



ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่แปรงถ่าน

BRUSHLESS DC MOTOR CONTROLLER



นายสายัญ	เขี้ยวจันทร์	รหัส 51361803
นายอนุสรณ์	ขยันกสิกรณ์	รหัส 51361841
นายภัทรวุฒิ	ธรรมธีระศิษย์	รหัส 51363005

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 1 2 10.ย. 2555 .....
เลขทะเบียน..... 1662.2133 .....
เลขเรียกหนังสือ..... ปร. ....
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 6665๗

2554

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร


ปีการศึกษา 2554

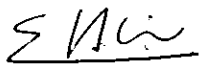



## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ ชุคควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน  
ผู้ดำเนินโครงการ นายสายัญ เขียวจันทร์ รหัส 51361803  
นายอนุสรณ์ ขยันกสิกรณ์ รหัส 51361841  
นายภัทรภูมิ ชรรณธีระศิษย์ รหัส 51363005  
ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพร เรืองสินชัชวานิช  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
ปีการศึกษา 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบรจรัม อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพร เรืองสินชัชวานิช)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชาติ เข้มมั่น)

  
.....กรรมการ  
(ดร. อัครพันธ์ วงศ์กั้งแห)

ชื่อหัวข้อโครงการ	ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
ผู้ดำเนินโครงการ	นายสาข์ญ เขียวจันทร์ รหัส 51361803
	นายอนุสรณ์ ขันนกลีกรณ์ รหัส 51361841
	นายภัทรวุฒิ ธรรมธีระศิษฏ์ รหัส 51363005
ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ โครงการงานเกี่ยวกับการศึกษาและออกแบบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 16F877 โดยส่งสัญญาณออกมาเพื่อควบคุมการเปิด-ปิดของคู่มอสเฟตในวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านให้หมุน โดยจุดมุ่งหมายคือ สามารถปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านได้

**Project title** Brushless DC Motor controller.

**Name** Mr. Sayan Keawchan ID. 51364316  
Mr. Anusorn Khayankasikorn ID. 51364552  
Mr. Pattarawut Thamteerasit ID. 51363005

**Project advisor** Assistant Professor Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D.

**Major** Electrical Engineering

**Department** Electrical and Computer Engineering

**Academic year** 2011

---

### Abstract

This thesis is present the project pertaining study and design of brushless dc motor controller with PIC microcontroller (16F877). PIC microcontroller will generate signals and send to control the couple MOSFET in three phase inverter for drive a brushless dc motor. Objective of this project is speed control of brushless dc motor.



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและได้รับคำแนะนำจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพร เรืองสินชัยวานิช ซึ่งเป็นที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้แนวคิดและแนวทางในการทำโครงการ คณะผู้ดำเนินโครงการขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงและขอระลึกถึงความกรุณาของท่านไว้ตลอดไป

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับคณะผู้ดำเนินงาน

ขอขอบคุณมิตรสหายทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการประกอบโครงการนี้ตลอดมา

เหนือสิ่งอื่นใด คณะผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้มอบความรัก ความเมตตา สติปัญญา เป็นที่ปรึกษาปัญหาในทุกๆเรื่อง รวมทั้งเป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างตั้งแต่วัยเยาว์ จวบจนถึงปัจจุบัน คอยเป็นกำลังใจทำให้ได้รับความสำเร็จอย่างทุกวันนี้และขอขอบคุณทุกคนในครอบครัวของคณะผู้ดำเนินโครงการที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายสาขัญญ์

นายอนุสรณ์

นายภัทรวุฒิ

เจียวจันทร์

ชัชฌิกรณ

ธรรมธีระศิษฏ์

# สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ .....	ข
Abstract.....	ค
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 แนวทางการดำเนินงาน .....	1
1.4 ขอบเขตของโครงการ .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	2
1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	3
1.7 งบประมาณ .....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor).....	4
2.1.1 ความหมายและรูปแบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor).....	4
2.1.2 การคอมมิวเทชัน (Commutation).....	7
2.1.3 ลักษณะและคุณสมบัติ .....	13
2.1.4 การตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์ .....	18
2.2 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส .....	18
2.3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier).....	21
2.4 เกตไดรฟ์ (Gate Drive).....	24

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 เพาเวอร์มอสเฟต (Power MOSFET) .....	25
2.5.1 คุณลักษณะของเพาเวอร์มอสเฟต .....	25
2.5.2 กำลังสูญเสียของเพาเวอร์มอสเฟต .....	26
2.5.3 แรงดันสไปค์ที่เกิดซอร์ส .....	27
2.5.4 อย่าใช้งานมอสเฟตเกินขีดจำกัดกระแสสูงสุด .....	27
2.5.5 อย่าใช้มอสเฟตเกินอัตรากระแสต่อเนื่อง .....	27
2.5.6 ระวังการใช้ไดโอดแฝงที่อยู่ในมอสเฟต .....	28
2.6 PIC คอนโทรลเลอร์ (PIC Controller) .....	28
2.6.1 สถาปัตยกรรมของ PIC .....	28
2.6.2 PIC ชนิดต่าง ๆ .....	28
2.6.3 โครงสร้างและสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 .....	29
2.7 ตัวต้านทาน (Resistor) .....	35
2.7.1 ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ .....	35
2.7.2 ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ .....	37
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ .....	38
3.1 อุปกรณ์การทดลอง .....	38
3.2 ระบบการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์ .....	42
3.2.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงให้กับวงจร .....	42
3.3 การโปรแกรมการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน .....	44
3.3.1 โค้ดโปรแกรมเพื่อควบคุมมอเตอร์ .....	44
3.3.2 การเขียนโปรแกรมบน MPLAB และการสร้างไฟล์ .HEX .....	45
3.3.3 การโปรแกรมไฟล์ .HEX ลงไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	52
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	57
4.1 จุดประสงค์ของการทดลอง .....	57
4.2 ขั้นตอนการทดลอง .....	57
4.2.1 ทดสอบเพื่อดูกราฟแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนที่ความเร็วรอบต่างๆ พร้อมทั้งสัญญาณที่จุดต่างๆ บนชุดควบคุม .....	57

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการทดลอง .....	58
4.3.1 ความเร็วรอบของมอเตอร์ .....	58
4.3.2 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส A ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่างๆ .....	59
4.3.3 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส A ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่างๆ .....	60
4.3.4 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส B ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่างๆ .....	61
4.3.5 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส B ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่างๆ .....	62
4.3.6 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส C ที่ความเร็วรอบต่างๆของมอเตอร์ .....	63
4.3.7 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส C ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ต่างๆ .....	64
4.3.8 กราฟสัญญาณที่จุดต่างๆ บนชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	65
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	67
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ .....	67
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข .....	67
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป .....	68
เอกสารอ้างอิง .....	69
ภาคผนวก .....	70
ภาคผนวก (ก) .....	71
ภาคผนวก (ข) .....	88
ภาคผนวก (ค) .....	89
ภาคผนวก (ง) .....	97
ภาคผนวก (จ) .....	104
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ .....	118

## สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1 แสดงรายละเอียดและตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F874/PIC16F877.....33



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร.....	5
2.2 โครงสร้างตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีโรเตอร์อยู่ใน.....	6
2.3 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านทั้งสามแบบ.....	7
2.4 โครงสร้างโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านและแบบไร้แปรงถ่าน.....	7
2.5 ภาพตัดขวางของมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน.....	8
2.6 รูปสัญญาณของ flux-linkage, back-EMF, กระแสและแรงบิด.....	9
2.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีคอมมิวเตเตอร์ 3 ส่วน 2 แปรงถ่าน.....	10
2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่าน 3 เฟส.....	10
2.9 กราฟลักษณะสมบัติความเร็วรอบต่อแรงบิดของโหลดต่างๆ.....	12
2.10 กราฟลักษณะสมบัติความเร็วรอบต่อแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบไร้แปรงถ่าน.....	14
2.11 กราฟทำงานช่วงเวลาต่อเนื่องและช่วงเวลาดำเนิน.....	15
2.12 การทำงานที่ความเร็วรอบคงที่.....	17
2.13 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส.....	18
2.14 แสดงหลักการของเทคนิคไซน์ตัดสามเหลี่ยม.....	18
2.15 คลื่นสัญญาณ.....	19
2.16 สเปกตรัม.....	19
2.17 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์.....	20
2.18 ไดโอด $D_1$ และ $D_2$ ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ ).....	21
2.19 ไดโอด $D_3$ และ $D_4$ ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ ).....	21
2.20 รูปคลื่น $V_{out}$ เปรียบเทียบกับ $V_{in}$ ของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์.....	22
2.21 แสดงค่าแรงดันไฟตรงกับค่าแรงดันไฟสูงสุด $V_p$ ของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น.....	22
2.22 เกตไคร์ฟ TC4467.....	23
2.23 การจัดขาของเกตไคร์ฟ TC4467.....	23
2.24 ครงสร้างภายในของเกตไคร์ฟ TC4467.....	23
2.25 OTP (One Time Programmable).....	28
2.26 EPROM (Erasable Programable ROM).....	28
2.27 EEPROM / Flash (Electrically Erasable Programmable ROM).....	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 แสดงตำแหน่งขา (PIN Diagram) ของตัวถัง.....	31
2.29 แสดงสถาปัตยกรรมที่เป็นโครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877.....	32
2.30 ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม (Carbon Composition Resistor).....	35
2.31 ตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอน (Carbon Film Resistor).....	36
2.32 ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ (Metal Film Resistor).....	36
2.33 ตัวต้านทานปรับค่าได้.....	37
3.1 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ขนาด 24 V 1.6 A.....	38
3.2 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	38
3.3 แหล่งจ่ายแรงดัน 5, 12 และ 24 โวลต์.....	39
3.4 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน.....	39
3.5 Pickit2.....	39
3.6 โค้ดแอมวจควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน.....	40
3.7 วงจรขับมอเตอร์ให้ทำงาน.....	41
3.8 วงจรเรียงกระแส.....	42
3.9 ชุดแหล่งจ่ายแรงดัน 5, 12 และ 24 โวลต์.....	43
3.10 เริ่มสร้างโปรเจก.....	45
3.11 สร้างโปรเจก.....	45
3.12 เลือกเบอร์ PIC.....	46
3.13 กำหนดภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรม.....	46
3.14 ตั้งชื่อโปรเจกและเลือกที่อยู่โปรเจก.....	47
3.15 เลือกไฟล์เข้าโปรเจก.....	47
3.16 เสร็จสิ้นการสร้างโปรเจก.....	48
3.17 สร้างเอกสาร.....	48
3.18 เขียนโปรแกรม.....	49
3.19 เซฟข้อมูล.....	49
3.20 เพิ่มไฟล์.....	50
3.21 เลือกไฟล์ที่ต้องการเพิ่ม.....	50
3.22 คอมไพล์.....	51
3.23 สร้างไฟล์ .HEX.....	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 ไอคอน Pickit2 v2.40.....	52
3.25 หน้าต่างแรกของโปรแกรม Pickit 2.....	52
3.26 หน้าต่าง เมนู Tools Check Communication.....	53
3.27 เมนู Device Midrange.....	53
3.28 เมนู File.....	54
3.29 เลือกไฟล์ .HEX.....	54
3.30 การ โปรแกรมไฟล์ .HEX.....	55
3.31 การ โปรแกรมเสร็จสมบูรณ์.....	55
3.32 ชุดจับเคลื่อนมอเตอร์.....	56
3.33 กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากออสซิลอสโคป.....	56
4.1 การหาค่ากราฟแรงดัน ไฟฟ้าและสัญญาณต่างๆ.....	57
4.2 ความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง 600, 800, 1,000, และ 1,200 รอบต่อนาทีตามลำดับ.....	58
4.3 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส A ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที.....	59
4.4 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส A ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที.....	60
4.5 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส B ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที.....	61
4.6 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส B ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000, และ 1,200 รอบต่อนาที.....	62
4.7 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส C ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000, และ 1,200 รอบต่อนาที.....	63
4.8 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส C ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000, และ 1,200 รอบต่อนาที.....	64
4.9 กราฟสัญญาณที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งไปให้เกิดไครฟ์ที่ขั้วมอเตอร์เฟสชุดบนและชุดล่าง.....	65
4.10 กราฟสัญญาณที่เกิดไครฟ์ส่งไปขั้วมอเตอร์เฟสชุดบนและชุดล่าง.....	65



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) จะพบได้ในงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากความก้าวหน้าทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์และไมโครโปรเซสเซอร์ ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมและการวิเคราะห์ของมอเตอร์ชนิดนี้จึงเป็นที่สนใจของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและสาขาที่เกี่ยวข้อง

ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในการสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีคุณภาพสูง ทำให้ดีซีมอเตอร์กลับมาเป็นที่สนใจของระบบขับเคลื่อน (Drive System) อีกครั้งและในเวลาเดียวกัน ความก้าวหน้าทางไมโครโปรเซสเซอร์ได้สร้างการประยุกต์งานใหม่ๆขึ้น ทำให้ดีซีมอเตอร์และสแต็ปมอเตอร์ได้รับความนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง

โครงการนี้จึงนำเสนอการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมให้ทำงานตามคำสั่งของโปรแกรม โดยสามารถทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
2. ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

### 1.3 แนวทางการดำเนินงาน

1. หาข้อมูลและทำการศึกษาวงจรและอุปกรณ์
2. ศึกษาการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
3. สร้างวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
4. ทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

#### 1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. สร้างชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
2. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. เข้าใจการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
2. สามารถสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านได้
3. ประยุกต์ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่ทำงานร่วมกับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับอุปกรณ์อื่นได้



### 1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ปี 2554							ปี 2555		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.หาหัวข้อโครงการที่สนใจ	■									
2. ศึกษาการทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาสร้างวงจรควบคุม			■	■	■					
3.ทดลองต่อวงจรควบคุม						■				
4.วิเคราะห์การทำงานของวงจรควบคุมและปรับปรุงแก้ไขวงจรควบคุม								■	■	
5.จัดทำรายงาน										■

### 1.7 งบประมาณ

ค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	2,000	บาท
ค่าอุปกรณ์มอเตอร์	1,500	บาท
ค่าจัดทำรายงาน	500	บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สามพันบาทถ้วน)	3,000	บาท

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

#### 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

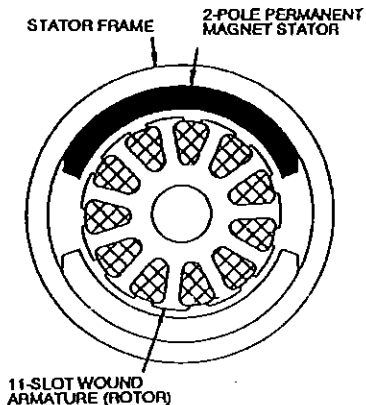
##### 2.1.1 ความหมายและรูปแบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) มีโครงสร้างตามชื่อของตัวมันคือเป็นมอเตอร์ที่ไม่มีทั้งแปรงถ่าน สลิปริง (Slipring) และคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับมอเตอร์กระแสตรงหรือมอเตอร์ซิงโครนัส เพื่อทำหน้าที่ในการจ่ายแรงดันให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ที่พันอยู่บนโรเตอร์ จากหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เช่น อินดักชันมอเตอร์ กระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์จะถูกสร้างขึ้นโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามหลักการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อินดักชันมอเตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนจากแหล่งจ่ายที่มีความถี่คงที่เพื่อที่จะเหนี่ยวนำพาโรเตอร์ให้หมุนไปด้วยความเร็วซิงโครนัส อย่างไรก็ตามการหมุนของโรเตอร์จะหมุนไปด้วยความเร็วที่ช้ากว่าความเร็วซิงโครนัสเสมอ เหตุผลก็เพราะว่ากระบวนการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีสลิป (Slip) ระหว่างตัวนำบนโรเตอร์กับกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าสูญเสียซึ่งสามารถหาได้จากสมการ  $I^2R$  ซึ่งทำให้เกิดความร้อนและประสิทธิภาพลดลงด้วย การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานตัวนำบนโรเตอร์ตามอุณหภูมิเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพแรงบิดต่อกระแสเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย สิ่งที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำให้การควบคุมอินดักชันมอเตอร์ในกรณีที่ต้องการความแม่นยำสูงได้ยากมาก จะเห็นได้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่านอยู่นอกเหนือข้อจำกัดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับอินดักชันมอเตอร์

โดยพื้นฐานมอเตอร์สเตปป์ (Stepping) เป็นมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านอีกแบบหนึ่ง โดยมีขดลวดที่พันบนสเตเตอร์ ในขณะที่เดียวกันตัวโรเตอร์ก็เป็นแม่เหล็กถาวรและขั้วแม่เหล็กทำจากเหล็กอ่อน แรงบิดจะเกิดขึ้นโดยการเหนี่ยวนำของโรเตอร์กับสเตเตอร์ที่เป็นฟัน ตามลำดับการกระตุ้นในแต่ละเฟส (ส่วนมากเป็น 2 เฟส) มอเตอร์สเตปป์สามารถมาใช้ประโยชน์ในลักษณะการทำงานแบบลูปเปิด ในทำนองเดียวกันอาจพูดได้ว่าการควบคุมตำแหน่งสามารถทำได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องตรวจสอบตำแหน่งโรเตอร์สำหรับการป้อนกลับ ซึ่งการทำงานแบบนี้มันคงเพียงพอที่จะทำให้แรงบิดคงที่ มอเตอร์สเตปป์ถูกออกแบบมาให้มีขนาดมุมในการสเตปป์น้อยมีรูปร่างของฟันเหมาะสมและช่องว่างอากาศค่อนข้างน้อย ลักษณะเด่นเหล่านี้ทำให้มอเตอร์สเตปป์มีราคาค่อนข้างสูงและยังมีเสียงรบกวนอีกด้วย

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือส่วนหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวรและส่วนอยู่กับที่เป็นขดลวดอาร์มเจอร์ หากย้อนกลับไปพิจารณาถึงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน ในการทำงานแม่เหล็กถาวรจะเป็นส่วนอยู่กับที่ในขณะที่ขดลวดอาร์มเจอร์จะเป็นส่วนหมุน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้ง 2 ชนิด กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวนำกลับไปกลับมาเพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กขึ้น ในทำนองเดียวกันเพื่อให้แน่ใจว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นนี้มีทิศทางไปในทางเดียวกันให้สังเกตมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านการกลับขั้วถูกจัดการโดยคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน ซึ่งแปรงถ่านจะติดตั้งอยู่ที่อยู่บนโรเตอร์ การสวิตช์จะเป็นไปตามลำดับอย่างอัตโนมัติกลับไปมาผ่านขดลวดอาร์มเจอร์ ส่วนในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน การกลับขั้วถูกจัดการโดยมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) ซึ่งต้องถูกสวิตช์ไปตามลำดับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์เช่นเดียวกัน ซึ่งการตรวจสอบตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์จะใช้เซ็นโค้ดเดอร์แทนการใช้คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน ขบวนการติดต่อทางไฟฟ้าของมอเตอร์ทั้ง 2 ชนิดเหมือนกัน เป็นสาเหตุให้เกิดสมการ และคุณสมบัติระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดเกือบจะเหมือนกันทุกประการ

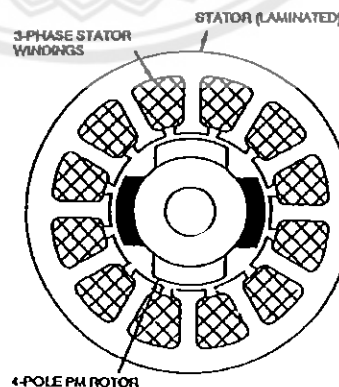
เมื่อกระแสเฟสในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน สวิตช์กลับขั้วทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กตามลำดับ มอเตอร์จะทำงานในลักษณะการกระตุ้นแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Squarewave Drive) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (Back-EMF) กรณีนี้จะถูกสร้างขึ้นเป็นรูปเหลี่ยม ในรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับจะถูกใช้ในการอ้างอิงถึงมอเตอร์และหาคะควบคุม อย่างไรก็ตาม ยังมีโหมดการทำงานแบบอื่น ๆ อีกซึ่งกระแสเฟสจะถูกสร้างขึ้นเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sinewave Drive) และเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับทางอุดมคติเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย รูปร่างของมอเตอร์และหาคะควบคุมของมันจะเหมือนกับมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แต่ทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกันที่สำคัญคือ มอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยรูปคลื่นไซน์ในการหมุนจะมีการกระจายอัตราส่วนกระแสต่อตัวนำที่ต่ำกว่า



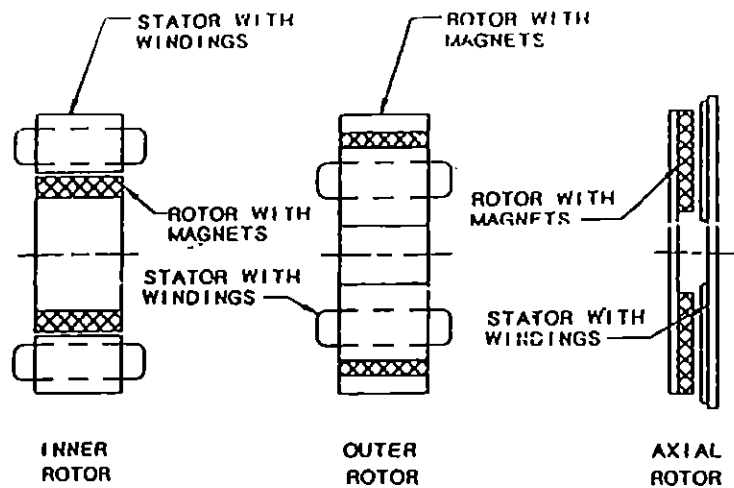
รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

จากรูปที่ 2.1 เป็นภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวรจะเห็นว่าแม่เหล็กถาวรจะเป็นส่วนที่ติดอยู่ด้านในของสเตเตอร์ ในขณะที่เดียวกันจะมีขดลวดคอปเปอร์พันอยู่บนโรเตอร์ กระแสจะไหลผ่านเข้าไปยังขดลวดคอปเปอร์โดยผ่านแปรงถ่านกับซี่คอมมิวเตเตอร์ ในเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะคงที่ในอากาศเป็นสาเหตุให้เกิดการคอมมิวเตเตอร์แอกชั่น รูปที่ 2.1 ไม่ได้แสดงให้เห็นถึงซี่คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน ดังนั้นสามารถเปรียบเทียบได้กับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่านที่มีโรเตอร์อยู่ด้านนอก ขดลวดที่อยู่ด้านใน เปรียบได้กับขดลวดคอปเปอร์ที่อยู่คงที่บนสเตเตอร์และแม่เหล็กถาวรที่เป็นส่วนหมุนจะอยู่ด้านนอก มอเตอร์แบบนี้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ในคอมพิวเตอร์ จากรูปที่ 2.2 เป็นภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านแบบที่มีส่วนหมุนอยู่ในแม่เหล็กถาวรจะอยู่บนโรเตอร์ ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้แปรงถ่านกับซี่คอมมิวเตเตอร์อีกเนื่องจากขดลวดอยู่บนสเตเตอร์ที่เป็นส่วนที่อยู่กับที่การทำให้โรเตอร์มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงจะช่วยลดความถี่ของแรงบิดได้มากกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดที่มีโรเตอร์อยู่ภายนอก

สำหรับมอเตอร์ที่ใช้งานที่ความเร็วรอบสูง ลักษณะโรเตอร์ที่ใช้จะเป็นเพลลาและมีซี่แม่เหล็กถาวรติดอยู่รอบ ๆ ซึ่งเพลลาทำจากโลหะสแตนเลสหรือโลหะอัลลอยที่มีความต้านทานจำเพาะสูง ข้อดีของโลหะมีความต้านทานจำเพาะสูงคือ จะมีค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนต่ำ จะเห็นได้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะมีหลายชนิดแตกต่างกันไปตามลักษณะ โครงสร้าง ตัวอย่างจากรูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ทั้ง 3 แบบ Axial Rotor, Inner Rotor และ Outer Rotor และยังมีรูปแบบของขดลวดที่แตกต่างกันตามโครงสร้างของซี่แม่เหล็ก



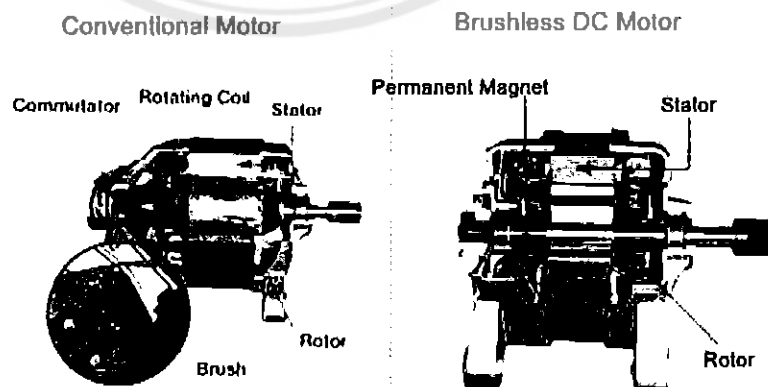
รูปที่ 2.2 โครงสร้างตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีโรเตอร์อยู่ภายใน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านทั้งสามแบบ

### 2.1.2 การคอมมิวเทชัน (Commutation)

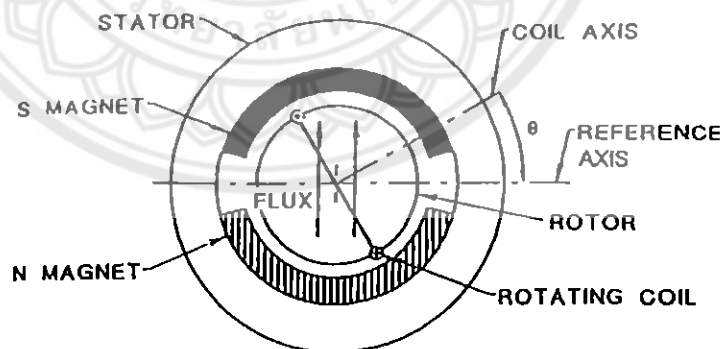
การคอมมิวเทชัน (Commutation) เป็นพื้นฐานที่สำคัญของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านกับชุดควบคุม ควรทำความเข้าใจเป็นอย่างดีก่อนที่จะลงมือออกแบบระบบต่าง ๆ ในการคอมมิวเทชันของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ที่เป็นการควบคุมแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมสามารถอธิบายได้เหมือนกันทุกประการกับการคอมมิวเทชันของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านทั่วไป จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างพื้นฐานของคอมมิวเทเตอร์ทั้ง 2 เหมือนกัน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านและแบบไร้แปรงถ่าน

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นโครงสร้างพื้นฐานโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านซึ่งในการหมุนสนามแม่เหล็กจะมีทิศทางไปในทางเดียวกันตลอด สนามแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นโดยแม่เหล็กถาวร จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าแม่เหล็กอยู่ 2 ขั้ว มีขั้วเหนือหนึ่งขั้ว ขั้วใต้หนึ่งขั้วและสมมติให้มีขดลวดขดเคี้ยวพันอยู่บนโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ให้  $\theta$  เป็นมุมระหว่างแกนอ้างอิงกับแกนของขดลวด ต้องการทราบว่าจุดเริ่มต้นของรูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ( $e_r$ ) ที่เกิดขึ้นในขดลวดที่หมุนผ่านสนามแม่เหล็ก อันดับแรกจะต้องทำการหารูปคลื่นของเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวด (Flux – linkage:  $\psi_1$ ) ก่อนจากรูปที่ 2.6 รูปคลื่น a  $\psi_1$  ถูกสร้างจากจำนวนรอบของขดลวด  $N_c$  และขนาดของฟลักซ์ (Flux;  $\phi$ ) ที่ตัดผ่านขดลวด ตัวห้อย  $l$  ให้สังเกตว่าเป็นขดลวดเฟสที่ 1

เมื่อ  $\theta = 0^\circ$  ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านตัวนำทั้งสองด้านของขดลวด แต่ไม่มีการเหนี่ยวนำที่ขดลวดเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวด ( $\psi_1$ ) จะมีค่าเป็นศูนย์และที่ตำแหน่งในทำนองเดียวกันเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวด ( $\psi_1$ ) จะมีค่าเป็นศูนย์ด้วยเมื่อ  $\theta = 180^\circ$  หลังจากนั้นจะครบรอบอีกเมื่อ  $\theta = 360^\circ$  ในระหว่างมุม  $0^\circ$  ถึง  $180^\circ$  เส้นแรงเชื่อมโยงขดลวด ( $\psi_1$ ) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนสูงสุดเมื่ออยู่ตำแหน่งมุม  $90^\circ$  เมื่อนั้นเองฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดจะตัดผ่านขดลวด เนื่องจากช่องว่างอากาศระหว่างขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้แต่ละด้านของขดลวดสามารถทำให้ขดลวดหมุนได้เล็กน้อย ที่ตำแหน่งมุม  $90^\circ$  จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวด ให้สัญญาณรูปบนในรูปที่ 2.6 รูปคลื่น a เป็นภาพของเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวดที่มุมต่างกัน



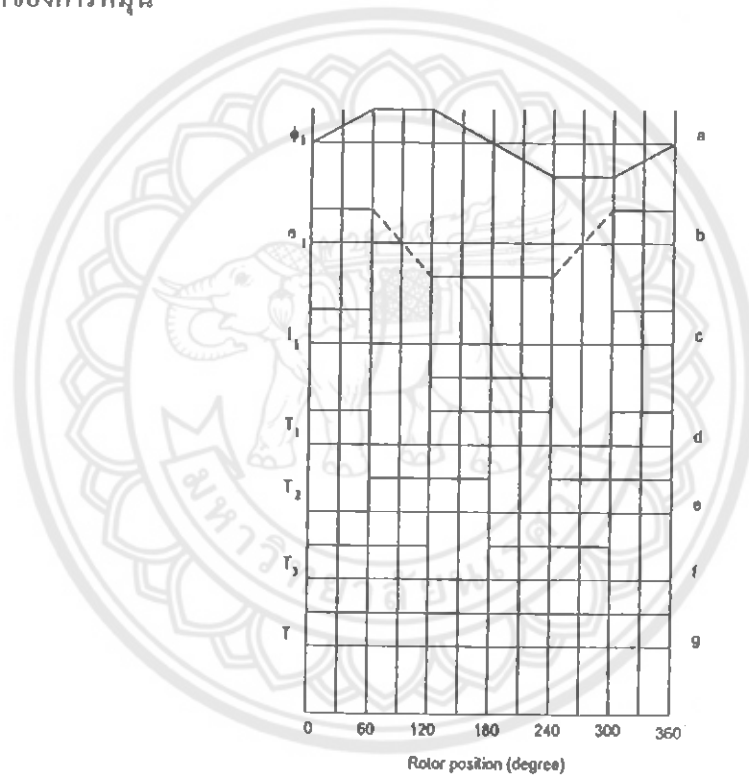
รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน

รูปสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ( $e_r$ ) สามารถอธิบายได้จากรูปคลื่น  $\psi_1$  โดยกฎของฟาราเดย์ ซึ่งสถานะนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับจะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวดหรืออาจจะกล่าวได้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าคือสัดส่วนของความชันของเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวดสามารถหาได้จากสูตร



$$e = \frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \frac{d\theta}{dt} = \omega_m \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\omega_m$  คือความเร็วเชิงมุมและ  $N$  คือความเร็วรอบของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที จะได้ว่า  $\omega_m = \frac{2\pi N}{60}$  เรเดียนต่อวินาที การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวดจะสัมพันธ์กับตำแหน่งของโรเตอร์  $\frac{\partial\psi}{\partial\theta}$  ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ความชันของเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวดในรูปที่ 2.6 รูปคลื่น a และรูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้า ( $e$ ) ที่แสดงในรูปที่ 2.6 รูปคลื่น b ในทางปฏิบัติขนาดของเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวดจะเพิ่มขึ้นจนถึงอิ่มตัวแล้วจะค่อยลดลงไปตามองศาของการหมุน

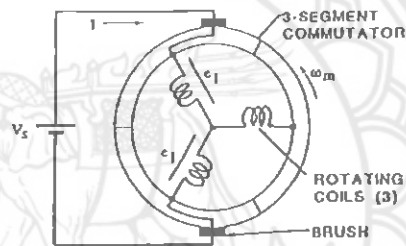


รูปที่ 2.6 รูปสัญญาณของเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวด, แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ, กระแสและแรงบิด

การคอมมิวเตเตอร์จะสวิตช์ไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่าย ( $i_i$ ) ไหลผ่านเข้าขดลวดซึ่งเหมือนกับขั้วของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายคือ  $e_i i_i$  รูปคลื่นของกระแส  $i_i$  แสดงในรูปที่ 2.6 รูปคลื่น c ถ้าให้ความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่และไม่คิดค่าสูญเสีย กำลังไฟฟ้าอินพุต (Input) ถูกเปลี่ยนเป็นกำลังทางกลจากสูตร  $T_i \omega_m$  ซึ่ง  $T_i$  คือแรงบิดที่เกิดขึ้นมาจากขดลวดขดที่หนึ่ง รูปคลื่นของแรงบิด  $T_i$  แสดงดังรูปที่ 2.6 รูปคลื่น d และสิ่งที่จำเป็นคือต้องทำให้แรงบิดมีทิศทางไปในทางเดียวกันเป็นเหตุให้ต้องกลับทิศทางการไหลของกระแสและขั้วของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับไปตามลำดับ

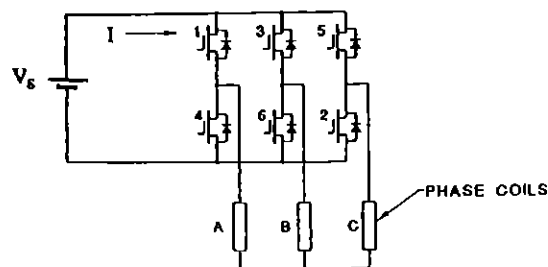
อย่างไรก็ตามแรงบิดที่ได้จากขดลวดนั้นไม่คงที่ เพราะมีช่วงเวลาที่แรงบิดมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งสามารถหาได้จากรูปคลื่นเส้นแรงเชื่อมโยงขดลวดข้างบน ที่มอเตอร์หมุนได้เพราะช่วงที่แรงบิดมีค่าเป็นศูนย์ ขดลวดจะหมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้

รูปที่ 2.7 แสดงระบบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 แต่มีขดลวด 3 คอยล์ซึ่งแต่ละคอยล์จะห่างกันเป็นมุม  $120^\circ$  ซึ่งกันและกัน ขดลวดจะต่อเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง และปลายอีกด้านหนึ่งต่อกับคอมมิวเตเตอร์ 3 ส่วน ซึ่งแต่ละอันมีมุมห่างกัน  $120^\circ$  รูปคลื่นของแรงบิดที่เกิดจากขดลวดขดที่ 2 และขดที่ 3 เหมือนกับภาพ  $T_1$  แต่ลำดับเฟสถูกแทนที่  $120^\circ$  และ  $240^\circ$  ตามรูปที่ 2.6 รูปคลื่น  $e$  และรูปที่ 2.6 รูปคลื่น  $f$  ผลรวมของแรงบิด ( $T$ ) ได้จากผลรวมของ  $T_1 + T_2 + T_3$  ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 รูปคลื่น  $g$  และแรงบิดจะมีค่าคงที่ตลอดช่วงการหมุน



รูปที่ 2.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีคอมมิวเตเตอร์ 3 ส่วน 2 แปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปที่มีคอมมิวเตเตอร์ 3 ส่วน จะมีลักษณะเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน 3 เฟส แบบการกระตุ้นด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน คือขดลวดเฟสของมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์เปรียบเทียบกับได้กับวงจรรินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์กำลังทำงานเป็นสวิตช์ดังในรูปที่ 2.8 และรูปคลื่นในรูปที่ 2.6 จะมีลักษณะเหมือนกันกับรูปคลื่นของมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 2.8 วงจรรินเวอร์เตอร์สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่าน 3 เฟส

มอเตอร์ทั้งสองมีคุณสมบัติที่สำคัญเหมือนกันคือรูปคลื่นกระแสจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุม 120° และในการจ่ายกระแสไฟฟ้ผ่านเข้าไปในขดลวดแน่นอนว่าจะต้องทำการทริกให้ ทรานซิสเตอร์นำกระแสครั้งละสองตัว คือด้านบนหนึ่งตัวและด้านล่างหนึ่งตัวตลอดเวลาการ คอม มิวเทชั่นจะทำให้กระแสจากแหล่งจ่ายและแรงบิดจะมีค่าคงที่

