญญาณแรงดันการไฟฟ้า(ล่าง) ก่อนทำการชิ่งโครไนซ์.....	74
รูปที่ 5.16 สัญญาณแรงดันอินเวอร์เตอร์(บน)กับสัญญาณแรงดันการไฟฟ้า(ล่าง) หลังทำการชิ่งโครไนซ์.....	74
รูปที่ 5.17 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองจ่ายโหลดโหลดไฟร่วมกับระบบการไฟฟ้า.....	75



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงการ.....	2
ตารางที่ 1.2 แสดงผังเวลาการดำเนินโครงการ.....	4
ตารางที่ 2.1 ฮาร์มอนิกของ $(\hat{V}_{Ao})_h / (V_d/2)$	12
ตารางที่ 2.2 แสดงการใช้วงจรกรองอันดับหนึ่งและสอง ให้เหมาะกับอิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่าย และโหลด.....	32
ตารางที่ 2.3 แสดงการใช้วงจรกรองอันดับสามและสี่ให้เหมาะกับอิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่าย และโหลด.....	33
ตารางที่ 2.4 ค่าอัตราการลดทอน (Lss) ในหน่วย dB/Octave.....	34
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบรวมทั้งจ่ายโหลดหลอดไฟ ที่พิกัดต่างๆ.....	69
ตารางที่ 5.2 แสดงเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์.....	70
ตารางที่ 5.3 แสดงเอาต์พุตของระบบการไฟฟ้า.....	70
ตารางที่ 5.4 แสดงเอาต์พุตของโหลด.....	70
ตารางที่ 5.5 แสดงเอาต์พุตของกำลังที่ส่งจ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์.....	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้น เห็นได้จากการดำเนินชีวิตประจำวันล้วนเกี่ยวข้องกับพลังงานไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นการทำงาน อุปกรณ์เครื่องมือ เครื่องอำนวยความสะดวกต่าง ๆ แต่แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน น้ำมัน และพลังงานจากน้ำมาผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งพลังงานเหล่านี้วันจะยิ่งลดน้อยลงไป

จึงเกิดแนวคิดหาพลังงานทดแทน เป็นพลังงานทางเลือก ตัวอย่างเช่น พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ จากเซลล์เชื้อเพลิง จากพลังงานลม สำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ก่อนนำมาใช้งานจำเป็นต้องมีอุปกรณ์แปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ และควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า ซึ่งก็คือ อินเวอร์เตอร์ โดยถ้าหากสามารถทำการควบคุมให้อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ จะได้การทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีความผิดเพี้ยนน้อยกว่ากรณีควบคุมแบบอนาล็อก อีกทั้งการออกแบบให้อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้จากการสั่งงานของไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถที่จะทำการพัฒนาโปรแกรม เพื่อไปใช้งานอย่างอื่นได้อีกเช่นกัน

1.2 โครงงานที่นำเสนอ

อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสต่อกับระบบไฟฟ้า มีส่วนประกอบแบ่งเป็น 4 ส่วนหลัก ๆ คือ

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (V_d)
2. วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter circuit)
3. วงจรต่อกับระบบไฟฟ้า (Grid - connected circuit)
4. ระบบควบคุม (Control system)

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าหนึ่งเฟส
2. ออกแบบและสร้างวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ต้านออกของอินเวอร์เตอร์ เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวน
3. ศึกษาเทคนิคการควบคุมแบบเลื่อนเฟส เพื่อปรับมุมกำลังการไหลของปริมาณไฟฟ้า
4. ศึกษาเทคนิคการควบคุมการแบ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบการไฟฟ้ากับอินเวอร์เตอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เรียนรู้และเข้าใจถึงหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์
2. เรียนรู้และเข้าใจถึงหลักการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวน
3. เรียนรู้และเข้าใจถึงหลักการจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนให้กับระบบการไฟฟ้า
4. อินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นมาสามารถเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าได้และเป็นต้นแบบในการพัฒนาต่อไป

1.5 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

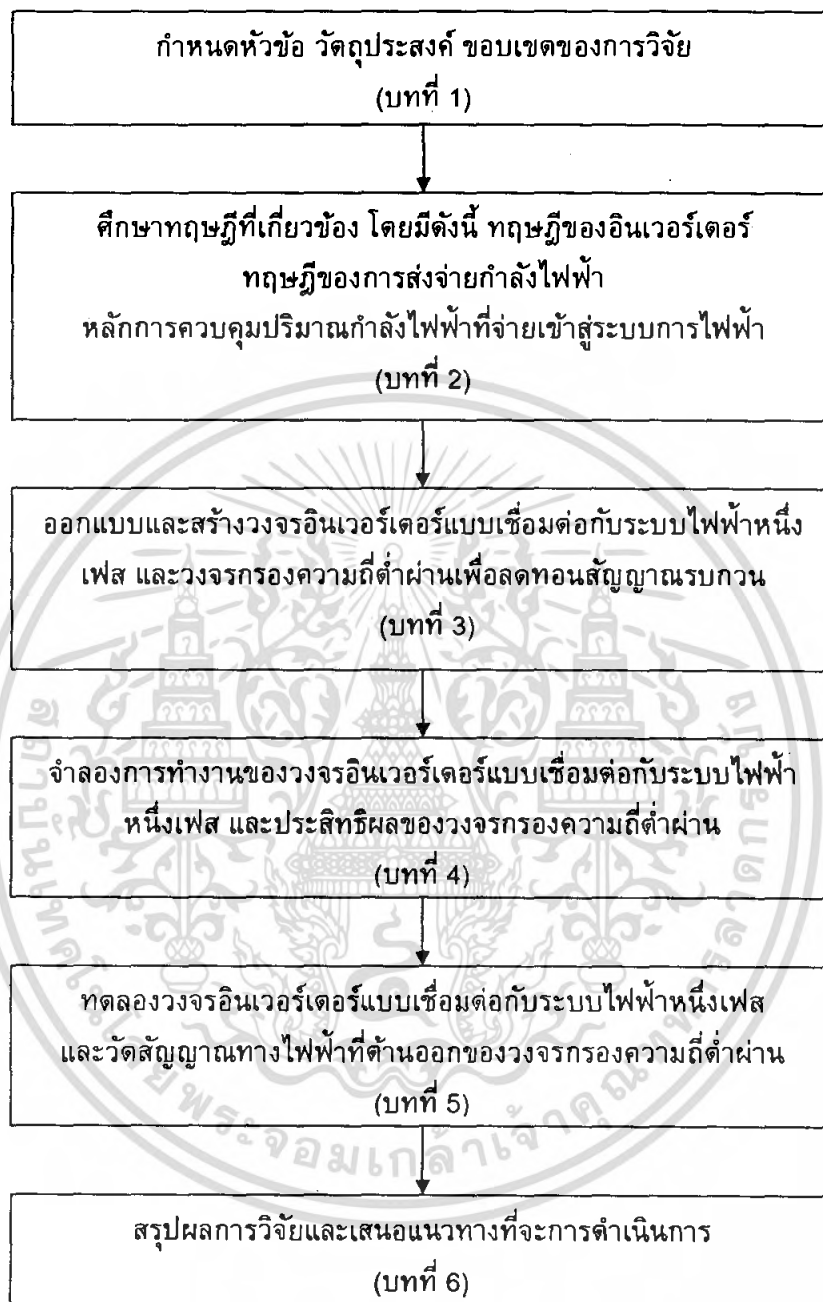
1. ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าหนึ่งเฟส มีพิกัดตามตารางที่ 1.1
2. ทำการศึกษาและออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำแบบพาสซีฟ

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงการ

รายการ		ข้อกำหนด
พิกัดแรงดันด้านเข้า	ใช้แบตเตอรี่	48 - 60 V _{dc} , 48 V _{dc} (ปกติ)
พิกัดด้านออกที่ต่อกับระบบการไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	หนึ่งเฟส 220 V _{ac} ± 5%
	ความถี่	50 Hz, ± 1%
	กำลังไฟฟ้า	300 W
พิกัดอินเวอร์เตอร์	เทคนิคการควบคุมสวิตช์	SPWM
	ตัวสวิตช์	IGBT
	ความถี่ในการสวิตช์	20 kHz
	ดัชนีการมอดูเลต	0.65 - 0.95, 0.8 (ปกติ)
	แรงดันไฟฟ้าด้านออก	27- 40 V _{ac} , 27 V _{ac} (ปกติ)
	การแยกกราวด์กับระบบไฟฟ้า	หม้อแปลงกำลัง 22/220 V _{ac}
	วงจรกรองด้านออก	Passive LC filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ผังเวลาการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.2 แสดงผังเวลาการดำเนินโครงการ

หัวข้อการดำเนินงาน	2550						2551			
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย	■									
2.ศึกษาทฤษฎี บทความ วิทยานิพนธ์ ที่เกี่ยวข้อง	■	■	■							
3.ออกแบบและจำลองวงจร อินเวอร์เตอร์ วงจรกรอง ความถี่ต่ำผ่าน การเชื่อมกับ ระบบกริด			■	■	■					
4.สร้างและทดลองวงจรที่ ออกแบบ ควบคุมการ เชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า						■	■	■	■	
5.สรุปและจัดทำ วิทยานิพนธ์								■	■	■



แผนการดำเนินงานที่กำหนดไว้

แผนการดำเนินงานจริง

1.8 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของเรื่อง โครงการที่นำเสนอ วัตถุประสงค์ของโครงการ ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ ขอบเขต แผนการดำเนินโครงการ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง อธิบายถึงหลักการและทฤษฎีที่สำคัญที่นำมาอ้างอิงและใช้ เพื่อจัดทำโครงการ

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่ง เฟส และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวน

บทที่ 4 จำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส และประสิทธิภาพของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

บทที่ 5 ผลการทดลอง จากชิ้นโครงการที่ได้มานำไปทำการทดลอง ตามขอบเขตที่กำหนด เก็บข้อมูล บันทึกผลการทดลอง

บทที่ 6 บทสรุปและเสนอแนวทางที่จะดำเนินการ เป็นการสรุปผล ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาโครงการนี้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้า ก่อนที่จะทำการออกแบบอินเวอร์เตอร์ ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ทฤษฎีของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หลักการควบคุมปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า ทฤษฎีของวงจรกรองความถี่ต่ำด้านออก

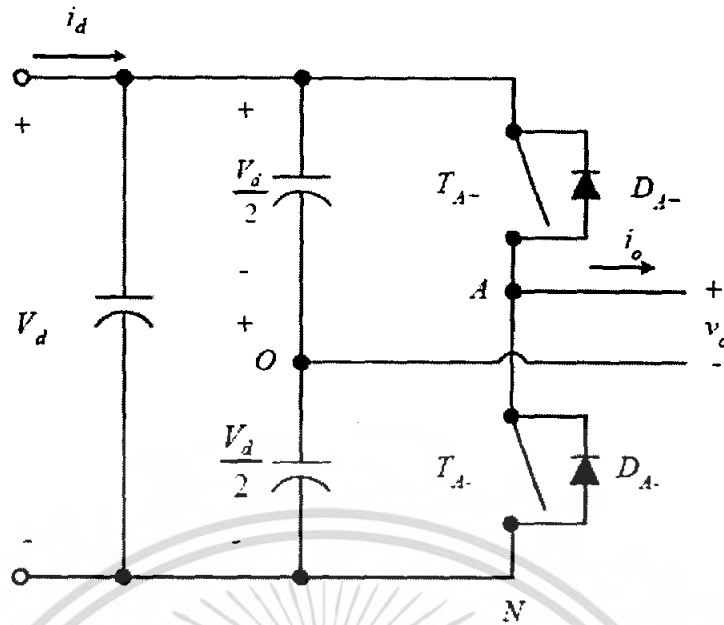
2.1 ทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์ [1]

อินเวอร์เตอร์ที่ทำการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับจะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มคือ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) กับอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI)

อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน มักจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันอาจจะแบ่งเป็นสองประเภทที่นิยมนำไปใช้งานคือ อินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width-Modulation inverter: PWM inverter) ส่วนอีกประเภทที่นิยมคืออินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (square-wave inverter) ซึ่งมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือขนาดของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ จะมีค่าสูง

2.1.1 การสวิตซ์ด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Sinusoidal Pulse Width Modulation: SPWM)

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) เพื่อความเข้าใจการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2.1 จะแสดงเพียงหนึ่งกิ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์คือกิ่ง A หรือ เฟส A ที่สมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าคงที่และกำหนดให้การสวิตซ์ทำงานเป็นแบบ พีดับเบิลยูเอ็ม [1]



รูปที่ 2.1 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกึ่ง [1]

คำย่อและความหมายที่สำคัญของการสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม มีดังต่อไปนี้

$V_{control}$ สัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก

V_{tri} สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตชิง

f_1 ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์

f_s ความถี่ของการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์

m_a อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด

m_f อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

ค่า m_a และ m_f จะนิยามจากสมการที่ (2.1ก) และ (2.1ข) ตามลำดับ

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (2.1ก)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.1ข)$$

เมื่อ $\hat{V}_{control}$ คือค่ายอดควบคุมสัญญาณไซน์

\hat{V}_{tri} คือค่ายอดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$v_{control} > v_{tri} , \quad T_{A+} \text{ จะนำกระแส } v_{Ao} = \frac{1}{2}V_d \quad (2.2)$$

$$v_{control} < v_{tri} , \quad T_{A-} \text{ จะนำกระแส } v_{Ao} = -\frac{1}{2}V_d \quad (2.3)$$

การทำงานของสวิตช์ T_{A+} และ T_{A-} จะขึ้นอยู่กับผลการเปรียบเทียบของ $v_{control}$ กับ v_{tri} โดยจะมีเงื่อนไขดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) และจะไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแส รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างเมื่อกำหนดเงื่อนไขที่ $m_a = 0.8$ และ $m_f = 15$ ฮาร์มอนิกสเปกตรัม (harmonic spectrum) ของ v_{Ao} โดยเขียนกราฟเทียบกับค่าแกนตั้ง $(\hat{V}_{Ao})_h / (V_d/2)$ แสดงในรูปที่ 2.2 (ค) จะมีส่วนสำคัญสามส่วนคือ

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

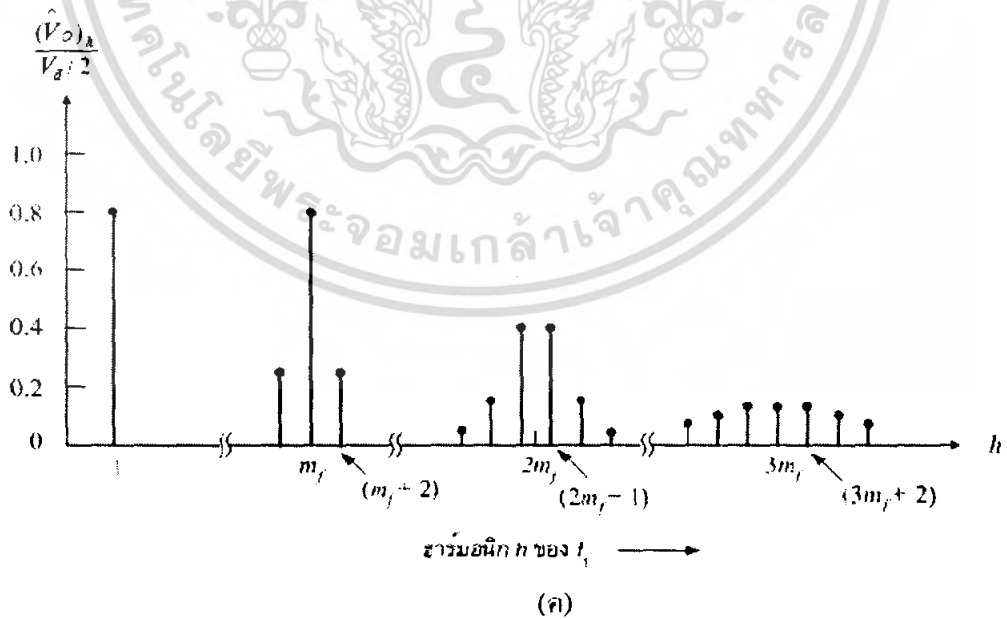
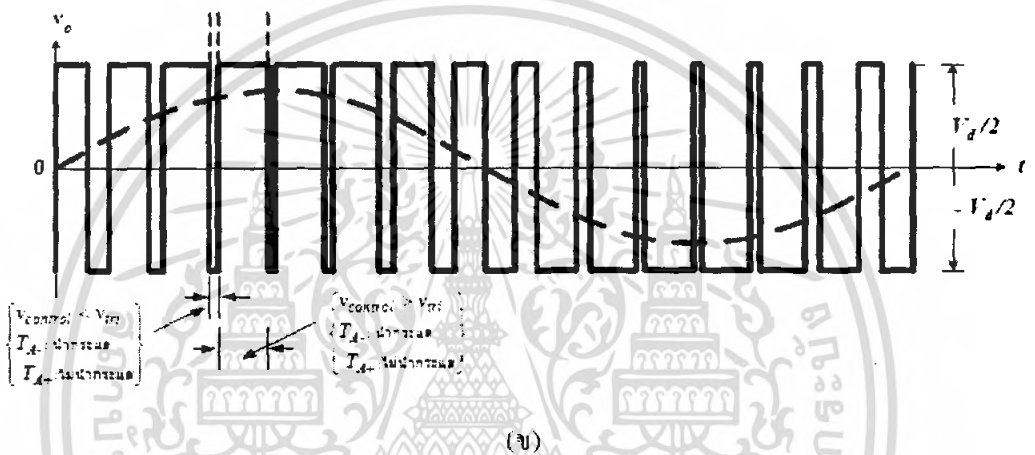
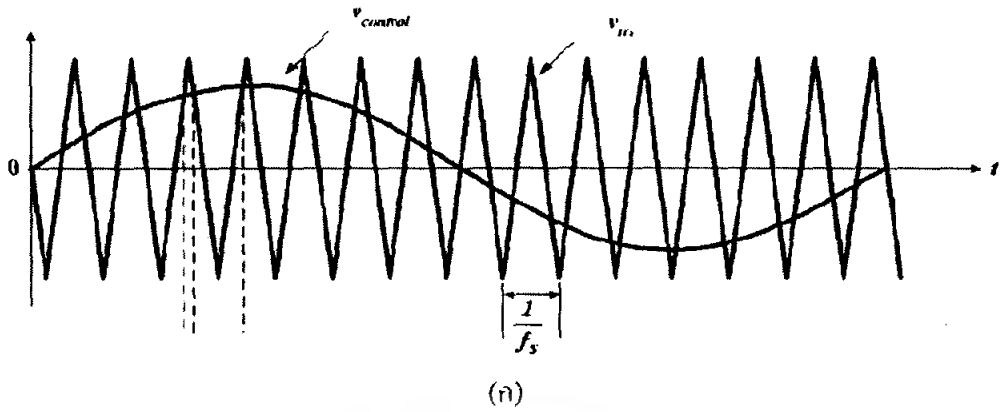
$$V_{Ao} = \frac{v_{control}}{\hat{V}_{tri}} \cdot \frac{V_d}{2} , \quad v_{control} \leq \hat{V}_{tri} \quad (2.4)$$

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

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

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

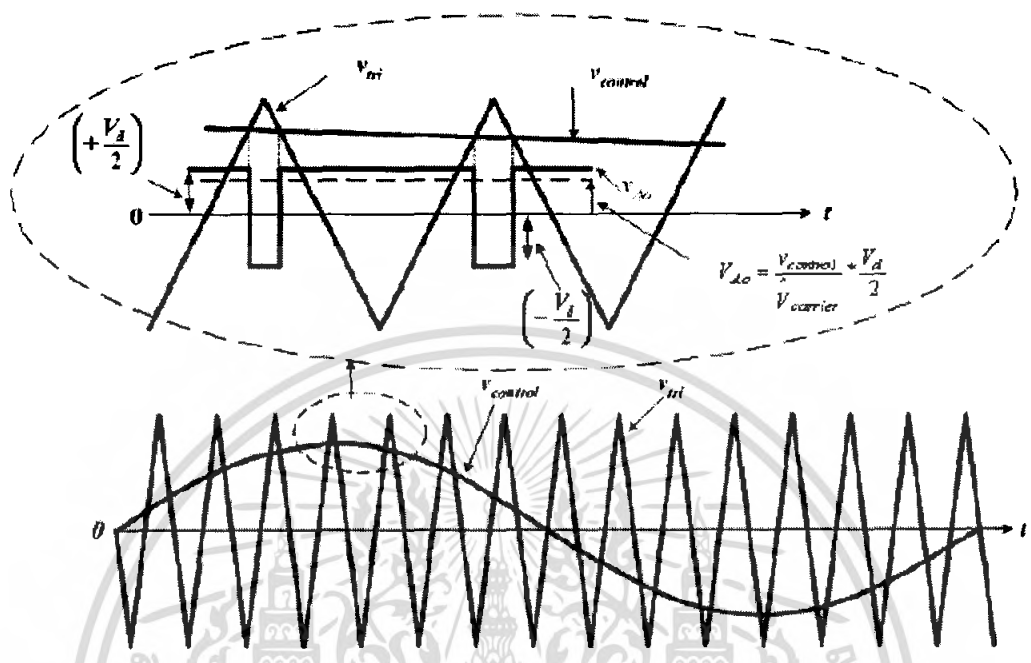
$$(\hat{V}_{Ao})_1 = m_a \cdot (V_d/2) , \quad m_a \leq 1.0 \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.2 การสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.5) พิจารณาประกอบรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลัก
 มวลจะแปรผันเป็นเชิงเส้นกับค่า m_a ซึ่ง m_a จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1



รูปที่ 2.3 พัดดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (sinusoidal pulsewidth modulation: SPWM) [1]

2). ค่าไซด์แบนด์ฮาร์โมนิก (sideband harmonic) จะเกิดขึ้นรอบๆ $1m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$ ดัง
 แสดงในสมการที่ (2.6) หรือ (2.7)

$$f_h = (jm_f \pm k)f_1 \tag{2.6}$$

$$h = j(m_f) \pm k \tag{2.7}$$

เมื่อ $h = 1$ คือ ความถี่หลักมูล (fundamental frequency)
 ถ้าค่า j เป็นเลขคี่ ค่าฮาร์โมนิกจะเท่ากับค่า k ที่เป็นเลขคู่
 ถ้าค่า j เป็นเลขคู่ ค่าฮาร์โมนิกจะเท่ากับค่า k ที่เป็นเลขคี่

3). ค่า m_f ฮาร์โมนิกควรจะเป็นเลขคี่ เพราะถ้ากำหนดให้ค่า m_f เป็นเลขคี่ก็จะทำให้เกิดการ
 สมมาตรเลขคี่ ซึ่งแสดงได้จากสมการ $f(-t) = -f(t)$ ผลที่ได้คือจะมีเพียงฮาร์โมนิกเลขคี่
 เท่านั้นที่ยังปรากฏอยู่ใน v_{AO} ส่วนฮาร์โมนิกเลขคู่จะหักล้างกัน โดยที่ช่วง $m_f > 21$ จะถือว่า
 m_f มีค่ามากโดยที่ขนาดของฮาร์โมนิกย่อย (sub-harmonics) จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า m_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีโอเวอร์มอดูเลชัน ($m_a > 1$) จะเกิดขึ้นเมื่อ $\hat{V}_{control} > \hat{V}_{tri}$ โดยค่ารูปคลื่นที่ดับเบิลยูเอ็มจะมีช่วงที่เป็นบวกหรือลบกว้างกว่าหนึ่งคาบการสวิตชิงแสดงดังในรูปที่ 2.4 โอเวอร์มอดูเลชัน มีข้อดีคือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าของความถี่หลักมูลจะมีค่าสูงกว่าในกรณี $m_a \leq 1$ แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และช่วงแรงดันยอดทางด้านออกของความถี่หลักมูลจะมีค่าอยู่ระหว่าง $V_d/2$ ถึง $4V_d/2\pi$ เขียนสมการได้ดังนี้

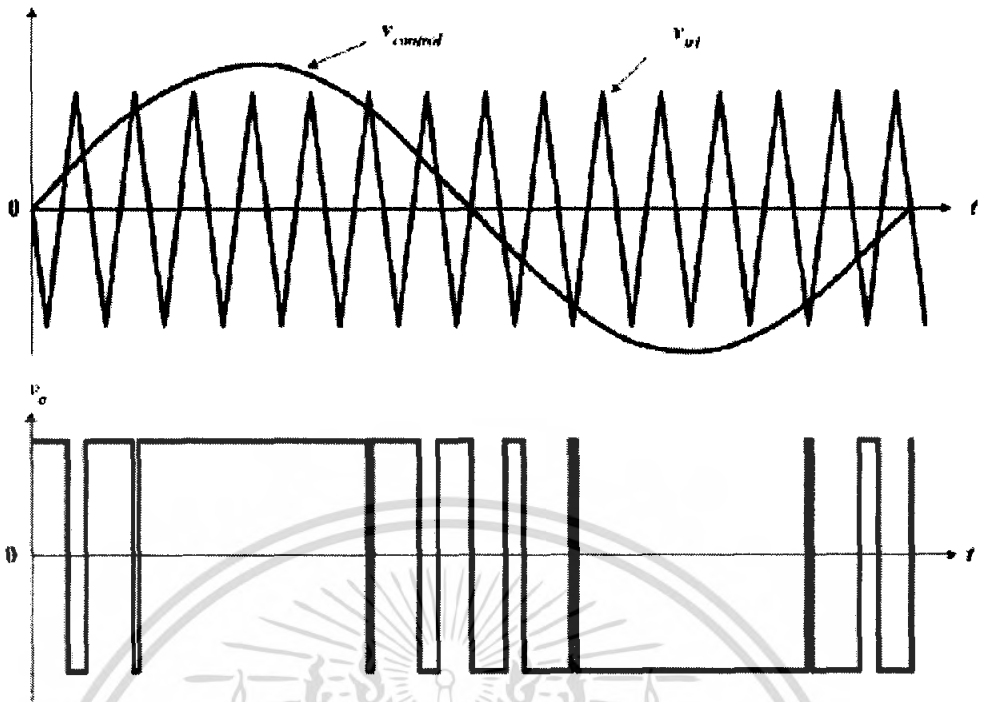
$$\frac{V_d}{2} < (\hat{V}_{Ao})_h < \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) ค่า $(\hat{V}_{Ao})_h$ จะอยู่ระหว่างค่าที่ทำงานในโหมดเชิงเส้นและโหมดรูปคลื่นสี่เหลี่ยม กรณีโหมดสี่เหลี่ยมจะเกิดจากการที่ $m_a \gg 1$ และต้องมีค่ามากพอ ในการที่จะบอกว่ามากพอเท่าใดจะขึ้นอยู่กับค่า m_f ด้วยหากค่า m_f มีค่ามากพอ m_a ก็จะต้องมีค่ามากไปด้วยที่จะทำให้ $v_{control}$ ไม่ตัดยอดของปลายสามเหลี่ยมของสัญญาณอ้างอิงเลย

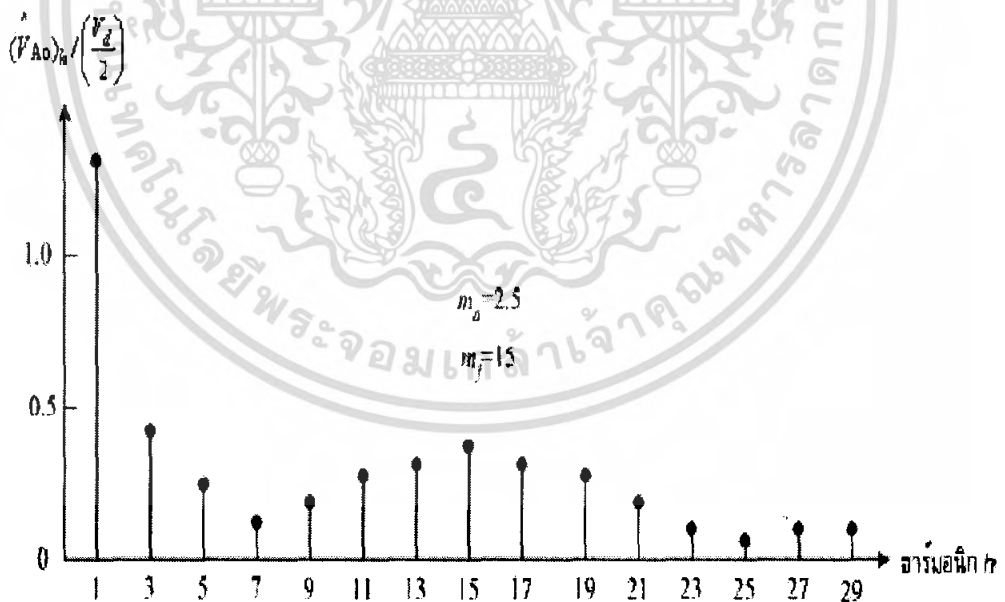
การเปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณในเงื่อนไขหาก $v_{control} > v_{tri}$ จะได้สัญญาณพัลส์เป็นบวก ในทำนองเดียวกันหาก $v_{control} < v_{tri}$ จะได้พัลส์เป็นลบ กรณีโอเวอร์มอดูเลชันในรูปที่ 2.4 ไชเคิลบวกของ $v_{control}$ จะมีช่วงยอดที่ $v_{control}$ มากกว่า v_{tri} จนถือว่าจะได้พัลส์บวกเป็นระยะเวลาหนึ่งเสมือนว่าไม่มีการสวิตชิง เช่นเดียวกับการเกิดขึ้นที่ครึ่งไชเคิลลบของ $v_{control}$ ช่วงล่างจะทำให้ค่าพัลส์เป็นลบหรือศูนย์เป็นช่วงขณะที่ไม่มีการสวิตชิง

อย่างไรก็ตามข้อเสียของกรณีโอเวอร์มอดูเลชันก็คือทำให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ที่อยู่ใกล้กับฮาร์มอนิกอันดับที่หนึ่งหรือความถี่หลักมูล เช่นฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7 เป็นต้น เช่นใน รูปที่ 2.5 ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดผลเสียมากหากนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7 จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและทำให้เกิดความเร็วหลายความเร็วในเวลาเดียวกันทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนไม่สม่ำเสมอ

ผลเสียที่จะเกิดเช่นในรูปที่ 2.5 คือเกิดฮาร์มอนิกที่ใกล้ๆ กับความถี่หลักมูลหรือฮาร์มอนิกอันดับหนึ่งและเกิดฮาร์มอนิกรอบๆ ความถี่ f_s

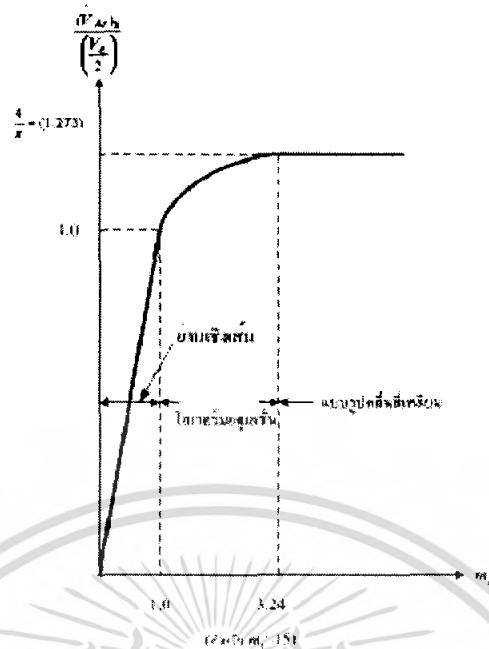


รูปที่ 2.4 รูปคลื่นพีดีบีเบิลยูเอ็มแบบ โอเวอร์มอดูเลชัน [1]



รูปที่ 2.5 สเปกตรากของรูปคลื่นพีดีบีเบิลยูเอ็มแบบ โอเวอร์มอดูเลชัน เมื่อ $m_o = 2.5$, $m_f = 15$ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ดับเบิลยูเอ็มโดยการปรับค่าดัชนีการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด [1]

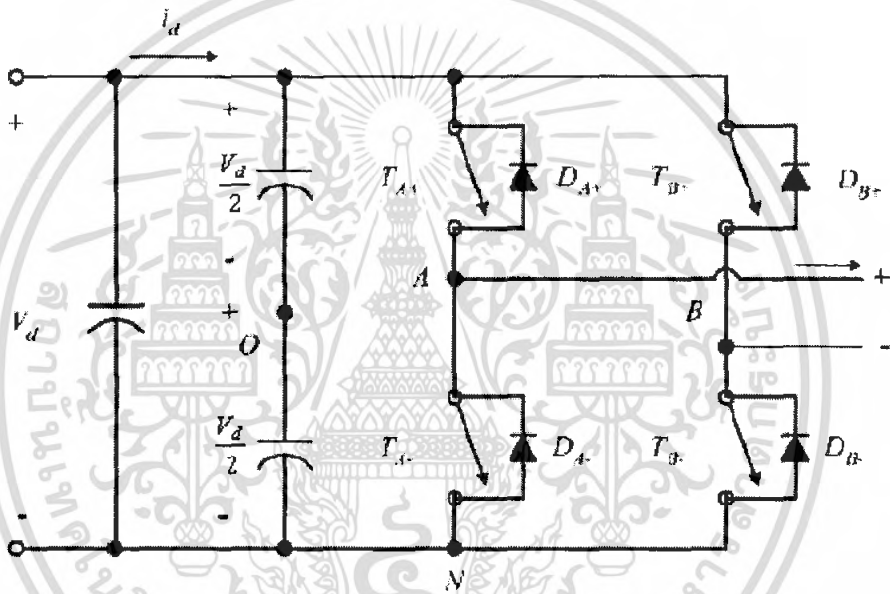
ตารางที่ 2.1 ฮาร์มอนิกของ $(\hat{V}_{Ao})_h / (V_d/2)$ [1]

h \ m_a	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
องค์ประกอบความถี่หลักมูล	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
m_f	1.242	1.150	1.006	0.818	0.601
$m_f \pm 2$	0.016	0.061	0.131	0.220	0.318
$m_f \pm 4$					0.018
$2m_f \pm 1$	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
$2m_f \pm 3$		0.024	0.071	0.139	0.212
$2m_f \pm 5$				0.013	0.033
$3m_f$	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113
$3m_f \pm 2$	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062
$3m_f \pm 4$		0.012	0.047	0.104	0.157
$3m_f \pm 6$				0.016	0.44
$4m_f \pm 1$	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068
$4m_f \pm 3$	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009
$4m_f \pm 5$			0.034	0.084	0.119
$4m_f \pm 7$				0.017	0.050
หมายเหตุ: $(\hat{V}_{Ao})_h / (V_d/2) = (V_{AN})_h / \frac{1}{2} V_d$ เป็นฟังก์ชันของ m_a					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ใช้เทคนิคการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เฟสเดียวจะประกอบไปด้วยสองกิ่ง คือ กิ่ง A และ กิ่ง B ในรูปที่ 2.7 โดยแบบฟูลบริดจ์จะมีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบฮาร์ฟบริดจ์สองเท่าที่เงื่อนไขแรงดันด้านเข้า (V_d) เท่ากัน จึงเหมาะที่จะเลือกใช้เมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าโหลดสูงขึ้นเงื่อนไขสำคัญที่อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ คือการทำงานของสวิตช์ T_{A+} และ T_{A-} ต้องไม่ทำงานพร้อมกันในทุกช่วงเวลา มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบ ในอุดมคติเวลาการสวิตช์ซิงของ T_{A+} และ T_{A-} จะตรงข้ามกัน แต่ในทางปฏิบัติจะต้องการช่วงเวลาที่ไม่สวิตช์ทั้งคู่ไม่นำกระแส ซึ่งจะเรียกว่า เดดไทม์ (deadtime) โดยเดดไทม์จะอยู่ในช่วงเวลาก่อนจะเปลี่ยนสถานะการสวิตช์จากนำกระแสเป็นไม่นำกระแส หรือจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแส



รูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ [1]

การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (bipolar voltage switching) คือการควบคุมให้สวิตช์แบบบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ เช่น ในรูปที่ 2.7 การทำงานของสวิตช์ T_{A+} และ T_{B-} จะถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลา อีกคู่หนึ่งคือการทำงานของสวิตช์ T_{A-} และ T_{B+} ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง A จะเท่ากับ

$$v_{Ao} = \frac{1}{2}V_d \quad \text{เมื่อ } v_{control} > v_{tri} , \quad \text{สวิตช์ } T_{A+} \text{ และ } T_{B-} \text{ จะนำกระแส (2.9)}$$

$$v_{Ao} = -\frac{1}{2}V_d \quad \text{เมื่อ } v_{control} < v_{tri} , \quad \text{สวิตช์ } T_{A-} \text{ และ } T_{B+} \text{ จะนำกระแส (2.10)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอาศัยหลักการตามรูปที่ 2.1 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบหนึ่งกึ่งจะได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกของกึ่ง B จะเท่ากับค่าลบของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของกึ่ง A คือ $v_{Bo} = -v_{Ao}$ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์หรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างกึ่ง A กับกึ่ง B คือ

$$v_o = v_{Ao} - v_{Bo} = v_{Ao} - (-v_{Ao}) = 2v_{Ao} = 2\left(\frac{1}{2}V_d\right) = V_d$$

เทียบเคียงกับสมการที่ (2.5) จะได้

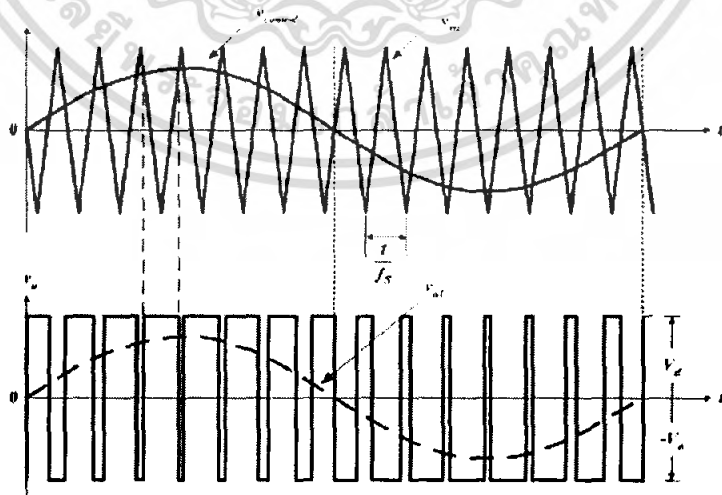
$$\hat{V}_{o1} = m_a V_d \quad \text{เมื่อ } m_a \leq 1.0 \quad (2.11)$$

และเทียบเคียงกับสมการที่ (2.8) จะได้

$$V_d < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d \quad \text{เมื่อ } m_a > 1.0 \quad (2.12)$$

หรืออาจจะสรุปได้ว่าแรงดันไฟฟ้ายอดด้านออกจะเท่ากับสมการที่ (2.11) เมื่อ m_a อยู่ในย่านเชิงเส้น และแรงดันไฟฟ้ายอดด้านออกจะเท่ากับสมการที่ (2.12) อยู่ในช่วงโอเวอร์มอดูเลชัน

โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะสวิตช์อยู่ระหว่าง $+V_d$ กับ $-V_d$ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ส่วนไซด์แบนฮาร์โมนิกจะเกิดขึ้นรอบๆ $m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$ เช่น หากความถี่สวิตช์เท่ากับ 20 kHz ไซด์แบนฮาร์โมนิกก็จะเกิดขึ้นที่ 20 kHz, 40 kHz และ 60 kHz เป็นต้น ดังเช่นที่ได้อธิบายในสมการที่ (2.6)



รูปที่ 2.8 การสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์ [1]

สิ่งที่ระบุว่าเป็นการสวิตซ์แบบไบโพลาร์ คือ

1. มีการสวิตซ์ของแรงดันระหว่างสาย v_o ระหว่างขั้วบัสบวกกับบัสลบ
2. ความถี่ของพัลส์ที่โหลดจะเท่ากับความถี่ของ v_m
3. จะเกิดความถี่จากสเปคตราคือ เริ่มต้นที่รอบๆ f_s และจำนวนเท่าของ f_s

2.1.3 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์

ในทางปฏิบัติ กิ่งใดๆของอินเวอร์เตอร์ สวิตซ์ตัวบนและตัวล่างต้องไม่นำกระแสพร้อมกัน ดังนั้นจึงต้องการช่วงเวลาที่ยุติการนำกระแสก่อนที่สวิตซ์จะเปลี่ยนสถานะ เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่าง บัสบวกกับบัสลบ ช่วงเวลานี้จะเรียกว่า เดดไทม์ (dead time หรือ blanking time) ซึ่งเวลาเดดไทม์ดังกล่าวจะต้องมีความเหมาะสม คือหากมีค่าน้อยเกินไปอาจทำให้มีโอกาสลัดวงจรได้ง่าย หรือถ้าหากมีค่ามากเกินไปก็อาจจะทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไป

สวิตซ์ที่มีความเร็วในการเปลี่ยนสถานะคือมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแส และเริ่มหยุดนำกระแสสั้นๆ (เป็นหลักสิบของนาโนวินาที) เช่น สวิตซ์ที่เป็นมอสเฟตจะมีค่าเดดไทม์น้อยๆ ประมาณ 1-2 ไมโครวินาที ส่วนสวิตซ์ที่เป็นไทรสเตอร์มักต้องการค่าเดดไทม์ที่มากกว่าทั้งนี้เพราะช่วงเวลาเริ่มนำกระแส และเริ่มหยุดนำกระแสที่มากกว่า ดังนั้นเดดไทม์จะขึ้นอยู่กับชนิดของสวิตซ์สารกึ่งตัวนำที่เลือกใช้

ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.9 โดยรูปที่ 2.9 (ก) เป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์หนึ่งกิ่ง รูปที่ 2.9 (ข) เป็นแรงดันควบคุมเกตในอุดมคติ รูปที่ 2.9 (ค) คือ แรงดันควบคุมเกตของสวิตซ์ที่ได้ชดเชยผลของเดดไทม์แล้ว โดยมีหลักการง่ายๆ คือ ทุกๆขาลงและขาขึ้นของแรงดันควบคุมเกต ให้นำช่วงเวลาไปเท่ากับเดดไทม์เพื่อไม่ให้สวิตซ์ในกิ่งเดียวกันทำงานพร้อมกัน แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาเดดไทม์จะขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไหล กล่าวคือ

เมื่อกระแสไหลไฟฟ้าที่โหลดเป็นบวก (i_o) มีทิศทางไหลออกจากจุด A ในรูปที่ 2.9(ง) หากโหลดเป็นโหลดความเหนี่ยวนำและตัวต้านทานร่วมกัน เมื่อ $i_o > 0$ ในช่วงเวลาเดดไทม์ แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าลดลงเพราะไดโอด D_{A-} จะนำกระแส ทำให้ v_{AN} ลดลงเป็นศูนย์ เฉพาะในช่วงเวลาเดดไทม์ ทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ยของ v_{AN} ลดลง

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลเป็นลบ (i_o) มีทิศทางไหลเข้าจุด A ในรูปที่ 2.9 (จ) เมื่อ $i_o < 1$ ในช่วงเวลาเดดไทม์ แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะไดโอด D_{A+} จะนำกระแสทำให้ v_{AN} มีค่าเป็น $+V_d$ เฉพาะในช่วงเวลาเดดไทม์ ทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ยของ v_{AN} มีค่าเพิ่มขึ้น

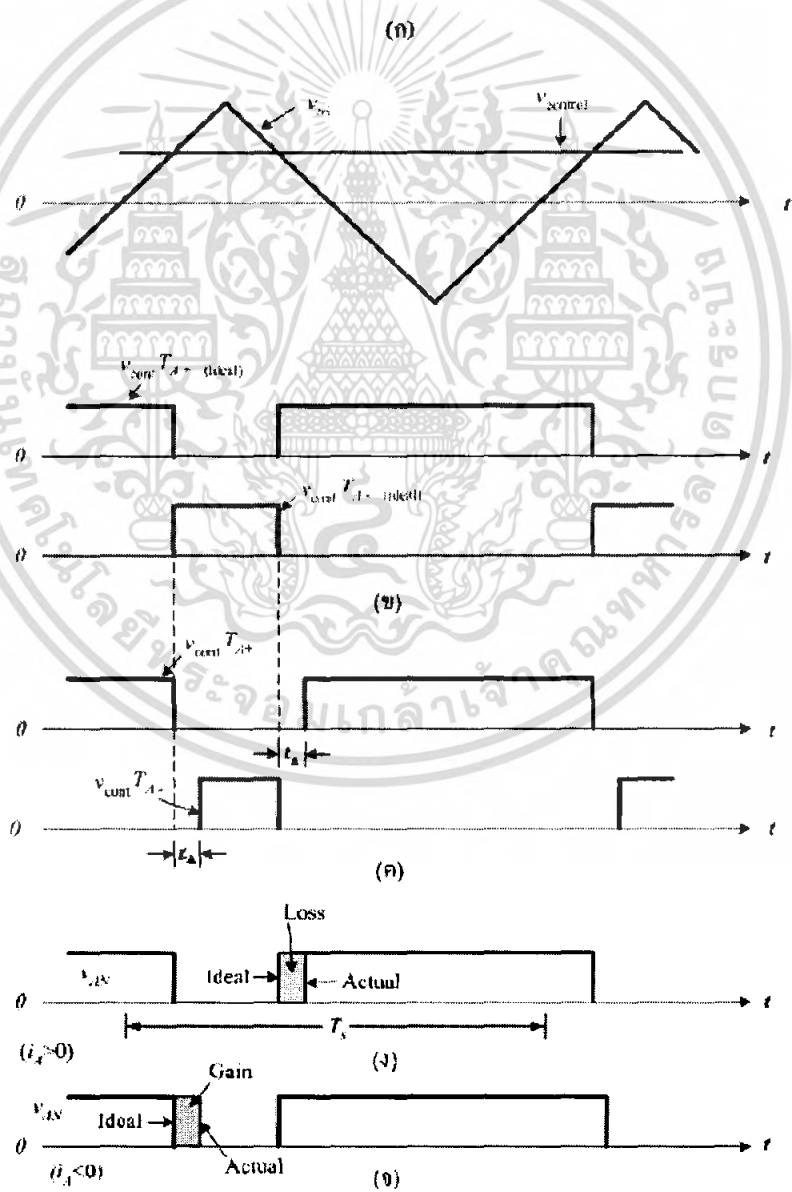
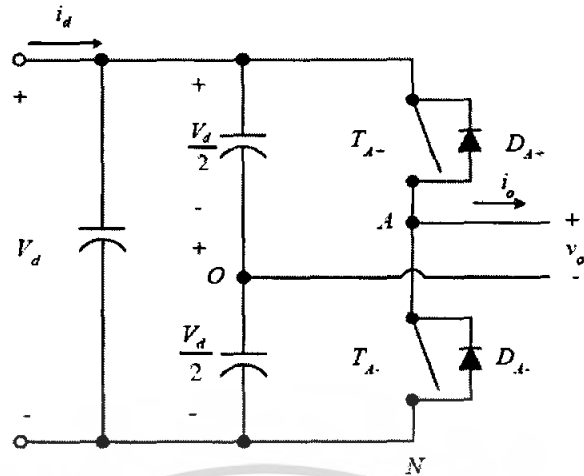
ค่าแรงดันผิดเพี้ยนจะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติลบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง เช่นที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.10 มีค่าดังสมการที่ (2.13) และ (2.14) สรุปได้ว่าเดดไทม์มากมีผลให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไปด้วย

$$v_e = (v_{Ao})_{ideal} - (v_{Ao})_{actual} \quad (2.13)$$

$$v_e = \pm \frac{2 \cdot (\text{deadtime})}{T_s} \cdot V_d \quad (2.14)$$

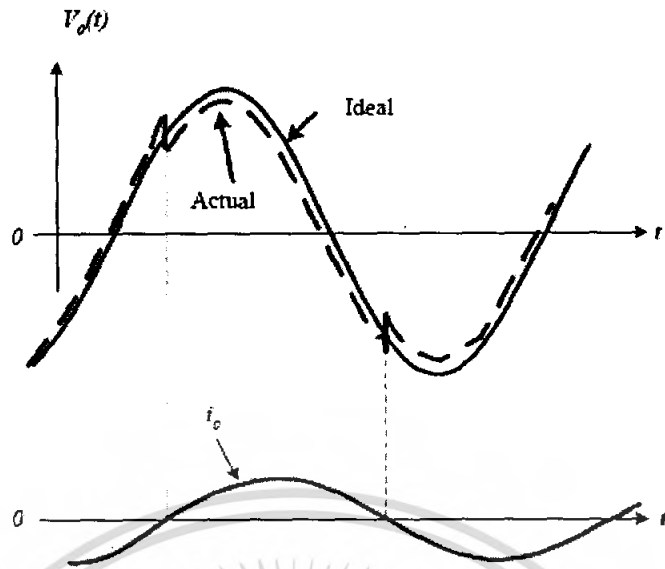
ข้อดีของเดดไทม์คือการทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบ แต่หากมีค่าเดดไทม์มากเกินไป ก็จะมีผลต่อรูปคลื่นสัญญาณทางด้านออก โดยขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไหล

ข้อเสียของเดดไทม์คือการเกิดฮาร์โมนิกที่ความถี่รอบข้างความถี่สวิตซิ่งและเกิดความถี่ที่ฮาร์โมนิกลำดับต่ำๆ อันจะเป็นผลเสียต่อสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.9 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันไฟฟ้าต้านออกของอินเวอร์เตอร์ [1]

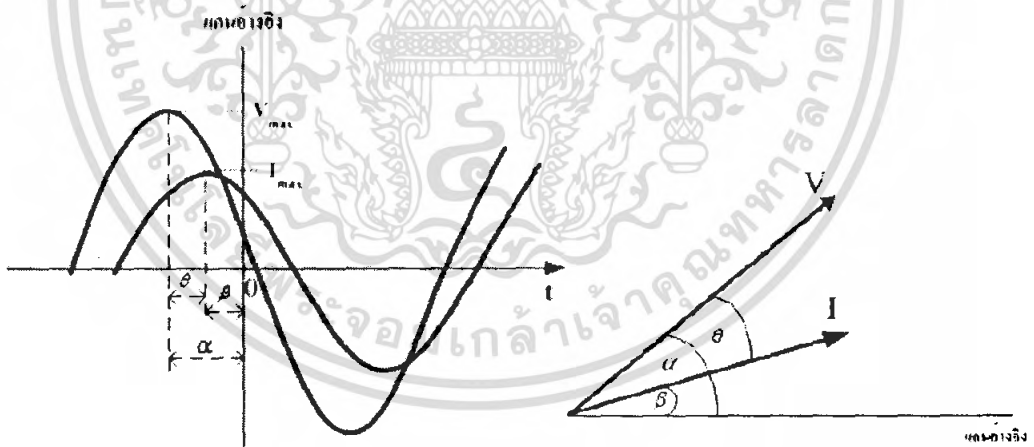
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงแก้ไข 82967 อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ผลของเดดไทม์ต่อแรงดันด้านออกรูปไซน์

2.2 ทฤษฎีของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

2.2.1 กำลังไฟฟ้าในรูปคอมเพล็กซ์ (Complex Power) [2]



รูปที่ 2.11 แรงดันไฟฟ้าและกระแสที่แกนอ้างอิงใดๆ

ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสในรูปเฟสเซอร์ที่บอกทั้งขนาดและมุม ของวงจรหนึ่งๆ เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงใดๆ โดยอาศัยฟังก์ชันของ Cosine สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = |V| \angle \alpha \text{ และ } I = |I| \angle \beta$$

$|V|, |I|$ คือ แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เป็นค่า rms ตามลำดับ

ทำให้สามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้า โดยรวมของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน ในรูปของค่ากำลังคอมเพล็กซ์ได้จากผลคูณของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสคอนจูเกต (conjugate of the current) จะได้ค่ากำลังไฟฟ้ารวม (complex power (S)) ที่มีหน่วยเป็น โวลท์-แอมป์ (VA) เมื่อ I^* : conjugate of the current

$$I^* = |I| \angle -\beta$$

$$S = VI^* = |V| \angle \alpha \times |I| \angle -\beta$$

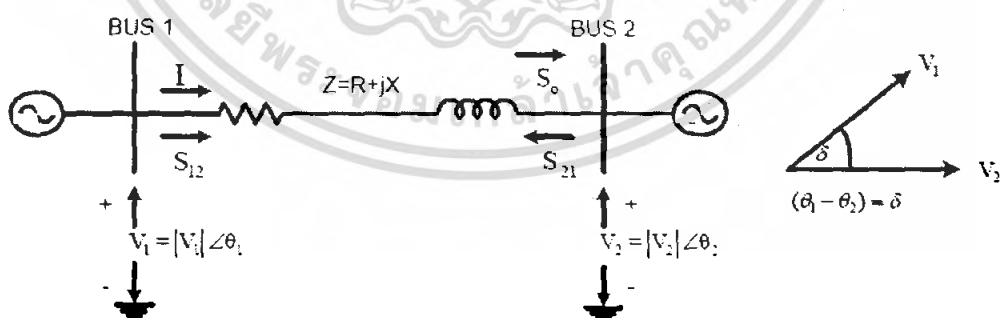
$$S = |V||I| \angle (\alpha - \beta) \quad (2.15)$$

โดยที่ $\alpha - \beta = \theta$ คือ power factor angle นั้นเอง
ทำให้อยู่ในรูป rectangular form จะได้

$$S = |V||I| \cos \theta + j|V||I| \sin \theta \quad (2.16ก)$$

$$S = P + jQ \quad (2.16ข)$$

2.2.2 การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างบัสสองบัส [3]



รูปที่ 2.12 การส่งกำลังไฟฟ้าระหว่าง 2 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ทิศทางการไหลของกระแสและกำลังไฟฟ้าตามรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นวงวนโหนดโตะแกรมแทนระบบส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 1 กับ บัส 2 และมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเป็น $Z = R + jX$ ต่ออยู่ระหว่างบัส ซึ่งมีสมการในการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

$$S_{12} = P_{12} + jQ_{12} = V_1(I)^* \quad (2.17)$$

$$S_{21} = P_{21} + jQ_{21} = V_2(-I)^* \quad (2.18)$$

$$I = \frac{V_1 - V_2}{Z} \quad (2.19)$$

$$S_o = P_o + jQ_o \quad (2.20)$$

โดยที่	S_{12}	คือ	กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลจากบัส 1 ไป บัส 2
	S_{21}	คือ	กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลจากบัส 2 ไป บัส 1
	S_o	คือ	กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลเข้าสู่บัส 2
	P_{12}	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส 1 ไปบัส 2
	P_{21}	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส 2 ไปบัส 1
	P_o	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัส 2
	Q_{12}	คือ	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลจากบัส 1 ไป บัส 2
	Q_{21}	คือ	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลจากบัส 2 ไป บัส 1
	Q_o	คือ	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลเข้าสู่บัส 2
	V_1, V_2	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 และ บัส 2 ตามลำดับ
	I	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส 1 ไปบัส 2
	Z	คือ	อิมพีแดนซ์ของสายส่ง

นำสมการที่ (2.17) ไปแทนในสมการที่ (2.19)

$$S_{12} = V_1 \frac{V_1^* - V_2^*}{Z^*}$$

$$S_{12} = \frac{|V_1|^2 - |V_1||V_2| \angle \theta_1 - \theta_2}{R - jX} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (2.18) ไปแทนในสมการที่ (2.19)

$$S_{21} = V_2 \frac{V_2^* - V_1^*}{Z^*}$$

$$S_{21} = \frac{|V_2|^2 - |V_1||V_2| \angle \theta_2 - \theta_1}{R - jX} \quad (2.22)$$

กำหนดให้ $\theta_1 - \theta_2 = \delta$

เมื่อ δ คือ มุมเฟาเวอร์แองเกิล (Power angle) ซึ่งเป็นมุมเฟสที่ต่างกันระหว่างแรงดันไฟฟ้าทั้งสอง จากสมการที่ (2.21) ตัวเศษเป็นสมการเชิงขั้ว สามารถแปลงเป็นสมการเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$S_{12} = \frac{|V_1|^2 - |V_1||V_2| \cos \delta + j|V_1||V_2| \sin \delta}{R - jX} \quad (2.22ก)$$

คูณด้วยคอนจูเกตของตัวส่วน จะได้

$$S_{12} = \frac{|V_1|^2 - |V_1||V_2| \cos \delta + j|V_1||V_2| \sin \delta}{R - jX} \times \frac{R + jX}{R + jX} \quad (2.22ข)$$

$$S_{12} = \frac{R|V_1|^2 - R|V_1||V_2| \cos \delta + X|V_1||V_2| \sin \delta + j(X|V_1|^2 - X|V_1||V_2| \cos \delta - R|V_1||V_2| \sin \delta)}{R^2 + X^2} \quad (2.22ค)$$

ดังนั้นจะได้สมการ

$$P_{12} = \frac{1}{R^2 + X^2} (R|V_1|^2 - R|V_1||V_2| \cos \delta + X|V_1||V_2| \sin \delta) \quad (2.23)$$

$$Q_{12} = \frac{1}{R^2 + X^2} (X|V_1|^2 - X|V_1||V_2| \cos \delta - R|V_1||V_2| \sin \delta) \quad (2.24)$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ (2.22) จะได้

$$P_{21} = \frac{1}{R^2 + X^2} (R|V_2|^2 - R|V_1||V_2| \cos \delta - X|V_1||V_2| \sin \delta) \quad (2.25)$$

$$Q_{21} = \frac{1}{R^2 + X^2} (X|V_2|^2 - X|V_1||V_2| \cos \delta + R|V_1||V_2| \sin \delta) \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งโดยทั่วไป $X \gg R$ จะทำให้ได้สมการใหม่โดยประมาณดังนี้

$$P_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X} \sin \delta = P_o(\delta) \quad (2.27)$$

$$Q_{12} = \frac{1}{X} (|V_1|^2 - |V_1||V_2| \cos \delta) = Q_o(\delta) \quad (2.28)$$

$$P_{21} = -\frac{|V_1||V_2|}{X} \sin \delta = -P_o(\delta) \quad (2.29)$$

$$Q_{21} = \frac{1}{X} (|V_2|^2 - |V_1||V_2| \cos \delta) = -Q_o(\delta) \quad (2.30)$$

โดยที่

$P_o(\delta)$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่มีการส่งจ่ายในรูปฟังก์ชันของมุมกำลัง

$Q_o(\delta)$ คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่มีการส่งจ่ายในรูปฟังก์ชันของมุมกำลัง

สำหรับค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าเสมือน จากสมการที่ (2.28) และ (2.30) จะได้

$$Q_{av} = \frac{Q_{12} - Q_{21}}{2} = \frac{|V_1|^2 - |V_2|^2}{2X} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.27) จะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการเพิ่มปริมาณกำลังไฟฟ้าจริง สามารถทำได้ด้วยวิธีการ ดังต่อไปนี้ [3]

1. ทำการเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้า วิธีนี้เรียกว่า Voltage support
2. ทำการลดค่ารีแอคแตนซ์ของสายส่ง วิธีนี้เรียกว่า Line compensation
3. ทำการเพิ่มค่ามุมกำลัง วิธีนี้เรียกว่า Phase shift

ถ้าหากต้องการให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลจากบัสที่ 2 ไปยัง บัสที่ 1 ก็ทำได้โดยการทำให้มุมกำลังเป็นลบ หรือ $\theta_2 > \theta_1$ นั้นเอง

จากสมการที่ (2.31) จะเห็นได้ว่า ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและค่ารีแอคแตนซ์ของสายส่ง จะมีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนด้วย ในกรณีที่มุมกำลังถูกคงค่าไว้เป็นศูนย์ ($\delta = 0$) ถ้าหากว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าของบัสที่จ่าย กับ บัสที่รับ มีค่าเท่ากัน ($V_1 = V_2$) กำลังไฟฟ้าเสมือนจะถูกส่งจากบัสที่จ่ายและส่งจากบัสที่รับ เข้าไปในสายส่งอย่างละครึ่งเท่าๆกัน และ จะทำให้

ค่าเฉลี่ยของกำลังเสมือนเป็นศูนย์ ส่วนของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจริงก็จะมีค่าเป็นศูนย์ด้วยตามสมการที่ (2.27) และ (2.29)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า จะมี 4 ตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและ กำลังไฟฟ้าเสมือน ได้แก่ และ V_1, V_2, X, δ เพื่อความเข้าใจความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้ง 4 ยิ่งขึ้น จากสมการที่ (2.30)

$$Q_o(\delta) = -\frac{|V_1|^2}{X} + \frac{|V_1||V_2|\cos\delta}{X} \quad (2.32)$$

$$Q_o(\delta) + \frac{|V_1|^2}{X} = \frac{|V_1||V_2|\cos\delta}{X} \quad (2.33)$$

และจากสมการที่ (2.27) จะได้

$$P_o(\delta) = \frac{|V_1||V_2|\sin\delta}{X} \quad (2.34)$$

นำสมการที่ (2.33) และสมการที่ (3.34) มายกกำลังสอง แล้วนำมาบวกกันจะได้

$$(P_o(\delta))^2 + \left(Q_o(\delta) + \frac{|V_1|^2}{X}\right)^2 = \left(\frac{|V_1||V_2|}{X}\right)^2 ((\sin\delta)^2 + (\cos\delta)^2) \quad (2.35)$$

$$(P_o(\delta))^2 + \left(Q_o(\delta) + \frac{|V_1|^2}{X}\right)^2 = \left(\frac{|V_1||V_2|}{X}\right)^2 \quad (2.36)$$

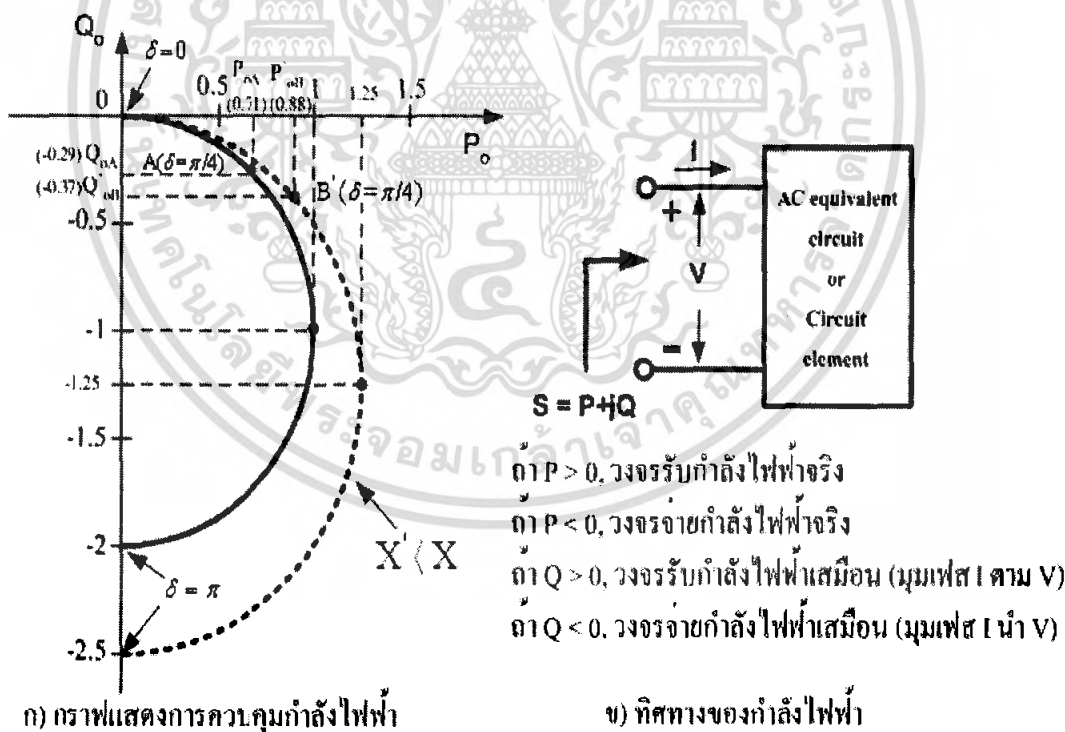
จากสมการที่ (2.36) นำไปเทียบเคียงกับสมการวงกลมมาตรฐานในทางคณิตศาสตร์คือ $(x-h)^2 + (y-k)^2 = r^2$ โดยมีจุดศูนย์กลางคือ (h, k) และมีขนาดรัศมี คือ r ดังนั้น สมการที่(2.36)

จะได้จุดศูนย์กลางของกราฟวงกลมอยู่ที่ จุด $(0, -\frac{|V_1|^2}{X})$ และมีขนาดรัศมีคือ $\frac{|V_1||V_2|}{X}$

ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายไปยังบัสที่ 2 ประกอบด้วยตัวแปรที่สำคัญสี่ตัว ได้แก่ V_1, V_2, X, δ สามารถนำไปวาดเป็นกราฟวงกลม ดังรูปที่ 2.13

กรณีที่ 1 ถ้าสมมติให้ค่าแรงดันเท่ากัน $V_1 = V_2 = 1$, $\delta = \frac{\pi}{4}$ และกำหนดให้ค่า $X=1$ เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (2.32) จะได้ $Q_{oA} = -0.29$ และแทนค่าในสมการที่ (2.34) จะได้ $P_{oA} = 0.71$ ดังรูปที่ 2.13 กราฟเส้นทึบ ถ้าหากเพิ่มค่ามุมกำลังมากขึ้น โดยที่ $0 < \delta < \frac{\pi}{2}$ จะสามารถจ่าย $P_o > Q_o$ แต่ถ้าหากเพิ่มมุมกำลังมากขึ้นอีก คือ $\frac{\pi}{2} < \delta < \pi$ จะทำให้สามารถจ่าย $Q_o > P_o$

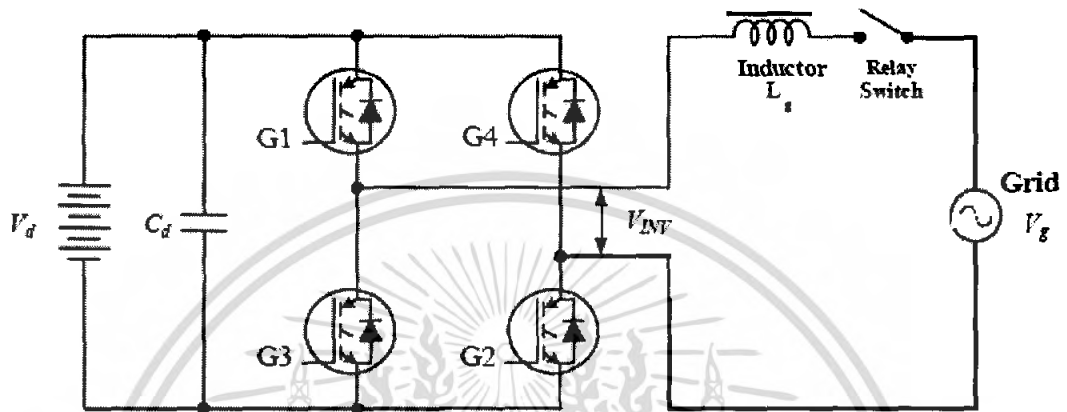
กรณีที่ 2 ถ้าสมมติว่าลดค่ารีแอกแตนซ์ $X' = 0.8$ ในขณะที่ $V_1 = V_2 = 1$ และ $\delta = \frac{\pi}{4}$ ตามเดิม เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (2.32) จะได้ $Q'_{oB} = -0.37$ และ สมการที่ (2.34) จะได้ $P'_{oB} = 0.88$ ดังรูปที่ 2.13 กราฟเส้นประ หรือ ถ้าหากพิจารณาตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.36) เมื่อลด ค่า X ลง จะทำให้รัศมีของวงกลมขยายใหญ่ขึ้น คือ $X' < X$ นั่นเอง (X' คือ กราฟเส้นประ, X คือกราฟเส้นทึบ) จึงกล่าวได้ว่า ถ้าลดค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งลง ก็จะทำให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (P_o) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q_o) ในหน่วย เเปอร์ยูนิต ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่บัส 2

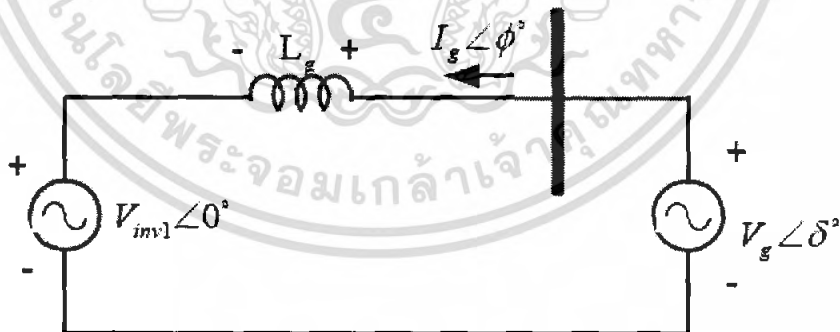
2.3 หลักการของอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบการไฟฟ้า

วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้าอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.14 มีส่วนประกอบดังนี้ แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง (V_d) ตัวเก็บประจุ (C_d) สวิตช์กำลัง ในที่นี้เลือกใช้ไอจีบีที ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง (L_g) และระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส (V_g)



รูปที่ 2.14 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบการไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.14 ใช้หลักการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่าง 2 บัสที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมาแล้วในข้างต้น สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลอย่างง่าย ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายสองแหล่งได้แก่ แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ (V_{inv}) และ แหล่งจ่ายการไฟฟ้า (V_g) ได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า ใช้หลักการควบคุมการไหลของพลังงานไฟฟ้า (bidirectional power flow) [4] โดยกำหนดให้กระแสไฟฟ้าถูกจ่ายจากระบบการไฟฟ้า เข้าสู่ระบบอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมุมเฟสแรงดันของการไฟฟ้านำหน้าแรงดันอินเวอร์เตอร์เป็นมุม δ เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางเวกเตอร์นั้นสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแส โดยกำหนดให้ V_g เป็นจุดอ้างอิงเฟสเซอร์ วิเคราะห์หาความสัมพันธ์กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ดังต่อไปนี้ โดยกำหนดให้

V_d	=	แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
I_d	=	กระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
V_{inv}	=	แรงดันด้านอินเวอร์เตอร์
L_g	=	ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง
V_g	=	แรงดันระบบไฟฟ้า
I_g	=	กระแสระบบไฟฟ้า
V_{Lg}	=	แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง L_g
f_1	=	ความถี่แรงดันระบบไฟฟ้า (ความถี่หลักมูล)
V_{Lg1}	=	แรงดันตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่หลักมูล
I_{g1}	=	กระแสระบบไฟฟ้าที่องค์ประกอบความถี่หลักมูล
V_{inv1}	=	แรงดันอินเวอร์เตอร์ที่องค์ประกอบความถี่หลักมูล

$$v_g = V_{g,\max} \sin(\omega t) \quad (2.37)$$

$$v_{inv} = V_{inv,\max} \sin(\omega t + \delta) \quad (2.38)$$

$$\omega = 2\pi f_1 \quad (2.39)$$

$$v_g = v_{inv} + v_{Lg} \quad (2.40)$$

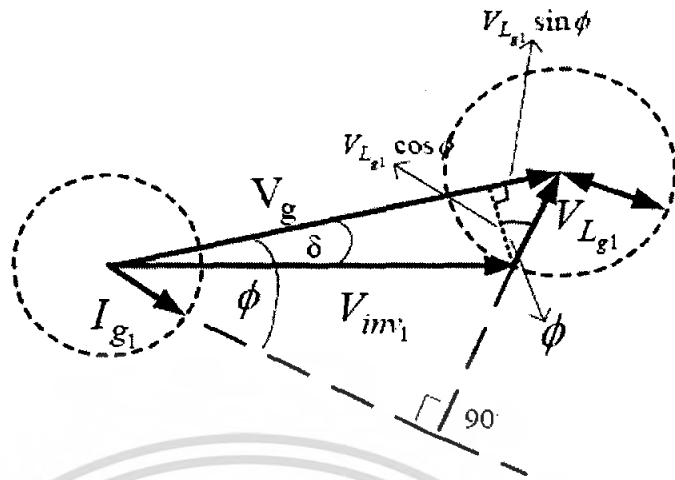
$$v_{Lg} = L_g \left(\frac{di_g}{dt} \right) \quad (2.41)$$

เมื่อกำหนดให้ V_g เป็นรูปคลื่นไซน์ พิจารณาที่องค์ประกอบมูลฐานจะได้ว่า

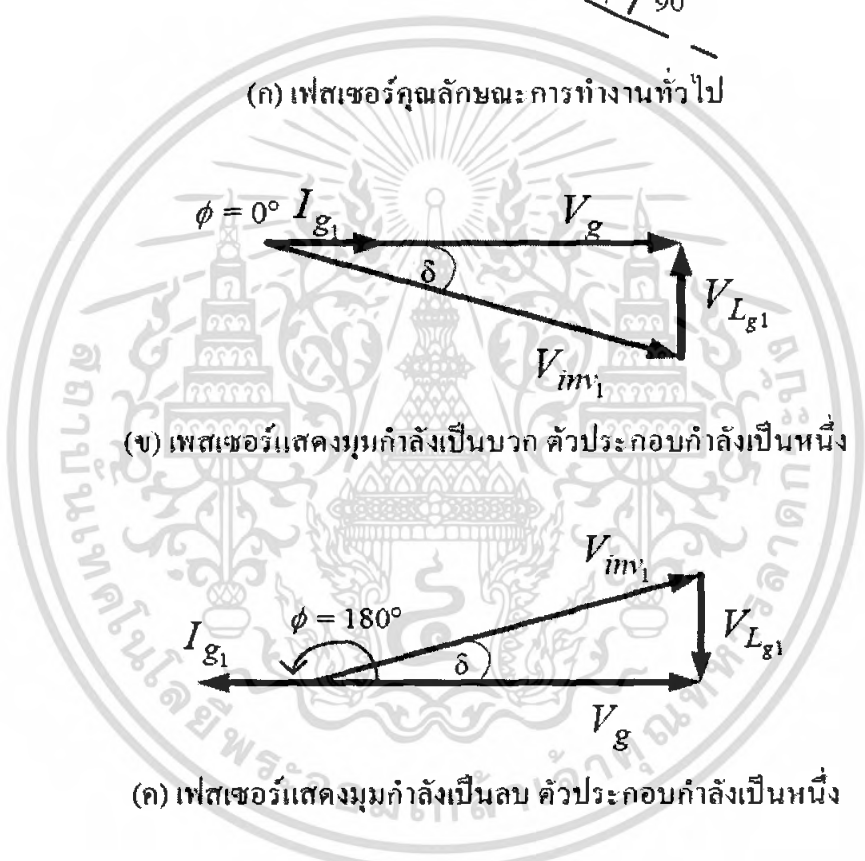
$$V_g = V_{inv1} + V_{Lg1} \quad (2.42)$$

$$V_{Lg1} = j\omega L_g I_{g1} \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

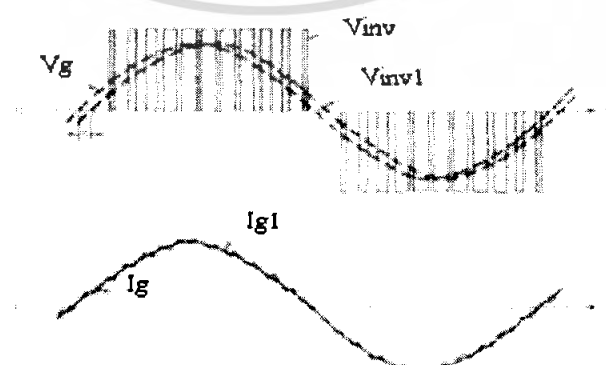


(ก) เฟสเซอร์คุณลักษณะการทำงานทั่วไป



(ข) เฟสเซอร์แสดงมุมกำลังเป็นบวก ตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง

(ค) เฟสเซอร์แสดงมุมกำลังเป็นลบ ตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง



(ง) ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันและกระแส ในกรณีที่มีมุมกำลังเป็นบวก ตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง

รูปที่ 2.16 แผนภาพเฟสเซอร์แรงดันและกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (2.43) ไปแทนในสมการที่ (2.42) จะได้กระแสที่ไหลเข้าระบบการไฟฟ้า คือ

$$\frac{V_g \angle 0 - V_{mv1} \angle \delta}{j\omega L_g} = I_{g1} \quad (2.43n)$$

จากรูปที่ 2.16 (ก) อาศัยทฤษฎีทางด้านตรีโกณมิติและสมการที่ (2.43) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_{mv1} \sin \delta = V_{I_{g1}} \cos \phi = \omega L_g (I_{g1} \cos \phi) \quad (2.44)$$

$$V_{mv1} \cos \delta = V_g - V_{I_{g1}} \sin \phi = V_g - \omega L_g (I_{g1} \sin \phi) \quad (2.45)$$

จากสมการที่ (2.44) จะได้

$$I_{g1} \cos \phi = \frac{V_{mv1} \sin \delta}{\omega L_g} \quad (2.46)$$

จากสมการที่ (2.45) จะได้

$$I_{g1} \sin \phi = \frac{V_g - V_{mv1} \cos \delta}{\omega L_g} \quad (2.47)$$

จากสมการที่ (2.46) จะได้

$$P_g = V_g I_{g1} \cos \phi = \frac{V_g \times V_{mv1} \sin \delta}{\omega L_g} \quad (2.48)$$

จากสมการที่ (2.47) จะได้

$$Q_g = V_g I_{g1} \sin \phi = \frac{[V_g^2 - (V_g V_{mv1}) \cos \delta]}{\omega L_g} \quad (2.49)$$

หรือ

$$Q_g = V_g I_{g1} \sin \phi = \frac{V_g^2}{\omega L_g} \left[1 - \frac{V_{mv1}}{V_g} \cos \delta \right] \quad (2.49n)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

