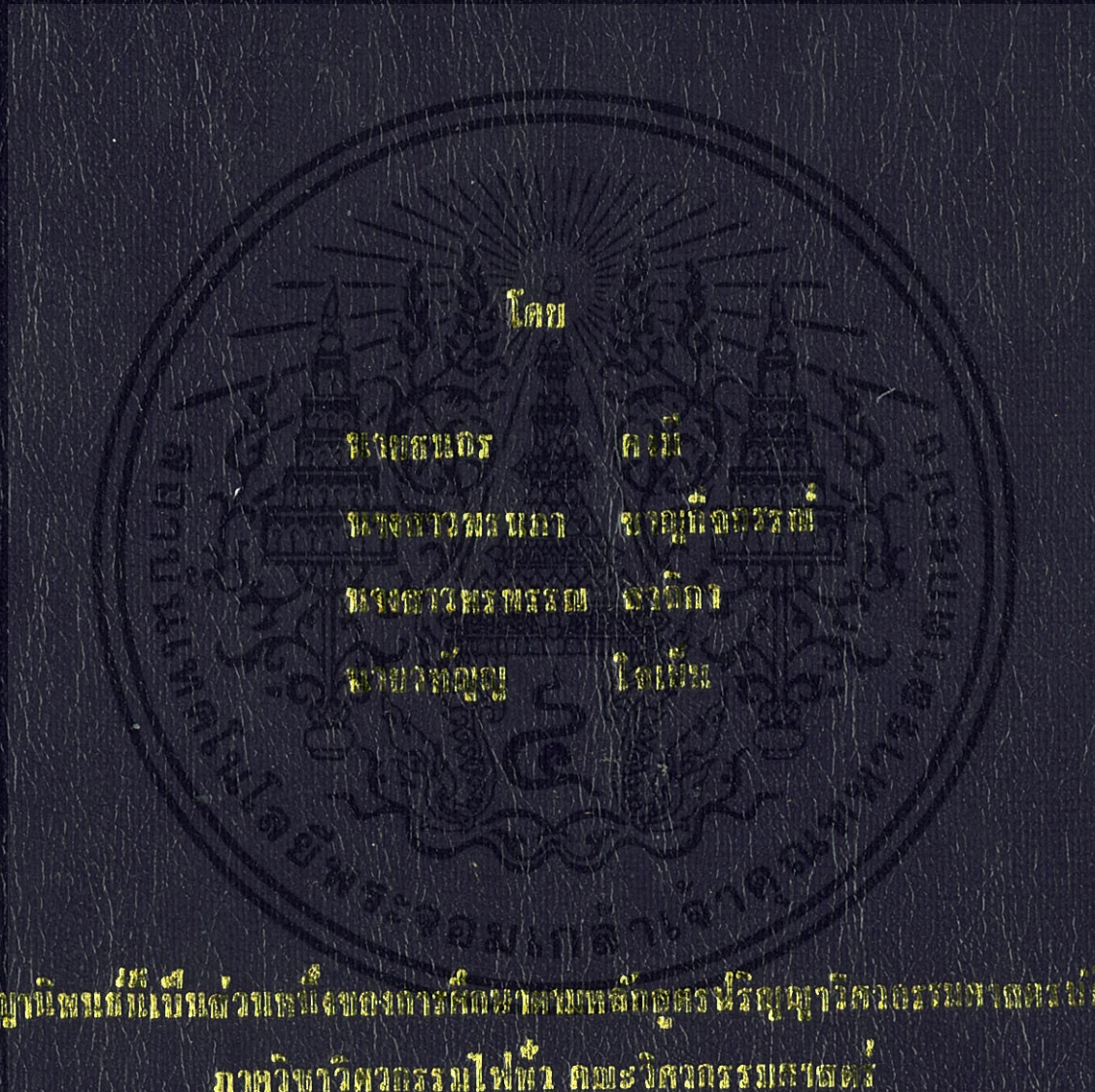


การออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็กชนิด
COMPACT INVERTER DESIGN



ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2552

การออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัด

COMPACT INVERTER DESIGN



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2557

COMPACT INVERTER DESIGN



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัด

COMPACT INVERTER DESIGN



โดย

นาย ธนกร คงมี

นางสาว พรนภา ชาญกิจกรรณ์

นางสาว พรพรรณ สาลีกา

นาย วทัญญู ใจเย็น

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปรศ.ดร์.สมยศ เกียรติวนิชวิไล เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัด

ผู้จัดทำ

1. นาย ชนกร คงมี
2. นางสาว พรนภา ชาญกิจกรรณ์
3. นางสาว พรพรรณ สาลิกา
4. นาย วทัตญญู ใจเย็น



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และห้ามจำหน่ายหรือเผยแพร่.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมชี้
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรชาติ สุวรรณงาม)

การออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัด

นาย ธนกร คงมี

นางสาว พรนภา ชาญกิจกรรม์

นางสาว พรพรรณ สาลิกา

นาย วทัณญ์ ใจเย็น

รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้นำเสนอการออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัดโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบอินเวอร์เตอร์ ขนาดกะทัดรัดและสามารถนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมได้ โดยออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัดเพื่อนำไปขับเคลื่อนอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส โดยอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถใช้ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ การควบคุมหรือการปรับความเร็วรอบนั้นทำได้จากการปรับขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบในโครงการนี้เป็นในรูปแบบของ เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์หรือฟูล-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ โดยใช้เทคนิคพัลส์วิดมอดูเลชัน ซึ่งสร้างสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Arm Cortex M4 (STM32F407VGT6) และใช้ออปโตคัปเปิลอร์ TLP250 เป็นอุปกรณ์ขับพาวเวอร์มอสเฟต (IRFP460) และแยกกราวด์ระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ โดยสร้างแบบจำลองและทดสอบจากโปรแกรม MATLAB Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPACT INVERTER DESIGN

Mr.Thanakorn kongmee

Ms.Pornnapa chankitkan

Ms.Pornpan salika

Mr.Watanyu jaiyen

Assoc.Prof.Dr.Somyot Kaitwanidvilai Advisor

Asst.Prof.Dr.Worachat Suwanngam Co-Advisor

ABSTRACT

This project presents a compact and commercial inverter design. The main objective of the project is to design a very compact and easy implementation to industry especially for a single phase induction motor drive. Inverter is the driver to control the speed of motor by varying the operating frequency and voltage. The topology of developed inverter in this project is H-Bridge inverter or full Bridge inverter using pulse width modulation (PWM) technique. The control signal is generated by the microcontroller Arm Cortex M4 (STM32F407VGT6). In addition, the TLP250 opto-coupler serves the purpose of isolation between the microcontroller circuit and the H-Bridge inverter, and supplies the required gate voltage for the turning on/off of the power MOSFET (IRFP460) in the H-bridge circuit. In this progress report, the H-Bridge inverter drive of a single phase induction motor was modeled and tested using MATLAB simulation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล และผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดี ตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆ บัณฑิตศึกษา ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆมาโดยตลอด โดยเฉพาะ นายภูมิ คงห้วยรอบ และนายสิริคุณ ตรีเทพประติมา ที่ช่วยเหลือและแนะนำในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการ ECC305 ECC406 ECC407 และ ECC308 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคน ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณห้อง ECC305 และ ECC 308 ที่ข้าพเจ้าใช้เป็นสถานที่ทำงานวิจัย นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณกมลวรรณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้ง พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	4
1.6 โครงสร้างเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 อินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส	5
2.1.1 ชนิดของอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส	5
2.1.2 การทำงานของอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส	6
2.2 เทคนิคการมอดูเลทความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM)	8
2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์	10
2.4 อินเวอร์เตอร์	12
2.4.1 ประเภทของอินเวอร์เตอร์	12
2.4.2 เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ (H-Bridge Inverter)	12
2.5 พาวเวอร์มอสเฟต (Power MOSFET)	14
2.5.1 การทำงานของมอสเฟต ชนิด N-Channel	15
2.6 ชุดขับสำหรับพาวเวอร์มอสเฟต	18
2.7 วงจรสแน็บเบอร์ (Snubber)	19
2.8 วงจรกรอง (Filter)	20
2.9 วงจรเดดไทม์ (Dead Time)	21
2.10 วงจรจ่ายไฟกระแสตรง (DC Power Supply)	22
2.10.1 ส่วนประกอบของวงจรจ่ายไฟกระแสตรง (DC Power Supply)	22
2.11 การระบายความร้อน	23
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 ส่วนประกอบหลักของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์	25
3.2 การออกแบบ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์	25
3.2.1 วงจรกำลัง (Main Circuit) ประกอบด้วย	25
3.2.2 ชุดวงจรขับเคลื่อน (Gate Drive Circuit)	26
3.2.4 วงจรไฟเลี้ยง (Power Supply)	27
3.2.5 วงจรควบคุม (Control Circuit)	28
3.2.6 วงจรจำกัดกระแสกระแสชากตอนเริ่มทำงาน	31
บทที่ 4 ผลการจำลอง และผลการทดลอง	32
4.1 บทนำ	32
4.2 การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	32
4.2.1 การจำลองสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท แบบยูนิโพลาร์	32
4.2.2 การจำลองการทำงานของ เอช - บริดจ์ อินเวอร์เตอร์	34
4.2.3 สรุปผลการจำลอง	36
4.3 การทดลองการทำงานของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์	36
4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	36
4.3.2 วงจรที่ใช้ในการปฏิบัติการทดลอง	37
4.3.4 ผลการทดลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์	37
4.3.5 สรุปผลการทดลอง	44
บทที่ 5 บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา	45
5.1 บทสรุป	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
5.3 แนวทางการพัฒนา	45
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก	48
ภาคผนวก ก	49
ภาคผนวก ข	54
ภาคผนวก ค	72
ประวัติผู้เขียน	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การต่อ Auxiliary Winding	7
2.2 วงจรสมมูลของ Induction Motor	7
2.3 กราฟแรงบิด (ก) อัตราส่วน V/F คงที่ (ข) อัตราส่วน V/F ไม่คงที่	8
2.4 PWM แบบ Bipolar และแบบ Unipolar	9
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์	11
3.1 ส่วนประกอบหลักของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์	25
3.2 ออปโตคัปเปิลอร์ เบอร์ TLP250	26
3.3 วงจรกำลังและวงจรชุดขับเกดที่ออกแบบ	28
3.4 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (ก) วงจรจริง (ข) แผนผังวงจร	29
3.5 ไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	30
4.1 แบบจำลองสัญญาณพัลส์วิตมอดูเลท แบบยูนิโพลาร์	32
4.2 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่สัญญาณไซน์ 50 Hz	32
4.3 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่สัญญาณไซน์ 40 Hz	33
4.4 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่สัญญาณไซน์ 30 Hz	33
4.5 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่สัญญาณไซน์ 20 Hz	33
4.6 กราฟสเปกตรัมของสัญญาณแรงดันเอาต์พุต	34
4.7 วงจร เอช – บริดจ์ อินเวอร์เตอร์	37
4.8 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 50.5 Hz	38
4.9 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 45.5 Hz	39
4.10 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 40.7 Hz	39
4.11 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 35.2 Hz	39
4.12 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 30.3 Hz	40
4.13 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 25.5 Hz	40
4.14 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 20.7 Hz	40
4.15 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 16.0 Hz	41
4.16 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 50.5 Hz	41
4.17 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 45.5 Hz	41
4.18 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 40.7 Hz	42
4.19 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 35.2 Hz	42
4.20 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 30.3 Hz	42
4.21 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 25.5 Hz	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.22	กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 20.7 Hz	43
4.23	กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 16.0 Hz	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง	34
4.2 ตารางเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์จากทฤษฎีและผลการ Simulation	35
4.3 พิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	37
4.4 ตารางผลการทดลองปรับความเร็วรอบของมอเตอร์	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในภาคอุตสาหกรรม มอเตอร์ไฟฟ้ามีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการผลิต ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์ โดยการนำอินเวอร์เตอร์มาใช้เป็นส่วนขับเคลื่อนมอเตอร์ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ช่วยให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพในการควบคุมการผลิตและเป็นส่วนที่ช่วยประหยัดพลังงานของมอเตอร์ได้มาก โดยอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบให้เหมาะสมกับสถานะของโหลด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ในกระบวนการต่างๆที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา สามารถประหยัดพลังงานของมอเตอร์อันเนื่องมาจากความเร็วรอบที่ลดลงในแต่ละช่วงเวลาได้

จากข้อมูลสถิติความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศ ปี 2555 - 2557 ของกระทรวงพลังงาน [1] พบว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจ โดยเฉพาะภาคอุตสาหกรรม ซึ่งความต้องการพลังงานที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องมีผลต่อความมั่นคงในการจัดหาพลังงาน และต้นทุนพลังงานที่มีแนวโน้มสูงขึ้น จึงได้มีการรณรงค์ลดการใช้พลังงานจากหลายหน่วยงาน โดยกระทรวงอุตสาหกรรมได้ริเริ่มโครงการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานภาคอุตสาหกรรม เพื่อหวังให้สถานประกอบการทุกแห่งได้ร่วมกันประหยัดไฟฟ้า ตามมติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2556 ให้หน่วยงานต่างๆช่วยกันประหยัดพลังงาน [2] นอกจากนี้ แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ. 2554 - 2573) ได้ประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคในการประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรมเป็น 13,790 ktoe แบ่งเป็นพลังงานความร้อน 10,950 ktoe และพลังงานไฟฟ้า 33,500 GWh โดยมีเป้าหมายประหยัดพลังงาน 11,300 ktoe ในปี 2573 [3] ซึ่งการใช้อินเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยประหยัดพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในงานด้านการผลิตในอุตสาหกรรม เช่น เครื่องจักรกลอุตสาหกรรมทุกประเภทที่ใช้มอเตอร์เป็นแรงขับเคลื่อน ระบบสายพานลำเลียง กระบวนการผลิตที่ต้องการควบคุมประสิทธิภาพและคุณภาพการผลิตให้คงที่ และใช้ในงานทั่วไปที่มีมอเตอร์เป็นตัวกำหนดพลังงานกล เช่น ระบบควบคุมปั๊มน้ำ พัดลม ระบบปรับอากาศ ในโรงงานและอาคารขนาดใหญ่ ระบบอัดอากาศ ระบบกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในที่จอดรถ ระบบการลำเลียง เช่น ลิฟต์ขนส่ง บันไดเลื่อน เป็นต้น โดยอินเวอร์เตอร์นั้นเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยควบคุมจากสัญญาณขับจากวงจรควบคุมของอินเวอร์เตอร์ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการนำเสนอการปรับความเร็วรอบของอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสโดยการควบคุมความถี่ของวงจรขับมอเตอร์ [4] โดยออกแบบวงจรระบบควบคุมความถี่ ซึ่งมี 4 ส่วน คือ วงจรเรียงกระแส (Rectifier) วงจรสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท (PWM Control

Circuit) ใช้ไอซี SG3525A สร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท วงจรขับเกต (Driver Circuit) ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ C124 และ MJE13002 เป็นอุปกรณ์ในวงจรขับเกต และวงจร เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ (H-Bridge Inverter) ใช้พาวเวอร์มอสเฟต (Power MOSFET) เบอร์ IRF 840 เป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยมีวงจรภาคจ่ายไฟ (Power Supply) 2 วงจร คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 โวลต์ เพื่อจ่ายไฟให้กับวงจร เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ เพื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลทและวงจรขับเกต โดยผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยการปรับความถี่ของสัญญาณขับเกต ซึ่งมีย่านการทำงานที่ความถี่ 16 – 56 เฮิรท์ซ์ ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ 480 – 1680 รอบต่อนาที (rpm) และใน [5] การพัฒนาการควบคุมความเร็วรอบของอินดักชันมอเตอร์ด้วยการควบคุมความถี่ โดยใช้ไอซีแอนดลจิก (AND logic) เบอร์ 74AC08 ไอซี SN7404 hex inverter และใช้ออปแอมป์ (Operational Amplifier) เบอร์ LM741 สร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท (Pulse Width Modulation: PWM) เพื่อนำไปใช้ในวงจรขับเกตของมอสเฟต โดยใช้พาวเวอร์มอสเฟต (Power MOSFET) เบอร์ IRF720 เป็นอุปกรณ์สวิตช์ในเอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ และใช้พาวเวอร์ทรานซิสเตอร์ (Power Transistor) เบอร์ MJE 13002 และเบอร์ C124 เป็นวงจรขับเกตมอสเฟต (Driver circuit)

ปัจจุบันอินเวอร์เตอร์ได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทั้งการสร้างสัญญาณขับเกตของสวิตช์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพ ระบบมีเสถียรภาพคงที่ และง่ายต่อการใช้งาน รวมถึงมีการพัฒนาการป้องกันการทำงานของอินเวอร์เตอร์จากแรงดันเกิน การลัดวงจร และจากผลของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ มีการนำเสนองานวิจัย การควบคุมอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ [6] ตระกูล PIC18F2520 ในการสร้าง Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) ควบคุม เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ เพื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการควบคุมความถี่ และใช้ออปโตคัปเปิลอร์ (Opto Coupler) เป็นวงจรขับเกตแยกระหว่างกราว์นของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และกราว์นของวงจร เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ เพื่อขับนำพาวเวอร์มอสเฟต (Power MOSFET) ในวงจร เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณความเร็วป้อนกลับ (speed's feedback) และสร้างสัญญาณที่ปรับเปลี่ยนความกว้างของพัลส์ เพื่อให้ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับความถี่คงที่ (V/F Constant Control) เพื่อให้แรงบิด (Torque) มีค่าคงที่เมื่อความเร็วเปลี่ยนไป ซึ่งเมื่อจำลองการทำงานของเอช-บริดจ์ อินเวอร์ ที่ใช้งานกับอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟสชนิด คาปาซิเตอร์ สตาร์ท-รัน มอเตอร์ จากโปรแกรม MATLAB/Simulink เมื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ แรงบิดคงที่ และสามารถปรับความถี่ได้ 16-50 เฮิรท์ซ์

โครงการนี้ได้นำเสนอการออกแบบ อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส (Single Phase Inverter) หรือ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ (H-Bridge Inverter) ขนาดกะทัดรัดและเชิงพาณิชย์ สำหรับขับเคลื่อนอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส โดยใช้พาวเวอร์มอสเฟต (Power MOSFET) เป็นอุปกรณ์สวิตช์ และสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน (Pulse Width Modulation: PWM) จากชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY มีSTM32F407VGT6 เป็น MCU ซึ่งเป็น

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM Cortex-M4 เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของสวิตช์ รวมถึงออกแบบ วงจรภาคจ่ายไฟ (Power Supply) วงจรป้องกันอินเวอร์เตอร์จากสัญญาณรบกวน และผลจาก อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยออกแบบให้มีราคาต้นทุนในการผลิตต่ำและมีคุณภาพ สามารถ นำมาใช้งานได้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้าง หลักการทำงาน และการควบคุมการทำงานของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ สำหรับใช้ขับเคลื่อนอินดักชันมอเตอร์มอเตอร์หนึ่งเฟส

1.2.2 เพื่อออกแบบ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ขนาดกะทัดรัด รวมถึงศึกษาการสร้าง สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท (Pulse Width Modulation) เพื่อควบคุมขาเกิดของอุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้ใน อินเวอร์เตอร์ และการป้องกันการรบกวนการทำงานของอินเวอร์เตอร์

1.2.3. เพื่อสร้าง เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ แบบกะทัดรัดเพื่อนำไปใช้จริงในการ ขับเคลื่อนอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างอินเวอร์เตอร์ สำหรับขับเคลื่อน อินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส โดยขอบเขตของโครงการนี้คือ สร้าง เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ แบบ กะทัดรัด ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน (Pulse Width Modulation) เพื่อเป็นสัญญาณขับเคลื่อนของสวิตช์ และจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยใช้ โปรแกรมMATLAB/Simulink รวมทั้งศึกษาผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ ปรับปรุง และ พัฒนา เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 จัดเตรียมหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย ศึกษาข้อมูลและอุปกรณ์ที่ เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย โดยมุ่งศึกษาการออกแบบอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนอินดักชันมอเตอร์ หนึ่งเฟส ขนาดกะทัดรัด

1.4.2 จัดหาข้อมูลและเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งหมด รวมถึงศึกษา วิธีการใช้เครื่องมือชนิดต่างๆ

1.4.3 สร้างแบบจำลอง ออกแบบ และสร้างอินเวอร์เตอร์

1.4.4 ทดสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์

1.4.5 สรุปผลงานของงานวิจัย เพื่อจัดทำและนำเสนอปริญาานิพนธ์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1.5.1 โครงการนี้จะทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัด

1.5.2 โครงการนี้เป็นการนำความรู้จากทฤษฎี โดยเฉพาะที่เกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในการวิเคราะห์การออกแบบอินเวอร์เตอร์ รวมถึงการเขียนไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งย่อมก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ศึกษาค้นคว้าวิจัยในสาขาดังกล่าว

1.5.3 โครงการนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาและออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัดเพื่อนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

1.6 โครงสร้างเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์

ปฏิญานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วย เนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการจัดทำ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัดสำหรับขับเคลื่อนอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส ซึ่งสามารถแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของโครงการ วัตถุประสงค์ของโครงการ ขอบเขตของการศึกษา แผนการดำเนินโครงการ และประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอินเวอร์เตอร์ การสร้างสัญญาณพัลส์วิตมอดูเลท (Pulse Width Modulation) และการออกแบบวงจรการป้องกันการรบกวนการทำงานของอินเวอร์เตอร์

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์แบบกะทัดรัด การสร้างสัญญาณพัลส์วิตมอดูเลทจากไมโครคอนโทรลเลอร์และจัดสร้างชิ้นงานจริง

บทที่ 4 แสดงผลการทดลอง และผลการจำลอง เอช บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ที่ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

บทที่ 5 บทสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ประกอบด้วย รูปภาพแสดงอินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นจริง รายการเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดสร้างชิ้นงานต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินдукชันมอเตอร์หนึ่งเฟส

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current Motor) หรือมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) คือ เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นพลังงานกล มีทั้งที่เป็นชนิด 1 เฟส (Single Phase) และชนิด 3 เฟส (Three Phase)

2.1.1 ชนิดของอินдукชันมอเตอร์หนึ่งเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับชนิด 1 เฟส เป็นมอเตอร์ชนิดทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

ก. เครื่องกลชนิดกรงกระรอก ได้แก่ สปลิตเฟสมอเตอร์ (Split Phase Motor) คาปาซิเตอร์มอเตอร์ (Capacitor Motor) และเซดเดดโพลมอเตอร์ (Shaded Pole Motor)

ข. เครื่องกลชนิดโรเตอร์พันขดลวด ได้แก่ ยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor) และรีพัลชันมอเตอร์ (Repulsion Motor)

1.) สปลิตเฟสมอเตอร์ (Split Phase Motor)

Split Phase Motor มีขนาดแรงม้าขนาดตั้งแต่ 1/4 แรงม้า, 1/3 แรงม้า, 1/2 แรงม้า จะมีขนาดไม่เกิน 1 แรงม้า มอเตอร์ชนิดนี้นิยมใช้งานมากในตู้เย็น เครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก เครื่องซักผ้า เป็นต้น

2.) คาปาซิเตอร์มอเตอร์ (Capacitor Motor)

คาปาซิเตอร์มอเตอร์ เป็นมอเตอร์ที่มีลักษณะคล้าย Split Phase Motor แต่มีคาปาซิเตอร์เพิ่มขึ้นมาทำให้มอเตอร์มีคุณสมบัติพิเศษกว่า Split Phase Motor คือมีแรงบิดขณะสตาร์ทสูง ใช้กระแสขณะสตาร์ทน้อย มีขนาดตั้งแต่ 1/20 แรงม้า ถึง 10 แรงม้า มอเตอร์ชนิดนี้นิยมใช้งานเกี่ยวกับ ปั้มน้ำ เครื่องอัดลม ตู้แช่ ตู้เย็น ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

ก. คาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ (Capacitor Start Motor)

ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของ Capacitor Start Motor เหมือนกับ Split Phase Motor แต่วงจรถดลวดสตาร์ทพันด้วยขดลวดขนาดใหญ่ขึ้นกว่า Split Phase Motor และพันจำนวนรอบมากขึ้นกว่าขดลวดชุดรัน แล้วต่อตัวคาปาซิเตอร์ (ชนิดอิเล็กโทรไลต์) อนุกรมเข้าในวงจรถดลวดสตาร์ท มีสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางตัดตัวคาปาซิเตอร์และขดลวดสตาร์ทออกจากวงจร

ข. คาปาซิเตอร์รันมอเตอร์ (Capacitor Run Motor)

ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของคาปาซิเตอร์รันมอเตอร์เหมือนกับชนิดสตาร์ทมอเตอร์ แต่ไม่มีสวิตช์เหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ตัวคาปาซิเตอร์ (คาปาซิเตอร์ประเภทน้ำมัน หรือกระดาษ โลหะ) จะต่ออยู่ในวงจรตลอดเวลา ทำให้ค่า Power Factor ดีขึ้น

ค. คาปาซิเตอร์สตาร์ทและรันมอเตอร์ (Capacitor Start and Run Motor)

ลักษณะโครงสร้างของคาปาซิเตอร์และรันมอเตอร์ชนิดนี้จะมีคาปาซิเตอร์ 2 ตัว คือ คาปาซิเตอร์สตาร์ทกับคาปาซิเตอร์รัน คาปาซิเตอร์สตาร์ทต่ออนุกรมอยู่กับสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางหรือเรียกว่า เซ็นติฟูกัลสวิตช์ ส่วนคาปาซิเตอร์รันจะต่ออยู่กับวงจรตลอดเวลา คาปาซิเตอร์ทั้งสองจะต่อขนานกัน ซึ่งค่าของคาปาซิเตอร์ทั้งสองนั้นมีค่าแตกต่างกัน

3.) รีพัลชันมอเตอร์ (Repulsion Motor)

รีพัลชันมอเตอร์ เป็นมอเตอร์ที่มีขดลวดโรเตอร์ (Rotor) ต่อเข้ากับคอมมิวเตเตอร์ และมีแปรงถ่านเป็นตัวต่อลวดวงจร จึงทำให้ปรับความเร็วและแรงบิดได้ โดยการปรับตำแหน่งแปรงถ่าน สเตเตอร์ (Stator) จะมีขดลวดพันอยู่ในร่องเพียงชุดเดียวเหมือนกับขดรีนของสปลิทเฟสมอเตอร์ เรียกว่า ขดลวดเมน (Main Winding) ต่อกับแหล่งจ่ายไฟโดยตรง แรงบิดเริ่มหมุนสูง ความเร็วคงที่มีขนาด 0.37-7.5 กิโลวัตต์ (10 แรงม้า) ใช้งานกับ ปัมคอมเพลสเซอร์ ปัมลม ปัมน้ำขนาดใหญ่

4.) ยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor)

Universal Motor เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กมีขนาดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 1/200 แรงม้าถึง 1/30 แรงม้า นำไปใช้ได้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง และใช้ได้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 1 เฟส มอเตอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติที่โดดเด่น คือให้แรงบิดเริ่มหมุนสูง นิยมนำไปใช้เป็นตัวขับเคลื่อนเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เช่น เครื่องบดและผสมอาหาร มีดโกนหนวดไฟฟ้า เครื่องนวดไฟฟ้า มอเตอร์จักรเย็บผ้า ส่วนไฟฟ้า เป็นต้น

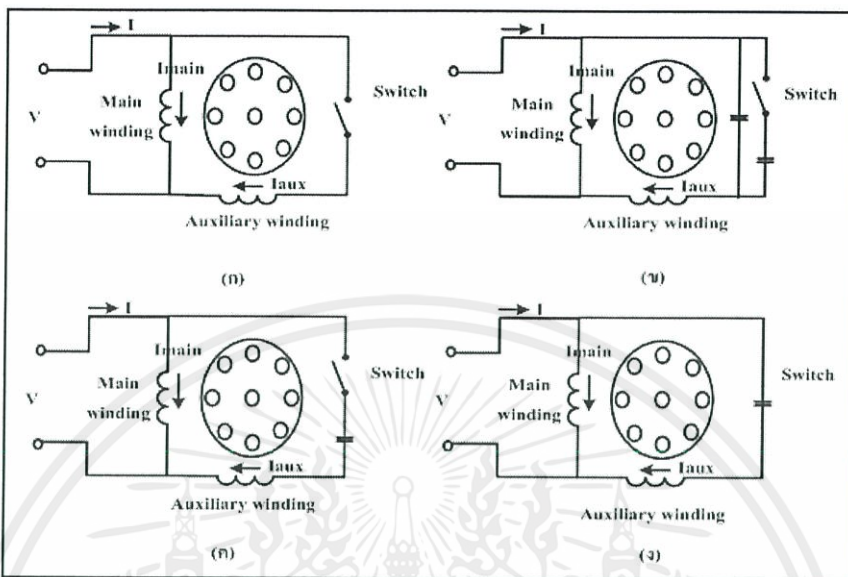
5.) เซดเดดโพลมอเตอร์ (Shaded Pole Motor)

Shaded Pole Motor เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กที่สุดมีแรงบิดเริ่มหมุนต่ำมาก อาศัยหลักการสร้างสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่โดยใช้ผลของ Shading Coil นำไปใช้งานได้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็กๆ เช่น ไดรเป่าผม พัดลมขนาดเล็ก