ที่สำคัญของรูปคลื่นแรงบิดคงที่ มีความสำคัญมากโดยเฉพาะในการขับเคลื่อนมอเตอร์ เซอร์โว ที่มีความแม่นยำสูงต้องการทั้งการควบคุมความเร็วรอบและการควบคุมตำแหน่งใน เครื่องจักร ยกตัวอย่างในเครื่องจักรที่ใช้สำหรับเจียรผิวชิ้นงานให้เรียบไม่เหมาะที่จะใช้การ ขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีแรงบิดไม่คงที่เพราะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดหรือริปเปิ้ล ซึ่งเป็น เหตุให้การทำงานยากลำบาก สิ่งที่สำคัญการทำให้รูปคลื่นกระแสคงที่คือจะต้องต่อคาปาซิเตอร์เพื่อ ทำหน้าที่ฟิลเตอร์ กระแสกร่อมแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยทั่วไปจะช่วยลดระดับการเกิดฮาร์ มอนิกส์ (Harmonics) ได้อีกด้วย

ที่ความเร็วรอบคงที่รูปคลื่นแรงบิดและรูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายจะคงที่แสดงให้เห็น การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลตามสมการดังนี้

$$EI = T\omega_m \quad (2.2)$$

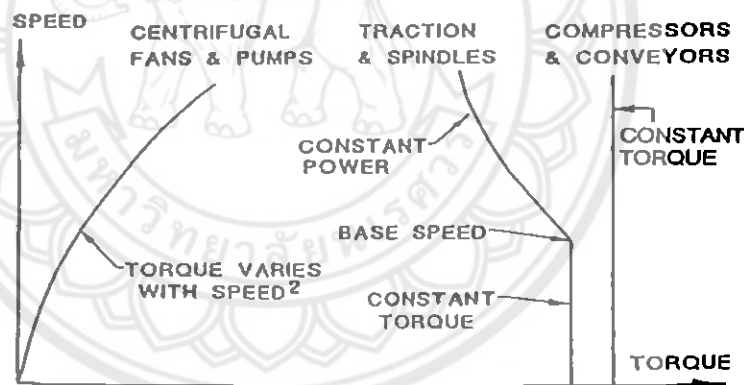
ซึ่ง  $E$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดกร่อมขดลวดอาร์เมเจอร์ 2 เฟสที่ต่ออนุกรมกัน และ  $I$  คือ กระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรง แรงดันแรงเคลื่อนไฟฟ้า ( $E$ ) ถูกต่อกับแปร่งถ่านมันจะมีค่าคงที่อยู่ ระหว่างช่วงแต่ละ 120° และสามารถหาได้จากกราวกราฟของอัตรากรเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น ของเส้นแรงเชื่อม โยงขดลวดของแต่ละเฟสในสนามแม่เหล็กหมุน ในการหมุนอัตรากร เปลี่ยนแปลงเชิงเส้นของเส้นแรงเชื่อม โยงขดลวดขึ้นอยู่กับกรกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กกรอบ ๆ สเตเตอร์

สามารถกล่าวได้ว่าสมการที่ 2.2 เป็นสมการพื้นฐานในทฤษฎีมอเตอร์ และสังเกตได้ว่า จะเป็นสมการเชิงเส้น ทำให้มุมมองในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงง่ายขึ้น สิ่งเหล่านี้เป็น ลักษณะพื้นฐานที่สำคัญในระบบคิซีเซอร์โวและระบบการควบคุมความเร็วรอบถูกรออกแบบมาแล้ว มากกว่าทศวรรษซึ่งมีความสำคัญมากสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปร่งถ่านในทาง อุดมคติมันมีลักษณะสมบัติที่เหมือนกัน แตกต่างกับอินดักชั่นมอเตอร์ที่มีลักษณะสมบัติไม่เป็น ไป ตามสมการที่ 2.2 ถึงแม้ว่ามันสามารถทำให้มีลักษณะที่คล้ายกันได้ทางอ้อมโดยการแปลงสมการ ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลักการพื้นฐานของการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) หรือฟิลด์ออ เรียนเต็ดคอนโทรล (Field oriented control) เป็นความจริงที่ว่าการควบคุมแบบเชิงเส้นของอิน

ดักชั้นมอเตอร์ต้องการแปลงฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์มากมายและยังต้องออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความยุ่งยากมากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

### 2.1.3 ลักษณะและคุณสมบัติ

การที่จะสามารถเข้าใจถึงลักษณะสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน คือ ต้องเรียนรู้เกี่ยวกับกราฟของความเร็วรอบกับแรงบิดของมอเตอร์ กราฟจะสามารถอธิบายสภาวะของมอเตอร์ในการขับโหลดแบบต่างๆ ได้ ในการเลือกใช้งานมอเตอร์สิ่งที่สำคัญ จะต้องให้กราฟของความเร็วรอบต่อแรงบิดของมอเตอร์ที่ความเหมาะสมกับลักษณะสมบัติของกราฟความเร็วรอบต่อแรงบิดของโหลด ยกตัวอย่าง ปัมคอมเพรสเซอร์ รอกและสายพานลำเลียงซึ่งต้องการแรงบิดที่คงที่เมื่อความเร็วคงที่แต่จะมีค่ามากหรือน้อยต่างกันขึ้นอยู่กับโหลดแต่ละชนิด จากรูปที่ 2.9 โหลดที่เป็นเซนติฟลูกัลปัม พัดลมและเครื่องเป่าลม จะเห็นได้ว่าบิดจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนความเร็วรอบยกกำลังสอง ส่วนโหลดแบบที่สามนี้ต้องการแรงบิดคงที่ในการขับเคลื่อนที่ ความเร็วรอบปกติและกำลังไฟฟ้าคงที่ที่ความเร็วรอบสูงกว่าและยังต้องการกำลังลดลงตัวอย่างเช่น รถไฟฟ้า เครื่องซักผ้า เครื่องปั้น



รูปที่ 2.9 กราฟลักษณะสมบัติความเร็วรอบต่อแรงบิดของโหลดต่างๆ

ฟังก์ชันพื้นฐานของกราฟความเร็วรอบต่อแรงบิด ทำให้แน่ใจได้ว่ามอเตอร์มีแรงบิดเพียงพอที่จะสามารถออกจากความเร็วรอบเป็นศูนย์ถึงความเร็วรอบพิวกัด และสามารถขับโหลดจากหยุดนิ่งจนถึงความเร็วรอบพิวกัด โดยไม่เกินขีดจำกัดทางอุณหภูมิและทางไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาตามความเหมาะสม

กราฟความเร็วรอบต่อแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน สามารถอธิบายได้จากการทดสอบด้วยไดนาโมมิเตอร์จาก สมการที่ 2.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงเชื่อม โยงขดลวดสามารถดูได้จากภาพที่ 2-6 รูปคลื่น a จะคงที่ช่วงการนำกระแสในแต่ละ  $120^\circ$  ใน

เฟส ตามในรูปแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ( $E$ ) จากการนำกระแสทั้งสองเฟสที่ต่ออนุกรมกัน และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E = k_E \omega_m \quad (2.3)$$

เมื่อ  $k_E$  ค่าคงที่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$T = k_E I \quad (2.4)$$

จากสมการแรงบิดแปรผันตรงกับกระแสและค่าคงที่ในสมการที่ 2.4 โดยปกติจะเรียกว่า ค่าคงที่ของแรงบิด  $k_T$  ในทางอุดมคติจะได้ว่า  $k_E = k_T$

แหล่งจ่ายแรงดัน ( $V_s$ ) เท่ากับผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ( $E$ ) กับแรงดันตกคร่อมความต้านทานในขดลวดรวมกับแรงดันตกคร่อมที่แปรงถ่าน ( $V_b$ )

$$V_s = E + RI + V_b \quad (2.5)$$

ค่า  $R$  คือค่าความต้านทานของขดลวดทั้ง 2 เฟสที่อนุกรมกันและ  $I$  คือกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย สมการนี้สามารถประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ถ้า  $V_b$  คือแรงดันตกคร่อมของทรานซิสเตอร์กำลังทั้ง 2 ตัวที่ต่ออนุกรมกัน ในการออกแบบระบบที่ดี  $V_b$  ต้องมีค่าน้อยที่สุดจากการแทนค่า  $V$  และ  $I$  จะได้สมการเป็น

$$\frac{\omega_m}{\omega_{NL}} = 1 - \frac{T}{T_{LR}} = 1 - \frac{I}{I_{LR}} \quad (2.6)$$

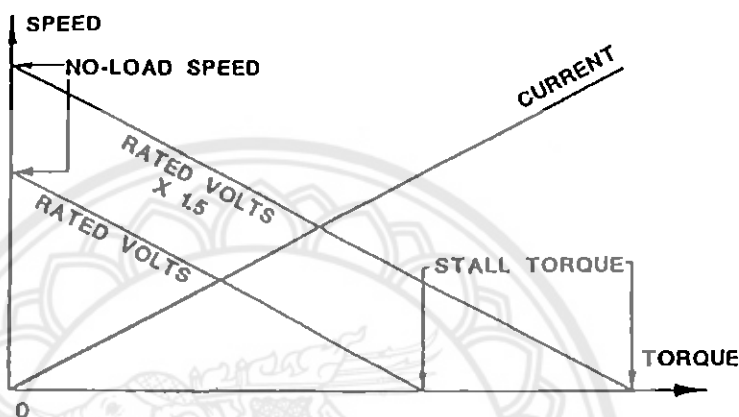
เมื่อ  $\omega_{NL}$  คือ ความเร็วรอบขณะ ไม่มี โหลด (No load) หน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที

$$\omega_{NL} = \frac{V_s}{k_E} \quad (2.7)$$

และ  $T_{LR}$  แรงบิดขณะล๊อค โรเตอร์ หน่วยเป็น นิวตันเมตร

$$T_{LR} = k_T I_{LR} = k_T \frac{V_s}{R} \tag{2.8}$$

$I_{LR}$  คือกระแสชดเชยมอเตอร์ซึ่งถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทานของขดลวดจากสมการที่ 2.6 จะได้ว่ากราฟความเร็วรอบต่อแรงบิดจะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สมการสามารถเขียนในรูปของความเร็วเชิงมุมเมื่อไม่มีโหลดขณะที่ค่าของแรงบิดและกระแสอยู่ในสภาวะล้นโรเตอร์



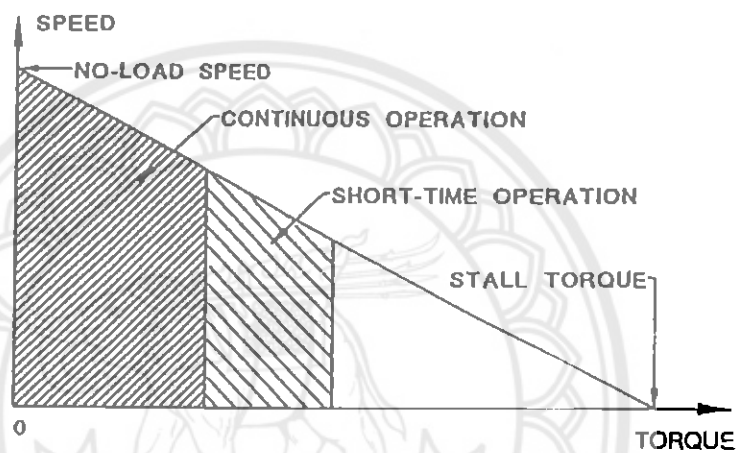
รูปที่ 2.10 กราฟลักษณะสมบัติความเร็วรอบต่อแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ถ้ามอเตอร์ทำงานที่สภาวะไม่มีโหลดแรงบิดจะเท่ากับศูนย์และไม่มีกระแสไหลจากแหล่งจ่าย ไม่มีแรงดันตกคร่อมความต้านทานของขดลวด มอเตอร์จะมีอัตราเร่งจนกระทั่ง  $E$  เท่ากับ  $V_s$  จากสมการที่ 2.7 แสดงให้เห็นความเร็วรอบขณะไม่มีโหลดสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับแรงดันที่แหล่งจ่ายซึ่งในความเป็นจริงจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันที่แหล่งจ่ายและแน่นอนคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถควบคุมความเร็วรอบด้วยปรับอิเล็กทรอนิกส์กำลังรูปที่ 2.10 รวมไปถึงกราฟความเร็วรอบต่อแรงบิดที่ 1.5 เท่าของแรงดันพิกัด

เมื่อในขณะมีโหลดกระแสจะถูกดึงจากแหล่งจ่าย ผลลัพธ์ที่ได้คือจะมีแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานในขดลวดมอเตอร์ เป็นไปได้ที่แรงดันตกคร่อม ( $E$ ) จะลดลงด้วยค่า  $V_s - RI$  ทำให้ความเร็วรอบตกลงด้วย แรงดันคร่อม ( $E$ ) จะแปรผกผันกับกระแสและแรงบิด สิ่งเหล่านี้สามารถอธิบายได้ว่าทำไมกราฟของความเร็วรอบต่อแรงบิดในสภาวะที่แรงดันคงที่ถึงลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น

ถ้ามีโหลดมากเกินไปความเร็วรอบจะตกลงจนเป็นศูนย์หรือหยุดหมุนอย่างเช่นในเงื่อนไขของโรเตอร์ เมื่อ  $E = 0$  แรงดันจากแหล่งจ่ายตกคร่อมที่ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์

ทั้งหมด โดยที่ปกติขดลวดมีค่าความต้านทานน้อยมาก เป็นเหตุให้กระแสไหลมากในขณะมอเตอร์หยุดนิ่ง โดยปกติจะไม่ยอมให้กระแสเต็มพิกัดไหลผ่านขดลวดโรเตอร์ถึงแม้ว่าช่วงเวลาสั้นๆ ก็ตามมันจะเป็นอันตรายต่อระบบหรือทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่เสียหายหรือฉนวนที่หุ้มขดลวดไหม้ได้ซึ่งในสภาวะการทำงานปกติจะอยู่ในขอบเขตแถบทางด้านซ้ายมือของรูปที่ 2.11 โดยทั่วไปเมื่อมีการใช้งานมอเตอร์โดยโหลดเป็นแบบต่อเนื่อง จะใช้งานในย่านที่แรงบิดมีค่าจากศูนย์สูงขึ้นจนถึง 30% ของแรงบิดขดลวดโรเตอร์และบางที่อาจจะใช้งานในย่านแรงบิดสูงขึ้นได้ถึง 50-60 % ในช่วงเวลาสั้น ๆ



รูปที่ 2.11 การทำงานช่วงเวลาต่อเนื่องและช่วงเวลาสั้นๆ

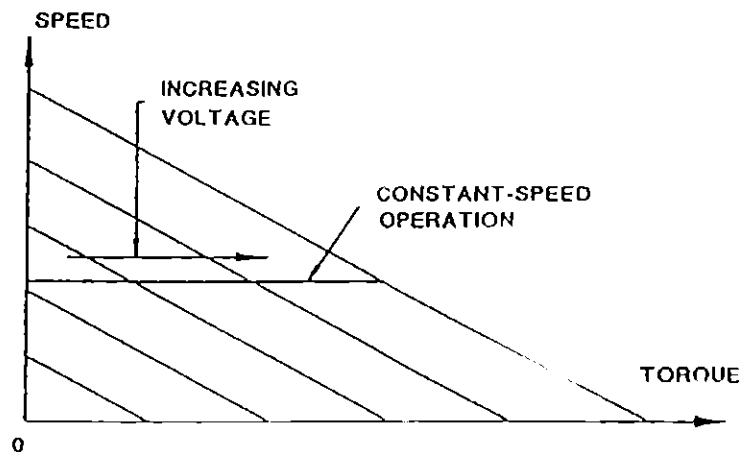
รูปที่ 2.11 แสดงช่วงเวลาทำงานแบบต่อเนื่องและช่วงเวลาทำงานแบบสั้นๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่งเป็นกราฟความเร็วรอบต่อแรงบิดที่สามารถอธิบายขีดจำกัดการทำงานของมอเตอร์และชุดควบคุม โดยทั่วไปแล้วในการทำงานจริงมันอาจจะไม่เป็นไปตามกราฟความเร็วรอบต่อแรงบิดของมอเตอร์ดังที่แสดงในภาพเสมอไปในที่จุดต่างๆ ในความจริงความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์นี้ จะเปลี่ยนแปลงอย่างคงที่โดยเฉลี่ยในช่วงนานการทำงาน ต้องอยู่ในย่านการทำงานอย่างต่อเนื่อง แต่อนุญาตให้ใช้ในย่านการทำงานสั้นๆ ได้ โหลดกรณีนี้อาจจะเกิดได้บ่อยๆ ทำให้เกิดการสะสมความร้อนซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเกินค่าพิกัดในช่วงเวลาสั้นๆ

ผลกระทบของอุณหภูมิมีผลต่อลักษณะสมบัติของฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์มีความร้อนสูงขึ้น อุณหภูมิสนามแม่เหล็กจะมีความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยและส่วนมากในกรณีนี้เป็นเหตุทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กลดลงได้ ผลที่ตามมาก็คือค่าคงที่ของแรงบิด  $K_T$  จะลดลงด้วย

กราฟความเร็วรอบต่อแรงบิดแสดงในรูปที่ 2.10 ถึง 2.12 ทั้งหมดมีลักษณะเป็นเส้นตรง เพราะถูกวาดขึ้นมาจากสมการทางอุดมคติที่ 2.6 แต่ในทางปฏิบัติกราฟความเร็วรอบต่อแรงบิดจะไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากผลของค่าอินดักแตนซ์ในขดลวด ซึ่งจะมีผลในขณะที่ความเร็วรอบสูงซึ่งทำให้ความเร็วรอบลดลงและมีผลให้สนามแม่เหล็กลดลง เนื่องจากการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก

ในการวิเคราะห์สมการต่างๆ ในทางอุดมคติจะไม่คิดค่าความสูญเสียทั้งหมด รวมถึงค่าความสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ ค่าความสูญเสียที่แกนเหล็ก (ฮีสเทรีซิสและกระแสไหลวน) ในแผ่นลามิเนตและค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทานของลวด นอกจากนั้นกระแสสูงและอุณหภูมิสูงเป็นผลทำให้สนามแม่เหล็กลดลงอีกด้วย อย่างไรก็ตามในการออกแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน การลดทอนของสนามแม่เหล็กไม่เป็นปัญหาเพราะว่ากระแสถูกควบคุมและถูกจำกัดโดยตัวควบคุมอย่างต่อเนื่องและมันยังสามารถตรวจจับอุณหภูมิเกินในมอเตอร์ได้อีกด้วย กราฟความเร็วรอบต่อแรงบิดแสดงให้เห็นได้ไม่ชัดเจนว่าทำไมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน สามารถทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ได้ในขณะที่มีโหลด เพราะว่ารูปที่เห็นจากกราฟความเร็วรอบจะตกลงถ้าโหลดหรือแรงบิดเพิ่มขึ้น คงจำได้ว่ากราฟความเร็วรอบต่อแรงบิดถูกจำกัดโดยเส้นเขตกันการทำงาน เส้นทึบในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นการทำงานที่ความเร็วรอบคงที่เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นผลก็คือแหล่งจ่ายแรงดันจะต้องถูกเพิ่มขึ้นจนเท่ากับพิกัดของแรงดันตกคร่อม ( $R \cdot I$ ) ดังนั้น  $E$  ยังคงที่ เพราะฉะนั้นความเร็วรอบก็คงที่ด้วย ซึ่งสามารถเห็นได้จากจุดการทำงานของกราฟความเร็วรอบต่อแรงบิดซึ่งเหมือนกับการเพิ่มแรงดันขึ้น การเพิ่มแรงดัน ( $R \cdot I$ ) จะปรับแรงดันด้วยตัวควบคุม สามารถทำได้โดยการป้อนกลับของรูปความเร็ว ในทางอุดมคติแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะเรียบอย่างสมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติไม่เป็นเช่นนั้น ถึงแม้ว่าจะสามารถป้อนกลับแล้วก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดในช่วงระหว่างรอบจะเกิดจากการไม่สมบูรณ์ของกระแสเฟสหรือจากริปเปิ้ลในรูปคลื่นกระแสที่เกิดจากการชอปเปอร์และจากการเปลี่ยนแปลงของวงจรแม่เหล็กที่เกิดจากช่วงการหมุนของโรเตอร์ บางครั้งผลนี้เรียกว่า Cogging มันสามารถตรวจสอบได้เมื่อใช้มือหมุนเพลลาอย่างช้า ๆ จะมีความรู้สึกว่ามีกระตุกเล็กน้อย ริปเปิ้ลแรงบิดทำให้การคอมมิวเทชันไม่สมบูรณ์และริปเปิ้ลของกระแสไม่สามารถตรวจสอบได้จากวิธีนี้ไม่ได้แปลว่ามอเตอร์นี้จะหมุนไม่เรียบตลอดเวลา โดยจะแสดงให้เห็นในขณะที่มอเตอร์ที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นที่ความเร็วรอบสูงความถี่ของมอเตอร์และโหลดจะลดการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบโดยการลดแอมพลิจูดของริปเปิ้ลแรงบิดลงที่ความเร็วรอบต่ำ การป้อนกลับรูปความเร็วจะขจัดริปเปิ้ลแรงบิดได้ทางอ้อมถ้าอัตราขยายป้อนกลับและแบนด์วิดท์มีค่าสูงเพียงพอ





รูปที่ 2.12 การทำงานที่ความเร็วรอบคงที่

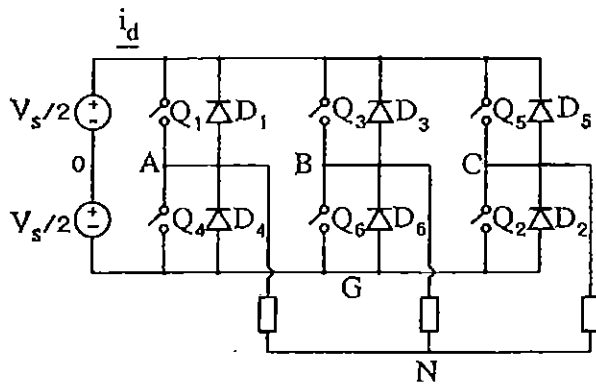
#### 2.1.4 การตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพยายามที่จะหาวิธีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยไม่ใช้เครื่องตรวจสอบตำแหน่งโรเตอร์ และหลังจากนั้นไม่นานก็มีบริษัทที่สามารถผลิตไอซีที่ใช้ในการควบคุมแบบนี้ว่า การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่ใช้ฮอลล์เซ็นเซอร์ แบบ 3 เฟส ที่มีโรเตอร์เป็นแบบแม่เหล็กถาวรซึ่งโดยปกติจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเพียงที่ละ 2 เฟสเท่านั้น ส่วนในเฟสที่ไม่เกิดการเหนี่ยวนำจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ในเฟสที่ไม่เกิดการเหนี่ยวนำจะสามารถบอกตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กโรเตอร์ที่อยู่ขณะนั้นได้

#### 2.2 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

อินเวอร์เตอร์ คือ วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ โดยใช้หลักการปรับค่าแรงดันกระแสตรงด้านอินพุต หรือใช้หลักการควบคุมเทคนิคการสวิตช์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปเทคนิคที่นิยมใช้คือ เทคนิคพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation: PWM)

เทคนิคพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation: PWM) คือการมอดูเลตความกว้างพัลส์ สามารถนำไปใช้ได้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ซึ่งสามารถปรับความถี่และระดับแรงดันหลักการของ PWM จะใช้คลื่นพาหะเป็นรูปสามเหลี่ยมนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปไซน์ ซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกผสมกัน (Modulate) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานของการเปรียบเทียบ จะเกิดจุดตัดกันของรูปคลื่นทั้งสอง นำมากำหนดเป็นสัญญาณการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งในวงจรหลักของอินเวอร์เตอร์

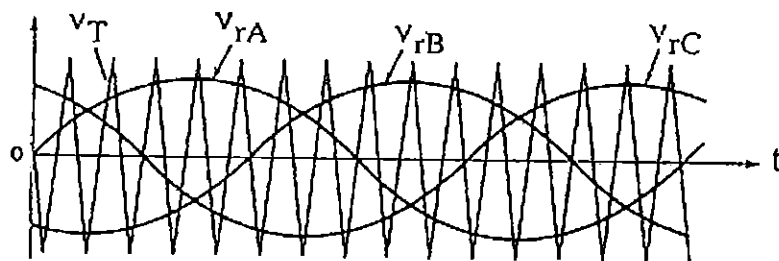


รูปที่ 2.13 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส

อินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟสมีแนวคิดและหลักการมาจากอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส กล่าวคือค่าแรงดันมูลฐานระหว่างสายหรือแรงดันเฟสจะแปรตามค่าดัชนีการมอดดูเลต หรือ  $m$  ซึ่งเท่ากับค่าสูงสุดของแรงดันอ้างอิงต่อค่าสูงสุดของแรงดันรูปสามเหลี่ยม ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าค่าสูงสุดของแรงดันรูปสามเหลี่ยมเท่ากับขนาดของแรงดันของวงจรเชื่อม โยงทางคิซี ดังนั้นค่า  $m$  จึงเป็นอัตราส่วนของแรงดันมูลฐานทางเอาต์พุตต่อแรงดันของแรงดันของวงจรเชื่อม โยงทางคิซี นั่นเอง

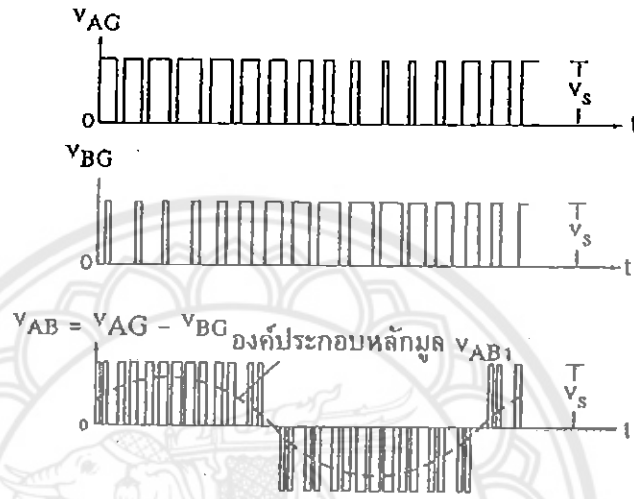
ในย่านการทำงานปกติดัชนีการมอดดูเลตจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งในช่วงนี้แรงดันมูลฐานทางเอาต์พุตจะมีลักษณะเป็นรูปไซน์ โดยย่านการทำงานนี้จะถูกเรียกว่า Linear Modulation และเมื่อทำการปรับค่าดัชนีการมอดดูเลตให้มากกว่า 1 จะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการมอดดูเลตและแรงดันมูลฐานเอาต์พุตไม่ได้เป็นเชิงเส้นอีกต่อไป แรงดันมูลฐานจะมีลักษณะไม่เป็นรูปไซน์ และเรียกช่วงการทำงานนี้ว่า Over Modulation

ลักษณะแรงดันอ้างอิงหรือแรงดันควบคุม แรงดันสามเหลี่ยม แรงดันเอาต์พุตเทียบกับ Negative Bus และแรงดันสายทางเอาต์พุตในวงจรในรูปที่ 2.14 ซึ่งมีการทำงานในย่าน Linear Modulation



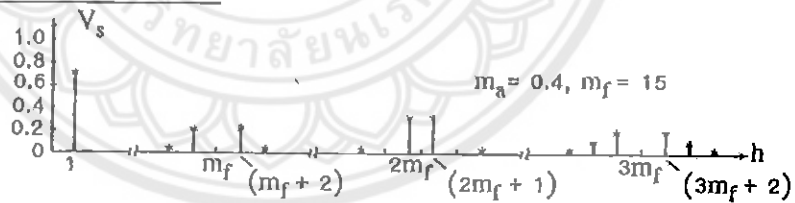
รูปที่ 2.14 หลักการของเทคนิคไซน์ตัดสามเหลี่ยม

จะมีรูปสามเหลี่ยม  $V_T$  ซึ่งมีความถี่เท่ากับการสวิตช์ และมีสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ 3 สัญญาณ ได้แก่  $V_{rA}$ ,  $V_{rB}$  และ  $V_{rC}$  ซึ่งมีมุมเฟสต่างกัน  $120^\circ$  โดยมีจุดตัดระหว่าง  $V_T$  กับ  $V_{rA}$ ,  $V_{rB}$  และ  $V_{rC}$  เป็นตัวกำหนดการตัดต่อวงจรของสวิตช์  $Q_1$ ,  $Q_4$ ,  $Q_3$ ,  $Q_6$  และ  $Q_5$ ,  $Q_2$  ตามลำดับ) รูปคลื่นของแรงดัน  $V_{AG}$ ,  $V_{BG}$  (G คือสายลบของแหล่งแรงดันไฟตรง)



รูปที่ 2.15 คลื่นสัญญาณ

ฮาร์มอนิกของแรงดันสาย



รูปที่ 2.16 สเปกตรัม [9]

แรงดันสาย  $V_{AB}$  มีองค์ประกอบหลักมูลเท่ากับ  $V_{AB1}$  แอมพลิจูดของ  $V_{AB1}$  เท่ากับ  $\sqrt{3}$  ของแอมพลิจูดของ  $V_{AG1}$  เนื่องจาก  $V_{AG}$  และ  $V_{BG}$  มีเฟสต่างกัน  $120^\circ$  และ  $V_{AB1}$  มีเฟสล่าช้า  $V_{AG1}$  อยู่  $30^\circ$  โดยมีความสัมพันธ์กันคือ

$$V_{AGI} = maVs \quad ; ma \leq 0.5 \quad (2.9)$$

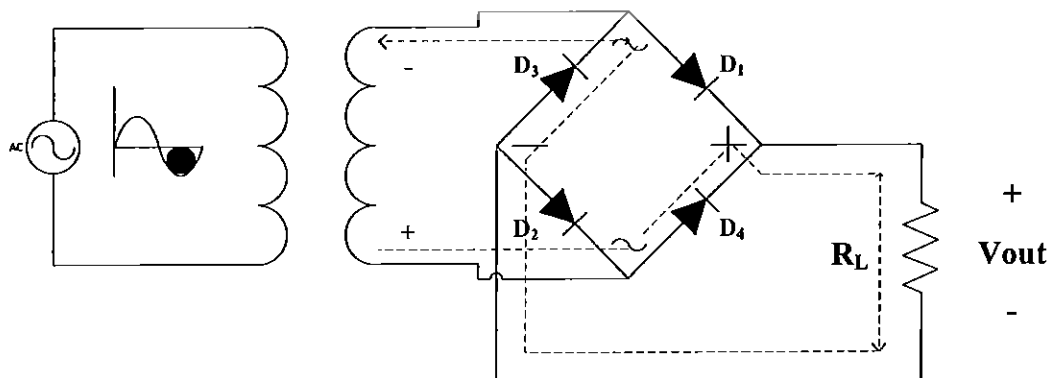
$$V_{AB1} = \sqrt{3} maVs; ma \leq 0.5 \quad (2.10)$$

ในการออกแบบระบบ โดยทั่วไปนิยมเลือกอัตรากรมอดดูเลตความถี่  $mf$  เป็นเลขคี่และเป็นพหุคูณของ 3 และให้ความลาดชันของ  $V_T$  และ  $V_r$  ณ จุดที่แรงดันทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกัน ในกรณีนี้ถ้า  $ma < 0.5$  สเปกตรัมของ  $V_{AB}$

เมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณ จะพบว่าในบางช่วงเวลา สวิตช์จะตอ่กึ่งทั้งสามของ โหลดเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่าย  $V_s$  (เช่น เมื่อ  $Q_4, Q_6, Q_2$  นำกระแส) และบางช่วงเวลาสวิตช์จะตอ่กึ่งทั้งสามโหลดเข้ากับขั้วบวก  $V_s$  (เช่น เมื่อ  $Q_1, Q_3, Q_5$  นำกระแส) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว กระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่ากำลังงานไม่ไหลจากแหล่งจ่ายสู่โหลด ซึ่งระยะเวลาของการควบคุมช่วงเวลาดังกล่าวเป็นการควบคุมกำลังงานที่จ่ายให้แก่โหลดหรือควบคุมค่าองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันเอาต์พุตนั่นเอง

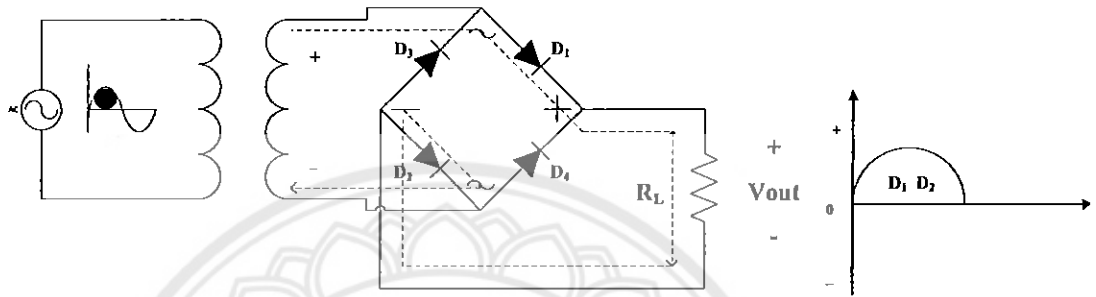
### 2.3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier)

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์มีลักษณะเหมือนวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น เพราะแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นแบบเต็มคลื่น ข้อแตกต่างระหว่างวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และแบบเต็มคลื่นธรรมดา ต่างกันตรงการต่อวงจร ไดโอด แบบเต็มคลื่นจะใช้ไดโอด 2 ตัว แบบบริดจ์จะใช้ไดโอด 4 ตัว และหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ก็แตกต่างกัน แบบเต็มคลื่นธรรมดาใช้หม้อแปลงมีแท่งกลาง (Center Tap, CT) มี 3 ขั้วแบบบริดจ์ใช้หม้อแปลง 2 ขั้วหรือ 3 ขั้วก็ได้ ดังรูปที่ 2.17



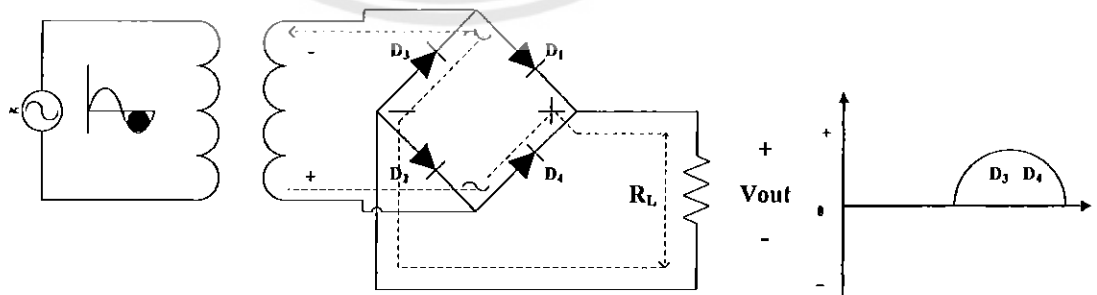
รูปที่ 2.17 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

การทำงานของวงจร ไดโอดจะผลัดกันนำกระแสครั้งละ 2 ตัว โดยเมื่อไซเคลลบวกของแรงดันไฟสลับ ( $V_m$ ) ปรากฏที่ด้านบนของขดทุติยภูมิของหม้อแปลงและด้านล่างจะเป็นลบ จะทำให้ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  ได้รับไบอัสตรงจะมีกระแสไหลผ่านไดโอด  $D_1$  ผ่านโหลด  $R_L$  ผ่านไดโอด  $D_2$  ครบวงจรที่หม้อแปลงด้านล่าง มีแรงดันตกคร่อมโหลด  $R_L$  ด้านบนเป็นบวก ด้านล่างเป็นลบ ได้แรงดันไฟช่วงบวกออกทางเอาต์พุต

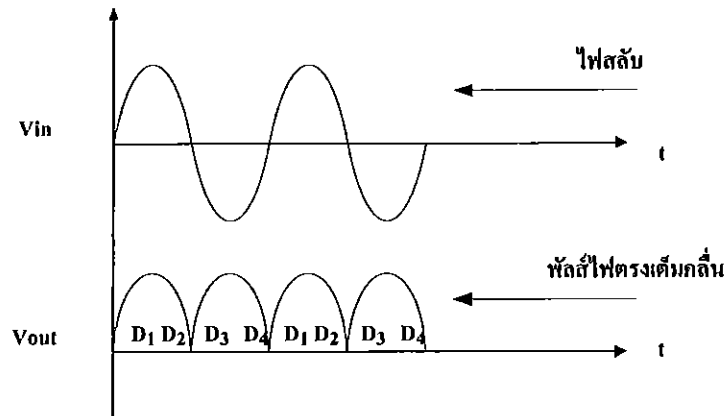


รูปที่ 2.18 ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ )

ในช่วงเวลาต่อมาไซเคลลบวกของแรงดันไฟสลับ ( $V_m$ ) ปรากฏที่ด้านบนของขดทุติยภูมิของหม้อแปลง และด้านล่าง เป็นบวก ดังแสดงในรูปที่ 3 ในช่วงเวลานี้ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  จะได้รับไบอัสกลับแต่ไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  จะได้รับไบอัสตรง ทำให้มีกระแสไหลผ่านไดโอด  $D_4$  ผ่านโหลด  $R_L$  และผ่านไดโอด  $D_3$  ครบวงจรที่หม้อแปลงด้านบน มีแรงดันตกคร่อมโหลด  $R_L$  ด้านบนเป็นบวก ด้านล่างเป็นลบ ได้แรงดันไฟช่วงบวกออกทางเอาต์พุตทำให้ได้คลื่นไฟตรงรวมกันเต็มคลื่นดังรูปที่ 2.19