- δ = มุมกำลัง (Power angle) คือมุมระหว่างแรงดันระบบไฟฟ้ากับอินเวอร์เตอร์
- ϕ = มุมระหว่างแรงดันและกระแสระบบไฟฟ้า (V_g, I_{g1})
- S_g = กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power) ระบบไฟฟ้า
- P_g = กำลังไฟฟ้าจริง (Active power) ระบบไฟฟ้า
- Q_g = กำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) ระบบไฟฟ้า

2.3.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง

จากสมการที่ 2.48 สมมติว่าแรงดันระบบไฟฟ้าและแรงดันอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ ถ้ามุมกำลังเป็นบวกหรือมุมเฟส V_{inv1} ตามหลัง V_g ตามรูปที่ 2.16 (ข) I_{g1} ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.17(ก) อธิบายได้ว่ากำลังไฟฟ้าจริงจะไหลจากระบบการไฟฟ้าไปยังอินเวอร์เตอร์

ในกรณีตรงกันข้าม ถ้ามุมกำลังมีค่าเป็นลบ คือมุมเฟสแรงดัน V_{inv1} นำหน้า V_g รูปที่ 2.16 (ค) I_{g1} จะมีเฟสตรงข้ามกับ V_g ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 (ข) อธิบายได้ว่า กำลังไฟฟ้าจริงจะไหลจากอินเวอร์เตอร์ไปยังระบบการไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามค่าไซน์ของมุมกำลัง เป็นไปตามสมการที่ (2.50)



รูปที่ 2.17 ทิศทางและรูปคลื่นกระแส, แรงดันที่จุดเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า

$$P_g \propto \sin \delta \quad (2.50)$$

ดังนั้นในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเพื่อให้อินเวอร์เตอร์จ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบการไฟฟ้าจึงต้องทำให้มุมเฟสแรงดันอินเวอร์เตอร์นำหน้าแรงดันระบบการไฟฟ้าโดยปริมาณของกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับมุมกำลังนั่นเอง

2.3.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนและตัวประกอบกำลัง

จากสมการที่ (2.49ก) สมมติว่าแรงดันระบบการไฟฟ้า (V_g) มุมกำลัง (δ) และค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยง (ωL_g) มีค่าคงที่ กำลังไฟฟ้าเสมือนจะแปรผกผันตามแรงดันอินเวอร์เตอร์ เป็นไปตามสมการที่ (2.51)

$$Q_g \propto \frac{1}{V_{invl}} \quad (2.51)$$

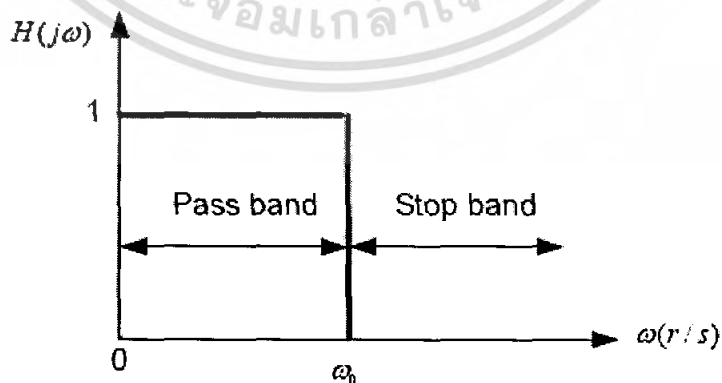
ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ถ้าหากเราคงค่าแรงดันของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับค่าแรงดันของการไฟฟ้า พิจารณาตามสมการที่ (2.49ก) $\frac{V_{invl}}{V_g} = 1$ ก็จะทำให้ Q_g ขึ้นอยู่กับ $\cos \delta$

โดยสรุปเป้าหมายของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์จะต้องควบคุมให้กำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) มีค่าน้อยที่สุดและกำลังไฟฟ้าจริง (P) ค่ามากที่สุด ซึ่งเป็นผลทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุด

กล่าวคือ กำลังไฟฟ้าจริงนั้นควบคุมด้วยการปรับมุมกำลัง ส่วนกำลังเสมือนควบคุมด้วยเทคนิคการปรับดิซิมูเลต เพื่อทำให้แรงดันอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับแรงดันระบบไฟฟ้าเสมอ ประโยชน์ของการควบคุมตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงใกล้เคียงหนึ่งจะทำให้ ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงขึ้นด้วย

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานวงจรกรองความถี่ต่ำด้านออก[5]

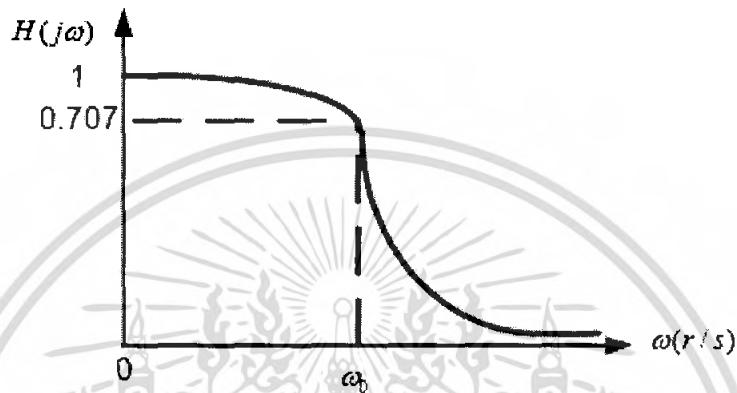
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน คือ วงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่าน แต่จะกั้นสัญญาณความถี่สูงเอาไว้



รูปที่ 2.18 การกั้นสัญญาณของวงจรกรองแบบอุดมคติ

จากรูปแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ โดยนิยามเราจะเรียกย่านความถี่ที่วงจรยอมให้ผ่านว่า ย่านความถี่ผ่าน (pass band) หรือ แบนด์วิดท์ (bandwidth : BW) ของวงจรส่วนย่านความถี่ที่วงจรไม่ยอมให้ผ่านไปจะเรียกว่า ย่านความถี่หยุด (stop band) ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าย่านความถี่ผ่านจะอยู่ระหว่าง 0 และ ω_0 โดยเราจะเรียกความถี่ ω_0 ว่าความถี่คัทออฟ (cut-off frequency)

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถสร้างวงจรกรองที่มีผลตอบสนองในแบบอุดมคติได้



รูปที่ 2.19 การกั้นสัญญาณของวงจรกรองแบบปฏิบัติ

จากรูปแสดงผลตอบสนองทางความถี่ที่สามารถสังเคราะห์ได้ในทางปฏิบัติ จะเห็นว่าในทางปฏิบัติแล้วค่าความถี่คัทออฟจะหมายถึง ค่าความถี่ที่ขนาดของสัญญาณด้านออกของวงจรซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้กันคือ มีค่าเท่ากับ 0.707 เท่า (หรือประมาณ -3 dB) ของขนาดสัญญาณสูงสุด

2.4.1 ลักษณะวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบต่าง ๆ

โดยทั่วไปแล้ววงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบสำคัญสองส่วนคือ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุซึ่งมีหลายรูปแบบด้วยกัน ถ้าหากแบ่งตามสมการโครงข่ายไฟฟ้าของวงจรกรอง ได้แก่

1. วงจรกรองอันดับหนึ่ง (first order) ประกอบด้วย วงจรกรองที่มีตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวเก็บประจุเพียง 1 ตัว
2. วงจรกรองอันดับสูงขึ้นไป (higher order) คือวงจรกรองที่ประกอบไปด้วย ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมารวมกัน ตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ได้แก่ วงจรกรองแบบแอล แบบที และแบบไบโเนเป็นต้น

2.4.2 ลำดับขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อลดทอนผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถสรุปเป็นลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

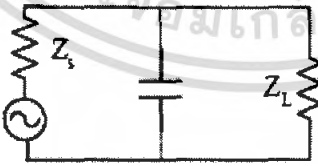
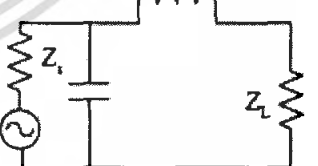
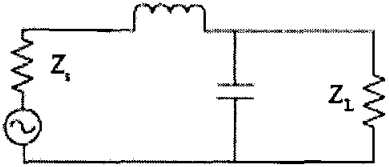
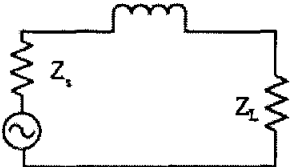
1. จะต้องทราบคุณลักษณะของแหล่งจ่ายหรือแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนและลักษณะของโหลดว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร เช่น

- มีความถี่สายกำลังเท่าไร (power line frequency) เช่น 50 Hz หรือ 60 Hz
- ค่าแรงดันของแหล่งจ่ายกี่โวลต์ ($V_{S,rms}$)
- ค่ากระแสสูงสุดที่พิกัดโหลด ($I_{S,rms}$)
- ลักษณะของโหลด ว่าเป็นอย่างไร มีอิมพีแดนซ์ต่ำหรือสูงเมื่อเทียบกับแหล่งจ่าย
- ย่านความถี่ของสัญญาณรบกวนที่ต้องการลดทอน

2. เลือกรูปแบบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่จะนำมาใช้งาน

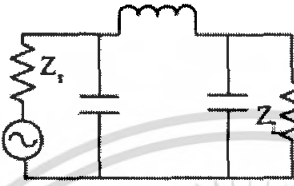
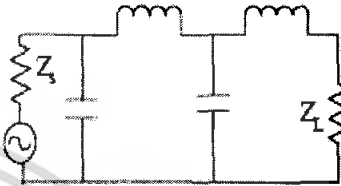
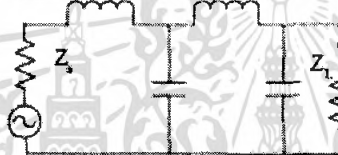
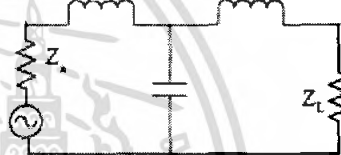
เลือกรูปแบบวงจรกรองตามตาราง โดยดูที่อิมพีแดนซ์ของโหลดและแหล่งจ่าย และดูว่า จะต้องเลือกรูปแบบวงจรกรองอันดับใด ต้องดูถึงความจำเป็น และขนาดของสัญญาณรบกวนที่ต้องการลดทอน ว่ามีค่ามากหรือน้อยเพียงใด ตามมาตรฐาน เพราะถ้าหากเลือกรูปแบบที่มีอุปกรณ่มากผลที่ตามมาก็คือราคาและน้ำหนักที่มากตามไปด้วย

ตารางที่ 2.2 แสดงการใช้วงจรกรองอันดับหนึ่งและสอง ให้เหมาะกับอิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่ายและโหลด

Z_L \ Z_S	High	Low
High	 <p>(first order capacitor filter type)</p>	 <p>(second order L-filter type)</p>
Low	 <p>(second order L- filter type)</p>	 <p>(first order inductor filter type)</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงการใช้วงจรกรองอันดับสามและสี่ที่เหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่ายและโหลด

Z_L \ Z_S	High	Low
High	 <p>(third order π - filter type)</p>	 <p>(cascade filter Type)</p>
Low	 <p>(cascade filter Type)</p>	 <p>(third order T- filter type)</p>

3. คำนวณหาค่า R_d

จากสมการ $\frac{V_1}{I_1} = R = \frac{V_2}{I_2}$ และ $R_d = \sqrt{\frac{L}{C}}$ จะได้ $R_d = \frac{V}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}}$ เนื่องจากในที่นี้ค่า

ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า เป็นตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่า จึงต้องใช้สมการ $\frac{V_1}{I_1} = R = \frac{V_2}{I_2}$

จะได้ว่า

$$R_d = \frac{V_{\min, rms}}{I_{\max, rms}} \quad (2.52)$$

โดยที่ $V_{\min, rms}$ คือค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ใช้งาน

$I_{\max, rms}$ คือค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งาน

ถ้าหากมองจากสมการนี้แล้ว ก็คือ ค่าความต้านทานต่ำที่สุด หรือโหลดสูงสุดที่ใช้งานนั่นเอง ซึ่งถ้าหากต้องการกรองสัญญาณรบกวนด้านเข้าหรือด้านออกก็ใช้แรงดันและกระแสของด้านนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หาค่าความถี่คัทออฟของวงจรรอง

โดยเริ่มต้นต้องทราบความถี่ที่ต้องการกำจัด (F) และขนาดของมึน (dB) สามารถหาได้จากกรวัด โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปที่สามารถแตก FFT ได้หรือจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีตัวแปรที่กำหนดดังต่อไปนี้

F คือ ความถี่ของสัญญาณที่ต้องการกำจัด

dB คือ ค่าการลดทอนที่ต้องการ ณ ความถี่ที่ต้องการกำจัด

Lss คือ ค่าความสูญเสีย (loss) หรือค่าอัตราการลดทอน ในหน่วย dB/decade ของวงจรรองที่เลือกใช้ตามตาราง แบบโพน์และที มีค่า $Lss = (2N+1)6$ และวงจรรองแบบแอลมีค่า $Lss = 12N$

N คือ จำนวนชุดวงจรรองแต่ละแบบที่นำมาต่ออนุกรมกัน (number of filters in tandem) ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของวงจรรองแบบแอลประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอย่างละหนึ่งตัว ถือว่าเป็น 1 ชุด จะได้ $N = 1$ ถ้ามีการต่อคาสเคดกันไปอีกชุด จะได้ $N = 2$ เป็นต้น

ในกรณีของวงจรรองแบบที ก็กล่าวในทำนองเดียวกัน โดยสรุปเป็นได้ดังนี้ ตารางที่ 2.4 ค่าอัตราการลดทอน (Lss) ในหน่วย dB/Octave

Filter	Number of filters in tandem						
	1	2	3	4	5	6	7
L	12	24	36	48	60	72	84
T	18	30	42	54	66	78	90

เมื่อได้ค่าความถี่ที่ต้องการกำจัด และขนาดของมึนพร้อมทั้งค่าอัตราการลดทอนของรูปแบบวงจรรองที่เลือกใช้ ในที่สุดก็สามารถหาค่า ความถี่ ณ จุด คัทออฟ ได้ดังนี้ F_0 คือ ความถี่คัทออฟ

$$\text{จะได้} \quad F_0 = \frac{F}{2^x} = \frac{F}{2^{\frac{dB}{Lss}}} \quad (2.53)$$

5. คำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

โดยนำค่า R_d และค่า F_0 ที่ได้มา ไปแทนในสมการ (3.9) และ (3.10) ได้ดังนี้

$$L = \frac{R_d}{\pi F_0} \quad (2.54)$$

$$C = \frac{1}{\pi F_0 R_d} \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ สร้างอินเวอร์เตอร์ และวงจรรองความถี่ต่ำด้านออก

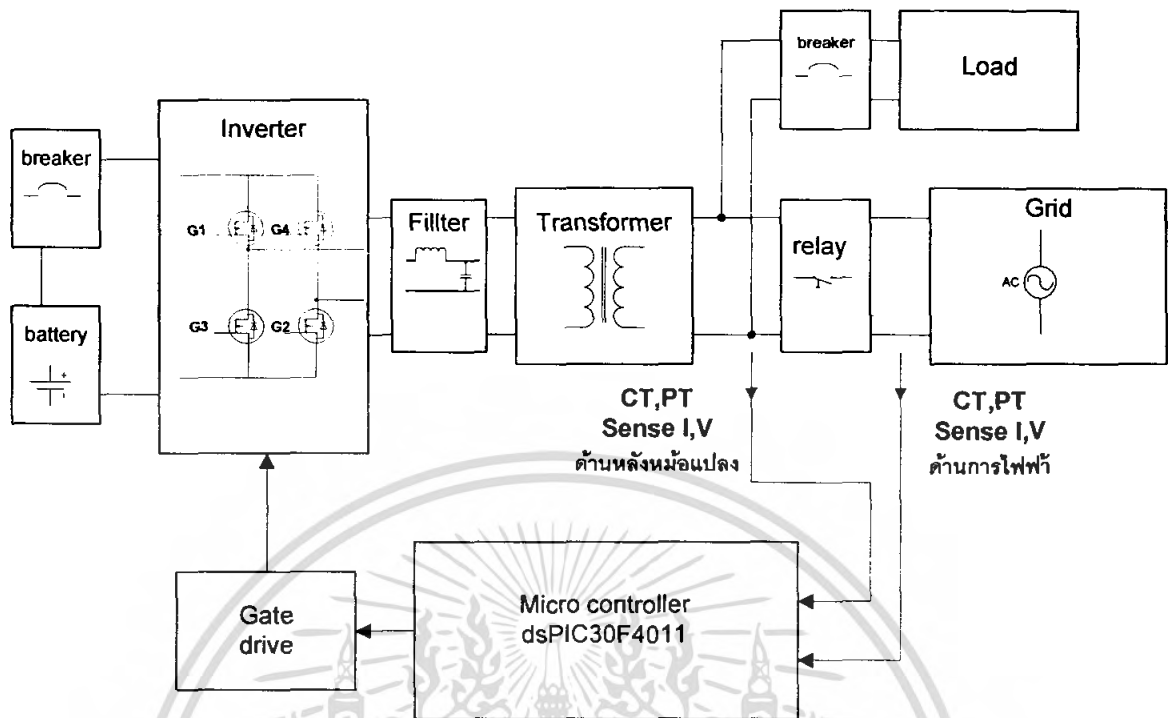
ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงคุณลักษณะอินเวอร์เตอร์สำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแล้วจากหลักการดังกล่าวนำมาซึ่งการออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงการคำนวณพิกัดของวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ วงจรและเทคนิคการควบคุมอินเวอร์เตอร์ รวมถึงการออกแบบค่าตัวเก็บประจุกับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรองความถี่ต่ำด้านออก และการจำลองระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า

3.1 ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้า

อินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้าที่ใช้ แสดงในรูปที่ 3.1 มีส่วนประกอบที่สำคัญแบ่งเป็น 4 ส่วนหลักๆ คือ

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (V_g)
2. วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter circuit)
3. วงจรต่อกับระบบไฟฟ้า (Grid - connected circuit)
4. ระบบควบคุม (control system)

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในที่นี้ได้ใช้แบตเตอรี่ ในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (C_g) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ และ ตัวสวิตช์ใช้ไอจีบีที (IGBT) ต่อแบบพูลบริดจ์เฟสเดียว แปลงแรงดันกระแสตรงเป็นแรงดันกระแสสลับ ผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนวงจรต่อกับระบบไฟฟ้า ประกอบด้วยหม้อแปลงกำลังแบบเพิ่มแรงดันมีหน้าที่แปลงแรงดันกระแสสลับจากวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีขนาดแรงดันต่ำให้สูงขึ้นเท่ากับแรงดันระบบไฟฟ้า (V_g) และต่อกับระบบการไฟฟ้าด้วยสวิตช์รีเลย์ ส่วนระบบควบคุมประกอบด้วยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ สร้างสัญญาณขั้วนำสวิตช์ ตรวจสอบสัญญาณแรงดัน, กระแสที่แบตเตอรี่ ตรวจสอบสัญญาณแรงดัน, กระแสของการไฟฟ้า ตรวจสอบจุดตัดสัญญาณแรงดันระบบไฟฟ้าและควบคุมกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 แผนผังส่วนประกอบอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบการไฟฟ้า

3.2 ขนาดพิกัดของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า

ในการสร้างต้นแบบอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์ สามารถทำได้โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังต่อไปนี้

3.2.1 การหาขนาดพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์

1. หาพิกัดแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์

เมื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า $V_d = 48$ โวลต์ และค่ามอดูเลชันที่สภาวะปกติ $m_a = 0.8$ สามารถคำนวณหาค่าแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ได้ดังสมการที่ (3.1)

$$\begin{aligned}\hat{V}_{ol} &= \hat{V}_{INV} = m_a V_d \\ \hat{V}_{ol} &= 0.8 \times 48 = 38.4 \text{ V} \\ V_{ol} &= \frac{\hat{V}_{ol}}{\sqrt{2}} = \frac{38.4}{\sqrt{2}} = 27.153 \text{ V}\end{aligned}\quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเงื่อนไขการแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าต่ำสุด ที่จะไม่ทำให้เกิดการทำงานในโหมดโอเวอร์มอดูเลชัน $m_a > 1.0$ โดยที่ค่าแรงดันด้านออกยังคงเดิมนั้น สามารถหาได้ดังนี้

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

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ต้องไม่ต่ำกว่า 38.4 โวลต์ เพื่อไม่ให้เกิดการโอเวอร์มอดูเลชัน ส่วนข้อเสียของการทำโอเวอร์มอดูเลชันนั้นได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.1.2

2. หาพิกัดกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์

โดยกำหนด พิกัดกำลังด้านออก 300 W และ ค่าตัวประกอบกำลัง 0.90 จะได้

$$P_{ol} = V_{ol} \times I_{ol} \cos \phi \quad (3.2)$$

$$I_{ol} = \frac{P_{ol}}{V_{ol} \times \cos \phi} = \frac{300}{27.153 \times 0.9} = 12.28 \text{ A}$$

$$\hat{I}_{ol} = \sqrt{2} \times I_{ol} = \sqrt{2} \times 12.28 = 17.36 \text{ A}$$

3. หาขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าด้านเข้า

โดยในที่นี้กำหนดค่าพิกัดกำลังด้านออก เท่ากับ 300 W และ ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ไว้ 80% จากสูตร

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.3)$$

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

4. หาพิกัดของกระแสตรงด้านเข้า โดยมีแรงดันกระแสตรงด้านเข้า 48 V หาค่าได้ดังนี้

$$P_a = I_a V_d \quad (3.4)$$

$$I_d = \frac{375}{48} = 7.8 \text{ A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณเบื้องต้น สามารถสรุปพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ได้ดังนี้	
แรงดันกระแสตรงด้านเข้า (V_d)	48- 60 โวลต์ (เฉลี่ย) (ปกติใช้ 48 โวลต์)
กระแสด้านเข้า (I_d)	7.8 แอมแปร์ (เฉลี่ย)
กำลังไฟฟ้าจริงด้านเข้า (P_d)	375 วัตต์
แรงดันด้านออก (V_o)	27.153 โวลต์ (ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงกำลัง)
กระแสด้านออก (I_o)	12.28 แอมแปร์ (ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงกำลัง)
กำลังไฟฟ้าจริงด้านออก (P_o)	300 วัตต์
ประสิทธิภาพ	80% (โดยประมาณ)
ค่าตัวประกอบกำลัง (PF)	0.90 (โดยประมาณ)

3.2.2 การหาขนาดพิกัดของตัวสวิตช์

จากการคำนวณพิกัดกระแสด้านออกสูงสุดเท่ากับ 17.36 แอมป์ และ แรงดันด้านเข้าสูงสุดที่กำหนดเท่ากับ 60 โวลต์ ตัวสวิตช์ที่ใช้ต้องมีขนาดพิกัดมากกว่า สองเท่าของกระแสและแรงดันที่คำนวณได้ โดยที่มีพิกัดกระแส $2 \times 17.36 = 34.7$ แอมป์ และแรงดัน $2 \times 60 = 120$ โวลต์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ IGBT เบอร์ HGTG20N60B3D ของบริษัท FAIRCHILD SEMICONDUCTOR ซึ่งมีพิกัดกระแส 40 แอมแปร์ และมีพิกัด แรงดัน 600 โวลต์

3.2.3 การหาขนาดพิกัดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

การเลือกขนาดพิกัดของแบตเตอรี่ สามารถคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

ระยะเวลาที่จ่ายให้กับระบบการไฟฟ้า	1	ชั่วโมง (โดยประมาณ)
กำลังไฟฟ้าที่จ่ายโหลดสูงสุด (P_d)	300	วัตต์
ใช้แบตเตอรี่ระบบแรงดัน (V_d)	48	โวลต์
ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ (η) =	80	เปอร์เซ็นต์

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

ดังนั้นขนาดความจุแบตเตอรี่ 7.8 แอมแปร์-ชั่วโมง

เนื่องจากความจุของแบตเตอรี่ไม่คงที่ตลอดอายุการใช้งานดังนั้นจึงจำเป็นต้องคิดการสำรองกำลังงานของแบตเตอรี่ไว้ 25 เปอร์เซ็นต์ (IEEE 1884-1994) เพื่อรักษาเสถียรภาพของค่าความจุของแบตเตอรี่ไว้

ในส่วนของการจ่ายกำลังงานให้กับวงจรควบคุม การสำรองกำลังงานจะถูกตั้งไว้ 10 เปอร์เซ็นต์สำหรับการเพิ่มขึ้นในส่วนที่ไม่ได้ถูกคาดการณ์ไว้ในระบบการทำงานของวงจร เพื่อ

ชดเชยในกรณีที่ตัวแปรที่มีอยู่ในการทำงานต่ำลงหรือเปลี่ยนแปลงไปจากส่วนที่ได้คาดหมายไว้ และสำหรับการจ่ายกำลังงานเข้าหลังจากระบบจ่ายกำลังงานถึงจุดแรงดันต่ำสุด (end voltage) (IEEE std 485-1983) และเพื่อชดเชยอุณหภูมิในการใช้งานของแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนไปจากการคำนวณ (25 องศาเซลเซียส)

ตั้งนั้นค่าเผื่อไว้สำหรับการสำรองกำลังของทั้งสองส่วนนี้จึงคิดที่ 35 เปอร์เซ็นต์
ตั้งนั้นค่าที่เผื่อไว้สำหรับการสูญเสีย loss Factor = 35 เปอร์เซ็นต์
เพราะฉะนั้นความจุของแบตเตอรี่ที่ใช้งาน $7.8 \times 1.35 = 10.53$ แอมป์
ตั้งนั้นเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 12 AH จำนวน 4 ลูก ต่ออนุกรมกัน

3.2.4 การหาขนาดพิกัดหม้อแปลงกำลัง

พิกัดกำลังด้านออกที่กำหนดไว้ คือ 300 วัตต์ แต่เนื่องจากการทดสอบพบว่ากระแส และ กำลังไฟฟ้ามักมีโอกาสเกินพิกัด จึงใช้หม้อแปลงกำลังมีพิกัดดังต่อไปนี้

พิกัดกำลังไฟฟ้าขนาด	390	โวลต์-แอมป์
พิกัดด้านแรงดันต่ำ (V_1) และ กระแส (I_1)	22	โวลต์ 17.72 แอมป์
พิกัดด้านแรงดันสูง (V_2) และ กระแส (I_2)	220	โวลต์ 1.77 แอมป์

สาเหตุที่เลือกพิกัดแรงดันด้านต่ำไว้ 22 โวลต์ ทั้งที่แรงดันด้านต่ำน่าจะเป็น 27 โวลต์ตามแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากจะมีแรงดันที่ตกคร่อมวงจรกรองประมาณ 5 โวลต์ จึงต้องออกแบบเผื่อไว้

3.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำด้านออก

จากทฤษฎีขั้นตอนการออกแบบในบทที่ 2 ต่อไปจะเป็นการออกแบบจริงที่ใช้ในโครงงานนี้มีขั้นตอนการออกแบบ 5 ขั้นตอนดังนี้

- 1) โครงงานนี้ต้องการออกแบบวงจรกรองที่ความถี่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟส ที่เชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า พิกัด 300 วัตต์ ความถี่ด้านออกที่ต้องการคือ 50 Hz โดยมีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนคืออินเวอร์เตอร์เอง และมีพิกัดด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่พิกัดดังต่อไปนี้ แรงดันด้านออกต่ำสุดคือ $V_{01,rms} = 27$ V และกระแสด้านออกสูงสุด คือ $I_{01,rms} = 12.28$ A
- 2) วงจรกรองที่เลือกใช้ในขั้นต้นจะเลือกวงจรกรองแบบแอล 1 ชุด โดยมีอัตราการลดทอนตามตารางที่ 2.4 คือ $L_{ss} = 12$ dB/octave
- 3) หาค่า R_d

$$R_d = \frac{V_{\min,rms}}{I_{\max,rms}} \quad (3.7)$$

$$R_d = \frac{27}{12.3} = 2.2 \quad \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ความถี่คัทออฟคือ

$$F_0 = \frac{F}{\frac{dB}{2^{L/20}}} \quad (3.8)$$

$$F_0 = \frac{20k}{\frac{32}{2^{12}}} = \frac{20,000}{6.3} = 3,150 \text{ Hz}$$

5) คำนวนหาค่า

$$L = \frac{R_d}{\pi F_0} \quad (3.9)$$

$$L = \frac{2.2}{3.14(3,150)} = 222.44 \mu\text{H}$$

$$C = \frac{1}{\pi F_0 R_d} \quad (3.10)$$

$$C = \frac{1}{(3.14)(3,150)(2.2)} = 45.96 \mu\text{F}$$

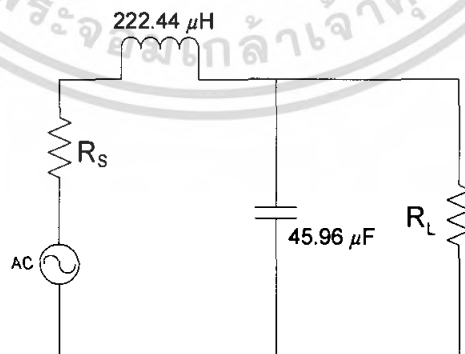
จากวิธีการดังกล่าวสามารถนำไปออกแบบวงจรกรองแบบที่ได้ค่าดังนี้
ความถี่คัทออฟคือ

$$F_0 = \frac{F}{\frac{dB}{2^{L/20}}} = \frac{20k}{\frac{32}{2^{18}} \cdot 3.4} = \frac{20,000}{3.4} = 5,832.65 \text{ Hz}$$

$$L = \frac{R_d}{\pi F_0} = \frac{2.2}{3.14(5,832.65)} = 120 \mu\text{H}$$

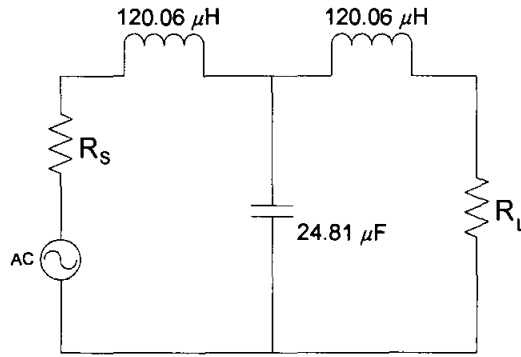
$$C = \frac{1}{\pi F_0 R_d} = \frac{1}{(3.14)(5,832.65)(2.2)} = 24.81 \mu\text{F}$$

ดังนั้นวงจรกรองทั้งสองแบบที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าดังรูป 3.2



ก) วงจรกรองแบบแอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) วงจรกรองแบบที่

รูปที่ 3.2 วงจรกรองที่ได้จากการออกแบบ

ส่วนของการออกแบบตัวเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้คือ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $222.44 \mu\text{H}$

(ก) จากการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการคือ $L = 222.44 \mu\text{H}$

(ข) คำนวณหาพลังงานสะสม

$$E = \frac{1}{2} LI_m^2 \quad (3.11)$$

$$E = \frac{1}{2} (222.44 \times 10^{-6}) (\sqrt{2} \times 12.3)^2 = 33,653 \mu\text{J}$$

(ค) เลือกขนาดและชนิดของแกนแม่เหล็กให้มีค่าพลังงานสะสมมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจากตารางภาคผนวก ข ได้เป็นแกน T-250

(ง) หาจำนวนรอบในการพันตัวเหนี่ยวนำ

พิจารณาตารางภาคผนวก ข ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสะสมกับขนาดแกนแม่เหล็ก จะทราบค่า Ampere-Turns (NI) คำนวณหาค่า N

$$NI = 800$$

$$N = 45.9$$

(จ) หาขนาดของขดลวดตัวนำ

พิจารณาตารางภาคผนวก ข Winding Table จากขั้นตอนที่ผ่านมา ขนาดแกนแม่เหล็กเท่ากับ T-250 จำนวนรอบเท่ากับ 46 ก็จะได้ขนาดของขดลวดตัวนำคือ AWG-13

ส่วนตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $120 \mu\text{H}$ สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

(ก) คำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ คือ $L = 120 \mu\text{H}$

(ข) คำนวณหาค่าพลังงานสะสม

$$E = \frac{1}{2} LI_m^2$$

$$E = \frac{1}{2} (120 \times 10^{-6}) (\sqrt{2} \times 12.3)^2 = 18,155 \mu\text{J}$$

(ค) เลือกขนาดและชนิดของแกนแม่เหล็กให้มีค่าพลังงานสะสมมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจากตารางภาคผนวก ข ได้เป็นแกน T-200

(ง) หาจำนวนรอบในการพันตัวเหนี่ยวนำ

พิจารณาตารางภาคผนวก ข ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสะสมกับขนาดแกนแม่เหล็ก จะทราบค่า Ampere-Turns (NI) คำนวณหาค่า N

$$NI = 600$$

$$N = 34.49$$

(จ) หาขนาดของขดลวดตัวนำ

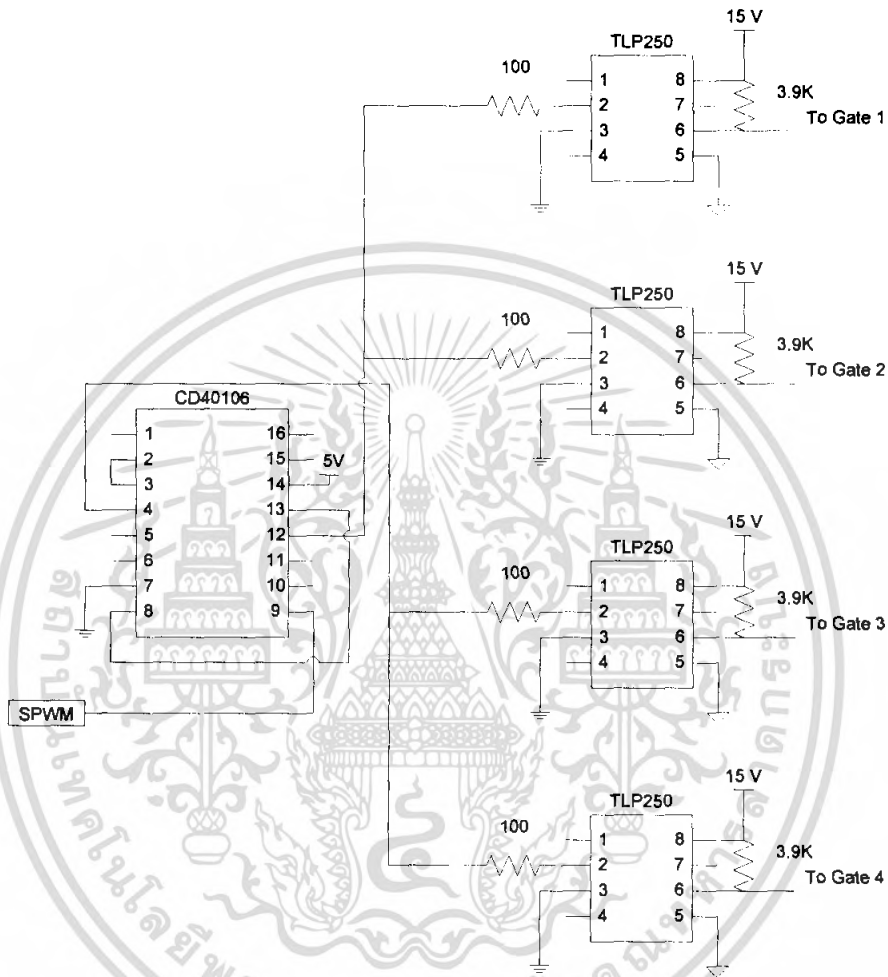
พิจารณາตารางภาคผนวก ข Winding Table

จากขั้นตอนที่ผ่านมา ขนาดแกนแม่เหล็กเท่ากับ T-200 จำนวนรอบเท่ากับ 35 ก็จะได้ขนาดของขดลวดตัวนำคือ AWG-11

3.4 ระบบควบคุม

3.4.1 วงจรขับนำสวิตช์ (gate driver)

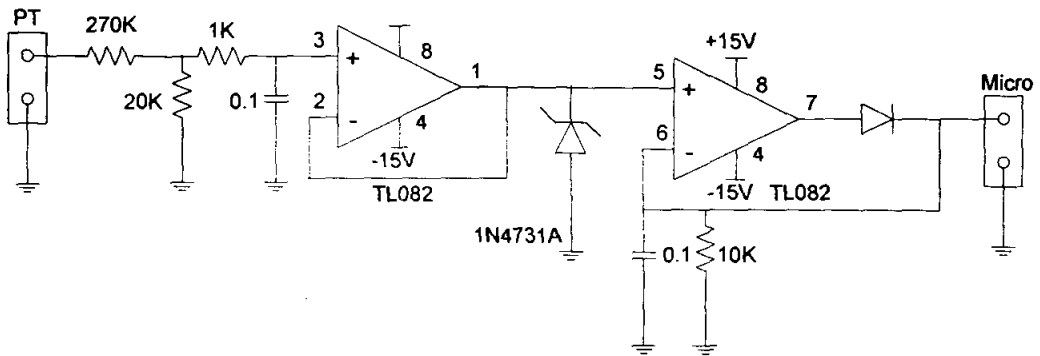
ทำหน้าที่รับสัญญาณ SPWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ มาผ่านวงจรบัฟเฟอร์แล้วจึงนำสัญญาณดังกล่าวไปยังวงจรแยกกันทางแสง จากนั้นจึงส่งสัญญาณเข้าขาเกตของไอจีบีทีต่อไป แสดงวงจรในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรขับนำสวิตช์ (gate driver)

3.4.2 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟตรง

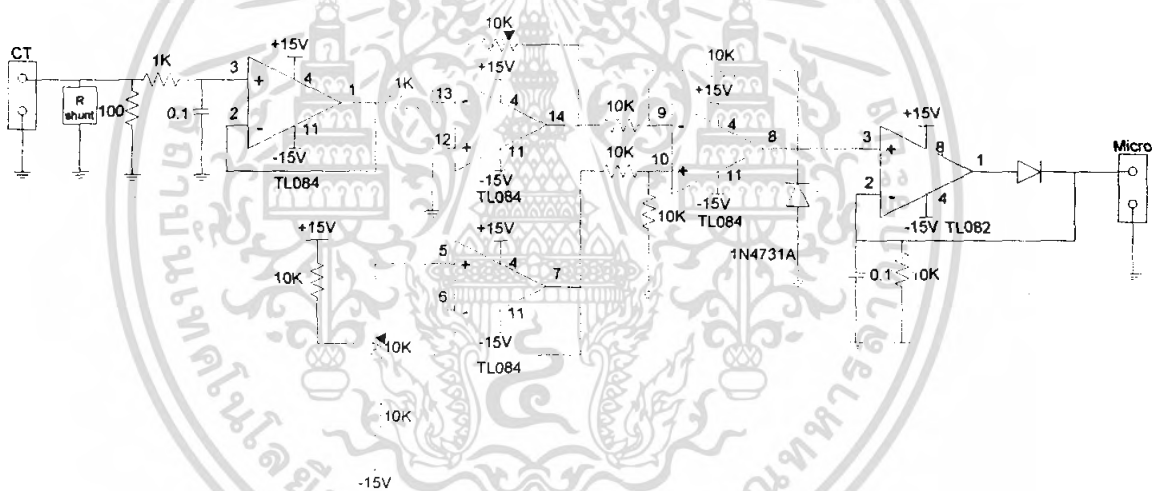
วงจรตรวจวัดแรงดันไฟตรง ซึ่งเป็นแรงดันอินพุต ออกแบบโดยลดทอนแรงดันด้วยตัวต้านทานจากแรงดัน 46-48 โวลต์ ลดทอนเป็น 2-4.5 โวลต์ แล้วผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรขยายสัญญาณโดยใช้อปแอมป์ แล้วเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงวงจรในรูปที่ 3.4