2.1.2 การทำงานของอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส

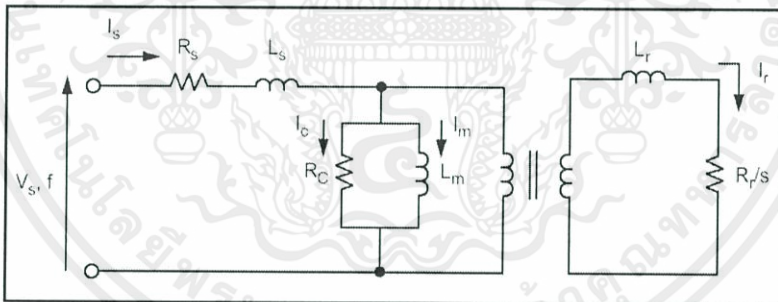
มอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับแบบหนึ่งเฟสมีโครงสร้างคล้ายกับมอเตอร์ 3 เฟส แต่มีข้อแตกต่างกันที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ 1 เฟสมีการพันขดลวดในลักษณะแบบเฟสเดียว (Main Winding) และต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเพียง 1 เฟส ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์จึงไม่ใช่สนามแม่เหล็กที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคจรเหมือนกับในกรณีของมอเตอร์ 2 เฟส หรือ 3 เฟสที่ได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 2 เฟส หรือ 3 เฟส จึงเป็นเหตุให้สนามแม่เหล็กที่เกิดการกลับไปกลับมาอยู่ที่สเตเตอร์ซึ่งไม่สามารถทำให้มอเตอร์เกิดแรงบิด และหมุนขึ้นได้ในขณะที่โรเตอร์นั้นยังหยุดอยู่ ซึ่งเป็นสาเหตุว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสไม่สามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเอง การทำให้มอเตอร์ 1 เฟส หมุนได้นั้น ทำได้โดยการต่อขดลวดอีก 1 ชุด เรียกว่า auxiliary winding ซึ่งอาศัยความต่างเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดทั้งสองบนสเตเตอร์ที่วางทำมุมกัน 90 องศา ดังนั้นมอเตอร์จะมีคุณสมบัติหรืออาการเช่นเดียวกับมอเตอร์ 2 เฟสกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดทั้งสองจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน จึงทำให้มอเตอร์สามารถเริ่มหมุนด้วยตัวเองได้ ดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส จะประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดคือ ขดลวดชุดสตาร์ทหรือขดลวดช่วย (Starting Winding or

Auxiliary Winding) และขดลวดชุดรันหรือขดลวดหลัก (Running Winding or Main Winding) ขดลวดทั้งสองวางทำมุมกัน 90 องศาทางไฟฟ้า และต่อคร่อมเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียว ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การต่อ Auxiliary Winding (ก) Split Phase Motor (ข) Capacitor Start and Run Motor (ค) Capacitor Start Motor (ง) Capacitor Run Motor

2.1.2 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบ v/f constant control



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของ Induction Motor

จากรูปที่ 2.2 R_s คือ ความต้านทานสเตเตอร์ (Stator Resistance), L_s คือความเหนี่ยวนำสเตเตอร์ (Stator Inductance), I_s คือกระแสสเตเตอร์ (Stator Current), V_s คือแรงดันที่สเตเตอร์, L_m คือ Magnetizing Inductance, I_m คือ Magnetizing Current, L_r คือความเหนี่ยวนำโรเตอร์ (Rotor Inductance), R_r คือความต้านทานโรเตอร์ (Rotor Resistance), I_r คือกระแสที่โรเตอร์ และ s คือสลลิป (Slip)

จากหลักการทำงานพื้นฐานของ Induction motor ความเร็วรอบของมอเตอร์ตามความต้องการของโหลดนั้นสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่าความถี่ (frequency) ตามสมการที่ (1) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คนแปลกหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_s = \frac{120f}{p} \tag{1}$$

เมื่อ Pole มีค่าคงที่ แต่เนื่องจากเมื่อความถี่เปลี่ยนแล้วจะทำให้ X_L เปลี่ยน ซึ่งถ้า X_L ของ L_M เปลี่ยนจะทำให้ I_M เปลี่ยนแปลงด้วยในขณะที่แรงดัน V_s เท่าเดิม เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างจากสเตเตอร์ เพื่อส่งพลังงานไปที่โรเตอร์ขึ้นอยู่กับขนาดของ I_M ถ้า I_M เปลี่ยน ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กนี้ก็เปลี่ยนด้วย การปรับความถี่ให้มีความมากขึ้นจะทำให้ X_L มีค่ามากขึ้น และ I_M มีค่าลดลง ส่งผลให้ขนาดฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าลดลง เนื่องจากสมการที่ (2)

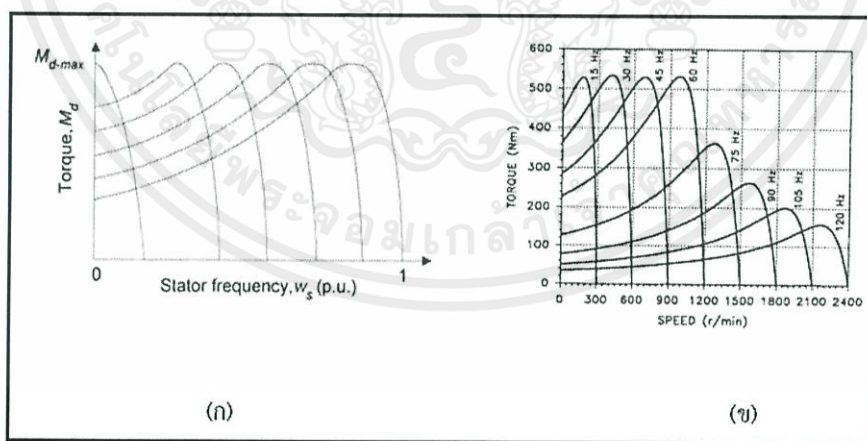
$$V = 4.44Nf\Phi \quad (2)$$

เมื่อจำนวนรอบขดลวดมีค่าคงที่ จะได้ $\Phi \propto \frac{V}{f}$ เมื่อขนาดของสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง แรงบิด (Torque) ก็จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันถ้าลดความถี่ในขณะที่ V_s เท่าเดิม กระแส I_M มีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น แรงบิด (Torque) จึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อกระแสมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแกนเหล็กจะเกิดการอิ่มตัว และสนามแม่เหล็กมีมากเกินไปส่งผลให้ความร้อนที่แกนเหล็กสูงขึ้น ไม่ว่า I_M จะเพิ่มหรือลดต่างส่งผลเสียต่อมอเตอร์ ดังนั้นจึงต้องให้ I_M มีค่าคงที่ ไม่ว่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงไปเท่าไรก็ตาม ซึ่งจะทำให้ขนาดสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ ส่งผลให้มอเตอร์มีแรงบิด (Torque) ได้สูงสุดคงที่ ดังรูปที่ 2.3 (ก)

$$I_M = \frac{V}{2\pi fL} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) จะเห็นว่า ถ้าคงสัดส่วน v กับ f ให้คงที่ กระแส I_M จะคงที่

V/F constant control มีข้อดีคือ สามารถใช้กับมอเตอร์ทั่วไปได้ โดยไม่ต้องทราบข้อมูลพารามิเตอร์ภายใน

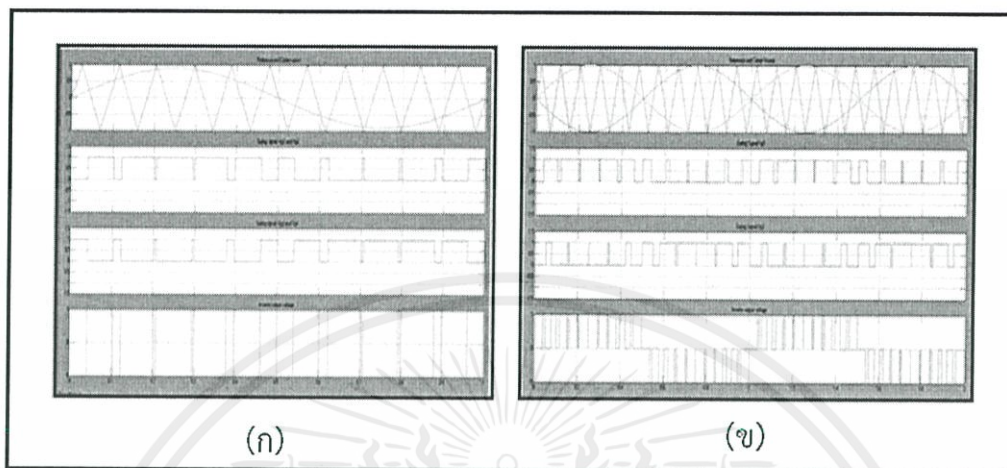


รูปที่ 2.3 กราฟแรงบิด (ก) อัตราส่วน V/F คงที่ (ข) อัตราส่วน V/F ไม่คงที่ [7]

2.2 เทคนิคการมอดูเลทความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM)

PWM (Pulse Width Modulation) คือ การปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณอ้างอิง (Referent) ที่เป็นสัญญาณไซน์ (Sine Wave) โดยให้เป็นสัญญาณความถี่มูลฐาน ซึ่งเป็นความถี่เดียวกันกับความถี่มูลฐานที่มอเตอร์จะได้รับ

กับสัญญาณพาหะ (Carrier Wave) ที่เป็นสัญญาณฟันเลื่อย (Saw Tooth) หรือสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular Wave) ที่ความถี่มากกว่าสัญญาณเอาต์พุตอ้างอิง (Reference Output) หลายเท่า ทำหน้าที่ร่วมกับสัญญาณความถี่มูลฐานเพื่อปรับให้ระดับแรงดัน rms เปลี่ยนแปลงไปเพื่อให้ค่า v/f คงที่



รูปที่ 2.4 (ก) PWM แบบ Bipolar (ข) PWM แบบ Unipolar

จากรูปที่ 2.4 แสดงการสร้างสัญญาณ PWM ซึ่งจะนำสัญญาณนี้ไปจุดชนวนตัวอุปกรณ์สวิตซ์ที่ใช้ในภาคกำลังต่อไป โดยสัญญาณ PWM ที่ได้เกิดจากการเปรียบเทียบจุดตัดของสัญญาณทั้งสอง จะเห็นได้ว่าจุดตัดนี้จะเป็นตัวกำหนดการเปิด-ปิดของสวิตซ์ที่ภาคอินเวอร์เตอร์ ทำให้อุปกรณ์สวิตซ์แต่ละชุดที่ภาคอินเวอร์เตอร์ต้องทำงานแบบสวิตซ์ตามรูปสัญญาณนี้ เรียกความกว้างระหว่างพัลส์ว่า ความกว้างพัลส์ (Pulse Width) และเรียกช่องว่างระหว่างพัลส์ว่า ความกว้างนอตช์ (Notch Width) นอกจากนี้เรายังสามารถเปลี่ยนความถี่และแรงดัน rms ของรูปคลื่น PWM นี้ได้ด้วยการเปลี่ยนความถี่และขนาดของสัญญาณรูปไซน์หรือสัญญาณมอดูเลต โดยจะทำให้ความถี่มูลฐานของรูปคลื่น PWM เปลี่ยน แต่การเปลี่ยนขนาดของสัญญาณไซน์จะทำให้ค่าแรงดัน rms ของ PWM เปลี่ยน ซึ่งถ้าควบคุมอย่างเป็นสัดส่วนกัน ผลคือทำให้ v/f คงที่

รูปคลื่น PWM นี้ เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อพิจารณาถึงความถี่ต่างๆที่แฝงอยู่ในตัวของรูปคลื่นโดยใช้การวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ สามารถเขียนสมการของคลื่น PWM ในรูปของอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

$$V(t) = m_a \frac{V_d}{2} \sin(\omega_s t + \phi) + \text{Bessel function harmonic term} \quad (4)$$

ω_s คือความถี่มูลฐานซึ่งคือความถี่ของรูปคลื่นไซน์, ϕ คือมุมต่างเฟสของสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลต และ m_a คือดัชนีการมอดูเลต (Modulation Index)

ค่าดัชนีการมอดูเลต (Modulation Index) คือ อัตราส่วนของแอมพลิจูดของสัญญาณมอดูเลต (Sine Wave) ต่อแอมพลิจูดของสัญญาณพาหะ (Triangle Wave Form)

$$m_a = \frac{\text{Amplitude of modulating wave form}}{\text{Amplitude of carrier wave form}} \quad (5)$$

จากสมการที่ (4) สามารถปรับค่าแอมพลิจูดของ $v(t)$ ได้โดยการปรับ m_a ซึ่งสามารถปรับค่า m_a ได้จาก 0 - 1 โดยที่ $m_a = 0$ สัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลทจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม และที่ $m_a = 1$ ช่องว่างระหว่างพัลส์ หรือความกว้างนอตช์ จะหายไป ซึ่งถ้า m_a มีค่ามาก จะทำให้ฟังก์ชันที่เป็นผลบวกอนุกรมของคลื่นที่เป็นฮาร์มอนิกส์ (Bessel Function Harmonic terms) มีบทบาทน้อยลง

จากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่น PWM พบว่าความถี่ของฮาร์มอนิกส์มีความสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณพาหะ และความถี่มูลฐานอยู่ในรูป $Mw_c + Nw_s$ เมื่อ w_c เป็นความถี่คลื่นพาหะ w_s เป็นความถี่มูลฐาน M และ N เป็นจำนวนเต็ม โดยที่ $M+N$ = จำนวนเต็มคี่ และเรียกอัตราส่วนของความถี่พาหะต่อความถี่มูลฐานว่า อัตราส่วนความถี่การมอดูเลท

อัตราส่วนความถี่การมอดูเลท (Frequency Modulation) คือ อัตราการของความถี่ของสัญญาณพาหะ (Triangle Wave Form) ต่อความถี่ของสัญญาณมอดูเลท (Sine wave)

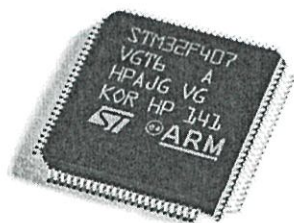
$$m_f = \frac{\text{frequency of carrier wave form}}{\text{frequency of modulating wave form}} \quad (6)$$

จากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ พบว่าแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไม่ขึ้นอยู่กับค่า m_f และจะน้อยลงเรื่อยๆ ตามการเพิ่มของค่า M และ N ที่มากขึ้น แต่ค่า m_f จะมีผลต่อฮาร์มอนิกส์ที่ไหลเข้ามอเตอร์ กล่าวคือ ยิ่งค่า m_f มีค่าสูงมากขึ้น กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์จะมีรูปใกล้คลื่นไซน์มากขึ้น และฮาร์มอนิกส์ต่างๆ จะถูกรองโดยค่าความเหนี่ยวนำของตัวมอเตอร์ แต่เมื่อ m_f มีค่ามากจะทำให้เกิดการเปิด-ปิดของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่ภาคอินเวอร์เตอร์เป็นจำนวนมากครั้ง เป็นผลให้เกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากการเปิด-ปิด (Switching Loss) สูง

ในการเปรียบเทียบ (Comparator) สัญญาณรูปสามเหลี่ยมหรือสัญญาณพาหะจะต้องมีความเป็นเชิงเส้นสูง (Linearity) จึงจะได้สัญญาณ PWM ที่มีความผิดเพี้ยนน้อย ซึ่งในการสร้างสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) นั้นสามารถสร้างได้จากวงจรนาฬิกาหรือสร้างจากการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอา ซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถังเดียวกัน ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์

โครงสร้างไมโครคอนโทรลเลอร์แบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ

1. หน่วยประมวลผลกลาง (CPU: Central Processing Unit)

2. หน่วยความจำ (Memory) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ROM และ RAM โดย ROM จะใช้เก็บโปรแกรมคำสั่ง (Program Memory) ซึ่งข้อมูลที่เก็บในหน่วยความจำประเภทนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือ RAM เป็นหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นที่พักข้อมูลก่อนที่จะถูกประมวลผลด้วยหน่วยประมวลผลกลาง หน่วยความจำส่วนนี้เป็นหน่วยความจำชนิด Volatile Memory คือต้องการไฟเลี้ยงในการทำงานของหน่วยความจำ ดังนั้นเมื่อไม่มีการจ่ายไฟเลี้ยง ข้อมูลทั้งหมดจะหายไป แต่เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเก็บค่าตัวแปรไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงใส่หน่วยความจำชนิด อีอีพรอม (EEPROM: Erasable Electrically Read Only Memory) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง

3. Peripheral Interface คือส่วนที่ใช้ติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น พอร์ตอินพุต (Input Port) พอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) การสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter: UART) และอื่นๆ ซึ่งการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกถือว่าเป็นจุดเด่นของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อที่จะสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ได้ เช่น การรับค่าจากเซนเซอร์ การส่งสัญญาณขั้วมอเตอร์ให้แก่วงจรขยายเพื่อไปขับมอเตอร์ การส่งข้อมูลเพื่อไปแสดงผลยังจอ LCD รวมถึงการติดต่อรับส่งข้อมูลกับคอมพิวเตอร์

4. ช่องทางเดินของสัญญาณ หรือบัส (Bus) คือเส้นทางการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่าง ซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต เป็นลักษณะของสายสัญญาณจำนวนมากอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (Data Bus) บัสแอดเดรส (Address Bus) และบัสควบคุม (Control Bus)

5. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา เป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับกำหนัดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกา มีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้น ส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นมีความเร็วใน

เอกสาร การประมวลผลสูงตามไปด้วย รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 อินเวอร์เตอร์

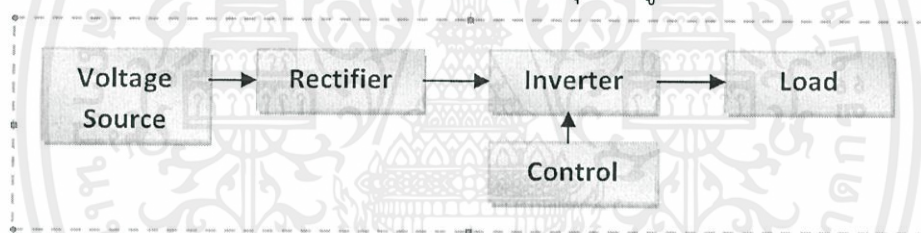
อินเวอร์เตอร์ คือ อุปกรณ์แปลงแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เป็นแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีขนาดและความถี่ตามต้องการ สามารถนำไปใช้ได้กับระบบแหล่งจ่ายไฟสลับสำรอง ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ เป็นต้น

2.4.1 ประเภทของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส (Single Phase Inverter) และอินเวอร์เตอร์สามเฟส (Three Phase Inverter) นอกจากนี้อินเวอร์เตอร์ยังสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างและการนำไปใช้งานได้ 2 ประเภทคือ อินเวอร์เตอร์แบบป้อนกระแส (Current Source Inverters) และอินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดัน (Voltage Source Inverters) ซึ่งแบ่งได้เป็น Square-wave inverters, Pulse-width-modulated (PWM) inverters และ Functional requirements of grid-connected inverters

2.4.2 เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ (H-Bridge Inverter)

เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ (H-Bridge Inverter) หรือ ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full Bridge Inverter) คือ อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่มีแรงดันเอาต์พุตเต็มลูกคลื่น



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์

บล็อกไดอะแกรมของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบด้วย

1.) Rectifier circuit

วงจร Rectifier หรือวงจรเรียงกระแส ทำหน้าที่แปลงผันหรือเปลี่ยนแรงดันจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรประกอบด้วย Power Diode 4 ตัว ในกรณีที่อินพุตเป็นแบบเฟสเดียว สำหรับอินเวอร์เตอร์บางประเภทจะใช้ SCR ทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแส ซึ่งสามารถควบคุมระดับแรงดันในวงจร DC Link ได้

2.) DC Link

DC Link หรือวงจรเชื่อมโยงทางดีซี คือวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ พักตึงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 400 โวลต์ สำหรับแรงดันอินพุต 1 เฟส ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงสั้นเนื่องจากการเบรกหรือมีการลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว

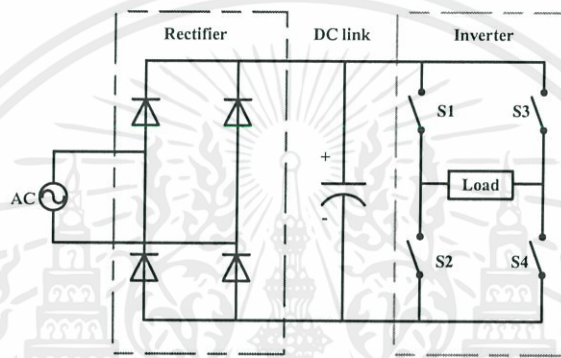
3.) Inverter Circuit

วงจรอินเวอร์เตอร์ คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการกรองจากวงจร DC link เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์ เช่น ทรานซิสเตอร์ ไอจีบีที (IGBT) และมอสเฟต (MOSFET) 4 สวิตช์ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

4.) Control Circuit

วงจรควบคุม ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ โดยอาศัยเทคนิคพัลส์วิดมอดูเลชัน (Pulse Width Modulation: PWM)

หลักการทำงานของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์



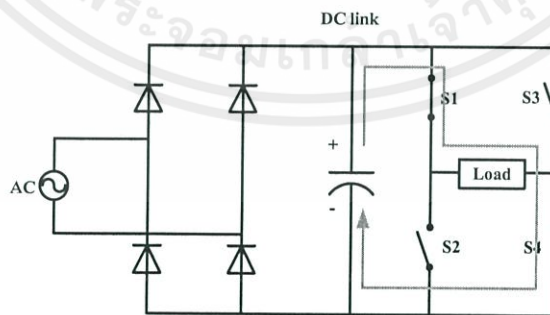
รูปที่ 2.7 เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 2.7 การทำงานของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ เป็นการทำงานของสวิตช์ (S1, S2, S3, S4) โดยสวิตช์ S1, S3 และสวิตช์ S2, S4 จะสลับกันทำงานทีละคู่

1.) สวิตช์ S1 และ S4 ทำงาน

เมื่อสวิตช์ S1, S4 ทำงาน สวิตช์ S2, S3 จะไม่ทำงาน ทิศทางของกระแสจะไหลดัง

รูปที่ 2.8 และแรงดันที่ตกคร่อมโหลดมีค่าเท่ากับ $+V_s$



รูปที่ 2.8 สวิตช์ S1 และ S3 ทำงาน

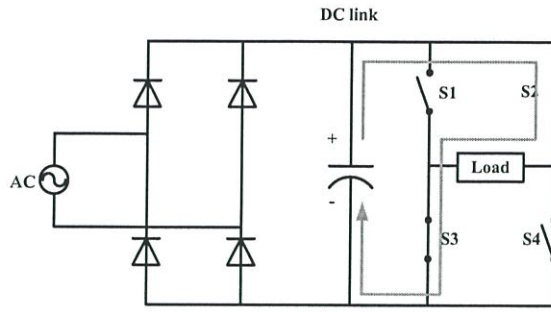
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.) สวิตช์ S2 และ S3 ทำงาน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

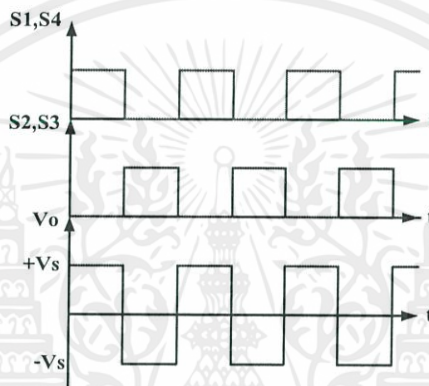
เมื่อสวิตช์ S2, S3 ทำงาน สวิตช์ S1, S4 จะไม่ทำงาน ทิศทางของกระแสจะไหลดัง

รูปที่ 2.9 และแรงดันที่ตกคร่อมโหลดมีค่าเท่ากับ $-V_s$



รูปที่ 2.9 สวิตช์ S2 และ S3 ทำงาน

กราฟแรงดันของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงแรงดันของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

2.5 พาวเวอร์มอสเฟต (Power MOSFET)

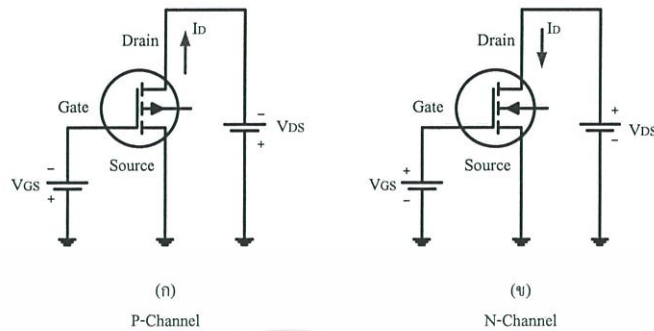
MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นำมาใช้ในการสวิตช์ซึ่ง การนำมอสเฟตไปใช้งานและการทำให้มอสเฟตสามารถทำงานหรือสามารถนำกระแสได้นั้น ต้องทำการกำหนดค่าของแรงดันให้มีค่าที่เหมาะสมกับลักษณะโครงสร้างของมอสเฟตนั้นๆ เรียกว่า การไบแอส (Bias) ให้กับอุปกรณ์มอสเฟต โดยการไบแอสอุปกรณ์มอสเฟตนั้นคือการป้อนแรงดันให้กับขาเกต (G : Gate) เพื่อใช้ในการควบคุมการไหลของกระแส มอสเฟตแบ่งตามชนิดการทำงานได้ 2 ชนิด คือ ชนิดเอ็นฮานเมนท์ (Enhancement MOSFET) และชนิดดีพลีชัน (Depletion MOSFET) ซึ่งแต่ละชนิดสามารถแบ่งตามโครงสร้างชนิดสารกึ่งตัวนำได้ 2 ชนิด ดังรูปที่ 2.11 ได้แก่

ก. มอสเฟต (MOSFET) ชนิด P-Channel

ถ้ากำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกตเป็น $+V_{GS}$ ขาเดรนและขาซอร์สจะไม่มีกระแสไหลผ่าน แต่ถ้ากำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกตเป็น $-V_{GS}$ ขาเดรนและขาซอร์สจะมีกระแสไหลผ่าน นั่นคือ มอสเฟตชนิด P-Channel ต้องไบแอสด้วยแรงดัน $-V_{SG}$ มอสเฟตชนิด P-Channel นั้นมีค่าความต้านทานภายในสูงทำให้เกิดกำลังสูญเสียภายในสูงตามไปด้วย

ข. มอสเฟต (MOSFET) ชนิด N-Channel

หากกำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกตเป็น $-V_{GS}$ ขาเดรนและขาซอร์สจะไม่มีกระแสไหลผ่าน ถ้ากำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกตเป็น $+V_{GS}$ มากพอ ขาเดรนและขาซอร์ส จะมีกระแสไหลผ่าน มอสเฟตชนิด N-Channel นั้นมีค่าความต้านทานภายในต่ำจึงทำให้กำลังสูญเสียภายในต่ำ



รูปที่ 2.11 การไบแอสมอสเฟต (ก) P-Channel (ข) N-Channel

โดยทั่วไปคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการสวิตช์ซึ่งจะต้องมีการเปลี่ยนสถานะช่วงเริ่มนำกระแสและช่วงเริ่มหยุดนำกระแสที่เร็ว (มีผลต่อความถี่ในการสวิตช์ซิ่ง) และมีความต้านทานขณะนำกระแสต่ำซึ่งมีผลต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียและประสิทธิภาพ มอสเฟตชนิด N-Channel จึงนิยมนำมาใช้งานมากกว่าชนิด P-Channel

2.5.1 การทำงานของมอสเฟต ชนิด N-Channel

การควบคุมให้มอสเฟตชนิด N-Channel นำกระแสทำได้โดยการไบแอสแรงดัน โดยให้ V_{GS} มีค่าเป็นบวก (ขา G มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขา S และ SS) และให้ขา D มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขา S (V_{DS} เป็นบวก) ถ้าแรงดันที่ตกคร่อมขา G-S (V_{GS}) น้อยไป กระแสเดรนจะยังไม่ไหลจนกว่า V_{GS} จะมีค่าสูงถึงปริมาณค่าหนึ่ง เรียกว่า แรงดันเทรชโฮลด์ “Threshold Voltage” (V_T)

ถ้าพิจารณาจากโครงสร้างภายในของมอสเฟต จะพบว่ามีความต้านระหว่างขา (B) กับขา (S) ซึ่งค่าแรงดันที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ค่าแรงดันเทรชโฮลด์ มีค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป และจะส่งผลต่อค่าของกระแสที่ไหล โดยค่าแรงดันที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า แรงดัน Body Effect

ลักษณะการทำงานของมอสเฟต มีดังนี้

1.) กรณีที่ $V_T > V_{GS} > 0$ และ $V_{DS} > 0$ (Cutoff: ย่านไม่นำกระแส)