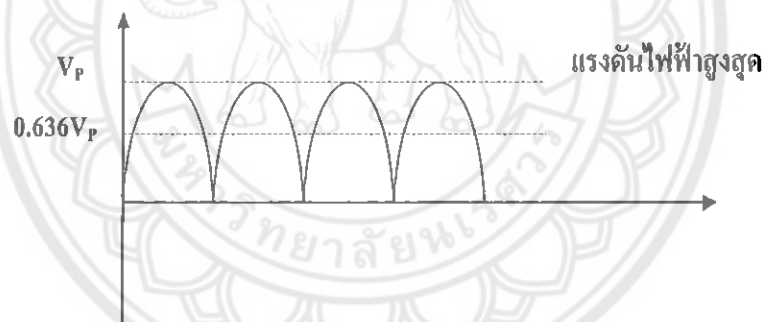


รูปที่ 2.19 ไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ )



รูปที่ 2.20 รูปคลื่น  $V_{out}$  เปรียบเทียบกับ  $V_{in}$  ของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นทั้งแบบมีแท่งกลางและแบบบริดจ์จะให้แรงดันเอาต์พุตทุกๆ ครึ่งรอบของแรงดันไฟสลับที่เข้ามาทั้งซีกบวกและซีกลบ ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตจึงมีค่าเป็น 2 เท่าของแรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็น 0.636 เท่าของแรงดันไฟสูงสุด



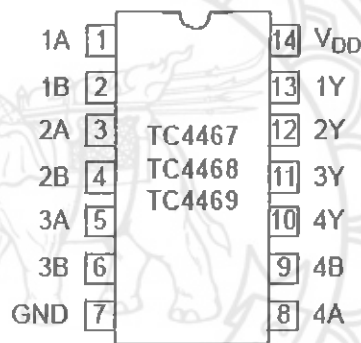
รูปที่ 2.21 ค่าแรงดันไฟตรงกับค่าแรงดันไฟสูงสุด  $V_p$  ของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

### 2.4 เกตไดร์ฟ (Gate Drive)

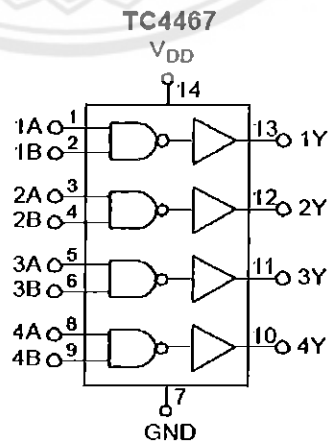
เกตไดร์ฟที่เลือกใช้ภายในโครงงานนี้คือ TC4467 ทำหน้าที่เป็นวงจรเชื่อมต่อ (Interface Circuit) ส่งสัญญาณไปเพื่อเปิด-ปิด ถุ่มอสเฟต ในวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.22 เกตไดร์ฟ TC4467



รูปที่ 2.23 การจัดขาของเกตไดร์ฟ TC4467



รูปที่ 2.24 โครงสร้างภายในของเกตไดร์ฟ TC4467

## 2.5 เพาเวอร์มอสเฟต (Power Mosfet)

เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญชนิดหนึ่ง ซึ่งนิยมใช้มากในวงจรสวิทช์ซึ่งเพาเวอร์ซัพพลาย การควบคุมมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์หรือวงจรถยายเสียงเป็นต้น เนื่องจากมีข้อดีที่ว่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์คือ กำลังงานสูญเสียขณะสวิทช์ต่ำ ไม่มีช่วงแรงดันพังทลายที่ 2 มีอัตราขยายสูงและวงจรถ่ายสร้างได้ง่าย ราคาถูก มีความทนทานและเสถียรภาพทางอุณหภูมิดีมีความจุหรือรับกระแสได้สูง สามารถนำมาต่อขนานได้ง่ายเนื่องจากสมบัติที่ความต้านทานเป็นบวก ใช้ในวงจรความถี่สูงได้ดี ข้อเสียของเพาเวอร์มอสเฟตก็มีเช่นเดียวกันคือ แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสมีค่ามากประมาณ 4.5 โวลต์ ซึ่งเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะมีเพียง 1 โวลต์เท่านั้น

### 2.5.1 คุณลักษณะของเพาเวอร์มอสเฟต

แรงดันพังทลาย ( $V_{DSS}$ ) แรงดันค่านี้เป็นค่าแรงดันระหว่างเดรนกับซอร์สซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิต่ำๆ ค่าแรงดันพังทลายของเพาเวอร์มอสเฟตจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดคั้งนั้นเมื่อป้อนแรงดันให้ระหว่างเดรนกับซอร์สโดยเปิดขาเกตไว้ คั้งเช่นวงจรถ่ายแรงดันตกคร่อมระหว่างขาเกตและซอร์สจะถูกสร้างขึ้นเนื่องมาจากค่าความจุภายในของมอสเฟตทำให้มอสเฟตนำกระแสเกิดการลัดวงจรขึ้นได้ จึงเป็นอันตรายต่อมอสเฟต ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ควรจะใส่ค่าความต้านทานหลายสิบบ โอห์มไว้ระหว่างขาเกตและซอร์สค่าความต้านทานขณะนำกระแส หรือ  $R_{DS(ON)}$  เพาเวอร์มอสเฟตขณะที่น่ากระแสอย่างสมบูรณ์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างเดรนกับซอร์สจะแปรผันตรงกับกระแสที่ไหลผ่านตัวมันเนื่องมาจากความต้านทานระหว่างเดรนกับซอร์ส ซึ่งมีลักษณะเดียวกับ โอห์มมิกรีซิตแตนซ์ (Ohmic Resistance) หรือความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปโดยหาได้จากกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสจากสมการ 2.11

$$P_{CON} = I_{DM}^2 R_{DS(ON)} \quad (2.11)$$

โดยที่  $I_{DM}$  คือ ค่ากระแสสูงสุดของกระแสเดรน (แอมป์; A)

ค่า  $R_{DS(ON)}$  จะเพิ่มตามอุณหภูมิที่รอยต่อ (โอห์ม;  $\Omega$ )

วงจรถ่ายของเพาเวอร์มอสเฟต จากโครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟตสามารถสร้างเป็นวงจรถ่ายซึ่งประกอบไปด้วยไดโอด ( $D_x$ ) ค่าความจุ, ค่าความต้านทาน (ซึ่งมีค่าน้อยมาก) และทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ( $Q_x$ ) การพิจารณาวงจรถ่ายนี้มีมีความสำคัญมากในการใช้งานเพาเวอร์



มอสเฟตควบคุมมอเตอร์แบบพัลส์วิดธ์มอดูเลชั่น (PWM) เพราะในขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตหยุดนำกระแสค่าแรงดันระหว่างครนกับซอร์สจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ( $dv/dt$  มีค่าสูง) กระแสส่วนหนึ่งจะไหลผ่านค่าความจุที่ต่ออยู่ระหว่างคอลเล็กเตอร์และเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_x$  ค่ากระแสนี้ ( $i_c = C \cdot dv/dt$ ) จะทำให้เกิดแรงดันที่ความต้านทานขาเบสและอิมิตเตอร์ของ  $Q_x$  ซึ่งแรงดันนี้อาจเกิดการลัดวงจรขึ้นได้ ส่วนการทำงานที่ความเร็วสูงถึงแม้ว่าเพาเวอร์มอสเฟตสามารถทำงานด้วยแรงดันเกตเพียงเล็กน้อย แต่ก็ต้องเพียงพอในการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุที่แฝงอยู่ภายในวงจรเกต ดังนั้นการทำงานที่ความเร็วสูงตัวเก็บประจุที่อินพุตจะต้องทำการเก็บประจุอย่างรวดเร็ว จึงควรใช้แหล่งจ่ายสัญญาณที่มีค่าความต้านทานต่ำๆ จึงสรุปได้ว่าวงจรขับกระแสเกตจะมีผลต่อความเร็วในการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต ส่วนอุณหภูมินั้นจะมีผลกระทบต่อความเร็วไม่มากเท่าใด ช่วงการทำงานที่ปลอดภัยหรือ SOAR (Safe Operating Area) ของเพาเวอร์มอสเฟตจะต่างจากเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์คือ ไม่มีแรงดันพังทลายที่ 2 (Second Breakdown) ดังนั้น SOAR ของเพาเวอร์มอสเฟตนี้จะแสดงช่วงของอัตราทนกำลังที่สภาวะการทำงานต่างๆ เป็นหลัก ซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปบ้างตามอุณหภูมิที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ โดยปกติจะไม่เกิน 150 องศาเซลเซียสถึง 175 องศาเซลเซียส ดังนั้นรูปร่างของตัวถังและการระบายความร้อนที่ดีจะช่วยให้ SOAR ดีขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราทนกำลังจะแปรเปลี่ยนไปตามขนาดความกว้างของพัลส์อินพุต ปกติแล้วกราฟ SOAR ที่คู่มือให้มานั้น มักจะเป็นกราฟในขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตมีอุณหภูมิบริเวณรอยต่อสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงสุด แต่ในขณะที่ใช้งานจะไม่มีกำหนดให้เพาเวอร์มอสเฟตทำงานจนกระทั่งอุณหภูมิที่บริเวณสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงสุด เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ ซึ่งสามารถเลี่ยงได้โดยกำหนดกำลังสูงสุดที่ต้องทำงานให้กับเพาเวอร์มอสเฟตนอกจากนั้นแล้วขนาดกระแสและแรงดันของพัลส์อินพุตก็มีอิทธิพลต่อช่วง SOAR เช่นกันซึ่งกระแสที่มากเกินไปจะทำให้อัตราทนกำลังลดลง ส่วนพัลส์ที่มีทรานเซียนต์จะทำให้เกิดแรงดันพังทลายขึ้น

### 2.5.2 กำลังสูญเสียของเพาเวอร์มอสเฟต

กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวเพาเวอร์มอสเฟต มีมาจากสาเหตุต่างๆ กัน ดังนี้ กำลังสูญเสียขณะนำกระแส เกิดขึ้นจากค่าความต้านทานของเพาเวอร์มอสเฟตขณะนำกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะแปรผันตามอุณหภูมิบริเวณรอยต่อสารกึ่งตัวนำซึ่งหาได้จาก

$$P_c = I_{on}^2 R_{DS(on)} \quad (2.12)$$

1607 4133

นส.

ด.ช. ๕

2554

กำลังสูญเสียขณะสวิตช์ ในขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแสจะมีกระแสไหลผ่านอยู่ในขณะที่มีแรงดันตกคร่อมจึงเป็นเหตุให้เกิดกำลังงานสูญเสียขึ้น โดยเฉพาะ

อย่างยิ่งเมื่อทำงานที่ความถี่สูงๆ และปกติแล้วช่วงเวลาในการหยุดนำกระแสจะนานกว่าช่วงเริ่มนำกระแสมาก ดังนั้นกำลังสูญเสียในขณะนำสวิตซ์จึงเกิดขึ้นในช่วงหยุดนำกระแสเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอาจลดทอนกำลังสูญเสียนี้ได้โดยการใส่วงจร snubber ระหว่างขาแคทรกับซอร์ส เพื่อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน  $V_{DS}$  หรือ  $dv_{DS}$  ขณะเริ่มหยุดนำกระแสให้เหมาะสม กำลังสูญเสียจากไดโอดแฝง เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านไดโอดในขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตหยุดนำกระแส ซึ่งจะพบในวงจรที่มีโหลดอินดักแตนซ์รวมอยู่ เช่น มอเตอร์

กำลังสูญเสียในภาคเกตอินพุต กำลังสูญเสียในส่วนนี้จะมีค่าน้อยที่สุดเพราะว่าขนาดของแรงดันและกระแสมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับเอาต์พุต โดยส่วนใหญ่แล้วกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนนี้เกิดจากค่าความต้านทานของขาเกตและวงจรขับกระแสเกตนั่นเอง

### 2.5.3 แรงดันสไปค์ที่เกิดซอร์ส

สิ่งที่ควรระวังของเพาเวอร์มอสเฟตอย่างหนึ่งคือแรงดันสไปค์ (Spike) ที่จะเข้ามาตกคร่อมเกตและซอร์ส ถ้าสูงเกินไปก็จะทำให้ผนังที่กั้นระหว่างเกตและซอร์สทะลุเสียหายอย่างถาวร แต่นอกจากเพาเวอร์มอสเฟตจะเสียหายได้โดยตรงจากแรงดันเกตซอร์สแล้ว การเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมแคทรซอร์สอย่างกะทันหันก็ยังเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันสไปค์ขึ้นได้ที่เกตซอร์สด้วยปัญหาดังกล่าว

### 2.5.4 อย่าใช้งานมอสเฟตเกินขีดจำกัดกระแสสูงสุด

มอสเฟตทุกตัวจะมีค่าของอัตราทนกระแสสูงสุดอยู่ ซึ่งถ้าไม่ได้ใช้งานเกินค่านี้อแล้ว มอสเฟตก็จะมีอายุยืนยาวคงทนต่อการใช้งาน แต่เหตุการณ์การกินกระแสเกินของโหลดที่เป็นขดลวดความร้อน ไล่หลอดไฟ มอเตอร์หรือแม้แต่โหลดที่เป็นความต้านทานธรรมดา ก็อาจก่อให้เกิดปัญหานี้ได้เสมอ วิธีป้องกันคือการใช้วงจรตรวจสอบหรือควบคุมกระแสซึ่งจะหยุดการทำงานของมอสเฟตเมื่อมีกระแสไหลเกินจากที่ตั้งไว้ นอกจากนี้กระแสทรานเซียนต์สูง ๆ (Transient current) ยังเกิดขึ้นได้จากคุณสมบัติการรีเฟล็กซ์เวอรีค่านีเวอรีสของไดโอดที่ไม่ไวพอ วิธีแก้ไขก็คือเลือกไดโอดที่มีคุณสมบัติการรีเฟล็กซ์เวอรีค่านีเวอรีสที่เร็วขึ้น หรือลดความเร็วการสวิตซ์ของมอสเฟตลง

### 2.5.5 อย่าใช้มอสเฟตเกินอัตรากระแสต่อเนื่อง

อัตราทนกระแสต่อเนื่องสูงสุดโดยตรงของมอสเฟตคือ  $I_D$  ซึ่งการเดินสายภายในมอสเฟต จุดเชื่อมและ โลหะที่ใช้ทำส่วนของซอร์สของมอสเฟตแต่ละตัวจะถูกออกแบบให้รองรับกระแสในอัตรานี้อย่างต่อเนื่องเป็นกระแส RMS หมายความว่าในขณะที่ทำงานเป็นสวิตซ์ซึ่ง ถ้ากระแสสูงสุดคือ  $I_{PK}$  ค่าดีวีไอเกิดคือ  $D$  ค่า  $I_{PK}$  สูงสุดจะเท่ากับ  $I_D/D$  และจะต้องไม่เกินค่า  $I_{DZ(MAX)}$  ที่กำหนดไว้ในสเปกของมอสเฟต

### 2.5.6 ระวังการใช้ไดโอดแฝงที่อยู่ในมอสเฟต

ไดโอดที่แฝงอยู่ในตำแหน่งซึ่งสำคัญต่อการสวิตช์ซึ่งมากถ้าหากคาร์คิฟเวอร์ด้านรีเวอร์สของไดโอดตัวนี้เข้าจะทำให้เกิดปัญหามากแต่ไดโอดแฝงที่อยู่ภายในมอสเฟตนั้นมีความเร็วพอสมควรแม้จะช้ากว่าการสวิตช์ของมอสเฟตและช้ากว่าไดโอดชนิดแยกส่วนแบบที่เร็วมากก็ตาม แต่ก็ยังเร็วกว่าไดโอดชนิดที่ใช้งานทั่วไปโดยปกติแล้วความเร็วของวงจรโดยรวมจะถูกจำกัดโดยไดโอดตัวนี้

## 2.6 PIC คอนโทรลเลอร์ (PIC Controller)

ในการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ใค้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ในการควบคุมซึ่งคอนโทรลเลอร์ที่ใช้คือ PIC 16F877 ซึ่ง PIC คือไมโครคอนโทรลเลอร์ อีกตระกูลหนึ่ง ย่อมาจากคำว่า Peripheral Interface Controller ซึ่งเป็นที่ยอมรับว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูลนี้ก็คือ พยายามรวมเอาทุกอย่างเอาไว้ในตัวของมันไม่ว่าจะเป็น PROGRAM MEMORY, RAM, EEPROM, SERIAL, I2C, PWM, A/D ฯลฯ โดยไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์เสริมจากภายนอก ในตัวของ PIC จะมีฟังก์ชันที่ใช้ในการประมวลผล รวมทั้งหน่วยความจำ ซึ่งทำให้มันเหมือนกัน ซึ่ที่ด้วยความเร็วของ PIC ภาควิทยาศาสตร์ศึกษาปัจจุบันสามารถทำสัญญาณนาฬิกาได้ที่ 20 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งทำให้หนึ่งคำสั่งของ PIC ใช้เวลาเพียง  $0.25 \mu$  วินาที แต่อย่างไรก็ตามได้มีบริษัทอื่นได้ซื้อลิขสิทธิ์ PIC จาก ไมโครชิพและได้สร้าง ชิพที่มีความเร็วได้มากกว่าเดิมขึ้นไปอีก

### 2.6.1 สถาปัตยกรรมของ PIC

ตอนนี้มี 3 สาขาหลักๆ สมัยก่อนมีแค่สอง คือขึ้นต้นด้วย 16xxx, 17xxx และใหม่ล่าสุดคือ 18xxx ถ้าพูดถึง คุณสมบัติที่เหนือกว่าเรียงจากน้อยสุดไปมากที่สุดก็คือ 16 -> 17 -> 18 คำสั่งแอสเซมบลี ของ 17 และมี 18 จะมีมากกว่า 16 ทำให้เขียนโปรแกรมได้ง่ายกว่า ราคาที่จะสูงกว่าด้วย แต่ที่เป็นที่นิยมก็คือตระกูล 16xxx

PIC จะยึดถือการออกแบบที่รวบรวมทุกอย่างไว้ในตัวประมวลผล ตัวเดียวโดยไม่ต้องต่ออุปกรณ์ใด ๆ เพิ่มเติม ผลที่ตามมาก็คือแผ่นวงจรจะมีขนาดเล็ก และอุปกรณ์ที่ใช้จะไม่มาก บางงานอาจจะใช้แค่ PIC เพียงตัวเดียวโดยไม่ต้องใช้ ตัวประมวลผลอื่นมาเพิ่มเติมเลย นี่ก็คือคุณสมบัติพิเศษของ PIC ครับ ซึ่งปัจจุบันหลายบริษัทที่ผลิต ไมโครคอนโทรลเลอร์ ก็เริ่มจะหันมาเลียนแบบแนวทางนี้ แต่ทุกอย่างย่อมมีข้อเสีย เนื่องจากแนวคิดที่จะรวมทุกอย่างไว้ในตัวประมวลผลเดียวทำ

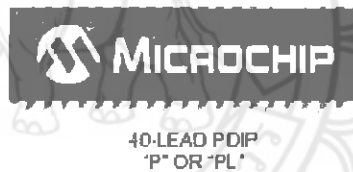
ให้ โปรแกรมเมม โมรีและ คาต้าเมม โมรี ไม่สามารถขยายโดยใช้กับหน่วยความจำภายนอกได้ PIC จึงเหมาะสำหรับงานเล็กๆ ไม่งานใหญ่ๆ ที่ต้องใช้การคำนวณและหน่วยความจำมาก

### 2.6.2 PIC ชนิดต่าง ๆ

MCU ในตระกูล PIC ถ้าแบ่งออกตามชนิดของ โปรแกรมเมม โมรี แบ่งได้เป็น 3 แบบ

1. OTP (one time programmable)
2. EPROM (erasable programable ROM)
3. EEPROM / Flash (electronically erasable programmable ROM)

ก. OTP เป็นตัวประมวลผลที่มีราคาถูกที่สุดในสามประเภท สาเหตุก็มาจากว่าตัวประมวลผล แบบ OTP จะสามารถทำการ โปรแกรมได้แค่ครั้งเดียวเท่านั้น หลังจากตัวประมวลผล ได้ถูกโปรแกรมไปแล้วจะ ไม่สามารถ โปรแกรมเข้าไปใหม่ได้อีก ดังนั้นตัวประมวลผลประเภทนี้จะ นิยมใช้หลังจาก ได้พัฒนาโปรแกรมจนกระทั่งจุดบกพร่องต่าง ๆ ในโปรแกรมไม่มีอีกแล้ว เพราะจะมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบตัวหน่วยความจำประเภทอื่น จะมีตัวอักษร C แสดงบนตัวประมวลผล เช่น 16C84,16C74



รูปที่ 2.25 OTP (One Time Programmable)

ข. EPROM เป็นตัวประมวลผลที่มีโปรแกรมเมม โมรีที่เมื่อเขียนโปรแกรมเข้าไปแล้ว สามารถโปรแกรมใหม่ด้วยการลบโปรแกรมเดิมโดยให้แสง UV (Ultra Violet) ส่องผ่านเข้าไปยังตัวประมวลผล ประมาณ 5-10 นาที ดังนั้นที่ด้านบนของตัวประมวลผล จะมีกรอบกระจกเพื่อให้แสง UV สามารถส่องผ่านเข้าไปในตัวประมวลผลได้แต่ก็มีจำนวนครั้งในการลบโปรแกรม เช่นกัน เมื่อลบโปรแกรมด้วยแสง UV มาก ๆ เข้าก็จะเกิดการด้าน คือโปรแกรมไม่เข้านั่นเองจะมีตัวอักษร JW หรือว่าคูเอว่าว่ามีกรอบกระจกอยู่บนตัวประมวลผลหรือไม่



รูปที่ 2.26 EPROM (Erasable Programable ROM)

ก. EEPROM / Flash เป็นตัวประมวลผลที่ออกมาไม่กี่ปี่นี้เอง ส่วนของ โปรแกรมเมม โมรี สามารถอ่านหรือเขียนด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าใช้เวลาในการลบข้อมูลไม่กี่วินาที และสามารถลบ และเขียนใหม่ได้หลายพันครั้ง ทำให้เป็นที่นิยมที่สุดใน 3 ประเภท มีตัวอักษร F เป็นตัวบอก เช่น 16F84, 16F877



40-LEAD PDIP  
'P' OR 'PL'

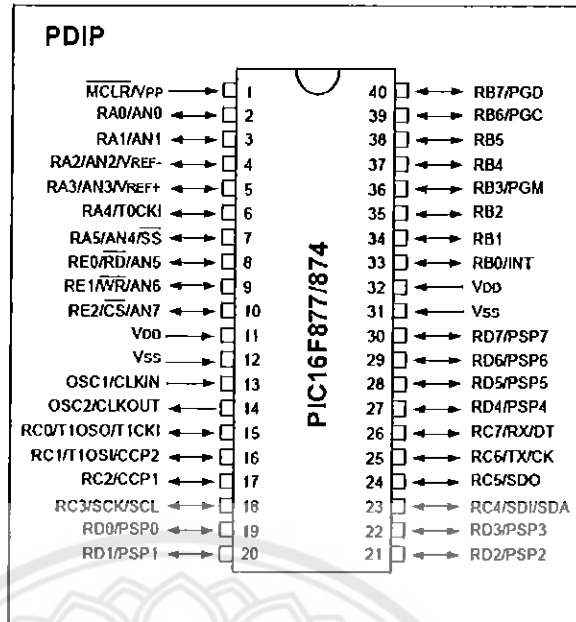
รูปที่ 2.27 EEPROM / Flash (Electrically Erasable Programmable ROM)

### 2.6.3 โครงสร้างและสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ของบริษัทไมโครชิพ (Microchip) โดยเฉพาะเบอร์ PIC16F877 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่กำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็น ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบแรกๆ ที่มีการประมวลผลแบบ RISC Processor (RISC : Reduced Instruction Set Computer ) โดยใช้คำสั่งการประมวลผลเพียง 33 - 35 คำสั่ง และใช้เวลาในการประมวลผลคำสั่งเพียง 1 หรือ 2 machine cycle ต่อคำสั่งเท่านั้น การประมวลผลคำสั่งเป็นลักษณะ Pipe Line คือขณะประมวลผลคำสั่งแรกจะทำการไหลคำสั่งถัดไปมาเตรียมรอไว้ ทำให้การทำงานที่รวดเร็วมาก นอกจากนั้นในตัวโครงสร้างยังประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ฟังก์ชัน โมดูลสำหรับใช้งาน พิเศษต่าง ๆ มากมาย ได้แก่ โมดูล Analog to Digital Converter , USART , Timer / Counter , SPI , Compare / Capture / PWM , I2C เป็นต้น โมดูลเหล่านี้มีส่วนเพิ่มขีดความสามารถให้นำไปใช้งานได้ อย่างหลากหลาย ประกอบกับมีเครื่องมือในการพัฒนาที่เพียบพร้อม คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 มีดังนี้คือ

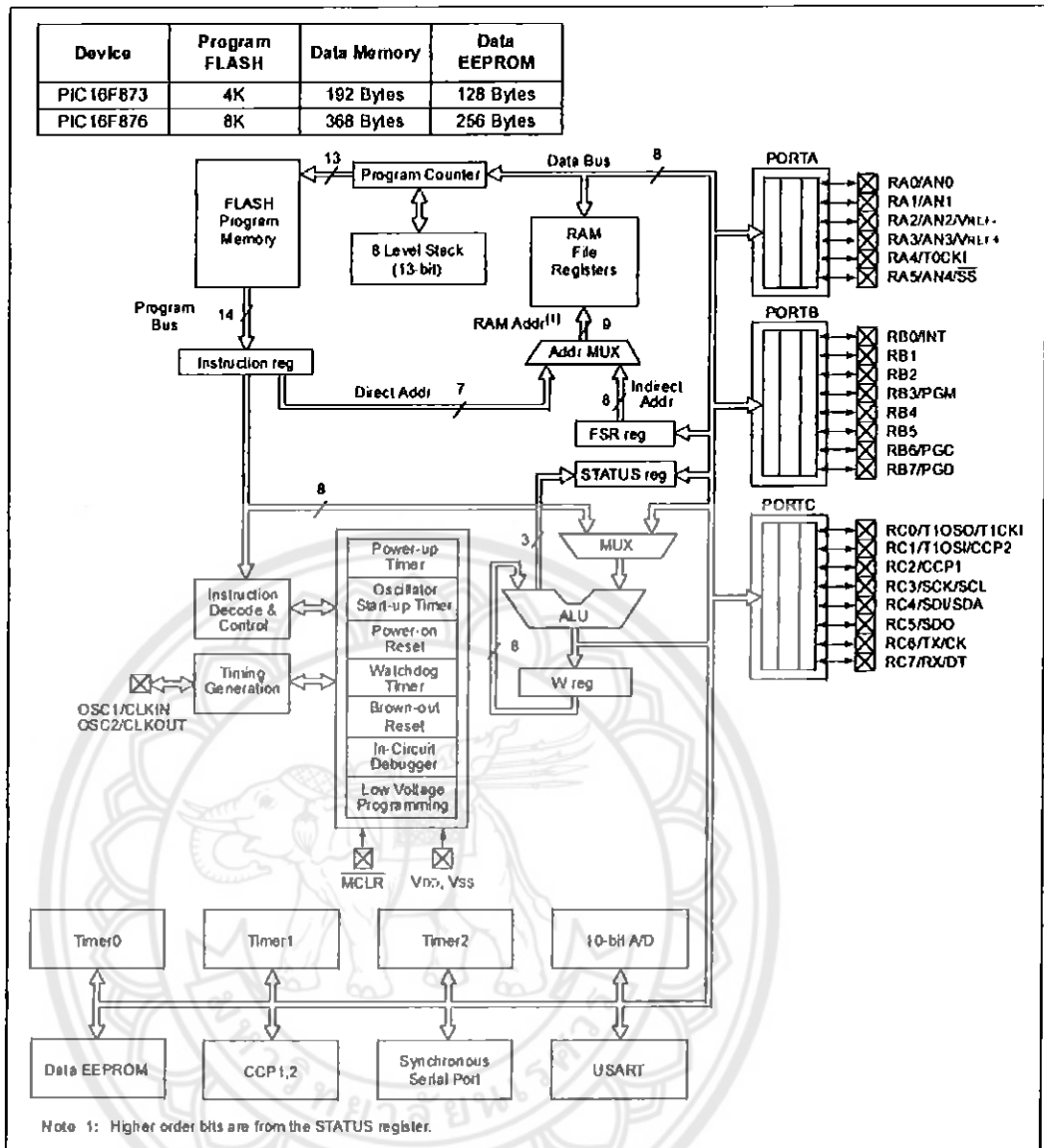
- มีคำสั่งในภาษาแอสเซมบลี 35 คำสั่ง
- ใช้ความถี่ออสซิลเลเตอร์ได้สูงสุด 20 MHz
- มีหน่วยความจำโปรแกรม Flash Memory ขนาด 8 K word ( 14 – bit words)
- มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ RAM 368 Bytes
- มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM 256 Byte
- มีการตอบสนองอินเทอร์รัพท์ทั้งหมด 14 แหล่ง
- สามารถเลือกระดับการป้องกันข้อมูล ( Code Protection ) ได้
- มีโหมดประหยัดพลังงาน (Sleep Mode)

- สามารถเลือกแหล่งสัญญาณนาฬิกาได้หลายโหมด XT RC และออสซิลเลเตอร์พลังงานต่ำ
- มีฟังก์ชันการรักษาเสถียรภาพการทำงาน ได้แก่ POR , PWRT, OST, BOR และ WDT
- การโปรแกรมตัวชิพแบบ ICSP ( ICSP : In-Circuit Serial Programming )
- สามารถทำงานที่ไฟเลี้ยงวงจรตั้งแต่ 2.0 V ถึง 5.5 V
- ขาพอร์ต I/O แต่ละขา สามารถรับและปล่อยกระแสได้สูงสุด 25 mA
- มีโมดูล Timer / Counter ใช้งานทั้งหมด 3 ตัว Timer 0 , Timer 1, และ Timer 2
- มีโมดูล CCP (CCP : Compare / Capture / PWM ) จำนวน 2 ชุด
- มีโมดูล Analog to Digital Converter ความละเอียด ขนาด 8 บิต และ 10 บิต จำนวน 8 ช่องภายในตัวชิพ
- มีโมดูลสื่อสารอนุกรมแบบ USART (USART : Universal Synchronous Asynchronous Receiver / Transmitter)
- มีพอร์ต I/O จำนวน 5 พอร์ต ได้แก่ พอร์ต A , B , C , D , และ E มีขา I/O รวมกัน 33 ขา ดังนี้คือ
  - PORTA มี 5 ขา RA0 ถึง RA5
  - PORTB มี 8 ขา RB0 ถึง RB7
  - PORTC มี 8 ขา RC0 ถึง RC7
  - PORTD มี 8 ขา RD0 ถึง RD7
  - PORTE มี 3 ขา RE0 ถึง RE2



รูปที่ 2.28 ตำแหน่งขา (PIN Diagram) ของตัวถัง

ขาสัญญาณของ PIC เบอร์ 16F877 นี้จะมีทั้งหมด 40 ขา ประกอบไปด้วยขาที่ทำหน้าที่ต่างๆ โดยจะมีขาสัญญาณ I/O ports ทั้งหมดจำนวน 33 ขา โดยสามารถนำไปใช้เป็นอินพุต/เอาต์พุตได้ทั้งหมดทุกขา ยกเว้นขา RA4 ซึ่งโครงสร้างภายในเป็นแบบ Open Drain ดังนั้นหากต้องการนำไปใช้เป็นขาสัญญาณเอาต์พุตจะต้องต่อตัวต้านทานพูลอัพ (Pull up) ไว้ด้วย ส่วนขาที่เหลือสามารถใช้งานได้ตามปกตินอกจากสัญญาณ I/O แล้วยังประกอบไปด้วยสัญญาณอื่นๆ อีกคือ ขาไฟเลี้ยง, กราวด์, ขารีเซ็ตและขาออสซิลเลเตอร์ ซึ่งสามารถสรุปหน้าที่การทำงานของขาสัญญาณในแต่ละขาได้ดังตารางต่อไปนี้



รูปที่ 2.29 สถาปัตยกรรมที่เป็นโครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877



ตารางที่ 2.1 รายละเอียดและตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์

PIC16F874 / PIC16F877

Pin Name	DIP Pin#	PLCC Pin#	QFP Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
OSC1/CLKIN	13	14	30	I	ST/CMOS <sup>(4)</sup>	Oscillator crystal input/external clock source input.
OSC2/CLKOUT	14	15	31	O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in crystal oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKOUT which has 1/4 the frequency of OSC1, and denotes the instruction cycle rate.
MCLR/VPP	1	2	18	I/P	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active low RESET to the device.
RA0/AN0	2	3	19	I/O	TTL	PORTA is a bi-directional I/O port. RA0 can also be analog input0. RA1 can also be analog input1. RA2 can also be analog input2 or negative analog reference voltage. RA3 can also be analog input3 or positive analog reference voltage. RA4 can also be the clock input to the Timer0 timer/counter. Output is open drain type. RA5 can also be analog input4 or the slave select for the synchronous serial port.
RA1/AN1	3	4	20	I/O	TTL	
RA2/AN2/VREF-	4	5	21	I/O	TTL	
RA3/AN3/VREF+	5	6	22	I/O	TTL	
RA4/T0CKI	6	7	23	I/O	ST	
RA5/SS/AN4	7	8	24	I/O	TTL	
RB0/INT	33	36	8	I/O	TTL/ST <sup>(1)</sup>	PORTB is a bi-directional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-up on all inputs. RB0 can also be the external interrupt pin. RB3 can also be the low voltage programming input. Interrupt-on-change pin. Interrupt-on-change pin. Interrupt-on-change pin or In-Circuit Debugger pin. Serial programming clock. Interrupt-on-change pin or In-Circuit Debugger pin. Serial programming data.
RB1	34	37	9	I/O	TTL	
RB2	35	38	10	I/O	TTL	
RB3/PGM	36	39	11	I/O	TTL	
RB4	37	41	14	I/O	TTL	
RB5	38	42	15	I/O	TTL	
RB6/PGC	39	43	16	I/O	TTL/ST <sup>(2)</sup>	
RB7/PGD	40	44	17	I/O	TTL/ST <sup>(2)</sup>	

Legend: I = input    O = output    I/O = input/output    P = power  
— = Not used    TTL = TTL input    ST = Schmitt Trigger input

- Note 1: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as an external interrupt.  
2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode.  
3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as general purpose I/O and a TTL input when used in the Parallel Slave Port mode (for interfacing to a microprocessor bus).  
4: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC oscillator mode and a CMOS input otherwise.

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) รายละเอียดและตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์

PIC16F874 / PIC16F877

Pin Name	DIP Pin#	PLCC Pin#	QFP Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description	
RC0/T1OSO/T1CKI	15	16	32	I/O	ST	PORTC is a bi-directional I/O port. RC0 can also be the Timer1 oscillator output or a Timer1 clock input.	
RC1/T1OSI/CCP2	16	18	35	I/O	ST	RC1 can also be the Timer1 oscillator input or Capture2 input/Compare2 output/PWM2 output.	
RC2/CCP1	17	19	36	I/O	ST	RC2 can also be the Capture1 input/Compare1 output/PWM1 output.	
RC3/SCK/SCL	18	20	37	I/O	ST	RC3 can also be the synchronous serial clock input/output for both SPI and I <sup>2</sup> C modes.	
RC4/SDI/SDA	23	25	42	I/O	ST	RC4 can also be the SPI Data In (SPI mode) or data I/O (I <sup>2</sup> C mode).	
RC5/SDO	24	26	43	I/O	ST	RC5 can also be the SPI Data Out (SPI mode).	
RC6/TX/CK	25	27	44	I/O	ST	RC6 can also be the USART Asynchronous Transmit or Synchronous Clock.	
RC7/RX/DT	26	29	1	I/O	ST	RC7 can also be the USART Asynchronous Receive or Synchronous Data.	
RD0/PSP0	19	21	38	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	PORTD is a bi-directional I/O port or parallel slave port when interfacing to a microprocessor bus	
RD1/PSP1	20	22	39	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>		
RD2/PSP2	21	23	40	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>		
RD3/PSP3	22	24	41	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>		
RD4/PSP4	27	30	2	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>		
RD5/PSP5	28	31	3	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>		
RD6/PSP6	29	32	4	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>		
RD7/PSP7	30	33	5	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>		
RE0/RD/AN5	8	9	25	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>	PORTE is a bi-directional I/O port. RE0 can also be read control for the parallel slave port, or analog input5.	
RE1/WR/AN6	9	10	26	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>		RE1 can also be write control for the parallel slave port, or analog input6.
RE2/CS/AN7	10	11	27	I/O	ST/TTL <sup>(3)</sup>		RE2 can also be select control for the parallel slave port, or analog input7.
VSS	12,31	13,34	6,29	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.	
VDD	11,32	12,35	7,28	P	—	Positive supply for logic and I/O pins	
NC	—	1,17,28,40	12,13,33,34	—	—	These pins are not internally connected. These pins should be left unconnected.	