รูปที่3.4 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟตรง

3.4.3 วงจรตรวจวัดกระแสไฟตรง

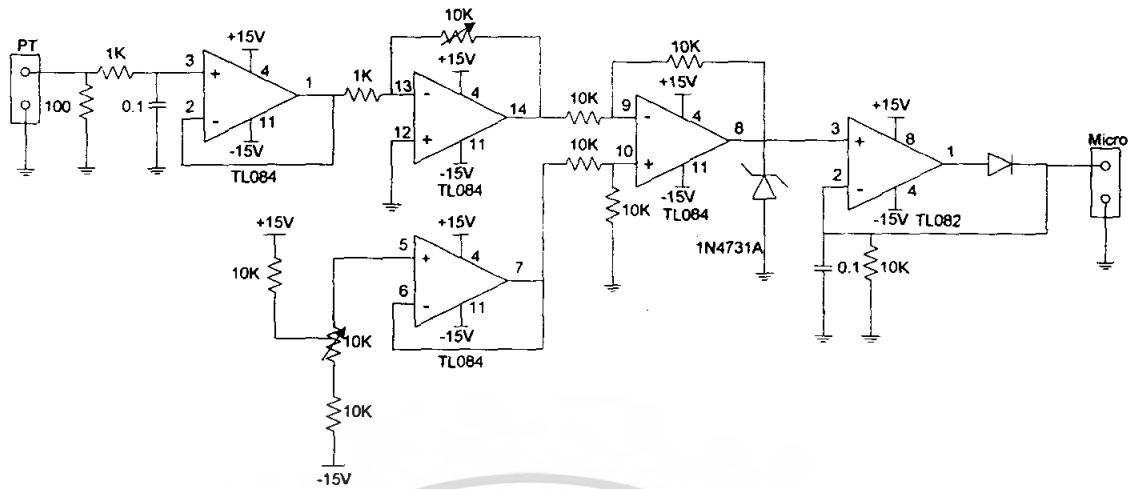
วงจรตรวจวัดกระแสไฟตรง ซึ่งเป็นกระแสต้านอินพุต ใช้หลักการแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน (R shunt) แปรผันตามกระแสที่ไหลผ่าน ผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรขยายสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ แล้วเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงวงจรในรูปที่3.5



รูปที่3.5 วงจรตรวจวัดกระแสไฟตรง

3.4.4 วงจรตรวจวัดแรงดันระบบการไฟฟ้า

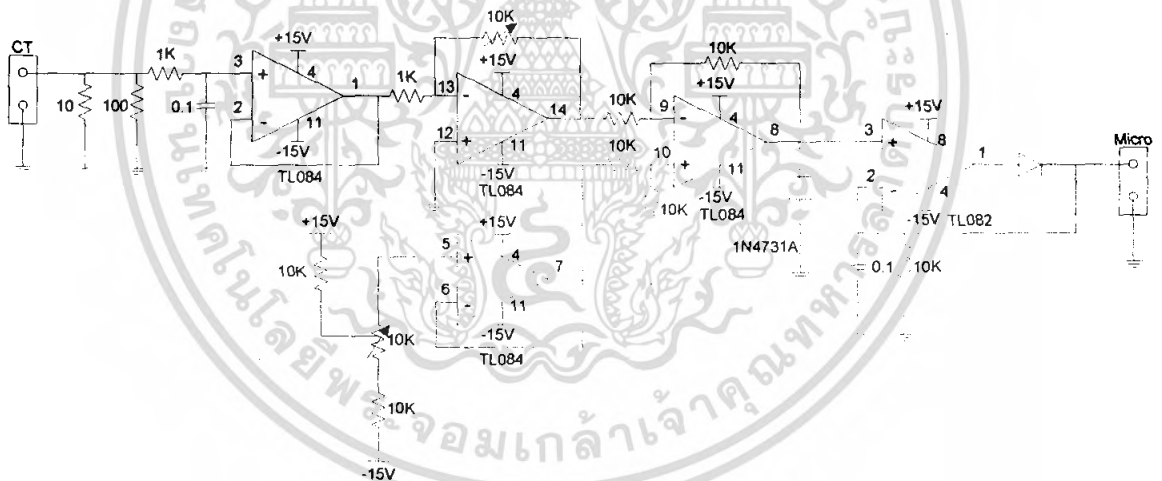
วงจรตรวจวัดแรงดันระบบการไฟฟ้า ซึ่งตรวจวัดค่าแรงดันกระแสสลับที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ออกแบบโดยใช้หม้อแปลงลดแรงดันจาก 220 โวลต์ เป็นแรงดัน 2 โวลต์ ผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรขยายสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ แล้วเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงวงจรในรูปที่3.6



รูปที่ 3.6 วงจรตรวจวัดแรงดันระบบการไฟฟ้า

3.4.5 วงจรตรวจวัดกระแสระบบการไฟฟ้า

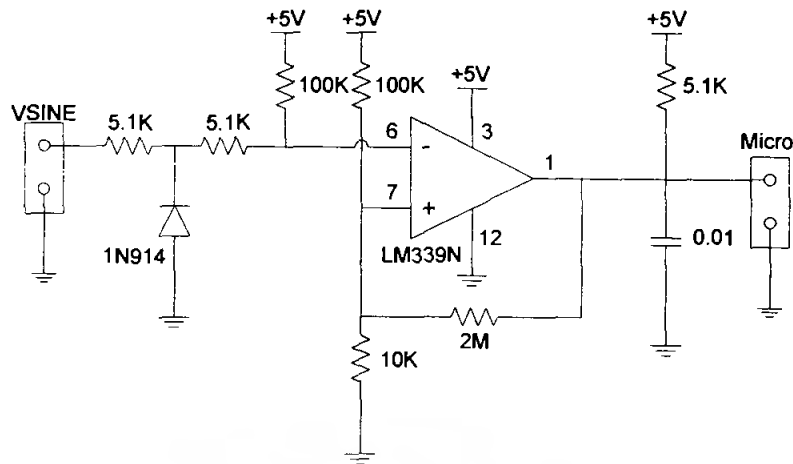
วงจรตรวจวัดกระแสระบบการไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระแสด้านเอาต์พุต โดยใช้หลักการของ Current Transducer ผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรรขยายสัญญาณโดยใช้อปแอมป์ แล้วเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงวงจรในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรตรวจวัดกระแสระบบการไฟฟ้า

3.4.6 วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์แรงดันระบบการไฟฟ้า

แรงดันระบบการไฟฟ้าจะต้องถูกตรวจวัดจุดตัดศูนย์ เพื่อเป็นมุมเฟสอ้างอิงที่ศูนย์องศา สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ จุดตัดศูนย์จะต่อเข้ากับขา RDO (input) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์ออกแบบโดยใช้ LM339N เป็นตัวเปรียบเทียบแรงดัน แสดงวงจรในรูปที่ 3.8

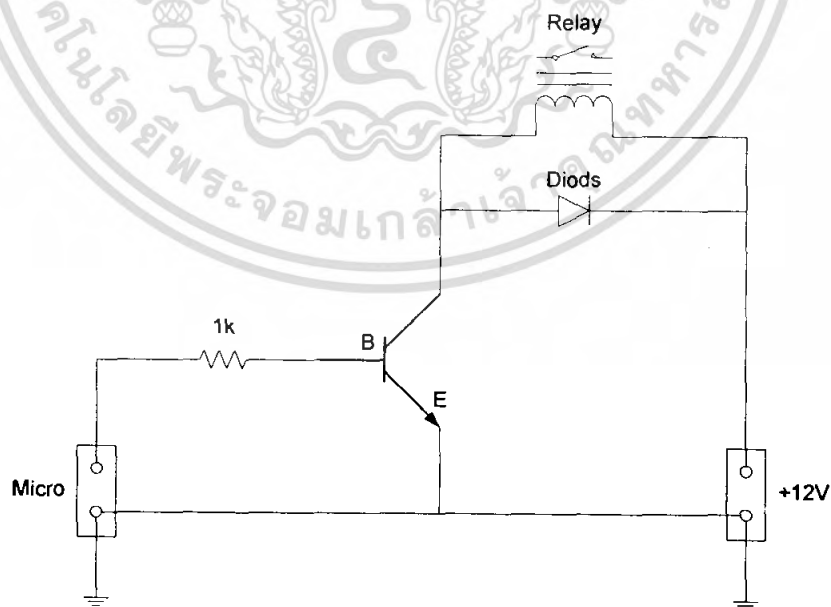


รูปที่3.8 วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์แรงดันระบบการไฟฟ้า

3.4.7 การขับรีเลย์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

หลักการของรีเลย์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าคือ ใช้กระแสต่ำไม่กี่ไมโครแอมป์หรือมิลลิแอมป์มาควบคุมการเปิดปิดหรือตัดต่อเหมือนเป็นสวิตช์ตัวหนึ่ง เพื่อให้โหลดสามารถใช้กระแสสูงๆเป็นแอมป์หรือหลายๆแอมป์ได้ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของรีเลย์นั้นๆ ว่าต้องทนแรงดันขนาดเท่าใด คอยล์รีเลย์ต้องการกระแสเท่าไรและมีความต้านทานมากน้อยขนาดไหนซึ่งค่าเหล่านี้ต้องให้ความสนใจ เพราะเป็นเรื่องสำคัญในการใช้รีเลย์

วงจรคอนโทรลหรือวงจรควบคุมที่เป็นวงจรแบบดิจิทัล โดยใช้พัลส์จากเอาต์พุตที่ออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมรีเลย์ให้ทำงานแต่กระแสที่จ่ายออกมามีค่าน้อยจึงต้องมีทรานซิสเตอร์มาขยายกระแส เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของคอยล์รีเลย์



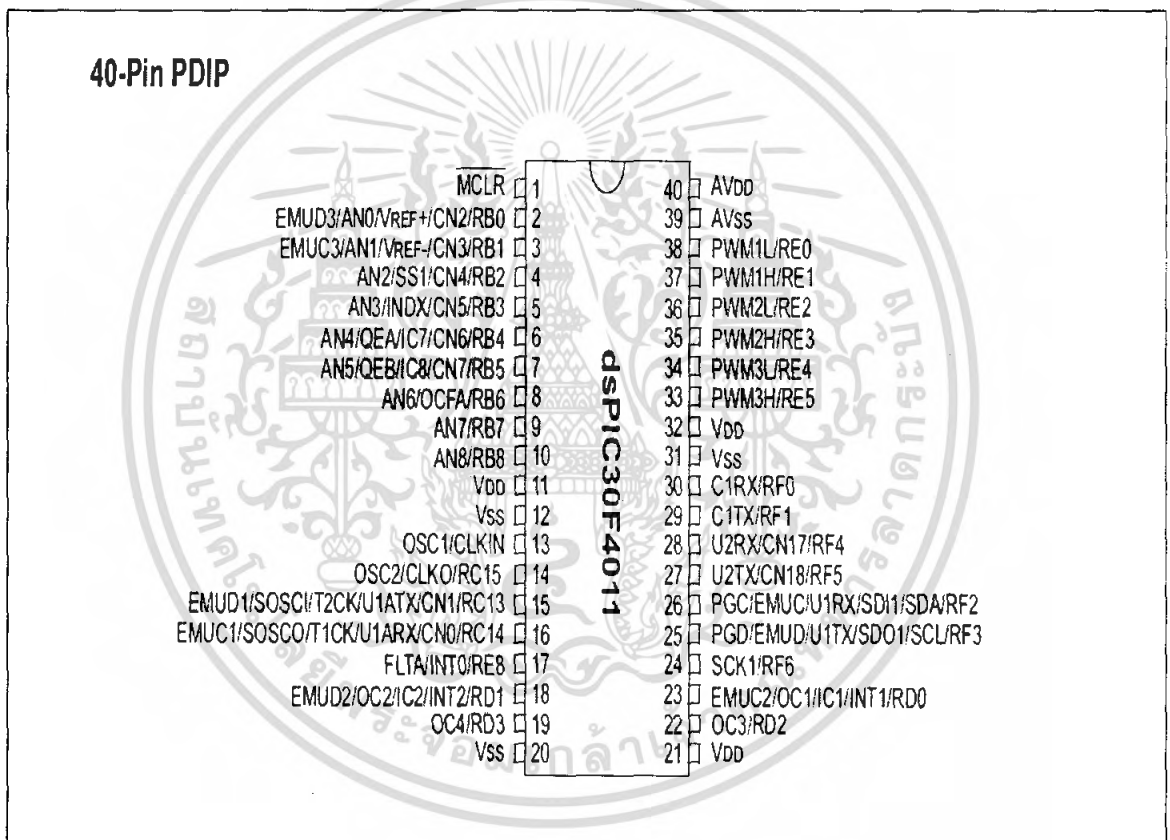
รูปที่3.9 วงจรรีเลย์ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้เพื่อป้องกันแรงดันย้อนกลับจึงมีไดโอดต่อคร่อมคอยส์รีเลย์ ไดโอดที่ใช้กันส่วนมากจะเป็นไดโอดที่ใช้ในวงจรเรกติไฟร์ทั่วไปคือเบอร์ 1N4001 เป็นต้น

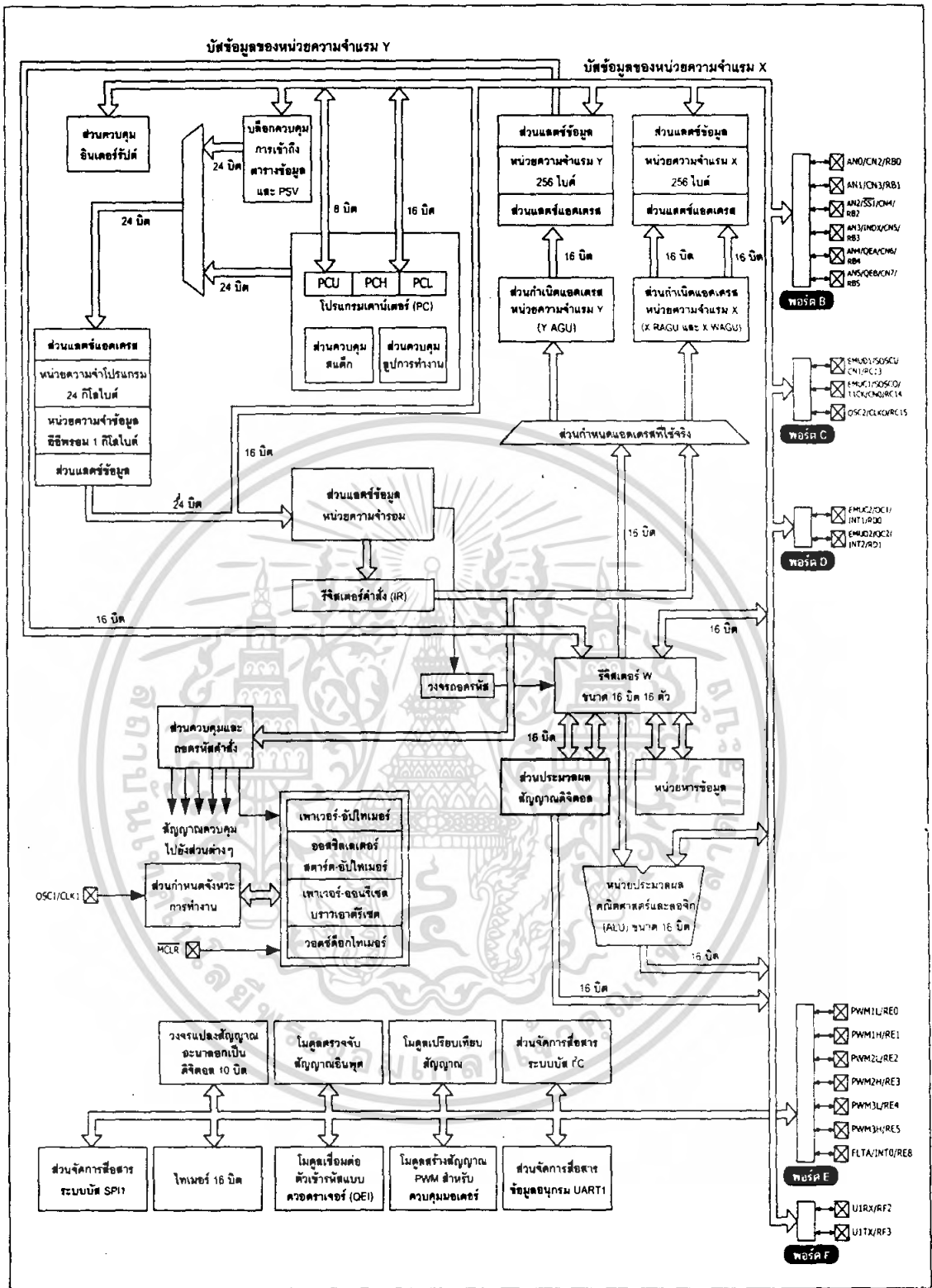
3.4.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์

สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ที่นำมาใช้ในการเรียนรู้และทดลองของโครงงานนี้คือเบอร์ dsPIC30F4011 ซึ่งมีขาต่อใช้งาน 40 ขา ในรูปที่ 3.10 แสดงไดอะแกรมการทำงานและส่วนประกอบทั้งหมดของ dsPIC30F4011 และการจัดขา สำหรับหน้าที่ของแต่ละขาได้อธิบายโดยสรุปไว้ในตาราง คุณสมบัติทางเทคนิคของ dsPIC30F4011 มีดังนี้



รูปที่ 3.10 ก) การจัดขาใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC4011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ข) ไดอะแกรมการทำงานและส่วนประกอบทั้งหมดของ dsPIC30F4011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คุณสมบัติของซีพียู

- มี 84 คำสั่งมาตรฐาน สามารถรองรับรูปแบบการอ้างแอดเดรสได้อย่างอิสระ
- ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ความจุ 12 กิโลไบต์ ลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 100,000 ครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้
- สามารถโปรแกรมหน่วยความจำโปรแกรมได้ด้วยตัวเอง โดยใช้กระบวนการทางซอฟต์แวร์
- มีหน่วยความจำข้อมูลอีพีรอม 1 กิโลไบต์ ลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 1,000,000 ครั้ง
- มีหน่วยความจำข้อมูลแรม 512 ไบต์
- รีจิสเตอร์ W จัดในรูปของอะเรย์ มีขนาด 16 บิต จำนวน 16 ตัว
- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- ความถี่สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก ตั้งแต่ย่านไฟตรงจนถึง 40 MHz
- ความถี่สัญญาณนาฬิกาในกรณีใช้งานร่วมกับวงจรเฟสล็อกถูกภายใน ตั้งแต่ 4 MHz ถึง 10 MHz เลือกได้ 3 ระดับ คือ 4, 8 หรือ 16 เท่า
- รองรับแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์ได้สูงสุด 62 แหล่ง รวมทั้งการอินเทอร์รัปต์จากภายนอก 3 แหล่ง
- สามารถกำหนดระดับความสำคัญในการตอบสนองอินเทอร์รัปต์ได้ 8 ระดับ
- มีอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ 48 ตำแหน่ง
- มีวงจรตรวจจับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีเพาเวอร์-อนรีเซต, เพาเวอร์-อับไทเมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ท-อับไทเมอร์
- มีวอตช์ด็อกไทเมอร์แบบโปรแกรมได้
- มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา หากผิดพลาดจะเข้าสู่โหมดสัญญาณนาฬิกา RC พลังงานต่ำทันที
- รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม (ICSP : In-Circuit Serial Programming)
- สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้
- ย่านไฟเลี้ยง 2.5 ถึง 5.5 V กระแสไฟฟ้า 2.6 ถึง 44 mA ที่ไฟเลี้ยง +5 V ขึ้นอยู่กับการกำหนดความเร็วในการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คุณสมบัติด้านการประมวลสัญญาณดิจิทัล

- มีแอมพลิจูดสัญญาณ 40 บิต 2 ตัว รองรับการประมวลทางคณิตศาสตร์ได้เป็นอย่างดี
- มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและการหารเลข 17 บิตในรูปของฮาร์ดแวร์ จึงทำให้สามารถทำการคูณและหารเลขได้อย่างรวดเร็ว
- ทำการคูณเลข 16 บิตได้ภายในสัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ไชเกิล
- มีตัวเลื่อนข้อมูลบาร์เรล 40 สเตจ ช่วยให้ประมวลผลข้อมูลที่จำนวนบิตมากๆ ทำได้รวดเร็ว
- มีวงจรเฟดแบ็กข้อมูล จึงทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว

3. คุณสมบัติของไมโครพังก์ชันพิเศษ

- สามารถจ่ายกระแสออกทางขาพอร์ตได้ 25 mA ทั้งแบบกระแสซิงก์และซอร์ส
- ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 16 บิต 3 ตัว สามารถต่อใช้งานร่วมกันเป็นไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 32 บิตได้
- มีไมโครตรวจจับสัญญาณดิจิทัลขนาด 16 บิต 4 ชุด
- มีไมโครเปรียบเทียบข้อมูลและกำเนิดสัญญาณ PWM ความละเอียด 16 บิต 2 ชุด
 - ในการเปรียบเทียบข้อมูลสามารถเลือกการทำงานได้ 2 โหมด
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมแบบ SPI
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์ผ่านระบบบัส I2C ทั้งแบบ 7 และ 10 บิต กำหนดเป็นมาสเตอร์หรือสลาฟได้
- มีไมโครสื่อสารข้อมูลอนุกรม UART พร้อมบัฟเฟอร์แบบ FIFO
- มีไมโครสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์ 6 ช่อง
 - เลือกรูปแบบเอาต์พุตได้ทั้งแบบคอมพลีเมนต์และแบบฮิสเทรี
 - มีโหมดปรับตำแหน่งการหมุนทั้งแบบปรับขอบสัญญาณและแบบกึ่งกลาง
 - มีส่วนกำเนิดดีวีทีไอเกิล 4 ชุด
 - กำหนดฐานเวลาได้ 4 โหมด
 - สามารถเลือกช่วงของสัญญาณทางเอาต์พุตได้
 - มีสัญญาณกระตุ้นเพื่อให้ทำงานสัมพันธ์กับวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์
 - สามารถควบคุมสัญญาณเอาต์พุตได้
- มีไมโครเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีอินพุต Phase A, Phase B และรับสัญญาณพัลส์เพื่อกำหนดตำแหน่ง
- มีตัวนับตำแหน่งขนาด 16 บิต นับได้ทั้งขึ้นและลง
- แสดงสถานะของทิศทางการนับได้
- กำหนดโหมดของการวัดตำแหน่งได้ 2 โหมดคือ x2 และx4
- มีวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบดิจิตอลจากอินพุตแบบโปรแกรมได้
- สำหรับกำหนดให้ทำงานเป็นไทเมอร์/เคาท์เตอร์ขนาด 16 บิตได้
- กำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากตำแหน่งที่นับเกิน (rollover) หรือนับขาด (underflow)

- มีวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล ความละเอียด 10 บิต 6 ช่อง
 - อัตราการสุ่มและแปลงสัญญาณ 500 กิโลแซมเปิลต่อวินาที
 - สามารถแปลงสัญญาณเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานในโหมดสลีปและไอเดิลได้

สถาปัตยกรรมโดยสรุปของ dsPIC30F4011

1. หน่วยประมวลผลกลาง

หน่วยประมวลผลของ dsPIC30F4011 ใช้คำสั่งที่ความยาว 1 เวิร์ด ขนาด 24 บิต โดยมีโปรแกรมเคาน์เตอร์ขนาด 23 บิต(จริงๆ แล้วโดยโครงสร้างมี 24 บิต แต่ไม่สนใจบิต MSB ซึ่งก็คือบิต 23 และบิต LSB หรือบิต 0 กำหนดเป็น "0" จึงทำให้สามารถติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมได้สูงสุด 4 เมกะเวิร์ด) เพื่อแจ้งแอดเดรสของหน่วยความจำโปรแกรมที่เข้าไปประมวลผล dsPIC30F4011 มีความจุของหน่วยความจำโปรแกรม 12 กิโลไบต์ เมื่อคำสั่งมีความยาว 24 บิต จึงบรรจุคำสั่งได้จริง 4 กิโลเวิร์ด

รีจิสเตอร์หลักที่ใช้ในการทำงานคือ รีจิสเตอร์ W (Working register) สำหรับใน dsPIC จะแตกต่างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC อย่างมาก โดยรีจิสเตอร์ W ได้รับการจัดโครงสร้างเป็นอาเรย์ขนาด 16 บิต จึงทำให้สามารถรองรับทั้งข้อมูล, ค่าแอดเดรส หรือค่าของรีจิสเตอร์ใดๆ ที่ต้องนำมาประมวลผลโดยใน dsPIC มีรีจิสเตอร์ W ให้ใช้งานถึง 16 ตัว ส่วนใหญ่ใช้ในการประมวลผลหลัก ส่วนอีกตัวหนึ่งก็คือ รีจิสเตอร์ W15 จะใช้ทำงานร่วมกับตัวซีส์เต็กในการทำงานของโปรแกรมย่อยและบริการอินเตอร์รัปต์

ด้านการตอบสนองอินเตอร์รัปต์นั้น dsPIC30F4011 มีการจัดสรรพื้นที่เก็บค่าอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ไว้มากถึง 54 ตำแหน่ง และยังสามารถกำหนดระดับความสำคัญได้อีก 8 ระดับ อีกด้วย

2. หน่วยความจำ

dsPIC30F4011 มีหน่วยความจำโปรแกรม 4 กิโลเวิร์ด แอดเดรสอยู่ในช่วง 0x000100 ถึง 0x001FFE สามารถโปรแกรมหรือเขียนข้อมูลลงไปได้ 2 วิธี คือ

1. โดยใช้การโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรมหรือ ICSP ผ่านทางขา PGD และ PGC (ขาที่ 17 และ 18) แล้วให้สัญญาณพัลส์แรงดันสูงสำหรับโปรแกรมผ่านเข้ามาทางขา MCLR
2. โปรแกรมตัวเองในขณะทำงานหรือ RTSP (Run Time Self-Programming)

ส่วนหน่วยความจำข้อมูลแรมนั้น dsPIC30F4011 ได้จัดสรรเป็น 2 ส่วนคือ หน่วยความจำข้อมูลแรม X และ Y แต่ละส่วนมีขนาด 16 บิต ความจุ 256 ไบต์ รวมเป็น 512 ไบต์ โดยในแต่ละส่วนจะมีตัวกำหนดแอดเดรสแยกออกจากกัน เรียกว่า AGU (Address Generation Unit)

ในขณะที่หน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม dsPIC30F4011 จัดสรรไว้ที่แอดเดรส 0x7FFC00 ถึง 0x7FFFFE มีความจุ 1 กิโลไบต์

3. ส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP Engine)

นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งของ dsPIC เนื่องจาก dsPIC ได้รับการออกแบบมาให้ทำงานในด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นหลัก ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มความสามารถในหน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิกอย่างมาก โดยในส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีหน่วยจัดการคูณเลขขนาด 17x17 บิตความเร็วสูง, หน่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์และลอจิกหรือ ALU ขนาด 40 บิต อีก 2 ตัว และตัวเลื่อนข้อมูล 2 ทิศทางแบบบารเรล (barrel shifter) ขนาด 40 บิต จึงทำให้สามารถจัดการข้อมูลขนาด 16 บิต ได้เสร็จสิ้นภายในสัญญาณนาฬิกาเพียงไซเคิลเดียว

4. โมดูลฟังก์ชันพิเศษ

dsPIC30F4011 ได้รวมเอาโมดูลสำหรับทำงานเฉพาะทางไว้อย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็น โมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล ความละเอียด 10 บิต, โมดูลเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมหรือ SPI, โมดูลสื่อสารข้อมูลบนระบบบัส I2C, โมดูลสื่อสารข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมหรือ UART, ไทเมอร์ขนาด 16 บิตถึง 3 ตัว และที่เป็นพิเศษอีก 2 โมดูลคือ โมดูลสร้างสัญญาณ PWM เพื่อการควบคุมมอเตอร์และโมดูลเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์ โดยสามารถใช้งานร่วมกันเพื่อสร้างระบบควบคุมมอเตอร์แบบปิดประสิทธิภาพสูง

5. พอร์ตอินพุตเอาต์พุต

dsPIC30F4011 มีพอร์ตให้ใช้งานมากถึง 5 พอร์ต รวม 40 ขา ดังนี้

พอร์ต B มี 9 ขา คือ RB0-RB8

พอร์ต C มี 2 ขา คือ RC13-RC14

พอร์ต D มี 3 ขา คือ RD0-RD3

พอร์ต E มี 7 ขา คือ RE0-RE5, RE8

พอร์ต F มี 7 ขา คือ RF0-RF6

โครงสร้างทางโปรแกรมที่ควรทราบ

ในรูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างทางโปรแกรมหรือ Programmer's model ของ dsPIC ที่นักพัฒนาต้องทราบ ซึ่งประกอบไปด้วย

- (ก) รีจิสเตอร์ W ขนาด 16 บิตมากถึง 16 ตัว โดยตัวที่ใช้งานเป็นหลักคือ W0 ส่วนตัวที่ถูกนำไปใช้ในส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมี 10 ตัว คือ W4-W13 ส่วน W14 ถูกนำไปใช้ร่วมเป็นตัวชี้เฟรม และ W15 ถูกนำไปใช้ร่วมเป็นตัวชี้สแต็ค
- (ข) แอควิวมูลเตอร์ 40 บิต จำนวน 2 ตัว ใช้ในงานประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นหลัก
- (ค) โปรแกรมเคาน์เตอร์ ขนาด 24 บิต นำมาใช้ในการแจ้งแอดเดรส 24 บิต โดยไม่สนใจบิต MSB และบิต LSB ต้องเป็น "0"
- (ง) รีจิสเตอร์หลัก อันประกอบไปด้วย

STATUS ซึ่งใช้แสดงสถานะการทำงาน มีขนาด 16 บิต

CORCON ใช้ควบคุมการทำงานของหน่วยประมวลผลกลาง มีขนาด 16 บิต

TBLPAG เป็นรีจิสเตอร์กำหนดเพจของตารางข้อมูลในหน่วยความจำโปรแกรมมีขนาด 8 บิต

PAVPAG เป็นรีจิสเตอร์แสดงแอดเดรสของพื้นที่โปรแกรม มีขนาด 8 บิต

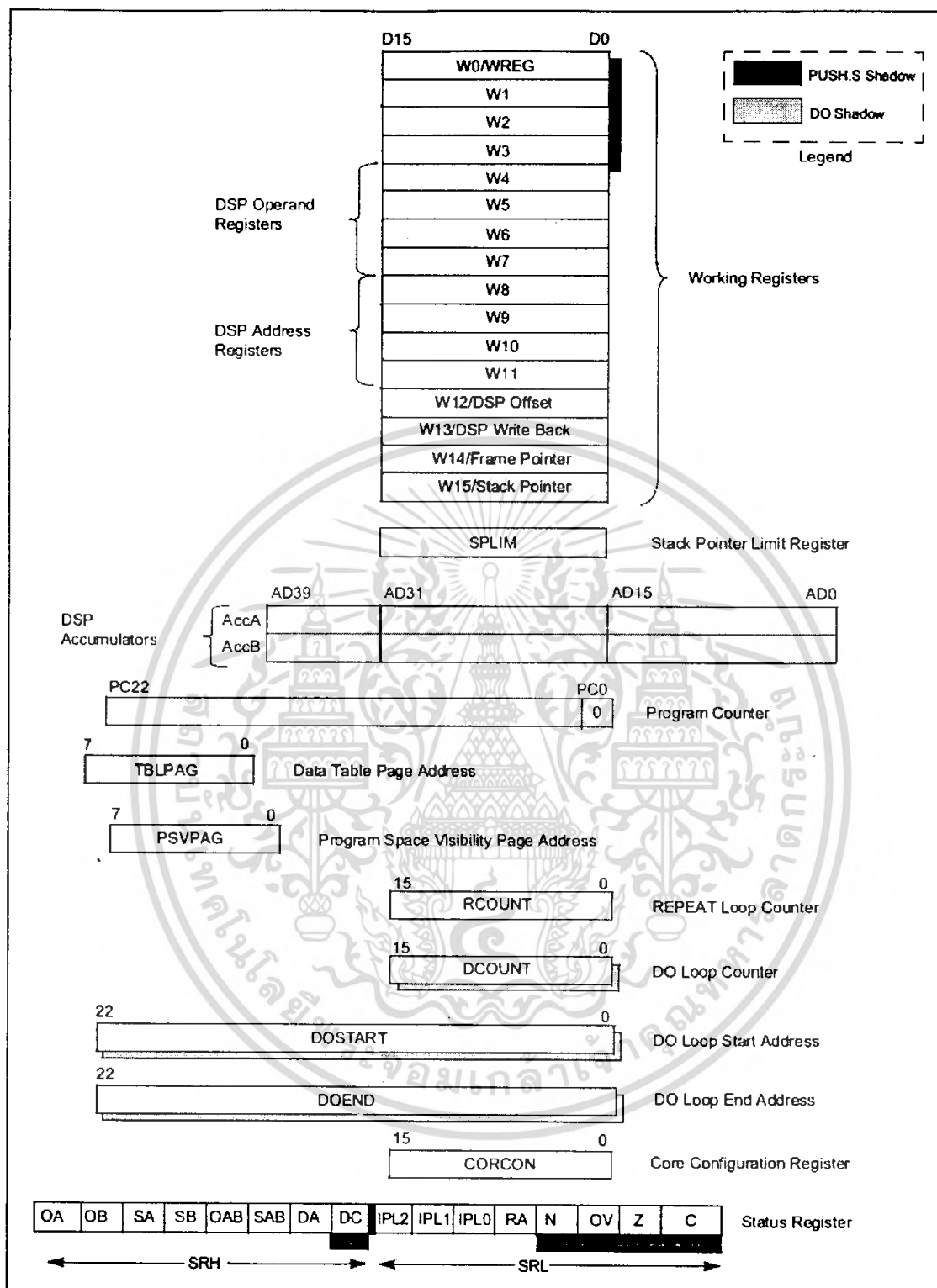
RCOUNT เป็นรีจิสเตอร์เก็บค่าตัวนับจำนวนรอบของลูปที่ทำซ้ำ

DCOUNT เป็นรีจิสเตอร์เก็บค่าตัวนับจำนวนรอบของลูปที่ทำงาน

DOSTART เป็นรีจิสเตอร์กำหนดแอดเดรสเริ่มต้นทำงานของโปรแกรมลูป

DOEND เป็นรีจิสเตอร์กำหนดแอดเดรสปลายทางที่ต้องการทำโปรแกรมลูป

สำหรับรีจิสเตอร์ DCOUNT, DOSTART และ DOEND เป็นรีจิสเตอร์เงา (shadow register) หมายความว่า เป็นรีจิสเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นชั่วคราวเพื่อเก็บค่าก่อนที่จะมีการถ่ายทอดออกไปทำงาน จึงไม่สามารถเข้าถึงรีจิสเตอร์เหล่านี้ได้โดยตรง



รูปที่ 3.11 โครงสร้างทางโปรแกรม (Program's model) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

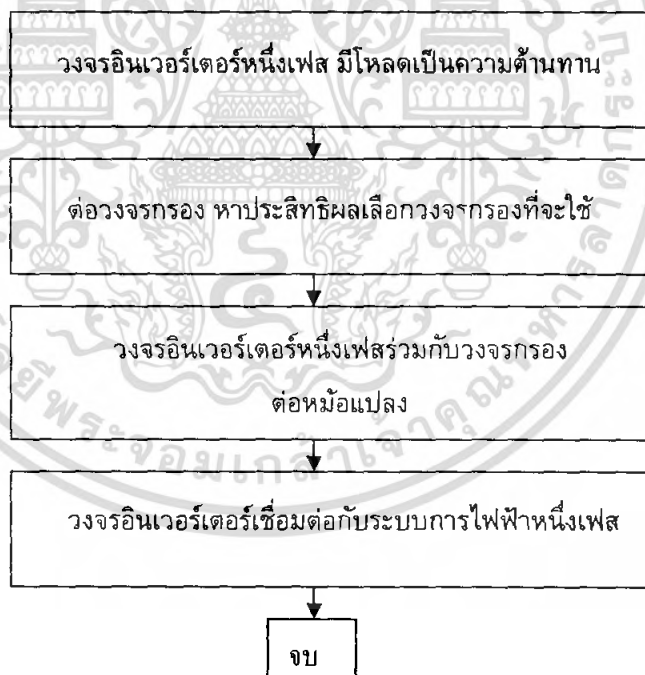
การจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

บทนี้เป็นการจำลองด้วยโปรแกรม PSpice เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าหนึ่งเฟส หลังจากที่ได้ออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์จากบทที่แล้ว

4.1 การสร้างแบบจำลอง

จะแบ่งการสร้างแบบจำลองเป็น 4 ส่วนหลักๆด้วยกันคือ

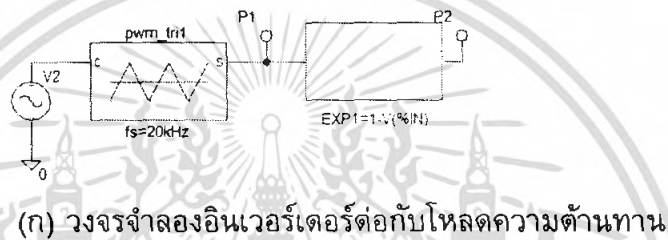
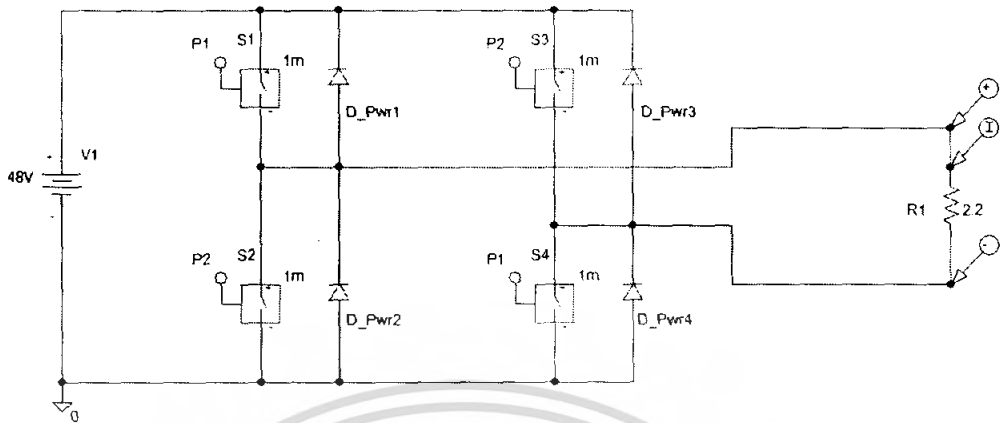
1. การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส โดยมีโหลดเป็นความต้านทาน
2. การจำลองการทำงานของวงจรกรองเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรกรองที่ใช้งานจริง
3. การจำลองการทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์ร่วมกับวงจรกรองต่อกับหม้อแปลง
4. การจำลองระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าหนึ่งเฟส