เมื่อป้อนแรงดันค่าบวกเข้าที่ขาเกตเทียบกับขาซอร์ส V_{GS} ที่มีค่าบวกค่าหนึ่ง แต่น้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T : Threshold Voltage) หรือ $V_T > V_{GS} > 0$ สนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ที่เกิดจากแรงดันเกตซอร์ส จะผลักให้โฮลในสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัส $\text{SiO}_2 - \text{Si}_2$ เคลื่อนที่ห่างออกไป ความหนาแน่นของโฮลในบริเวณดังกล่าวจึงมีค่าลดลงจากเดิม ผลดังกล่าวทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่อยู่ใต้ส่วนเกต ดังนั้นในกรณีนี้ ซอร์สและเดรนยังคงถูกแยกออกจากกันด้วยชั้นของบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นใต้ส่วนเกตและเป็นชั้นที่มีความนำไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นเมื่อแรงดันเดรนซอร์สมีค่าเพิ่มขึ้นกระแสเดรนก็จะมีกระแสไหลแต่มีค่าน้อยมากประมาณค่าเป็นศูนย์ $I_D \approx 0$ ในสภาวะนี้มอสเฟตยังคงอยู่ในสภาวะคัทออฟหรือสถานะ off เช่นเดิม

2.) กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ V_{DS} มีค่าน้อย (Ohmic Region: ย่านไม่อิ่มตัว)

เมื่อแรงดันเกตซอส V_{GS} มีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น จนเท่ากับแรงดันขีดเริ่ม V_T หรือมีค่าสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม $V_{GS} > V_T$ ในขณะนี้นสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนออกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันเกตซอสจะมีค่ามากพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นกลับชนิดเอ็น (N-Inversion Layer) หรือแซนแนลชนิดเอ็นในสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัสระหว่าง $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ บริเวณใต้ส่วนเกตแซนแนลนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นประจุบาง ๆ (Sheet of Charge) ภายในแซนแนลนี้จะมีอิเล็กตรอนซึ่งถูกเหนี่ยวนำอยู่ในแซนแนล และจะมีค่าขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ หรือแรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ เมื่อแรงดันเกตซอสคงที่ และแรงดันเดรนเป็นศูนย์มีค่าเท่ากับแรงดันที่ซอส แรงดันที่ตกคร่อมของออกไซด์จะมีค่าเท่า ๆ กันทุกจุดในแซนแนล แต่เมื่อแรงดันเดรนซอส V_{DS} มีค่าเป็นบวก สนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ที่จุดต่าง ๆ ที่ห่างออกมาจากด้านซอสจะมีค่าลดลง เพราะแรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่จุดใกล้ด้านเดรนจะมีค่าลดลง ผลดังกล่าวทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแซนแนลที่เข้าใกล้มาทางด้านเดรน มีค่าลดลงด้วย และจะมีค่าน้อยที่สุดที่ปลายด้านเดรน

อย่างไรก็ดี กรณีที่แรงดันเดรนซอสมีค่าในช่วงต่ำ ๆ อาจประมาณได้ว่าสนามไฟฟ้าทุกจุดมีค่าเท่ากัน ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแซนแนล ประมาณได้ว่ามีค่ายาวเท่ากันตลอดจากปลายซอสถึงปลายเดรน ถัดจากแซนแนลออกไปจะเป็นบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งแรงดัน $+V_D$ จะทำให้รอยต่อ พี-เอ็นที่อยู่รอบ ๆ ส่วนเดรนได้รับไบอัสย้อนกลับ ทำให้บริเวณปลอดพาหะทางด้านเดรนขยายกว้างมากกว่าทางด้านซอสเล็กน้อย แซนแนลชนิดเอ็นที่เกิดขึ้นนี้เสมือนกับเป็นแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีความยาวเท่ากับ L โดยมีขั้วปลายทั้งสองด้าน คือ ส่วนซอสและส่วนเดรน (n^+) เมื่อแรงดันเดรนเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สนามไฟฟ้าในแซนแนลจะทำให้อิเล็กตรอนในแซนแนลเกิดการดริฟท์ (Drift) หรือเคลื่อนที่ในทิศทางจากด้านซอสไปยังด้านเดรน ดังนั้นทำให้มีกระแส I_D เกิดขึ้น โดยมีทิศทางพุ่งเข้าที่ขั้วเดรน ขนาดของกระแสเดรนในขณะนี้ จะถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทานของแซนแนล ดังนั้นขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นในช่วงต่ำ กระแสเดรนที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันเดรน ซึ่งเกือบจะเป็นเชิงเส้น เรียกการทำงานในย่านนี้ว่า “ย่านเชิงเส้น” (Ohmic Region หรือ Linear Region หรือ Triode Region) ในช่วงนี้มอสเฟตจะมีสภาพไม่อิ่มตัว หรือ (Non-Saturation) กล่าวคือ กระแสเดรนจะขึ้นอยู่กับแรงดันที่เดรน และความชันของกราฟ $I_D - V_D$ จะเพิ่มขึ้นกับแรงดันเกต เนื่องจากแรงดันเกตเพิ่มขึ้นจะทำให้ความนำของแซนแนลเพิ่มขึ้นด้วย

3.) กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ หรือ $V_{DS} < V_{DS}(\text{sat})$

เมื่อแรงดันเดรนมีค่าสูงขึ้นต่อไป ค่าความต่างศักย์ระหว่างซอสและเดรน จะทำให้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในแซนแนลมีศักย์ไม่เท่ากันอย่างเห็นได้ชัด ศักย์ไฟฟ้าที่ปลายซอสยังคงเป็นศูนย์โวลต์ แต่เมื่อตำแหน่งนั้นอยู่ห่างออกมาจากทางด้านซอส หรือเมื่อเข้าไปใกล้ทางด้านเดรน ศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงสุดที่ปลายด้านเดรน คือ V_D ดังนั้นแรงดันระหว่างขั้วเกตและแซนแนล (แรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์) ที่ตำแหน่ง X ต่าง ๆ ตลอดความยาวของแซนแนลจะมีค่าไม่เท่ากัน ที่ปลายด้านซอสแรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ V_C โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับ

แรงดันเดรน แต่ที่ตำแหน่ง X ที่ห่างจากซอสหรือใกล้เข้ามาทางด้านเดรน แรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์ จะมีค่าลดลง และที่ปลายด้านเดรนแรงดันตกคร่อมชั้นออกไซด์นี้จะมีค่าต่ำสุดและมีค่าเท่ากับ $V_{GS} - V_{DS}$ กรณีที่แรงดันเดรนมีค่าไม่สูงมากและทำให้ $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ แสดงว่าในช่วงนี้ยังมีแขนแนลเกิดขึ้นได้โดยตลอดตั้งแต่ซอสจนถึงเดรน และแรงดันเกตคงที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแขนแนลที่ปลายด้านซอสจะมีค่าคงที่ แม้แรงดันเดรนจะเพิ่มขึ้น แต่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแขนแนลจะลดลงกับระยะทางที่ห่างออกไปจากด้านซอส และยังมีค่าลดลงเมื่อแรงดันเดรนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเมื่อใกล้เข้าไปทางด้านเดรน ขนาดของแขนแนลจะมีค่าลดลง ดังนั้นความต้านทานของแขนแนลจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับแรงดันเดรน โดยเมื่อแรงดันเดรนมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของกระแสจะชะลอตัวลงดังสังเกตได้จากกราฟ $I_D - V_D$ ซึ่งความชันของกราฟจะมีค่าลดลง (โค้งมากขึ้น) เมื่อแรงดันเดรนเพิ่มขึ้น แต่ยังคงอยู่ในเงื่อนไข $(V_{GS} - V_{DS}) > V_T$ หรือ $V_{DS} < V_{DS(sat)}$ โดยที่ $V_{DS(sat)}$ หมายถึง แรงดันเดรนซอสที่อิ่มตัว

4.) กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} = V_{DS(sat)}$ (Pinch off Point: จุดพินช์ออฟ)

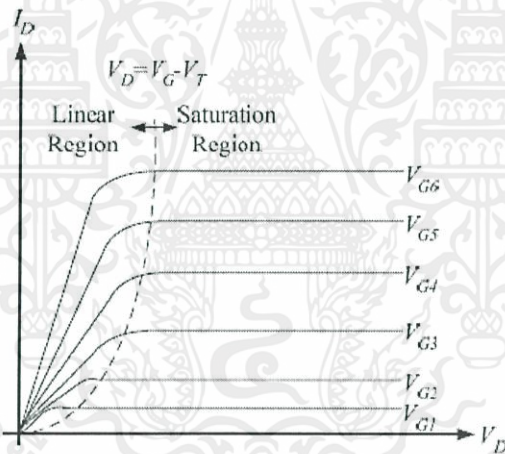
เมื่อแรงดัน V_D ยังคงเพิ่มขึ้นกระทั่งมีค่ามาก จนทำให้แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่ตำแหน่งปลายด้านเดรนมีค่าเท่ากับแรงดันขีดเริ่มพอดิ หรือ $(V_{GS} - V_{DS}) = V_T$ แขนแนลที่ปลายด้านเดรนจะมีขนาดลดลงเป็นศูนย์หรือแขนแนลขาดออกพอดิที่เดรน ซึ่งเรียกสภาวะนี้ว่า “สภาวะพินช์ออฟ” (Pinch off) และจุดที่แขนแนลขาดออกพอดินี้เรียกว่า “จุดพินช์ออฟ” (Pinch off Point) บริเวณตลอดพาหะตรงส่วนเดรนจะมีขนาดกว้างมากกว่าด้านซอสอย่างเห็นได้ชัด ค่าของแรงดันเดรนซอสที่พอดิที่ทำให้เริ่มเกิดสภาวะพินช์ออฟ ถูกเรียกว่า “แรงดันเดรนซอสอิ่มตัว” (Saturation Drain Source Voltage: $V_{DS(sat)}$) หรือบางกรณีเรียกว่า “แรงดันพินช์ออฟ” (Pinch off Voltage: V_p)

ในขณะนี้พิจารณาได้ว่า แขนแนลที่ขาดออกพอดิที่ตำแหน่งปลายด้านเดรน เมื่ออิเล็กตรอนในแขนแนลถูกดริฟท์ (Drift) โดยสนามไฟฟ้าจากด้านซอสมาทางด้านเดรน และเมื่อมาถึงปลายแขนแนลที่จุดพินช์ออฟ สนามไฟฟ้าค่าสูงสุดที่ตกคร่อมในช่วงแคบ ๆ ของบริเวณตลอดพาหะระหว่างปลายของแขนแนล และส่วนเดรน จะดึงให้อิเล็กตรอนที่ส่วนปลายแขนแนลข้ามบริเวณตลอดพาหะเข้าไปยังส่วนเดรน ดังนั้นกระแสเดรนยังคงไหลได้แต่ขนาดของกระแสจะถูกจำกัดด้วยปริมาณของอิเล็กตรอน ที่ถูกดึงหรือฉีกข้ามบริเวณตลอดพาหะดังกล่าวและอาจจะพิจารณาได้ว่ากระแสเดรนถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทานประสิทธิผล (Effective Resistance) ของแขนแนล ดังนั้นเมื่อแรงดันเดรน-ซอสเพิ่มขึ้น กระแส I_D จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (อย่างชะลอตัว) กระทั่งเมื่อถึงค่า $V_{DS(sat)}$ กระแสเดรนจะมีค่าสูงสุดเรียกว่า “กระแสเดรนอิ่มตัว” (Saturation Drain Current) และเขียนแทนด้วย $I_{D(sat)}$

5.) กรณีที่ $V_{GS} > V_T$ และ $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ (Saturation Region: ย่านนำกระแส

อิ่มตัว) เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น เมื่อแรงดันที่เดรนซอสมีค่ามากกว่าแรงดันอิ่มตัวหรือ $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ ทำให้แรงดันที่

ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่บริเวณใกล้ปลายด้านเดรน มีค่าน้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS} - V_{DS} < V_T$) ดังนั้น ในบริเวณดังกล่าวจะไม่มีแชนแนลเกิดขึ้น จึงคล้ายกับว่าจุดพินชออฟเกิดขึ้น เลื่อนไปจากจุดเดรนเข้าไปทางด้านจุดซอส และที่ตำแหน่ง X ใด ๆ ที่เป็นจุดพินชออฟ ตามเงื่อนไขของสมการ ($V_{GS} - V_{DS}(X) = V_T$) ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อแรงดันเดรนมีค่าสูงกว่า $V_{DS(sat)}$ จุดพินชออฟจะเลื่อนเข้าไปใกล้ด้านซอส ทำให้เกิดบริเวณหลอดพาหะระหว่างจุดพินชออฟกับส่วนเดรน ซึ่งมีระยะกว้างเท่ากับ ΔL หากพิจารณาว่า มอสเฟตนี้เป็นชนิด Long Channel และ $\Delta L \ll L$ ดังนั้นความยาวของแชนแนลจึงมีขนาดสั้นลงจากเดรนน้อยมาก จนประมาณว่ามีขนาดความยาวเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นความต้านทานของแชนแนล จะมีค่าประมาณเท่าเดิม แม้ว่าแรงดันที่เดรนจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม และแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างซอสถึงจุดพินชออฟจะมีค่าคงที่เสมอ โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันเดรนซอส และเมื่อแรงดันที่เดรนซอสเพิ่มขึ้นสูงกว่า $V_{DS(sat)}$ กระแสเดรนจะประมาณได้ว่ามีค่าคงที่ และเท่ากับค่าของ $I_{D(sat)}$ ซึ่งเป็นกระแสเดรนอิ่มตัว ซึ่งมอสเฟตถูกพิจารณาว่าทำงานในย่านอิ่มตัวหรือ (Saturation Region) กล่าวคือ กระแสเดรนจะมีค่าคงที่ โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันที่เดรน ความสัมพันธ์ของแรงดัน V_G กับกระแส I_D ในขณะที่แรงดันที่ขาเกตคงที่และมอสเฟตทำงานในย่านอิ่มตัว แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของแรงดัน V_G กับกระแส I_D ในย่านการทำงานของมอสเฟต [8]

6.) กรณีย่านพังทลาย (Breakdown Region)

เนื่องจากแรงดันไบอัสที่ให้แก่อรอยต่อพี-เอ็น ระหว่างเดรน-ฐานรองจะเป็นการไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นเมื่อแรงดันที่เดรนมีค่ามากขึ้นและสูงขึ้นถึงค่า ๆ หนึ่งที่เรียกว่า “แรงดันพังทลาย” (Breakdown Voltage: V_B) ทำให้รอยต่อเกิดการพังทลายแบบอวาลันซ์ (Avalanche Breakdown) กระแสเดรนที่อยู่ในย่านอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้มอสเฟตเข้าสู่สภาวะการพังทลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

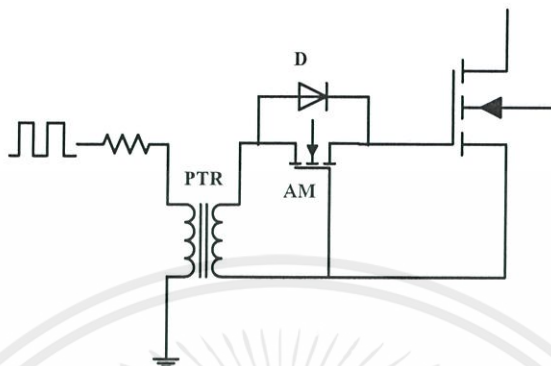
2.6 ชุดขับสำหรับพาวเวอร์มอสเฟต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

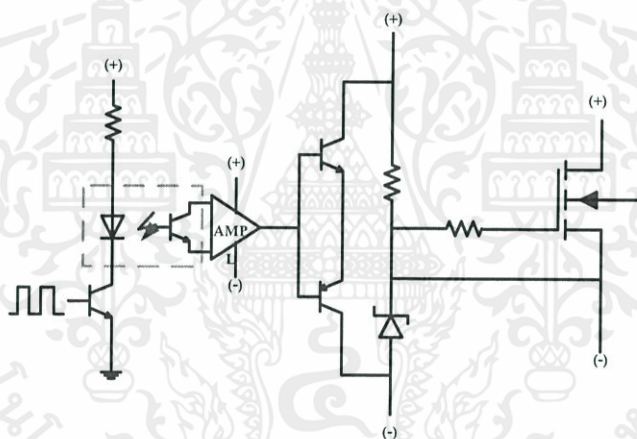
การทำให้มอสเฟตนำกระแสหรือหยุดนำกระแสต้องมียังจรขับนำ โดยต้องให้ได้

แรงดันสูงเพียงพอเพื่อควบคุมขาเกตของมอสเฟตให้ทำงานอย่างทันที (Turn On) และกระแสสูง

เพียงพอเพื่อให้สภาวะการนำกระแส (On) ยังคงอยู่ในวงจรกำลังที่ใช้แรงดันสูง และมีการแยกโดด (Isolating) ระหว่างวงจรควบคุมและกำลังโดยใช้พัลส์ทรานฟอร์มเมอร์ (Pulse Transformer) หรือ ออปโตคัปเปิลเลอร์ (Opto Coupler) ดังรูปที่ 2.13 และ 2.14 นอกจากนี้ในชุดขับเชิงพาสซีฟจะมีการ ป้องกันกระแสเกินด้วย



รูปที่ 2.13 วงจรขับเกตสวิตช์โดยใช้ Pulse Transformer

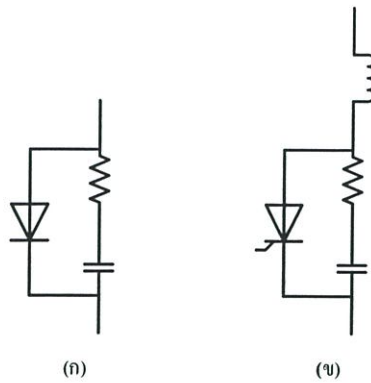


รูปที่ 2.14 วงจรขับเกตสวิตช์โดยใช้ Opto Coupler

2.7 วงจรสแน็บเบอร์ (Snubber)

เป็นวงจรที่นำมาต่อร่วมกับอุปกรณ์สวิตช์ เพื่อป้องกันสวิตช์จากแรงดันเกิน ขณะทรานเซียนต์ (Transient) และกระแสเกินขณะสวิตช์ Turn On และ Turn Off ลด dv/dt และ di/dt ช่วยลดกำลังงานสูญเสีย (Switching Loss) ที่เกิดขึ้นที่สวิตช์ขณะใช้งาน ป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ สวิตช์ทำงานเกินขอบเขต SOA และป้องกันความเสียหายของสวิตช์จากแรงดันสูงชั่วขณะในช่วงมอส เฟตหยุดนำกระแส แต่การใส่วงจรสแน็บเบอร์นั้นอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อการทำงานของวงจรได้ เช่น ช่วงเวลาในการสวิตช์แต่ละครั้งอาจเกิดการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วงจรสแน็บเบอร์มี 2 ประเภท คือ สแน็บเบอร์ที่ใช้ลดความสูญเสียในขณะที่เริ่มต้นหยุดการทำงาน (Turn Off Snubber) และสแน็บเบอร์ที่ใช้ลดความสูญเสียในจังหวะเริ่มต้นการทำงาน (Turn On Snubber) หรือใช้ประกอบกันทั้งสองสภาวะ วงจรสแน็บเบอร์แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 (ก) RC Snubber (ข) RC Snubber ใส่อินดักเตอร์เพิ่มเข้าไปช่วยลด di/dt

2.8 วงจรกรอง (Filter)

วงจรกรองหรือฟิลเตอร์ (Filter) คือวงจรไฟฟ้าที่ยอมให้สัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ใด ๆ ความถี่หนึ่งหรือช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้นผ่านไปได้ ส่วนความถี่อื่นหรือช่วงความถี่อื่น ๆ นอกเหนือจากที่กำหนดจะถูกกลดทอนไปซึ่งจะเป็นช่วงความถี่ใดนั้นจะขึ้นอยู่กับกรออกแบบวงจร วงจรกรองความถี่มีด้วยกัน 2 แบบ คือ

1.) แบบ Active คือ วงจรที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์ที่ต้องการไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นการทำงานของตัวอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ประเภท ทรานซิสเตอร์ หรือ ไอซี

2.) แบบ Passive คือวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟ ซึ่งหมายถึง อุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ทำงาน ได้แก่ อุปกรณ์ประเภท ตัวต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) และ ขดลวดเหนี่ยวนำ (L) ซึ่งแบ่งตามคุณลักษณะผลตอบสนองความถี่ (Frequency Response) ได้ 4 ชนิด คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter: LPF) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-Pass Filter: HPF) วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-Pass Filter: BPF) และวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน (Band-Stop Filter: BSF) วงจรกรองความถี่ทุกชนิด จะนิยมใช้คุณสมบัติของ L ที่ให้ความถี่ต่ำผ่านได้ดี และคุณสมบัติของ C ที่ให้ความถี่สูงผ่านได้ดีมาออกแบบเป็น วงจรกรองความถี่

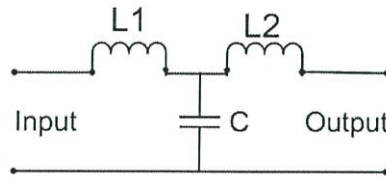
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

วงจร Low Pass Filter มีลักษณะการต่อคือ ใช้ L อนุกรมกับวงจร และ C ขนานกับวงจร คุณสมบัติของวงจรก็คือ เมื่อเราป้อนความถี่ต่ำเข้าวงจร L จะมีค่า X_L ต่ำ C จะมีค่า X_C สูง ให้ความถี่ต่ำผ่าน L ได้สะดวก ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนด ค่า X_L จะมากขึ้น ค่า X_C จะลดลง ให้ความถี่ผ่านขดลวดได้ลดลง บางส่วนที่ผ่านไปได้ก็จะถูก C ดึงลงกราวด์ ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้น้อยมาก วงจร Low Pass Filter สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. T Type Low Pass Filter

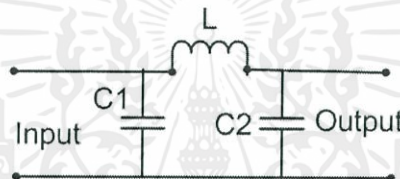
การใช้ L หรือ C เพียงตัวเดียว ไม่สามารถกำจัดสัญญาณความถี่สูงได้หมดที่จุด Cut Off Frequency ทำให้ความถี่สูงผ่านไปได้ ซึ่งแก้ปัญหาโดยการเพิ่ม L เข้าไปในวงจรอีกชุด เมื่อต่อแล้ว ลักษณะวงจรคล้าย ตัว T จึงเรียกว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบที่



รูปที่ 2.16 T Type Low Pass Filter

ข. Pi Type Low Pass Filter

วงจรมีการใช้ C 2 ตัวและ L 1 ตัว รูปร่างคล้ายตัว Pi (พาย: π) จึงเรียกว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบพาย วงจรแบบนี้จะนิยมใช้ในภาคจ่ายไฟ และวงจร Regulator

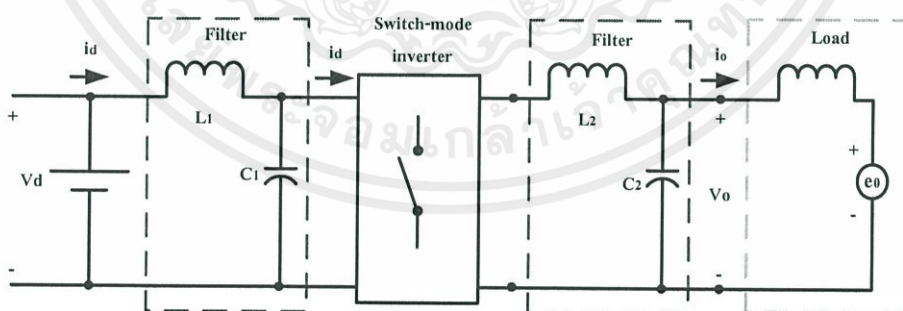


รูปที่ 2.17 Pi Type Low Pass Filter

การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน สามารถคำนวณได้จาก สมการ Cut Off Frequency

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

สำหรับอินเวอร์เตอร์ ใช้วงจรกรองเพื่อกรองสัญญาณรบกวนทางด้านอินพุตและโหลดดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรกรองในอินเวอร์เตอร์

2.9 วงจรเดทไทม์ (Dead Time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ เนื่องจาก การ ON-OFF ของมอสเฟตไม่ได้เกิดขึ้นทันทีทันใด การนำสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) มาขับโดยตรงจะทำให้มอสเฟตทำงานพร้อมกัน เรียกว่า Shoot Through ซึ่งทำให้วงจรเสียหายได้ และเป็นที่มาของคำ ว่า Dead Time หรือเวลาวิกฤต ดังนั้นเพื่อ

แก้ไขปัญหานี้ จะต้องมีกำหนดเวลาให้อุปกรณ์ที่ถูกกำหนดให้ หยุดทำงานอีกเล็กน้อย เพื่อให้แน่ใจว่ามีการหยุดทำงานลงอย่างแท้จริงก่อนที่จะกระตุ้นให้เกิดสภาวะการทำงานในโหมดถัดไปมี ดังนั้นจึงต้องควบคุมสัญญาณ PWM ในการขับสวิตซ์โดยการสร้างเวลาที่เป็น Dead Band ไว้ด้วย เพื่อ Off การทำงานของสวิตซ์ทั้งสองโหมดการทำงาน

2.10 วงจรจ่ายไฟกระแสตรง (DC Power Supply)

วงจรจ่ายไฟกระแสตรง เป็นวงจรที่จ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุม และวงจรขับสวิตซ์ ซึ่งทั้งสองวงจรต้องการไฟเลี้ยงอุปกรณ์เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยส่วนที่เป็นวงจรควบคุมนั้นคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นตัวประมวลผลและควบคุมสัญญาณขับของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งต้องการไฟเลี้ยงวงจร 3-5 V_{DC} และส่วนที่เป็นวงจรขับสวิตซ์ต้องการไฟเลี้ยงวงจร 15 V_{DC}

2.10.1 ส่วนประกอบของวงจรจ่ายไฟกระแสตรง (DC Power Supply)

สัญญาณ Sine Wave กระแสสลับขนาด 220 V_{AC} ความถี่ 50 Hz แปลงแรงดันลงให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันที่ต้องการใช้งานด้วยหม้อแปลง (Transformer) ซึ่งแรงดันที่ได้จากหม้อแปลงยังคงเป็นแรงดันกระแสสลับอยู่ จึงต้องผ่านวงจรเรียงกระแส (Rectifier) เพื่อทำให้เป็นแรงดันกระแสตรงก่อน จากนั้นผ่านวงจรกรองกระแสเพื่อทำให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสมีความเรียบขึ้น และรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟตรงให้คงที่และตรงตามความต้องการ

1.) หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงแรงดันแบบ Step down ทำหน้าที่แปลงแรงดันสูงเป็นแรงดันต่ำ การเลือกหม้อแปลงให้มีขนาดพอเหมาะกับการใช้งานที่พิจารณาจากขนาดของแรงดันไฟตรง (V_O) และกระแสไฟตรงสูงสุด (I_O) ที่สามารถจ่ายให้โหลดได้ แล้วนำมากำหนดขนาดของแรงดันขดทุติยภูมิ (Secondary) และกระแสใช้งานที่ขดทุติยภูมิ (Secondary) ของหม้อแปลง

2.) วงจรเรียงกระแส (Bridge Rectifier)

วงจรเรียงกระแส ทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่มาจากหม้อแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง

3.) วงจรกรอง (Filter)

วงจรกรอง ทำหน้าที่กรองรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเรียบยิ่งขึ้น โดยใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่ออยู่ระหว่าง Rectifier และ Voltage Regulator

4.) วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator)

วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulators) มีหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้โหลดมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาพโหลด โดยทั่วไป สามารถแบ่งชนิดของ Regulator ออกเป็น 2 ชนิด คือ Series Regulator และ Switching Regulator โดย Series Regulator จะควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้โดยใช้ตัวแปรียบเทียบแรงดันกับแรงดันเอาต์พุตที่ย้อนกลับมา ส่วน Switching Regulator นั้นจะทำงานในลักษณะ On-Off ผ่านวงจร LC Filter เพื่อ

กรองกระแสให้เรียบเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ทำได้โดยการปรับค่าเวลาในการ On (t_{on})

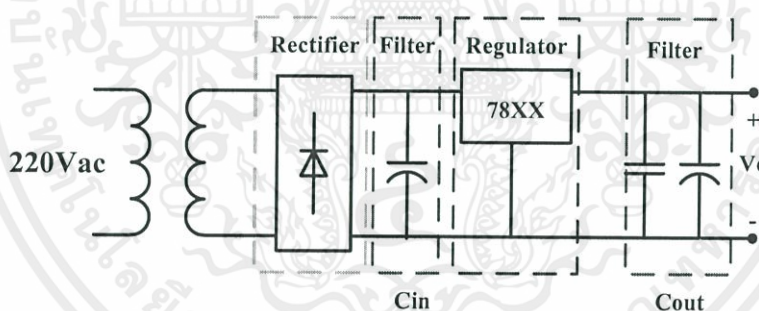
Series Regulator

ใช้หลักการรักษาระดับแรงดันด้วย Integrated Circuit (IC) ซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้กันมาก เนื่องจากใช้งานง่ายและมีราคาไม่แพงมาก อีกทั้งยังมีวงจรป้องกันภายในตัว IC เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีหลายประเภทไว้ให้เลือกเพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน ได้แก่ IC ตระกูล 78XX (Three Terminal Positive Voltage Regulator) หรือ 79XX (Three Terminal Negative voltage Regulator) ตลอดจน IC ตระกูล Adjustable Regulator

Three- Terminal Fixed Voltage Regulators

เป็น IC ที่ให้แรงดันออกมากคงที่ (ตามเบอร์ IC) โดยประกอบด้วย 3 ขาคือ Unregulated input, Regulated output และ Common หรือ Ground IC ชนิดนี้สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือ

- 1.) Positive Fixed Voltage Regulators จะขึ้นต้นด้วย 78XX โดยที่ XX นี้หมายถึงแรงดันไฟตรงที่ผ่านการ Regulated เช่น 7805 จำ ให้แรงดันไฟตรงออกมาคงที่ 5V
- 2.) Negative Fixed Voltage Regulators จะขึ้นต้นด้วย 79XX โดยที่ XX นี้มีความหมายคือ เป็นแรงดันไฟลบที่ผ่านการ Regulated แล้ว



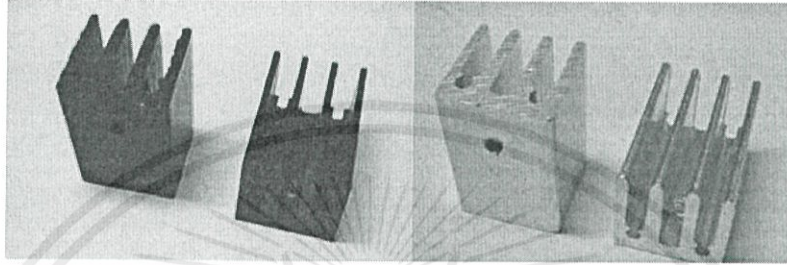
รูปที่ 2.19 วงจรภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

2.11 การระบายความร้อน

วัตถุประสงค์ของการระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ คือการป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ทั้งหลายในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังเสียหาย หรือทำงานผิดพลาด โดยอุปกรณ์ทั้งหลายนี้จะเน้นเป็นพิเศษสำหรับอุปกรณ์สวิตชิง เช่น มอสเฟต ไอจีบีที ทรานซิสเตอร์ ไดโอด เรกกูเรเตอร์ เป็นต้น

การระบายความร้อนสำหรับอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีหลายวิธีการ เช่น การใช้น้ำไหลเวียนระบายความร้อน การใช้พัดลมดูดอากาศเพื่อระบายความร้อน หรือการใช้แผ่นระบายความร้อน (Heat Sink) เป็นต้น

การระบายความร้อน โดยหลักการไหลของความร้อน เช่น มีการไหลของความร้อนที่ตัวมอสเฟต และต้องระบายความร้อนดังกล่าวให้กับสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบข้างมอสเฟต เพื่อรักษาให้อุณหภูมิที่รอยต่อ (Junction Temperature: T_j) ไม่เกินค่าที่กำหนด กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตซึ่งจะเกิดจากการสูญเสียขณะสวิตซิ่ง (Switching Loss) ซึ่งจะประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส (Turn Off Switching Loss) ร่วมกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะนำกระแส (Conduction Loss) โดยกำลังสูญเสียจะถูกควบคุมให้ไหลผ่านตัวถังของมอสเฟต (Case) ซึ่งต้องระบายความร้อนสู่แผ่นระบายความร้อน โดยผ่านทางแผ่นฉนวน



รูปที่ 2.20 Heat Sink

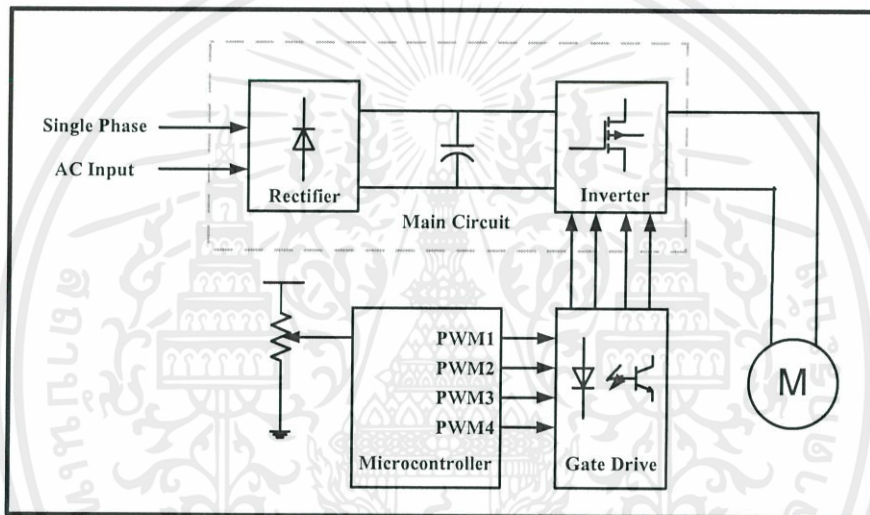
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้างอินเวอร์เตอร์

ในบทนี้แนะนำการออกแบบ การคำนวณ และสร้างอินเวอร์เตอร์ (Single-Phase Full Bridge Inverter) เพื่อนำไปขับอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส (Single Phase Induction Motor) ซึ่งประกอบด้วยวงจรหลัก ได้แก่ วงจรกำลัง (Main Circuit) วงจรไฟเลี้ยง (Power Supply) วงจรขับเคลื่อน (Gate Drive Circuit) และวงจรควบคุม (Control Circuit) ที่สามารถปรับความถี่รอบของมอเตอร์โดยควบคุมการปรับความถี่ของสัญญาณมอดดูเลท (Pulse Width Modulation) จากไมโครคอนโทรลเลอร์

3.1 ส่วนประกอบหลักของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบหลักของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

3.2 การออกแบบ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

3.2.1 วงจรกำลัง (Main Circuit) ประกอบด้วย

1. วงจรเรียงกระแส (Rectifier) ทำหน้าที่แปลงแรงดันกระแสสลับ 220 V_{AC} เป็นแรงดันกระแสตรง 311 V_{DC} โดยใช้บริดจ์ไดโอด พิกัดแรงดัน 400 V
2. ตัวเก็บประจุ (C) หรือ DC Link เป็นตัวกรองแรงดันเพื่อกรองแรงดันด้านขาเข้าและขาออกให้เรียบ มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับโหลดและรักษาระดับไฟฟ้าด้านออกให้คงที่ โดยใช้ C ขนาด 470 uF พิกัดแรงดัน 400 V ขนาดกันจำนวน 4 ตัว จะได้ 1880 uF และใช้ค่าความต้านทานดิสชาร์จ 100 kΩ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$E_0 = E_m \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) \quad (8)$$

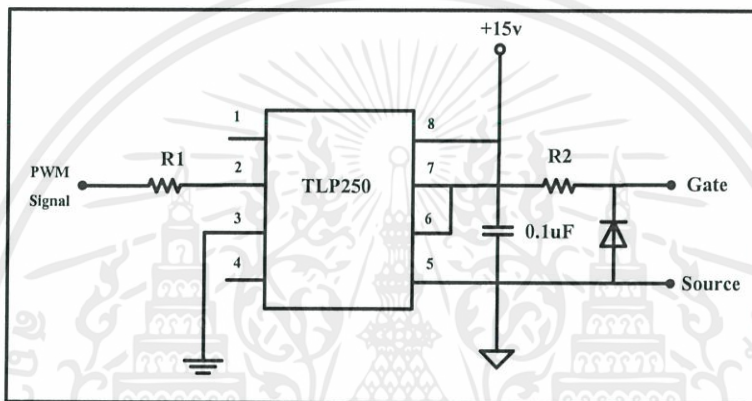
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาคือ "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า" ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยด้วยสวิตช์จำนวน 4 สวิตช์ โดยใช้มอสเฟต (Mosfet) ทำหน้าที่ในการสวิตซ์ซึ่งไฟเข้าสู่โหลดโดยจะได้รับสัญญาณควบคุมจากส่วนขยายสัญญาณควบคุม โดยมอสเฟตที่ใช้เป็นเพาเวอร์มอสเฟต เบอร์ IRFP460

4. ไดโอด (D) ทำหน้าที่เป็น Freewheeling Diode ในช่วงที่มอสเฟตหยุดนำกระแส ทำให้กระแสวิ่งผ่านโหลดอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ Super Fast Diode เบอร์ MUR460

3.2.2 ชุดวงจรขับเกต (Gate Drive Circuit)

ชุดขับมอสเฟต ใช้ IC ออปโตคัปเปิลอร์ (Opto Coupler) แยกกราวน์ เบอร์ TLP 250 จำนวน 8 ขา เป็นวงจรขับมอสเฟต ซึ่งจะรับสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์และทำหน้าที่ขยายสัญญาณก่อนที่จะส่งสัญญาณไปขับมอสเฟต



รูปที่ 3.2 ออปโตคัปเปิลอร์ เบอร์ TLP250

1. การหาค่าความต้านทาน (Resistance)

การหาค่าความต้านทาน R1 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$R = \frac{V_{in} - V_F}{I_F} \quad (10)$$

เมื่อ V_{in} : แรงดันของสัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์

V_F : แรงดันตกคร่อมระหว่างขา 2 และ 3

I_F : กระแสอินพุตที่ไหลเข้าขา 2

โดยที่ค่าต่างๆในการออกแบบ มีดังนี้

$$V_{in} = 5 \text{ V}$$

$$V_F = 1.6 \text{ V}$$

$$I_F = 10 \text{ mA}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เมื่อแทนค่าในสมการที่ 10 จะได้ดังนี้
 ไม่ว่าจะพิมพ์กี่ครั้งก็ให้พิมพ์ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{5V - 1.6V}{10mA} = 340 \Omega$$

เลือกใช้ $R = 330 \Omega$ จะได้กระแส $I_F = 10.3 \text{ mA}$

3.2.4 วงจรไฟเลี้ยง (Power Supply)

วงจรไฟเลี้ยง (Power Supply) ทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้กับ วงจรควบคุม วงจรขับเคลื่อน และรีเลย์

วงจรไฟเลี้ยงสำหรับวงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ประกอบด้วย

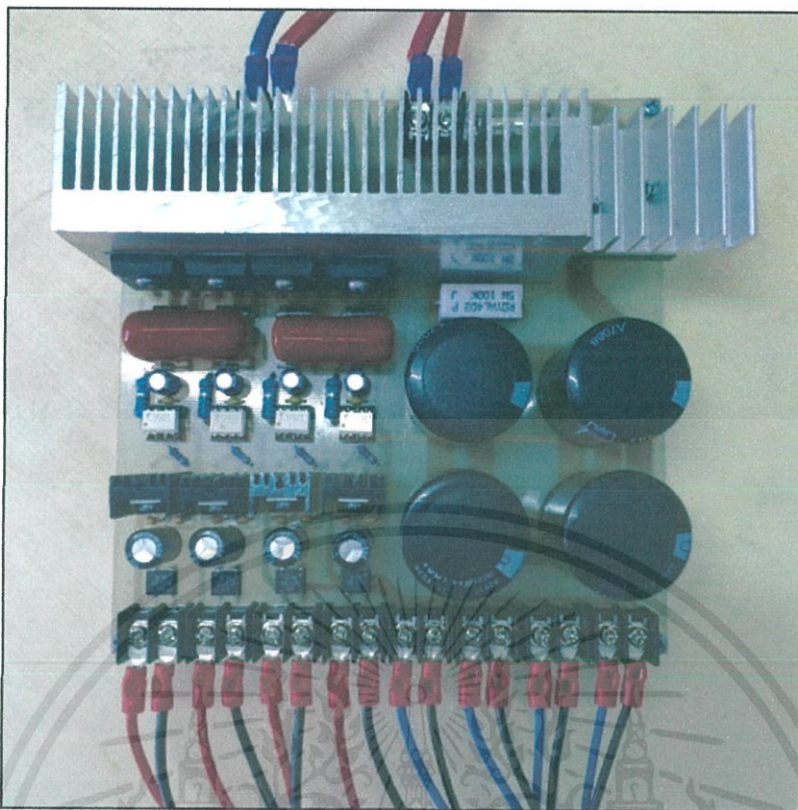
1. หม้อแปลงแรงดัน (Step down Transformer) พิกัดแรงดัน 220/9 V_{AC} ทำหน้าที่แปลงแรงดันจาก 220 V_{AC} เป็นแรงดัน 9 V_{AC}
2. วงจรเรียงกระแส (Bridge Rectifier) ทำหน้าที่แปลงแรงดันกระแสสลับเป็นแรงดันกระแสตรง โดยใช้ บริดจ์ไดโอดเบอร์ DB105G พิกัดแรงดัน 500 V พิกัดกระแส 1 A
3. Regulator เบอร์ 7805 ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ 5 V_{DC}
4. ตัวเก็บประจุ ขนาด 1000 μF 50 V ทำหน้าที่กรองสัญญาณแรงดันให้เรียบ และตัวเก็บประจุ 0.1 μF ทำหน้าที่ป้องกันการตอบสนองสัญญาณทรานเซียนต์ (Transient Response) ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด

วงจรไฟเลี้ยงสำหรับวงจรขับเคลื่อน ประกอบด้วย

1. หม้อแปลงแรงดัน (Step down Transformer) 4 เอาต์พุต พิกัดแรงดัน 220/16 V_{AC} พิกัดกระแส 0.25 A ทำหน้าที่แปลงแรงดันจาก 220 V_{AC} เป็นแรงดัน 16 V_{AC}
2. วงจรเรียงกระแส (Bridge Rectifier) ทำหน้าที่แปลงแรงดันกระแสสลับเป็นแรงดันกระแสตรง โดยใช้ บริดจ์ไดโอดเบอร์ DB105G พิกัดแรงดัน 500 V พิกัดกระแส 1 A
3. Regulator เบอร์ 7815 ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ 15 V_{DC}
4. ตัวเก็บประจุ ขนาด 1000 μF 50 V ทำหน้าที่กรองสัญญาณแรงดันให้เรียบ และตัวเก็บประจุ 0.1 μF ทำหน้าที่ป้องกันการตอบสนองสัญญาณทรานเซียนต์ (Transient Response) ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด

วงจรกำลัง และวงจรขับเคลื่อนที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

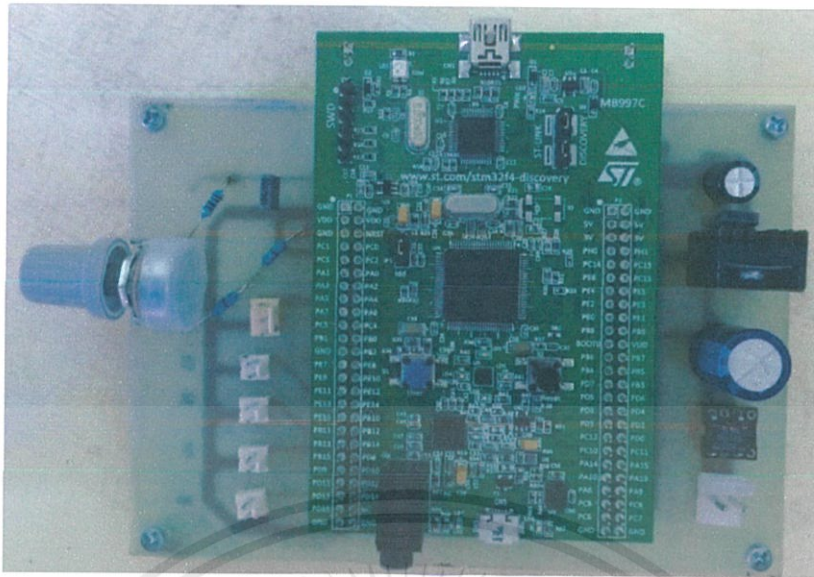


รูปที่ 3.3 วงจรกำลังและวงจรชุดขับเคลื่อนที่ออกแบบ

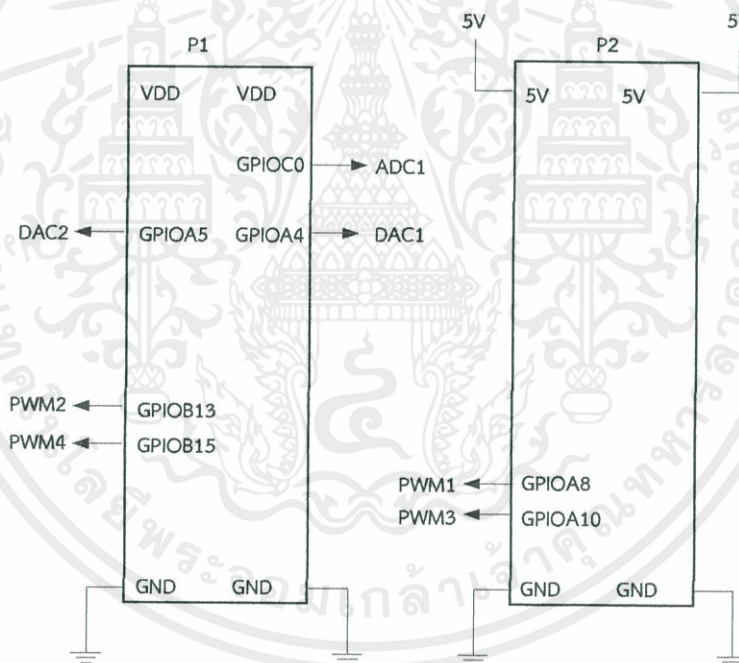
3.2.5 วงจรควบคุม (Control Circuit)

โครงการนี้เลือกใช้บอร์ด STM32F4 Discovery โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F407VGT6 เป็นหน่วยประมวลผลกลาง โดยในบอร์ดจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ชุด ST-LINK/V2 ใช้ในการ Download และ Debug ไปยัง MCU STM32F407VGT6 ที่อยู่ในบอร์ดผ่านทาง PORT USB แสดงดังรูปที่ 3.4 (ก) เป็นตัวสร้างและควบคุมสัญญาณมอดูเลท (Pulse Width Modulation) ส่งเข้าวงจรขับเคลื่อน TLP250 ที่ใช้ในการขับมอเตอร์

STM32F407VGT6 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Arm Cortex M4 ขนาด 32 บิต มีโมดูลและฟังก์ชันที่หลากหลายและจำเป็นต่อโครงการ เช่น ฟังก์ชันสร้างและควบคุมสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท และสัญญาณที่สร้างขึ้นถูกประมวลผลด้วย Timer Interrupt ซึ่งสามารถควบคุมเวลาในการ Trigger ได้อย่างคงที่ โมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC) ความละเอียด 12 บิต จำนวน 3 ช่องสัญญาณ ซึ่งมีความจำเป็นต่อการปรับสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลทเพราะไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องรับสัญญาณอนาลอกจากตัวต้านทานปรับค่าได้ และนอกจากนี้ยังมีความสามารถโดดเด่นจากไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอื่นคือ Direct Memory Access (DMA) ที่ทำให้โมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC) สามารถส่งค่ามาเก็บยัง DMA ได้โดยตรง ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานสามารถอ่านค่า ADC จาก DMA ได้ทันที ทำให้การประมวลผลไม่เสียเวลาในการเรียกใช้งานโมดูล ADC และการที่ ARM Cortex-M4 นี้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิต ทำให้สามารถใช้งานค่านวนตัวแปรที่เป็น Floating Point Unit หรือจุดทศนิยมได้ในสัญญาณนาฬิกาทุกตัว



(ก)



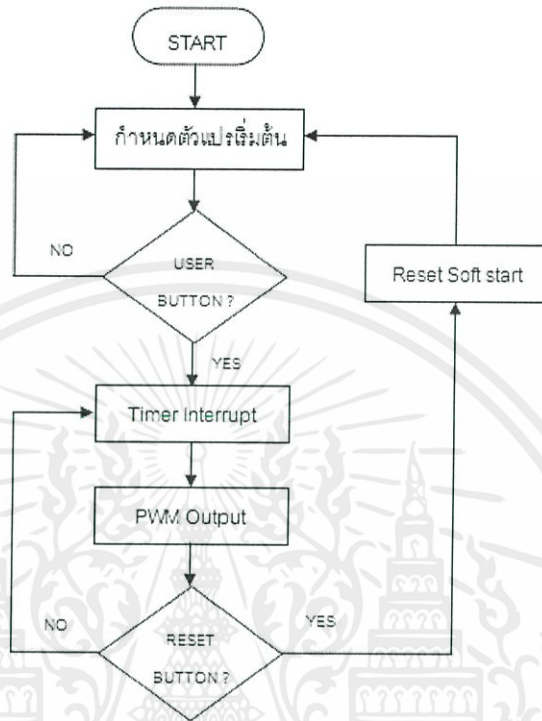
(ข)

รูปที่ 3.4 วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (ก) วงจรจริง (ข) แผนผังวงจร

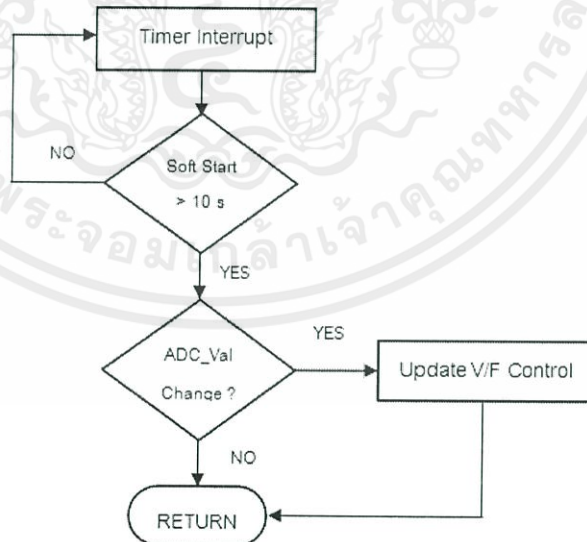
จากรูปที่ 3.3 (ข) ได้แสดงแผนผังการเชื่อมต่อสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรมิโครคอนโทรลเลอร์ ได้แก่ การรับอินพุตจากค่าความต้านทานปรับค่าได้ การส่งออกเอาต์พุตสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลทไปที่วงจรถับเกต และการส่งออกเอาต์พุต DAC ซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกสำหรับการทำให้แก่ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) สามารถวัดสัญญาณไซน์ ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมของสัญญาณ PWM

ขั้นตอนการทำงานสร้างสัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงได้ดัง
ไดอะแกรม (Flow Chart) ดังรูปที่ 3.5

Main Routine



Timer Interrupt Routine



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เริ่มต้นโปรแกรมจะเริ่มทำงานเมื่อมีการกดสวิตช์สตาร์ท (User Button)

โปรแกรมจะเข้ามาทำงานในลูป Timer Interrupt

2. ในรูป Timer Interrupt จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณ PWM โดยช่วง 10 วินาทีแรก โปรแกรมจะสร้างสัญญาณ PWM แบบซอร์ฟสตาร์ท (Soft start)

3. โปรแกรมจะเพิ่มและลดความถี่ของสัญญาณ PWM ด้วยอัตราส่วน V/F คงที่ โดยตรวจสอบจากการปรับค่าอนาล็อกที่ต่อกับวงจร Analog to Digital

4. เมื่อมีการกดปุ่มรีเซ็ต โปรแกรมจะหยุดทำงาน และรีเซ็ตค่า Soft Start เป็น 0

3.2.6 วงจรจำกัดกระแสกระชากตอนเริ่มทำงาน

เมื่อจ่ายไฟให้แก่วงจร กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน R_1 ในช่วงเริ่มต้นการทำงานและ R_1 จะถูกลัดวงจร โดยใช้รีเลย์เป็นสวิตช์ตัดต่อวงจร เนื่องจาก R_1 ทำหน้าที่จำกัดกระแสในช่วงเริ่มต้นการชาร์จตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต กล่าวคือกระแสที่ไหลผ่าน R_1 คือกระแสที่ใช้ในการชาร์จตัวเก็บประจุ โดยใช้เวลาไม่น้อยกว่า 5 วินาที เมื่อวงจรเริ่มต้นการทำงาน ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดการกระชากของกระแสขณะเริ่มทำงาน สามารถหาความต้านทาน ได้ดังสมการที่ 11 และ 12

$$V_c(t) = V - V \exp\left(\frac{-t}{R_1 C}\right) \quad (11)$$

$$R_1 = \frac{-5}{1880 \times 10^{-6} \ln\left(\frac{310 - 302.25}{310}\right)} \quad (12)$$

$$R_1 = 720.97 \Omega$$

ดังนั้นเลือกใช้ R_1 800 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการจำลอง และผลการทดลอง

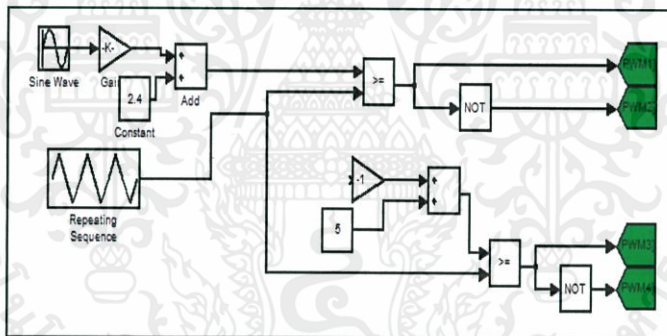
4.1 บทนำ

ในบทนี้นำเสนอผลการจำลองและผลการทดลองการทำงานของ เอช – บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ โดยการจำลอง ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink ซึ่งในการทำงานของ อินเวอร์เตอร์จะ ใช้สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชันแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของ มอสเฟต และควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้หลักการ V/F คอนโทรล

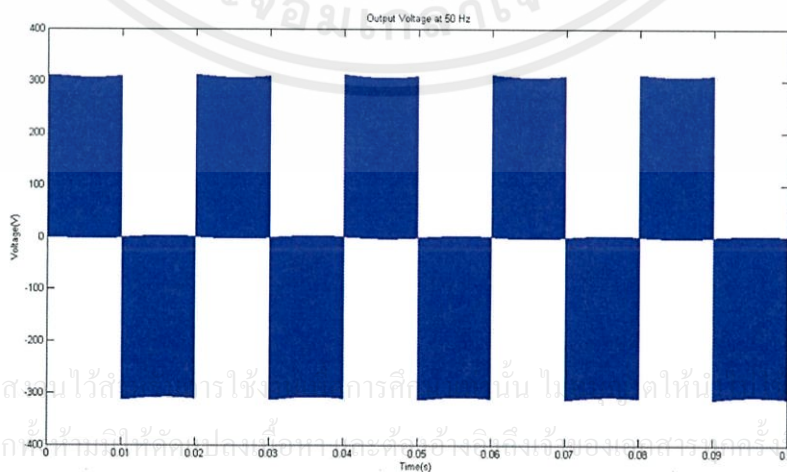
4.2 การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.2.1 การจำลองสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท แบบยูนิโพลาร์

จากทฤษฎีในบทที่ 2 สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท แบบยูนิโพลาร์ จะใช้สัญญาณไซน์ สองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 180 องศา เป็นสัญญาณควบคุม เปรียบเทียบกันสัญญาณสามเหลี่ยมที่เป็นสัญญาณอ้างอิง ซึ่งจะได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตใกล้เคียงกับสัญญาณไซน์ ดังรูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่มีความถี่สัญญาณไซน์ 50 Hz

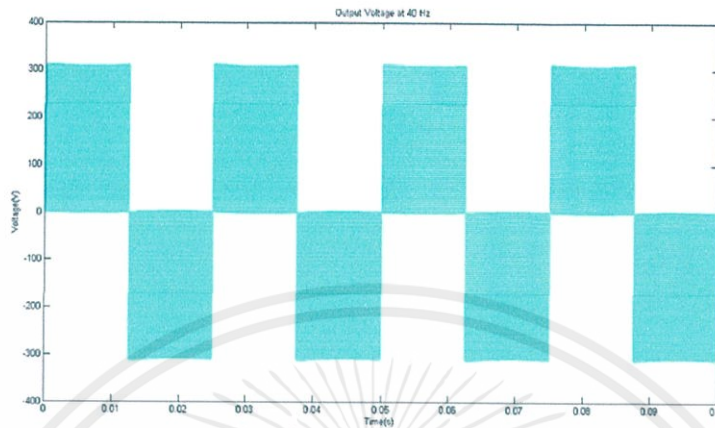


รูปที่ 4.1 แบบจำลองสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท แบบยูนิโพลาร์

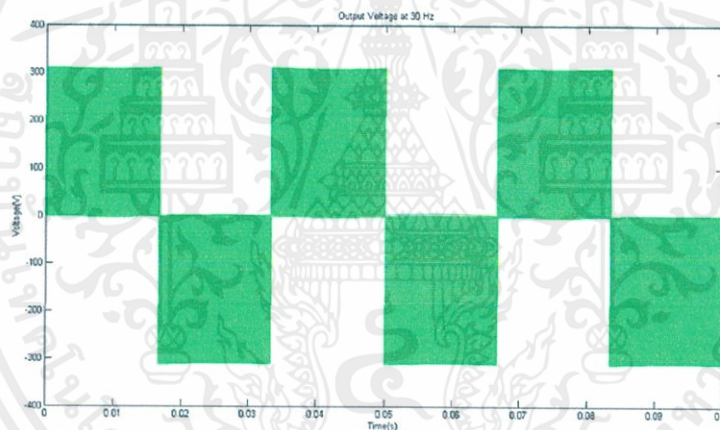


รูปที่ 4.2 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่มีความถี่สัญญาณไซน์ 50 Hz