Legend: I = input    O = output    I/O = input/output    P = power  
 — = Not used    TTL = TTL input    ST = Schmitt Trigger input

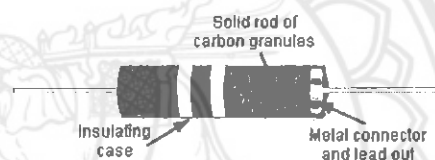
- Note 1: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as an external interrupt.  
 2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode  
 3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as general purpose I/O and a TTL input when used in the Parallel Slave Port mode (for interfacing to a microprocessor bus)  
 4: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC oscillator mode and a CMOS input otherwise.

## 2.7 ตัวต้านทาน (Resistor)

ตัวต้านทาน (Resistor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า เพื่อให้กระแสและแรงดันภายในวงจร ได้ขนาดตามที่ต้องการ เนื่องจากอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แต่ละตัวถูกออกแบบให้ใช้แรงดันและกระแสที่แตกต่างกัน ดังนั้นตัวต้านทานจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทและใช้กันมากในงานด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วิทยุ, โทรทัศน์, คอมพิวเตอร์, เครื่องขยายเสียง ตลอดจนเครื่องมือเครื่องใช้ทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ เป็นต้น

### 2.7.1 ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่

ก. ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม (Carbon Composition Resistor) ตัวต้านทานชนิดนี้จะนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งจะมีราคาถูก โครงสร้างภายในทำจากวัสดุซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทาน โดยที่ปลายทั้งสองข้างจะต่อลวดตัวนำออกมาและบริเวณผิวด้านนอกจะฉาบด้วยฉนวน มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก



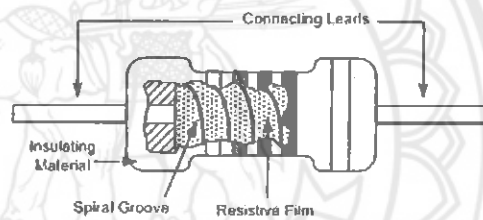
รูปที่ 2.30 ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม (Carbon Composition Resistor)

การที่เรียกตัวต้านทานชนิดนี้ว่าตัวต้านทานแบบคาร์บอนผสม เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ทำตัวต้านทานนี้เกิดจากการผสมกันระหว่างผงคาร์บอนและผงของฉนวน ซึ่งการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดนี้จะให้ค่าความต้านทานที่ได้เปลี่ยนแปลงไป ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่จำนวน 4 ตัว ซึ่งมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 2 โอห์ม จนถึง 10 เมกะโอห์ม

ขนาดของตัวต้านทานจะแสดงถึงกำลังงาน ซึ่งอยู่ในรูปของความร้อนที่สามารถแพร่กระจายออกมาได้ ความต้านทานทำหน้าที่จำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นสถานะของการต้านทานหรือขีดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนขึ้น โดยปริมาณความร้อนที่แพร่กระจายออกมาเมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยเวลาจะมีหน่วยเป็น วัตต์ (Watts) และตัวต้านทานแต่ละตัวจะมีค่าอัตราทนกำลัง (Wattage Rating) เฉพาะที่แตกต่างกันออกไป โดยตัวต้านทานขนาดใหญ่จะสามารถที่จะแพร่กระจายความร้อนได้ดีกว่า เช่น ตัวต้านทานขนาดใหญ่มีอัตราการแพร่กระจายความร้อน 2 วัตต์ ในขณะที่ความต้านทานตัวเล็กสามารถกระจายความร้อนในอัตราแค่ 1/8 วัตต์

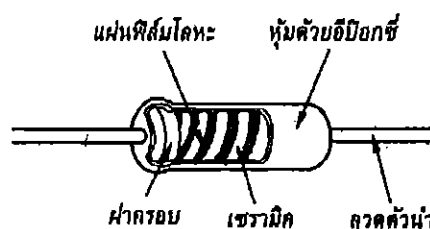
ค่าความคลื่อน เป็นปัจจัยที่จะต้องพิจารณาอีกประการหนึ่งที่จะต้องพิจารณา ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้เป็นปริมาณความผิดพลาดของค่าความต้านทานที่แตกต่างกันออกไปจากค่าที่กำหนดไว้ เช่น ค่าความต้านทาน 1,000 โอห์ม มีค่าความคลาดเคลื่อน 10 % ดังนั้นค่าความต้านทานที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 900 โอห์ม และ 1,100 โอห์ม

ข. ตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอน (CarBon Film Resistor) ตัวต้านทานชนิดนี้ถูกสร้างโดยการเคลือบแผ่นฟิล์มคาร์บอนที่มีคุณสมบัติของค่าความต้านทานลงบนแกนเซรามิก ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวน หลังจากนั้นให้ทำการตัดแต่งฟิล์มคาร์บอนที่ได้ให้เป็นรูปร่างวงแหวนรอบแกนเซรามิก โดยถ้ามีอัตราส่วนของเนื้อคาร์บอนมีปริมาณมากกว่าฉนวนจะทำให้ค่าความต้านทานที่ได้มีค่าต่ำ แต่ถ้าฉนวนมีอัตราส่วนมากกว่าเนื้อของคาร์บอน ความต้านทานที่ได้ก็จะมีค่าสูง ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอนจะมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงได้ โดยไม่ทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้ตัวต้านทานชนิดนี้ก็มีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม



รูปที่ 2.31 ตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอน (CarBon Film Resistor)

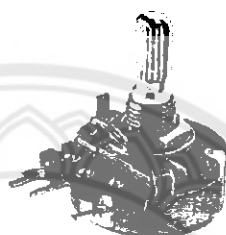
ค. ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ (Metal Film Resistor) ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะมีรูปร่างลักษณะ การสร้างทำได้โดยการพ่นฟิล์มโลหะให้เป็นแผ่นบางๆ ลงบนเซรามิกรูปทรงกระบอก จากนั้นจึงตัดแผ่นฟิล์มนี้โดยให้มีส่วนที่เป็นแผ่นฟิล์มสั้นอยู่กับฉนวนซึ่งเป็นเซรามิก ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมาก และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายนอกได้ดี นอกจากนี้ยังเกิดสัญญาณรบกวนได้น้อยเมื่อเทียบกับตัวต้านทานคาร์บอนชนิดอื่นๆ



รูปที่ 2.32 ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ (Metal Film Resistor)

### 2.7.2 ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้

ก. โทเทนชิโอมิเตอร์ (3 ขั้ว : A,B และ C) รูปแสดงลักษณะภายนอกของโทเทนชิโอมิเตอร์แบบต่างๆ ซึ่งบางครั้งนิยมเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า พอต (Pot) ดังแสดงในรูป ข ความแตกต่างระหว่างโทเทนชิโอมิเตอร์และรีโอสตัส คือจำนวนขั้วต่อใช้งาน ซึ่งขั้วต่อของโทเทนชิโอมิเตอร์จะมี 3 ขั้ว โดยการนำไปใช้งานสามารถต่อค่าความต้านทานได้ 3 แบบ ได้แก่ ระหว่าง A และ B (X) ระหว่าง B และ C (Y) และระหว่าง C และ A (Z) ส่วนที่เพิ่มเข้ามาที่ทำให้โทเทนชิโอมิเตอร์แตกต่างไปจากรีโอสตัส คือ ขั้วที่ 3 ที่ต่อเข้ากับปลายอีกด้านหนึ่งของแถบค่าความต้านทาน



รูปที่ 2.33 ตัวต้านทานปรับค่าได้

### บทที่ 3

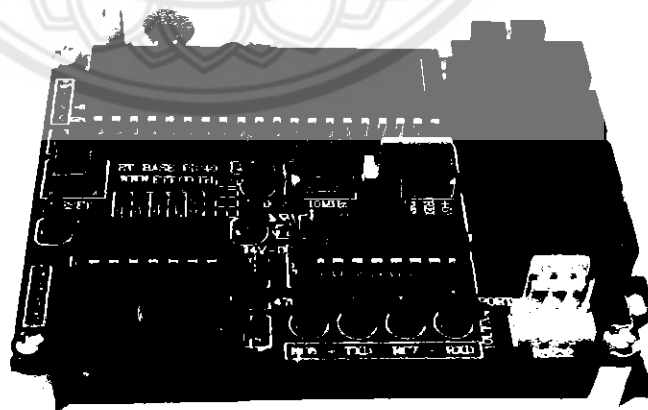
## ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

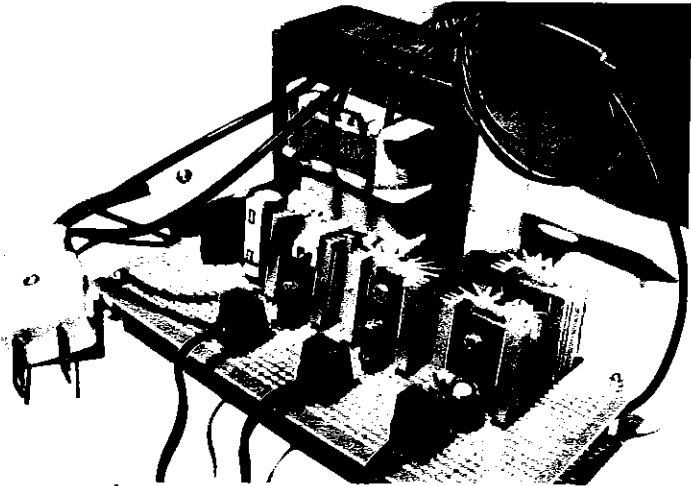
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงาน รวมทั้งอุปกรณ์อื่นๆ ดังนี้



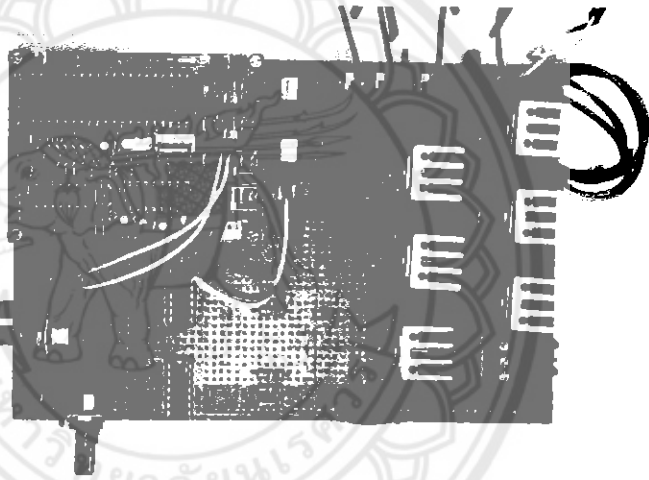
รูปที่ 3.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ขนาด 24 V 1.6 A



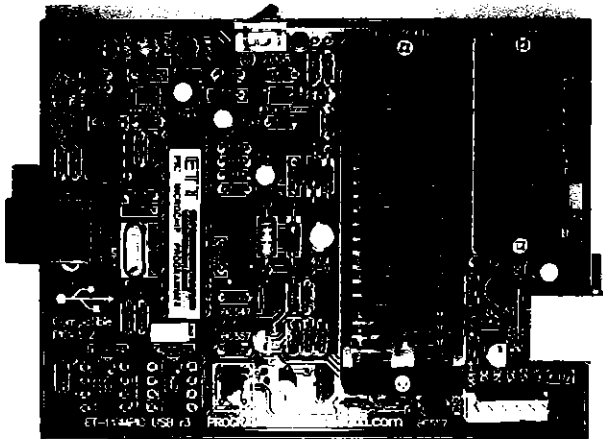
รูปที่ 3.2 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.3 แหล่งจ่ายแรงดัน 5, 12 และ 24 โวลต์



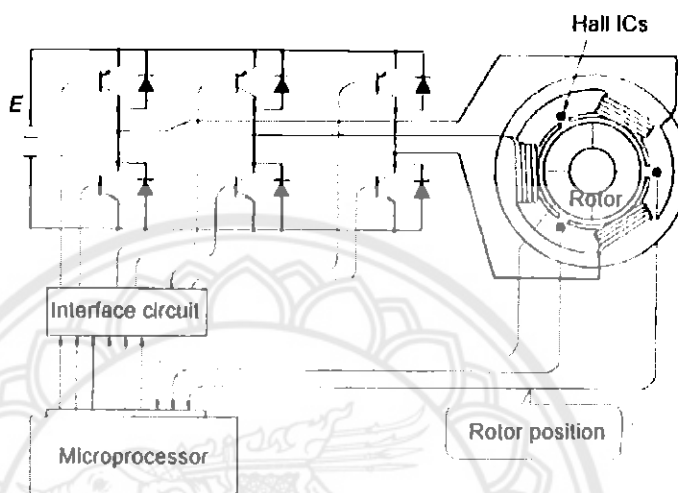
รูปที่ 3.4 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 3.5 Pickit2

### 3.2 ระบบการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์

ระบบการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้นประกอบด้วยส่วนต่างๆ ทั้งส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์นั้นสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.6



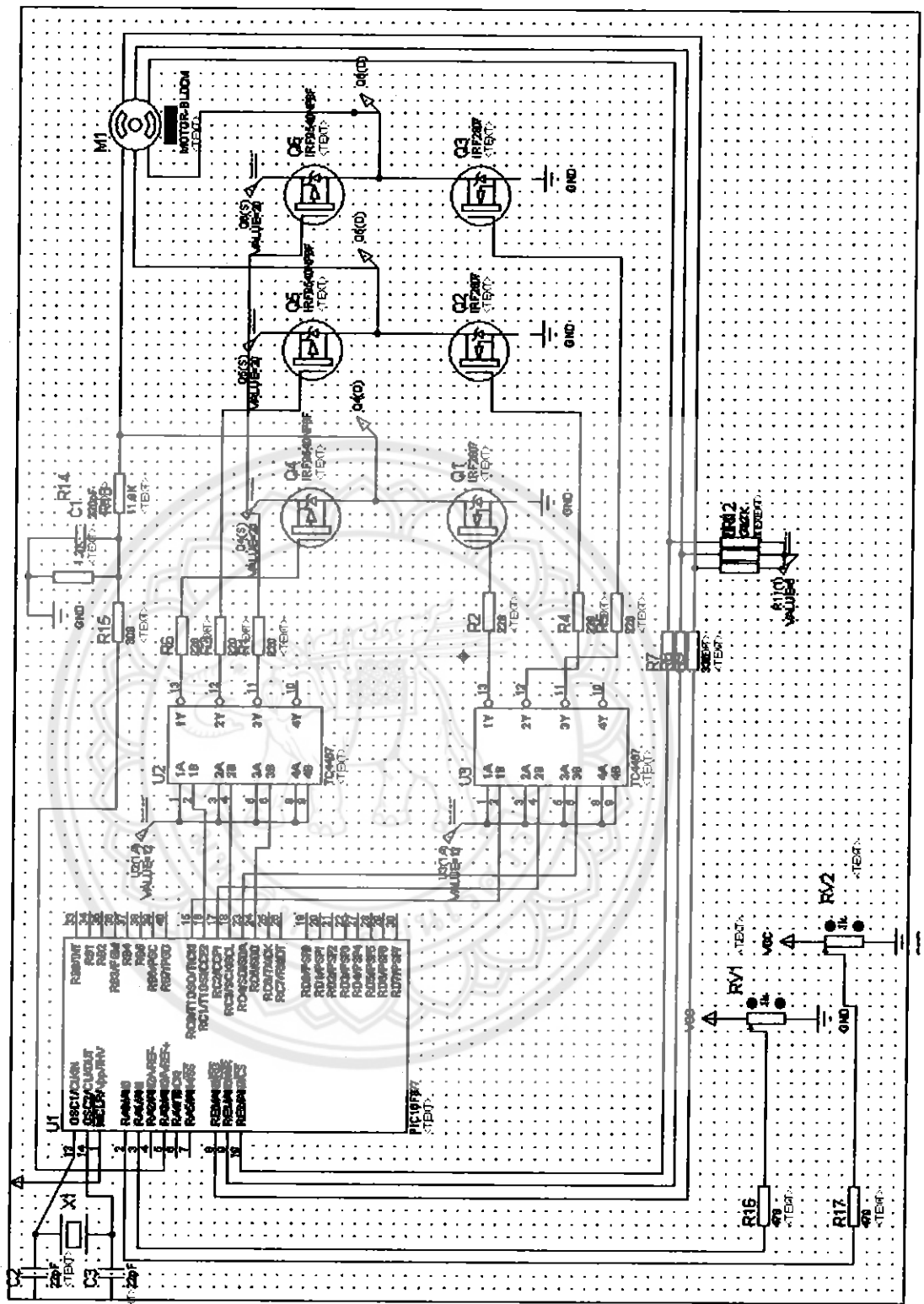
รูปที่ 3.6 โค้ดแกรมวงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

จากโค้ดแกรมวงจรควบคุมมอเตอร์ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณเอาต์พุตออกมาในรูปแบบของสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลต จะทำหน้าที่สั่งการควบคุมการเปิด-ปิด มอสเฟตแต่ละคู่ ในวงจรอินเวอร์เตอร์โดยสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลตนี้จะถูกส่งผ่านชุดวงจรเชื่อมต่อ แล้วส่งสัญญาณเอาต์พุตของชุดวงจรเชื่อมต่อเพื่อควบคุมการเปิด-ปิด มอสเฟตแต่ละคู่ในวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อไป

วงจรอินเวอร์เตอร์ จะทำหน้าที่สวิตซ์ซึ่งมอสเฟตเพื่อแปลงไฟกระแสตรงเป็นรูปคลื่นสวิตซ์ซึ่ง 3 เฟส โดยแรงดันที่จ่ายให้กลับอินเวอร์เตอร์เท่ากับ  $24 V_{DC}$

โดยปกติแล้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะมีฮอลล์เซ็นเซอร์ เป็นตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์แล้วส่งสัญญาณกลับมายังไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่ในปัจจุบันนี้มีวิธีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยไม่ใช้ฮอลล์เซ็นเซอร์การควบคุมแบบนี้เรียกว่า การควบคุมโดยไม่ใช้เซ็นเซอร์ (Sensorless DC Motor) แบบ 3 เฟส ที่มีโรเตอร์เป็นแบบแม่เหล็กถาวร โดยปกติจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเพียงทีละ 2 เฟสเท่านั้น ส่วนในเฟสที่ไม่เกิดการเหนี่ยวนำจะเกิด Back-EMF ในเฟสที่ไม่เกิดการเหนี่ยวนำจะสามารถบอกตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กโรเตอร์ที่อยู่ในขณะที่นั้นได้



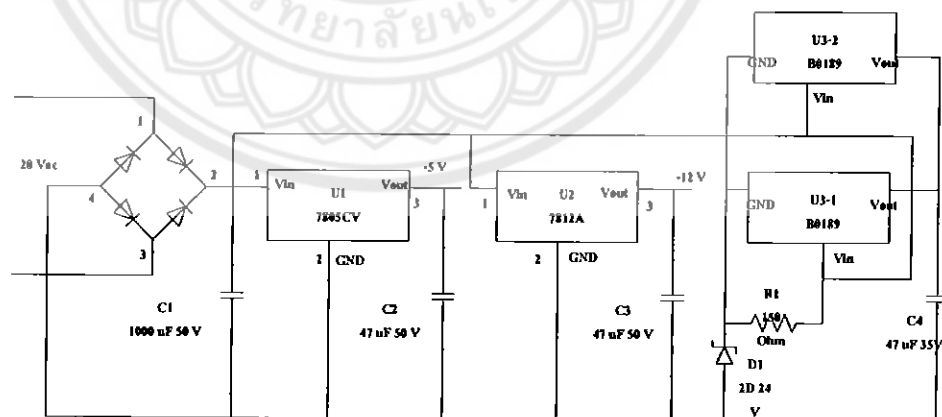


รูปที่ 3.7 วงจรขับมอเตอร์ให้ทำงาน

### 3.2.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงให้กับวงจร

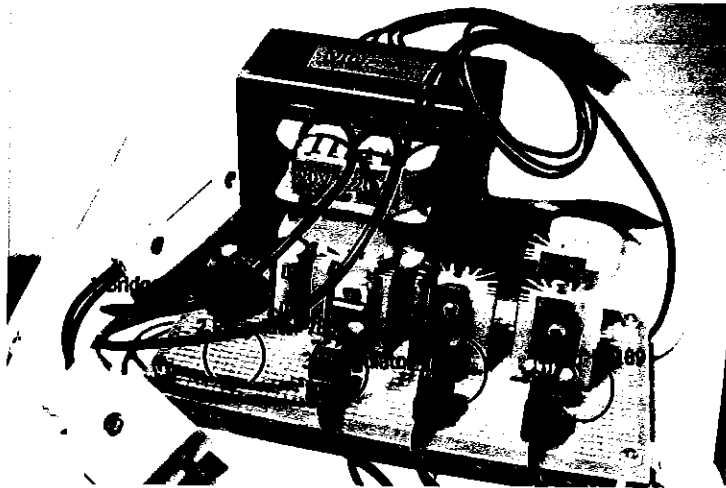
ใช้วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์แปลงไฟจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแหล่งจ่ายไฟมีดังนี้

1. หม้อแปลงขนาด 20 โวลต์ 3 แอมป์ 1 ลูก เพื่อแปลงไฟจาก 220 โวลต์ เป็น 20 โวลต์
2. Full Bridge rectifier 1 ตัวแปลงไฟกระแสสลับเป็นไฟกระแสตรง
3. ตัวเก็บประจุขนาด 1,000  $\mu\text{F}$  1 ตัว
4. ตัวเก็บประจุขนาด 0.47  $\mu\text{F}$  50 โวลต์ 2 ตัว
5. ตัวเก็บประจุขนาด 0.47  $\mu\text{F}$  35 โวลต์ 1 ตัว
6. ตัวต้านทานขนาด 150 โอห์ม 1 ตัว
7. ไดโอด 2D ขนาด 24 โวลต์ 1 ตัว
8. ไอซีเรกูเลเตอร์เบอร์ 7805CV เพื่อรักษาระดับแรงดันที่ 5 โวลต์
9. ไอซีเรกูเลเตอร์เบอร์ 7812A เพื่อรักษาระดับแรงดันที่ 12 โวลต์
10. ไอจีพีทีเบอร์ B0189 2 ตัว เพื่อรักษาระดับแรงดันที่ 24 โวลต์
11. แผ่นปรินต์ต่อเนกประสงค์
12. ซิงค์ระบายความร้อนเพื่อระบายความร้อนให้กับ ไอซีเรกูเลเตอร์และไอจีพีที



รูปที่ 3.8 วงจรเรียงกระแส

จากรูปวงจรเรียงกระแสที่ 3.8 จะได้แรงดันที่ต้องการคือ 5 V, 12 V และ 24 V เพื่อนำไปจ่ายให้กับชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 3.9 ชุดแหล่งจ่ายแรงดัน 5, 12 และ 24 โวลต์

หมายเลข 1 หมายถึง บริดจ์เรียงกระแส

หมายเลข 2 หมายถึง เรกกูเรเตอร์ เบอร์ 7805CV ได้ไฟ  $5 V_{dc}$  1 A

หมายเลข 3 หมายถึง เรกกูเรเตอร์ เบอร์ 7812A ได้ไฟ  $12 V_{dc}$  1 A

หมายเลข 4 หมายถึง IGBT เบอร์ B0189 ได้ไฟ  $24 V_{dc}$  2 A

### 3.3 การโปรแกรมการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

#### 3.3.1 โค้ดโปรแกรมเพื่อควบคุมมอเตอร์

```

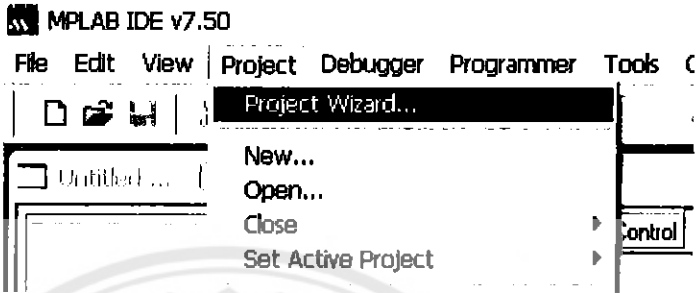
list P = PIC16F877
include "p16f877.inc"
__CONFIG _CP_OFF & _WRT_ENABLE_OFF & _HS_OSC & _WDT_OFF
& _PWRTE_ON & _BODEN_ON

; Acceleration/Deceleration Time = RampRate * 256 * 256 * Timer 0 prescale / Fosc
#define AccelDelay D'255' ; determines full range
acceleration time
#define DecelDelay D'200' ; determines full range
deceleration time
#define ManThresh 0x3f ; Manual threshold is the
PWM potentiometer
; reading above which RPM is adjusted automatically
#define AutoThresh 0x100-ManThresh
OffMask equ B'11010101' ; PWM off kills the high drives
Phase1 equ B'00110001' ; phase 1 C high, A low
Phase2 equ B'00110100' ; phase 2 C high, B low
Phase3 equ B'00000111' ; phase 3 A high, B low
Phase4 equ B'00010011' ; phase 4 A high, C low
Phase5 equ B'00011100' ; phase 5 B high, C low
Phase6 equ B'00001101' ; phase 6 B high, A low

```

### 3.3.2 การเขียนโปรแกรมบน MPLAB และการสร้างไฟล์ .HEX

1. ไปที่ Project แล้วเลือกที่ Project Wizard ดังรูปที่ 3.10

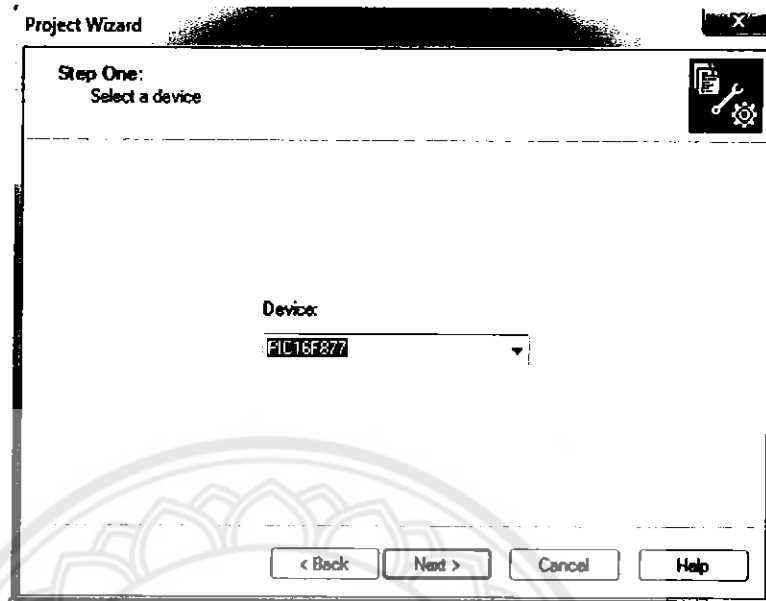


รูปที่ 3.10 เริ่มสร้างโปรเจกต์



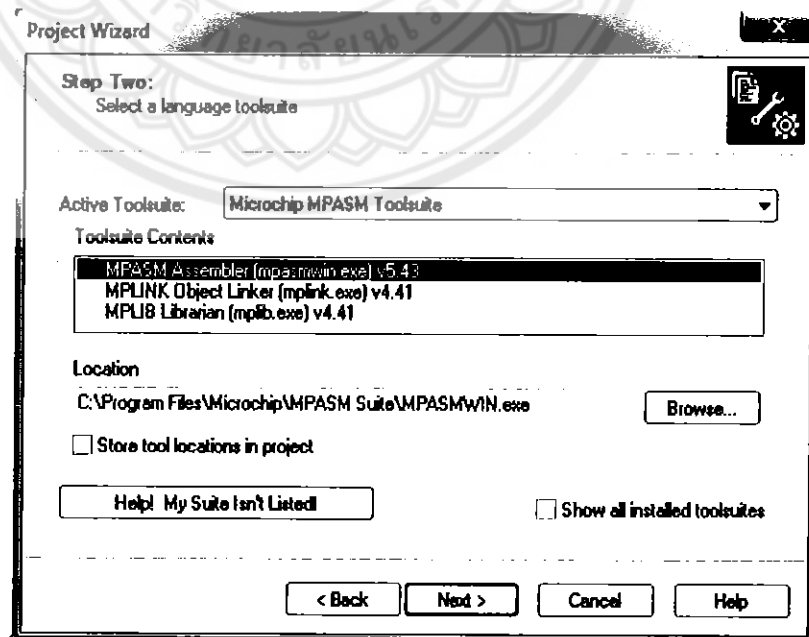
รูปที่ 3.11 สร้างโปรเจกต์

2. ทำการเลือก เบอร์ PIC ที่จะใช้งานจากนั้นคลิก Next



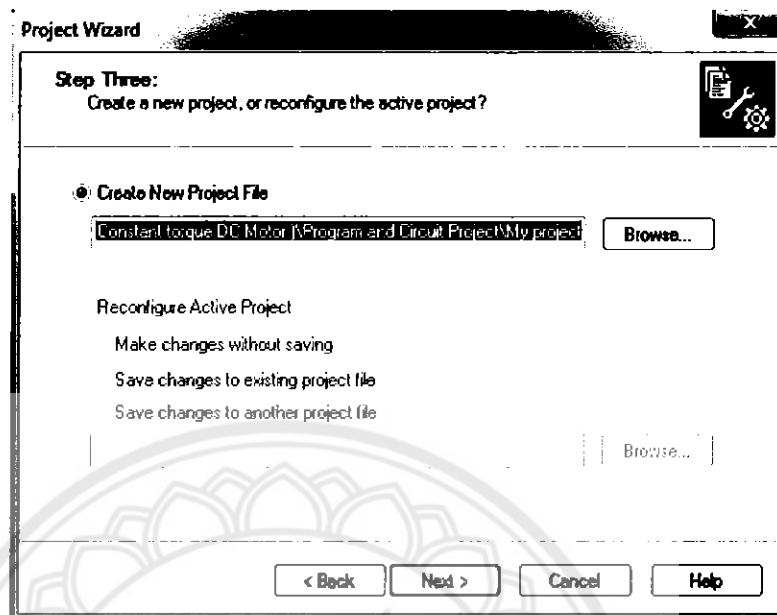
รูปที่ 3.12 เลือกเบอร์ PIC

3. กำหนด ภาษาที่ช่อง Active Toolsuite แล้วเลือกที่ MPASM Assembler (mpasmwin.exe) v5.43



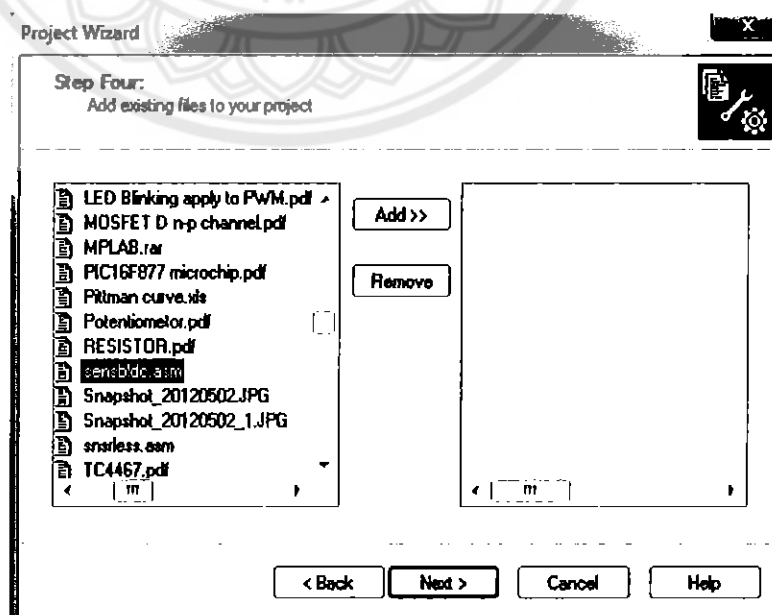
รูปที่ 3.13 กำหนดภาษาที่ใช้เขียน โปรแกรม

#### 4. ตั้งชื่องาน โปรเจ็ค และเลือกที่อยู่โปรเจ็ค

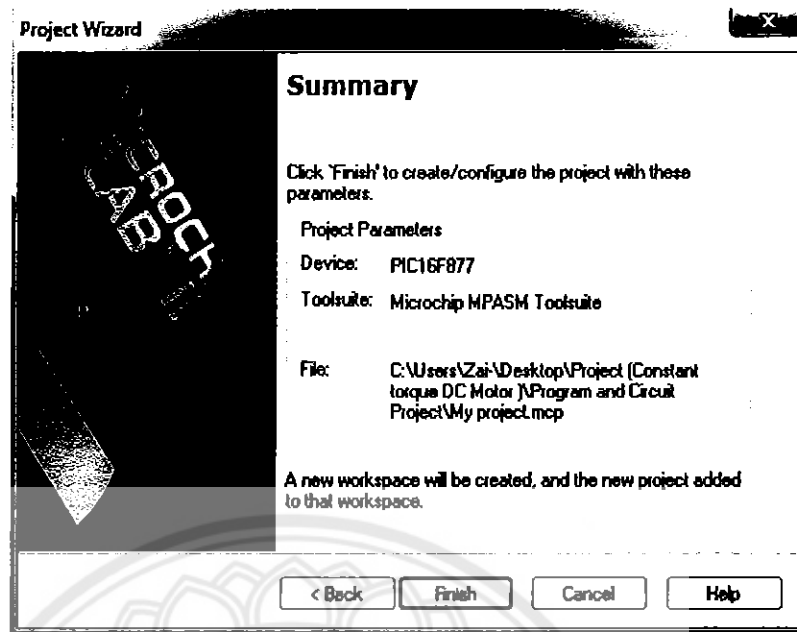


รูปที่ 3.14 ตั้งชื่อโปรเจ็คและเลือกที่อยู่โปรเจ็ค

#### 5. เลือกไฟล์ 16F877\_g.lkr จากโฟลเดอร์ C:/Programfile/Microchip/MPASM Suite/LKR เข้าโปรเจ็ค

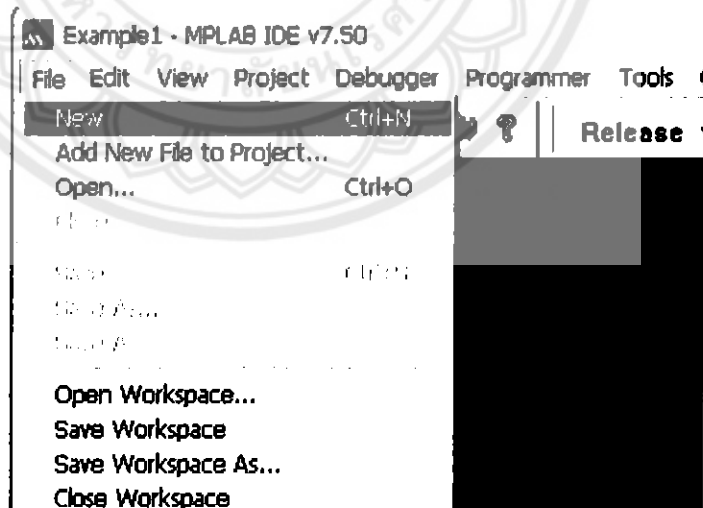


รูปที่ 3.15 เลือกไฟล์เข้าโปรเจ็ค



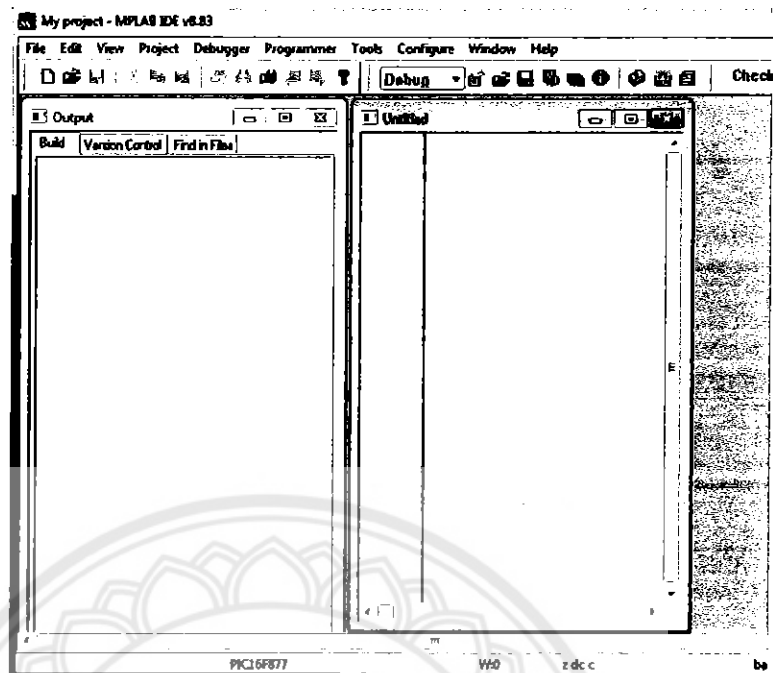
รูปที่ 3.16 เสร็จสิ้นการสร้างโปรเจ็ค

6. เริ่มต้นเขียนโปรแกรมสร้างเอกสาร และเขียนโปรแกรม ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 ตามลำดับ