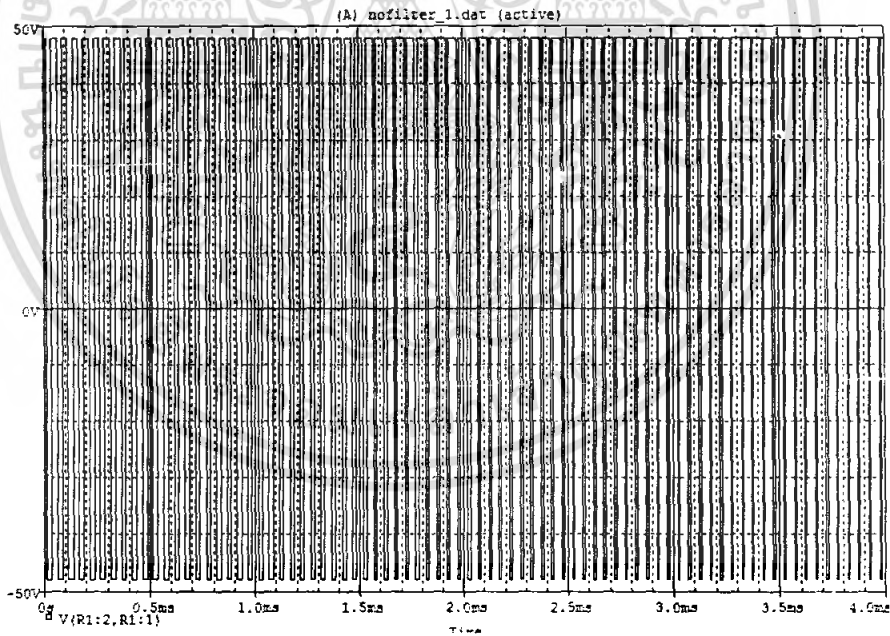
รูปที่ 4.1 ลำดับขั้นตอนการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส โดยมีโหลดเป็นความต้านทาน

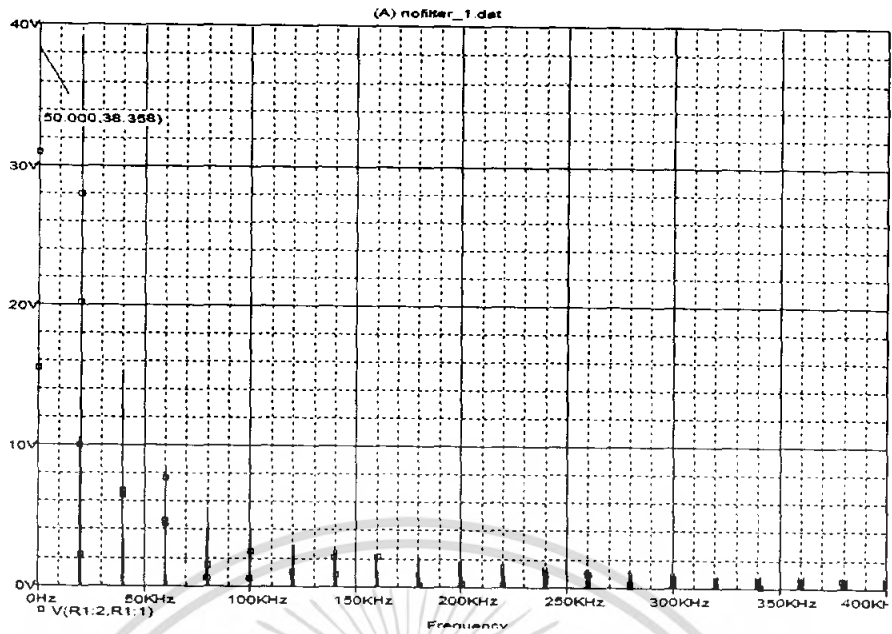


(ก) วงจรจำลองอินเวอร์เตอร์ต่อกับโหลดความต้านทาน

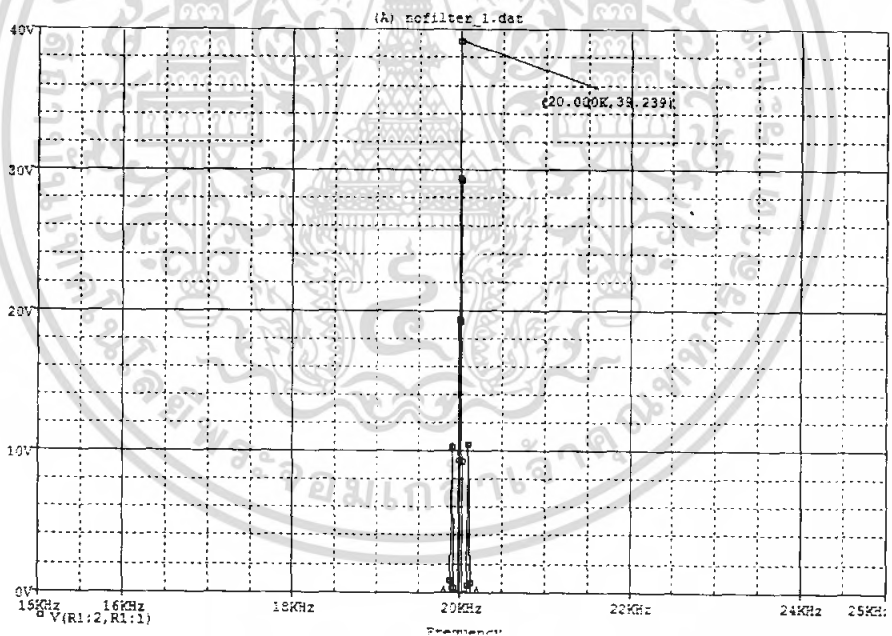


(ข) ผลการจำลองแรงดันต้านออก SPWM ของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) สเปกตรารวมของแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ แรงดันค่ายอด
ความถี่หลักมูลคือ 38.358 V ($V_{rms} = 27$ V)



(ง) ภาพขยายยอดแรงดันที่ต้องการกำจัดมีค่า 39.239 V หรือ $20 \log 39.239 = 32$ dB
ที่ความถี่ 20 kHz

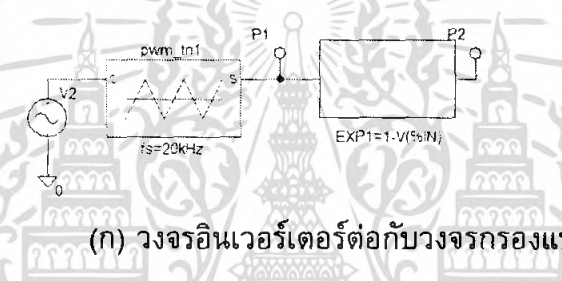
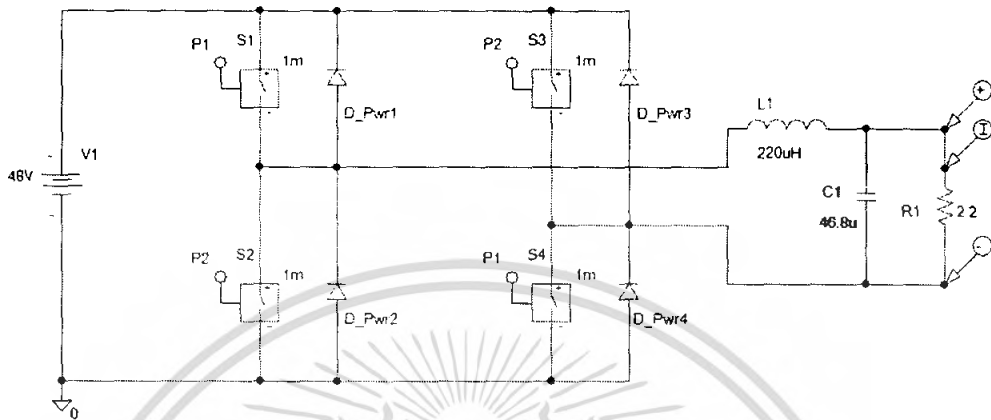
รูปที่ 4.2 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส โดยมีโหลดเป็นความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

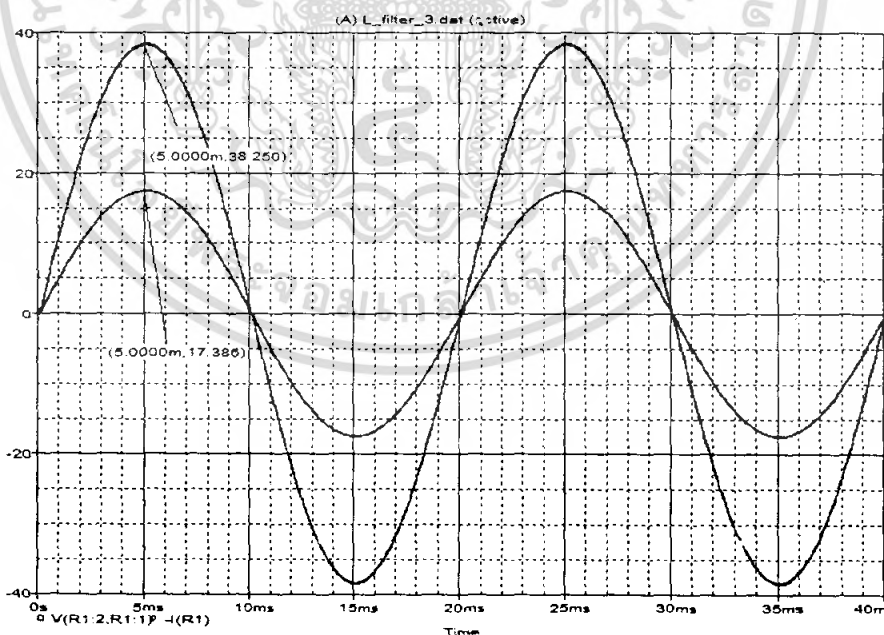
4.1.2 การจำลองการทำงานของวงจรกรองเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรกรองที่ใช้งานจริง

โดยวงจรกรองที่เลือกมาพิจารณาคือวงจรกรองแบบ L และแบบ T

4.1.2.1 การจำลองการทำงานของวงจรกรองแบบ L

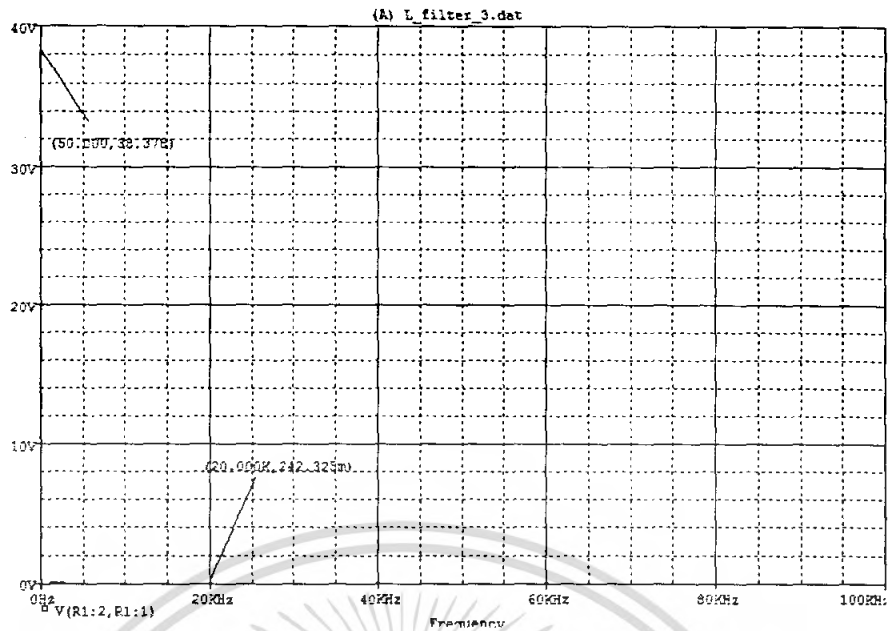


(ก) วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อกับวงจรกรองแบบ L



(ข) ผลการจำลองแรงดัน (บน) $27.05 V_{rms}$ กระแส (ล่าง) $12.29 A_{rms}$ หลังผ่านวงจรกรองแบบ L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) สเปกตรัมฮาร์โมนิกของแรงดันต้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 20 kHz

หลังผ่านวงจรกรองแบบแอลลดลงเหลือ 0.242 V

HARMONIC NO	FREQUENCY (Hz)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.836E+01	1.000E+00	-1.902E+00	0.000E+00
2	1.000E+02	8.693E-04	2.249E-05	1.627E+02	1.663E+02
3	1.500E+02	4.129E-04	1.076E-05	-1.744E+02	-1.744E+02
4	2.000E+02	8.239E-04	2.161E-05	-1.680E+02	-1.394E+02
5	2.500E+02	4.115E-04	1.072E-05	5.352E+01	6.253E+01
6	3.000E+02	6.136E-04	1.599E-05	6.771E+01	7.353E+01
7	3.500E+02	8.703E-04	2.260E-05	1.731E+02	1.692E+02
8	4.000E+02	5.169E-04	1.347E-05	1.477E+02	1.622E+02
9	4.500E+02	5.877E-04	1.591E-05	9.681E+01	1.130E+02
10	5.000E+02	3.784E-04	9.861E-06	-1.159E+02	-9.786E+01
11	5.500E+02	1.643E-04	4.287E-06	-2.337E+01	-6.355E+01
12	6.000E+02	3.892E-04	1.015E-05	-1.680E+02	-1.464E+02
13	6.500E+02	1.190E-03	3.100E-06	-7.971E+01	-5.623E+01
14	7.000E+02	7.360E-04	1.840E-06	9.943E+01	1.247E+02
15	7.500E+02	7.446E-04	1.940E-06	2.649E+03	2.968E+01
16	8.000E+02	7.745E-04	2.015E-06	-9.099E+01	-6.126E+01
17	8.500E+02	3.322E-04	9.959E-06	1.299E+01	4.362E+01
18	9.000E+02	7.554E-04	1.968E-06	-8.965E+01	-2.721E+01
19	9.500E+02	8.716E-04	2.271E-06	1.643E+01	5.046E+01
20	1.000E+03	1.116E-03	2.902E-06	1.342E+02	1.707E+02
21	1.050E+03	6.321E-04	1.698E-06	-7.270E+01	-3.482E+01
22	1.100E+03	7.397E-04	1.927E-06	3.275E+01	7.230E+01
23	1.150E+03	8.321E-04	2.325E-06	8.717E+01	1.286E+02
24	1.200E+03	1.060E-03	2.761E-06	-1.109E+02	-6.763E+01
25	1.250E+03	4.705E-04	1.227E-06	1.150E+02	1.150E+02
26	1.300E+03	4.908E-04	1.278E-06	1.097E+02	1.166E+02
27	1.350E+03	1.132E-03	3.079E-06	-7.423E+01	-2.562E+01
28	1.400E+03	3.579E-04	9.327E-06	-1.561E+02	-1.156E+02
29	1.450E+03	2.099E-04	5.470E-06	5.447E+01	1.047E+02
30	1.500E+03	6.049E-04	1.576E-06	8.159E-01	5.489E+01
31	1.550E+03	3.921E-04	1.022E-06	-6.124E+01	-5.377E+00
32	1.600E+03	7.434E-04	1.937E-06	-4.358E+01	1.406E+01
33	1.650E+03	5.221E-04	1.361E-06	-3.385E+01	2.611E+01
34	1.700E+03	3.329E-04	2.024E-06	-1.625E+02	-1.012E+02
35	1.750E+03	9.525E-04	9.194E-06	-9.990E+01	-3.593E+01
36	1.800E+03	4.333E-04	1.142E-06	4.907E+01	1.103E+02
37	1.850E+03	4.806E-04	1.252E-06	-6.042E+01	6.245E+00
38	1.900E+03	3.772E-04	9.828E-06	-1.391E+02	-7.052E+01
39	1.950E+03	4.897E-04	1.276E-06	-1.432E+02	-7.282E+01
40	2.000E+03	2.825E-04	7.360E-06	-1.103E+02	-3.821E+01
41	2.050E+03	3.298E-04	8.592E-06	-1.596E+02	-7.674E+01
42	2.100E+03	2.293E-04	5.965E-06	-5.925E+01	1.643E+01
43	2.150E+03	7.869E-04	2.047E-06	1.097E+02	1.372E+02
44	2.200E+03	4.641E-04	1.209E-06	7.276E+00	3.656E+01
45	2.250E+03	3.443E-04	1.415E-06	6.122E+01	1.423E+02
46	2.300E+03	3.093E-04	8.062E-06	7.163E+01	1.545E+02
47	2.350E+03	6.596E-04	1.719E-06	7.732E+00	9.242E+01
48	2.400E+03	2.336E-04	6.097E-06	-7.242E+01	1.407E+01
49	2.450E+03	3.989E-04	1.039E-06	-9.694E+00	7.860E+01
50	2.500E+03	4.139E-04	1.079E-06	-1.762E+02	-8.606E+01

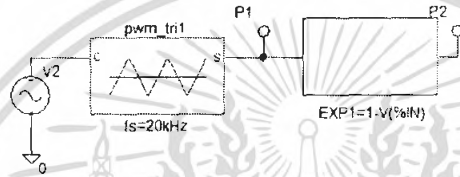
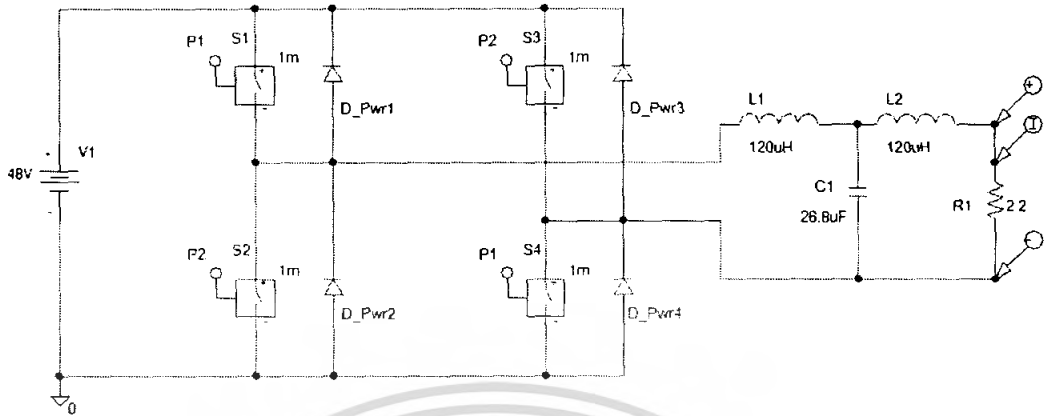
TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.143779E-02 PERCENT

(ง) ผลการจำลองวงจรกรองแบบแอลมีค่า THD_v = 0.011

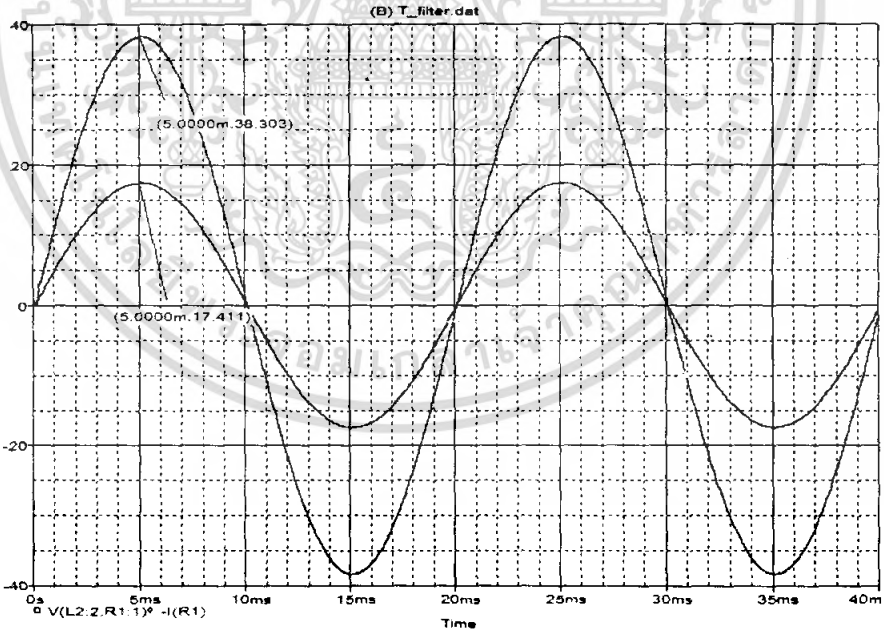
รูปที่ 4.3 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสต่อกับวงจรกรองแบบแอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 การจำลองการทำงานของวงจรกรองแบบ T

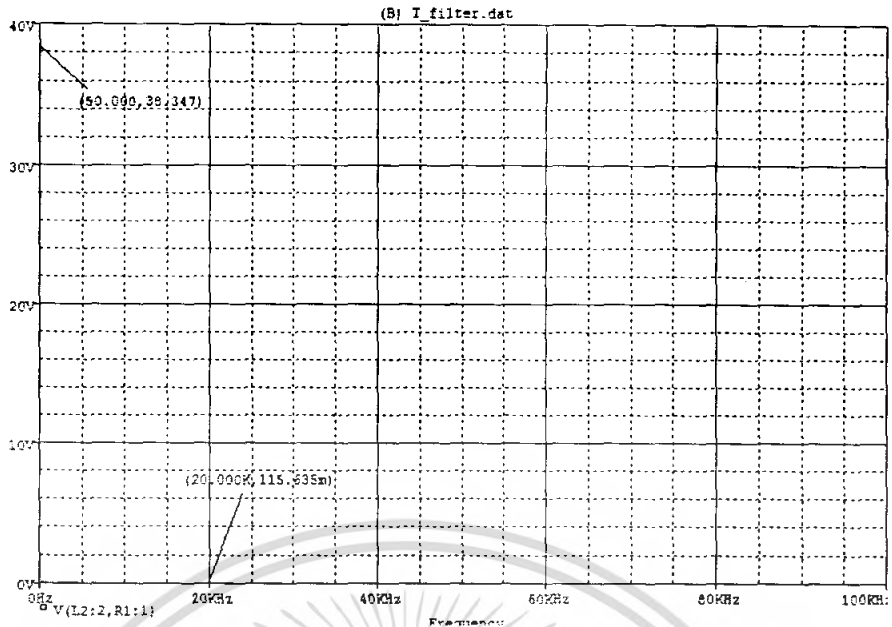


(ก) วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อกับวงจรกรองแบบ T



(ข) ผลการจำลองแรงดัน(บน) 27.08 V_{rms} กระแส (ล่าง) 12.31 A_{rms} หลังผ่านวงจรกรองแบบ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) สเปกตรัมฮาร์มอนิกของแรงดันต้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 20 kHz
 หลังผ่านวงจรกรองแบบที่ลดลงเหลือ 0.115 V

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.835E+01	1.000E+00	-1.943E+00	0.000E+00
2	1.000E+02	9.075E-04	2.367E-05	1.641E+02	1.690E+02
3	1.500E+02	6.790E-04	1.771E-05	1.766E+02	1.325E+02
4	2.000E+02	6.563E-04	1.723E-05	-1.462E+02	-1.384E+02
5	2.500E+02	5.584E-04	1.456E-05	3.232E+01	4.214E+01
6	3.000E+02	6.022E-04	1.570E-05	6.527E+01	7.702E+01
7	3.500E+02	7.139E-04	1.862E-05	1.762E+02	1.900E+02
8	4.000E+02	5.047E-04	1.316E-05	1.454E+02	1.611E+02
9	4.500E+02	6.897E-04	1.799E-05	1.197E+02	1.373E+02
10	5.000E+02	3.954E-04	1.028E-05	-1.171E+02	-9.751E+01
11	5.500E+02	1.467E-04	3.825E-06	-1.307E+02	-1.091E+02
12	6.000E+02	3.740E-04	9.780E-06	-1.562E+02	-1.323E+02
13	6.500E+02	1.311E-03	3.418E-05	-6.620E+01	-4.070E+01
14	7.000E+02	5.849E-04	1.525E-05	1.012E+02	1.287E+02
15	7.500E+02	7.512E-04	1.959E-05	-3.226E+00	2.622E+01
16	8.000E+02	6.266E-04	1.632E-05	-9.557E+01	-5.416E+01
17	8.500E+02	2.364E-04	6.168E-06	7.972E+01	1.121E+02
18	9.000E+02	6.256E-04	1.631E-05	-5.773E+01	-1.739E+01
19	9.500E+02	7.280E-04	1.893E-05	2.520E+01	6.949E+01
20	1.000E+03	8.354E-04	2.178E-05	4.472E+02	1.543E+02
21	1.050E+03	8.206E-04	2.140E-05	-5.302E+01	-1.175E+01
22	1.100E+03	5.665E-04	1.477E-05	4.382E+01	9.700E+01
23	1.150E+03	6.925E-04	1.806E-05	1.090E+02	1.543E+02
24	1.200E+03	8.077E-04	2.106E-05	-3.402E+01	-4.693E+01
25	1.250E+03	6.366E-04	1.672E-05	1.386E+02	1.877E+02
26	1.300E+03	4.263E-04	1.099E-05	1.386E+02	1.897E+02
27	1.350E+03	9.114E-04	2.377E-05	-4.803E+01	4.972E+00
28	1.400E+03	3.327E-04	8.677E-06	-1.266E+02	-7.153E+01
29	1.450E+03	1.890E-04	4.929E-06	-1.260E+01	3.943E+01
30	1.500E+03	4.996E-04	1.303E-05	3.471E+01	9.360E+01
31	1.550E+03	2.975E-04	7.759E-06	-2.897E+01	3.193E+01
32	1.600E+03	6.583E-04	1.717E-05	-4.096E+00	5.872E+01
33	1.650E+03	4.062E-04	1.059E-05	3.540E+01	1.002E+02
34	1.700E+03	4.303E-04	1.123E-05	-1.176E+02	-5.082E+01
35	1.750E+03	5.303E-04	1.384E-05	-5.749E+01	-1.122E+01
36	1.800E+03	3.749E-04	9.775E-06	1.013E+02	1.720E+02
37	1.850E+03	7.131E-04	1.859E-05	-3.194E+01	4.069E+01
38	1.900E+03	4.340E-04	1.132E-05	-9.042E+01	-1.589E+01
39	1.950E+03	4.905E-04	1.279E-05	-1.033E+02	-2.670E+01
40	2.000E+03	3.446E-04	8.986E-06	-5.646E+01	2.206E+01
41	2.050E+03	2.734E-04	7.130E-06	-1.224E+02	-4.187E+01
42	2.100E+03	3.139E-04	8.169E-06	-1.505E+01	6.739E+01
43	2.150E+03	1.061E-03	2.767E-05	1.705E+02	2.549E+02
44	2.200E+03	6.329E-04	1.649E-05	6.292E+01	1.492E+02
45	2.250E+03	6.824E-04	1.780E-05	1.237E+02	2.120E+02
46	2.300E+03	5.467E-04	1.426E-05	1.304E+02	2.207E+02
47	2.350E+03	1.287E-03	3.357E-05	7.183E+01	1.641E+01
48	2.400E+03	4.019E-04	1.048E-05	-1.559E+01	7.864E+01
49	2.450E+03	8.847E-04	2.306E-05	5.854E+01	1.547E+02
50	2.500E+03	9.246E-04	2.411E-05	-1.231E+02	-2.494E+01

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.20101E-02 PERCENT

(ง) ผลการจำลองวงจรกรองแบบแอลมีค่า THD_v = 0.012

รูปที่ 4.4 การจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสต่อกับวงจรกรองแบบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการจำลองประสิทธิภาพของวงจรกรอง

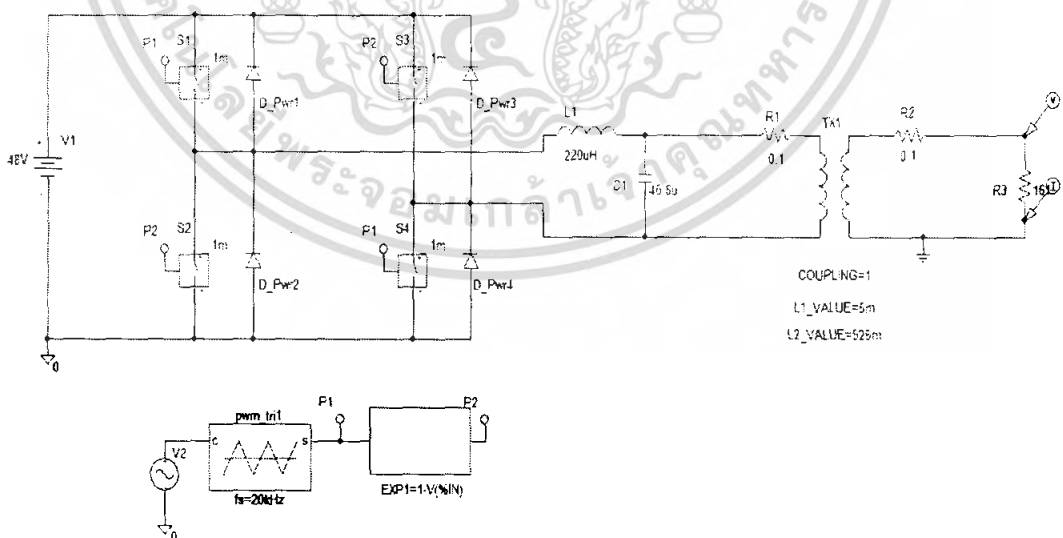
จากการจำลองที่ผ่านมา ในตอนแรกวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อกับโหลดความต้านทานจะพบว่า แรงดันและกระแสที่ได้ออกมาจะไม่ใช่สัญญาณไซน์ จำเป็นต้องมีวงจรกรองเข้ามาช่วย จากการออกแบบในบทที่ 3 ได้วงจรกรองมา 2 แบบคือ วงจรกรองแบบแอล และวงจรกรองแบบที

เมื่อพิจารณาที่แรงดันและกระแสหลังผ่านวงจรกรองทั้งวงจรกรองแบบแอลและแบบที จะได้สัญญาณเป็นไซน์ด้วยกันทั้งคู่ จึงพิจารณาที่การลดทอนสัญญาณรบกวนจากรูปที่ 4.3 (ค) วงกรองแบบแอลมีสเปกตรัมฮาร์มอนิกของแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 20 KHz เหลือ 0.242 V ส่วนวงจรกรองแบบทีจากรูปที่ 4.4 (ค) จะมีสเปกตรัมฮาร์มอนิกของแรงดันด้านออกเหลือ 0.115 V

ตามมาตรฐานของ IEEE 519 std จะกำหนดขีดจำกัดระดับความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน จึงพิจารณา THD_V ของวงจรกรองแบบแอลและแบบที จากรูปที่ 4.3 (ง) พบว่า THD_V ของวงจรกรองแบบแอลมีค่าเท่ากับ 0.011 ส่วนวงจรกรองแบบทีจากรูปที่ 4.4 (ง) มีค่า THD_V เท่ากับ 0.012

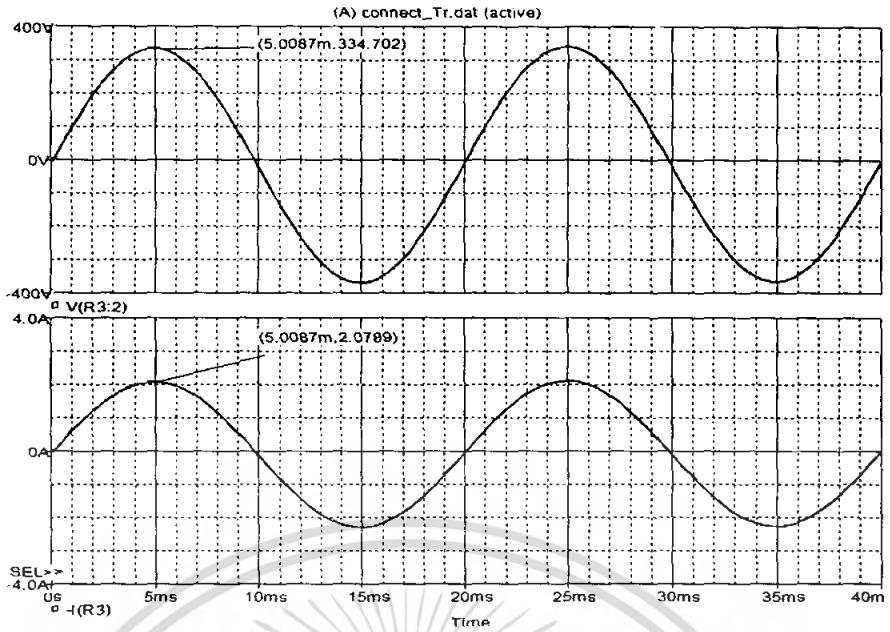
ดังนั้นจากการจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรกรองแบบแอลและแบบที จึงเลือกใช้วงจรกรองแบบแอลเพราะมีระดับความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่น้อยกว่าวงจรกรองแบบที

4.1.3 การจำลองการทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์ร่วมกับวงจรกรอง ต่อกับหม้อแปลง



(ก) วงจรอินเวอร์เตอร์ร่วมกับวงจรกรองแบบแอลต่อกับหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ผลการจำลองแรงดัน (บน) และ กระแส (ล่าง) หลังผ่านหม้อแปลง

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.529E+02	1.000E+00	1.012E+00	0.000E+00
2	1.000E+02	7.149E-01	2.026E-03	-1.785E+02	-1.905E+02
3	1.500E+02	4.772E-01	1.362E-03	-1.792E+02	-1.822E+02
4	2.000E+02	3.598E-01	1.017E-03	-1.783E+02	-1.824E+02
5	2.500E+02	2.694E-01	7.634E-04	-1.791E+02	-1.942E+02
6	3.000E+02	2.361E-01	6.651E-04	-1.787E+02	-1.777E+02
7	3.500E+02	2.186E-01	6.195E-04	-1.795E+02	-1.778E+02
8	4.000E+02	1.815E-01	5.144E-04	-1.800E+02	-1.883E+02
9	4.500E+02	1.597E-01	4.527E-04	-1.780E+02	-1.688E+02
10	5.000E+02	1.405E-01	3.982E-04	-1.776E+02	-1.877E+02
11	5.500E+02	1.246E-01	3.531E-04	-1.776E+02	-1.987E+02
12	6.000E+02	1.214E-01	3.440E-04	-1.797E+02	-1.675E+02
13	6.500E+02	1.092E-01	3.096E-04	-1.752E+02	-1.988E+02
14	7.000E+02	1.045E-01	2.945E-04	-1.769E+02	-1.826E+02
15	7.500E+02	8.954E-02	2.537E-04	-1.794E+02	-1.945E+02
16	8.000E+02	8.898E-02	2.521E-04	-1.743E+02	-1.910E+02
17	8.500E+02	7.997E-02	2.266E-04	-1.796E+02	-1.968E+02
18	9.000E+02	7.524E-02	2.132E-04	-1.760E+02	-1.942E+02
19	9.500E+02	6.536E-02	1.852E-04	-1.798E+02	-1.990E+02
20	1.000E+03	7.848E-02	2.274E-04	-1.757E+02	-1.854E+02
21	1.050E+03	5.797E-02	1.648E-04	-1.766E+02	-1.972E+02
22	1.100E+03	6.003E-02	1.701E-04	-1.771E+02	-1.642E+02
23	1.150E+03	6.118E-02	1.734E-04	-1.745E+02	-1.512E+02
24	1.200E+03	6.001E-02	1.709E-04	-1.727E+02	-1.970E+02
25	1.250E+03	5.716E-02	1.620E-04	-1.793E+02	-1.840E+02
26	1.300E+03	5.631E-02	1.596E-04	-1.798E+02	-1.515E+02
27	1.350E+03	5.093E-02	1.440E-04	-1.725E+02	-1.992E+02
28	1.400E+03	5.045E-02	1.430E-04	-1.785E+02	-1.514E+02
29	1.450E+03	4.774E-02	1.353E-04	-1.793E+02	-1.493E+02
30	1.500E+03	4.246E-02	1.203E-04	-1.795E+02	-2.999E+02
31	1.550E+03	4.393E-02	1.247E-04	-1.799E+02	-2.072E+02
32	1.600E+03	4.077E-02	1.155E-04	-1.790E+02	-2.954E+02
33	1.650E+03	3.968E-02	1.124E-04	-1.799E+02	-2.132E+02
34	1.700E+03	4.341E-02	1.230E-04	-1.781E+02	-2.125E+02
35	1.750E+03	4.202E-02	1.191E-04	-1.761E+02	-2.115E+02
36	1.800E+03	3.891E-02	1.083E-04	-1.757E+02	-1.993E+02
37	1.850E+03	3.584E-02	1.016E-04	-1.793E+02	-2.113E+02
38	1.900E+03	3.915E-02	1.099E-04	-1.773E+02	-2.153E+02
39	1.950E+03	3.843E-02	1.089E-04	-1.750E+02	-2.144E+02
40	2.000E+03	3.682E-02	1.015E-04	-1.751E+02	-2.157E+02
41	2.050E+03	3.726E-02	1.056E-04	-1.794E+02	-2.209E+02
42	2.100E+03	3.331E-02	9.440E-05	-1.767E+02	-2.192E+02
43	2.150E+03	3.339E-02	9.471E-05	-1.721E+02	-1.285E+02
44	2.200E+03	2.794E-02	7.917E-05	-1.797E+02	-1.932E+02
45	2.250E+03	3.055E-02	8.666E-05	-1.744E+02	-1.285E+02
46	2.300E+03	3.041E-02	8.613E-05	-1.743E+02	-1.283E+02
47	2.350E+03	2.542E-02	7.204E-05	-1.749E+02	-1.273E+02
48	2.400E+03	2.891E-02	8.193E-05	-1.769E+02	-2.243E+02
49	2.450E+03	2.523E-02	7.156E-05	-1.768E+02	-2.224E+02
50	2.500E+03	3.147E-02	8.917E-05	-1.775E+02	-2.281E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 3.192999E-01 PERCENT