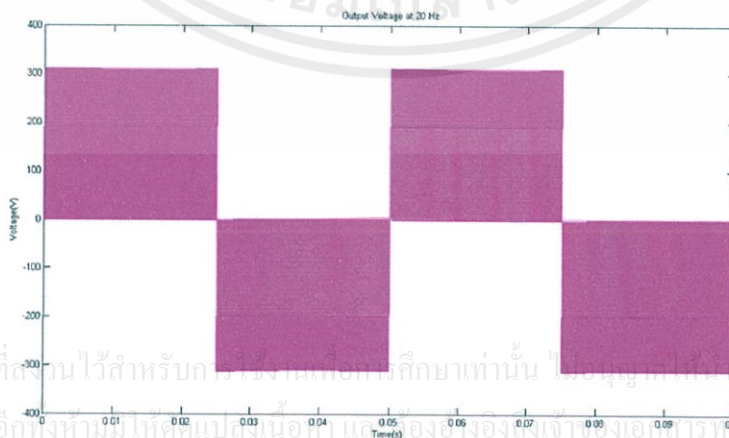
เมื่อปรับสัญญาณไซน์แบบ V/F คอนโทรล สัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะมีความถี่เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณไซน์ ดังรูปที่ 4.3 – 4.5 แสดงสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่มีความถี่สัญญาณไซน์ 40 Hz, 30Hz และ 20 Hz ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่มีความถี่สัญญาณไซน์ 40 Hz



รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่มีความถี่สัญญาณไซน์ 30 Hz

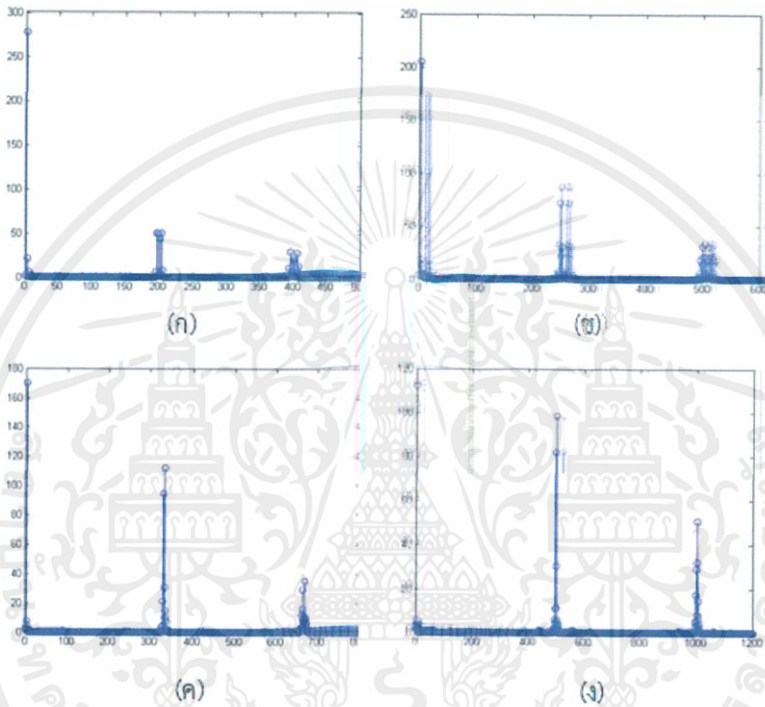


รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่มีความถี่สัญญาณไซน์ 20 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคคลในวงจำกัดเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสำเนาอื่นใด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 - 4.5 ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต จะเท่ากับความถี่ของสัญญาณ ไซน์ และแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) จะมีค่าเปลี่ยนไปตามความถี่ ตามการควบคุมแบบ V/F คอนโทรล

เมื่อแตกอนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะได้กราฟสเปกตรัมที่ m_a เท่ากับ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อ m_a มีค่าน้อยลง แรงดันที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental) ของสัญญาณลดลง และแรงดันฮาร์โมนิกส์มีค่าเพิ่มขึ้นที่จำนวนเท่าของความถี่ สวิตซ์



รูปที่ 4.6 กราฟสเปกตรัมของสัญญาณแรงดันเอาต์พุต (ก) $m_a = 1$ (ข) $m_a = 0.8$ (ค) $m_a = 0.6$ (ง) $m_a = 0.4$

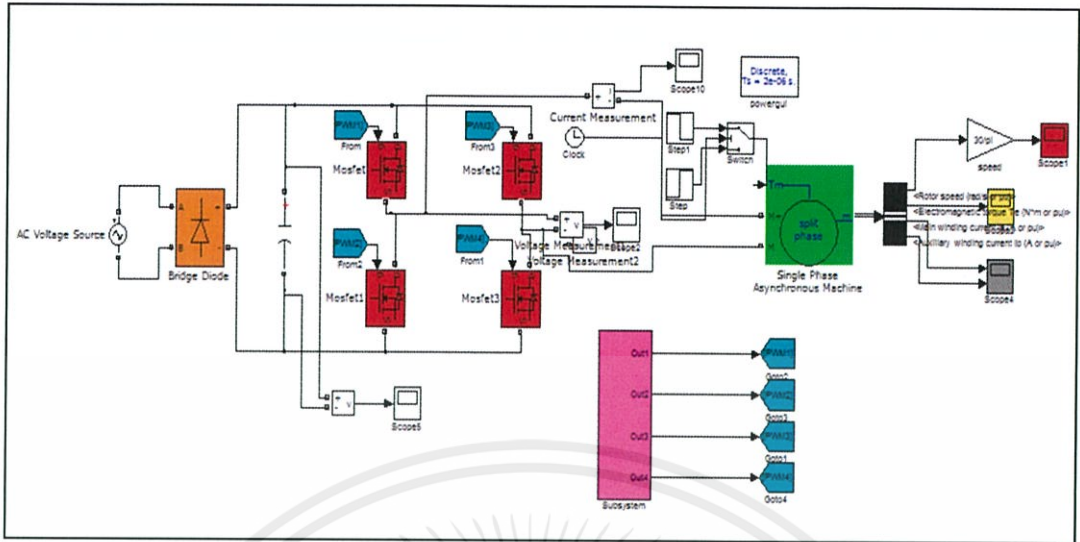
4.2.2 การจำลองการทำงานของ เอช - บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

วงจรจำลอง เอช - บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ใช้มอสเฟต เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ โดยใช้ความถี่สวิตซ์ซิง 20 kHz และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ดังตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์	จำนวน
Resistance (R)	2.00 Ohm
Inductance (L)	30 mH
Torque constant (Km)	0.1 N m/A
Back emf constant (Kb)	0.2 V sec/rad
Viscous friction (B)	0.2 N m sec/rad
Inertia (J)	0.00002 kg m ²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังต้องออกการทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 วงจรจำลอง เอช - บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

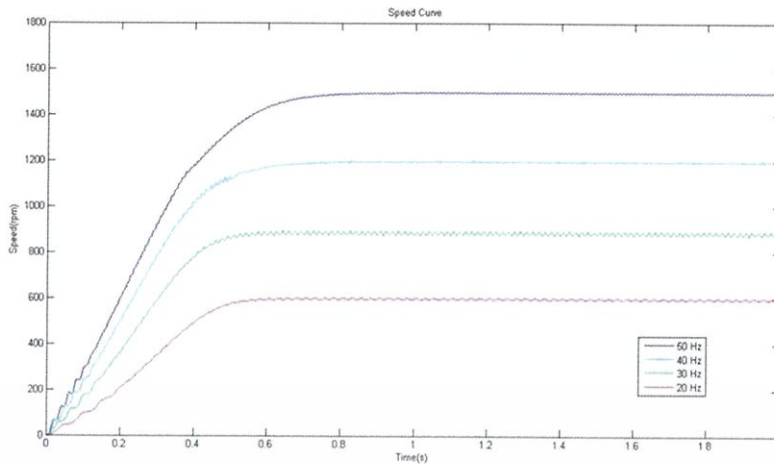
รูปที่ 4.7 แสดงวงจรจำลอง เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้ควบคุมอินдукชันมอเตอร์หนึ่งเฟส โดยควบคุมแบบ V/F คอนโทรล จากทฤษฎีในบทที่ 2 เมื่อปรับความถี่ของสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถเปรียบเทียบผลจากทฤษฎีและผลจากการ Simulation โดยมอเตอร์มี Pole 4 ขั้ว ได้ดังตารางที่ 4.2

ตาราง 4.2 ตารางเปรียบเทียบความเร็วรอบซิงโครนัส (N_s) ของมอเตอร์จากทฤษฎีและผลการ Simulation

ความถี่ (Hz)	ความเร็วรอบของมอเตอร์ N_s (rpm)	
	ทฤษฎี	Simulation
15	450	440
20	600	595
30	900	900
40	1200	1200
50	1500	1500

จะได้กราฟแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความเร็วรอบซิงโครนัส (N_s) ของมอเตอร์

4.2.3 สรุปผลการจำลอง

จากการจำลองเพื่อทดสอบการควบคุม V/F คอนโทรล ของสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลทแบบยูนิโพลาร์ พบว่าความถี่และแรงดันของสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณไซน์ซึ่งเป็นสัญญาณอ้างอิงของสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท โดยเปลี่ยนแปลงแบบ V/F คงที่ ซึ่งเมื่อแอมพลิจูดของสัญญาณไซน์หรือค่าดัชนีการมอดูเลท m_a เพิ่มขึ้น แรงดันที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental) ของสัญญาณจะเพิ่มขึ้น และแรงดันฮาร์มอนิกส์จะมีค่าลดลงที่จำนวนเท่าของความถี่สวิตซิ่ง ดังนั้นถ้า m_a มีค่ามากจะทำให้แรงดันฮาร์มอนิกส์มีบทบาทน้อยลงด้วย และเมื่อนำสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลทมาขับเคลื่อนมอเตอร์ในแบบจำลอง เอช - บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้โดยมอเตอร์มีแรงบิดสูงสุด (T_{max}) คงที่

4.3 การทดลองการทำงานของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลอง เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบ เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยควบคุมแบบ V/F คอนโทรล โดยการปรับความถี่และแอมพลิจูดของสัญญาณไซน์ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมของสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลท โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ เพื่อดูพฤติกรรมของมอเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- | | |
|---|-----------------|
| 1. เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ที่ทำการออกแบบ | จำนวน 1 ชุด |
| 2. อินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส | จำนวน 1 เครื่อง |
| 3. เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer) | จำนวน 1 เครื่อง |
| 4. Digital Oscilloscope รุ่น DT-1620 พร้อมกับ โพรบวัดแรงดัน | จำนวน 1 เครื่อง |
| 5. มัลติมิเตอร์รุ่น Fluke | จำนวน 1 เครื่อง |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3. เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer) นั้น ไม่อนุญาตให้ จำนวน 1 เครื่อง ให้นำไปใช้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีก 4. Digital Oscilloscope รุ่น DT-1620 พร้อมกับ ของเอกสาร จำนวน 1 เครื่อง ให้นำไปใช้

6. เครื่องวัดอุณหภูมิ

จำนวน 1 เครื่อง

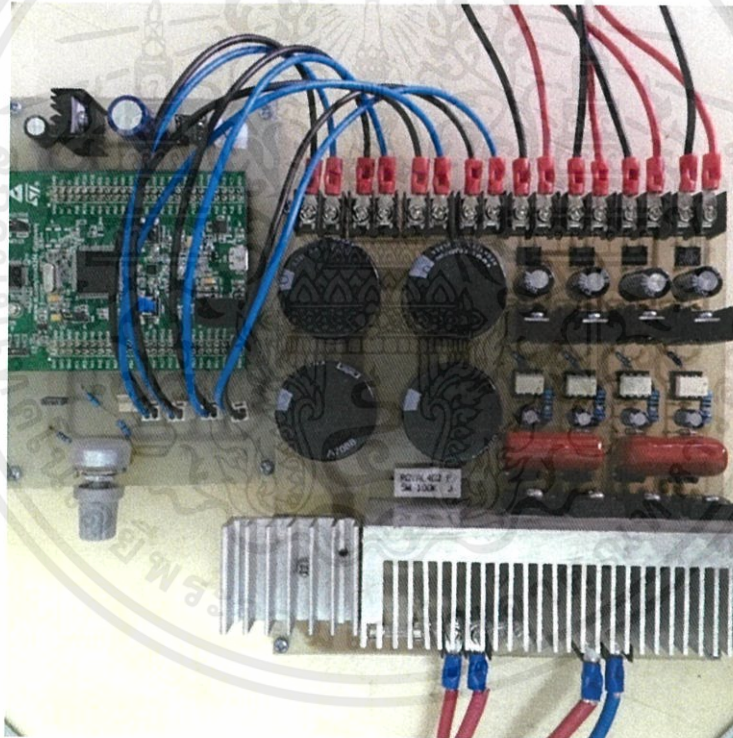
7. พาวเวอร์มิเตอร์

จำนวน 2 เครื่อง

ตาราง 4.3 พิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	พิกัด
Horsepower	1/4 HP (0.2 kW)
Frequency	50 Hz
Pole	4 Pole
Voltage	220 V
Speed	1450 RPM
Current	2.6 A

4.3.2 วงจรที่ใช้ในการปฏิบัติการทดลอง



รูปที่ 4.7 วงจร เอช - บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

4.3.4 ผลการทดลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์

ทำการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการควบคุมมอเตอร์ โดย

จ่ายแรงดันอินพุต 230 โวลต์ และวัดความเร็วรอบโรเตอร์ของมอเตอร์ (N_r) โดยมอเตอร์มีเปอร์เซ็นต์ สลิปเท่ากับ 3.33% ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 13

$$S = \left(\frac{N_s - N_r}{N_s} \right) \times 100 \quad (13)$$

ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4

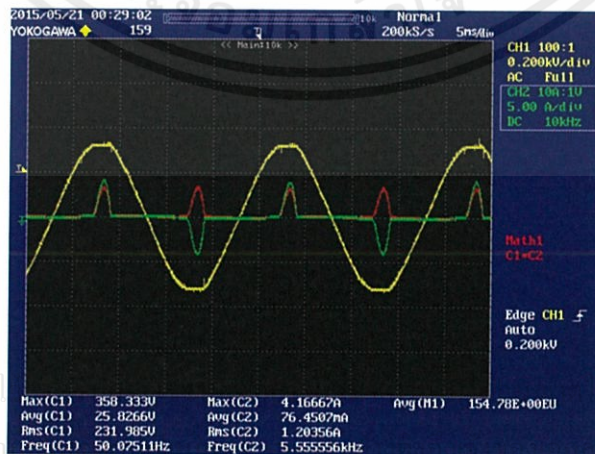
ตาราง 4.4 ตารางผลการทดลองปรับความเร็วรอบของมอเตอร์

ความถี่ (Hz)	ความเร็วรอบ N_s (RPM) คำนวณ	ความเร็วรอบ N_r (RPM) จริง	ความเร็วรอบ N_s (RPM) จริง	แรงดันอินพุต (V_{rms})	กระแสอินพุต (I_{rms})	กำลังไฟฟ้าอินพุต (Watts)	แรงดันเอาต์พุต (V_{rms})	กระแสเอาต์พุต (I_{rms})	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (Watts)
16.0	480.0	454.3	469.8	231.06	0.882	108.20	130.98	1.580	60.84
20.7	621.0	581.4	601.3	231.27	0.927	114.55	150.03	1.383	73.44
25.5	765.0	716.1	740.5	231.08	1.325	168.35	168.05	1.368	120.87
30.3	909.0	861.2	890.6	230.45	1.858	245.06	185.50	1.738	222.97
35.2	1056.0	1013.8	1048.4	229.46	2.818	386.60	202.25	2.330	353.71
40.7	1221.0	1178.4	1218.7	231.07	1.136	140.61	215.58	2.183	85.04
45.5	1365.0	1316.8	1361.8	230.89	1.278	162.76	227.07	2.24	83.92
50.5	1515.0	1461.0	1510.8	231.98	1.203	154.78	241.97	2.162	76.48

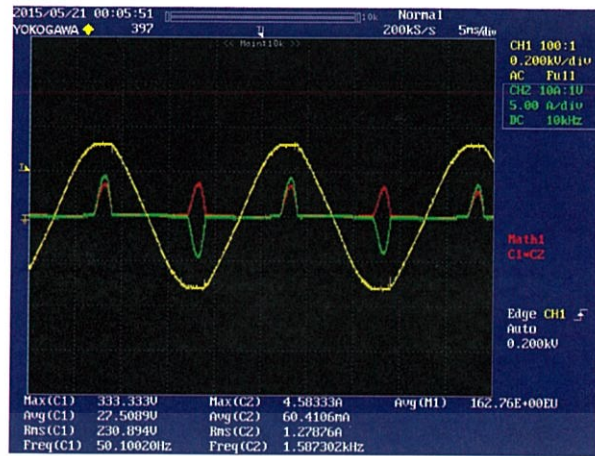
จากผลการทดลอง อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมความเร็วซิงโครนัส (N_s) ของมอเตอร์ได้ด้วยการปรับความถี่ของสัญญาณ PWM เมื่อปรับความถี่เพิ่มขึ้น ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามด้วย โดยมอเตอร์มีเปอร์เซ็นต์สลิปเท่ากับ 3.33% ซึ่งสามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 16-50 เฮิรตซ์ โดยในช่วงความถี่ต่ำ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎี และในช่วงความถี่ 40 – 50 เฮิรตซ์ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากทฤษฎี และสามารถหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบเฉลี่ยได้เท่ากับ 68.53%

4.3.4 กราฟแสดงแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

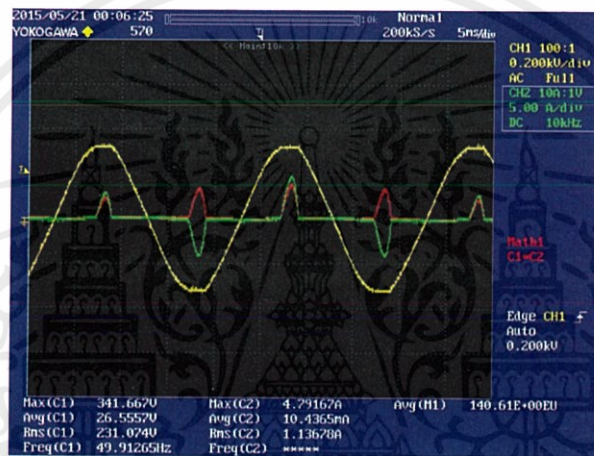
กราฟแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์



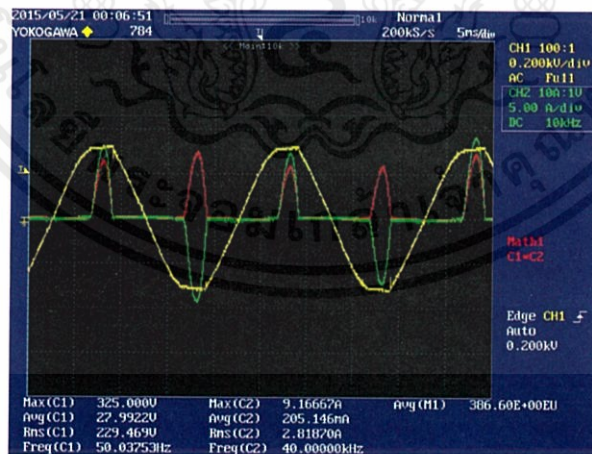
รูปที่ 4.8 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 50.5 Hz



รูปที่ 4.9 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 45.5 Hz

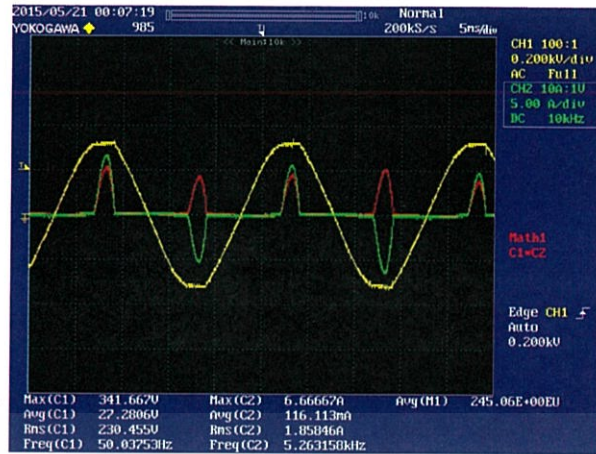


รูปที่ 4.10 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 40.7 Hz

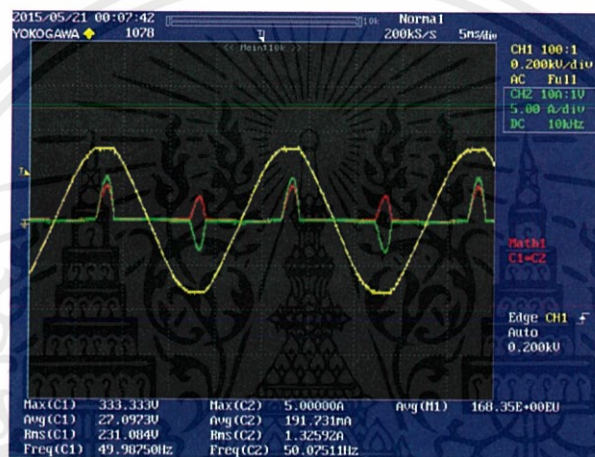


รูปที่ 4.11 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 35.2 Hz

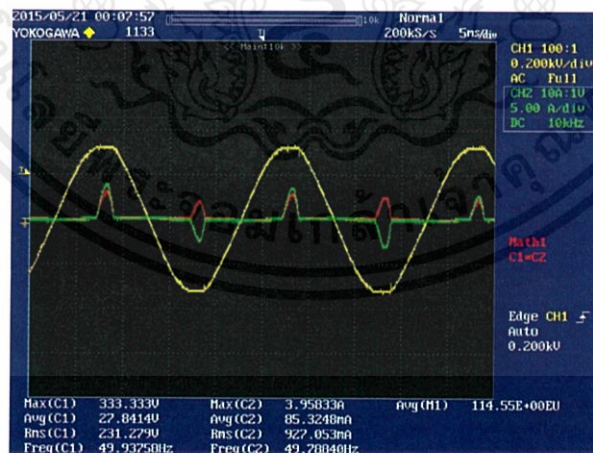
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 30.3 Hz

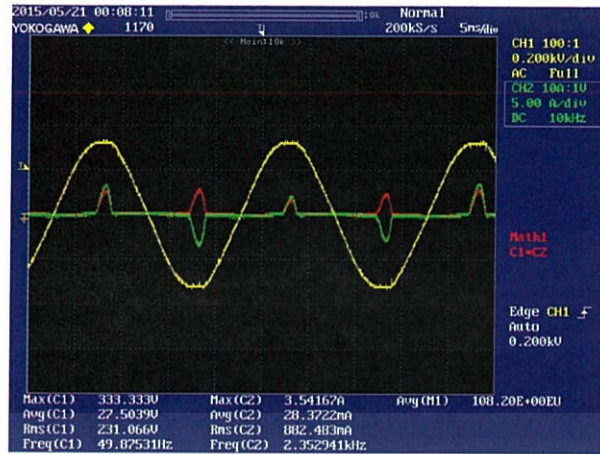


รูปที่ 4.13 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 25.5 Hz



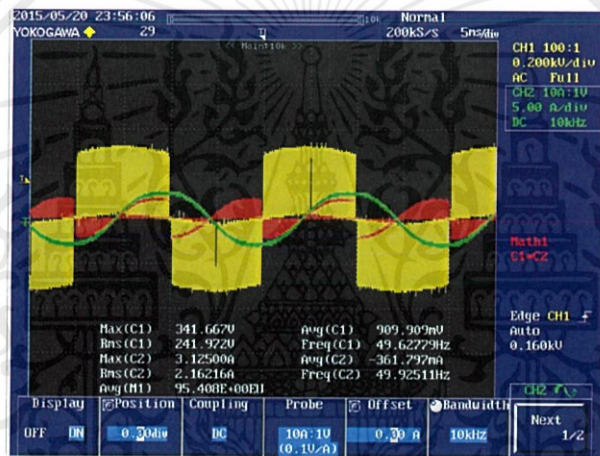
รูปที่ 4.14 กราฟแรงดันอินพุตที่ความถี่ 20.7 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

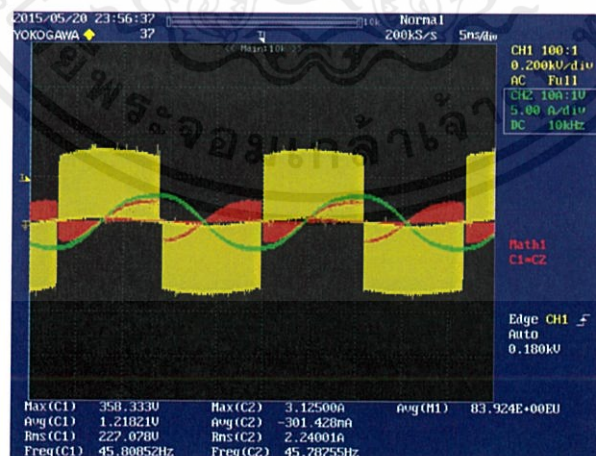


รูปที่ 4.15 กราฟแรงดันอินพุตที่มีความถี่ 16.0 Hz

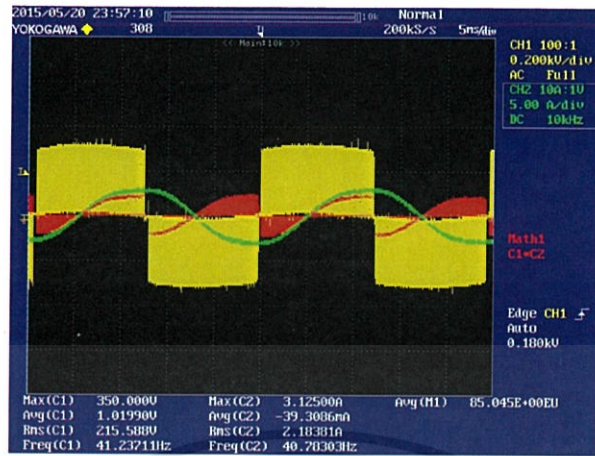
กราฟแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์



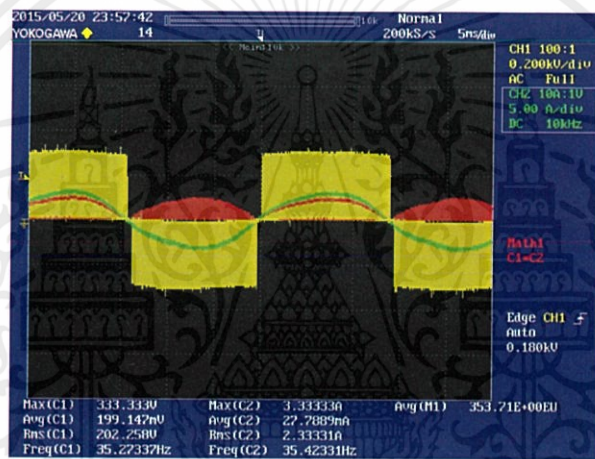
รูปที่ 4.16 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่มีความถี่ 50.5 Hz



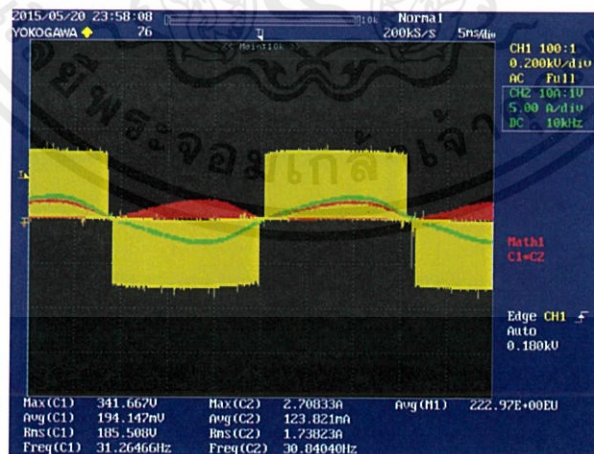
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ รูปที่ 4.17 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่มีความถี่ 45.5 Hz ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 40.7 Hz

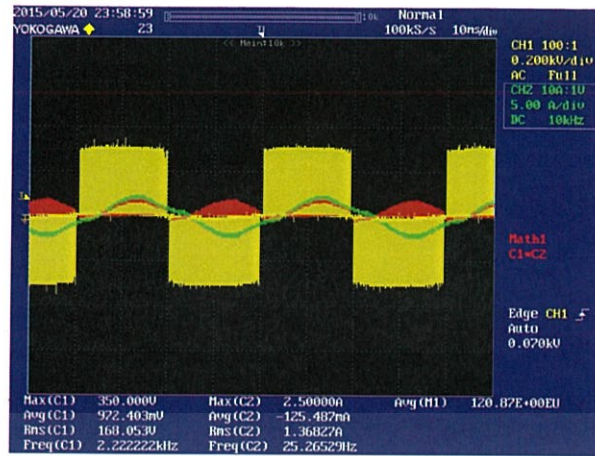


รูปที่ 4.19 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 35.2 Hz

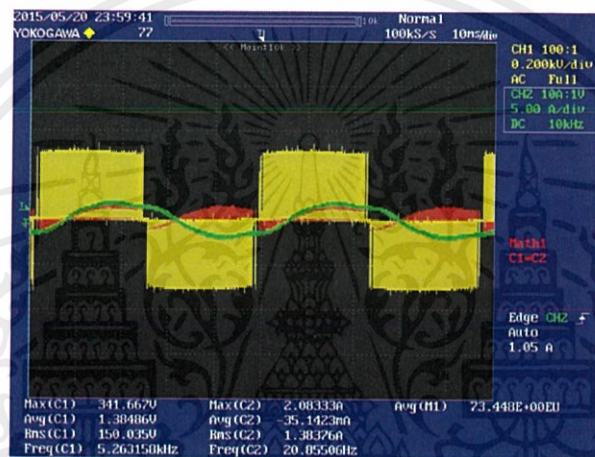


รูปที่ 4.20 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 30.3 Hz

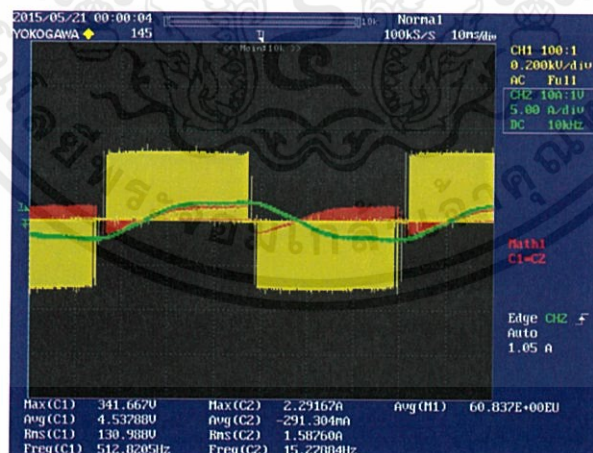
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 25.5 Hz