รูปที่ 3.17 สร้างเอกสาร

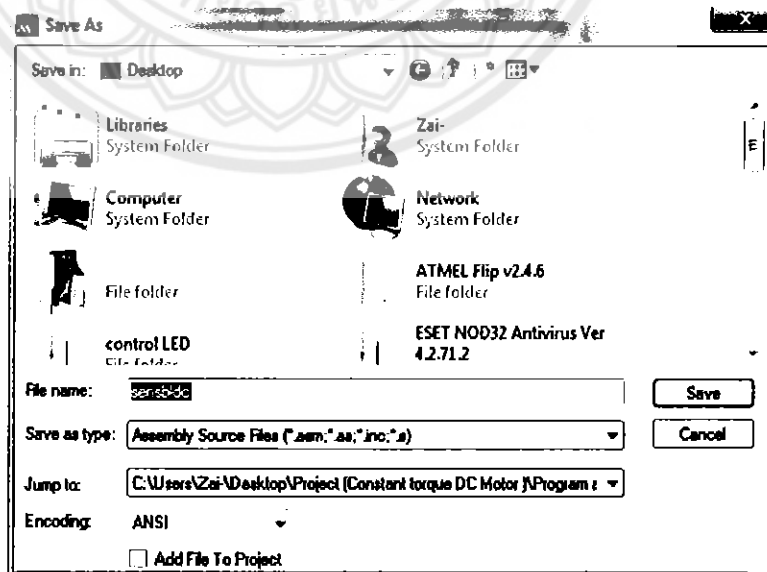




รูปที่ 3.18 เขียนโปรแกรม

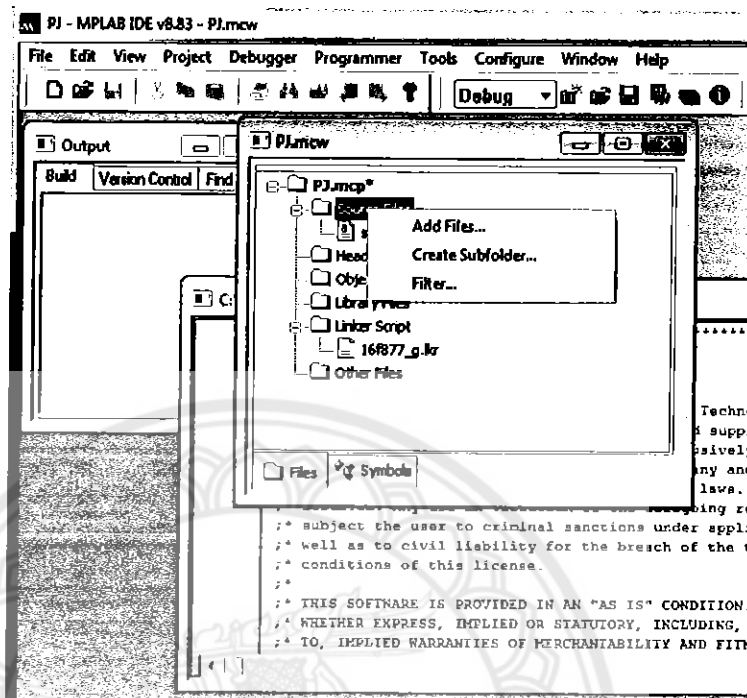
7. เขียนโค้ด โปรแกรมลงไป ในหน้าต่างของ โปรแกรมตามรูปที่ 3.18

8. ทำการเซฟเลือก File แล้วเลือก save หรือ Ctrl+S แล้วเลือกสถานที่ที่จะทำการเซฟไฟล์

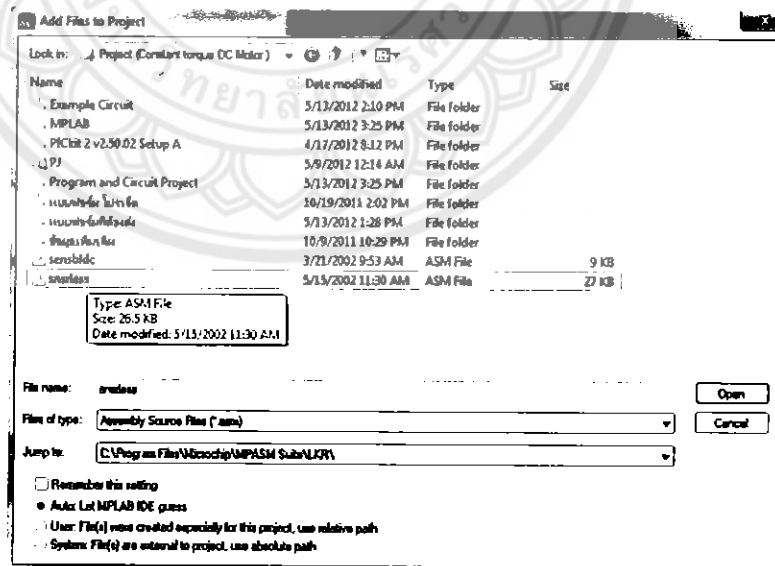


รูปที่ 3.19 เซฟข้อมูล

9. ทำการเพิ่มไฟล์ ดังรูปที่ 3.18 แล้วเลือกไฟล์จากที่เซฟ ดังรูปที่ 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ

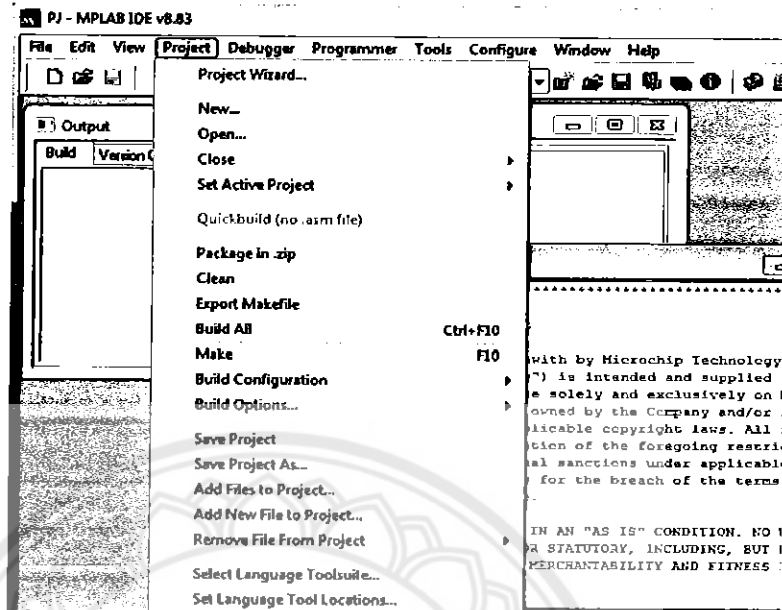


รูปที่ 3.20 เพิ่มไฟล์



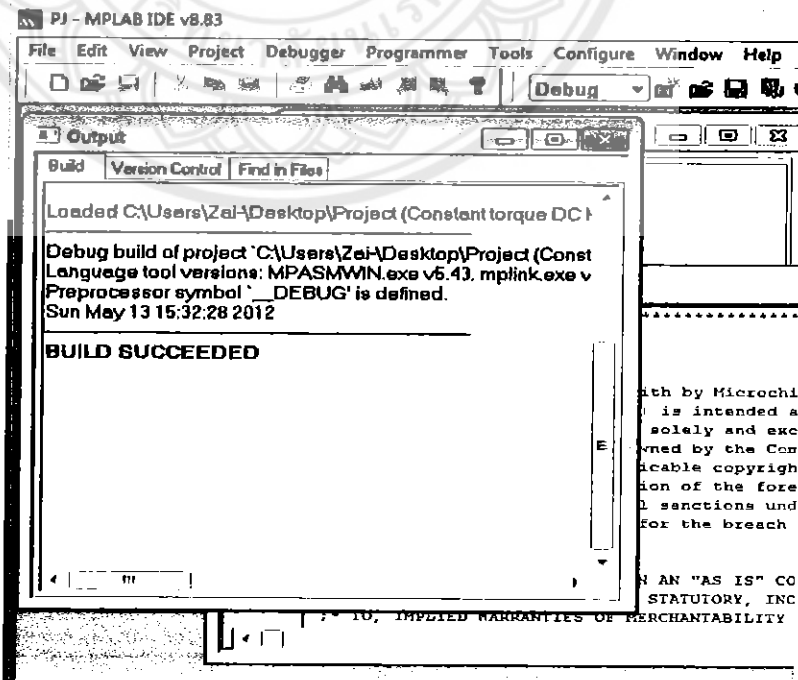
รูปที่ 3.21 เลือกไฟล์ที่ต้องการเพิ่ม

10. เมื่อเลือกไฟล์ที่เพิ่มมาแล้ว ทำการคอมไพล์ ไปที่ Project เลือกที่ Make หรือกด F10



รูปที่ 3.22 คอมไพล์

11. หากโปรแกรมไม่ผิดพลาด เมื่อคอมไพล์แล้วจะมีข้อความ BUILD SUCCEEDED แสดงว่าใช้งานได้ สามารถนำไฟล์ที่มีนามสกุล .HEX ไปใช้ได้



รูปที่ 3.23 สร้างไฟล์ .HEX

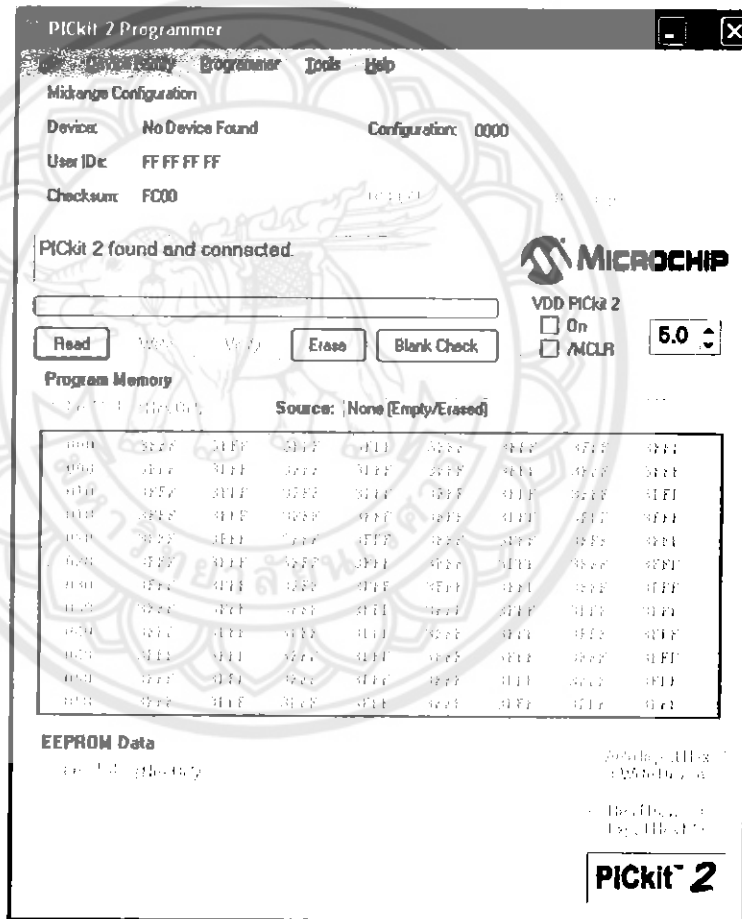
### 3.3.3 การโปรแกรมไฟล์ .HEX ลงไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 1. ให้ดับเบิ้ลคลิกที่ ไอคอน



รูปที่ 3.24 ไอคอน Pickit2 v2.40

จะปรากฏหน้าต่างใหม่ขึ้นมา

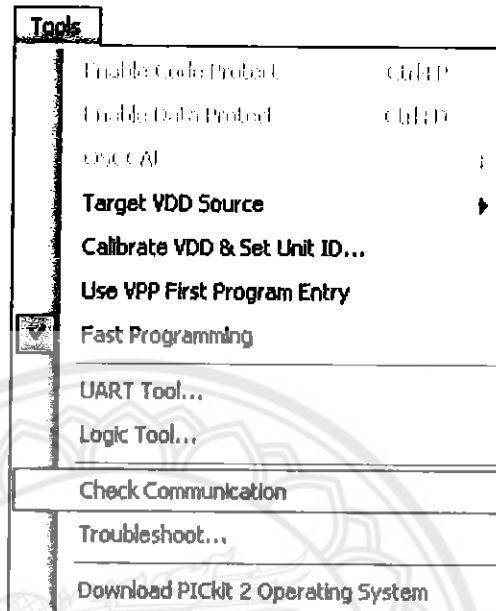


รูปที่ 3.25 หน้าต่างแรกของโปรแกรม Pickit 2

ปกติแล้วโปรแกรม PICKit2 จะทำการตรวจสอบอุปกรณ์ที่ต่อไว้โดยอัตโนมัติ หากอุปกรณ์นั้นต่อกับภาคจ่ายไฟไว้เรียบร้อยแล้ว

## 2. การตรวจสอบจาก โปรแกรม

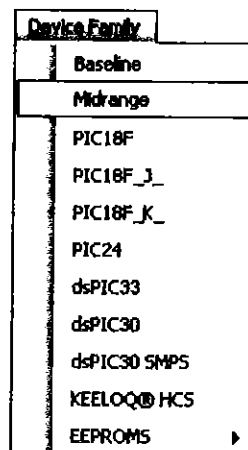
จากเมนู Tools ให้เลือก Check Communication



รูปที่ 3.26 หน้าต่าง เมนู Tools Check Communication

โปรแกรม PICKit2 จะทำการตรวจสอบอุปกรณ์ที่ต่อไว้โดยอัตโนมัติหรือต้องการระบุ device

- ตัวอย่างเช่นถ้าต้องการ โปรแกรม PIC16F877
- จากเมนู Device Family ให้เลือก Device Midrange



รูปที่ 3.27 เมนู Device Midrange

3.นำ HEX ไฟล์ (ไฟล์ที่ผ่านการคอมไพล์แล้ว) จากเมนู File เลือก Import Hex แล้วเลือก Hex ไฟล์ที่ต้องการ โปรแกรม

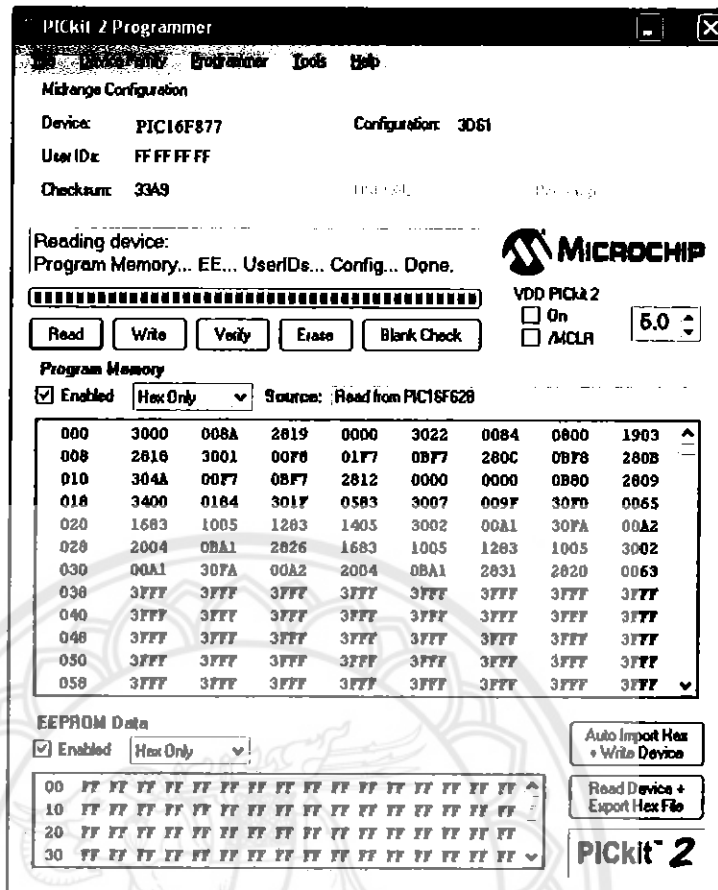
File	
Import Hex	Ctrl+I
Export Hex	Ctrl+E
Exit	Ctrl+Q

รูปที่ 3.28 เมนู File



รูปที่ 3.29 เลือกไฟล์ .HEX

หลังจากเลือกไฟล์ .HEX แล้ว ให้คลิกที่ปุ่ม Write เพื่อทำการ โปรแกรมไฟล์ .HEX ลงบน ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.30 การโปรแกรมไฟล์ .HEX

4. หลังจากกดปุ่ม Write โปรแกรมจะทำการลบ (Erase) และ โปรแกรมไฟล์ .HEX ลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ให้โดยอัตโนมัติ



รูปที่ 3.31 การโปรแกรมเสร็จสมบูรณ์

หลังจาก โปรแกรมไฟล์ .HEX ลงไมโครคอนโทรลเลอร์แล้ว หลังจากกดสวิทช์รีเซ็ตแล้ว โปรแกรมก็จะเริ่มทำงานทันที



รูปที่ 3.32 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

หลังจากมอเตอร์เริ่มหมุนแล้วจึงทำการ วัดแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้วยออสซิลโลสโคป เพื่อหากราฟของแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในขณะที่มอเตอร์หมุนที่ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 3.33 กราฟแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 จุดประสงค์ของการทดลอง

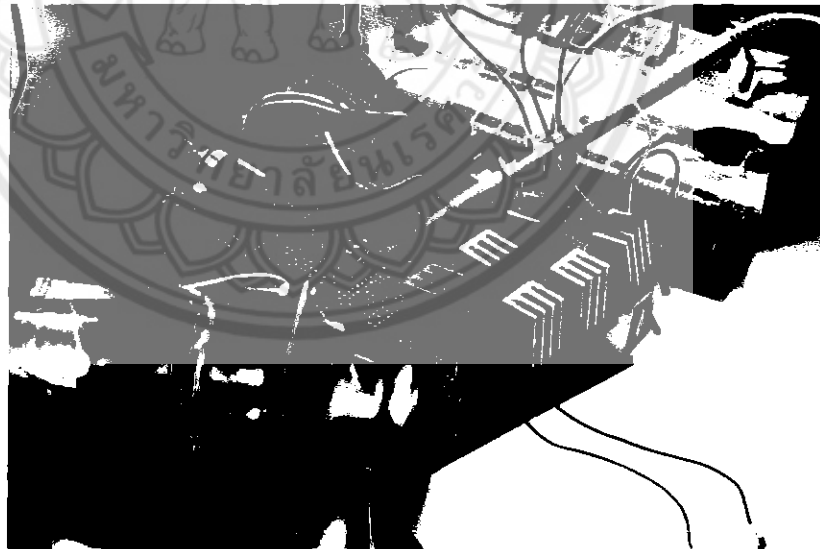
- ต้องการทราบผลการทดสอบกราฟของแรงดันไฟฟ้าเมื่อมอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบต่างๆ
- ต้องการทราบกราฟของสัญญาณที่จุดต่างๆ บนชุดควบคุม

#### 4.2 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองเพื่อวัดค่ากราฟแรงไฟฟ้าในขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนที่ความเร็วรอบต่าง และสัญญาณที่จุดต่างๆบนชุดควบคุมในขณะที่ความเร็วรอบเดียวกัน

##### 4.2.1 ทดสอบเพื่อดูกราฟแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนที่ความเร็วรอบต่างๆ พร้อมทั้งสัญญาณที่จุดต่างๆ บนชุดควบคุม

ใช้สายโทรบของออสซิลโลสโคปจับสัญญาณที่จุดต่างๆ บนชุดควบคุมเพื่อหากราฟแรงดันไฟฟ้าและสัญญาณต่าง



รูปที่ 4.1 การหาค่ากราฟแรงดันไฟฟ้าและสัญญาณต่างๆ

### 4.3 ผลการทดลอง

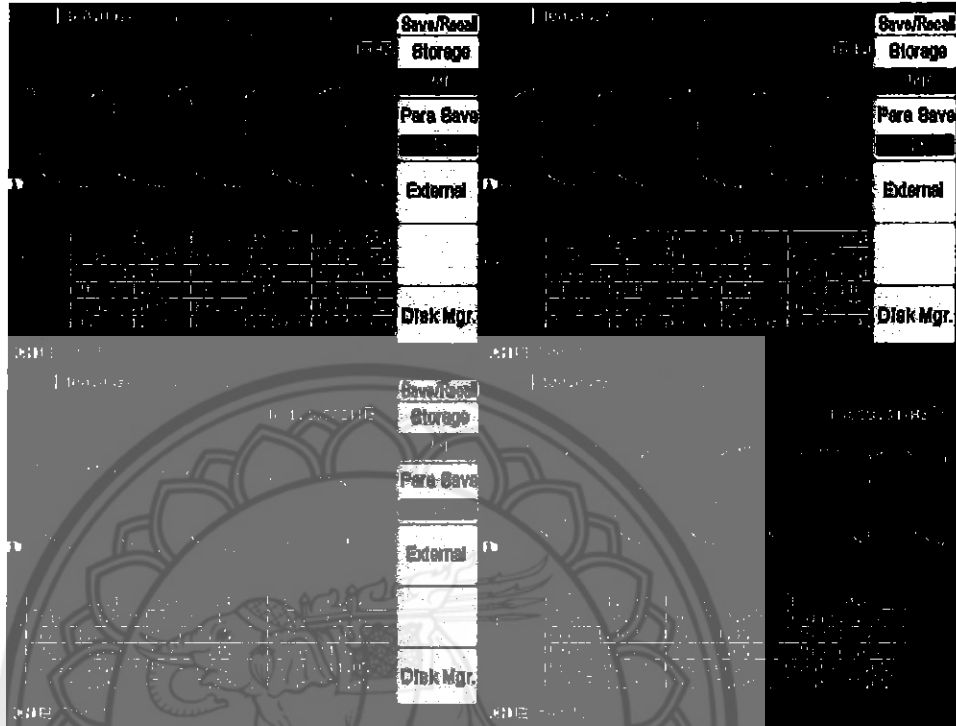
#### 4.3.1 ความเร็วรอบของมอเตอร์



รูปที่ 4.2 ความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที ตามลำดับ

ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่วัดในการทดลอง ได้แก่ 600 รอบต่อนาที 800 รอบต่อนาที 1,000 รอบต่อนาทีและ 1,200 รอบต่อนาที

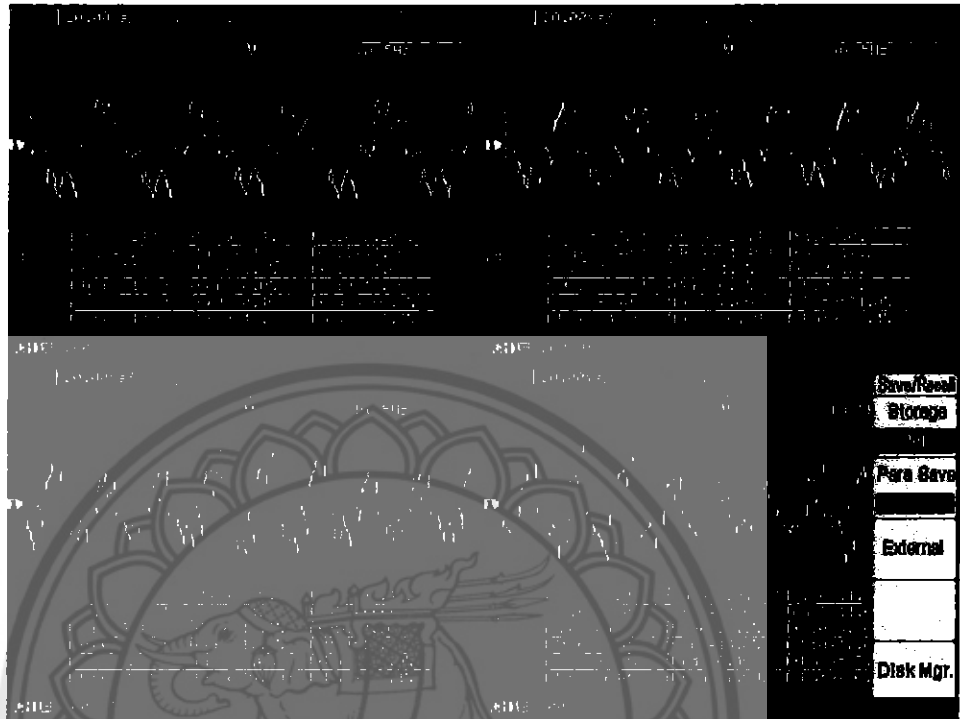
#### 4.3.2 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส A ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 4.3 กราฟแรงดัน ไฟฟ้าที่เฟส A ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที ตามลำดับ

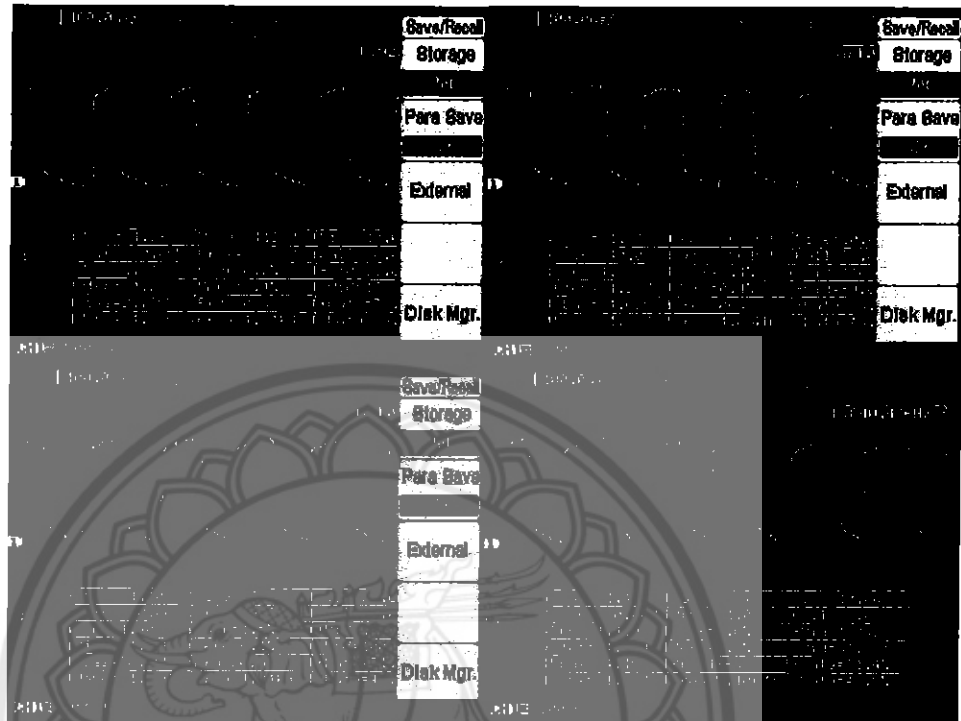
รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นกราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส A ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง ในขณะที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาทีตามลำดับ จากกราฟด้านบนจะเห็นว่าขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ค่าคิวดี้ไซเกิลขณะนั้นมีค่าเท่ากับ 32% เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที ค่าคิวดี้ไซเกิลมีค่าเท่ากับ 35% เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที มีค่าคิวดี้ไซเกิลเท่ากับ 41% และเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที มีค่าคิวดี้ไซเกิลเท่ากับ 68%

### 4.3.3 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส A ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 4.4 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส A ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที  
ตามลำดับ

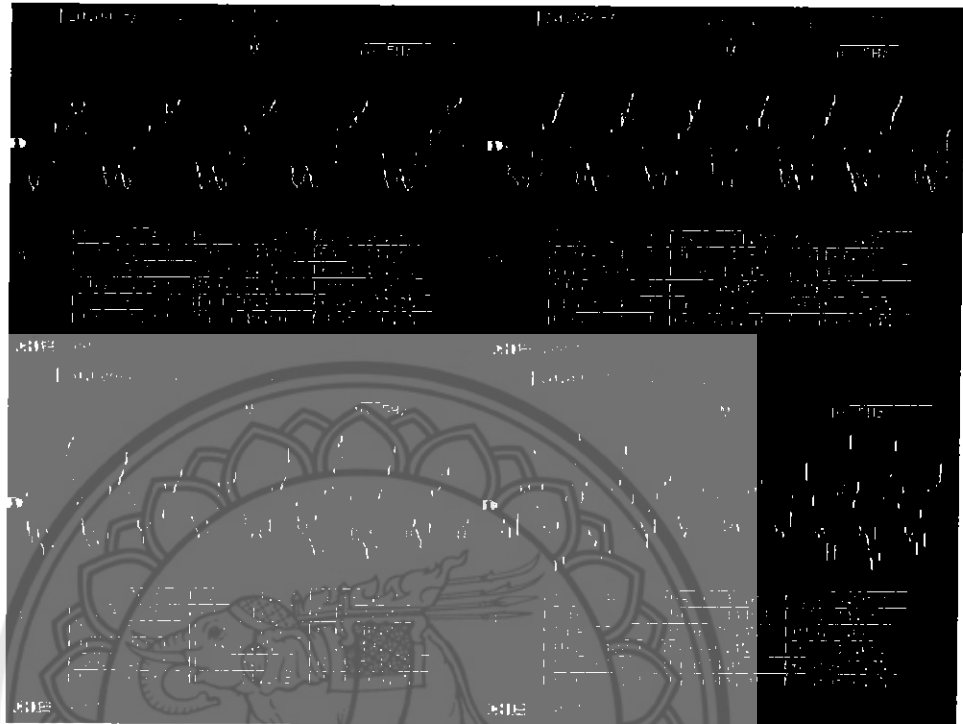
#### 4.3.4 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส B ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 4.5 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส B ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที ตามลำดับ

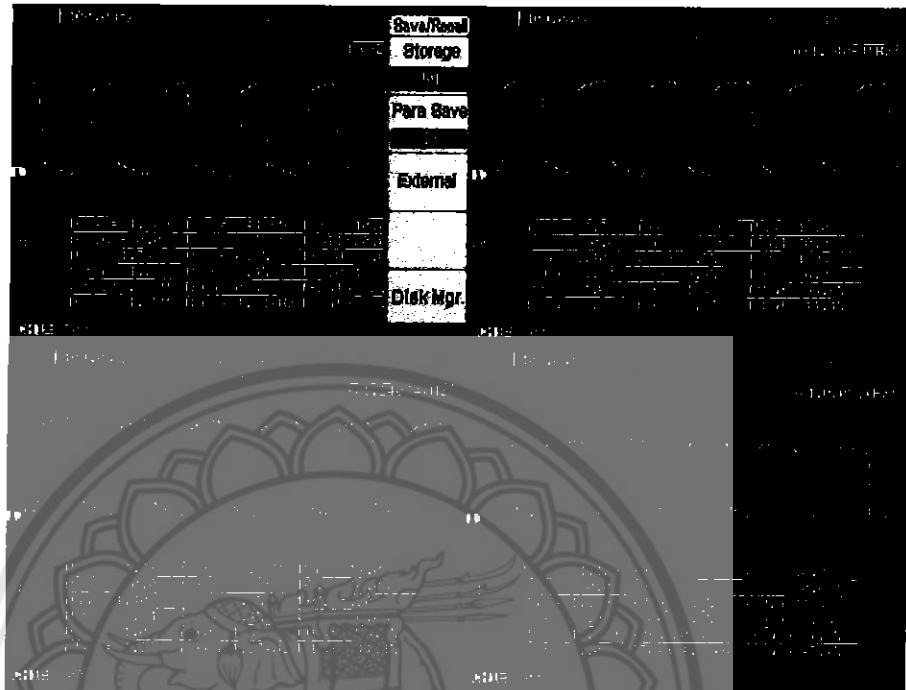
รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นกราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส B ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง ในขณะที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาทีตามลำดับ จากกราฟด้านบนจะเห็นว่าขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ค่าคิวดัชนีเกิดขณะนั้นมีค่าเท่ากับ 32% เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที ค่าคิวดัชนีเกิดมีค่าเท่ากับ 53% เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที มีค่าคิวดัชนีเกิดเท่ากับ 51% และเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที มีค่าคิวดัชนีเกิดเท่ากับ 71%

#### 4.3.5 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส B ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 4.6 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส B ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาทีตามลำดับ

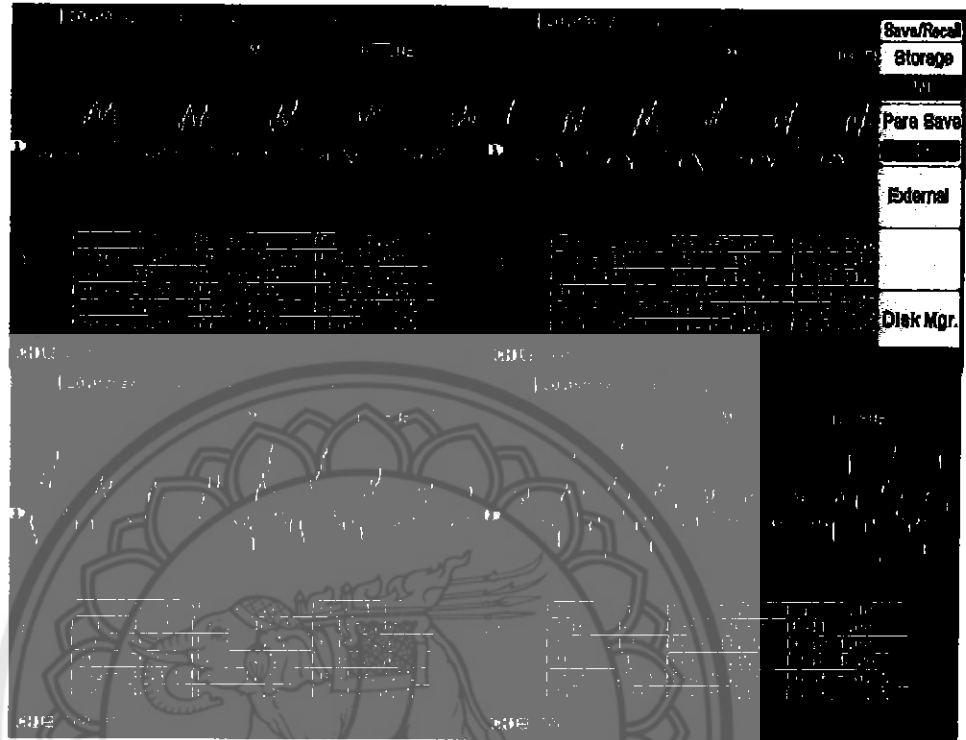
#### 4.3.6 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส C ที่ความเร็วรอบต่างๆของมอเตอร์



รูปที่ 4.7 กราฟแรงดัน ไฟฟ้าที่เฟส C ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นกราฟแรงดันไฟฟ้าที่เฟส C ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง ในขณะที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาทีตามลำดับ จากกราฟด้านบนจะเห็นว่าขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ค่าคิวดั้ไซเคล ขณะนั้นมีค่าเท่ากับ 32% เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที ค่าคิวดั้ไซเคลมีค่าเท่ากับ 55% เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที มีค่าคิวดั้ไซเคลเท่ากับ 51% และเมื่อ มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที มีค่าคิวดั้ไซเคลเท่ากับ 57%

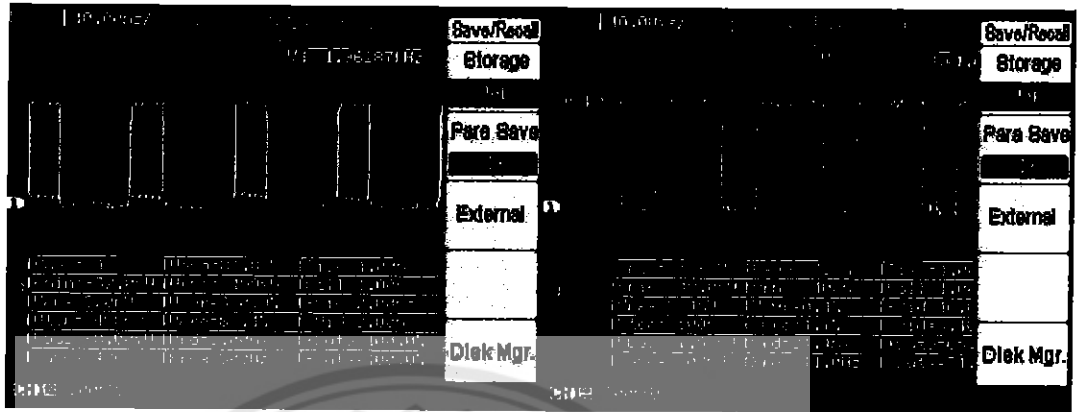
#### 4.3.7 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส C ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 4.8 กราฟกระแสไฟฟ้าที่เฟส C ที่ความเร็วรอบ 600, 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที



#### 4.3.8 กราฟสัญญาณที่จุดต่างๆ บนชุดไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.9 กราฟสัญญาณที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งไปให้เกดไคร์ฟที่ขั้วมอสเฟทชุดบนและชุดล่าง