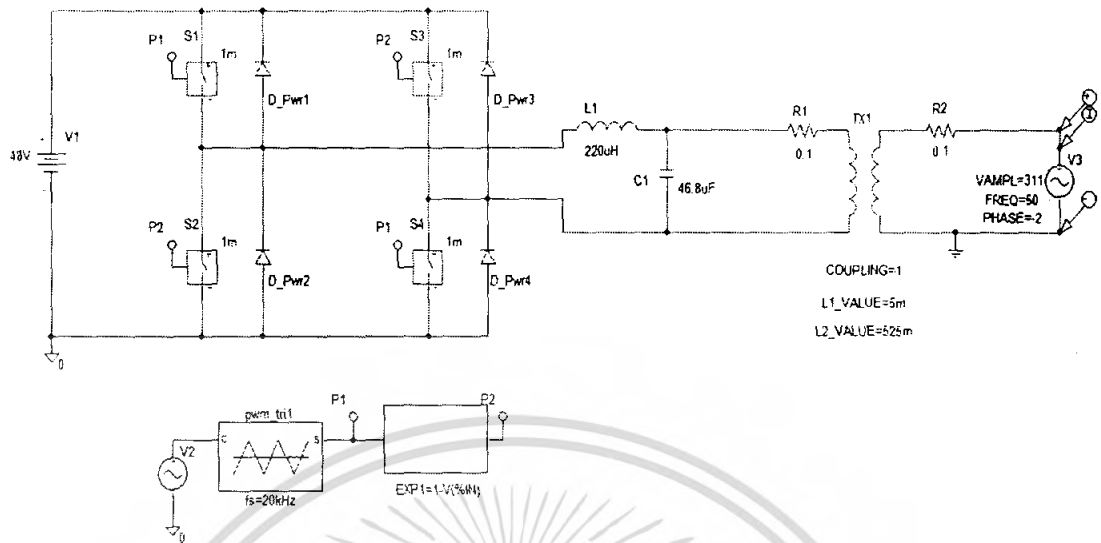
(ค) ผลการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ร่วมกับวงจรกรองแบบแอล

ต่อกับหม้อแปลงมีค่า THD_v = 0.32

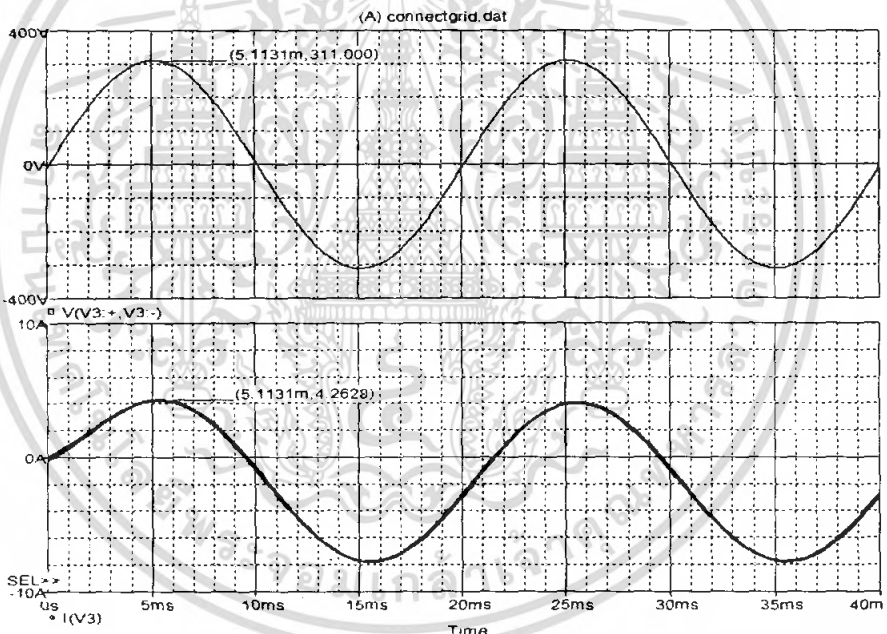
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์ร่วมวงจรกรองต่อกับหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การจำลองระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าหนึ่งเฟส



(ก) วงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าหนึ่งเฟส



(ข) ผลการจำลองแรงดัน (บน) และ กระแส (ล่าง) เมื่อเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า

รูปที่ 4.6 ผลการจำลองระบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับการไฟฟ้าหนึ่งเฟส

วิเคราะห์ผลการจำลองเมื่อเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าหนึ่งเฟส แรงดัน 220 V

จะพบว่ากระแสที่จำลองได้จะลอยต่ำกว่าระดับอ้างอิง ซึ่งสาเหตุเนื่องมาจากปัญหาทางเทคนิคของการจำลอง ดังนั้นในส่วนของการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบการไฟฟ้าหนึ่งเฟสนั้น จะศึกษาผลที่ได้จากการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ระบบที่ใช้ในการเชื่อมโยงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับระบบไฟฟ้า คือ อินเวอร์เตอร์โดยใช้สัญญาณควบคุมแบบเอสพีดับเบิลยูเอ็ม ที่ได้ออกแบบไว้เป็นการเชื่อมโยง ชุดแบตเตอรี่ 48 โวลต์ 12 แอมป์-ชั่วโมง เข้ากับระบบการไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ เพื่อทำการช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดร่วมกับระบบการไฟฟ้า ซึ่งในการทดลองจะแบ่ง การทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ

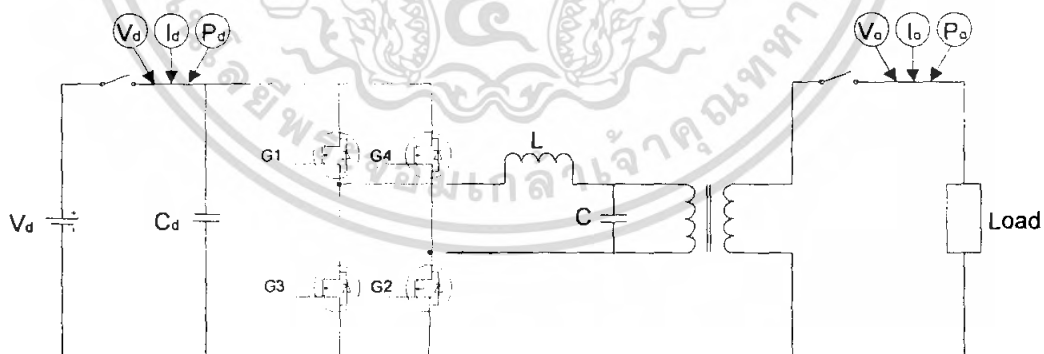
1. การทดลองหาประสิทธิภาพของระบบรวมทั้งจ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัดต่างๆ
2. การทดลองทำการซิงโครไนซ์ร่วมกับระบบการไฟฟ้าขณะไม่มีภาระโหลด
3. การทดลองจ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัดต่างๆ ร่วมกับระบบการไฟฟ้า

ซึ่งในการทดลองใช้เครื่องมือดังนี้

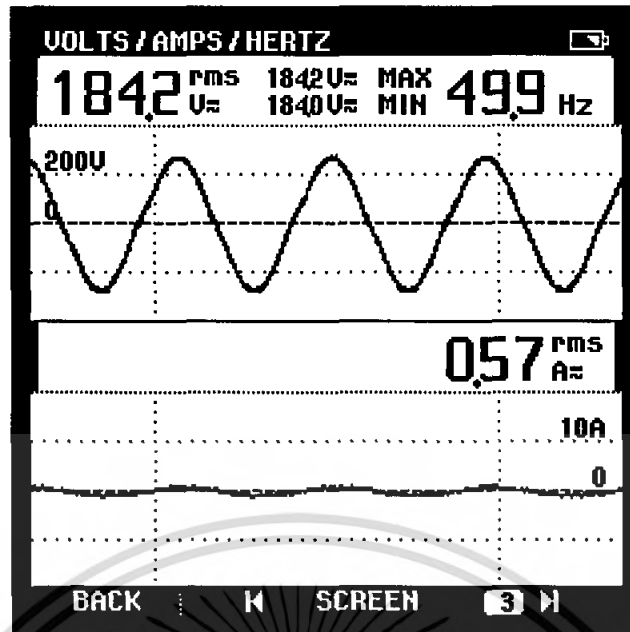
1. ดิจิตอลออสซิลโลสโคปรุ่น DL 8 bit 200 Ms/s 150 MHz YOGOGAWA ใช้ในการ วัดรูปคลื่นสัญญาณการทดลอง
2. FLUKE 39 POWER ใช้ในการบันทึกค่า กระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้าและค่าตัว ประกอบกำลังในส่วนของการไฟฟ้ากระแสสลับและรูปคลื่นที่ได้จากอินเวอร์เตอร์
3. MULTIMETER ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าและกระแสไฟด้านตรง

5.1 การทดลองหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดหลอดไฟ

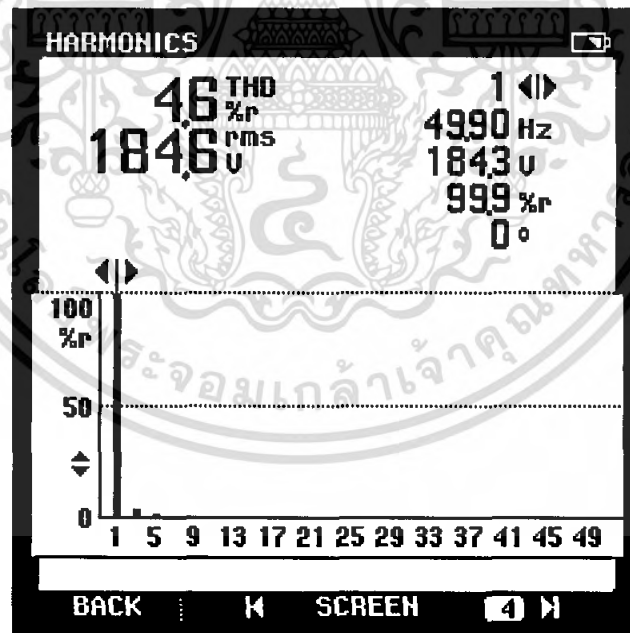
5.1.1 การทดลองหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัด 60, 100, 160, 200, 260 และ 300 วัตต์ ดัชนีโมดูลเลต(m_a) มีค่าคงที่ซึ่งมีวงจรการทดลองดังรูป 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

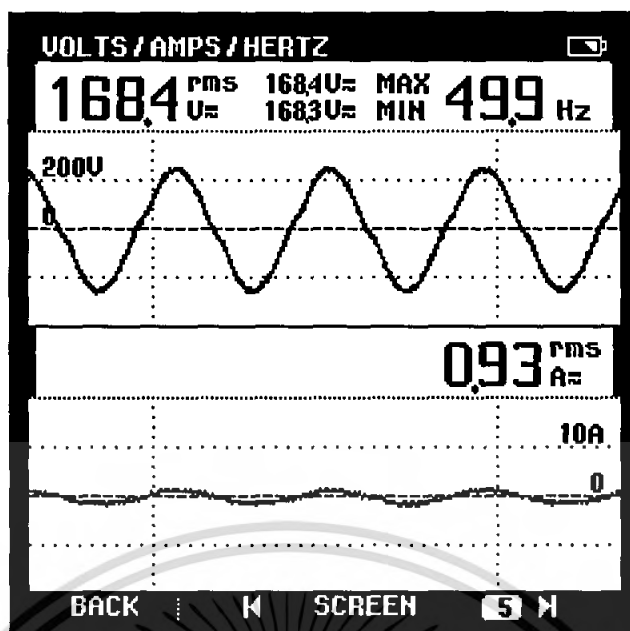


รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 100 วัตต์

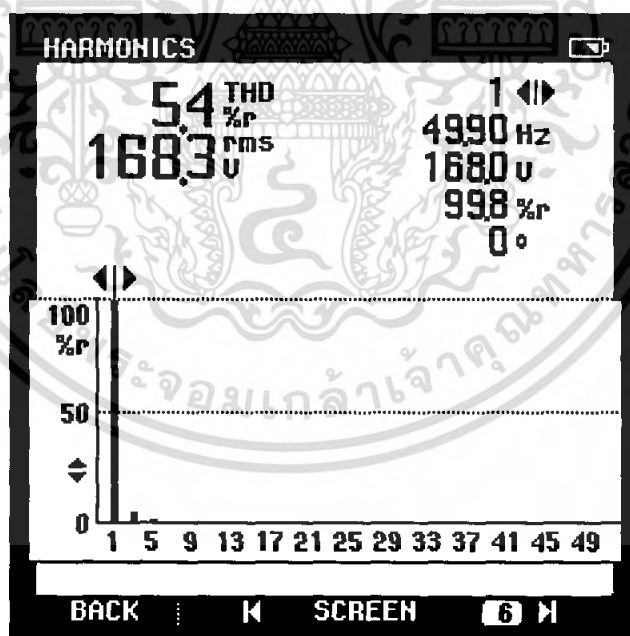


รูปที่ 5.3 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์
เมื่อจ่ายโหลด 100 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

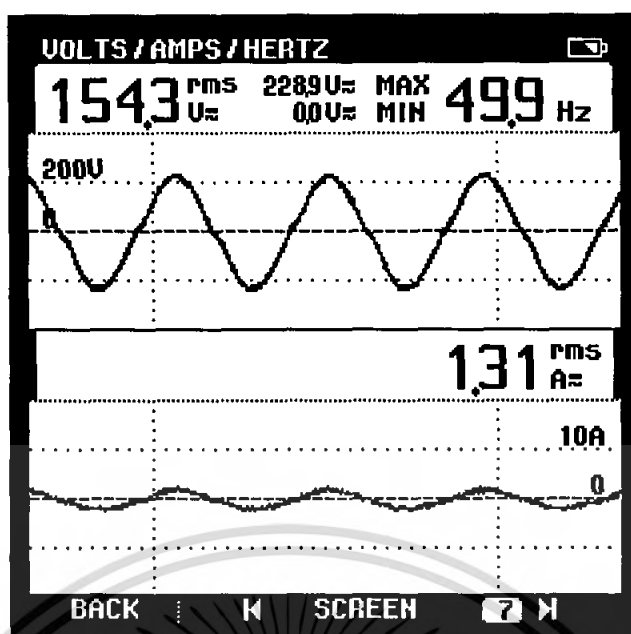


รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสแอมป์ฟุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์

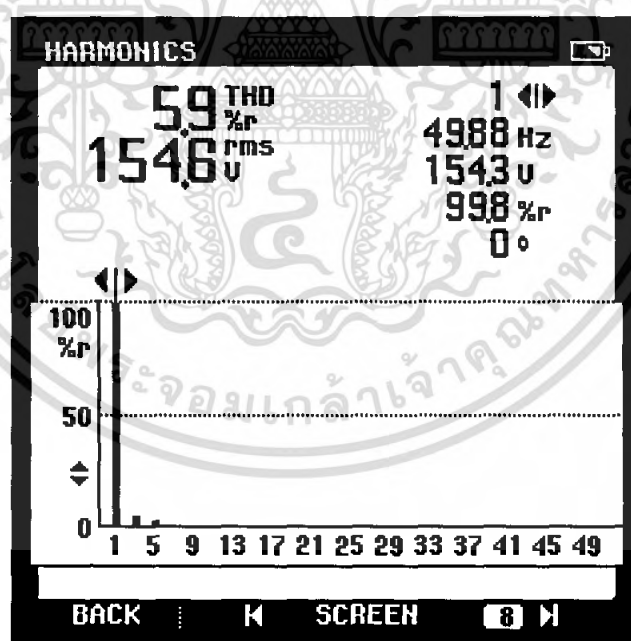


รูปที่ 5.5 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 300 วัตต์



รูปที่ 5.7 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์
เมื่อจ่ายโหลด 300 วัตต์

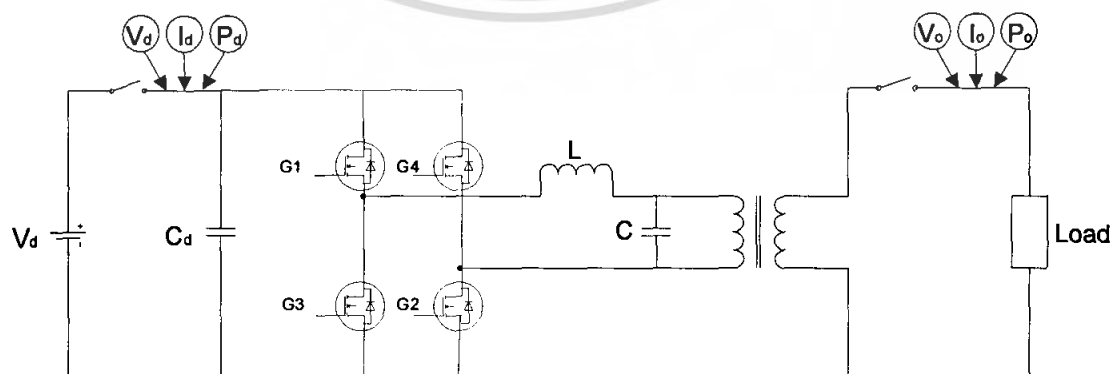
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองหาประสิทธิภาพของระบบรวมที่จ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัด
ต่างๆ

โหลด	No-load	60 วัตต์	100 วัตต์	160 วัตต์	200 วัตต์	260 วัตต์	300 วัตต์
$V_d(V)$	52.2	51.1	50.8	50.5	50.5	50.3	50.2
$I_d(A)$	-	1.5	2.2	3.2	3.7	4.6	5.2
$P_d(W)$	-	76.65	111.76	161.6	186.85	231	261
$V_o(V)$	228.4	195	185.2	171.2	165.8	159.8	154.4
$I_o(A)$	-	0.41	0.55	0.79	0.93	1.15	1.31
$P_o(W)$	-	70	100	130	150	180	200
THD _v (%)	2.9	3.8	4.6	5.1	5.5	5.8	5.9
THD _i (%)	-	14.5	9.5	7.5	6.7	7.0	7.0
PF	-	0.91	0.96	0.99	0.99	0.99	1.0
η (%)	-	91.3	89.48	80.45	80.28	77.8	76.62

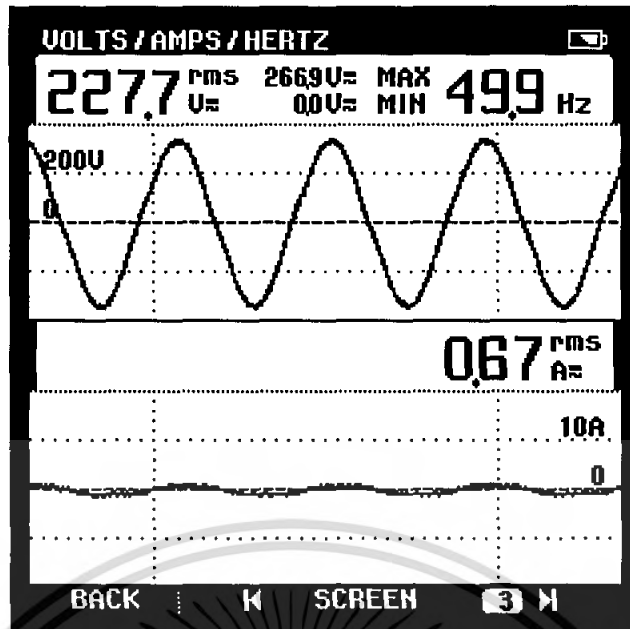
จากการทดลองหาประสิทธิภาพของระบบรวม ที่พิกัดโหลดต่างๆ กำหนดให้ค่าอัตรา
มอดูเลตมีค่าคงที่การทดสอบสรุปได้ว่า จะพบว่าแรงดันต้านเอาต์พุตและประสิทธิภาพของระบบ
รวม มีค่าลดลงเมื่อพิกัดโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของระบบจะมี
ค่ามากขึ้น เราจึงทำการทดลองรักษาระดับแรงดัน โดยการปรับค่าอัตรามอดูเลตในการทดลอง
ต่อไป

5.1.2 การทดลองหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัด 60,
100, 160, 200, 260 และ 300 วัตต์ ซึ่งมีการปรับค่าดัชนีมอดูเลตเพื่อรักษาระดับแรงดัน
เอาต์พุตซึ่งมีวงจรการทดลองดังรูป 5.8

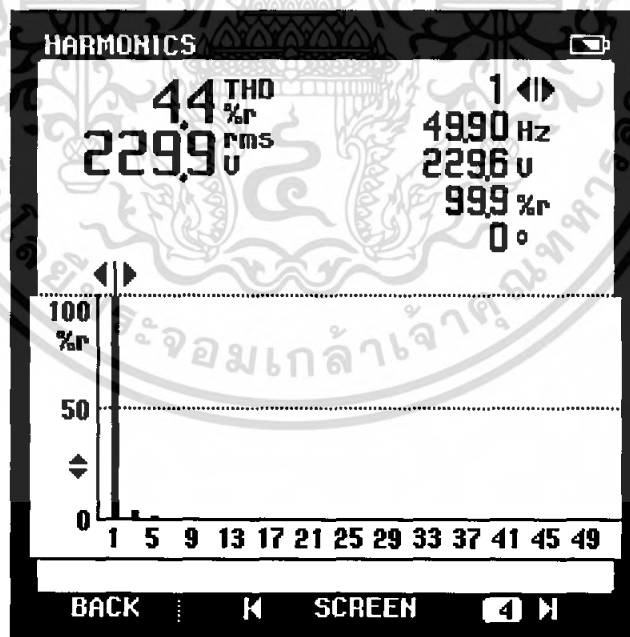


รูปที่ 5.8 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

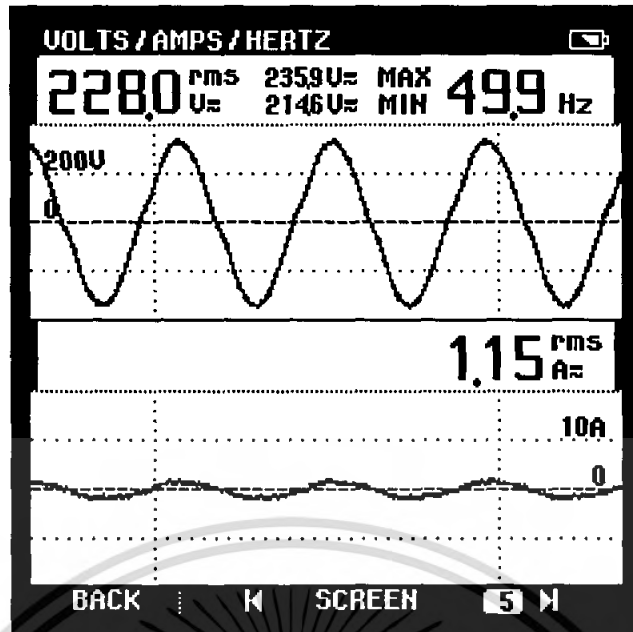


รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 100 วัตต์

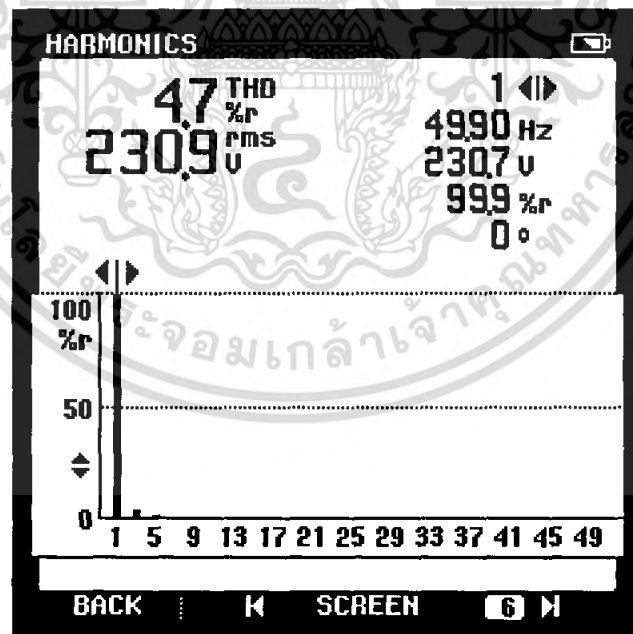


รูปที่ 5.10 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 100 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

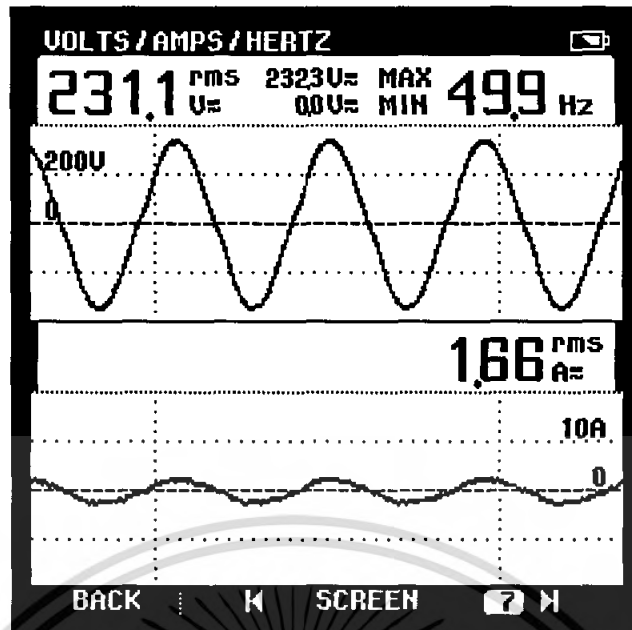


รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์

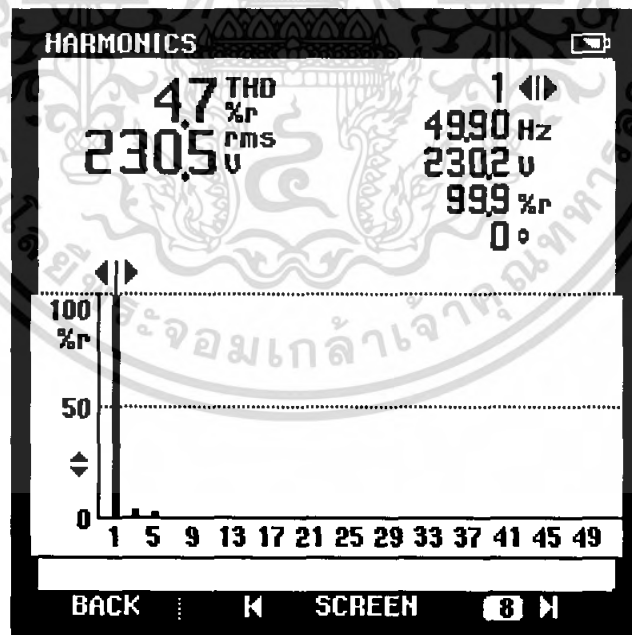


รูปที่ 5.12 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 200 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 300 วัตต์



รูปที่ 5.14 แสดงค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันของอินเวอร์เตอร์เมื่อจ่ายโหลด 300 วัตต์

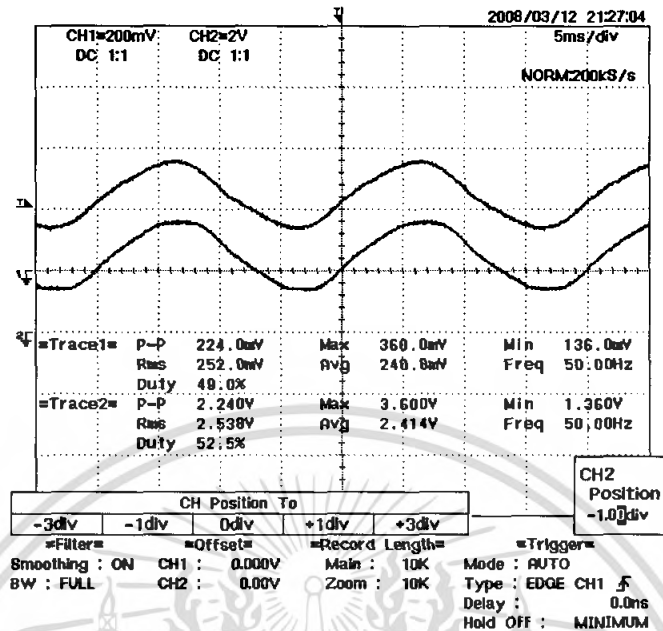
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองหาประสิทธิภาพของระบบรวมที่จ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัด
ต่างๆ โดยมีการปรับค่าดัชนีมอดูเลตเพื่อรักษาระดับแรงดัน

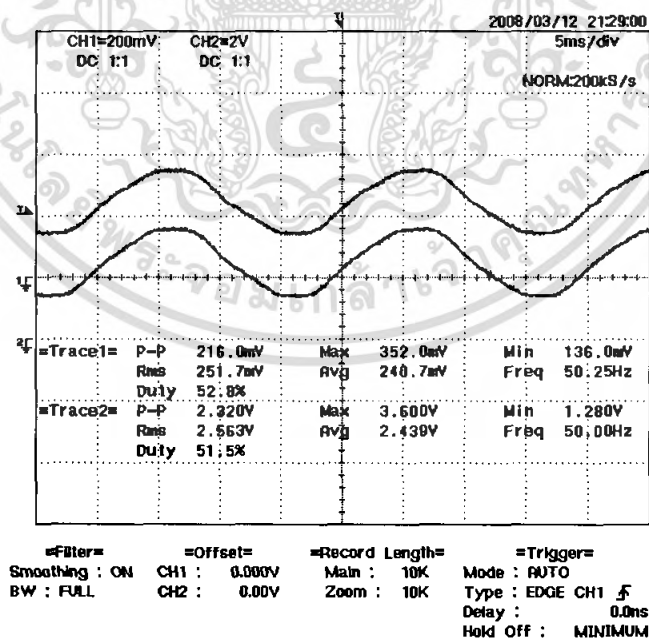
โหลด	No-load	60 วัตต์	100 วัตต์	160 วัตต์	200 วัตต์	260 วัตต์	300 วัตต์
m_a	0.65	0.74	0.78	0.82	0.85	0.90	0.92
$V_d(V)$	51.7	51	50.6	50.2	49.9	49.5	49.3
$I_d(A)$	-	1.8	3.0	4.6	5.8	7.8	9.3
$P_d(W)$	-	91.8	151.8	230.92	289.42	386.1	458.49
$V_o(V)$	229.4	230	227.7	228.8	228.0	231.4	231.1
$I_o(A)$	-	0.5	0.68	0.98	1.15	1.46	1.66
$P_o(W)$	-	100	140	210	260	330	380
THD _v (%)	2.8	4.1	4.4	4.7	4.7	4.7	4.7
THD _i (%)	-	14.1	12.0	9.0	8.1	7.6	7.3
PF	-	0.87	0.94	0.97	0.98	0.99	0.99
η (%)	-	94.7	92.23	89.03	88.04	84.61	82.05

จากการทดลองหาประสิทธิภาพของระบบรวม ที่พิกัดโหลดต่างๆเมื่อให้ค่าอัตรามอดูเลตมีการปรับค่าได้เพื่อรักษาระดับแรงดันจากการทดลองสรุปได้ว่า แรงดันด้านเอาต์พุตสามารถรักษาระดับแรงดันได้และประสิทธิภาพของระบบรวมมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองค่าอัตรามอดูเลตแบบคงที่

5.2 การทดลองทำการซิงโครไนซ์ร่วมกับระบบการไฟฟ้าขณะไม่มีภาระโหลด



รูปที่ 5.15 สัญญาณแรงดันอินเวอร์เตอร์(บน)กับสัญญาณแรงดันการไฟฟ้า(ล่าง) ก่อนทำการซิงโครไนซ์

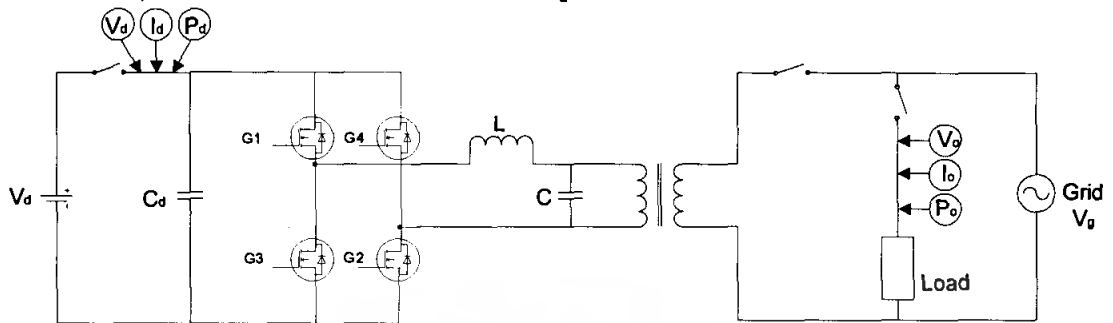


รูปที่ 5.16 สัญญาณแรงดันอินเวอร์เตอร์(บน)กับสัญญาณแรงดันการไฟฟ้า(ล่าง) หลังทำการซิงโครไนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดลองจ่ายโหลดที่พิกัดต่าง ๆ ร่วมกับระบบการไฟฟ้า

การทดลองจ่ายโหลดหลอดไฟที่พิกัด 100 และ 200 วัตต์ ร่วมกับระบบการไฟฟ้า แสดงเอาต์พุตของโหลดซึ่งมีวงจรการทดลองดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลองจ่ายโหลดหลอดไฟร่วมกับระบบการไฟฟ้า

ตารางที่ 5.3 แสดงเอาต์พุตของโหลด

โหลด	100 วัตต์	200 วัตต์
$V_L(V)$	224.6	225.5
$I_L(A)$	0.43	0.85
$P_L(W)$	90	190
$Q_L(VAR)$	10	10
$S_L(VA)$	90	190
$THD_v(\%)$	2.0	2.1
$THD_i(\%)$	4.5	4.3

สรุปผลการทดลองจ่ายโหลดที่พิกัดต่าง ๆ ร่วมกับระบบการไฟฟ้าสามารถทำการเชื่อมต่อได้จริงและสามารถร่วมกันจ่ายโหลด ที่พิกัด 100, 200 วัตต์โดยค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดันและกระแสมีค่าต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ [7] ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ในการทำการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

บทที่ 6

บทวิจารณ์และสรุป

จากวัตถุประสงค์และทฤษฎีเบื้องต้น ทำการออกแบบระบบที่ใช้ในการเชื่อมโยงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ 48 โวลต์ เข้ากับระบบการไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ผลการทดลองและผลการดำเนินงานของโครงการทั้งหมดสรุปได้ว่า ในส่วนของโปรแกรมสามารถเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณ SPWM เพื่อใช้ในการขับเกตของวงจรถืออินเวอร์เตอร์ 1 เฟสได้จริง และสามารถขับขาเกต IGBT ทั้ง 4 ตัวได้ โดยมี Dead-time 400 nS ได้คลื่นรูปไซน์ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อกรองฮาร์โมนิก จากนั้นนำไปผ่านหม้อแปลงเพื่อเพิ่มแรงดันให้ได้ 220 โวลต์ เพื่อให้มีแรงดันเท่ากับการไฟฟ้า ทำการตรวจสอบเฟสของอินเวอร์เตอร์และเฟสของระบบการไฟฟ้า เมื่อเฟสตรงกันก็ทำการเชื่อมโยงเข้ากับระบบการไฟฟ้า โดยสามารถจ่ายโหลดร่วมกับระบบการไฟฟ้าได้

สิ่งสำคัญในการสร้างอินเวอร์เตอร์ที่ต่อกับระบบการไฟฟ้า คือได้รับความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และความรู้ทางด้านไฟฟ้ากำลัง ผู้ที่จะทำโครงการนี้ควรจะมีพื้นฐานความรู้ทางด้านนี้มาบ้างเพื่อความเข้าใจและความรวดเร็วในการพัฒนาโครงการนี้อย่างมีประสิทธิภาพ และควรศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมต่อระบบกริดว่ามีเงื่อนไขอย่างไรบ้าง เช่น แรงดันไฟฟ้า ความถี่และมุมเฟสของแรงดันจะต้องมีค่าเท่ากัน

6.1 ข้อดีของอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบได้

- 6.1.1 สามารถรักษาระดับแรงดันได้โดยการปรับค่าอัตรามอดูเลตอัตโนมัติ
- 6.1.2 สามารถเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้าได้
- 6.1.3 สามารถช่วยจ่ายโหลดร่วมกับระบบการไฟฟ้าได้

6.2 ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบได้

- 6.2.1 ประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้ายังมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม
- 6.2.2 พิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์มีค่าน้อย
- 6.2.3 มีการสูญเสียจากการอุปกรณส์วิตชิ่ง

6.3 ปัญหาในระหว่างการทำโครงการ

6.3.1 ด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากขาดประสบการณ์ในด้านการเขียนโปรแกรมมาก่อนจึงทำให้เกิดปัญหาในช่วงแรก แต่ก็สามารถทำการแก้ไขสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6.3.2 ด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากขาดประสบการณ์ในด้านการต่อวงจรและการเลือกพิกัดค่าต่างๆทำให้เกิดปัญหาในช่วงแรก แต่ก็สามารถทำการแก้ไขสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6.4 สิ่งที่ได้รับการพัฒนาต่อไปสำหรับโครงการนี้

6.4.1 ควรมีการเพิ่มอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อความปลอดภัยของวงจร

6.4.2 ควรมีการเพิ่มพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ให้สามารถจ่ายโหลดได้สูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

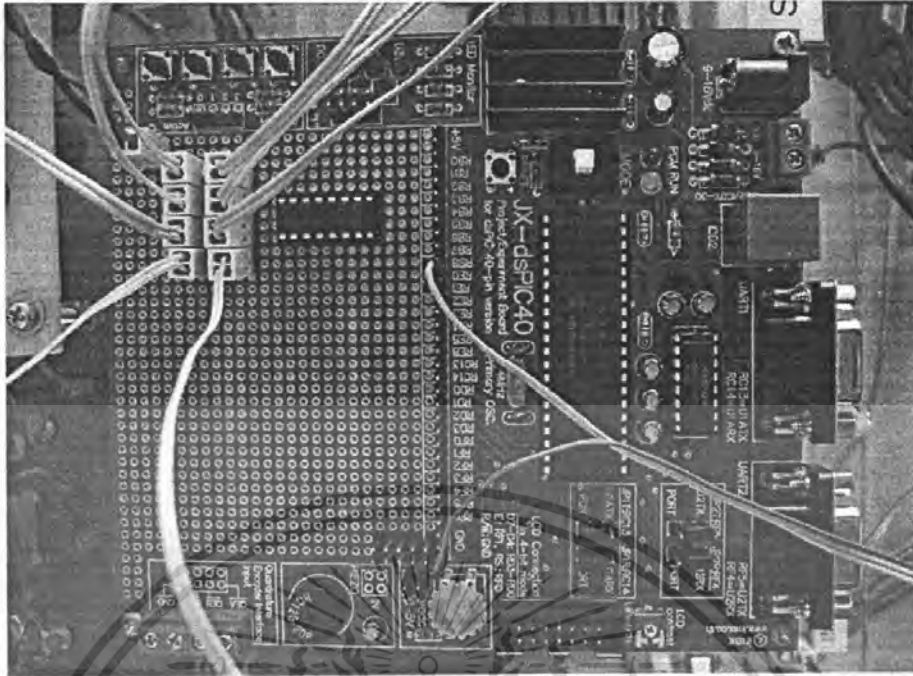
เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 4. กทม., โรงพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินติ้ง, 2549
- [2] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, **พื้นฐานระบบไฟฟ้า เล่ม 1**, วศ.สจล. 135, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] Ali Feliachi, "Unified Power Flow Controllers", CRC Press LLC, 2002.
- [4] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins," Power Electronics converters, Applications, and Design", John Wiley & Sons, 2 nd edition, 1995.
- [5] ประชา คำภักดี, "การวิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้วยวงจรกรองด้านออกของอินเวอร์เตอร์สำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส", **วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549
- [6] ศิริวัฒน์ ปอกเพชร และคณะ, "อินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน", **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [7] IEEE Std 519 -1992 IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems

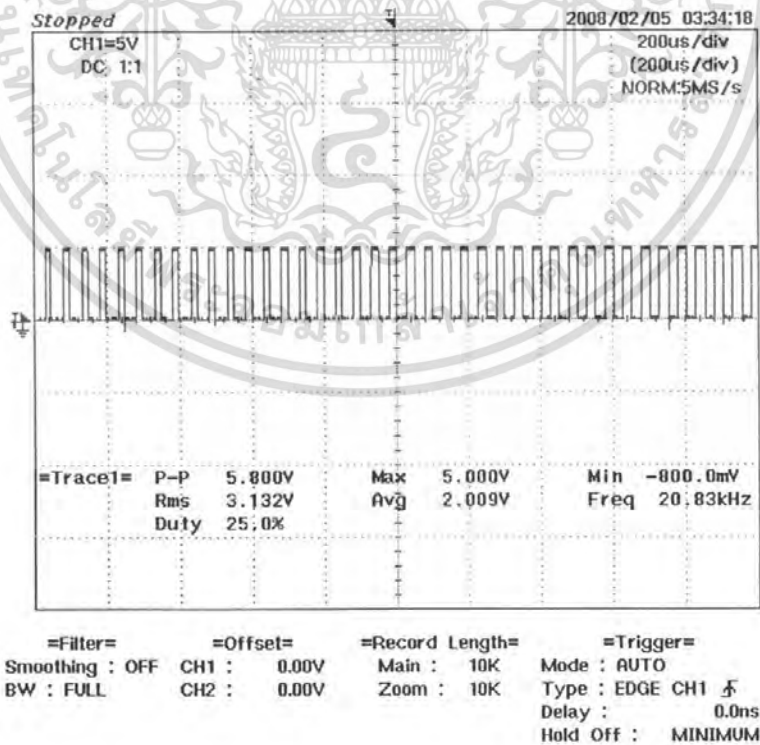
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

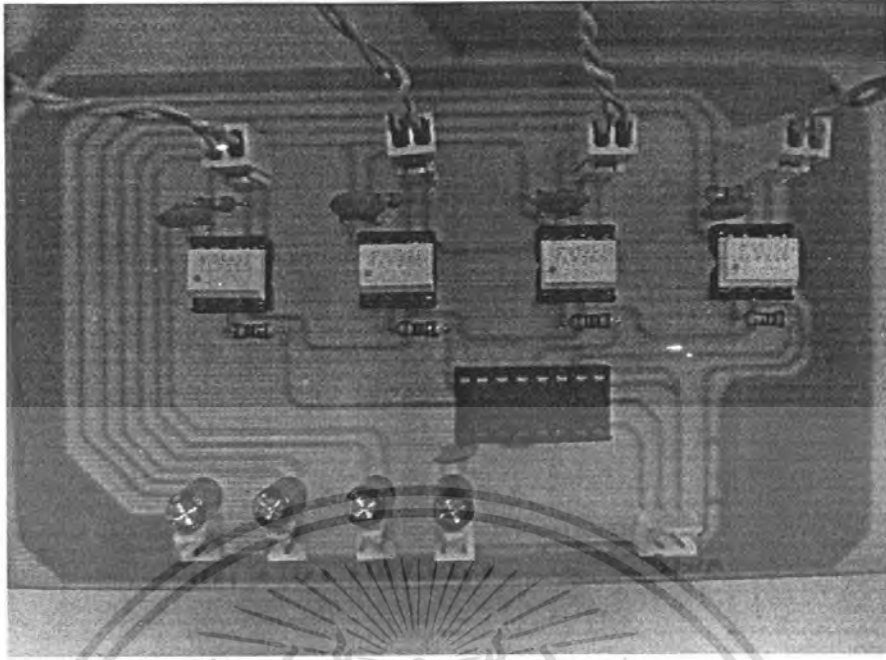


รูปที่ ก-1 วงจรควบคุมรวมของระบบอินเวอร์เตอร์ต่อระบบการไฟฟ้า

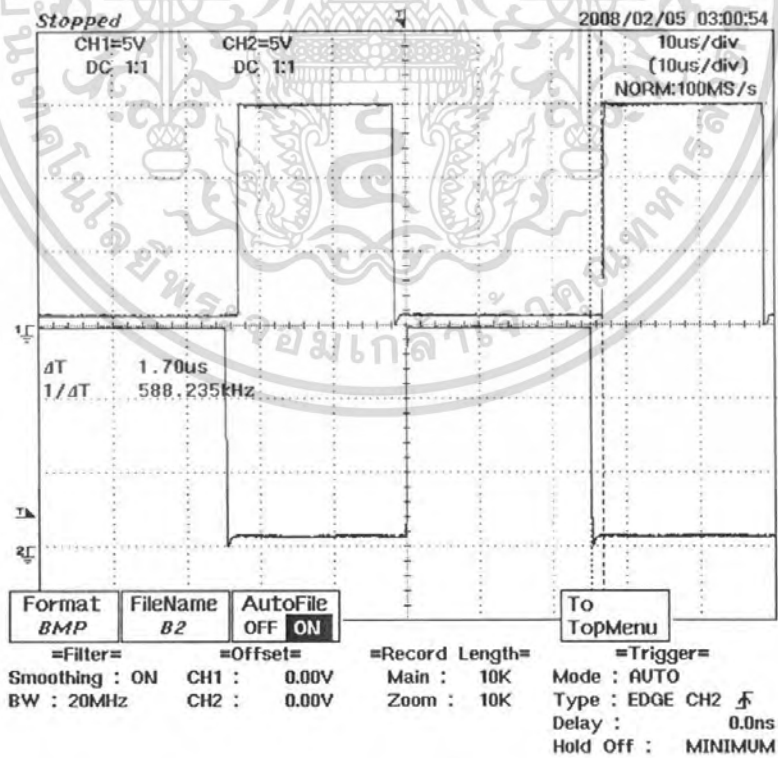


รูปที่ ก-2 สัญญาณแอสซิงโครนัสที่กำเนิดสัญญาณจาก dsPIC30F4011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

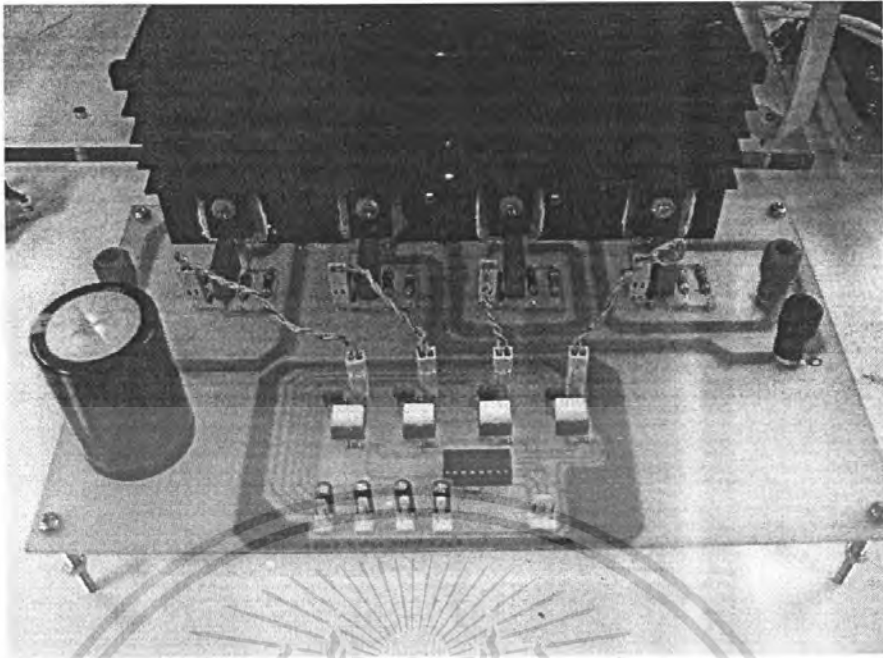


รูปที่ ก-3 วงจรขับนำสวิตช์

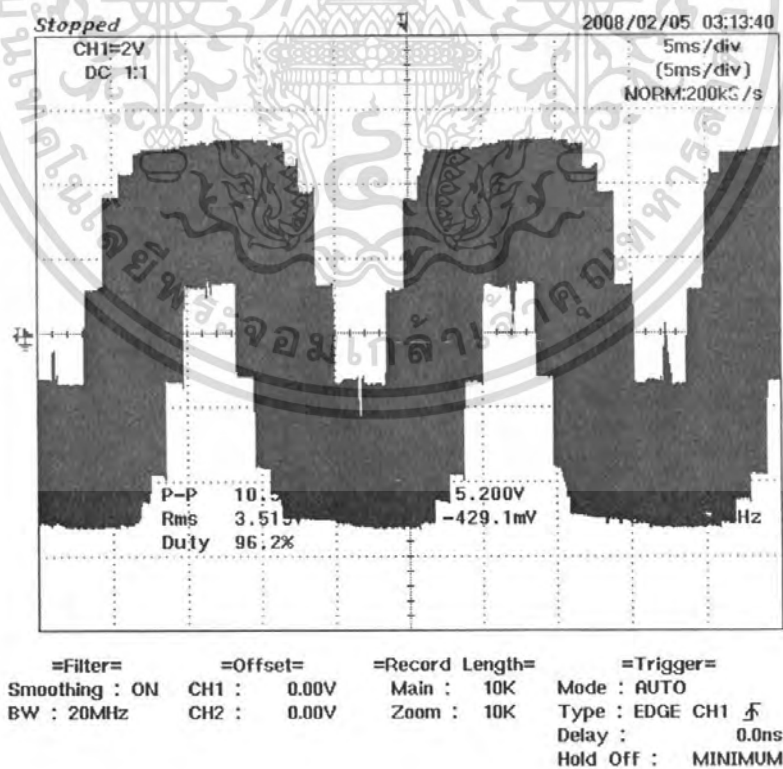


รูปที่ ก-4 สัญญาณวงจรถับนำสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

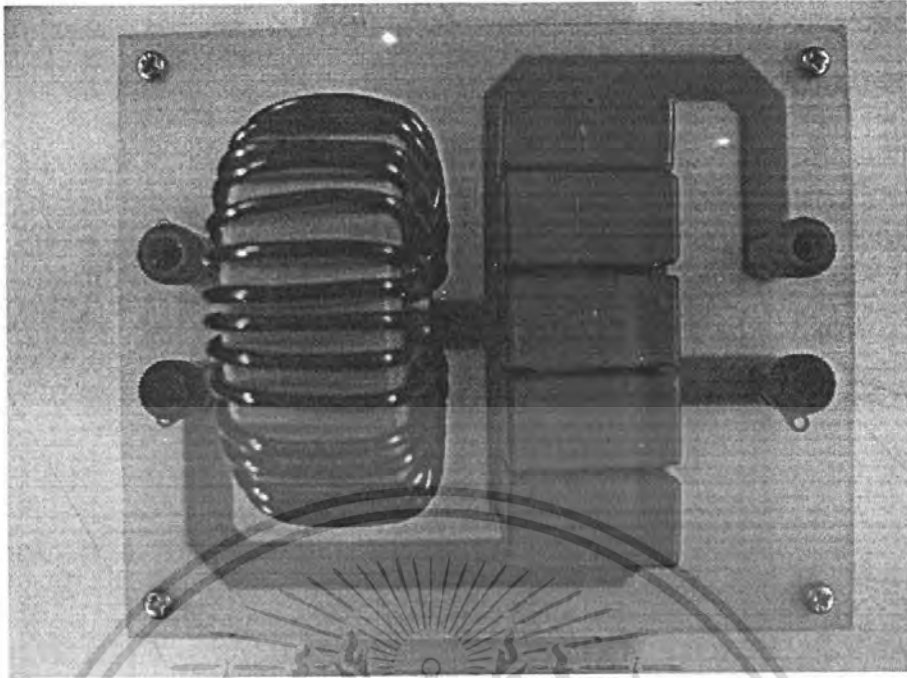


รูปที่ ก-5 วงจรอินเวอร์เตอร์

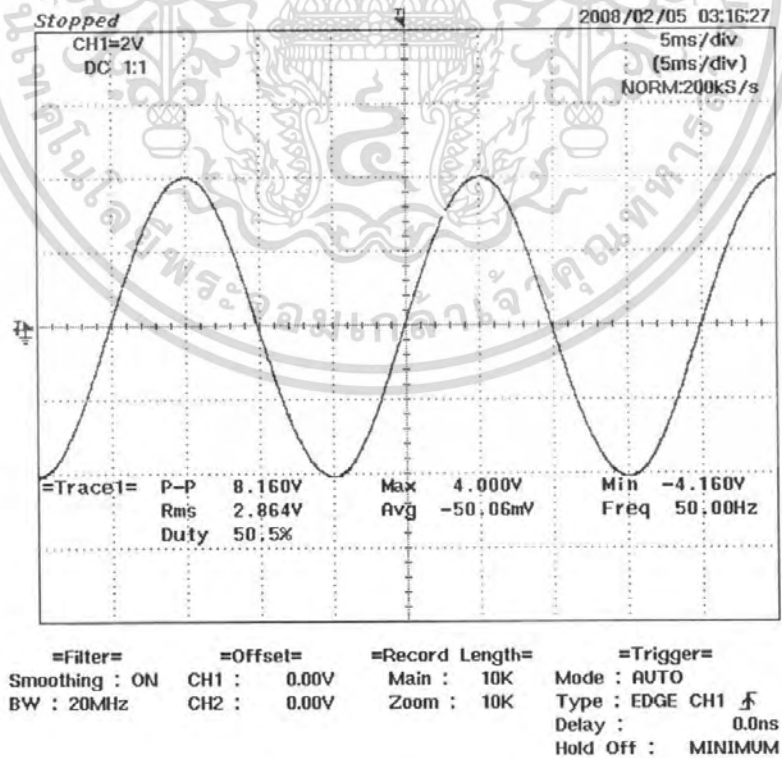


รูปที่ ก-6 สัญญาณที่ออกจากอินเวอร์เตอร์โดยไม่ผ่านฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

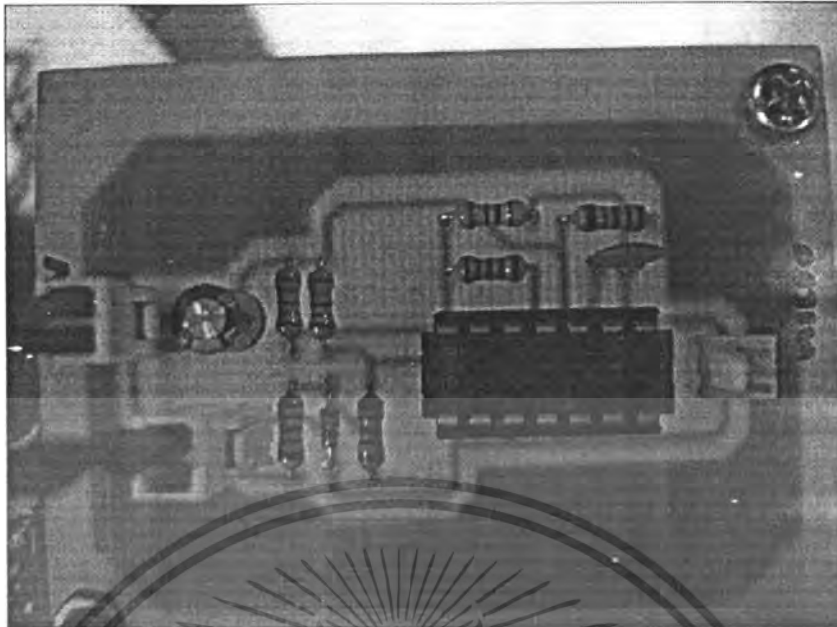


รูปที่ ก-7 วงจรฟิลเตอร์

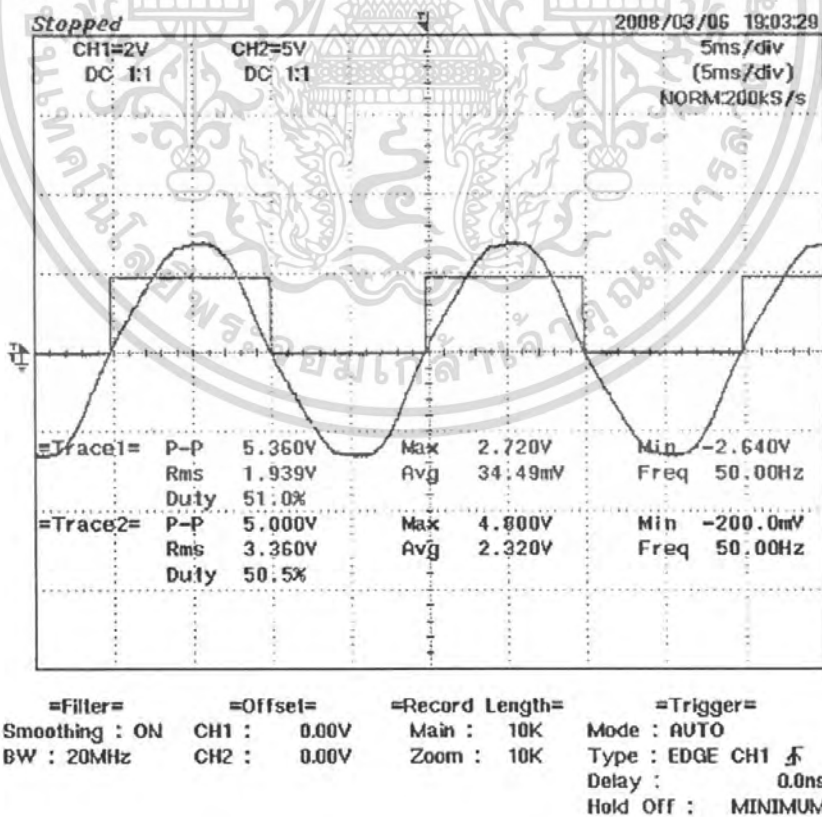


รูปที่ ก-8 สัญญาณที่ออกจากอินเวอร์เตอร์โดยผ่านฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

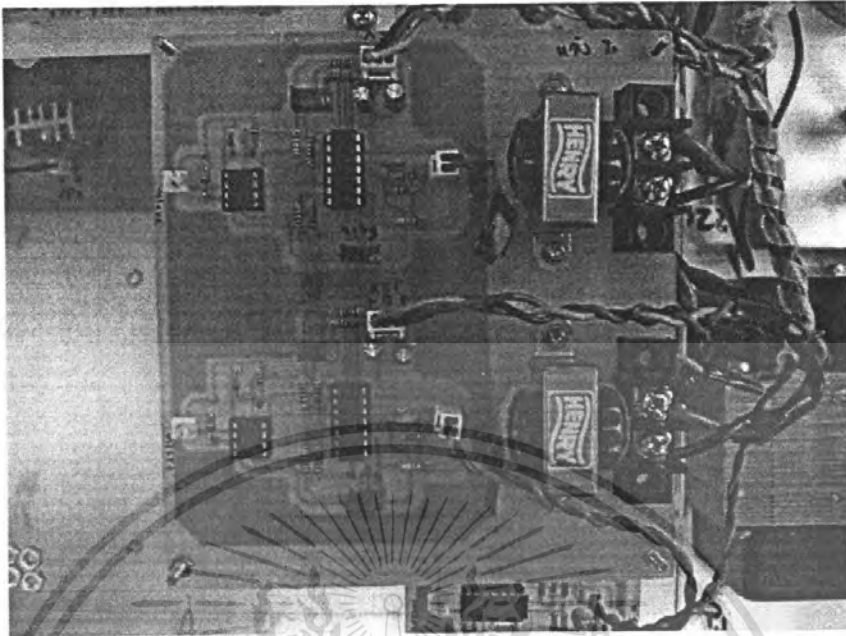


รูปที่ ก-9 วงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์แรงดันระบบการไฟฟ้า

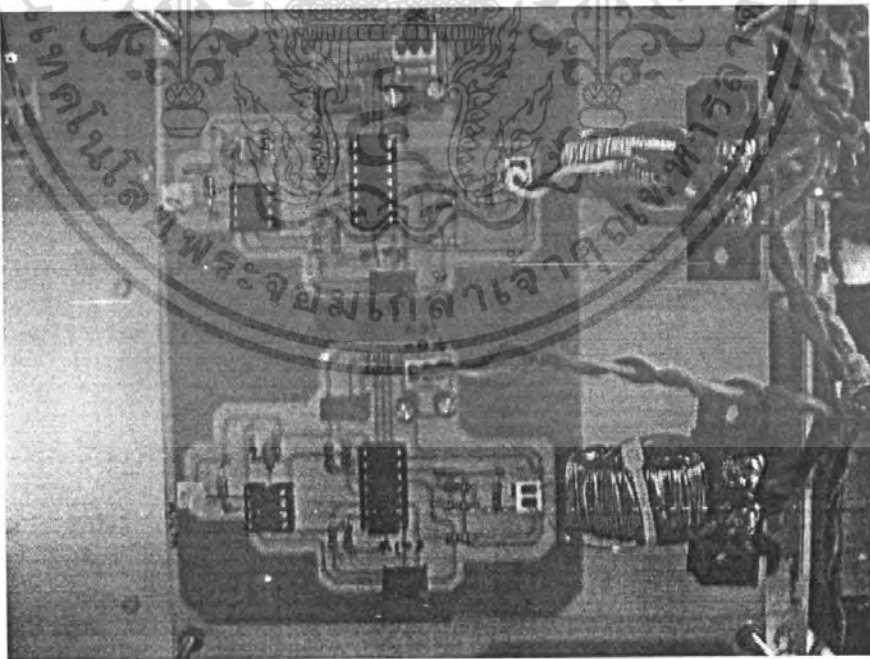


รูปที่ ก-10 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดจุดตัดศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

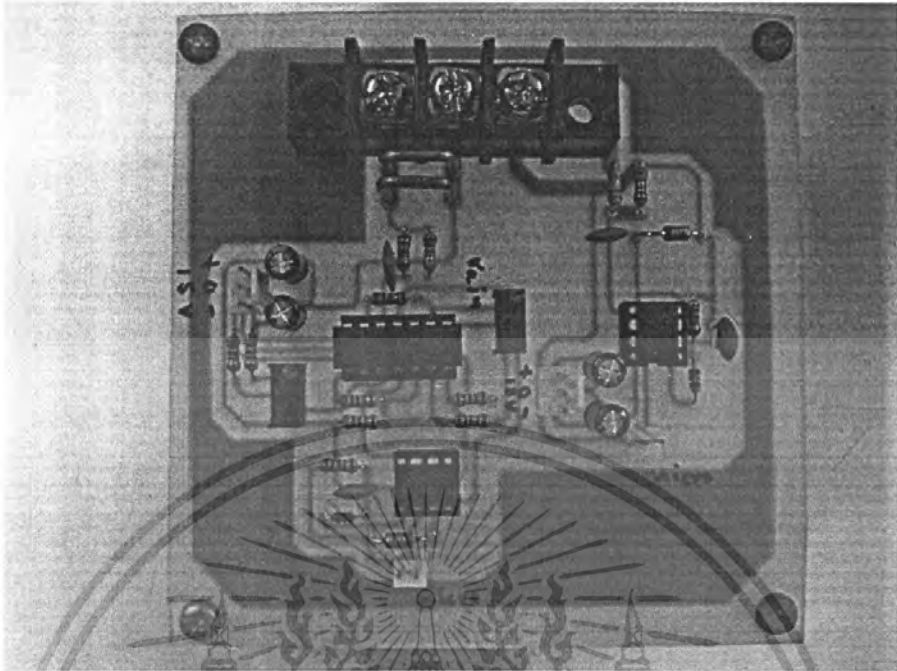


รูปที่ ก-11 วงจรตรวจจับแรงดัน



รูปที่ ก-12 วงจรตรวจจับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

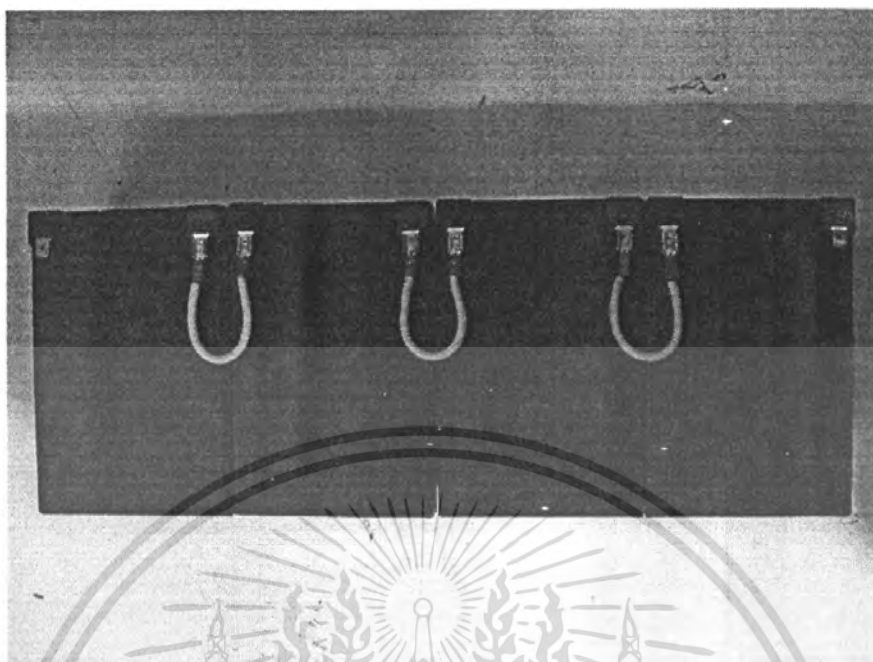


รูปที่ ก-13 วงจรตรวจจับแรงดันและกระแสที่แบตเตอรี่

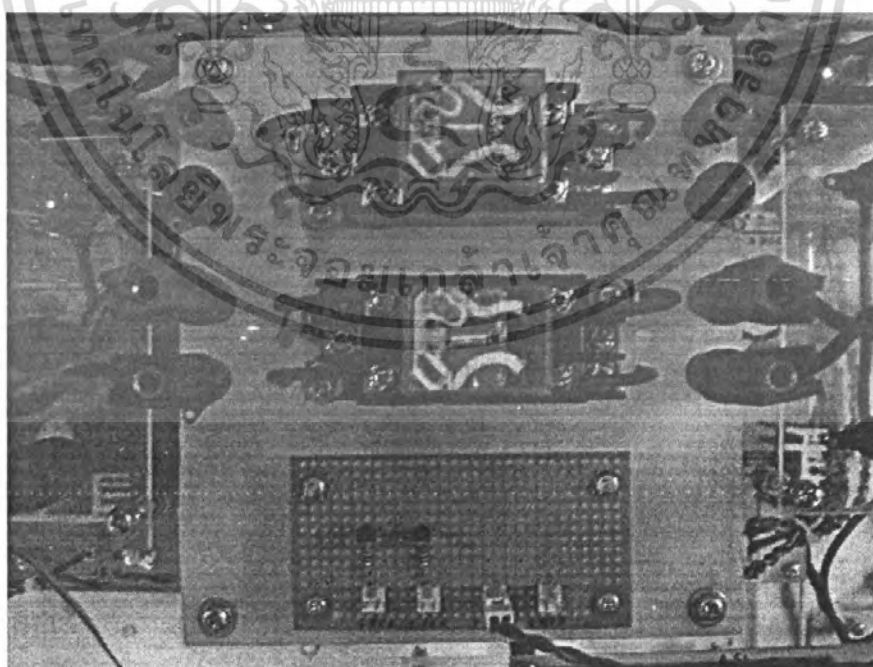


รูปที่ ก-14 หม้อแปลงยกระดับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-15 แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 12 AH จำนวน 4 ลูก ต่ออนุกรมกัน



รูปที่ ก-16 ชุดรีเลย์เชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์กับการไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40A, 600V, UFS Series N-Channel IGBT with Anti-Parallel Hyperfast Diode

The HGTG20N60B3D is a MOS-gated high voltage switching device combining the best features of MOSFETs and bipolar transistors. The device has the high input impedance of a MOSFET and the low on-state conduction loss of a bipolar transistor. The much lower on-state voltage drop varies only moderately between 25°C and 150°C. The diode used in anti-parallel with the IGBT is the RHRP3060.

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

Formerly developmental type TA490.16

Features

- 40A, 600V at $T_C = 25^\circ\text{C}$
- Typical Fall Time 140ns at 150°C
- Short Circuit Rated
- Low Conduction Loss
- Hyperfast Anti-Parallel Diode

Packaging

JEDEC STYLE TO-247



Ordering Information

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
HGTG20N60B3D	TO-247	G20N60B3D

NOTE: When ordering, use the entire part number.

Symbol



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

4,364,073	4,417,385	4,430,792	4,443,931	4,469,176	4,516,143	4,532,534	4,587,713
4,598,461	4,605,948	4,620,211	4,631,564	4,639,754	4,639,762	4,641,162	4,644,637
4,682,195	4,684,413	4,694,313	4,717,879	4,743,952	4,783,690	4,794,432	4,801,986
4,803,533	4,809,045	4,809,047	4,810,665	4,823,176	4,837,606	4,860,080	4,883,767
4,888,627	4,890,143	4,901,127	4,904,609	4,933,740	4,963,951	4,968,027	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HGTG20N60B3D

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

	HGTG20N60B3D	UNITS
Collector to Emitter Voltage	BV_{CES}	600 V
Collector to Gate Voltage, $R_{GE} = 1\text{M}\Omega$	BV_{CGR}	600 V
Collector Current Continuous	I_{C25}	40 A
At $T_C = 110^\circ\text{C}$	I_{C110}	20 A
Average Diode Forward Current at 110°C	$I_{(AVG)}$	20 A
Collector Current Pulsed (Note 1)	I_{CM}	160 A
Gate to Emitter Voltage Continuous	V_{GES}	± 20 V
Gate to Emitter Voltage Pulsed	V_{GEM}	± 30 V
Switching Safe Operating Area at $T_C = 150^\circ\text{C}$	SSOA	30A at 600V
Power Dissipation Total at $T_C = 25^\circ\text{C}$	P_D	165 W
Power Dissipation Derating $T_C > 25^\circ\text{C}$		1.32 W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{STG}	-40 to 150 $^\circ\text{C}$
Maximum Lead Temperature for Soldering	T_L	260 $^\circ\text{C}$
Short Circuit Withstand Time (Note 2) at $V_{GE} = 15\text{V}$	t_{SC}	4 μs
Short Circuit Withstand Time (Note 2) at $V_{GE} = 10\text{V}$	t_{SC}	10 μs

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

NOTES:

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

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

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Collector to Emitter Breakdown Voltage	BV_{CES}	$I_C = 250\mu\text{A}$, $V_{GE} = 0\text{V}$	600	-	-	V
Collector to Emitter Leakage Current	I_{CES}	$V_{CE} = BV_{CES}$	-	-	250	μA
		$T_C = 150^\circ\text{C}$	-	-	2.0	mA
Collector to Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(SAT)}$	$I_C = I_{C110}$, $V_{GE} = 15\text{V}$	-	1.8	2.0	V
		$T_C = 150^\circ\text{C}$	-	2.1	2.5	V
Gate to Emitter Threshold Voltage	$V_{GE(TH)}$	$I_C = 250\mu\text{A}$, $V_{CE} = V_{GE}$	3.0	5.0	6.0	V
Gate to Emitter Leakage Current	I_{GES}	$V_{GE} = \pm 20\text{V}$	-	-	± 100	nA
Switching SOA	SSOA	$T_C = 150^\circ\text{C}$, $V_{GE} = 15\text{V}$, $R_G = 10\Omega$, $L = 45\mu\text{H}$	$V_{CE} = 480\text{V}$ 100	-	-	A
			$V_{CE} = 600\text{V}$ 30	-	-	A
Gate to Emitter Plateau Voltage	V_{GEP}	$I_C = I_{C110}$, $V_{CE} = 0.5 BV_{CES}$	-	8.0	-	V
On-State Gate Charge	$Q_{G(ON)}$	$I_C = I_{C110}$, $V_{CE} = 0.5 BV_{CES}$	-	80	105	nC
		$V_{GE} = 15\text{V}$, $V_{GE} = 20\text{V}$	-	105	135	nC
Current Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$	$T_C = 150^\circ\text{C}$, $I_C = I_{C110}$	-	25	-	ns
Current Rise Time	t_r	$V_{CE} = 0.8 BV_{CES}$, $V_{GE} = 15\text{V}$	-	20	-	ns
Current Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$	$R_G = 10\Omega$, $L = 100\mu\text{H}$	-	220	275	ns
Current Fall Time	t_f		-	140	175	ns
Turn-On Energy	E_{ON}		-	475	-	μJ
Turn-Off Energy (Note 3)	E_{OFF}		-	1050	-	μJ
Diode Forward Voltage	V_{EC}	$I_{EC} = 20\text{A}$	-	1.5	1.9	V
Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$I_{EC} = 20\text{A}$, $dI_{EC}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	-	55	ns
		$I_{EC} = 1\text{A}$, $dI_{EC}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	-	45	ns
Thermal Resistance	$R_{\theta JC}$	IGBT	-	-	0.76	$^\circ\text{C}/\text{W}$
		Diode	-	-	1.2	$^\circ\text{C}/\text{W}$

NOTE:

3. Turn-Off Energy Loss (E_{OFF}) is defined as the integral of the instantaneous power loss starting at the trailing edge of the input pulse and ending at the point where the collector current equals zero ($I_{CE} = 0\text{A}$). The HGTG20N60B3D was tested per JEDEC standard No. 24-1 Method for Measurement of Power Device Turn-Off Switching Loss. This test method produces the true total Turn-Off Energy Loss. Turn-On losses include diode losses.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC

TLP250

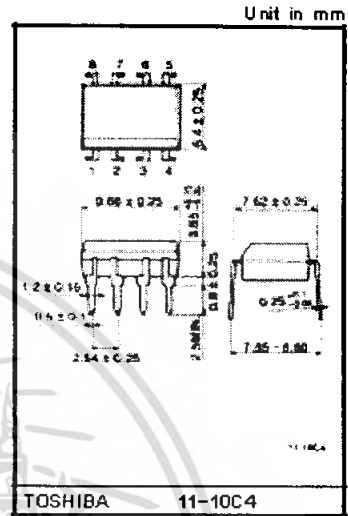
Transistor Inverter
 Inverter For Air Conditioner
 IGBT Gate Drive
 Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
 This unit is 8-lead DIP package.
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: $I_T = 5\text{mA (max.)}$
- Supply current (I_{CC}): 11mA (max.)
- Supply voltage (V_{CC}): $10\text{--}35\text{V}$
- Output current (I_O): $\pm 1.5\text{A (max.)}$
- Switching time (t_{PH}/t_{PL}): $1.5\mu\text{s (max.)}$
- Isolation voltage: $2500\text{V}_{rms} \text{ (min.)}$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type
 VDE approved: DIN VDE0884D6.92, certificate No.76823
 Maximum operating insulation voltage: 630V_{PK}
 Highest permissible over voltage: 4000V_{PK}

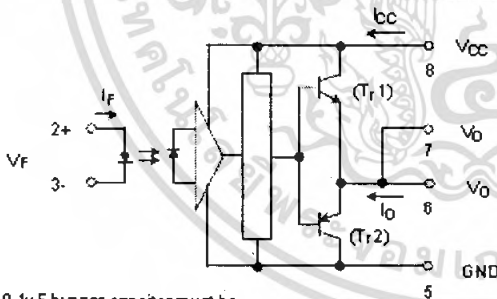
(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

- Creepage distance: 6.4mm (min.)
 Clearance: 6.4mm (min.)



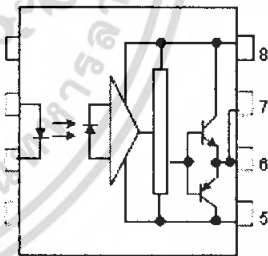
Weight: 0.54 g

Schematic



A0.1 μ F bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 : V_O (Output)
- 7 : V_O
- 8 : V_{CC}

Truth Table

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	I _F	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	ΔI _F / ΔTa	-0.36	mA/°C	
	Peak transient forward current (Note 1)	I _{FFT}	1	A	
	Reverse voltage	V _R	5	V	
	Junction temperature	T _J	125	°C	
Detector	"H" peak output current (P _{WH} ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	I _{OPH}	-1.5	A	
	"L" peak output current (P _{WL} ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	I _{OPL}	+1.5	A	
	Output voltage	V _O	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Supply voltage	V _{CC}	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	ΔV _O / ΔTa	-0.73	V/°C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	ΔV _{CC} / ΔTa	-0.73	V/°C	
	Junction temperature	T _J	125	°C	
	Operating frequency (Note 3)	f	25	kHz	
Operating temperature range	T _{opr}	-20~85	°C		
Storage temperature range	T _{stg}	-65~125	°C		
Lead soldering temperature (10 s) (Note 4)	T _{sol}	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H.s 60%) (Note 5)	BV _S	2500	Vrms		

Note 1: Pulse width P_W ≤ 1μs, 300pps

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform, I_{OPH} ≤ -1.0A (≤ 2.5μs), I_{OPL} ≤ +1.0A (≤ 2.5μs)

Note 4: It is 2 mm or more from a lead root.

Note 5: Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

Note 6: A ceramic capacitor (0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Input current, on (Note 7)	I _{F(ON)}	7	8	10	mA	
Input voltage, off	V _{F(OFF)}	0	—	0.8	V	
Supply voltage	V _{CC}	15	—	30	20	V
Peak output current	I _{OPH/OPL}	—	—	±0.5	A	
Operating temperature	T _{opr}	-20	25	70	85	°C

Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs.

CD40106B Types

CMOS Hex Schmitt Triggers

High-Voltage Types (20-Volt Rating)

■ CD40106B consists of six Schmitt-trigger circuits. Each circuit functions as an inverter with Schmitt-trigger action on the input. The trigger switches at different points for positive- and negative-going signals. The difference between the positive-going voltage (V_P) and the negative-going voltage (V_N) is defined as hysteresis voltage (V_H) (see Fig.6). The CD40106B types are supplied in 14-lead hermetic dual-in-line ceramic packages (F3A suffix), 14-lead dual-in-line plastic packages (E suffix), 14-lead small-outline packages (M, MT, M8, and NSR suffixes), and 14-lead thin shrink small-outline packages (PW and PWR suffixes).