รูปที่ 4.22 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 20.7 Hz



รูปที่ 4.23 กราฟแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 16.0 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่แสดงดังรูปที่ 4.8 — 4.23 โดยกราฟสี่เหลี่ยมแสดงกราฟแรงดัน กราฟสี่เหลี่ยมแสดงกราฟกระแส และกราฟสี่เหลี่ยมแสดงกราฟกำลังไฟฟ้า จะเห็นได้ว่ากราฟแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เป็นสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลทแบบยูนิโพลาร์ และกราฟกระแสเอาต์พุตเป็นกราฟสัญญาณไซน์และมีเฟสล่าช้าหลังกราฟสัญญาณแรงดัน เนื่องจากมอเตอร์มีค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ซึ่งมีผลช่วยกรองสัญญาณกระแส จากกราฟแสดงแรงดันเอาต์พุตพบว่า เมื่อปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีความถี่และแรงดันเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ด้วยอัตราส่วน V/F คงที่

4.3.5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบ อินเวอร์เตอร์สามารถปรับความเร็วรอบชิงโครนัส (N_s) ของมอเตอร์ด้วยการปรับความถี่ไฟฟ้าป้อนเข้า ด้วยอัตราส่วน V/F คงที่ ซึ่งสามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 16 — 50 เฮิรตซ์ และปรับความเร็วรอบชิงโครนัสของมอเตอร์ได้ในช่วง 455 — 1450 rpm โดยมอเตอร์ที่ทำการทดลองมีเปอร์เซ็นต์สลลิปเท่ากับ 3.33% และอินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพในการทำงานเฉลี่ยเท่ากับ 68.53%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

5.1 บทสรุป

การออกแบบอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสในโครงงานนี้ เป็นการออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด และใช้งานง่าย เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟสขนาด 1/4 แรงม้า (0.2 kW) โดยใช้การควบคุมแบบ V/F คอนโทรล ซึ่งออกแบบส่วนของการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้ขนาดของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลทมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับการสร้างสัญญาณจากวงจรอนาล็อก นอกจากนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์ยังสามารถใช้ควบคุมการทำงานอื่นๆได้อีกคือ การชอร์ฟสตาร์ท และการสั่งการทำงานของรีเลย์ โดยอินเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ในช่วง 455 rpm – 1450 rpm ที่ความถี่ 16 – 50 เฮิรตซ์ และมีประสิทธิภาพโดยรวมในการทำงาน 68.53%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขณะที่ทำการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ควรแยกกราวด์ระหว่างวงจรทดลองและเครื่องมือวัด เช่น ออสซิลโลสโคป เนื่องจากสัญญาณรบกวนจากเครื่องมือวัดสามารถสร้างสัญญาณรบกวน ที่อาจส่งผลให้มอสเฟตเสียหายได้
2. ระบบระบายความร้อนในตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้แก่ มอสเฟต และเรกกูเลเตอร์ ต้องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและเหมาะสมกับขนาดของอุปกรณ์ เนื่องจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์มีความสูญเสียสวิตชิง (Switching Loss) ทำให้อุปกรณ์เกิดความ จึงควรมีการติดตั้งตัวระบายความร้อน (Heatsink) เพื่อป้องกันอุปกรณ์เสียหาย
3. ตัวระบายความร้อนควรมีการต่อลงกราวด์ เพื่อความปลอดภัย และป้องกันการลัดวงจรจากการสัมผัสขณะที่ทำการทดลองอยู่
4. ในการออกแบบวงจรขับเคลื่อน และวงจรกำลัง ควรออกแบบให้สัญญาณมี spike น้อยกว่านี้ โดยการใส่วงจรสแน็บเบอร์
5. ในการออกแบบวงจรขับเคลื่อน ควรออกแบบให้สัญญาณขับเคลื่อนมีความคม หรือให้สัญญาณขับเคลื่อนมีความโค้งน้อยที่สุด โดยการเลือกค่า R_g ที่เหมาะสม

5.3 แนวทางการพัฒนา

1. จากโครงงาน ผู้ที่จะนำไปพัฒนาต่อ ควรเพิ่มการป้องกันสัญญาณรบกวน เนื่องจากขณะที่ทำการทดลอง เมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ ส่งผลให้มอสเฟตเสียหายและเกิดการลัดวงจร
2. สามารถลดขนาดของวงจรจ่ายไฟเลี้ยงได้ โดยใช้หลักการ แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์โหมดทราวเวอร์ซัพพลาย (Switch Mode Power Supply) โดยในแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์โหมด

แรงดันกระแสสลับอินพุตจะถูกเรียงกระแสโดยตรง จากนั้นจะถูกกรองเพื่อให้ได้แรงดันกระแสตรง โดยแรงดันกระแสตรงที่เกิดขึ้นจะถูกสับเปลี่ยนให้ปิด/เปิดที่ความถี่สูงโดยวงจรสวิตชิงอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เป็นกระแสสลับความถี่สูงมาก (ประมาณ 10 KHz-1 MHz) ซึ่งจะช่วยให้มีการใช้หม้อแปลงไฟฟ้า และตัวกรองเก็บประจุที่มีขนาดเล็กมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถิติพลังงานประจำปี [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.energy.go.th>
- [2] โครงการช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าของกระทรวงอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.industry.go.th>
- [3] แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ. 2554 - 2573) [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.enconfund.go.th/pdf/index/EEDP_Thai.pdf
- [4] Mr.Aung Zaw Latt and Dr.Ni Ni Win, “Variable Speed Drive of Single Phase Induction Motor Using Frequency Control Method,” 2009 International Conference on Education Technology and Computer
- [5] Ibrahim, Raja Ismail and Ghazali, “Development of Variable Speed Drive for Single Phase Induction Motor Base on Frequency Control,” Power and Energy Conference, 2006. PECon’06 IEEE International
- [6] Chaitanya N.Jibhakate and Vijaya Huchche, “Speed Control of Single Phase Induction Motor Using Microcontroller,” International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) 2014
- [7] กราฟแรงบิด [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://what-when-how.com/induction-motor/open-loop-scalar-speed-control-constant-voltshertz-induction-motor/>
- [8] กราฟช่วงการทำงานของมอสเฟต [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.research-system.siam.edu>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัด

Compact Inverter Design

ธนกร คงมี พรนภา ชาญกิจกรรณ์ พรพรรณ สาลิกา วัทธัญญา โยธิน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบังกรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: sua-ss@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัดโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัดและสามารถนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมได้ เพื่อนำไปขับเคลื่อนอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟส โดยอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถใช้ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ การควบคุมหรือการปรับความเร็วรอบนั้นทำได้จากการปรับขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบในโครงการนี้เป็นในรูปแบบของเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์หรือฟูล-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ โดยใช้เทคนิคพัลส์วิดโมดูเลชัน ซึ่งสร้างสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Arm Cortex M4 (STM32F407VGT6) และใช้ออปโตคัปเปิลอร์ TLP250 เป็นอุปกรณ์ขับพาวเวอร์ MOSFET (IRFP460) และแยกกราวด์ระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์

คำสำคัญ: การออกแบบอินเวอร์เตอร์ขนาดกะทัดรัดและเชิงพาณิชย์

ABSTRACT

This Paper presents a compact inverter design. The main objective of this paper is to design a very compact and easy implementation to industry especially for a single phase induction motor drive. Inverter is the driver to control the speed of motor by varying the operating frequency and voltage. The topology of developed inverter in this project is H-Bridge inverter or full Bridge inverter using pulse width modulation (PWM) technique. The control signal is generated by the microcontroller Arm Cortex M4 (STM32F407VGT6). In addition, the TLP250 opto-coupler serves the purpose of isolation between the microcontroller circuit and the H-Bridge inverter, and supplies the required gate voltage for the turning on/off of the power MOSFET (IRFP460) in the H-bridge circuit.

1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการนำมาควบคุมการทำงานของมอเตอร์[1] ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วทั้งการสร้างสัญญาณขับเคลื่อนของสวิตช์จาก ไอซีแอนดลอจิก (AND Logic)[2]และจากไมโครคอนโทรลเลอร์ [3] ทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพระบบมีเสถียรภาพคงที่และง่ายต่อการใช้งานรวมถึงมีการพัฒนาการป้องกันการทำงานของอินเวอร์เตอร์ โครงการนี้ได้นำเสนอการออกแบบเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ (H-Bridge Inverter) ขนาดกะทัดรัดสำหรับขับเคลื่อนอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟสโดยใช้พาวเวอร์ MOSFET (Power MOSFET) เป็นอุปกรณ์สวิตช์และสร้างสัญญาณพัลส์วิดโมดูเลชัน (Pulse Width Modulation: PWM) STM32F407VGT6 เป็น MCU ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM Cortex-M4 เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของสวิตช์รวมถึงออกแบบวงจรจ่ายไฟ (Power Supply)

2. ทฤษฎี

2.1 การควบคุมมอเตอร์แบบ V/F คอนโทรล

จากหลักการทำงานพื้นฐานของ Induction motor ความเร็วรอบของมอเตอร์ตามความต้องการของโหลดนั้นสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่าความถี่ (frequency) ตามสมการที่ (1)

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (1)$$

เมื่อ Pole มีค่าคงที่ แต่เนื่องจากเมื่อความถี่เปลี่ยนแล้วจะทำให้ X_L เปลี่ยน ซึ่งถ้า X_L ของ L_m เปลี่ยนจะทำให้ I_m เปลี่ยนแปลงด้วยในขณะที่แรงดัน V_s เท่าเดิม เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างจากสเตเตอร์เพื่อส่งพลังงานไปที่โรเตอร์ขึ้นอยู่กับขนาดของ I_m ถ้า I_m เปลี่ยน ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กนี้ก็เปลี่ยนด้วย การปรับความถี่ให้มีค่ามากขึ้นจะทำให้ X_L มีค่ามากขึ้น และ I_m มีค่าลดลง ส่งผลให้ขนาดฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าลดลง เนื่องจากสมการที่ (2)

$$V = 4.44Nf\Phi \quad (2)$$

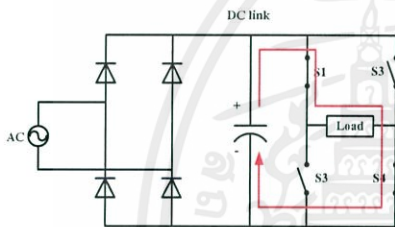
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจำนวนรอบขดลวดมีค่าคงที่ จะได้ $\omega \propto \frac{V}{f}$ เมื่อขนาดของสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง แรงบิด (Torque) ก็จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันถ้าลดความถี่ในขณะที่ V_s เท่าเดิม กระแส I_m มีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น แรงบิด (Torque) จึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อกระแสมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแกนเหล็กจะเกิดการอิ่มตัว และสนามแม่เหล็กมีมากเกินไปส่งผลให้ความร้อนที่แกนเหล็กสูงขึ้น ไม่ว่า I_m จะเพิ่มหรือลดต่างส่งผลเสียต่อมอเตอร์ ดังนั้นจึงต้องให้ I_m มีค่าคงที่ไม่ว่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงไปเท่าไรก็ตาม ซึ่งจะทำให้ขนาดสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ ส่งผลให้มอเตอร์มีแรงบิด (Torque) ได้สูงสุดคงที่

2.2 การทำงานของ เช - บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

การทำงานของเช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์เป็นการทำงานของสวิตช์ (S1, S2, S3, S4) โดยสวิตช์ S1, S3 และสวิตช์ S2, S4 จะสลับกันทำงานทีละคู่

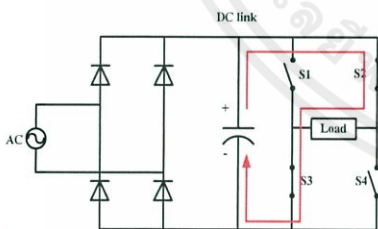
1.) สวิตช์ S1 และ S4 ทำงาน



รูปที่ 1 การทำงานสวิตช์ s1 และ s4 ของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 1 แสดงการทำงานของ สวิตช์ S1 และ S4 เมื่อสวิตช์ S1, S4 ทำงานสวิตช์ S2, S3 จะไม่ทำงานทิศทางของกระแสจะไหลครึ่งรูปและแรงดันที่ตกคร่อมโหลดมีค่าเท่ากับ $+V_s$

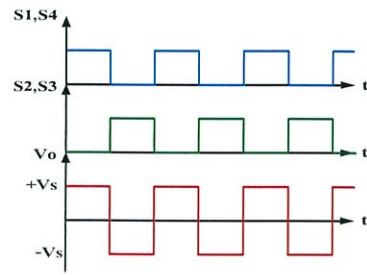
2.) สวิตช์ S2 และ S4 ทำงาน



รูปที่ 2 การทำงานสวิตช์ s2 และ s3 ของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 2 แสดงการทำงานของ สวิตช์ S2 และ S3 เมื่อสวิตช์ S2, S3 ทำงานสวิตช์ S1, S4 จะไม่ทำงานทิศทางของกระแสจะไหลครึ่งรูปและแรงดันที่ตกคร่อมโหลดมีค่าเท่ากับ $-V_s$

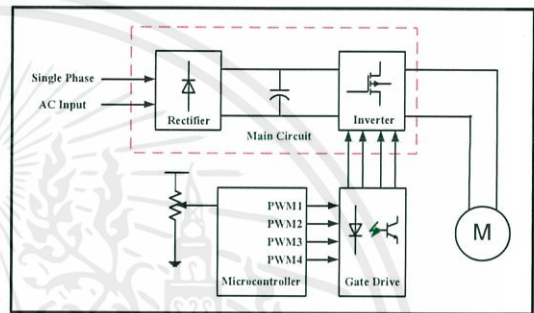
กราฟแรงดันเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟแรงดันเอาต์พุต

3. การออกแบบและสร้างวงจร เช - บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

ส่วนประกอบหลักของ เช - บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ส่วนประกอบหลักของ เช - บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

3.1 การออกแบบวงจรกำลัง (Main Circuit)

ในการออกแบบวงจรกำลัง ใช้ทิวเวอร์มอสเฟตเบอร์ IRFP460 เป็นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่ง ซึ่งมีกักแรงดัน 500 โวลต์ และพิกัดกระแส 20 แอมป์ โดยใช้ความถี่สวิตช์ซึ่ง 20 kHz มีไดโอดทำหน้าที่เป็น Freewheeling Diode ในช่วงที่มอสเฟตหยุดนำกระแสทำให้กระแสวิ่งผ่านโหลดอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ Super Fast Diode เบอร์ MUR460 และใช้ตัวเก็บประจุขนาด 470 uF พิกัดแรงดัน 400 โวลต์ ขนาดกันจำนวน 4 ตัว จะได้ คีซีลิงก์ (DC Link) ขนาด 1880 uF

3.2 การออกแบบวงจรชุดขับเกต (Gate Drive Circuit)

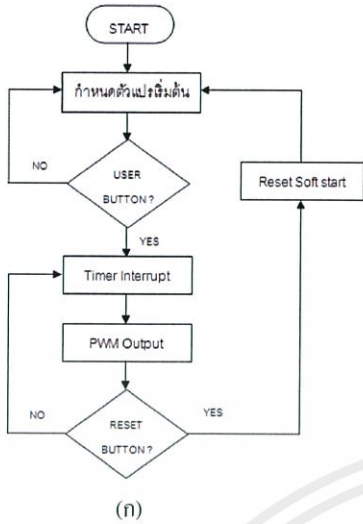
ชุดขับมอสเฟต ใช้ IC ออปโตคัปเปิลเลอร์ (Opto Coupler) แยกกราวน์ เบอร์ TLP 250 เป็นวงจรขับมอสเฟต ซึ่งจะรับสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และทำหน้าที่ขยายสัญญาณก่อนที่จะส่งสัญญาณไปขับมอสเฟต

3.3 วงจรควบคุม (Control Circuit)

ในการสร้างสัญญาณพัลส์วิดโมดูเลต เลือกใช้บอร์ด STM32F4 Discovery โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F407VGT6 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Arm Cortex M4 ขนาด 32 บิต เป็นหน่วยประมวลผลกลาง โดยการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 5

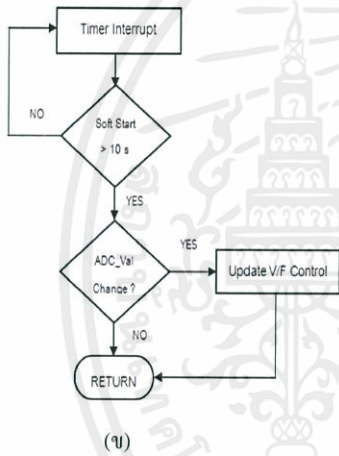
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Main Routine



(ก)

Timer Interrupt Routine

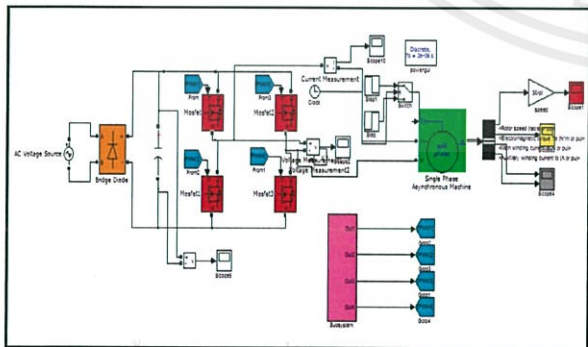


(ข)

รูปที่ 5 แผนผังแสดงโปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

(ก) Main Routine (ข) Timer Interrupt Routine

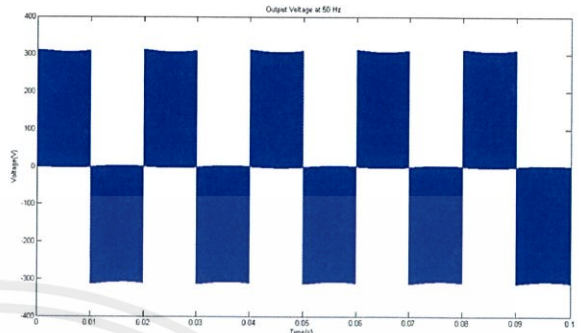
4. ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 6 วงจร เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

รูปที่ 6 แสดงวงจรจำลอง เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้ควบคุมอินดักมอเตอร์หนึ่งเฟส โดยควบคุมแบบ V/F คอนโทรล ใช้

สัญญาณพัลส์วัดมอดูเลทแบบซุนิโพลาร์เป็นสัญญาณขับเกตมอสเฟต ซึ่งจะได้สัญญาณแรงดันเอาท์พุทใกล้เคียงกับสัญญาณไซน์ ดังรูปที่ 7 แสดงสัญญาณแรงดันเอาท์พุทที่ความถี่สัญญาณ 50 Hz ซึ่งเป็นสัญญาณอ้างอิง 50 Hz



รูปที่ 7 กราฟแรงดันเอาท์พุทที่ความถี่สัญญาณ 50 Hz

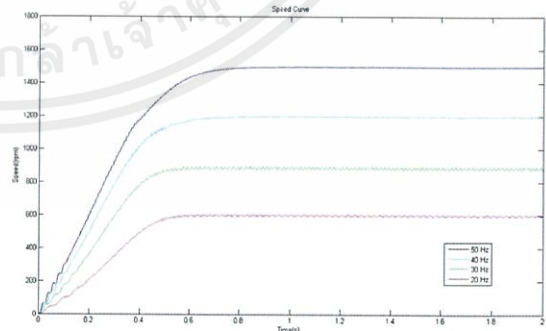
เมื่อปรับความถี่ของสัญญาณพัลส์วัดมอดูเลท จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถเปรียบเทียบผลจากทฤษฎีและผลจากการ Simulation โดยมอเตอร์มี Pole 4 ขั้ว ได้ดังตารางที่ 1

ตาราง 1 ตารางเปรียบเทียบความเร็วรอบซิงโครนัสของมอเตอร์ (N_s)

จากทฤษฎีและผลการ Simulation

ความถี่ (Hz)	ความเร็วรอบของมอเตอร์ (rpm)	
	ทฤษฎี	Simulation
15	450	440
20	600	595
30	900	900
40	1200	1200
50	1500	1500

จะได้กราฟแสดงความเร็วรอบซิงโครนัสของมอเตอร์ (N_s) ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟความเร็วรอบซิงโครนัสของมอเตอร์ (N_s)

จากการจำลองเพื่อทดสอบการควบคุม V/F คอนโทรล ของสัญญาณพัลส์วัดมอดูเลทแบบซุนิโพลาร์ พบว่าความถี่และแรงดันของสัญญาณอ้างอิงของเจ้าของเอกสารบทความการนำไปใช้สัญญาณแรงดันเอาท์พุท จะเปลี่ยนแปลงแบบ V/F คงที่ ตามสัญญาณ

ไซนัสซึ่งเป็นสัญญาณอ้างอิงของสัญญาณพัลส์วิดิมอดูเลท และเมื่อนำสัญญาณมาขับเคลื่อนของมอเตอร์เฟสอินแบบจำลอง เอช – บริดจ์อินเวอร์เตอร์ สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้โดยมอเตอร์มีแรงบิดสูงสุด (Torque) คงที่

5. ผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการควบคุมมอเตอร์ โดยจ่ายแรงดันอินพุต 220 โวลต์ และทดลองปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตาราง 2 ผลการทดลองปรับความเร็วรอบของมอเตอร์

ความเร็วรอบ N_s (RPM) คำนวณ	ความเร็วรอบ N_r (RPM) จริง	ความเร็วรอบ N_s (RPM) จริง	ความถี่ (Hz)
480.0	454.3	469.8	16.0
621.0	581.4	601.3	20.7
765.0	716.1	740.5	25.5
909.0	861.2	890.6	30.3
1056.0	1013.8	1048.4	35.2
1221.0	1178.4	1218.7	40.7
1365.0	1316.8	1361.8	45.5
1515.0	1461.0	1510.8	50.5

6. สรุปผลการทดลอง

การออกแบบอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสในบทความนี้ เป็นการออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด ใช้งานง่าย เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของอินดักชันมอเตอร์หนึ่งเฟสขนาด 1/4 แรงม้า (0.2 kW) โดยใช้การควบคุมแบบ V/F คอนโทรล ซึ่งออกแบบส่วนของการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้ขนาดของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์วิดิมอดูเลทมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับการสร้างสัญญาณจากวงจรอนาลอก นอกจากนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์ยังสามารถใช้ควบคุมการทำงานอื่นๆ ได้ก็คือ การชอร์ฟสตาร์ท การสั่งการทำงานของรีเลย์ โดยอินเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบ สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ในช่วง 455 rpm – 1450 rpm ที่ความถี่ 16 – 50 เฮิรตซ์ และมีประสิทธิภาพในการทำงาน 68.53%

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mr.Aung Zaw Latt and Dr.Ni Ni Win, “Variable Speed Drive of Single Phase Induction Motor Using Frequency Control Method,” 2009 International Conference

- [2] Ibrahim, Raja Ismail and Ghazali, “Development of Variable Speed Drive for Single Phase Induction Motor Base on Frequency Control,” Power and Energy Conference, 2006. PECon’06 **IEEE International**

- [3] Chaitanya N.Jibhakate and Vijaya Huchche, “Speed Control of Single Phase Induction Motor Using Microcontroller,” International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) 2014

8. ประวัติผู้เขียนบทความ



นายชนกร คงมี

ที่อยู่ 72/30 หมู่บ้านพิวตัน ต.บ้านกรด
อ.บางปะอิน จ.พระนครศรีอยุธยา 13160
เบอร์โทรศัพท์ 089-132-5050



นางสาวพรนภา ชาญกิจกรรณ์

ที่อยู่ 99/38 หมู่ 1 ต.หัวรอ
อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000
เบอร์โทรศัพท์ 081-384-8706



นางสาวพรพรรณ สาธิกา

ที่อยู่ 98 หมู่ 6 ต.หนองยาง
อ.พนมสารคาม จ.ฉะเชิงเทรา 24120
เบอร์โทรศัพท์ 081-850-9672



นายทัตญญู ใจเย็น

ที่อยู่ 51/171 หมู่ 1 ต.ชนู
อ.อุทัย จ.พระนครศรีอยุธยา 13000
เบอร์โทรศัพท์ 086-416-4799

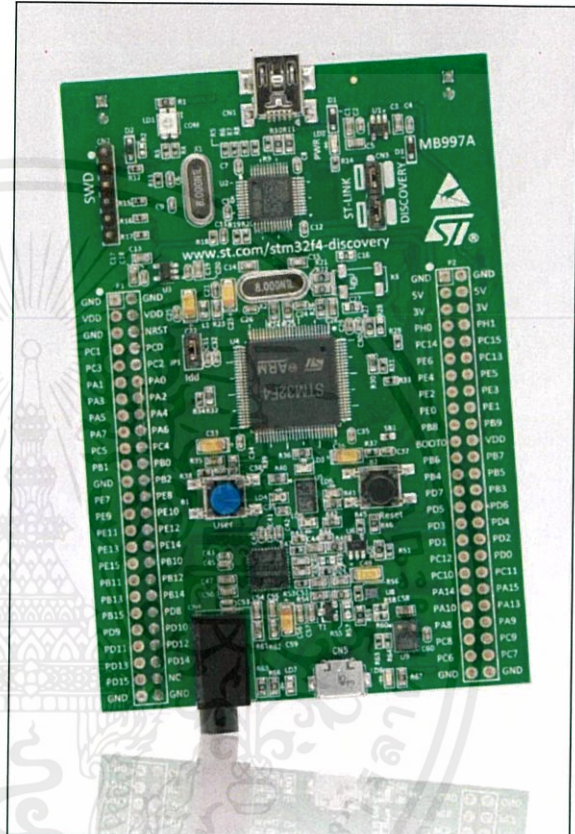


ภาคผนวก ข
ข้อมูลอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Features

- STM32F407VGT6 microcontroller featuring 32-bit ARM Cortex-M4F core, 1 MB Flash, 192 KB RAM in an LQFP100 package
- On-board ST-LINK/V2 with selection mode switch to use the kit as a standalone ST-LINK/V2 (with SWD connector for programming and debugging)
- Board power supply: through USB bus or from an external 5 V supply voltage
- External application power supply: 3 V and 5 V
- LIS302DL or LIS3DSH ST MEMS 3-axis accelerometer
- MP45DT02, ST MEMS audio sensor, omni-directional digital microphone
- CS43L22, audio DAC with integrated class D speaker driver
- Eight LEDs:
 - LD1 (red/green) for USB communication
 - LD2 (red) for 3.3 V power on
 - Four user LEDs, LD3 (orange), LD4 (green), LD5 (red) and LD6 (blue)
 - 2 USB OTG LEDs LD7 (green) VBus and LD8 (red) over-current
- Two push buttons (user and reset)
- USB OTG FS with micro-AB connector
- Extension header for all LQFP100 I/Os for quick connection to prototyping board and easy probing



Based on the STM32F407VGT6, it includes an ST-LINK/V2 embedded debug tool, two ST MEMS, digital accelerometer and digital microphone, one audio DAC with integrated class D speaker driver, LEDs and push buttons and an USB OTG micro-AB connector.

A large number of free ready-to-run application firmware examples are available on www.st.com/stm32f4-discovery to support quick evaluation and development.

To expand the functionality of the STM32F4 Discovery kit with Ethernet connectivity, LCD display and more, visit www.st.com/stm32f4dis-expansion.

Description

The STM32F4DISCOVERY helps you to discover the STM32F407/417 line features and to develop your applications easily. It includes everything required for beginners and experienced users to get started quickly.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRFP460, SiHFP460

Vishay Siliconix

Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY

V_{DS} (V)	500	
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = 10$ V	0.27
Q_g (Max.) (nC)	210	
Q_{gs} (nC)	29	
Q_{gd} (nC)	110	
Configuration	Single	

FEATURES

- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Lead (Pb)-free Available



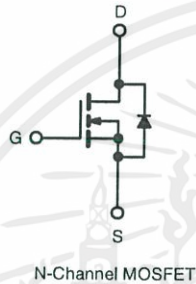
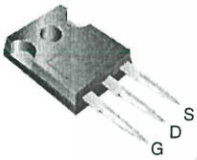
RoHS*
COMPLIANT

DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distances between pins to meet the requirements of most safety specifications.