รูปที่ 4.10 กราฟสัญญาณที่เกดไคร์ฟส่งไปขั้วมอสเฟทชุดบนและชุดล่าง

จากการพิจารณากราฟของแรงดันไฟฟ้าที่เฟส A, B และ C นั้น มีลักษณะที่เหมือนกัน คือ สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่ออกมานั้นมีลักษณะเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน หากนำสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมของทั้งสามเฟสมาเปรียบเทียบกัน แล้ว สัญญาณแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสที่ได้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

หากพิจารณาเรื่องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านแล้ว นั้นจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์สูงๆนั้นจะใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูง โดยพิจารณาจากค่า คิวดีซีเกิด กล่าวคือยิ่งความเร็วรอบของมอเตอร์สูงเท่าไรค่าคิวดีซีเกิดจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เช่นกราฟแรงดันไฟฟ้าจากเฟส A เมื่อความเร็วรอบเท่ากับ 600 รอบต่อนาที ค่าคิวดีซีเกิดจะมีค่า เท่ากับ 32% เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 800 รอบต่อนาทีค่าคิวดีซีเกิดเท่ากับ 35% เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที จะมีค่าคิวดีซีเกิดเท่ากับ 41% และเมื่อ มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที ค่าคิวดีซีเกิดขณะนั้นเท่ากับ 68% จากผลการ ทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วรอบต่ำค่าคิวดีซีเกิดจะมีค่าต่ำ เช่นเดียวกันซึ่งหาก ความเร็วรอบสูงขึ้นค่าคิวดีซีเกิดจะสูงขึ้นตาม ไปด้วย



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลองในโครงการนี้ พร้อมเสนอแนะแนวทางการนำโครงการนี้ไปพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นหรือ สามารถพัฒนาเพื่อปรับปรุงตัวโครงการให้ทำงานได้ตามวัตถุประสงค์อื่น

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

จากการดำเนิน โครงการเรื่องชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ได้สร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และวัตถุประสงค์ของโครงการคือ สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านได้ โดยสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านให้มีความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที 800 รอบต่อนาที 1,000 รอบต่อนาทีและ 1,200 รอบต่อนาทีได้ โดยการปรับความเร็วนั้นใช้อุปกรณ์ โปเทนชิโอมิเตอร์ หรือตัวต้านทานปรับค่าได้แบบ โวลลุ่ม เป็นตัวปรับความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

#### 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

ปัญหาที่พบในโครงการคือการเริ่มเดินของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านนั้น เป็นไปอย่างไม่ราบรื่นซึ่งไม่ควรจะเกิดขึ้นกับมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน สาเหตุของปัญหาอาจเกิดมาจากการใช้โค้ด โปรแกรมที่มีจุดบกพร่องในการเริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน รวมไปถึง ไม่มีการใช้ฮอลล์เซ็นเซอร์ในการรับตำแหน่งของโรเตอร์ จึงอาจทำให้การเริ่มเดินเป็นไปอย่างไม่ราบรื่น

แนวทางการแก้ไขปัญหา คือการใช้ฮอลล์เซ็นเซอร์รับค่าตำแหน่งของโรเตอร์ส่งเข้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อส่งสัญญาณออกมาจับกลุ่มอสเฟต ซึ่งอาจทำให้การเริ่มเดินของมอเตอร์ดีขึ้น

### 5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

- 5.3.1 ออกแบบวงจรและทำการ โปรแกรมการทำงานของมอเตอร์ให้มีฟังก์ชันการทำงานที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้นไป เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานให้กับมอเตอร์
- 5.3.2 ออกแบบระบบการแสดงผลเพื่อแสดงค่าความเร็วที่มอเตอร์หมุนในขณะนั้น
- 5.3.3 ออกแบบระบบการรับค่า อะนาล็อก ทุ ดิจิตอล (Analog to Digital) จากตัวต้านทานปรับค่าได้ (Potentiometer) เป็นเทอร์มิสเตอร์ (thermister) เป็นตัวส่งค่า ADC ไปให้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เป็นไปตามอุณหภูมิในขณะนั้น
- 5.3.4 ออกแบบวงจรและ โปรแกรมให้มอเตอร์สามารถหมุนกลับทางได้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Ward Brown. (December 5, 2011). **Brushless DC Motor Control Made Easy.**  
[http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS\\_GET\\_PAGE&nodeId=1824&appnote=en012037](http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1824&appnote=en012037) (สืบค้นเมื่อ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2554)
- [2] บริษัท อีทีที จำกัด. คู่มือเรียนรู้และเข้าใจสถาปัตยกรรมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877.  
 จาก <http://www.etteam.com/product/21C05.html> (สืบค้นเมื่อ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2554)
- [3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ นุ่นงาม. ปรินญาณิพนธ์เรื่อง การควบคุมมอเตอร์ กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ . จาก <http://library.kmutnb.ac.th/projects/B1417926x.pdf> (สืบค้นเมื่อ 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2554)
- [4] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ขจร อินวงษ์. รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย **Brushless DC Motor 2** ตัว. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. จาก <http://library.kmutnb.ac.th/projects/B15411151.pdf> (สืบค้นเมื่อ 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2554)
- [5] MICROCHIP. PIC16F87X Datasheet. 2001 Microchip Technology Inc. จาก <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30292c.pdf> (สืบค้นเมื่อ 2 กรกฎาคม พ.ศ. 2554)
- [6] ปรินญาณิพนธ์ปีการศึกษา 2553 สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เรื่อง ระบบควบคุมมอเตอร์ชนิด ไร้แปรงถ่าน(BRUSHLESS MOTOR CONTROL)
- [7] <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/IRF9540.pdf> (สืบค้นเมื่อ 20 มกราคม พ.ศ. 2555)
- [8] <http://th.element14.com/microchip/pic16f877-04-p/ic-8bit-flash-mcu-16f877-dip40/dp/9761349>. (สืบค้นเมื่อ 20 มกราคม พ.ศ. 2555)
- [9] ปรินญาณิพนธ์ปีการศึกษา 2552 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เรื่อง วงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (THE CIRCUIT CONTROLLER OF BRUSHLESS DC MOTOR BY FUZZY LOGIC CONTROL)



## ภาคผนวก (ก)

## โค้ดโปรแกรม Sensorless Brushless DC Motor

```

list P = PIC16F877
include "p16f877.inc"
    __CONFIG_CP_OFF & _WRT_ENABLE_OFF & _HS_OSC & _WDT_OFF &
_PWRTE_ON & _BODEN_ON
; Acceleration/Deceleration Time = RampRate * 256 * 256 * Timer 0 prescale / Fosc
#define AccelDelay D'255' ; determines full range acceleration time
#define DecelDelay D'200' ; determines full range deceleration time
#define ManThresh 0x3f ; Manual threshold is the PWM
potentiometer
; reading above which RPM is adjusted
automatically
#define AutoThresh 0x100-ManThresh
OffMask equ B'11010101' ; PWM off kills the high drives
Phase1 equ B'00110001' ; phase 1 C high, A low
Phase2 equ B'00110100' ; phase 2 C high, B low
Phase3 equ B'00000111' ; phase 3 A high, B low
Phase4 equ B'00010011' ; phase 4 A high, C low
Phase5 equ B'00011100' ; phase 5 B high, C low
Phase6 equ B'00001101' ; phase 6 B high, A low
#define CARRY STATUS,C
#define ZERO STATUS,Z
#define subw! sublw
;* Define I/O Ports
#define ReadIndicator PORTB,0 ; diagnostic scope trigger for BEMF readings
#define DrivePort PORTC ; motor drive and lock status
;* Define RAM variables
CBLOCK 0x20

```

```

STATE          ; Machine state
PWMThresh     ; PWM threshold
PhaseIndx     ; Current motor phase index
Drive         ; Motor drive word
RPMIndex      ; RPM Index workspace
ADCRPM        ; ADC RPM value
ADCOffset     ; Delta offset to ADC PWM threshold
PresetHi      ; speed control timer compare MS byte
PresetLo      ; speed control timer compare LS byte
Flags         ; general purpose flags
Vsupply       ; Supply voltage ADC reading
DeltaV1       ; Difference between expected and actual BEMF at T/4
DeltaV2       ; Difference between expected and actual BEMF at T/2
CCPSaveH     ; Storage for phase time when finding DeltaV
CCPSaveL     ; Storage for phase time when finding DeltaV
CCPT2H        ; Workspace for determining T/2 and T/4
CCPT2L        ; Workspace for determining T/2 and T/4
RampTimer     ; Timer 0 post scaler for accel/decel ramp rate
xCount        ; general purpose counter workspace
Status        ; relative speed indicator status
ENDC

;* Define Flags
#define DriveOnFlag  Flags,0          ; Flag for invoking drive disable mask when clear
#define AutoRPM      Flags,1          ; RPM timer is adjusted automatically
;
;
#define FullOnFlag   Flags,4          ; PWM threshold is set to maximum drive
#define Tmr0Ovf     Flags,5          ; Timer 0 overflow flag
#define Tmr0Sync    Flags,6          ; Second Timer 0 overflow flag
;
;
#define BEMF1Low    DeltaV1,7        ; BEMF1 is low if DeltaV1 is negative
#define BEMF2Low    DeltaV2,7        ; BEMF2 is low if DeltaV2 is negative
;*****

```



```

;*      Define State machine states and index numbers
sRPMSetup    equ    D'0'          ; Wait for Phase1, Set ADC GO, RA1->ADC
sRPMRead     equ    sRPMSetup+1   ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->RPM
sOffsetSetup equ    sRPMRead+1    ; Wait for Phase2, Set ADC GO, RA3->ADC
sOffsetRead  equ    sOffsetSetup+1; Wait for ADC nDONE, Read ADC->ADCOffset
sVSetup      equ    sOffsetRead+1 ; Wait for Phase4, Drive On, wait 9 uSec, Set ADC GO
sVIdle       equ    sVSetup+1     ; Wait for Drive On, wait Tacq, set ADC GO
sVRead       equ    sVIdle+1      ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->Vsupply
sBEMFSetup   equ    sVRead+1      ; Wait for Phase5, set Timer1 compare to half phase
time
sBEMFIdle    equ    sBEMFSetup+1  ; Wait for Timer1 compare, Force Drive on and wait 9
uSec,
                                ; Set ADC GO, RA0->ADC
sBEMFRead    equ    sBEMFIdle+1   ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->Vbemf
sBEMF2Idle   equ    sBEMFRead+1   ; Wait for Timer1 compare, Force Drive on and wait 9
uSec,
                                ; Set ADC GO, RA0->ADC
sBEMF2Read   equ    sBEMF2Idle+1 ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->Vbemf
;*      The ADC input is changed depending on the STATE
;*      Each STATE assumes a previous input selection and changes the selection
;*      by XORing the control register with the appropriate ADC input change mask
;*      defined here:
ADC0to1      equ    B'00001000'   ; changes ADCON0<5:3> from 000 to 001
ADC1to3      equ    B'00010000'   ; changes ADCON0<5:3> from 001 to 011
ADC3to0      equ    B'00011000'   ; changes ADCON0<5:3> from 011 to 000
;***** PROGRAM STARTS HERE
        org    0x000
        nop
        goto  Initialize
        org    0x004
        bsf    Tmr0Ovf             ; Timer 0 overflow flag used by accel/decel timer
        bsf    Tmr0Sync            ; Timer 0 overflow flag used to synchronize code execution

```

```

    bcf    INTCON,T0IF
    retfie          ;

Initialize

    clrf   PORTC          ; all drivers off
    clrf   PORTB
    banksel TRISA

; setup I/O

    clrf   TRISC          ; motor drivers on PORTC
    movlw  B'00001011'    ; A/D on RA0 (PWM), RA1 (Speed) and RA3 (BEMF)
    movwf  TRISA          ;
    movlw  B'11111110'    ; RB0 is locked indicator
    movwf  TRISB

; setup Timer0
    movlw  B'11010000'    ; Timer0: Fosc, 1:2
    movwf  OPTION_REG
    bsf    INTCON,T0IE    ; enable timer 0 interrupts

; Setup ADC
    movlw  B'00000100'    ; ADC left justified, AN0, AN1
    movwf  ADCON1
    banksel PORTA
    movlw  B'10000001'    ; ADC clk = Fosc/32, AN0, ADC on
    movwf  ADCON0

; setup Timer 1
    movlw  B'00100001'    ; 1:4 prescale, internal clock, timer on
    movwf  T1CON

; setup Timer 1 compare
    movlw  0xFF           ; set compare to maximum count
    movwf  CCPR1L         ; LS compare register
    movwf  CCPR1H         ; MS compare register
    movlw  B'00001011'    ; Timer 1 compare mode, special event - clears timer1
    movwf  CCP1CON

; initialize RAM

```

```

clrf    PWMThresh
movlw  D'6'
movwf  PhaseIndx

clrf    Flags
clrf    Status      ;
clrf    STATE      ; LoopIdle->STATE
bcf    INTCON,T0IF ; ensure timer 0 overflow flag is cleared
bsf    INTCON,GIE  ; enable interrupts

```

#### MainLoop

```

;    PWM, Commutation, State machine loop
btfsc  PIR1,CCP1IF ; time for phase change?
call   Commutate   ; yes - change motor drive

PWM
bsf    DriveOnFlag ; pre-set flag
btfsc  FullOnFlag  ; is PWM level at maximum?
goto   PWM02       ; yes - only commutation is necessary
movf   PWMThresh,w ; get PWM threshold
addwf  TMR0,w      ; compare to timer 0
btfss  CARRY       ; drive is on if carry is set
bcf    DriveOnFlag ; timer has not reached threshold, disable drive
call   DriveMotor  ; output drive word

```

#### PWM02

```

call   LockTest
call   StateMachine ; service state machine
goto   MainLoop    ; repeat loop

```

#### StateMachine

```

movlw  SMTableEnd-SMTable-1; STATE table must have 2^n entries
andwf  STATE,f             ; limit STATE index to state table
movlw  high SMTable       ; get high byte of table address
movwf  PCLATH              ; prepare for computed goto
movlw  low SMTable        ; get low byte of table address
addwf  STATE,w            ; add STATE index to table root

```

```

    btfsc  CARRY                ; test for page change in table
    incf   PCLATH,f             ; page change adjust
    movwf  PCL                  ; jump into table

SMTTable                ; number of STATE table entries MUST be evenly
divisible by 2

    goto  RPMSetup            ; Wait for Phase1, Set ADC GO, RA1->ADC, clear timer0
overflow

    goto  RPMRead             ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->RPM
    goto  OffsetSetup         ; Wait for Phase2, Set ADC GO, RA3->ADC
    goto  OffsetRead          ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->ADCOffset
    goto  VSetup              ; Wait for Phase4
    goto  VIdle               ; Wait for Drive On, wait Tacq, set ADC GO
    goto  VRead               ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->Vsupply
    goto  BEMFSetup           ; Wait for Phase5, set Timer1 compare to half phase time
    goto  BEMFIdle            ; When Timer1 compares force Drive on, Set ADC GO after
Tacq, RA0->ADC

    goto  BEMFRead            ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->Vbemf
    goto  BEMF2Idle           ; When Timer1 compares force Drive on, Set ADC GO after
Tacq, RA0->ADC

    goto  BEMF2Read           ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->Vbemf
; fill out table with InvalidStates to make number of table entries evenly divisible by 2

    goto  InvalidState        ; invalid state - reset state machine
    goto  InvalidState        ; invalid state - reset state machine
    goto  InvalidState        ; invalid state - reset state machine
    goto  InvalidState        ; invalid state - reset state machine

SMTTableEnd

RPMSetup                ; Wait for Phase1, Set ADC GO, RA1->ADC, clear timer0
overflow

    movlw  Phase1             ; compare Phase1 word...
    xorwf  Drive,w            ; ...with current drive word
    btfss  ZERO               ; ZERO if equal
    return                    ; not Phase1 - remain in current STATE

```

```

bsf    ADCON0,GO    ; start ADC
movlw  ADC0to1      ; prepare to change ADC input
xorwf  ADCON0,f     ; change from AN0 to AN1
incf   STATE,f      ; next STATE
bcf    Tmr0Sync     ; clear timer0 overflow
return ; back to Main Loop

```

**RPMRead** ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->RPM

```

btfsc  ADCON0,GO    ; is ADC conversion finished?
return ; no - remain in current STATE
movf   ADRESH,w     ; get ADC result
movwf  ADCRPM       ; save in RPM
incf   STATE,f      ; next STATE
return ; back to Main Loop

```

**OffsetSetup** ; Wait for Phase2, Set ADC GO, RA3->ADC

```

movlw  Phase2       ; compare Phase2 word...
xorwf  Drive,w      ; ...with current drive word
btfss  ZERO         ; ZERO if equal
return ; not Phase2 - remain in current STATE
bsf    ADCON0,GO    ; start ADC
movlw  ADC1to3      ; prepare to change ADC input
xorwf  ADCON0,f     ; change from AN1 to AN3
incf   STATE,f      ; next STATE
return ; back to Main Loop

```

**OffsetRead** ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->ADCOffset

```

btfsc  ADCON0,GO    ; is ADC conversion finished?
return ; no - remain in current STATE
movf   ADRESH,w     ; get ADC result
xorlw  H'80'        ; complement MSB for +/- offset
movwf  ADCOffset    ; save in offset

```

```

addwf  ADCRPM,w    ; add offset to PWM result
btfss  ADCOffset,7 ; is offset a negative number?
goto   OverflowTest ; no - test for overflow
btfss  CARRY       ; underflow?
andlw  H'00'       ; yes - force minimum
goto   Threshold   ;

```

#### OverflowTest

```

btfsc  CARRY       ; overflow?
movlw  H'ff'       ; yes - force maximum

```

#### Threshold

```

movwf  PWMThresh   ; PWM threshold is RPM result plus offset
btfsc  ZERO        ; is drive off?
goto   DriveOff    ; yes - skip voltage measurements
bcf    FullOnFlag  ; pre-clear flag in preparation of compare
sublw  0xFD        ; full on threshold
btfss  CARRY       ; CY = 0 if PWMThresh > FullOn
bsf    FullOnFlag  ; set full on flag
incf   STATE,f     ; next STATE
return ; back to Main Loop

```

#### DriveOff

```

clrf   Status      ; clear speed indicators
movlw  B'11000111' ; reset ADC input to AN0
andwf  ADCON0,f    ;
clrf   STATE       ; reset state machine
return

```

#### VSetup ; Wait for Phase4

```

movlw  Phase4      ; compare Phase4 word...
xorwf  Drive,w     ; ...with current Phase drive word
btfss  ZERO        ; ZERO if equal
return             ; not Phase4 - remain in current STATE
call   SetTimer    ; set timer value from RPM table

```

```

    incf    STATE,f                ; next STATE
    return                ; back to Main Loop
VIdle
    ; Wait for Drive On, wait Tacq, set ADC GO
    btfss  DriveOnFlag          ; is Drive active?
    return                ; no - remain in current STATE
    bsf    ReadIndicator         ; Diagnostic
    call   Tacq                  ; motor Drive is active - wait ADC Tacq time
    bsf    ADCON0,GO             ; start ADC
    bcf    ReadIndicator         ; Diagnostic
    incf    STATE,f                ; next STATE
    return                ; back to Main Loop
VRead
    ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->Vsupply
    btfsc  ADCON0,GO             ; is ADC conversion finished?
    return                ; no - remain in current STATE
    movf   ADRESH,w              ; get ADC result
    movwf  Vsupply                ; save as supply voltage
    incf    STATE,f                ; next STATE
    bcf    Tmr0Sync              ; clear timer 0 overflow
    return                ; back to Main Loop
BEMFSetup
    ; Wait for Phase5, set Timer1 compare to half phase time
    movlw  Phase5                ; compare Phase5 word...
    xorwf  Drive,w                ; ...with current drive word
    btfss  ZERO                  ; ZERO if equal
    return                ; not Phase5 - remain in current STATE
    btfss  Tmr0Sync              ; synchronize with timer 0
    return                ;
    btfss  PWMThresh,7           ; if PWMThresh > 0x80 then ON is longer than OFF
    goto   BEMFS1                ; OFF is longer and motor is currently off - compute
now
    btfss  DriveOnFlag          ; ON is longer - wait for drive cycle to start
    return                ; not started - wait
BEMFS1

```

```

    bcf    CCP1CON,0    ; disable special event on compare
    movf   CCPR1H,w     ; save current capture compare state
    movwf  CCPSaveH    ;
    movwf  CCPT2H      ; save copy in workspace
    movf   CCPR1L,w     ; low byte
    movwf  CCPSaveL    ; save
    movwf  CCPT2L      ; and save copy
    bcf    CARRY        ; pre-clear carry for rotate
    rrf    CCPT2H,f     ; divide phase time by 2
    rrf    CCPT2L,f     ;
    bcf    CARRY        ; pre-clear carry
    rrf    CCPT2H,w     ; divide phase time by another 2
    movwf  CCPR1H      ; first BEMF reading at phase T/4
    rrf    CCPT2L,w     ;
    movwf  CCPR1L      ;
    incf   STATE,f     ; next STATE
    return          ; back to Main Loop
BEMFIdle          ; When Timer1 compares force Drive on, Set ADC GO after
Tacq, RA0->ADC
    btfss  PIR1,CCP1IF ; timer compare?
    return          ; no - remain in current STATE
    bsf    DriveOnFlag ; force drive on for BEMF reading
    call   DriveMotor  ; activate motor drive
    bsf    ReadIndicator ; Diagnostic
    call   Tacq        ; wait ADC acquisition time
    bsf    ADCON0,GO   ; start ADC
    bcf    ReadIndicator ; Diagnostic
; setup to capture BEMF at phase 3/4 T
    movf   CCPT2H,w
    addwf  CCPR1H,f    ; next compare at phase 3/4 T
    movf   CCPT2L,w    ;

```



```

    addwf  CCP1L,f      ; set T/2 lsb
    btfsc  CARRY        ; test for carry into MSb
    incf   CCP1H,f      ; perform carry
    bcf    PIR1,CCP1IF ; clear timer compare interrupt flag
    incf   STATE,f      ; next STATE
    return                ; back to Main Loop

BEMFRead                ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->Vbemf
    btfsc  ADCON0,GO    ; is ADC conversion finished?
    return                ; no - remain in current STATE
    rrf    Vsupply,w    ; divide supply voltage by 2
    subwf  ADRESH,w     ; Vbemf - Vsupply/2
    movwf  DeltaV1      ; save error voltage
    incf   STATE,f      ; next STATE
    return                ; back to Main Loop

BEMF2Idle               ; When Timer1 compares force Drive on, Set ADC GO after
Tacq, RA0->ADC
    btfss  PIR1,CCP1IF ; timer compare?
    return                ; no - remain in current STATE
    bsf    DriveOnFlag  ; force drive on for BEMF reading
    call   DriveMotor    ; activate motor drive
    bsf    ReadIndicator ; Diagnostic
    call   Tacq          ; wait ADC acquisition time
    bsf    ADCON0,GO    ; start ADC
    bcf    ReadIndicator ; Diagnostic
    movlw  ADC3to0      ; prepare to change ADC input
    xorwf  ADCON0,f     ; change from AN3 to AN0
; restore Timer1 phase time and special event compare mode
    movf   CCPSaveH,w
    movwf  CCP1H        ; next compare at phase T
    movf   CCPSaveL,w ;
    movwf  CCP1L        ; set T lsb
    bcf    PIR1,CCP1IF ; clear timer compare interrupt flag

```

```

    bsf    CCP1CON,0    ; enable special event on compare
    incf   STATE,f      ; next STATE
    return ; back to Main Loop

BEMF2Read ; Wait for ADC nDONE, Read ADC->Vbemf
    btfsc  ADCON0,GO    ; is ADC conversion finished?
    return ; no - remain in current STATE
    rrf    Vsupply,w    ; divide supply voltage by 2
    subwf  ADRESH,w    ; Vbemf - Vsupply/2
    movwf  DeltaV2     ; save error voltage
    clrf   STATE       ; reset state machine to beginning
    return ; back to Main Loop

InvalidState ; trap for invalid STATE index
    movlw  B'11000111' ; reset ADC input to AN0
    andwf  ADCON0,f    ;
    clrf   STATE
    return

Tacq
; Software delay for ADC acquisition time
; Delay time = Tosc*(3+3*xCount)
    movlw  D'14'      ; 14 equates to approx 9 uSec delay
    movwf  xCount ;
    decfsz xCount,f  ;
    goto   $-1       ; loop here until time complete
    return

LockTest
; T is the commutation phase period. Back EMF is measured on the
; floating motor terminal at two times during T to determine
; the approximate zero crossing of the BEMF. BEMF low means that
; the measured BEMF is below (supply voltage)/2.
; If BEMF is low at 1/4 T then accelerate.
; If BEMF is high at 1/4 T and low at 3/4 T then speed is OK.
; If BEMF is high at 1/4 T and 3/4 T then decelerate.

```

```

; Lock test computation is synchronized to the PWM clock such
; that the computation is performed during the PWM ON or OFF
; time whichever is longer.
; synchronize test with start of timer 0

```

```

    btfss    Tmr0Ovf          ; has timer 0 wrapped around?
    return   ; no - skip lock test
    btfss    PWMThresh,7     ; if PWMThresh > 0x80 then ON is longer than OFF
    goto     LT05            ; OFF is longer and motor is currently off - compute now
    btfss    DriveOnFlag     ; ON is longer - wait for drive cycle to start
    return   ; not started - wait

```

LT05

```

    bcf      Tmr0Ovf          ; clear synchronization flag
    decfsz  RampTimer,f     ; RampTimer controls the acceleration/deceleration rate
    return

```

```

; use lock results to control RPM only if not manual mode

```

```

    bsf      AutoRPM          ; preset flag
    movf    ADCRPM,w         ; compare RPM potentiometer...
    addlw   AutoThresh       ; ...to the auto control threshold
    btfss   CARRY            ; CARRY is set if RPM is > auto threshold
    bcf      AutoRPM          ; not in auto range - reset flag
    btfss   BEMF1Low         ; is first BEMF below Supply/2
    goto    LT20             ; no - test second BEMF

```

LT10

```

; accelerate if BEMF at 1/4 T is below Supply/2

```

```

    movlw   B'10000000'     ; indicate lock test results
    movwf   Status           ; status is OR'd with drive word later
    movlw   AccelDelay       ; set the timer for acceleration delay
    movwf   RampTimer       ;
    btfss   AutoRPM          ; is RPM in auto range?
    goto    ManControl       ; no - skip RPM adjustment
    incfsz  RPMIndex,f       ; increment the RPM table index
    return  ; return if Index didn't wrap around

```

```

    decf   RPMIndex,f   ; top limit is 0xFF
    return

```

#### LT20

```

    btfsc  BEMF2Low     ; BEMF1 was high...
    goto   ShowLocked   ; ... and BEMF2 is low - show locked

```

; decelerate if BEMF at 3/4 T is above Supply/2

```

    movlw  B'01000000'  ; indicate lock test results
    movwf  Status        ; status is OR'd with drive word later
    movlw  DecelDelay    ; set the timer for deceleration delay
    movwf  RampTimer     ;

    btfss  AutoRPM       ; is RPM in auto range?
    goto   ManControl    ; no - skip RPM adjustment
    decfsz RPMIndex,f    ; set next lower RPM table index
    return ; return if index didn't wrap around
    incf   RPMIndex,f    ; bottom limit is 0x01
    return

```

#### ShowLocked

```

    movlw  B'11000000'  ; indicate lock test results
    movwf  Status        ; status is OR'd with drive word later
    movlw  DecelDelay    ; set the timer for deceleration delay
    movwf  RampTimer     ;

    btfsc  AutoRPM       ; was RPM set automatically?
    return ; yes - we're done

```

#### ManControl

```

    movf   ADCRPM,w      ; get RPM potentiometer reading...
    movwf  RPMIndex      ; ...and set table index directly
    return

```

#### Commutate

```

;   Commutation is triggered by PIR1<CCP1IF> flag.
;   This flag is set when timer1 equals the compare register.

```

```

;      When BEMF measurement is active the compare time is not
;      cleared automatically (special event trigger is off).
;      Ignore the PIR1<CCP1IF> flag when special trigger is off
;      because the flag is for BEMF measurment.
;      If BEMF measurement is not active then decrement phase table
;      index and get the drive word from the table. Save the
;      drive word in a global variable and output to motor drivers.
      btfss  CCP1CON,0    ; is special event on compare enabled?
      return                ; no - this is a BEMF measurment, let state machine handle this

```

```

      bcf    PIR1,CCP1IF  ; clear interrupt flag
      movlw  high OnTable ; set upper program counter bits
      movwf  PCLATH
      decfsz PhaseIndx,w  ; decrement to next phase
      goto   $+2          ; skip reset if not zero
      movlw  D'6'         ; phase counts 6 to 1
      movwf  PhaseIndx    ; save the phase index
      addlw  LOW OnTable
      btfsc  CARRY        ; test for possible page boundry
      incf   PCLATH,f     ; page boundry adjust
      call   GetDrive
      movwf  Drive        ; save motor drive word

```

#### DriveMotor

```

      movf   Drive,w      ; restore motor drive word
      btfss  DriveOnFlag ; test drive enable flag
      andlw  OffMask     ; kill high drive if PWM is off
      iorwf  Status,w    ; show speed indicators
      movwf  DrivePort   ; output to motor drivers
      return

```

#### GetDrive

```

      movwf  PCL        ; computed goto

```

#### OnTable

```

retlw Phase6
retlw Phase5
retlw Phase4
retlw Phase3
retlw Phase2
retlw Phase1

```

#### SetTimer

```

; This sets the CCP module compare registers for timer 1.
; The motor phase period is the time it takes timer 1
; to count from 0 to the compare value. The CCP module
; is configured to clear timer 1 when the compare occurs.
; Get the timer1 compare variable from two lookup tables, one
; for the compare high byte and the other for the low byte.
call SetTimerHigh
movwf CCPR1H ; Timer1 High byte preset
call SetTimerLow
movwf CCPR1L ; Timer1 Low byte preset
return

```

#### SetTimerHigh

```

movlw high T1HighTable ; lookup preset values
movwf PCLATH ; high bytes first
movlw low T1HighTable ;
addwf RPMIndex,w ; add table index
btfsc STATUS,C ; test for table page crossing
incf PCLATH,f ;
movwf PCL ; lookup - result returned in W

```

#### SetTimerLow

```

movlw high T1LowTable ; repeat for lower byte
movwf PCLATH ;
movlw low T1LowTable ;
addwf RPMIndex,w ; add table index
btfsc STATUS,C ; test for table page crossing

```

```
incf PCLATH,f ;  
movwf PCL ; lookup - result returned in W  
#include "BLDCspd4.inc"  
end
```



**ภาคผนวก (๗)****รายการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์**

1. Microcontroller PIC16F877
2. Logic-Input CMOS Quad Drivers TC4469
3. MOSFET IRF2807
4. MOSFET IRF9540
5. IC Regulator 7805
6. IC Regulator 7812





## ภาคผนวก (ก)

## รายละเอียดของมอสเฟต IRF2807

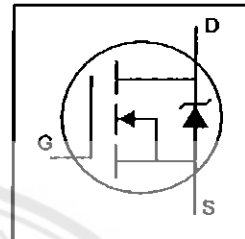
International  
**IR** Rectifier

PD - 91517

IRF2807

HEXFET® Power MOSFET

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



$V_{DS} = 75V$

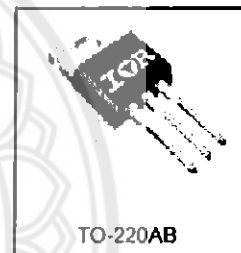
$R_{DS(on)} = 13m\Omega$

$I_D = 82A\text{@}$

**Description**

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

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



TO-220AB

**Absolute Maximum Ratings**

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	82	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	58	A
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	280	A
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	230	W
	Linear Derating Factor	1.5	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$I_{AR}$	Avalanche Current ①	43	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy ①	23	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ②	5.9	V/ns
$T_J$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf-in (1.1N-m)	

**Thermal Resistance**

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.65	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.60	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

# IRF2807

International  
IR Rectifier

## Electrical Characteristics @ T<sub>J</sub> = 25°C (unless otherwise specified)

Parameter	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
V <sub>(BR)DSS</sub>	Drain-to-Source Breakdown Voltage	75	—	—	V	V <sub>GS</sub> = 0V, I <sub>D</sub> = 250μA
ΔV <sub>(BR)DSS</sub> /ΔT <sub>J</sub>	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.074	—	V/°C	Reference to 25°C, I <sub>D</sub> = 1mA
R <sub>DS(on)</sub>	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	13	mΩ	V <sub>GS</sub> = 10V, I <sub>D</sub> = 43A ④
V <sub>GS(th)</sub>	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V <sub>DS</sub> = V <sub>GS</sub> , I <sub>D</sub> = 250μA
g <sub>fs</sub>	Forward Transconductance	38	—	—	S	V <sub>DS</sub> = 50V, I <sub>D</sub> = 43A④
I <sub>DSS</sub>	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V <sub>DS</sub> = 75V, V <sub>GS</sub> = 0V
		—	—	250	μA	V <sub>DS</sub> = 60V, V <sub>GS</sub> = 0V, T <sub>J</sub> = 150°C
I <sub>GSS</sub>	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V <sub>GS</sub> = 20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	V <sub>GS</sub> = -20V
Q <sub>g</sub>	Total Gate Charge	—	—	180	nC	I <sub>D</sub> = 43A
Q <sub>gs</sub>	Gate-to-Source Charge	—	—	29	nC	V <sub>DS</sub> = 60V
Q <sub>gd</sub>	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	55	nC	V <sub>GS</sub> = 10V, See Fig. 6 and 13
t <sub>d(on)</sub>	Turn-On Delay Time	—	13	—	ns	V <sub>DD</sub> = 38V
t <sub>r</sub>	Rise Time	—	64	—	ns	I <sub>D</sub> = 43A
t <sub>d(off)</sub>	Turn-Off Delay Time	—	49	—	ns	R <sub>θ</sub> = 2.5Ω
t <sub>f</sub>	Fall Time	—	48	—	ns	V <sub>GS</sub> = 10V, See Fig. 10 ④
L <sub>D</sub>	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L <sub>S</sub>	Internal Source Inductance	—	7.5	—	nH	
C <sub>iss</sub>	Input Capacitance	—	3820	—	pF	V <sub>GS</sub> = 0V
C <sub>oss</sub>	Output Capacitance	—	610	—	pF	V <sub>DS</sub> = 25V
C <sub>rss</sub>	Reverse Transfer Capacitance	—	130	—	pF	f = 1.0MHz, See Fig. 5
E <sub>AS</sub>	Single Pulse Avalanche Energy②	—	1280	340⑥	mJ	I <sub>AS</sub> = 60A, L = 370μH

## Source-Drain Ratings and Characteristics

Parameter	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I <sub>S</sub>	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	82④	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I <sub>SM</sub>	Pulsed Source Current (Body Diode)①	—	—	280	A	
V <sub>SD</sub>	Diode Forward Voltage	—	—	1.2	V	T <sub>J</sub> = 25°C, I <sub>S</sub> = 43A, V <sub>GS</sub> = 0V ④
t <sub>rr</sub>	Reverse Recovery Time	—	100	160	ns	T <sub>J</sub> = 25°C, I <sub>F</sub> = 43A
Q <sub>rr</sub>	Reverse Recovery Charge	—	410	810	nC	di/dt = 100A/μs ④
t <sub>on</sub>	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L <sub>S</sub> +L <sub>D</sub> )				

### Notes:

- ① Repetitive rating: pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting T<sub>J</sub> = 25°C, L = 370μH, R<sub>θ</sub> = 25Ω, I<sub>AS</sub> = 43A, V<sub>GS</sub> = 10V (See Figure 12)
- ③ I<sub>SD</sub> ≤ 43A, di/dt ≤ 300A/μs, V<sub>DD</sub> ≤ V<sub>(BR)DSS</sub>, T<sub>J</sub> ≤ 175°C
- ④ Pulse width ≤ 400μs; duty cycle ≤ 2%.
- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑥ This is a calculated value limited to T<sub>J</sub> = 175°C.
- ⑦ Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature. Package limitation current is 75A.