Features:

- Schmitt-trigger action with no external components
- Hysteresis voltage (typ.) 0.9 V at V_{DD} = 5 V, 2.3 V at V_{DD} = 10 V, and 3.6 V at V_{DD} = 15 V
- Noise immunity greater than 50%
- No limits on input rise and fall times
- Standardized, symmetrical output characteristics
- 100% tested for quiescent current at 20 V
- Maximum input current of 1 μA at 15 V over full package-temperature range; 100 nA at 10 V and 25°C
- Low V_{DD} to V_{SS} current during slow input ramp
- 5-V, 10-V, and 15-V parametric ratings
- Meets all requirements of JEDEC Tentative Standard No. 13B, "Standard Specifications for Description of "B" Series CMOS Devices"

Applications:

- Wave and pulse shapers
- High-noise-environment systems
- Monostable multivibrators
- Astable multivibrators

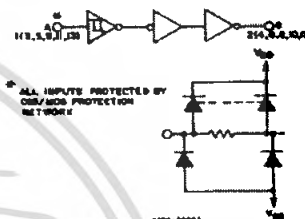
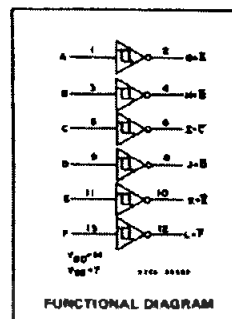


Fig. 1 - Logic diagram (1 of 6 Schmitt triggers).

MAXIMUM RATINGS, Absolute-Maximum Values:

DC SUPPLY-VOLTAGE RANGE, (V _{DD}) Voltages referenced to V _{SS} Terminal	-0.5V to +20V
INPUT VOLTAGE RANGE, ALL INPUTS	-0.5V to V _{DD} + 0.5V
DC INPUT CURRENT, ANY ONE INPUT	±10mA
POWER DISSIPATION PER PACKAGE (P _D):	
For T _A = -55°C to +100°C	500mW
For T _A = +100°C to +125°C	Derate Linearly at 12mW/°C to 200mW
DEVICE DISSIPATION PER OUTPUT TRANSISTOR FOR T _A = FULL PACKAGE-TEMPERATURE RANGE (All Package Types)	100mW
OPERATING-TEMPERATURE RANGE (T _A)	-55°C to +125°C
STORAGE TEMPERATURE RANGE (T _{stg})	-65°C to +150°C
LEAD TEMPERATURE (DURING SOLDERING): At distance 1/16 ± 1/32 inch (1.59 ± 0.79mm) from case for 10s max.	+265°C

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

For maximum reliability, nominal operating conditions should be selected so that operation is always within the following ranges:

CHARACTERISTIC	LIMITS		UNITS
	MIN.	MAX.	
Supply-Voltage Range (For T _A Full Package-Temperature Range)	3	18	V

DYNAMIC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

At T_A = 25°C, Input t_r, t_f = 20 ns, C_L = 50 pF, R_L = 200 kΩ

CHARACTERISTIC	TEST CONDITIONS	LIMITS			UNITS
		V _{DD} (V)	TYP.	MAX.	
Propagation Delay Time: t _{PHL} , t _{PLH}		5	140	280	ns
		10	70	140	
		15	60	120	
Transition Time: t _{THL} , t _{TLH}		5	100	200	ns
		10	50	100	
		15	40	80	
Input Capacitance, C _{IN}	Any Input		5	7.5	pF

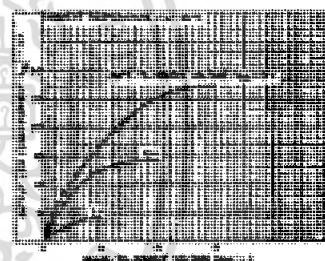


Fig. 2 - Typical output low (sink) current characteristics.

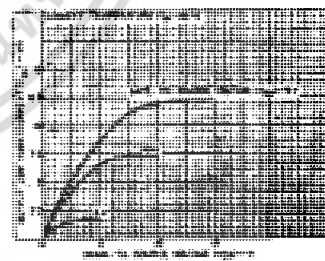


Fig. 3 - Minimum output low (sink) current characteristics.

Copyright © 2003, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

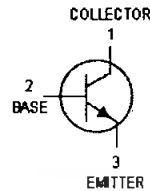
SINGLE LAYER WINDING TABLE																				
WIRE SIZE (AWG)		26	25	24	22	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	TOTAL POWER DISSIPATION (WATTS) VS. TEMP RISE			
RESISTIVITY (mΩ/ft)		2.13	1.34	.842	.500	.300	.204	.120	.060	.032	.016	.008	.0051	.0021	.0013	.0008				
MAXIMUM AMPS 100° PER ALLOWABLE 25C° TEMP RISE 40C°		64	50	1.29	1.83	2.62	3.72	4.45	5.33	6.35	7.60	9.03	10.8	12.9	15.4					
PART No.		MIL CROSS/IN	SURFACE AREA (sqm)	NUMBER OF TURNS													10C°	25C°	40C°	
T16	.85	.80	9	8	4	2	1										.013	.038	.067	
T20	.95	1.16	11	8	5	3	2	1									.018	.055	.097	
T25	1.13	1.88	18	14	10	7	5	4	3	2	1						.030	.099	.157	
T26	1.74	2.67	15	11	8	5	3	2	1								.042	.147	.223	
T30	1.44	2.79	25	20	15	11	7	6	5	4	3	2	1	1			.044	.133	.233	
T37	1.53	3.77	37	29	22	17	12	11	9	7	5	4	3	2	1	1	.060	.190	.316	
T38	1.02	4.43	31	24	18	13	10	8	7	5	4	3	2	1			.071	.211	.371	
T41	1.84	5.23	43	34	26	20	15	13	11	9	7	6	5	4	3	2	1	.083	.249	.437
T50	2.01	6.86	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	.109	.326	.574
T50B	2.32	7.83	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	.125	.373	.659
T50D	2.95	9.87	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	.157	.470	.826
T51C	2.53	7.56	36	28	22	16	12	10	9	7	5	4	3	2	1		.120	.350	.633	
T60	2.43	9.84	37	33	41	32	25	21	19	16	14	12	10	8	7	6	4	.156	.438	.823
T60D	3.69	14.3	37	33	41	32	25	21	19	16	14	12	10	8	7	6	4	.228	.651	1.20
T68	2.47	11.2	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7	6	.178	.533	.936
T68A	2.77	12.5	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7	6	.198	.594	1.04
T68D	3.41	15.2	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7	6	.241	.722	1.27
T72	3.15	13.3	54	43	33	26	19	17	14	12	11	9	7	6	5	4	3	.212	.634	1.11
T80	2.83	15.5	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11	9	.246	.736	1.30
T80B	3.44	18.7	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11	9	.298	.892	1.57
T80D	4.07	22.0	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11	9	.350	1.05	1.84
T90	3.84	22.4	115	92	72	57	44	33	34	30	26	23	20	17	15	13	11	.356	1.07	1.88
T94	3.44	22.0	117	94	74	58	45	40	35	31	27	24	21	18	15	13	11	.350	1.06	1.86
T106	4.43	31.0	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13	11	.492	1.47	2.59
T106A	3.85	26.8	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13	11	.427	1.28	2.25
T106B	5.19	35.5	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13	11	.565	1.59	2.97
T124	3.95	33.3	150	120	95	75	59	52	46	40	35	31	27	24	21	18	15	.529	1.58	2.79
T130	4.75	42.2	165	133	105	83	65	55	51	45	40	35	31	27	23	20	17	.671	2.01	3.53
T130A	3.07	33.2	165	133	105	83	65	53	51	45	40	35	31	27	23	20	17	.529	1.58	2.79
T131	5.11	42.1	134	107	85	67	52	46	41	36	32	28	24	21	18	16	13	.669	2.00	3.62
T132	4.95	42.2	147	118	93	74	58	51	45	40	35	31	27	23	20	18	15	.671	2.01	3.53
T141	4.75	46.8	189	151	119	95	75	69	59	52	45	40	35	31	27	24	20	.744	2.23	3.92
T150	5.25	53.2	180	145	114	91	71	63	56	49	44	38	34	29	26	22	19	.846	2.53	4.45
T157	5.89	63.2	204	164	129	103	81	72	64	56	50	44	39	34	30	26	23	1.01	3.01	5.29
T175	6.59	79.1	230	186	147	117	92	82	73	64	57	50	44	39	34	30	26	1.26	3.76	6.16
T184	7.54	89.2	202	163	129	102	81	72	63	56	50	44	38	34	29	26	22	1.42	4.25	7.47
T200	6.53	90.9	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36	31	1.45	4.33	7.61
T200B	8.79	120	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36	31	1.91	5.74	10.1
T207	8.93	111	202	163	129	102	81	72	63	56	50	44	38	34	29	26	22	1.76	5.26	9.23
T225	0.93	109	305	246	195	155	123	109	97	80	70	64	60	53	40	41	30	1.74	5.21	9.10
T226B	0.21	143	305	246	195	155	123	109	97	86	76	68	60	63	46	41	36	2.27	6.70	11.9
T250	10.4	166	270	217	172	137	108	98	86	76	67	60	53	46	41	36	31	2.83	7.88	13.9
T300	7.95	173	422	341	271	216	171	153	136	121	108	96	85	75	66	56	52	2.75	8.23	14.5
T300D	10.5	223	422	341	271	216	171	153	136	121	108	96	85	75	66	56	52	3.55	10.6	18.7
T400	11.1	301	494	399	317	254	201	179	160	142	126	113	100	88	78	68	61	4.79	14.3	25.2
T400D	14.4	384	494	399	317	254	201	179	160	142	126	113	100	88	78	68	61	6.10	18.2	32.1
T520	13.7	496	680	550	437	350	278	248	221	197	176	156	139	123	109	97	86	7.88	23.6	41.5
T520D	17.7	629	680	550	437	350	278	248	221	197	176	156	139	123	109	97	86	10.0	30.0	52.7
T650	23.1	986	769	621	494	396	315	261	250	223	199	177	158	139	124	113	98	15.7	46.9	82.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

 Order this document
 by BC546D

Amplifier Transistors
 NPN Silicon

BC546, B
BC547, A, B, C
BC548, A, B, C

 CASE 29-04, STYLE 17
 TO-92 (TO-226AA)

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	BC 546	BC 547	BC 548	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CE0}	65	45	30	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	80	50	30	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	6.0			Vdc
Collector Current — Continuous	I_C	100			mA _{dc}
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	625			mW
		5.0			mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	1.5			Watt
		12			mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150			$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	$^\circ\text{C/W}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
----------------	--------	-----	-----	-----	------

OFF CHARACTERISTICS

Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_C = 1.0\text{ mA}, I_B = 0$)	BC546	$V_{(BR)CEO}$	65	—	—	V
	BC547		45	—	—	
	BC548		30	—	—	
Collector-Base Breakdown Voltage ($I_C = 100\ \mu\text{A}$)	BC546	$V_{(BR)CBO}$	80	—	—	V
	BC547		50	—	—	
	BC548		30	—	—	
Emitter-Base Breakdown Voltage ($I_E = 10\ \mu\text{A}, I_C = 0$)	BC546	$V_{(BR)EBO}$	6.0	—	—	V
	BC547		6.0	—	—	
	BC548		6.0	—	—	
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 70\text{ V}, V_{BE} = 0$) ($V_{CE} = 50\text{ V}, V_{BE} = 0$) ($V_{CE} = 35\text{ V}, V_{BE} = 0$) ($V_{CE} = 30\text{ V}, T_A = 125^\circ\text{C}$)	BC546	I_{CES}	—	0.2	15	nA
	BC547		—	0.2	15	
	BC548		—	0.2	15	
	BC546/547/548		—	—	4.0	

REV 1

© Motorola, Inc. 1996



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BC546, B BC547, A, B, C BC548, A, B, C**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted) (Continued)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
ON CHARACTERISTICS					
DC Current Gain ($I_C = 10 \mu\text{A}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$)	h_{FE}	—	90	—	—
	BC547A/548A	—	150	—	—
	BC546B/547B/548B	—	270	—	—
	BC548C	—	—	—	—
($I_C = 2.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$)	BC546	110	—	450	—
	BC547	110	—	800	—
	BC548	110	—	800	—
	BC547A/548A	110	180	220	—
	BC546B/547B/548B	200	290	450	—
	BC547C/BC548C	420	520	800	—
($I_C = 100 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$)	BC547A/548A	—	120	—	—
	BC546B/547B/548B	—	180	—	—
	BC548C	—	300	—	—
Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 10 \text{ mA}$, $I_B = 0.5 \text{ mA}$) ($I_C = 100 \text{ mA}$, $I_B = 5.0 \text{ mA}$) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $I_B = \text{See Note 1}$)	$V_{CE(sat)}$	—	0.09	0.25	V
		—	0.2	0.6	
		—	0.3	0.6	
Base-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 10 \text{ mA}$, $I_B = 0.5 \text{ mA}$)	$V_{BE(sat)}$	—	0.7	—	V
Base-Emitter On Voltage ($I_C = 2.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$)	$V_{BE(on)}$	0.55	—	0.7	V
		—	—	0.77	
SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS					
Current-Gain — Bandwidth Product ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$, $f = 1.0 \text{ MHz}$)	f_T	150	300	—	MHz
	BC546	150	300	—	
	BC547	150	300	—	
	BC548	150	300	—	
Output Capacitance ($V_{CB} = 10 \text{ V}$, $I_C = 0$, $f = 1.0 \text{ MHz}$)	C_{obo}	—	1.7	4.5	pF
Input Capacitance ($V_{EB} = 0.5 \text{ V}$, $I_C = 0$, $f = 1.0 \text{ MHz}$)	C_{ibo}	—	10	—	pF
Small-Signal Current Gain ($I_C = 2.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	h_{fe}	125	—	500	—
	BC546	125	—	900	—
	BC547/548	125	—	260	—
	BC547A/548A	240	330	500	—
	BC546B/547B/548B	450	600	900	—
	BC547C/548C	—	—	—	—
Noise Figure ($I_C = 0.2 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$, $R_G = 2 \text{ k}\Omega$, $f = 1.0 \text{ kHz}$, $\Delta f = 200 \text{ Hz}$)	NF	—	2.0	10	dB
	BC546	—	2.0	10	
	BC547	—	2.0	10	
	BC548	—	2.0	10	

Note 1: I_B is value for which $I_C = 11 \text{ mA}$ at $V_{CE} = 1.0 \text{ V}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



March 2004

LM139/LM239/LM339/LM2901/LM3302

Low Power Low Offset Voltage Quad Comparators

General Description

The LM139 series consists of four independent precision voltage comparators with an offset voltage specification as low as 2 mV max for all four comparators. These were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage. These comparators also have a unique characteristic in that the input common-mode voltage range includes ground, even though operated from a single power supply voltage.

Application areas include limit comparators, simple analog to digital converters, pulse, squarewave and time delay generators, wide range VCO, MOS clock timers, multivibrators and high voltage digital logic gates. The LM139 series was designed to directly interface with TTL and CMOS. When operated from both plus and minus power supplies, they will directly interface with MOS logic—where the low power drain of the LM339 is a distinct advantage over standard comparators.

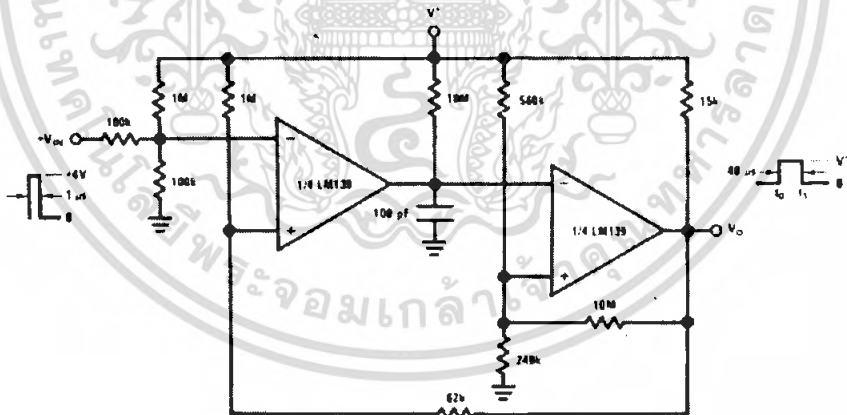
Features

- Wide supply voltage range
- LM139/139A Series 2 to 36 V_{DC} or ±1 to ±18 V_{DC}
- LM2901: 2 to 36 V_{DC} or ±1 to ±18 V_{DC}
- LM3302: 2 to 28 V_{DC} or ±1 to ±14 V_{DC}
- Very low supply current drain (0.8 mA) — independent of supply voltage
- Low input biasing current: 25 nA
- Low input offset current: ±5 nA
- Offset voltage: ±3 mV
- Input common-mode voltage range includes GND
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Low output saturation voltage: 250 mV at 4 mA
- Output voltage compatible with TTL, DTL, ECL, MOS and CMOS logic systems

Advantages

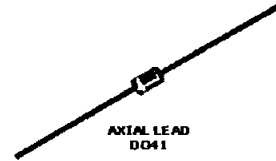
- High precision comparators
- Reduced V_{OS} drift over temperature
- Eliminates need for dual supplies
- Allows sensing near GND
- Compatible with all forms of logic
- Power drain suitable for battery operation

One-Shot Multivibrator with Input Lock Out



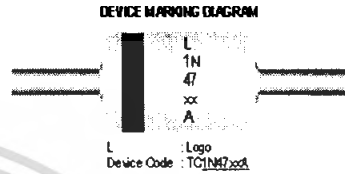
005706.12

1 Watt DO-41 Hermetically Sealed Glass Zener Voltage Regulators



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

Parameter	Value	Units
Storage Temperature Range	-65 to +200	$^\circ\text{C}$
Maximum Junction Operating Temperature	+200	$^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation	1.0	Watt
Thermal Resistance Junction to Lead	53.5	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance Junction to Ambient	100	$^\circ\text{C/W}$
Lead Temperature (1/16" from case for 10 seconds)	+230	$^\circ\text{C}$



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

Specification Features:

- Zener Voltage Range 3.3 to 56 Volts
- DO-41 Package (JEDEC)
- Through-Hole Device Type Mounting
- Hermetically Sealed Glass
- Compression Bonded Construction
- All external surfaces are corrosion resistant and leads are readily solderable
- Cathode indicated by polarity band



ELECTRICAL SYMBOL

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

Device Type	$V_Z @ I_{ZT}$ (Volts) Nominal	I_{ZT} (mA)	$Z_{ZT} @ I_{ZT}$ (Ω) Max	I_{ZK} (mA)	$Z_{ZK} @ I_{ZK}$ (Ω) Max	$I_R @ V_R$ (μA) Max	V_R (Volts)
TC1N4728A	3.3	76	10	1	400	100	1
TC1N4729A	3.6	69	10	1	400	100	1
TC1N4730A	3.9	64	9	1	400	50	1
TC1N4731A	4.3	58	9	1	400	10	1
TC1N4732A	4.7	53	8	1	500	10	1
TC1N4733A	5.1	49	7	1	550	10	1
TC1N4734A	5.6	45	5	1	600	10	2
TC1N4735A	6.2	41	2	1	700	10	3
TC1N4736A	6.8	37	3.5	1	700	10	4
TC1N4737A	7.5	34	4	0.5	700	10	5
TC1N4738A	8.2	31	4.5	0.5	700	10	6
TC1N4739A	9.1	28	5	0.5	700	10	7
TC1N4740A	10	25	7	0.25	700	10	7.6
TC1N4741A	11	23	8	0.25	700	5	8.4
TC1N4742A	12	21	9	0.25	700	5	9.1
TC1N4743A	13	19	10	0.25	700	5	9.9
TC1N4744A	15	17	14	0.25	700	5	11.4
TC1N4745A	16	15.5	16	0.25	700	5	12.2
TC1N4746A	18	14	20	0.25	700	5	13.7
TC1N4747A	20	12.5	22	0.25	750	5	15.2
TC1N4748A	22	11.5	23	0.25	750	5	16.7

March 2003 / B

TC1N4728A through TC1N4758A Series

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NHG RELAYS



28×21.5×35



3C:28×31.5×36



4C:28×41.5×36



RoHS

JQX-13F

COC 03001003500

R50016343 c us E158859

Features

- Small size, light weight, heavy reverse power.
- Optional mounting ways.
- Firm structure, strong anti-shock & anti vibration.
- Suitable for automatic control, telecommunication equipment, household electrical appliances and machinery electrical facilities.

Ordering Information

JQX-13F 2C a DC12V 1 L

1 2 3 4 5 6

1 Part number: JQX-13F

2 Contact arrangement: 1A:1A; 2A:2A; 1B:1B; 2B:2B;
1C:1C; 2C:2C; 3C:3C; 4C:4C

3 Terminal: a Inserting type; b PCB type

4 Coil rated voltage(V): AC:6,12,24,36,48,110,120,220,240
DC:6,12,24,36,48,110,220

5 Cover: 1'1 Mode; 2'2 Mode

6 Coil transient suppression: L'with LED;
D'with diode;
LD'with LED & diode
NIL standard

Contact Data

Contact Material	AgCdO	AgSnO ₂				
Contact Arrangement			1A (SPSTNO) 1B (SPSTNC) 1C (SPDT(B-M))	2A (DPSTNO) 2B (DPSTNC) 2C (DPDT(B-M))	3C (3PDT(B-M))	4C (4PDT(B-M))
Contact Rating (resistive)	Contact Current		15A/20A	10A	10A	10A
	Contact voltage		277VAC,28VDC			
	Coil Power	DC	0.9W	0.9W	1.4W	1.5W
AC		1.2VA	1.2VA	2VA	2.5VA	
Max. Switching Voltage	30VDC,300VAC		Max. Switching Current,20A			
Max. Resistance or Voltage drop	≤50mΩ		item 3.12 of IEC255-7			
Operational life	Electrical	10 ⁶	item 3.30 of IEC255-7			
	Mechanical	2×10 ⁶	item 3.31 of IEC255-7			

Coil Parameter (DC)

Dash numbers	Coil voltage V		Coil resistance Ω 10%	Pick up voltage V(max) 80% of rated voltage	Release voltage V(min) 10% of rated voltage	Coil power W	Operate Time ms	Release Time ms
	Rated	Max						
006-900	6	6.6	40	4.6	0.6	0.9	<25	<25
012-900	12	13.2	160	9.6	1.2			
024-900	24	26.4	640/850	19.2	2.4			
036-900	36	39.6	1440	28.8	3.6			
048-900	48	52.8	2560	38.4	4.8			
110-900	110	121	13444	88.0	11.0			
220-900	220	242	53778	176	22.0			
012-1400	12	13.2	107	9.6	1.2	1.4	<25	<25
024-1400	24	26.4	410	19.2	2.4			
036-1400	36	39.6	926	28.8	3.6			
048-1400	48	52.8	1700	38.4	4.8			
110-1400	110	121	8500	88.0	11.0			
220-1400	220	242	34571	176	22.0			
012-1500	12	13.2	100	9.6	1.2	1.5	<25	<25
024-1500	24	26.4	350	19.2	2.4			
036-1500	36	39.6	865	28.8	3.6			
048-1500	48	52.8	1600	38.4	4.8			
110-1500	110	121	6900	88.0	11.0			
220-1500	220	242	32267	176	22.0			

CAUTION: 1.The use of any coil voltage less than the rated coil voltage will compromise the operation of the relay.
2.Pickup and release voltage are for test purposes only and are not to be used as design criteria.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

JQX-13F

Coil Parameter (AC)

Dash numbers	Coil voltage V		Coil resistance $\Omega \pm 10\%$	Rated current mA	Pick up voltage V(max) (80% of rated voltage)	Release voltage V(min) (30% of rated voltage)	Coil power VA
	Rated	Max.					
008AC-1200	6	6.6	11.5	183.0	4.8	1.8	1.2
012AC-1200	12	13.2	46	91.0	9.6	3.6	
024AC-1200	24	26.4	184	46.0	19.2	7.2	
036AC-1200	36	39.6	320	33.0	28.8	10.8	
048AC-1200	48	52.8	735	24.0	38.4	14.4	
110AC-1200	110	121	3900	11.0	88.0	33.0	
120AC-1200	120	132	4550	9.8	96.0	36.0	
220AC-1200	220	242	14400	4.2	176	66.0	
240AC-1200	240	312	15210	5.5	192	72.0	
012AC-2000	12	13.2	24	167	9.6	3.6	2.0
024AC-2000	24	26.4	100	83	19.2	7.2	
036AC-2000	36	39.6	230	56	28.8	10.8	
048AC-2000	48	52.8	410	42	38.4	14.4	
110AC-2000	110	121	2300	18	88.0	33.0	
220AC-2000	220	242	8600	9.1	176	66.0	
240AC-2000	240	312	12100	6.2	192	72.0	
012AC-2500	12	13.2	20	208	9.6	3.6	2.5
024AC-2500	24	26.4	78	104	19.2	7.2	
036AC-2500	36	39.6	180	69	28.8	10.8	
048AC-2500	48	52.8	350	52.1	38.4	14.4	
110AC-2500	110	121	1600	22.7	88.0	33.0	
220AC-2500	220	242	6700	11.4	176	66.0	
240AC-2500	240	312	9120	9.8	192	72.0	

CAUTION: 1. The use of any coil voltage less than the rated coil voltage will compromise the operation of the relay.
2. Pickup and release voltage are for test purposes only and are not to be used as design criteria.

Operation condition

Insulation Resistance ⁹⁾	1000M Ω min (at 500VDC)	Item 7 of IEC255-5
Dielectric Strength ¹⁰⁾		
Between contacts	50Hz 1000V	Item 6 of IEC255-5
Between contact and coil	50Hz 1500V	Item 6 of IEC255-5
Shock resistance	100m/s ² 11ms	IEC68-2-27 Test Ea
Vibration resistance	10-55Hz double amplitude 1.5mm	IEC68-2-6 Test Fc
Terminals strength	6N 4N(PC type)	IEC68-2-21 Test Ua2
Solderability	235°C ± 2°C 3-0.5s	IEC68-2-20 Test Ta method 1
Ambient Temperature	-40~70°C; -25~70°C(3C,4C)	
Relative Humidity	85% (at 30°C)	IEC68-2-3 Test Ca
Mass	37g(1C,2C), 50g(3C), 70g(4C)	

Note: 1). When testing, coil terminals should be connected, if LED is installed in relay.

Qualification inspection:

Perform the qualification test as specified in the table IV of IEC255-19-1 and minimum sample size 24.

Safety approvals

Safety approval	UL&CUR	TaV	CQC
Load	10A/277VAC 12A/250VAC, 28VDC ≠HP 125VAC	10A/277VAC, 28VDC	10A/220VAC

Ningbo Huaguan Relay Corporation LTD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include<p30F4011.h>

#include<adc10.h>

#include<lcd4011.h>

#include<pwm.h>

#include<adc10.h>

#include<incap.h>

#include<ports.h>

#include<timer.h>

#define V_offset 512

#define I_offset 512

unsigned int sine_addr_p= 0;

unsigned int timer_value,x;

float ma =0.65;

float pdc1;

_FBORPOR(PBOR_ON&BORV_20&PWRT_64&MCLR_EN&PWMxH_ACT_LO&PWMxL_A
CT_LO&RST_PWMPIN);

_FWDT(WDT_OFF);

_FOSC(CSW_ON_FSCM_OFF & XT_PLL16);

_FGS(CODE_PROT_OFF);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

static float sine_table[400]={
0,6,13,19,25,31,38,44,50,56,63,69,
75,81,87,93,99,106,112,118,124,130,135,141,
147,153,159,165,170,176,182,187,193,198,204,209,
214,220,225,230,235,240,245,250,255,260,265,269,
274,278,283,287,292,296,300,304,308,312,316,320,
324,327,331,334,338,341,344,347,351,354,356,359,
362,365,367,370,372,374,376,378,380,382,384,386,
387,389,390,392,393,394,395,396,397,398,398,399,
399,400,400,400,400,400,400,400,399,399,398,398,
397,396,395,394,393,392,390,389,387,386,384,382,
380,378,376,374,372,370,367,365,362,359,356,354,
351,347,344,341,338,334,331,327,324,320,316,312,
308,304,300,296,292,287,283,278,274,269,265,260,
255,250,245,240,235,230,225,220,214,209,204,198,
193,187,182,176,170,165,159,153,147,141,135,130,
124,118,112,106,99,93,87,81,75,69,63,56,
50,44,38,31,25,19,13,6,0,-6,-13,-19,
-25,-31,-38,-44,-50,-56,-63,-69,-75,-81,-87,-93,
-99,-106,-112,-118,-124,-130,-135,-141,-147,-153,-159,-165,

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-170,-176,-182,-187,-193,-198,-204,-209,-214,-220,-225,-230,
-235,-240,-245,-250,-255,-260,-265,-269,-274,-278,-283,-287,
-292,-296,-300,-304,-308,-312,-316,-320,-324,-327,-331,-334,
-338,-341,-344,-347,-351,-354,-356,-359,-362,-365,-367,-370,
-372,-374,-376,-378,-380,-382,-384,-386,-387,-389,-390,-392,
-393,-394,-395,-396,-397,-398,-398,-399,-399,-400,-400,-400,
-400,-400,-400,-400,-399,-399,-398,-398,-397,-396,-395,-394,
-393,-392,-390,-389,-387,-386,-384,-382,-380,-378,-376,-374,
-372,-370,-367,-365,-362,-359,-356,-354,-351,-347,-344,-341,
-338,-334,-331,-327,-324,-320,-316,-312,-308,-304,-300,-296,
-292,-287,-283,-278,-274,-269,-265,-260,-255,-250,-245,-240,
-235,-230,-225,-220,-214,-209,-204,-198,-193,-187,-182,-176,
-170,-165,-159,-153,-147,-141,-135,-130,-124,-118,-112,-106,
-99,-93,-87,-81,-75,-69,-63,-56,-50,-44,-38,-31,
-25,-19,-13,-6};

int phaseshift = 0;

long

t100us,t10ms,t50ms,t100ms,t1s,Vgdatatab,Vg_use,Vinv_use,Ig_use,Iinv_use,Vbatt_use,Ibatt_ use,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

t10ms_count,t150ms_count,t100ms_count,t1s_count,

ADC_Vg,ADC_Ig,ADC_Vinv,ADC_linv,ADC_Vbatt,ADC_Ibatt,

Vgdataavg,Igdataavg,Vinvdataavg,linvdataavg,Vbattdataavg,Ibattdataavg;

unsigned long int      Vgdata,Igdata,Vinvdata,linvdata,Vbattdata,Ibattdata,a,b;

unsigned long Vdiff;

long   div_count;

int capturetimer;

float timecycle;

unsigned int result[5], old_result[5],i;

void delay(unsigned int ms)
{
    int i,a;
    for(i=0;i<ms;i++)
    {
        for(a=0;a<816;a++);
    }
}

void _ISR_FLTAInterrupt(void)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{

    IFS2bits.FLTAIF = 0;

    return;

}

void _ISR_T1Interrupt(void)

{

    IFS0bits.T1IF = 0;

    t10ms_count++;

    t50ms_count++;

    t100ms_count++;

    t1s_count++;

    t100us++;

    if (t10ms_count >= 100)

    {

        t10ms++;

        t10ms_count = 0;

    }

    if (t50ms_count >= 500)

    {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

t50ms++;

t50ms_count = 0;

}

if (t100ms_count >= 1000)

{

t100ms++;

t100ms_count = 0;

}

if (t1s_count >= 10000)

{

t1s++;

t1s_count = 0;

}

return;

}

/****function display adc value*****/

void display_adc_value(unsigned char addr, unsigned int val)

{

char i;

lcd_command(2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    lcd_command(addr);

    for(i=0;i<4;i++);

    {

        lcd_text(0x20);

    }

    inttolcd(addr,val);

}

//*****function display sceen title*****//
void display_title()
{
    lcd_puts(LINE1," 10 bit ADC for ");
00H
    lcd_puts(LINE2," dsPIC demo ");
40H
    lcd_delay(1000);
}

void pwm_int()
{
    IEC2bits.PWMIE = 1;

    IPC9 = 0xd000 ;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DTCON1 = (PWM_DTAPS4 & PWM_DTA2);

FLTACON = (PWM_OVA1H_ACTIVE &

           PWM_OVA2H_ACTIVE &

           PWM_FLTA_MODE_LATCH &

           PWM_FLTA1_DIS &

           PWM_FLTA2_DIS );

PTCON = (PWM_EN &

          PWM_OP_SCALE1 &

          PWM_IPCLK_SCALE1 &

          PWM_MOD_UPDN);

PWMCON1 = (PWM_MOD1_COMP &

            PWM_MOD2_COMP &

            PWM_PEN1H &

            PWM_PEN1L );

}

void PWM()

{

    pdc1= 400 + (float)(ma*(sine_table[sine_addr_p]));

    sine_addr_p++;

    if (sine_addr_p>399) {sine_addr_p = 0;}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

return;

}

void _ISR_PWMInterrupt(void)

{

    PDC1 = pdc1;

    PWM();

    IFS2bits.PWMIF = 0;

}

//*****function initialize for adc module*****//

void adc_init()

{

    ADCON1bits.ADON = 0;

    ADPCFG = 0x0000;

    ADCON1 = 0x00E6;

    ADCON2 = 0x0414;

    ADCON3 = 0x0210;

    ADCHS = 0x0000;

    ADCSSL = 0x003F;

    ADCON1bits.ADON = 1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

//function for initial input capture//

void capture_init()

{

    TRISDbits.TRISD0 = 1;

    ConfigIntCapture1(IC_INT_PRIOR_1 & IC_INT_ON);

    T3CON = 0x8000;

    OpenCapture1(IC_IDLE_STOP &
                 IC_TIMER3_SRC &
                 IC_INT_1CAPTURE &
                 IC_EVERY_RISE_EDGE);

}

//Interrupt service routine capture every rising edge//

void _ISR_IC1Interrupt(void)

{

    sine_addr_p = 0;

    IFS0bits.IC1IF = 0;

}

//****function timer1 interrupt****//

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int int_t1_init(void)
{
    unsigned long match_value;

    ConfigIntTimer1(T1_INT_PRIOR_7 & //timer1 interrupt priority 7
                   T1_INT_ON);

    WriteTimer1(0);

    match_value = 1600;

    OpenTimer1(T1_ON &
               T1_GATE_OFF &
               T1_IDLE_STOP &
               T1_PS_1_1 &
               T1_SYNC_EXT_OFF &
               T1_SOURCE_INT, match_value);
}

```

```

//****function analog to digital converter****//

```

```

void ADC(void)

```

```

{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(i=0;i<6;i++)
{
    ADCON1bits.SAMP = 1;

    while(!ADCON1bits.SAMP);

    ConvertADC10();

    while(ADCON1bits.SAMP);

    while(BusyADC10());

    result[i] = ReadADC10(i);
}
}

void sum_ADC()
{
    if(result[0]>=V_offset)

Vgrid

    { ADC_Vg = result[0] - V_offset;}

    if(result[0]<V_offset)

ADC Vgrid

    { ADC_Vg = V_offset - result[0];}

    if(result[1]>=I_offset)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Igrid

```
{ ADC_lg = result[1] - I_offset;}
```

```
if(result[1]<I_offset)
```

ADC Igrid

```
{ ADC_lg = I_offset - result[1];}
```

```
if(result[2]>=V_offset)
```

Vinv

```
{ ADC_Vinv = result[2] - V_offset;}
```

```
if(result[2]<V_offset)
```

ADC Vinv

```
{ ADC_Vinv = V_offset - result[2];}
```

```
if(result[3]>=I_offset)
```

linv

```
{ ADC_linv = result[3] - I_offset;}
```

```
if(result[3]<I_offset)
```

ADC linv

```
{ ADC_linv = I_offset - result[3];}
```

```
if(result[4]>=V_offset)
```

Vbatt

```
{ ADC_Vbatt = result[4] - V_offset;}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if(result[4]<V_offset)
```

```
ADC Vbatt
```

```
{ ADC_Vbatt = V_offset - result[4];}
```

```
if(result[5]>=I_offset)
```

```
Igrid
```

```
{ ADC_Ibatt = result[5] - I_offset;}
```

```
if(result[5]<I_offset)
```

```
ADC Igrid
```

```
{ ADC_Ibatt = I_offset - result[5];}
```

```
Vgdata = Vgdata + ADC_Vg;
```

```
Vinvdata = Vinvdata + ADC_Vinv;
```

```
Igdata = Igdata + ADC_Ig;
```

```
Iinvdata = Iinvdata + ADC_Iinv;
```

```
Vbattdata = Vbattdata + ADC_Vbatt;
```

```
Ibattdata = Ibattdata + ADC_Ibatt;
```

```
}
```

```
void avr_ADC()
```

```
{
```

```
Vgdataavg = Vgdata/div_count ;
```

```
Vinvdataavg = Vinvdata/div_count ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

lgdataavg = lgdata/div_count ;

linvdataavg = linvdata/div_count ;

Vbattdataavg = Vbattdata/div_count ;

Ibattdataavg = Ibattdata/div_count ;

div_count = 0;

Vgdata = 0;

Vinvdata = 0;

lgdata = 0;

linvdata = 0;

Vbattdata = 0;

Ibattdata = 0;
}

void gain()
{

Vg_use = Vgdataavg*1.6767;

Vinv_use = Vinvdataavg*1.6767;

lg_use = lgdataavg*1.6767;

linv_use = linvdataavg*1.6767;

Vbatt_use = Vbattdataavg*1.6767;

Ibatt_use = Ibattdataavg*1.6767;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

void change_ma()

{

    Vdiff = Vinv_use-Vg_use;

    TRISCbits.TRISC13 = 0;

    if( Vinv_use < 225 )

        { ma = ma + 0.01 ;if(ma>=0.95) ma = 0.95 ;}

    if((Vinv_use <= 230)&(Vinv_use >= 210)) ma=ma;

    if(Vinv_use > 235 )

        { ma = ma - 0.01 ;if(ma<=0.50) ma = 0.50 ;}

x=ma*100;

/*if(Vdiff <= 5)

    { PORTCbits.RC13 = 1;}

if(Vinv_use >= 230)

    { PORTCbits.RC13 = 0;}

if(Vinv_use <= 210)

    { PORTCbits.RC13 = 0;}*/

}

//****interrupt service routine for external interrupt0(switch for phase shift up)****//

void _ISR_INT0Interrupt(void)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{

    delay_ms(10);

    IFS0bits.INT0IF = 0;

    phaseshift = phaseshift+1;

    if(phaseshift>10)

    {

        phaseshift = 10;

    }

}

/****interrupt service routine for external interrupt1(switch for phase shift down)****/
void _ISR _INT1Interrupt(void)
{

    delay_ms(10);

    IFS1bits.INT1IF = 0;

    phaseshift = phaseshift-1;

    if(phaseshift<1)

    {

        phaseshift = 1;

    }

}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int main(void)

{

    lcd_init();

    display_title();

    lcd_clear();

    adc_init();

    int_t1_init();

    pwm_int();

    PTPER = 400;

    capture_init();

    while (1)
    {
        if (t100us >= 1)
        {
            b++;

            ADC();

            sum_ADC();

            div_count++;

            t100us = 0;

        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (t10ms >= 1)
{
    t10ms = 0;
}

if (t50ms >= 1)
{
    t50ms = 0;
}

if (t100ms >=1)
{
    avr_ADC();
    gain();
    change_ma();
    t100ms = 0;
}

if (t1s >= 1)
{
    display_adc_value(0x80, x);

    display_adc_value(0x86, Vinv_use);

    display_adc_value(0xC0, Ig_use);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้