TO-247



ORDERING INFORMATION

Package	TO-247
Lead (Pb)-free	IRFP460PbF
	SiHFP460-E3
SnPb	IRFP460
	SiHFP460

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS $T_C = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted

PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage	V_{DS}	500	V
Gate-Source Voltage	V_{GS}	± 20	
Continuous Drain Current	V_{GS} at 10 V	$T_C = 25^\circ\text{C}$	20
		$T_C = 100^\circ\text{C}$	13
Pulsed Drain Current ^a	I_{DM}	80	A
Linear Derating Factor		2.2	W/ $^\circ\text{C}$
Single Pulse Avalanche Energy ^b	E_{AS}	960	mJ
Repetitive Avalanche Current ^a	I_{AR}	20	A
Repetitive Avalanche Energy ^a	E_{AR}	28	mJ
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25^\circ\text{C}$	P_D	280
Peak Diode Recovery dV/dt ^c		dV/dt	3.5
Operating Junction and Storage Temperature Range	T_J, T_{stg}		- 55 to + 150
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s		300 ^d
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10
			1.1
			lbf · in
			N · m

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DD} = 50$ V, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 4.3$ mH, $R_G = 25 \Omega$, $I_{AS} = 20$ A (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq 20$ A, $dI/dt \leq 160$ A/ μs , $V_{DD} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 150^\circ\text{C}$.
- 1.6 mm from case.



* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

IRFP460, SiHFP460

Vishay Siliconix



THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	R_{thJA}	-	40	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	R_{thCS}	0.24	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	R_{thJC}	-	0.45	

SPECIFICATIONS $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Static						
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	500	-	-	V
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25\text{ }^\circ\text{C}, I_D = 1\text{ mA}$	-	0.63	-	V/°C
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	± 100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = 500\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	25	μA
		$V_{DS} = 400\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 125\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 12\text{ A}^b$	-	-	0.27	Ω
Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{DS} = 50\text{ V}, I_D = 12\text{ A}^b$	13	-	-	S
Dynamic						
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0\text{ V}, V_{DS} = 25\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}, \text{ see fig. 5}$	-	4200	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	870	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	350	-	
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 20\text{ A}, V_{DS} = 400\text{ V}, \text{ see fig. 6 and 13}^b$	-	-	210	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	-	29	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}		-	-	110	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 250\text{ V}, I_D = 20\text{ A}, R_G = 4.3\text{ }\Omega, R_D = 13\text{ }\Omega, \text{ see fig. 10}^b$	-	18	-	ns
Rise Time	t_r		-	59	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	110	-	
Fall Time	t_f		-	58	-	
Internal Drain Inductance	L_D		Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact 	-	5.0	
Internal Source Inductance	L_S		-	13	-	
Drain-Source Body Diode Characteristics						
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode 	-	-	20	A
Pulsed Diode Forward Current ^a	I_{SM}		-	-	80	
Body Diode Voltage	V_{SD}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_S = 20\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	1.8	V
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_F = 20\text{ A}, di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	570	860	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}		-	5.7	8.6	μC
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)				

Notes

- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
 b. Pulse width $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.

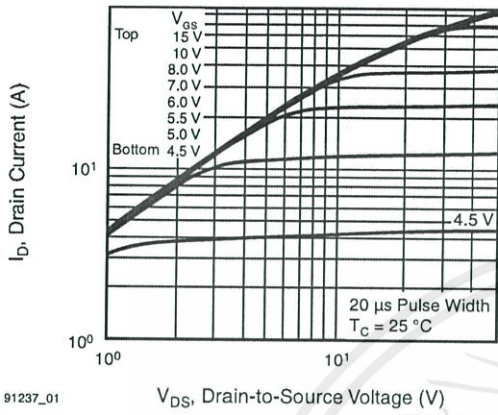
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



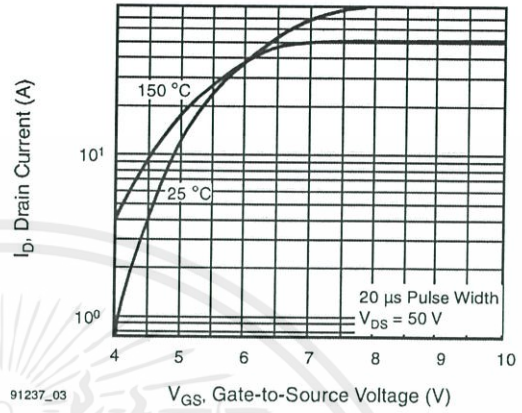
IRFP460, SiHFP460

Vishay Siliconix

TYPICAL CHARACTERISTICS 25 °C, unless otherwise noted



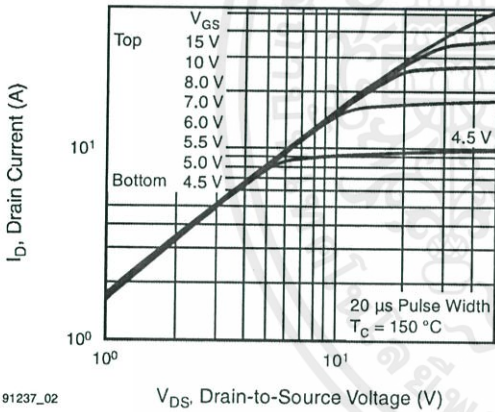
91237_01



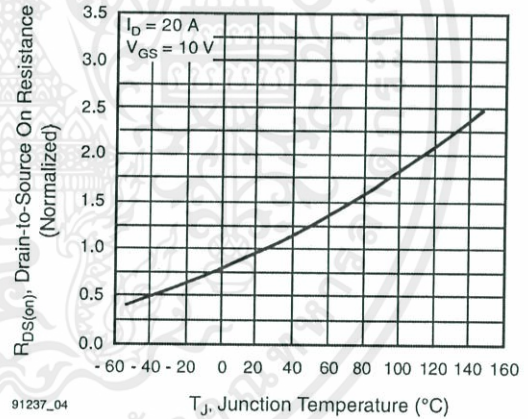
91237_03

Fig. 1 - Typical Output Characteristics, $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics



91237_02



91237_04

Fig. 2 - Typical Output Characteristics, $T_C = 150\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 4 - Normalized On-Resistance vs. Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460, SiHFP460

Vishay Siliconix

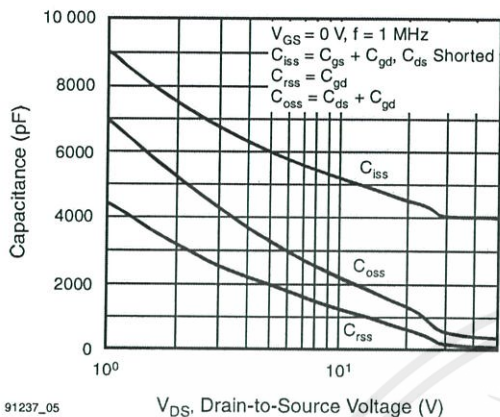


Fig. 5 - Typical Capacitance vs. Drain-to-Source Voltage

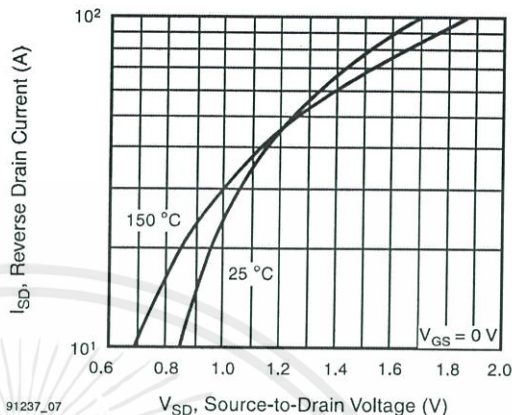


Fig. 7 - Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

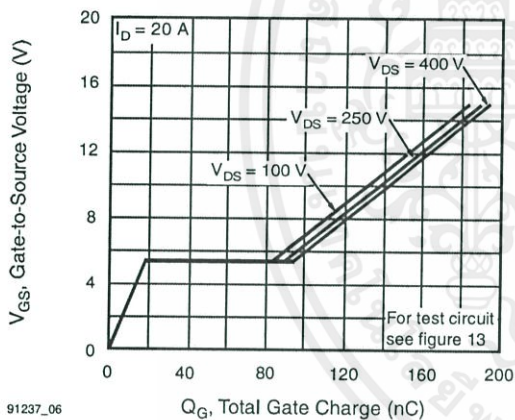


Fig. 6 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Source Voltage

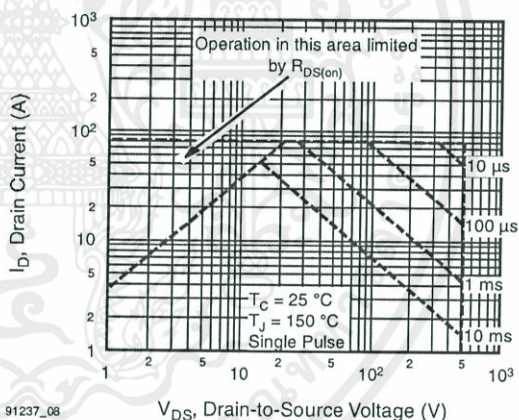


Fig. 8 - Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRFP460, SiHFP460

Vishay Siliconix

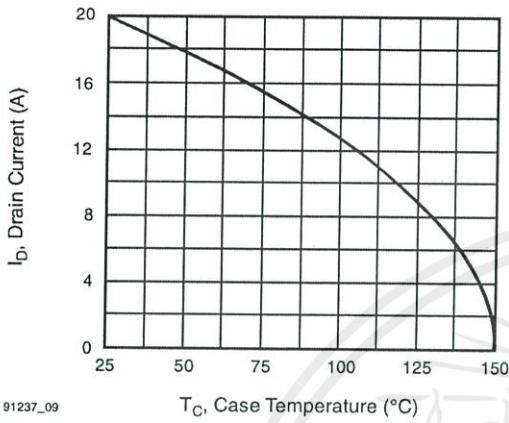


Fig. 9 - Maximum Drain Current vs. Case Temperature

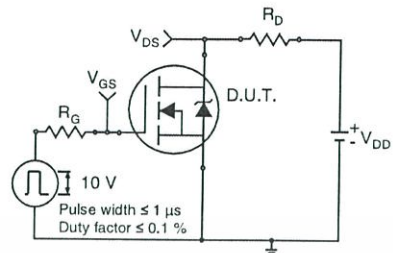


Fig. 10a - Switching Time Test Circuit

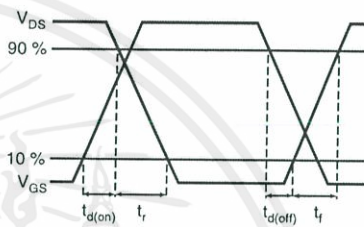


Fig. 10b - Switching Time Waveforms

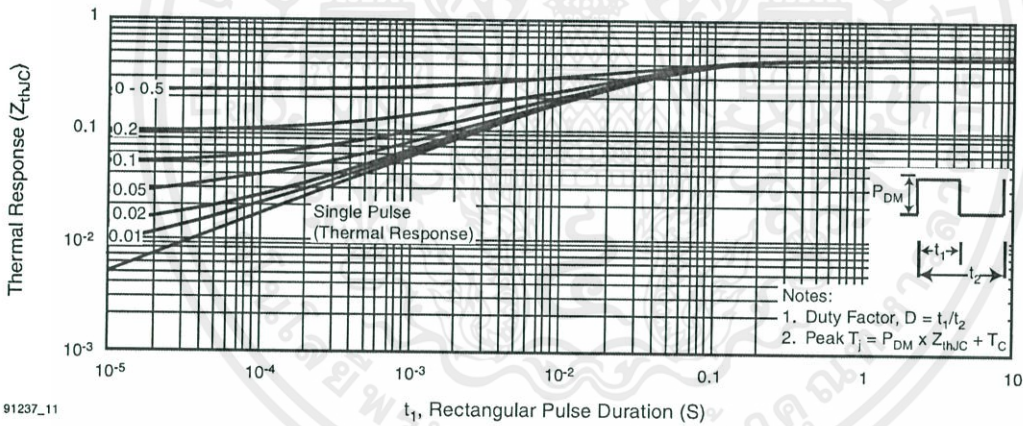


Fig. 11a - Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

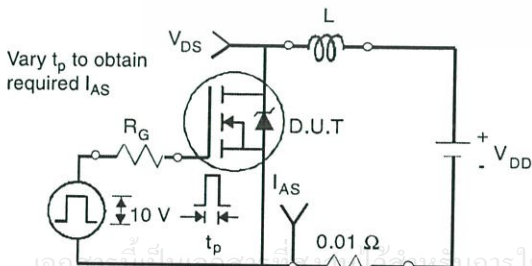


Fig. 12a - Unclamped Inductive Test Circuit

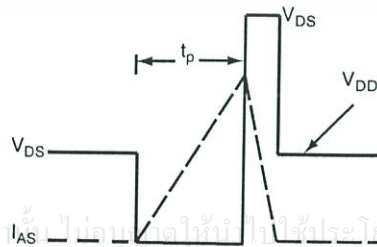


Fig. 12b - Unclamped Inductive Waveforms

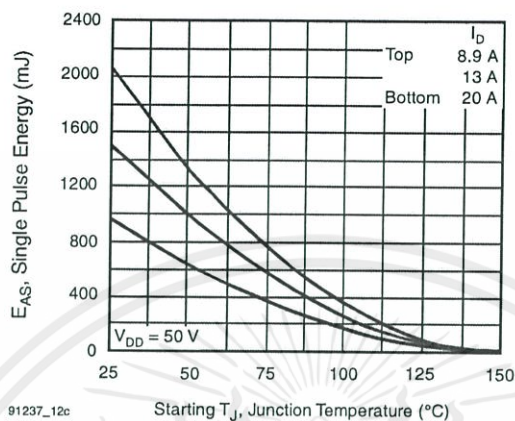


Fig. 12c - Maximum Avalanche Energy vs. Drain Current

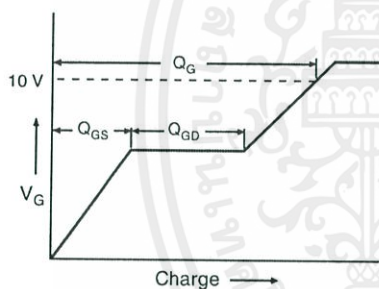


Fig. 13a - Basic Gate Charge Waveform

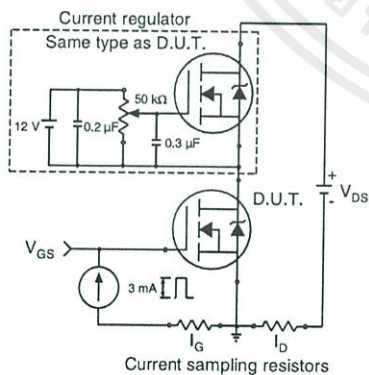


Fig. 13b - Gate Charge Test Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRFP460, SiHFP460

Vishay Siliconix

Peak Diode Recovery dV/dt Test Circuit

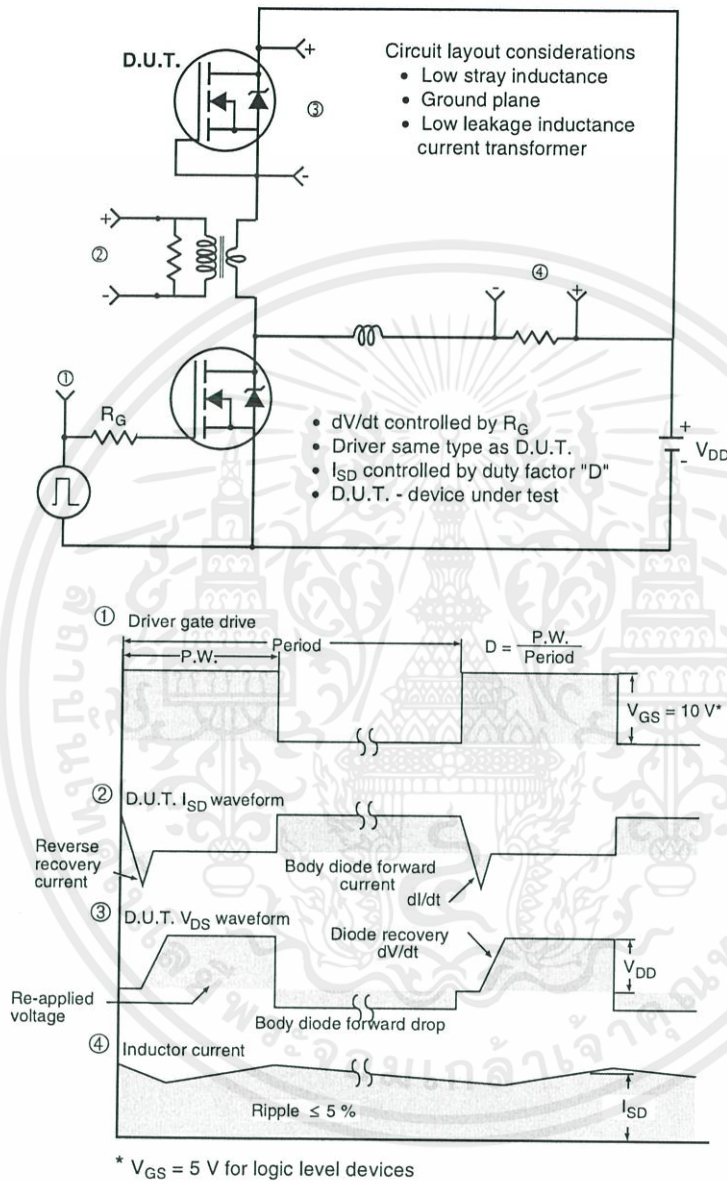
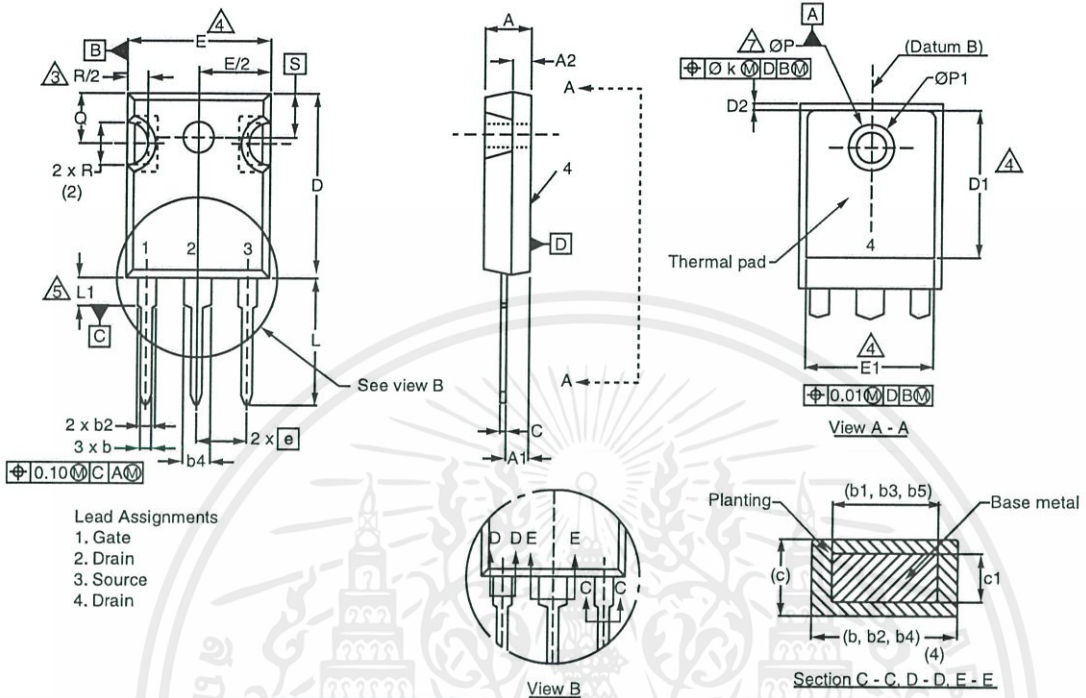


Fig. 14 - For N-Channel

Vishay Siliconix maintains worldwide manufacturing capability. Products may be manufactured at one of several qualified locations. Reliability data for Silicon Technology and Package Reliability represent a composite of all qualified locations. For related documents such as package/tape drawings, part marking, and reliability data, see <http://www.vishay.com/ppg?91237>.



TO-247AC (High Voltage)



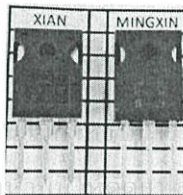
DIM.	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
A	4.58	5.31	0.180	0.209
A1	2.21	2.59	0.087	0.102
A2	1.17	2.49	0.046	0.098
b	0.99	1.40	0.039	0.055
b1	0.99	1.35	0.039	0.053
b2	1.53	2.39	0.060	0.094
b3	1.65	2.37	0.065	0.093
b4	2.42	3.43	0.095	0.135
b5	2.59	3.38	0.102	0.133
c	0.38	0.86	0.015	0.034
c1	0.38	0.76	0.015	0.030
D	19.71	20.82	0.776	0.820
D1	13.08	-	0.515	-

DIM.	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
D2	0.51	1.30	0.020	0.051
E	15.29	15.87	0.602	0.625
E1	13.72	-	0.540	-
e	5.46 BSC		0.215 BSC	
Ø k	0.254		0.010	
L	14.20	16.25	0.559	0.640
L1	3.71	4.29	0.146	0.169
N	7.62 BSC		0.300 BSC	
Ø P	3.51	3.66	0.138	0.144
Ø P1	-	7.39	-	0.291
Q	5.31	5.69	0.209	0.224
R	4.52	5.49	0.178	0.216
S	5.51 BSC		0.217 BSC	

ECN: X13-0103-Rev. D, 01-Jul-13
 DWG: 5971

Notes

1. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M-1994.
2. Contour of slot optional.
3. Dimension D and E do not include mold flash. Mold flash shall not exceed 0.127 mm (0.005") per side. These dimensions are measured at the outermost extremes of the plastic body.
4. Thermal pad contour optional with dimensions D1 and E1.
5. Lead finish uncontrolled in L1.
6. Ø P to have a maximum draft angle of 1.5 to the top of the part with a maximum hole diameter of 3.91 mm (0.154").
7. Outline conforms to JEDEC outline TO-247 with exception of dimension c.
8. Xian and Mingxin actually photo.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ Vishay Siliconix ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ข้างบนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในเงื่อนไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and/or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

Material Category Policy

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as RoHS-Compliant fulfill the definitions and restrictions defined under Directive 2011/65/EU of The European Parliament and of the Council of June 8, 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (EEE) - recast, unless otherwise specified as non-compliant.

Please note that some Vishay documentation may still make reference to RoHS Directive 2002/95/EC. We confirm that all the products identified as being compliant to Directive 2002/95/EC conform to Directive 2011/65/EU.

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as Halogen-Free follow Halogen-Free requirements as per JEDEC JS709A standards. Please note that some Vishay documentation may still make reference to the IEC 61249-2-21 definition. We confirm that all the products identified as being compliant to IEC 61249-2-21 conform to JEDEC JS709A standards.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC

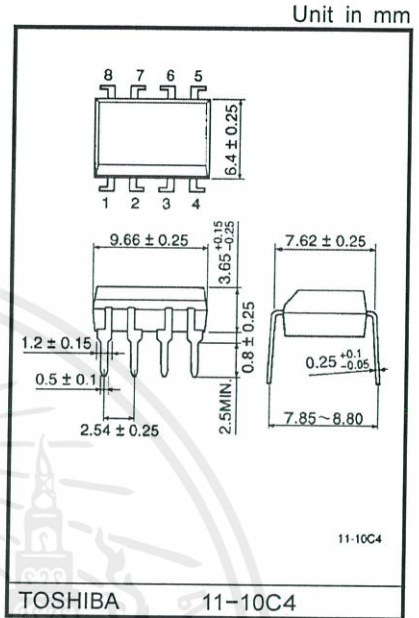
TLP250

- Transistor Inverter
- Inverter For Air Conditionor
- 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.

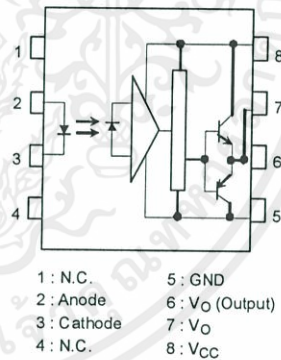
- Input threshold current: $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): $10\text{--}35\text{V}$
- Output current (I_O): $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500\text{V}_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option(D4)
 VDE Approved : DIN EN60747-5-2
 Maximum Operating Insulation Voltage : 890V_{PK}
 Highest Permissible Over Voltage : 4000V_{PK}

(Note):When a EN60747-5-2 approved type is needed,
 Please designate "Option(D4)"



Weight: 0.54 g(Typ.)

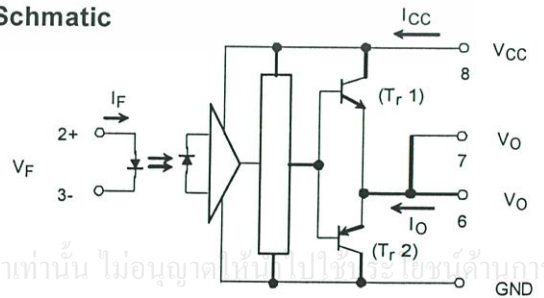
Pin Configuration (top view)



Truth Table

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

Schematic



A 0.1 μF bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	I_F	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	I_{FPT}	1	A	
	Reverse voltage	V_R	5	V	
	Junction temperature	T_j	125	°C	
Detector	"H"peak output current ($P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$) (Note 2)	I_{OPH}	-1.5	A	
	"L"peak output current ($P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$) (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)	$\Delta V_O / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_{CC} / \Delta T_a$	-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}	-55~125	°C		
Lead soldering temperature (10 s)	T_{sol}	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 4)	BV_S	2500	Vrms		

Note 1: Pulse width $P_W \leq 1\mu s$, 300pps

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform, $I_{OPH} \leq -1.0A (\leq 2.5\mu s)$, $I_{OPL} \leq +1.0A (\leq 2.5\mu s)$

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

Note 5: 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 (Note6)	$I_{F(ON)}$	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}/I_{OPL}	—	—	±0.5	A
Operating temperature	T_{opr}	-20	25	70 85	°C

Note 6: Input signal rise time(fall time)<0.5μs.

Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min	Typ.*	Max	Unit
Input forward voltage		V _F	—	I _F = 10 mA, Ta = 25°C	—	1.6	1.8	V
Temperature coefficient of forward voltage		ΔV _F / ΔTa	—	I _F = 10 mA	—	-2.0	—	mV / °C
Input reverse current		I _R	—	V _R = 5V, Ta = 25°C	—	—	10	μA
Input capacitance		C _T	—	V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF
Output current	"H" level	I _{OPH}	1	V _{CC} = 30V (*1) I _F = 10 mA V ₈₋₆ = 4V I _F = 0 V ₆₋₅ = 2.5V	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level	I _{OPL}	2		0.5	2	—	
Output voltage	"H" level	V _{OH}	3	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, I _F = 5mA	11	12.8	—	V
	"L" level	V _{OL}	4	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _F = 0.8V	—	-14.2	-12.5	
Supply current	"H" level	I _{CCH}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
				V _{CC} = 30V, I _F = 10mA	—	—	11	
	"L" level	I _{CCL}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—	
				V _{CC} = 30V, I _F = 0mA	—	—	11	
Threshold input current	"Output L→H"	I _{FLH}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O > 0V	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L"	V _{FHL}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O < 0V	0.8	—	—	V
Supply voltage		V _{CC}	—		10	—	35	V
Capacitance (input-output)		C _S	—	V _S = 0, f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance(input-output)		R _S	—	V _S = 500V, Ta = 25°C R.H. ≤ 60%	1×10 ¹²	10 ¹⁴	—	Ω

* All typical values are at Ta = 25°C (*1): Duration of I_O time ≤ 50μs

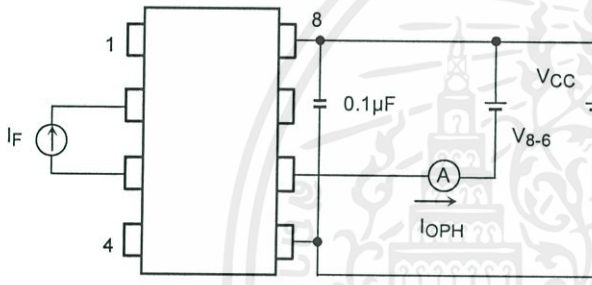
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Switching Characteristics (Ta = -20~70°C , unless otherwise specified)

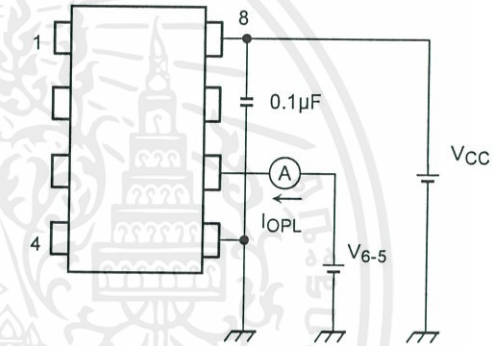
Characteristic	Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min	Typ.*	Max	Unit
Propagation delay time	L→H	5	I _F = 8mA V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω	—	0.15	0.5	μs
	H→L			—	0.15	0.5	
Output rise time	t _r			—	—	—	
Output fall time	t _f			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output	C _{MH}	6	V _{CM} = 600V, I _F = 8mA V _{CC} = 30V, Ta = 25°C	-5000	—	—	V / μs
Common mode transient immunity at low level output	C _{ML}			5000	—	—	V / μs

All typical values are at Ta = 25°C

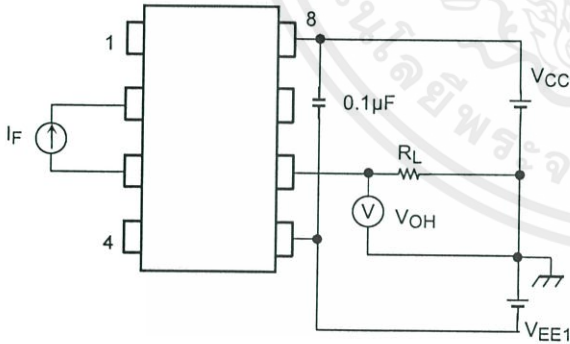
Test Circuit 1 : I_{OPH}



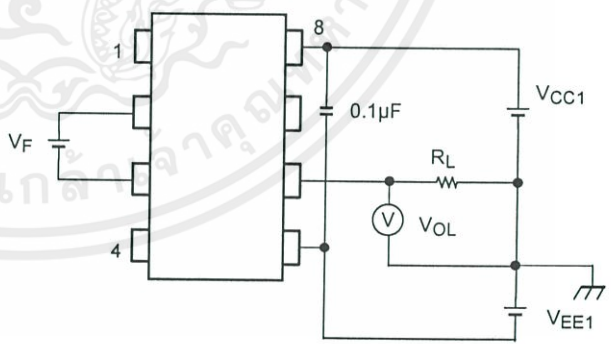
Test Circuit 2 : I_{OPL}



Test Circuit 3 : V_{OH}

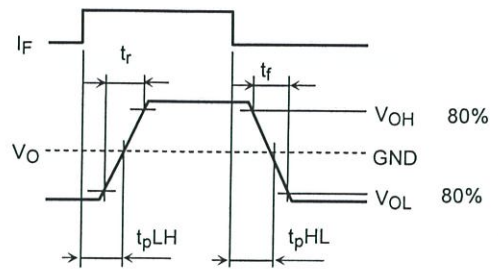
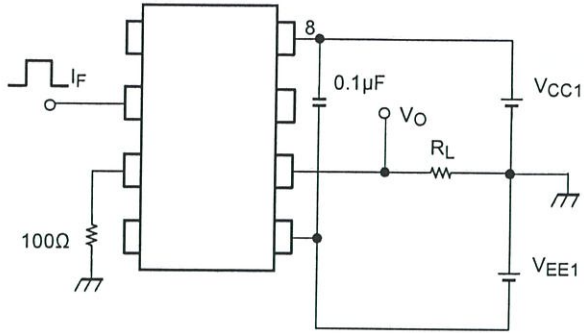


Test Circuit 4 : V_{OL}

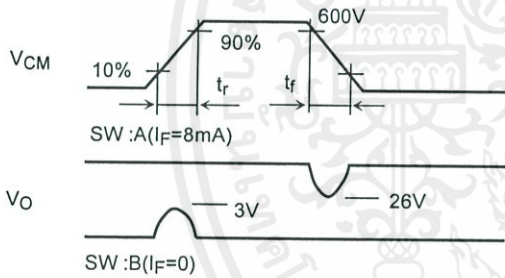
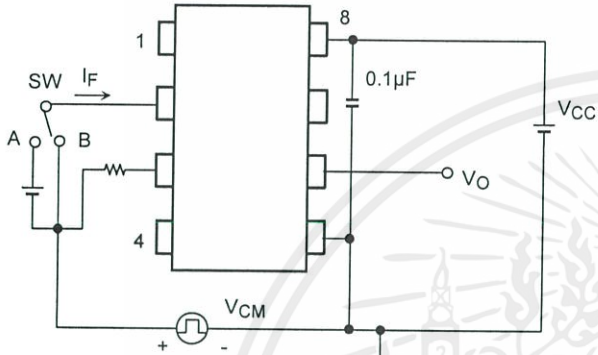


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuit 5: t_{pLH} , t_{pHL} , t_r , t_f



Test Circuit 6: C_{MH} , C_{ML}

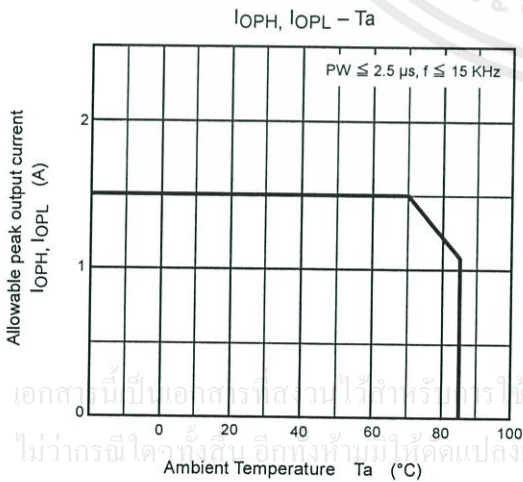
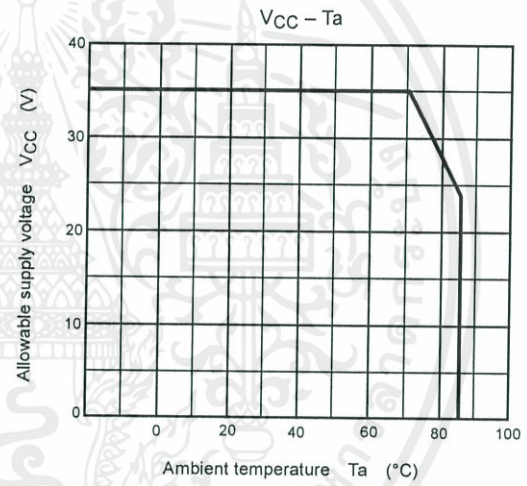
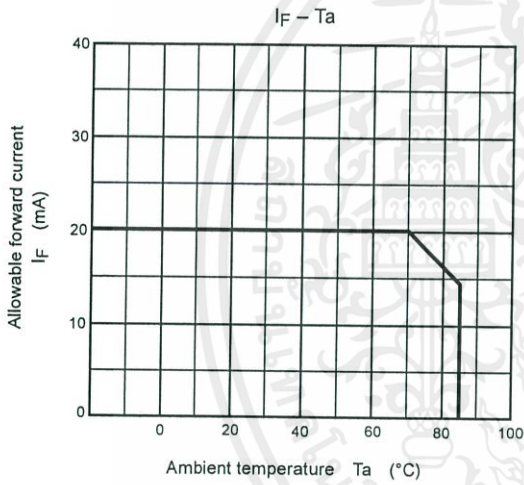
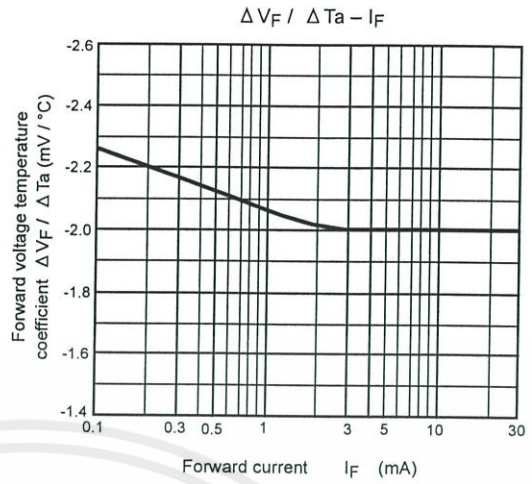
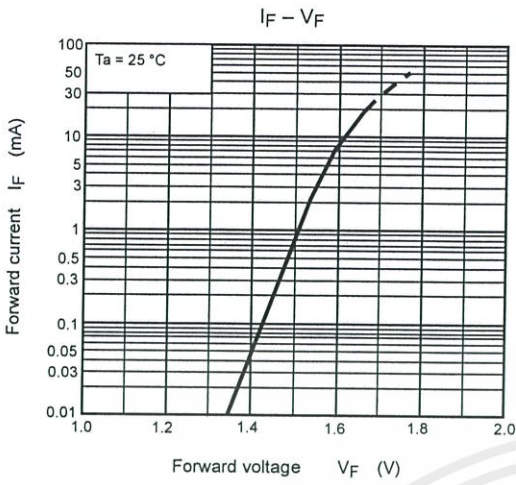


$$C_{ML} = \frac{480 \text{ (V)}}{t_r \text{ (\mu s)}}$$

$$C_{MH} = \frac{480 \text{ (V)}}{t_f \text{ (\mu s)}}$$

$C_{ML}(C_{MH})$ is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

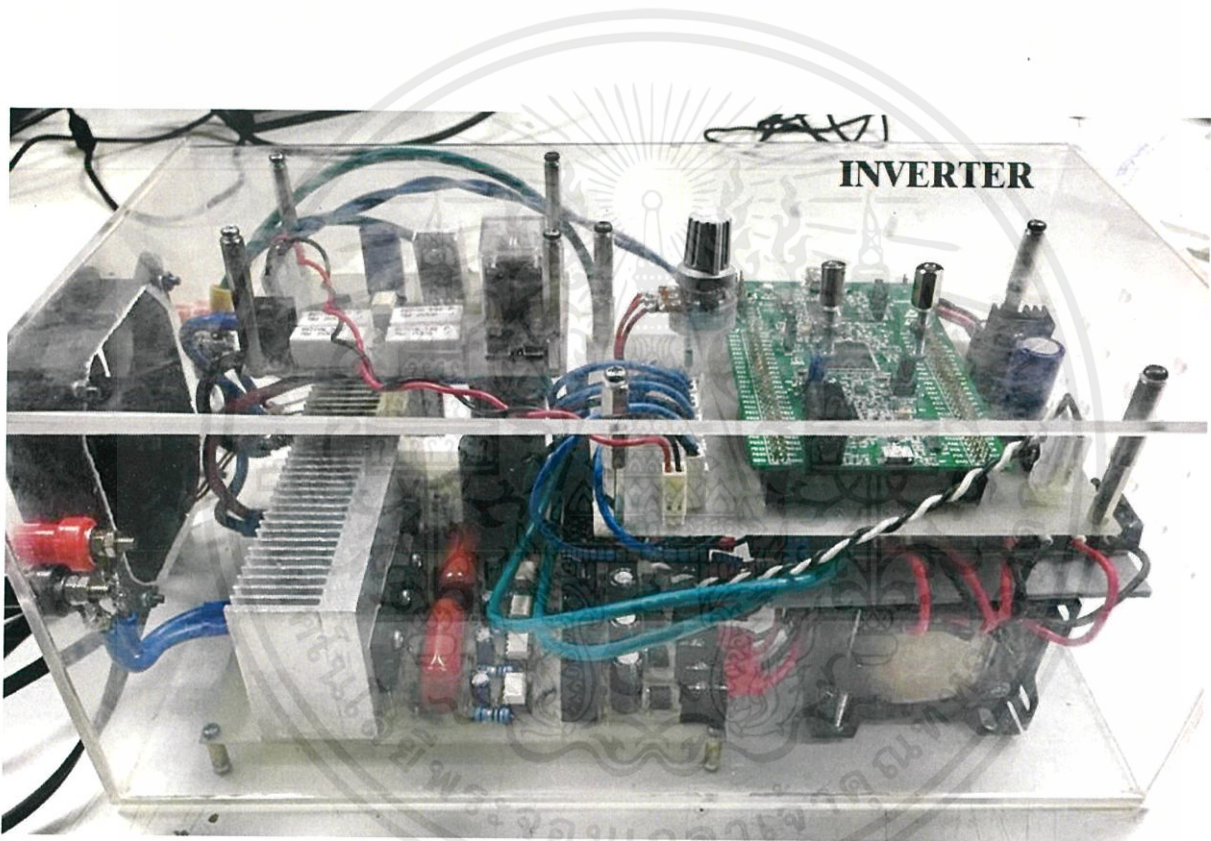
RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

20070701-EN

- The information contained herein is subject to change without notice.
- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property.
In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc.
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- The products described in this document shall not be used or embedded to any downstream products of which manufacture, use and/or sale are prohibited under any applicable laws and regulations.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA for any infringements of patents or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patents or other rights of TOSHIBA or the third parties.
- GaAs(Gallium Arsenide) is used in this product. The dust or vapor is harmful to the human body. Do not break, cut, crush or dissolve chemically.
- Please contact your sales representative for product-by-product details in this document regarding RoHS compatibility. Please use these products in this document in compliance with all applicable laws and regulations that regulate the inclusion or use of controlled substances. Toshiba assumes no liability for damage or losses occurring as a result of noncompliance with applicable laws and regulations.



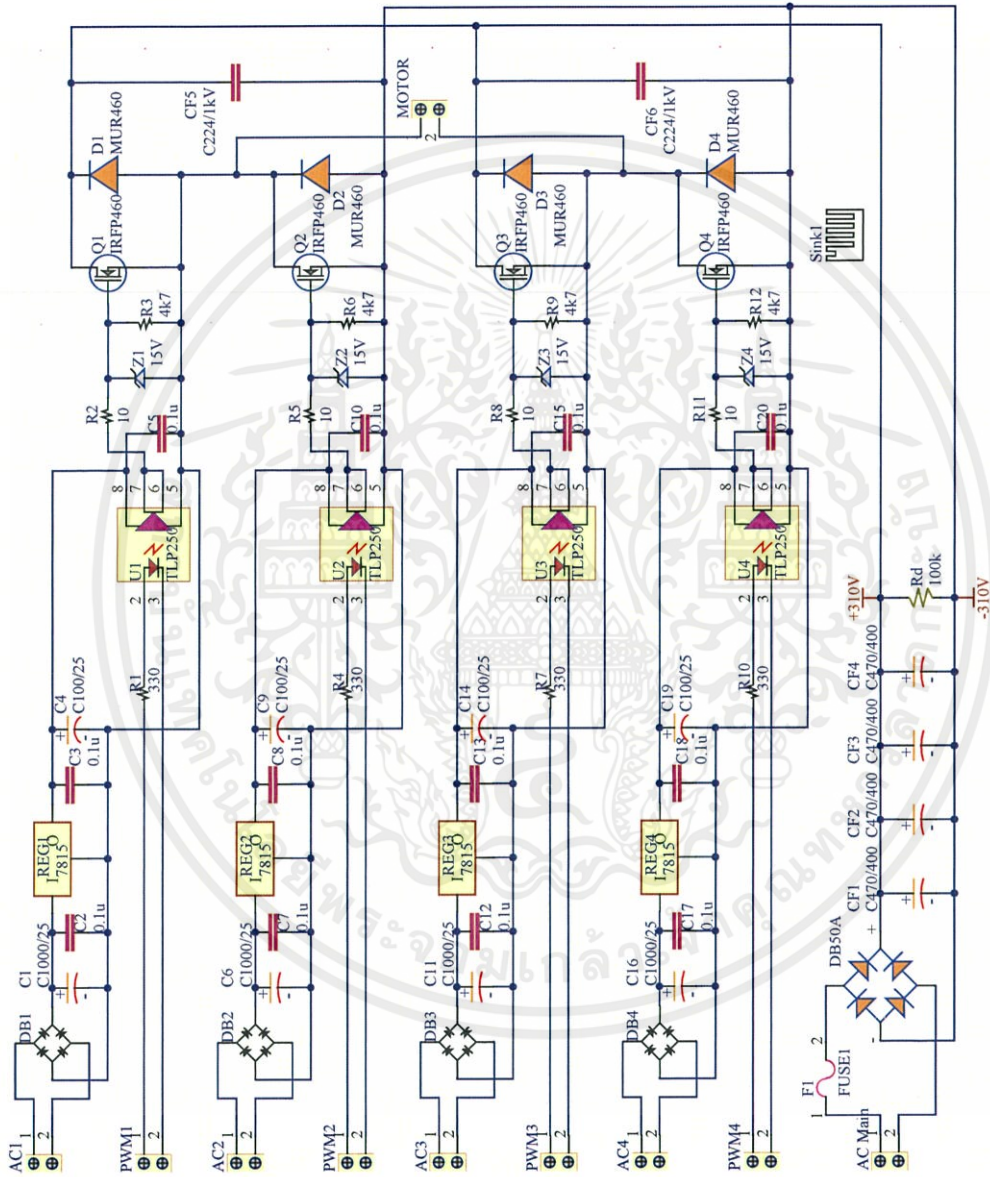
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงวงจรจริงที่ทำการออกแบบและประกอบสร้าง

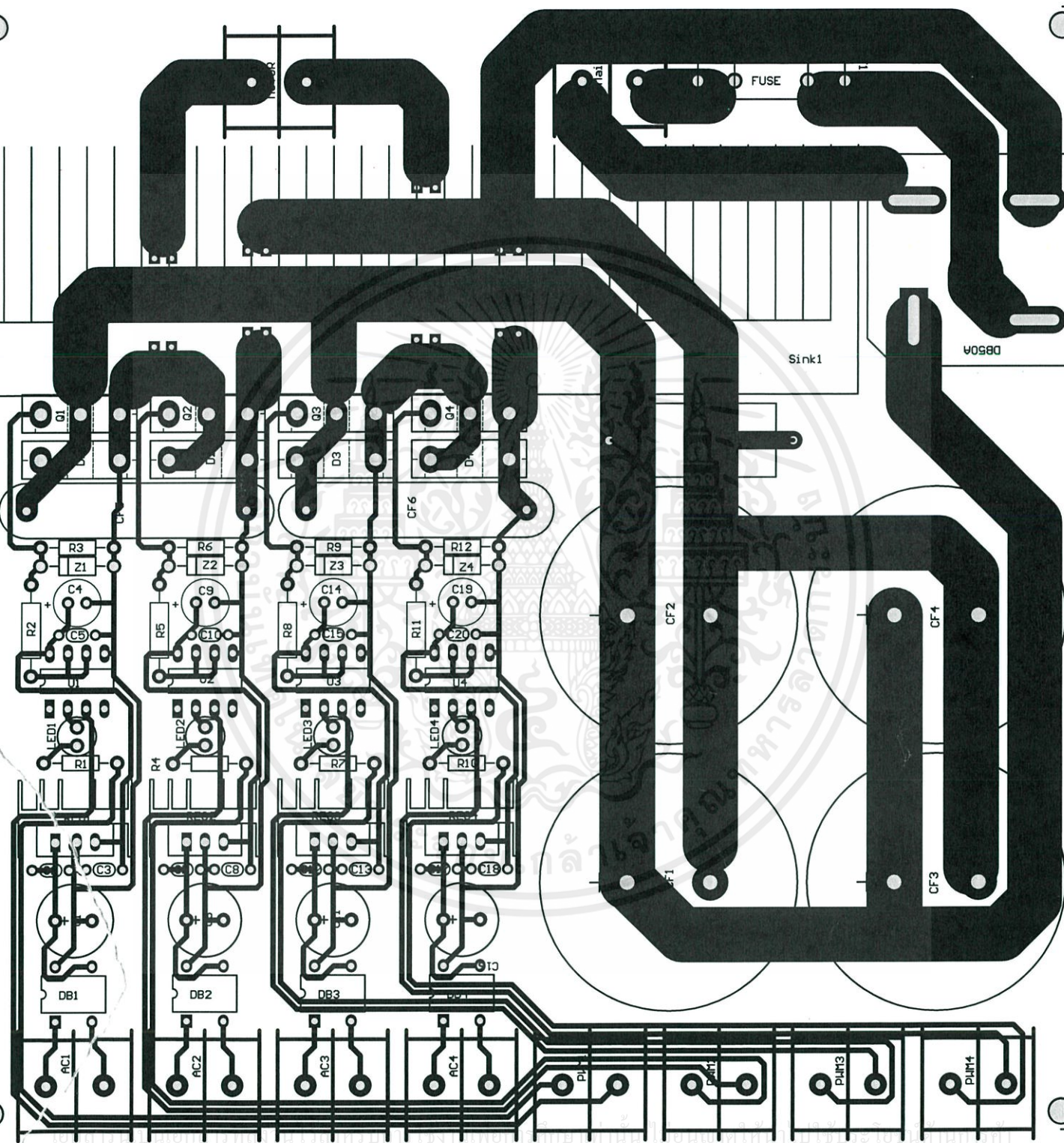
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Schematic ของวงจรกำลังและวงจรขับเคลื่อน

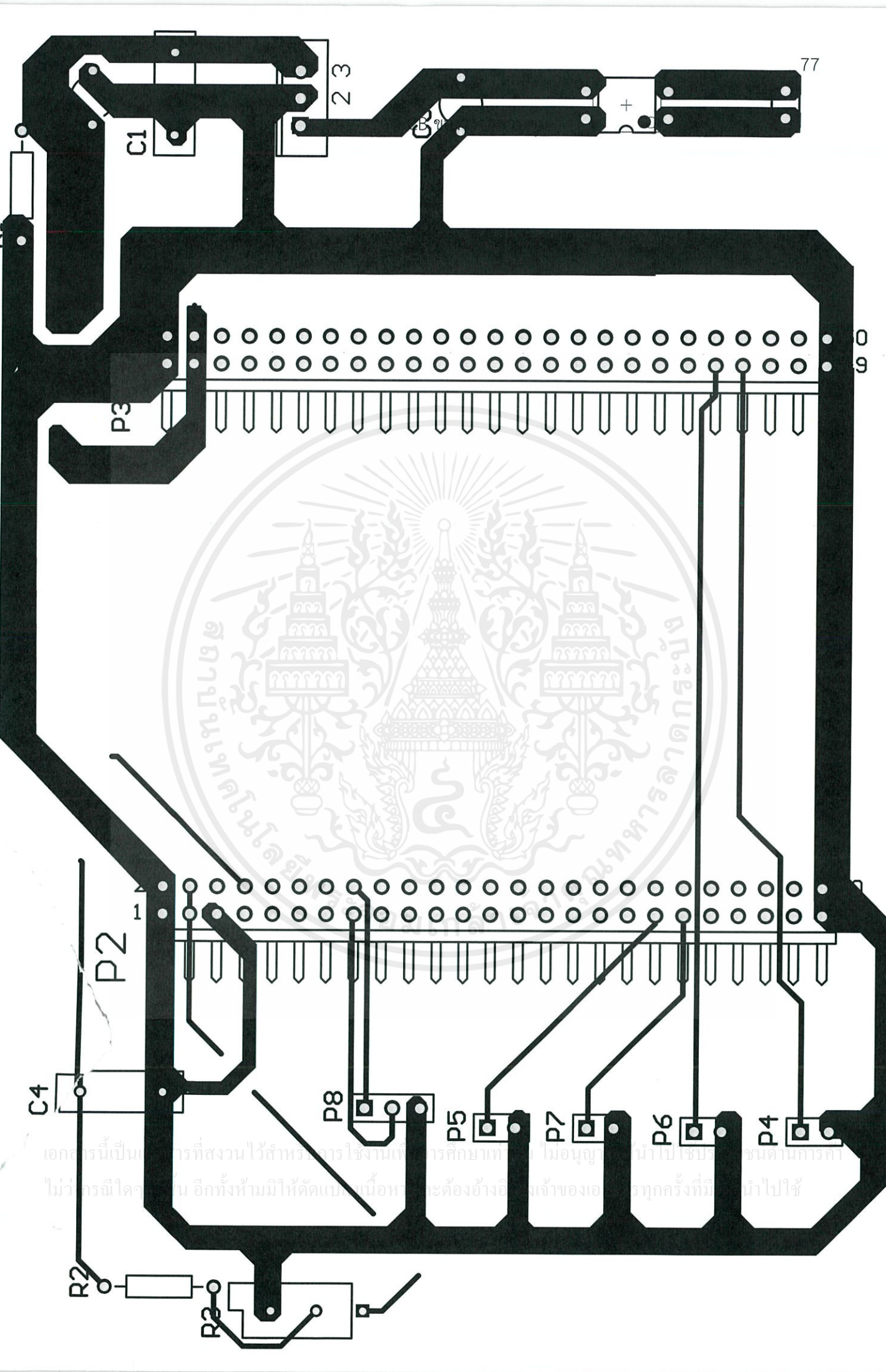


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PCB ของวงจรกำลังและวงจรขับเคลื่อน



ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2 3

C1

C2

P3

0
9

P2

1 4

C4

P8

P5

P7

P6

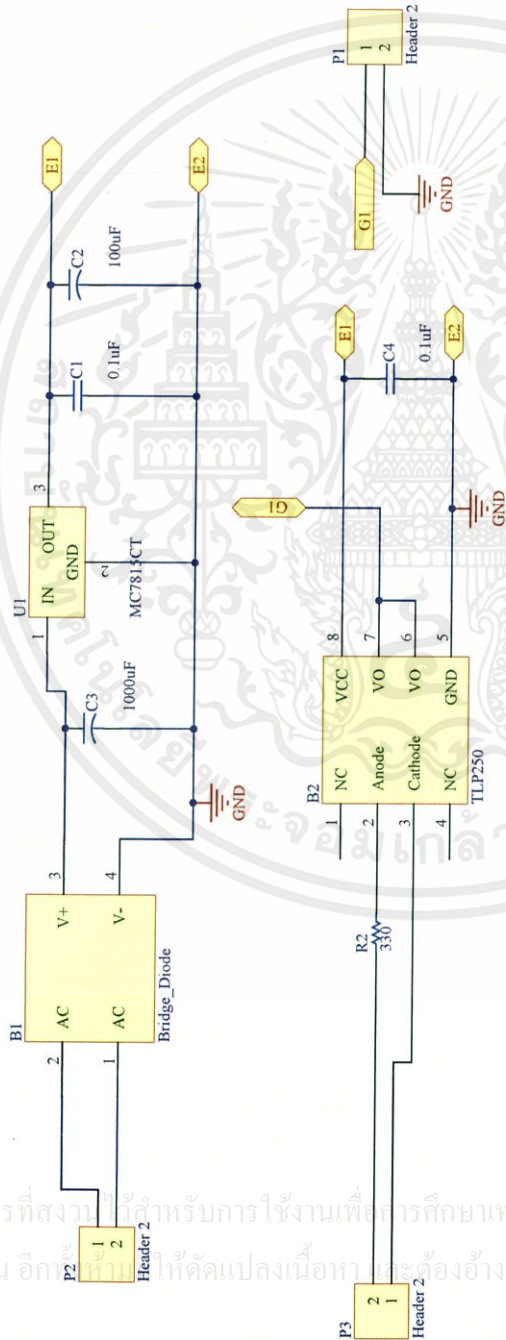
P4

R2

R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

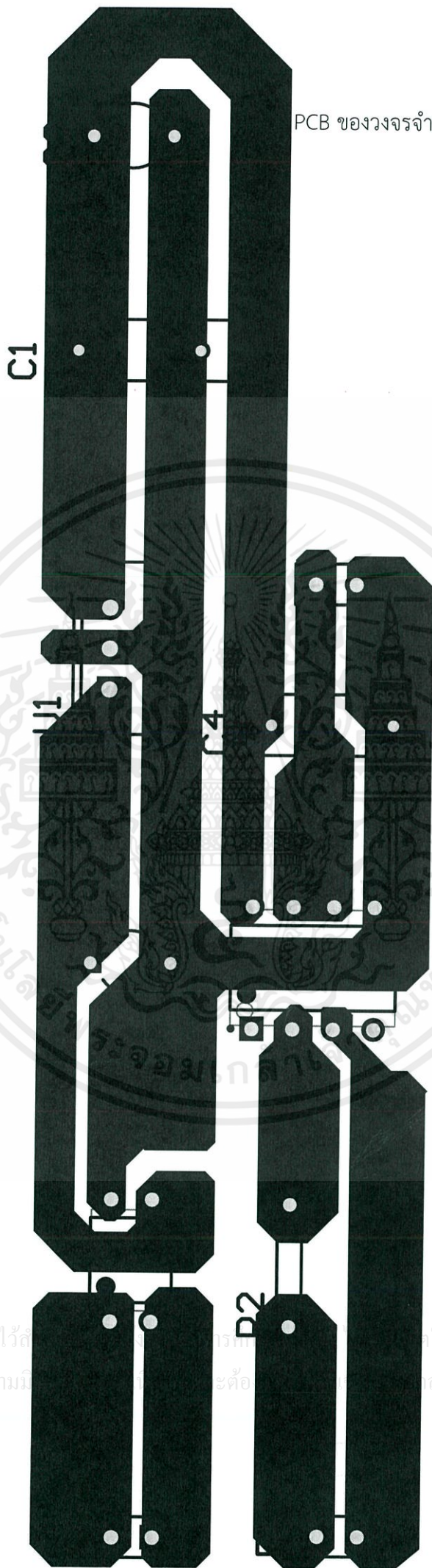
Schematic ของวงจรจำกัดกระแสกระชากช่วงเริ่มต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังให้คัดแปลงเนื้อหาเพื่อใช้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title		Revision	
Size	Number	Revision	78
A4			
Date:	19/5/2015	Sheet of	
File:	C:\Users\A\relay_SchDoc	Drawn By:	

PCB ของวงจรจำกัดกระแสกระชากช่วงเริ่มต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น การนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การบริการ หรือการโฆษณาใดๆทั้งสิ้น หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ – นามสกุล นายธนกร คงมี

วัน เดือน ปีเกิด 18 มกราคม พ.ศ. 2536

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย พระนครศรีอยุธยา

ปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ – นามสกุล นางสาวพณภา ชาญกิจกรรณ์

วัน เดือน ปีเกิด 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2535

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย พระนครศรีอยุธยา

ปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ – นามสกุล นางสาวพรพรรณ สาลิกา

วัน เดือน ปีเกิด 12 ตุลาคม พ.ศ. 2535

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพรหมสารคาม “พนมอูลวิทยา”

ปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ – นามสกุล นายทัญญู ใจเย็น

วัน เดือน ปีเกิด 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2536

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสารคามวิทยาราชภัฏ พระนครศรีอยุธยา

ปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้