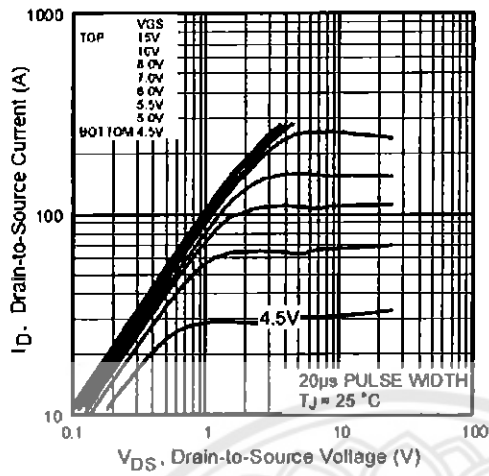


Fig 1. Typical Output Characteristics

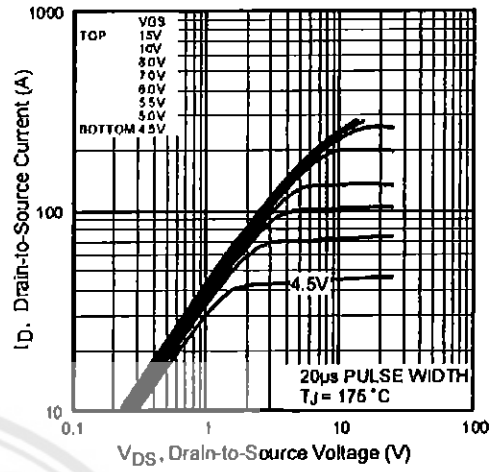


Fig 2. Typical Output Characteristics

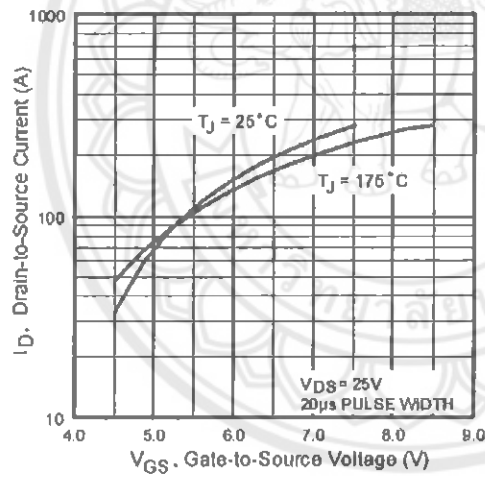


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

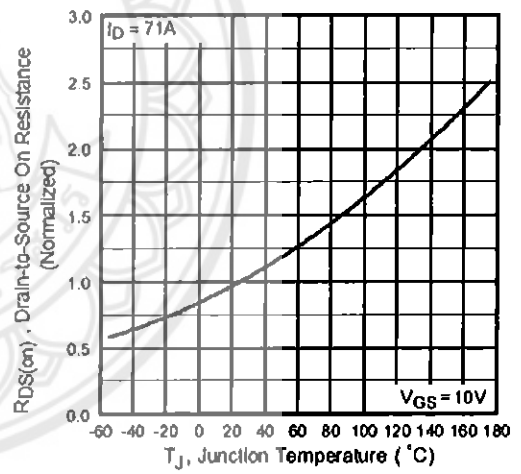


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

# IRF2807

International  
Rectifier

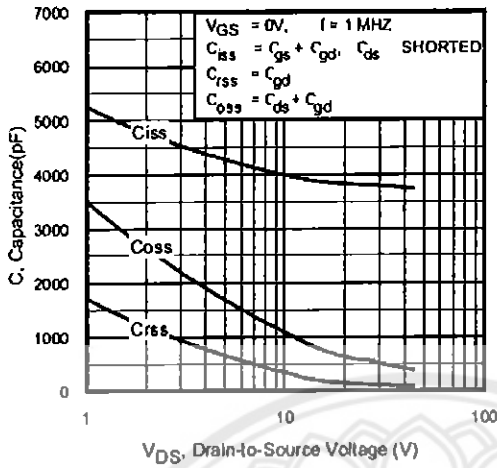


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

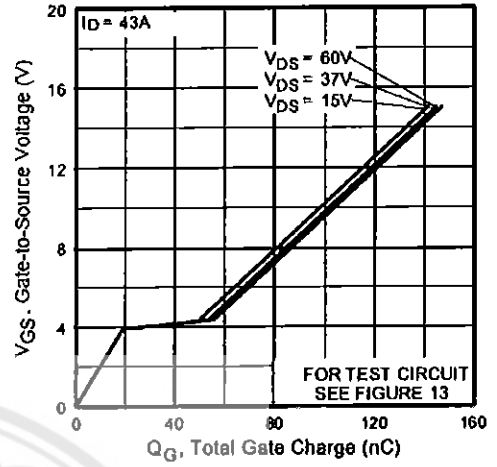


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

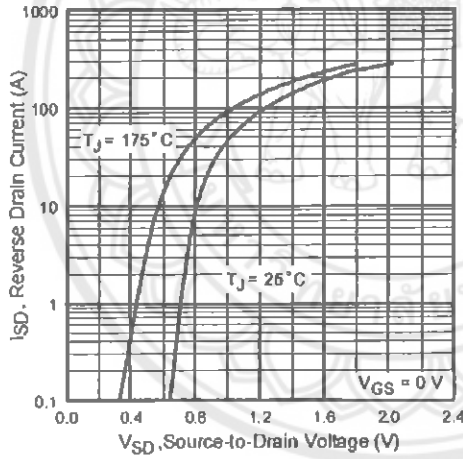


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

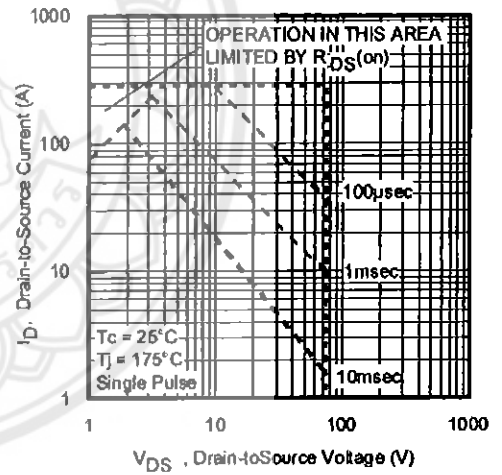


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

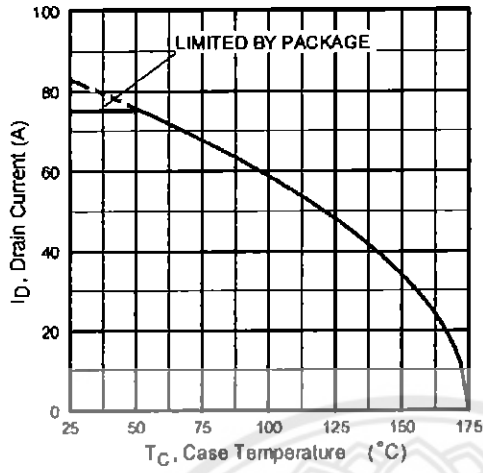


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

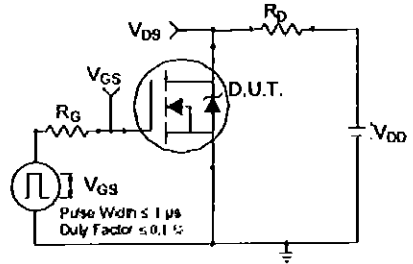


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

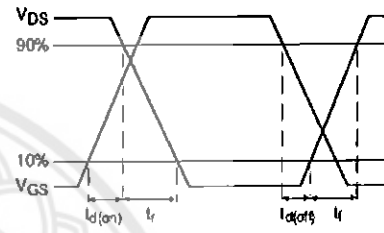


Fig 10b. Switching Time Waveforms

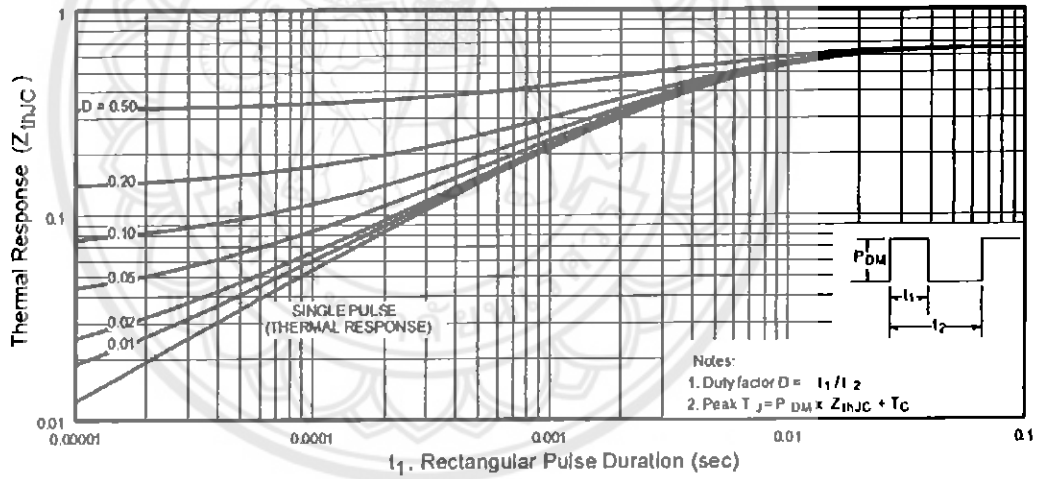


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

# IRF2807

International  
IR Rectifier

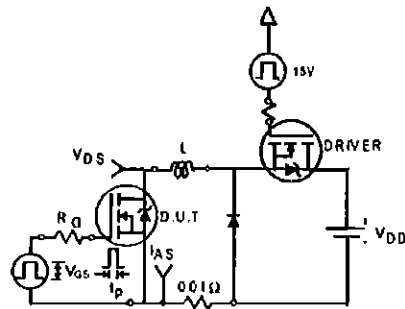


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

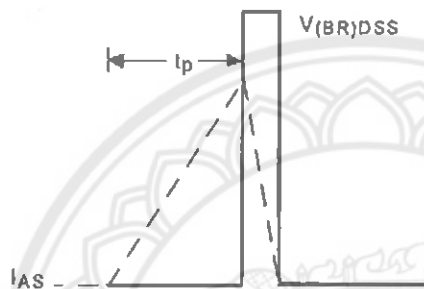


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

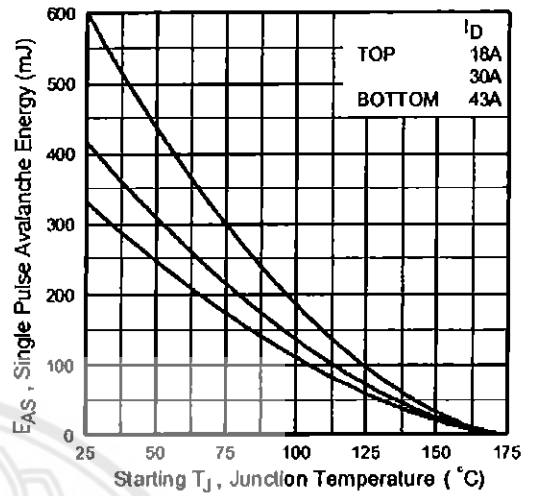


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

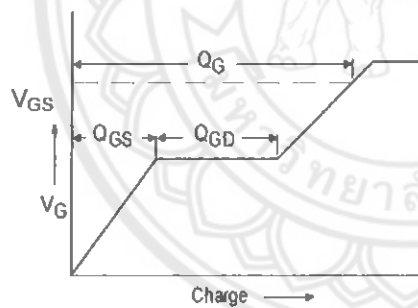


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

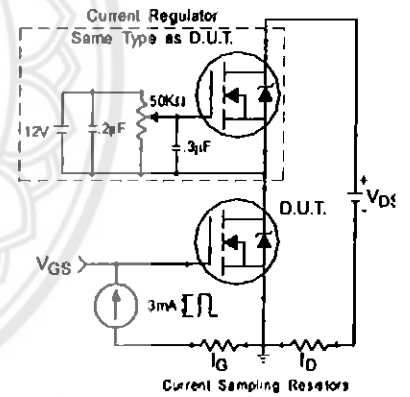
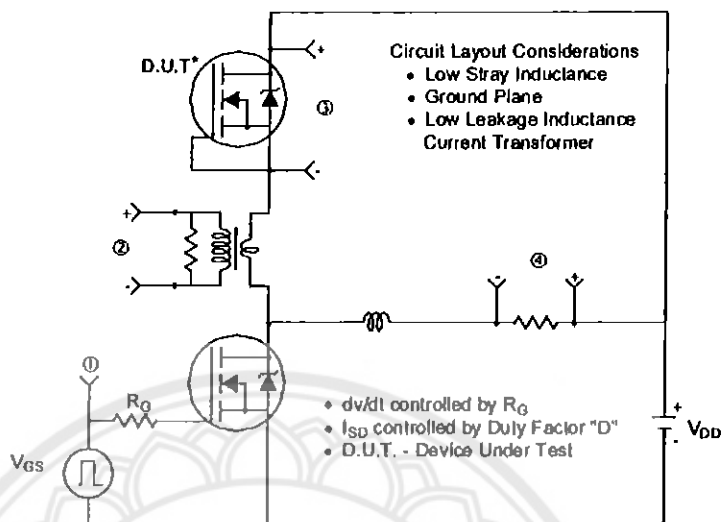
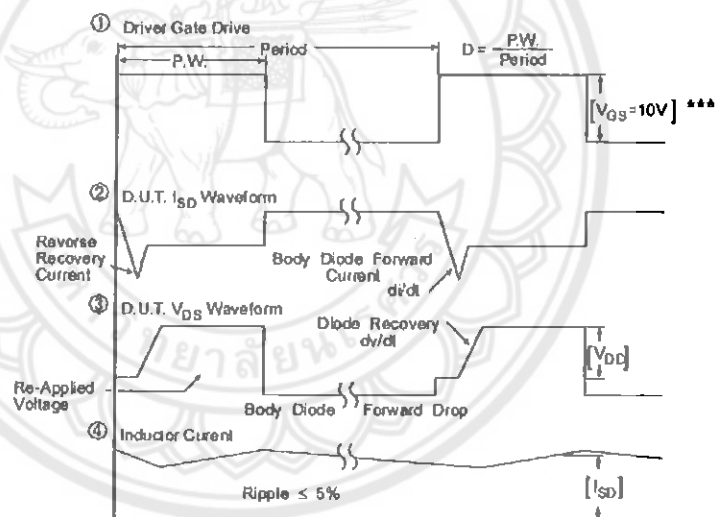


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit



\* Reverse Polarity of D.U.T for P-Channel



\*\*\*  $V_{GS} = 5.0V$  for Logic Level and 3V Drive Devices

Fig 14. For N-channel HEXFET® power MOSFETs

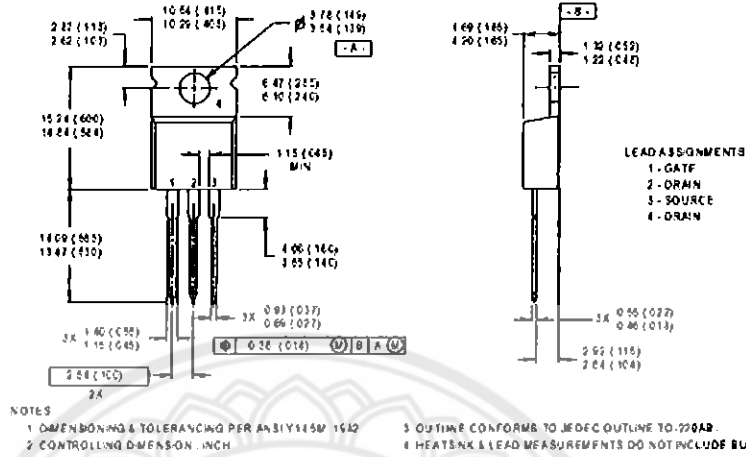
# IRF2807

International  
**IOR** Rectifier

## Package Outline

TO-220AB

Dimensions are shown in millimeters (inches)

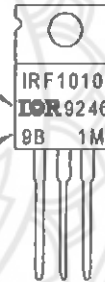


## Part Marking Information

TO-220AB

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

INTERNATIONAL  
RECTIFIER  
LOGO  
ASSEMBLY  
LOT CODE



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

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

International  
**IOR** Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105  
TAC Fax: (310) 252-7903  
Visit us at [www.irf.com](http://www.irf.com) for sales contact information. 3/01



ภาคผนวก (ง)

รายละเอียดของมอสเฟต IRF9540

**FAIRCHILD**  
SEMICONDUCTOR\*

**IRF9540, RF1S9540SM**

Data Sheet

January 2002

**19A, 100V, 0.200 Ohm, P-Channel Power MOSFETs**

These are P-Channel enhancement mode silicon gate power field effect transistors. They are advanced power MOSFETs designed, tested, and guaranteed to withstand a specified level of energy in the breakdown avalanche mode of operation. All of these power MOSFETs are designed for applications such as switching regulators, switching converters, motor drivers, relay drivers, and drivers for high power bipolar switching transistors requiring high speed and low gate drive power. They can be operated directly from integrated circuits.

Formerly Developmental Type TA17621.

**Ordering Information**

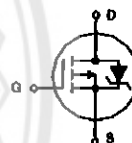
PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
IRF9540	TO-220AB	IRF9540
RF1S9540SM	TO-263AB	RF1S9540

NOTE: When ordering, use the entire part number. Add the suffix 9A to obtain the TO-263AB variant in the tape and reel, i.e., RF1S9540SM9A.

**Features**

- 19A, 100V
- $r_{DS(ON)} = 0.200\Omega$
- Single Pulse Avalanche Energy Rated
- SOA is Power Dissipation Limited
- Nanosecond Switching Speeds
- Linear Transfer Characteristics
- High Input Impedance
- Related Literature
  - TB334 "Guidelines for Soldering Surface Mount Components to PC Boards"

**Symbol**



**Packaging**



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

	IRF0540, RF150540SM	UNITS
Drain to Source Voltage (Note 1)	$V_{DS}$	-100 V
Drain to Gate Voltage ( $R_{GS} = 20k\Omega$ ) (Note 1)	$V_{DGR}$	-100 V
Continuous Drain Current	$I_D$	-19 A
$T_C = 100^\circ\text{C}$	$I_D$	-12 A
Pulsed Drain Current (Note 3)	$I_{DM}$	-76 A
Gate to Source Voltage	$V_{GS}$	$\pm 20$ V
Maximum Power Dissipation (Figure 1)	$P_D$	150 W
Linear Derating Factor (Figure 1)		1 W/°C
Single Pulse Avalanche Energy Rating (Note 4)	$E_{AS}$	560 mJ
Operating and Storage Temperature	$T_J, T_{STG}$	-55 to 175 °C
Maximum Temperature for Soldering		
Leads $\pm 10.053$ in (1.6mm) from Case for 10s	$T_L$	300 °C
Package Body for 10s, See Techbrief 334	$T_{pkg}$	260 °C

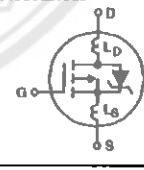
**CAUTION:** Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

**NOTE:**

- $T_J = 25^\circ\text{C}$  to  $150^\circ\text{C}$ .

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

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
Drain to Source Breakdown Voltage	$BV_{DSS}$	$I_D = -250\mu\text{A}, V_{GS} = 0\text{V}$ (Figure 10)	-100	-	-	V	
Gate to Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{DS}, I_D = -250\mu\text{A}$	-2	-	-4	V	
Zero Gate Voltage Drain Current	$I_{DSS}$	$V_{DS} = \text{Rated } BV_{DSS}, V_{GS} = 0\text{V}$ $V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } BV_{DSS}, V_{GS} = 0\text{V}, T_C = 125^\circ\text{C}$	-	-	-25	$\mu\text{A}$	
On-State Drain Current (Note 2)	$I_{D(ON)}$	$V_{DS} > I_{D(ON)} \times r_{DS(ON)} \text{ MAX}, V_{GS} = -10\text{V}$	-19	-	-	A	
Gate to Source Leakage Current	$I_{GSS}$	$V_{GS} = \pm 20\text{V}$	-	-	$\pm 100$	nA	
Drain to Source On Resistance (Note 2)	$r_{DS(ON)}$	$I_D = -10\text{A}, V_{GS} = -10\text{V}$ (Figures 8, 9)	-	0.150	0.200	$\Omega$	
Forward Transconductance (Note 2)	$g_{fs}$	$V_{DS} > I_{D(ON)} \times r_{DS(ON)} \text{ MAX}, I_D = -6\text{A}$ (Figure 12)	5	7	-	S	
Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$	$V_{DD} = -50\text{V}, I_D = -19\text{A}, R_G = 9.1\Omega, R_L = 23\Omega,$ $V_{GS} = -10\text{V}$ (Figures 17, 18)	-	16	20	ns	
Rise Time	$t_r$	MOSFET Switching Times are Essentially Independent of Operating Temperature	-	65	100	ns	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$		-	47	70	ns	
Fall Time	$t_f$		-	28	70	ns	
Total Gate Charge (Gate to Source + Gate to Drain)	$Q_{g(TOT)}$	$V_{GS} = -10\text{V}, I_D = -18\text{A}, V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } BV_{DSS}$ $I_{g(REF)} = -1.5\text{mA}$ (Figures 14, 19, 20)	-	70	90	nC	
Gate to Source Charge	$Q_{gs}$	Gate Charge is Essentially Independent of Operating Temperature	-	14	-	nC	
Gate to Drain "Miller" Charge	$Q_{gd}$		-	56	-	nC	
Input Capacitance	$C_{iss}$	$V_{DS} = -25\text{V}, V_{GS} = 0\text{V}, f = 1\text{MHz}$ (Figure 11)	-	1100	-	pF	
Output Capacitance	$C_{oss}$		-	550	-	pF	
Reverse Transfer Capacitance	$C_{rss}$		-	250	-	pF	
Internal Drain Inductance	$L_D$	Measured From the Contact Screw on Tab to the Center of Die	Modified MOSFET Symbol Showing the Internal Devices Inductances	-	3.5	-	nH
		Measured From the Drain Lead, 6mm (0.25in) from Package to the Center of Die		-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	$L_S$	Measured From the Source Lead, 6mm (0.25in) from Package to Source Bonding Pad	-	7.5	-	nH	
Thermal Resistance Junction to Case	$R_{\theta JC}$		-	-	1	$^\circ\text{C/W}$	
Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	Typical Socket Mount	-	-	62.5	$^\circ\text{C/W}$	



Source to Drain Diode Specifications

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Continuous Source to Drain Current	$I_{SD}$	Modified MOSFET Symbol Showing the Integral Reverse P-N Junction Diode	-	-	-18	A
Pulse Source to Drain Current (Note 3)	$I_{SDM}$		-	-	-76	A
Source to Drain Diode Voltage (Note 2)	$V_{SD}$	$T_C = 25^\circ\text{C}$ , $I_{SD} = -19\text{A}$ , $V_{GS} = 0\text{V}$ (Figure 13)	-	-	-1.5	V
Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$T_J = 150^\circ\text{C}$ , $I_{SD} = 19\text{A}$ , $dI_{SD}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	170	-	ns
Reverse Recovery Charge	$Q_{RR}$	$T_J = 150^\circ\text{C}$ , $I_{SD} = 19\text{A}$ , $dI_{SD}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	0.8	-	$\mu\text{C}$

NOTES:

2. Pulse test: pulse width  $\leq 300\mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 2\%$ .
3. Repetitive rating: pulse width limited by maximum junction temperature. See Transient Thermal Impedance curve (Figure 3).
4.  $V_{DD} = 25\text{V}$ , starting  $T_J = 25^\circ\text{C}$ ,  $L = 4\text{mH}$ ,  $R_G = 25\Omega$ , peak  $I_{AS} = 19\text{A}$ , (Figures 15, 16).

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified

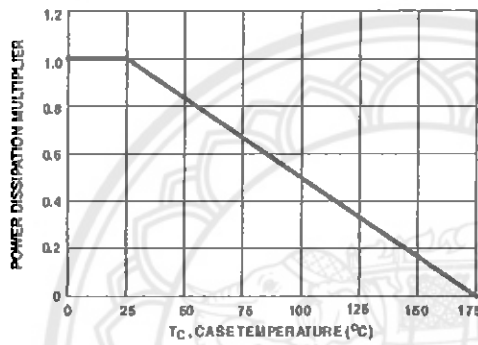


FIGURE 1. NORMALIZED POWER DISSIPATION vs CASE TEMPERATURE

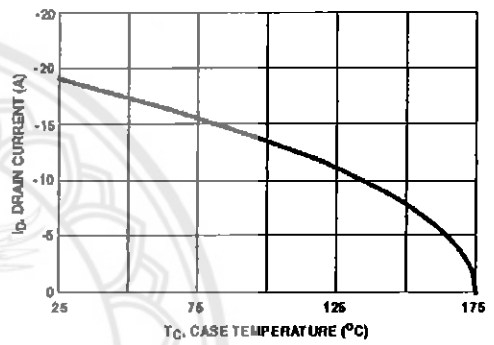


FIGURE 2. MAXIMUM CONTINUOUS DRAIN CURRENT vs CASE TEMPERATURE

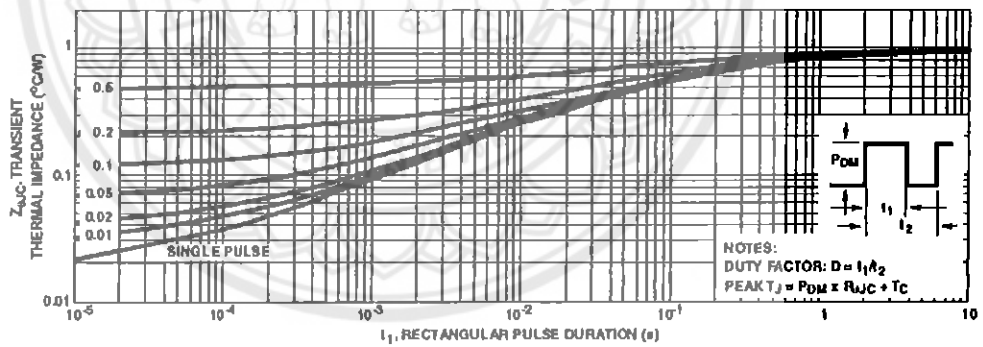


FIGURE 3. NORMALIZED MAXIMUM TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified (Continued)

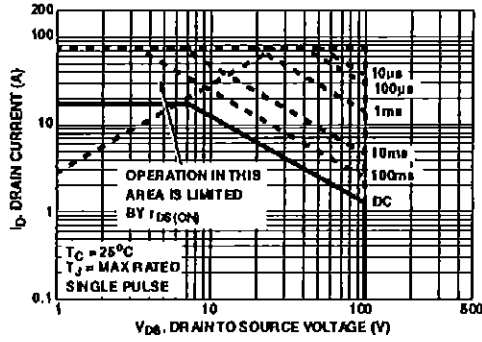


FIGURE 4. FORWARD BIAS SAFE OPERATING AREA

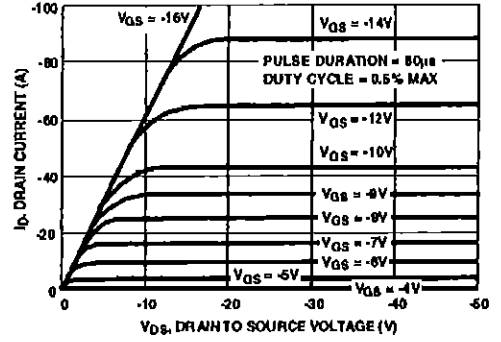


FIGURE 5. OUTPUT CHARACTERISTICS

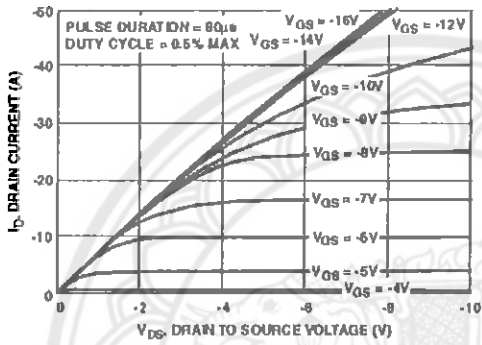


FIGURE 6. SATURATION CHARACTERISTICS

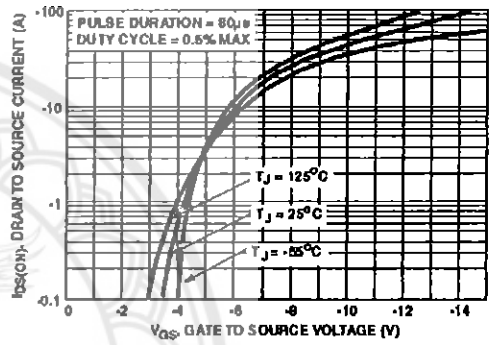
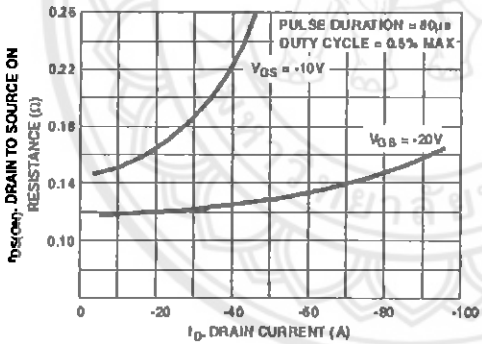


FIGURE 7. TRANSFER CHARACTERISTICS



NOTE: Heating effect of 2µs pulse is minimal.  
FIGURE 8. DRAIN TO SOURCE ON RESISTANCE vs. GATE VOLTAGE AND DRAIN CURRENT

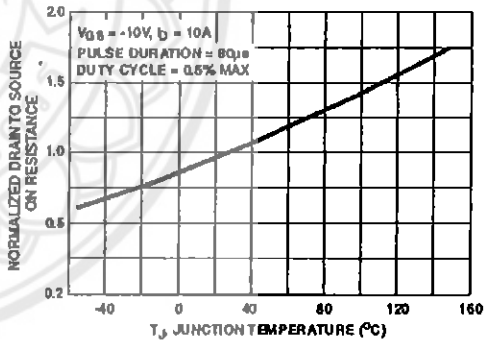


FIGURE 9. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE ON RESISTANCE vs. JUNCTION TEMPERATURE

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified (Continued)

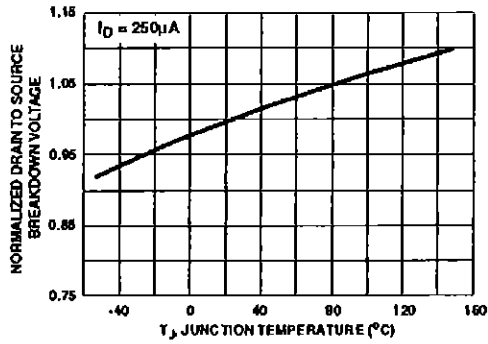


FIGURE 10. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE BREAKDOWN VOLTAGE vs JUNCTION TEMPERATURE

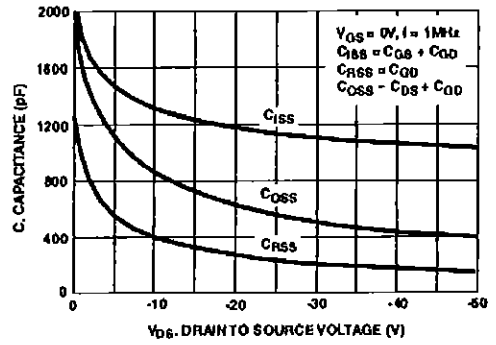


FIGURE 11. CAPACITANCE vs DRAIN TO SOURCE VOLTAGE

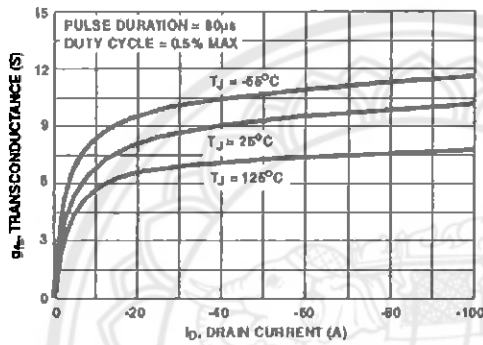


FIGURE 12. TRANSCONDUCTANCE vs DRAIN CURRENT

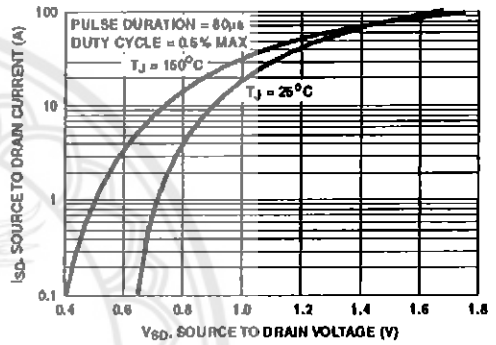


FIGURE 13. SOURCE TO DRAIN DIODE VOLTAGE

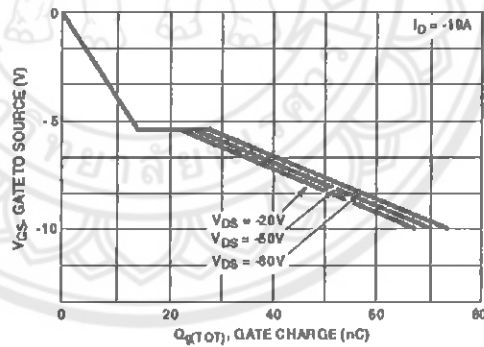


FIGURE 14. GATE TO SOURCE VOLTAGE vs GATE CHARGE

Test Circuits and Waveforms

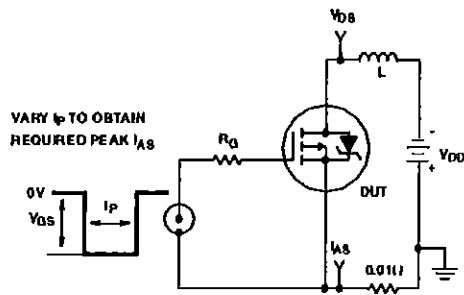


FIGURE 15. UNCLAMPED ENERGY TEST CIRCUIT

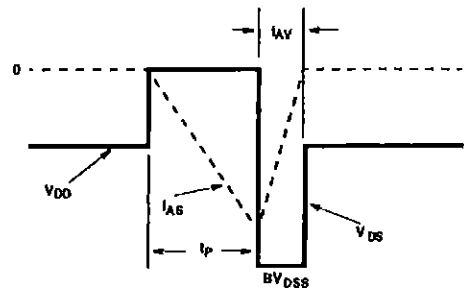


FIGURE 16. UNCLAMPED ENERGY WAVEFORMS

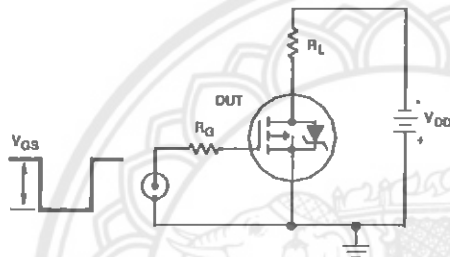


FIGURE 17. SWITCHING TIME TEST CIRCUIT

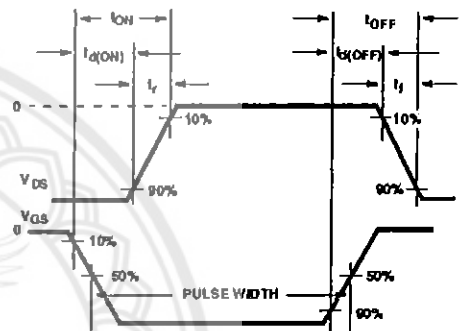


FIGURE 18. RESISTIVE SWITCHING WAVEFORMS

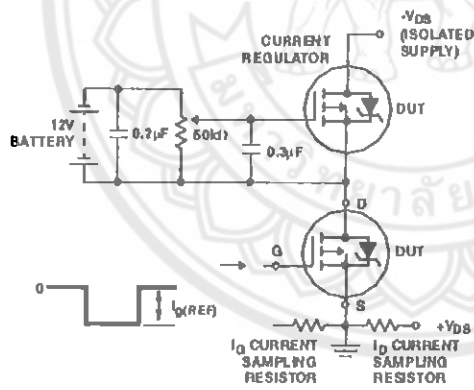


FIGURE 19. GATE CHARGE TEST CIRCUIT

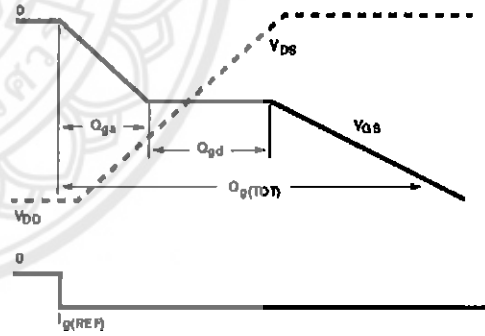


FIGURE 20. GATE CHARGE WAVEFORMS

**TRADEMARKS**

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

ACEx™	FAST <sup>®</sup>	OPTOLOGIC™	SMART START™	VCX™
Bottomless™	FASTr™	OPTOPLANAR™	STAR*POWER™	
CodFET™	FRFET™	PACMAN™	Stealth™	
CROSSVOLT™	GlobalOptoisolator™	POP™	SuperSOT™-3	
DenseTrench™	GTO™	Power247™	SuperSOT™-6	
DOME™	HiSeC™	PowerTrench <sup>®</sup>	SuperSOT™-8	
EcoSPARK™	ISOPLANAR™	QFET™	SyncFET™	
E <sup>2</sup> CMOS™	LittleFET™	QS™	TinyLogic™	
EnSigna™	MicroFET™	QT Optoelectronics™	TruTranslation™	
FACT™	MicroPak™	Quiet Series™	UHC™	
FACT Quiet Series™	MICROWIRE™	SILENT SWITCHER <sup>®</sup>	UltraFET <sup>®</sup>	

STAR\*POWER is used under license

**DISCLAIMER**

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

**LIFE SUPPORT POLICY**

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

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.

2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.


**PRODUCT STATUS DEFINITIONS**

**Definition of Terms**

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

ภาคผนวก (จ)

รายละเอียดของ TC4467

 **MICROCHIP TC4467/TC4468/TC4469**

**Logic-Input CMOS Quad Drivers**

**Features**

- High Peak Output Current: 1.2 A
- Wide Operating Range:
  - 4.5 V to 18 V
- Symmetrical Rise/Fall Times: 25 nsec
- Short, Equal Delay Times: 75 nsec
- Latch-proof. Will Withstand 500 mA Inductive Kickback
- 3 Input Logic Choices:
  - AND / NAND / AND + Inv
- ESD Protection on All Pins: 2 kV

**Applications**

- General Purpose CMOS Logic Buffer
- Driving All Four MOSFETs in an H-Bridge
- Direct Small Motor Driver
- Relay or Peripheral Drivers
- CCD Driver
- Pin-Switching Network Driver

**General Description**

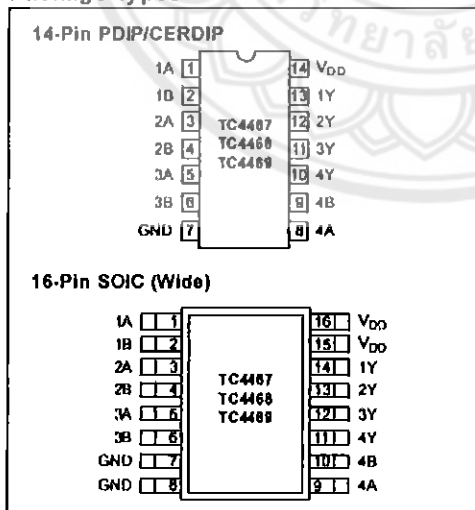
The TC4467/TC4468/TC4469 devices are a family of four-output CMOS buffers/MOSFET drivers with 1.2 A peak drive capability. Unlike other MOSFET drivers, these devices have two inputs for each output. The inputs are configured as logic gates: NAND (TC4467), AND (TC4468) and AND/INV (TC4469).

The TC4467/TC4468/TC4469 drivers can continuously source up to 250 mA into ground referenced loads. These devices are ideal for direct driving low current motors or driving MOSFETs in a H-bridge configuration for higher current motor drive (see Section 5.0 for details). Having the logic gates onboard the driver can help to reduce component count in many designs.

The TC4467/TC4468/TC4469 devices are very robust and highly latch-up resistant. They can tolerate up to 5 V of noise spiking on the ground line and can handle up to 0.5 A of reverse current on the driver outputs.

The TC4467/4468/4469 devices are available in commercial, industrial and military temperature ranges.

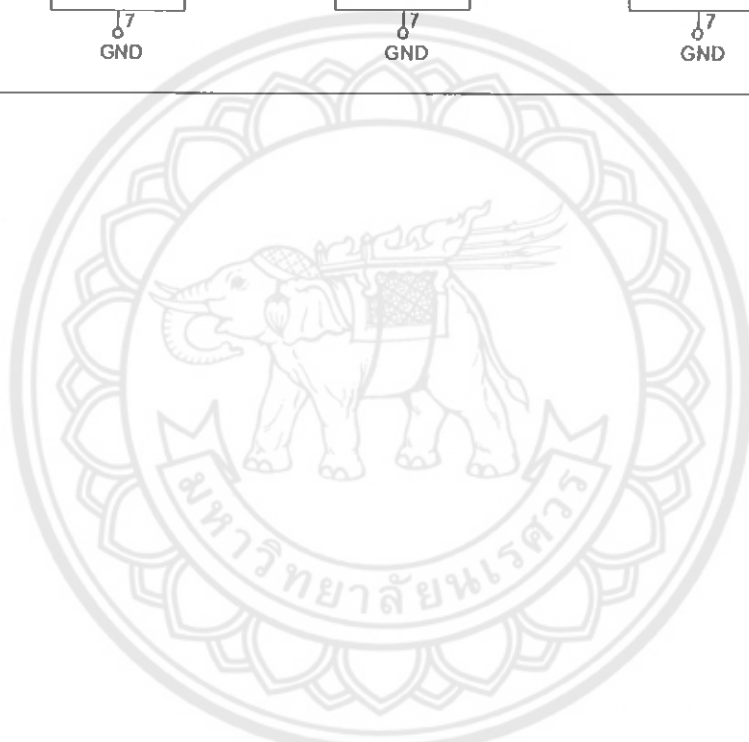
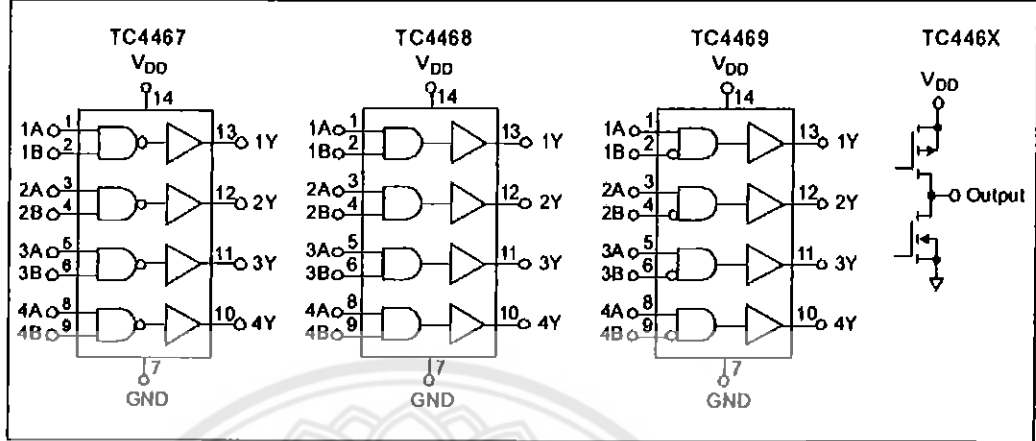
**Package Types**





# TC4467/TC4468/TC4469

## Logic Diagrams



# TC4467/TC4468/TC4469

## 1.0 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

### Absolute Maximum Ratings†

Supply Voltage	+20V
Input Voltage	(GND - 5 V) to (V <sub>DD</sub> + 0.3 V)
Package Power Dissipation: (T <sub>A</sub> ≤ 70°C)	
PDIP	800 mW
CERDIP	840 mW
SOIC	760 mW
Package Thermal Resistance	
CERDIP R <sub>θJA</sub>	100°C/W
CERDIP R <sub>θJC</sub>	23°C/W
PDIP R <sub>θJA</sub>	80°C/W
PDIP R <sub>θJC</sub>	35°C/W
SOIC R <sub>θJA</sub>	95°C/W
SOIC R <sub>θJC</sub>	28°C/W
Operating Temperature Range:	
C Version	0°C to +70°C
E Version	-40°C to +85°C
M Version	-55°C to +125°C
Maximum Chip Temperature	+150°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C

†Notice: Stresses above those listed under "Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at those or any other conditions above those indicated in the operation listings of this specification is not implied. Exposure to maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

### ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Electrical Characteristics: Unless otherwise noted, T <sub>A</sub> = +25°C, with 4.5 V ≤ V <sub>DD</sub> ≤ 18 V.						
Parameters	Sym	Min	Typ	Max	Units	Conditions
<b>Input</b>						
Logic 1, High Input Voltage	V <sub>IH</sub>	2.4	—	V <sub>DD</sub>	V	Note 3
Logic 0, Low Input Voltage	V <sub>IL</sub>	—	—	0.8	V	Note 3
Input Current	I <sub>IN</sub>	-1.0	—	+1.0	μA	0 V ≤ V <sub>IN</sub> ≤ V <sub>DD</sub>
<b>Output</b>						
High Output Voltage	V <sub>OH</sub>	V <sub>DD</sub> - 0.025	—	—	V	I <sub>LOAD</sub> = 100 μA (Note 1)
Low Output Voltage	V <sub>OL</sub>	—	—	0.15	V	I <sub>LOAD</sub> = 10 mA (Note 1)
Output Resistance	R <sub>O</sub>	—	10	15	Ω	I <sub>OUT</sub> = 10 mA, V <sub>DD</sub> = 18 V
Peak Output Current	I <sub>PK</sub>	—	1.2	—	A	
Continuous Output Current	I <sub>DC</sub>	—	—	300	mA	Single Output
				500	mA	Total Package
Latch-Up Protection Withstand Reverse Current	I	—	500	—	mA	4.5 V ≤ V <sub>DD</sub> ≤ 18 V
<b>Switching Time (Note 1)</b>						
Rise Time	t <sub>R</sub>	—	15	25	nsec	Figure 4-1
Fall Time	t <sub>F</sub>	—	15	25	nsec	Figure 4-1
Delay Time	t <sub>D1</sub>	—	40	75	nsec	Figure 4-1
Delay Time	t <sub>D2</sub>	—	40	75	nsec	Figure 4-1
<b>Power Supply</b>						
Power Supply Current	I <sub>S</sub>	—	1.5	4	mA	
Power Supply Voltage	V <sub>DD</sub>	4.5	—	18	V	Note 2

- Note 1:** Totem pole outputs should not be paralleled because the propagation delay differences from one to the other could cause one driver to drive high a few nanoseconds before another. The resulting current spike, although short, may decrease the life of the device. Switching times are ensured by design.
- Note 2:** When driving all four outputs simultaneously in the same direction, V<sub>DD</sub> will be limited to 18 V. This reduces the chance that internal diodes will cause high-power dissipation in the device.
- Note 3:** The input threshold has approximately 50 mV of hysteresis centered at approximately 1.5 V. Input rise times should be kept below 5 μsec to avoid high internal peak currents during input transitions. Static input levels should also be maintained above the maximum, or below the minimum, input levels specified in the "Electrical Characteristics" to avoid increased power dissipation in the device.

# TC4467/TC4468/TC4469

## ELECTRICAL SPECIFICATIONS (OPERATING TEMPERATURES)

Electrical Characteristics: Unless otherwise noted, over operating temperature range with $4.5\text{ V} \leq V_{DD} \leq 18\text{ V}$ .						
Parameters	Sym	Min	Typ	Max	Units	Conditions
<b>Input</b>						
Logic 1, High Input Voltage	$V_{IH}$	2.4	—	—	V	Note 3
Logic 0, Low Input Voltage	$V_{IL}$	—	—	0.8	V	Note 3
Input Current	$I_{IN}$	-10	—	10	$\mu\text{A}$	$0\text{ V} \leq V_{IN} \leq V_{DD}$
<b>Output</b>						
High Output Voltage	$V_{OH}$	$V_{DD} - 0.025$	—	—	V	$I_{LOAD} = 100\ \mu\text{A}$ (Note 1)
Low Output Voltage	$V_{OL}$	—	—	0.30	V	$I_{LOAD} = 10\ \text{mA}$ (Note 1)
Output Resistance	$R_O$	—	20	30	$\Omega$	$I_{OUT} = 10\ \text{mA}$ , $V_{DD} = 18\ \text{V}$
Peak Output Current	$I_{PK}$	—	1.2	—	A	
Continuous Output Current	$I_{OC}$	—	—	300	mA	Single Output
		—	—	500		Total Package
Latch-Up Protection Withstand Reverse Current	$I$	—	500	—	mA	$4.5\text{ V} \leq V_{DD} \leq 18\text{ V}$
<b>Switching Time (Note 1)</b>						
Rise Time	$t_R$	—	15	50	nsec	Figure 4-1
Fall Time	$t_F$	—	15	50	nsec	Figure 4-1
Delay Time	$t_{D1}$	—	40	100	nsec	Figure 4-1
Delay Time	$t_{D2}$	—	40	100	nsec	Figure 4-1
<b>Power Supply</b>						
Power Supply Current	$I_S$	—	—	8	mA	
Power Supply Voltage	$V_{DD}$	4.5	—	18	V	Note 2

- Note 1: Totem pole outputs should not be paralleled because the propagation delay differences from one to the other could cause one driver to drive high a few nanoseconds before another. The resulting current spike, although short, may decrease the life of the device. Switching times are ensured by design.
- Note 2: When driving all four outputs simultaneously in the same direction,  $V_{DD}$  will be limited to 18 V. This reduces the chance that internal dv/dt will cause high-power dissipation in the device.
- Note 3: The input threshold has approximately 50 mV of hysteresis centered at approximately 1.6 V. Input rise times should be kept below 5  $\mu\text{sec}$  to avoid high internal peak currents during input transitions. Static input levels should also be maintained above the maximum, or below the minimum, input levels specified in the "Electrical Characteristics" to avoid increased power dissipation in the device.

## TRUTH TABLE

Part No.	TC4467 NAND				TC4468 AND				TC4469 AND/INV			
Inputs A	H	H	L	L	H	H	L	L	H	H	L	L
Inputs B	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L
Outputs TC446X	L	H	H	H	H	L	L	L	L	H	L	L

Legend: H = High L = Low

# TC4467/TC4468/TC4469

## 2.0 TYPICAL PERFORMANCE CURVES

**Note:** The graphs and tables provided following this note are a statistical summary based on a limited number of samples and are provided for informational purposes only. The performance characteristics listed herein are not tested or guaranteed. In some graphs or tables, the data presented may be outside the specified operating range (e.g., outside specified power supply range) and therefore outside the warranted range.

**Note:**  $T_A = +25^\circ\text{C}$ , with  $4.5\text{ V} \leq V_{DD} \leq 18\text{ V}$ .

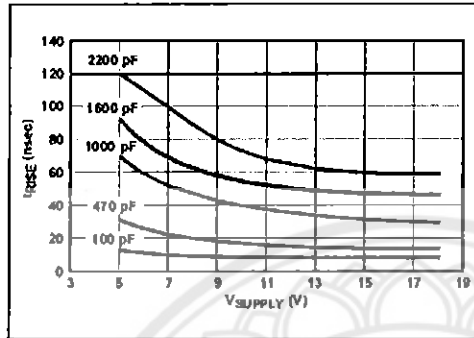


FIGURE 2-1: Rise Time vs. Supply Voltage.

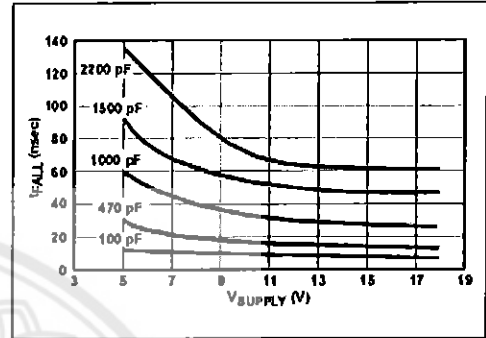


FIGURE 2-4: Fall Time vs. Supply Voltage.

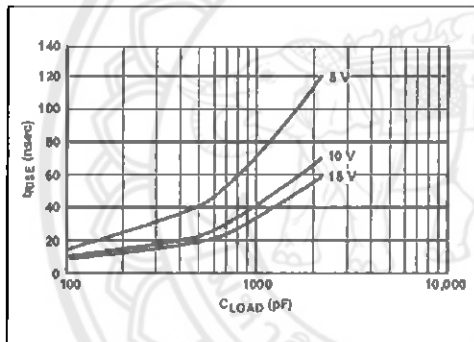


FIGURE 2-2: Rise Time vs. Capacitive Load.

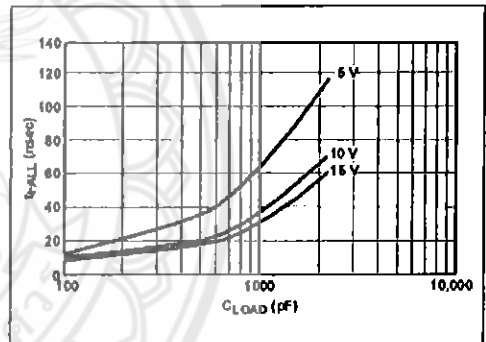


FIGURE 2-5: Fall Time vs. Capacitive Load.

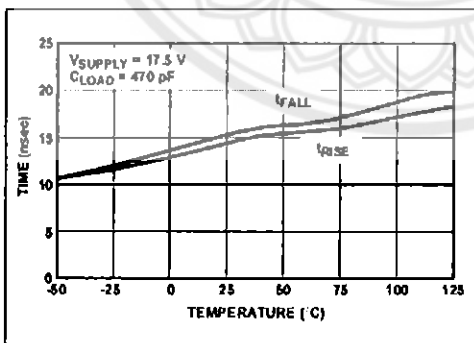


FIGURE 2-3: Rise/Fall Times vs. Temperature.

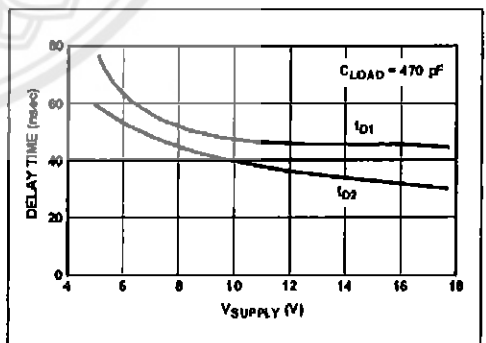


FIGURE 2-6: Propagation Delay Time vs. Supply Voltage.

# TC4467/TC4468/TC4469

## 2.0 TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONTINUED)

Note:  $T_A = +25^\circ\text{C}$ . with  $4.5\text{ V} \leq V_{DD} \leq 18\text{ V}$ .

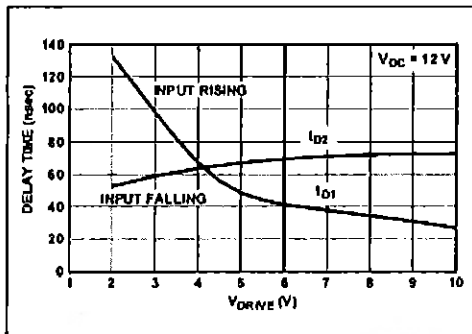


FIGURE 2-7: Input Amplitude vs. Delay Times.

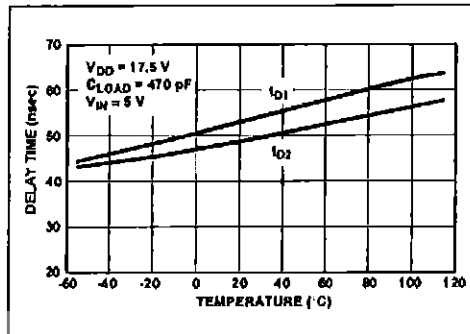


FIGURE 2-10: Propagation Delay Times vs. Temperatures.

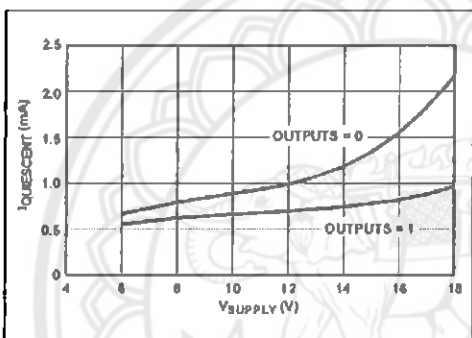


FIGURE 2-8: Quiescent Supply Current vs. Supply Voltage.

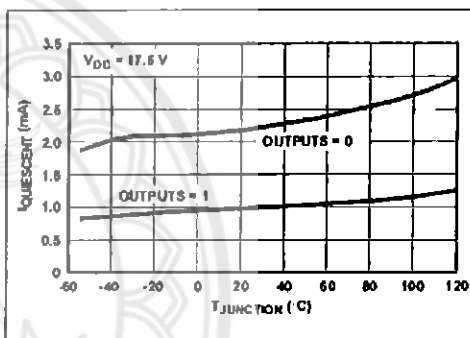


FIGURE 2-11: Quiescent Supply Current vs. Temperature.

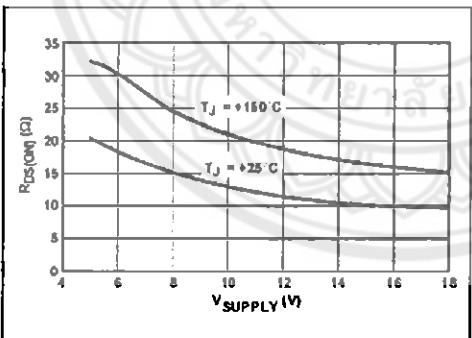


FIGURE 2-9: High-State Output Resistance.

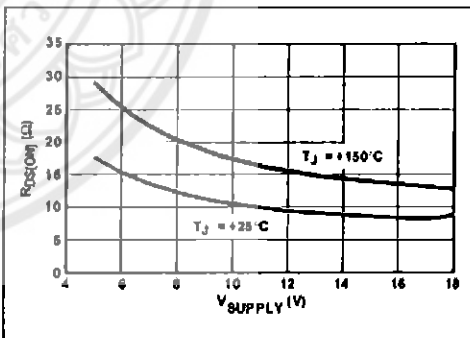


FIGURE 2-12: Low-State Output Resistance.

# TC4467/TC4468/TC4469

## 2.0 TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONTINUED)

Note: (Load on single output only).

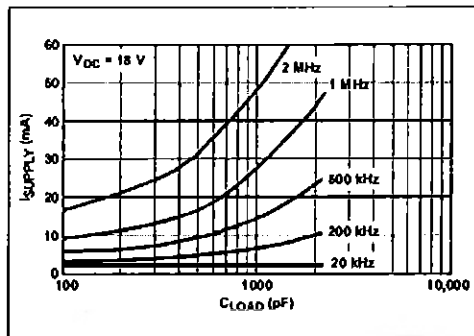


FIGURE 2-13: Supply Current vs. Capacitive Load.

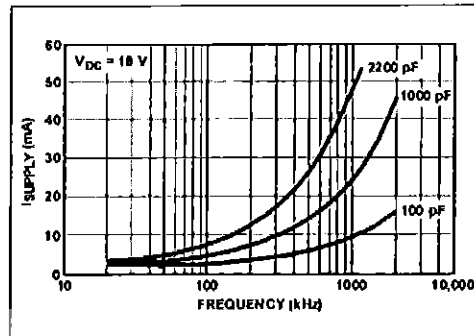


FIGURE 2-16: Supply Current vs. Frequency.

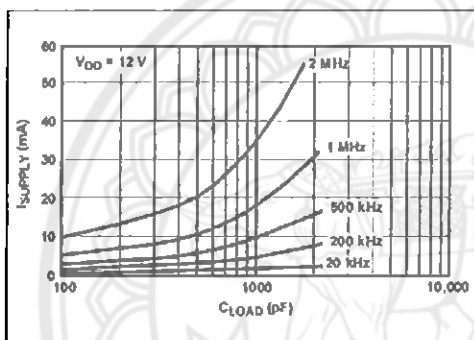


FIGURE 2-14: Supply Current vs. Capacitive Load.

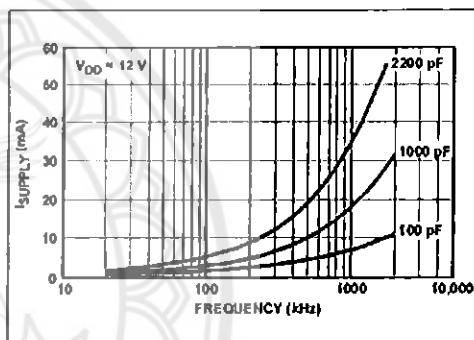


FIGURE 2-17: Supply Current vs. Frequency.

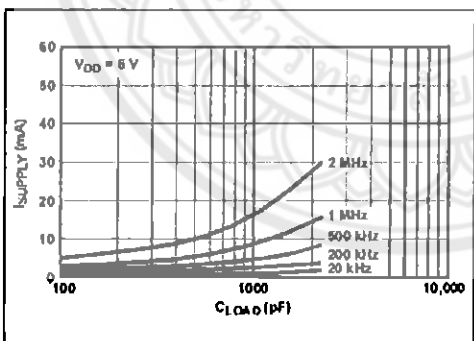


FIGURE 2-15: Supply Current vs. Capacitive Load.

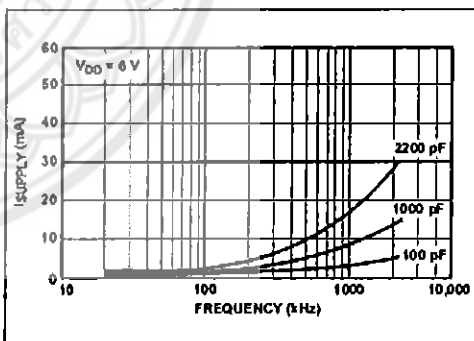


FIGURE 2-18: Supply Current vs. Frequency.

## TC4467/TC4468/TC4469

### 3.0 PIN DESCRIPTIONS

The descriptions of the pins are listed in Table 3-1.

TABLE 3-1: PIN FUNCTION TABLE

14-Pin PDIP, CERDIP	16-Pin SOIC (Wide)	Description
Symbol	Symbol	
1A	1A	Input A for Driver 1, TTL/CMOS Compatible Input
1B	1B	Input B for Driver 1, TTL/CMOS Compatible Input
2A	2A	Input A for Driver 2, TTL/CMOS Compatible Input
2B	2B	Input B for Driver 2, TTL/CMOS Compatible Input
3A	3A	Input A for Driver 3, TTL/CMOS Compatible Input
3B	3B	Input B for Driver 3, TTL/CMOS Compatible Input
GND	GND	Ground
—	GND	Ground
4A	4A	Input A for Driver 4, TTL/CMOS Compatible Input
4B	4B	Input B for Driver 4, TTL/CMOS Compatible Input
4Y	4Y	Output for Driver 4, CMOS Push-Pull Output
3Y	3Y	Output for Driver 3, CMOS Push-Pull Output
2Y	2Y	Output for Driver 2, CMOS Push-Pull Output
1Y	1Y	Output for Driver 1, CMOS Push-Pull Output
V <sub>DD</sub>	V <sub>DD</sub>	Supply Input, 4.5 V to 18 V
—	V <sub>DD</sub>	Supply Input, 4.5 V to 18 V

## TC4467/TC4468/TC4469

### 4.0 DETAILED DESCRIPTION

#### 4.1 Supply Bypassing

Large currents are required to charge and discharge large capacitive loads quickly. For example, charging a 1000 pF load to 18 V in 25 nsec requires 0.72 A from the device's power supply.

To ensure low supply impedance over a wide frequency range, a 1  $\mu$ F film capacitor in parallel with one or two low-inductance, 0.1  $\mu$ F ceramic disk capacitors with short lead lengths (<0.5 in.) normally provide adequate bypassing.

#### 4.2 Grounding

The TC4467 and TC4469 contain inverting drivers. Potential drops developed in common ground impedances from input to output will appear as negative feedback and degrade switching speed characteristics. Instead, individual ground returns for input and output circuits, or a ground plane, should be used.

#### 4.3 Input Stage

The input voltage level changes the no-load or quiescent supply current. The N-channel MOSFET input stage transistor drives a 2.5 mA current source load. With logic "0" outputs, maximum quiescent supply current is 4 mA. Logic "1" output level signals reduce quiescent current to 1.4 mA, maximum. Unused driver inputs must be connected to  $V_{DD}$  or  $V_{SS}$ . Minimum power dissipation occurs for logic "1" outputs.

The drivers are designed with 50 mV of hysteresis, which provides clean transitions and minimizes output stage current spiking when changing states. Input voltage thresholds are approximately 1.5 V, making any voltage greater than 1.5 V, up to  $V_{DD}$ , a logic "1" input. Input current is less than 1  $\mu$ A over this range.

#### 4.4 Power Dissipation

The supply current versus frequency and supply current versus capacitive load characteristic curves will aid in determining power dissipation calculations. Microchip Technology's CMOS drivers have greatly reduced quiescent DC power consumption.

Input signal duty cycle, power supply voltage and load type influence package power dissipation. Given power dissipation and package thermal resistance, the maximum ambient operating temperature is easily calculated. The 14-pin plastic package junction-to-ambient thermal resistance is 83.3°C/W. At +70°C, the package is rated at 800 mW maximum dissipation. Maximum allowable chip temperature is +150°C.

Three components make up total package power dissipation:

1. Load-caused dissipation ( $P_L$ ).
2. Quiescent power ( $P_Q$ ).
3. Transition power ( $P_T$ ).

A capacitive-load-caused dissipation (driving MOSFET gates), is a direct function of frequency, capacitive load and supply voltage. The power dissipation is:

#### EQUATION

$$P_L = fCV_S^2$$

$f$  = Switching Frequency  
 $C$  = Capacitive Load  
 $V_S$  = Supply Voltage

A resistive-load-caused dissipation for ground-referenced loads is a function of duty cycle, load current and load voltage. The power dissipation is:

#### EQUATION

$$P_L = D(V_S - V_L)I_L$$

$D$  = Duty Cycle  
 $V_S$  = Supply Voltage  
 $V_L$  = Load Voltage  
 $I_L$  = Load Current



# TC4467/TC4468/TC4469

A resistive-load-caused dissipation for supply-referenced loads is a function of duty cycle, load current and output voltage. The power dissipation is

**EQUATION**

$$P_L = DV_O I_L$$

*D* = Duty Cycle  
*V<sub>O</sub>* = Device Output Voltage  
*I<sub>L</sub>* = Load Current

Quiescent power dissipation depends on input signal duty cycle. Logic HIGH outputs result in a lower power dissipation mode, with only 0.6 mA total current drain (all devices driven). Logic LOW outputs raise the current to 4 mA maximum. The quiescent power dissipation is:

**EQUATION**

$$P_Q = V_S(D(I_H) + (1 - D)I_L)$$

*I<sub>H</sub>* = Quiescent Current with all outputs LOW (4 mA max.)  
*I<sub>L</sub>* = Quiescent Current with all outputs HIGH (0.6 mA max.)  
*D* = Duty Cycle  
*V<sub>S</sub>* = Supply Voltage

Transition power dissipation arises in the complementary configuration (TC446X) because the output stage N-channel and P-channel MOS transistors are ON simultaneously for a very short period when the output changes. The transition power dissipation is approximately:

**EQUATION**

$$P_T = fV_S(10 \times 10^{-9})$$

*C* = 1000 pF Capacitive Load  
*V<sub>S</sub>* = 15 V  
*D* = 50%  
*f* = 200 kHz  
*P<sub>D</sub>* = Package Power Dissipation  
 = *P<sub>L</sub>* + *P<sub>Q</sub>* + *P<sub>T</sub>*  
 = 45mW + 35mW + 30mW  
 = 110mW

Package power dissipation is the sum of load, quiescent and transition power dissipations. An example shows the relative magnitude for each term:

Maximum operating temperature is:

**EQUATION**

$$T_J - \theta_{JA}(P_D) = 141^\circ\text{C}$$

*T<sub>J</sub>* = Maximum allowable junction temperature (+150°C)  
*θ<sub>JA</sub>* = Junction-to-ambient thermal resistance (83.3°C/W) 14-pin plastic package

**Note:** Ambient operating temperature should not exceed +85°C for "EJD" device or +125°C for "MJD" device.

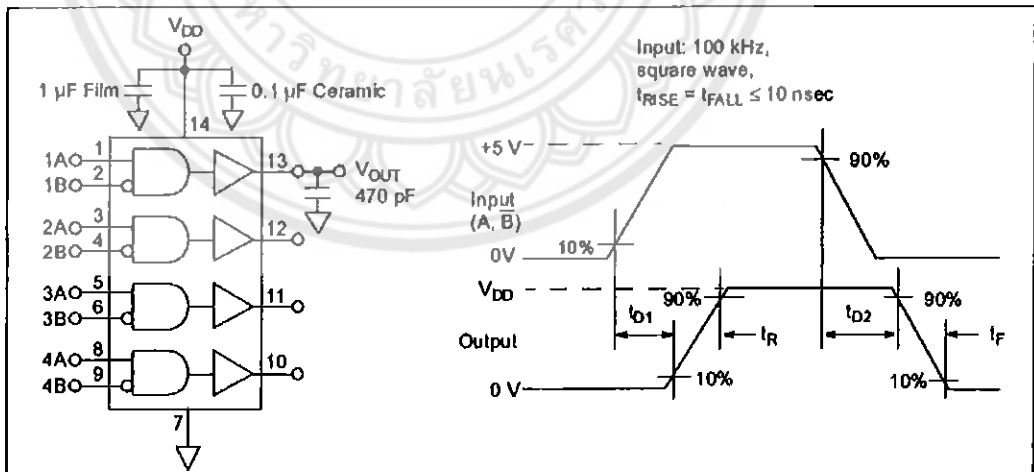


FIGURE 4-1: Switching Time Test Circuit.

# TC4467/TC4468/TC4469

## 5.0 APPLICATIONS INFORMATION

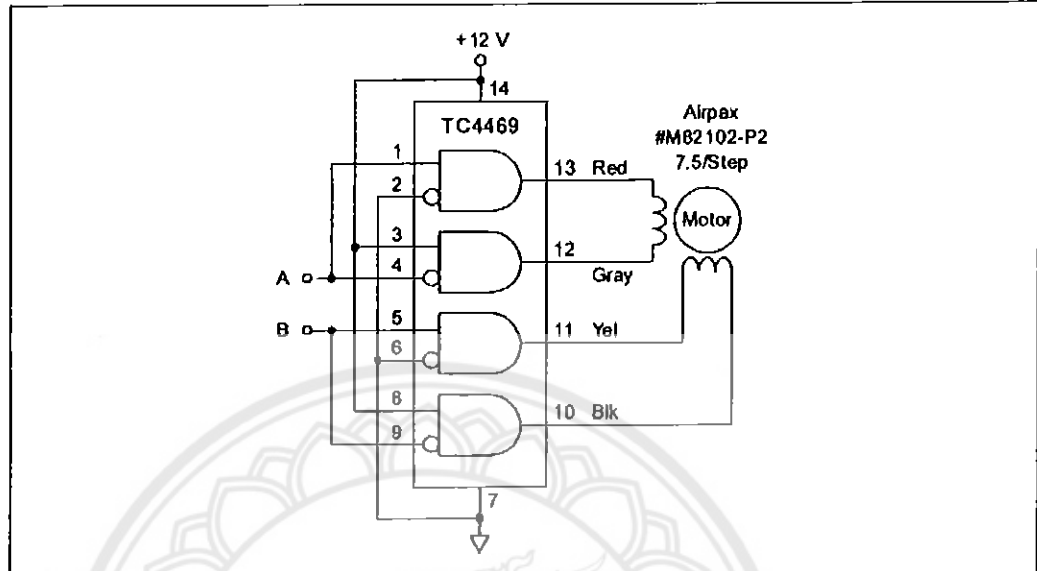


FIGURE 5-1: Stepper Motor Drive.

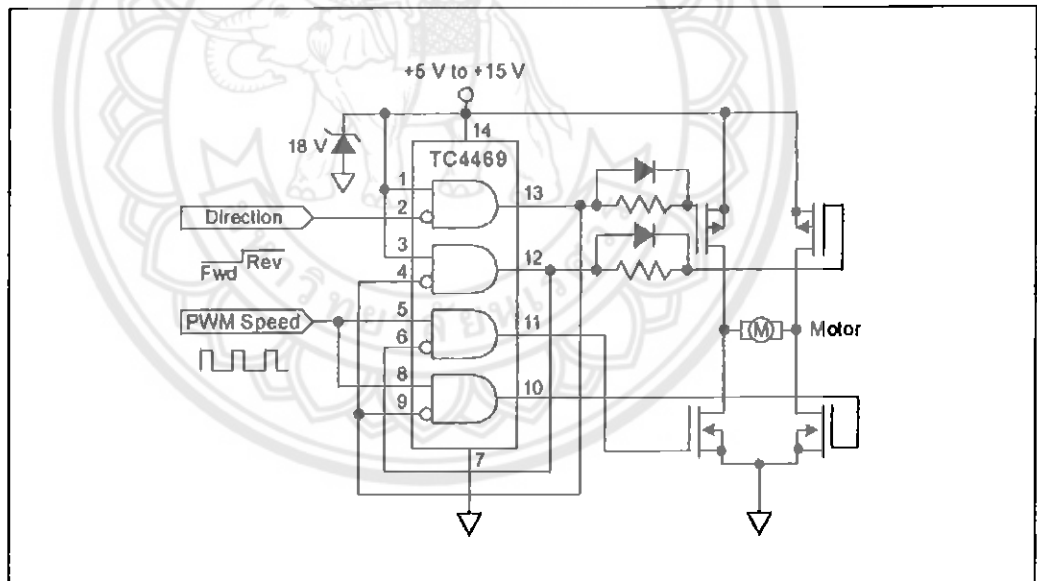


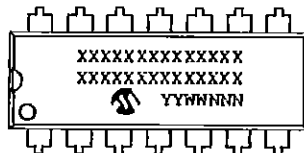
FIGURE 5-2: Quad Driver For H-bridge Motor Control.

# TC4467/TC4468/TC4469

## 6.0 PACKAGING INFORMATION

### 6.1 Package Marking Information

14-Lead PDIP (300 mil)



Example:



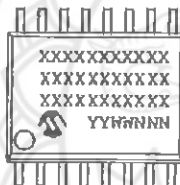
14-Lead CERDIP (300 mil)



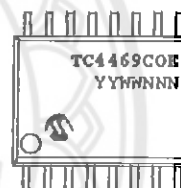
Example:



16-Lead SOIC (300 mil)



Example:



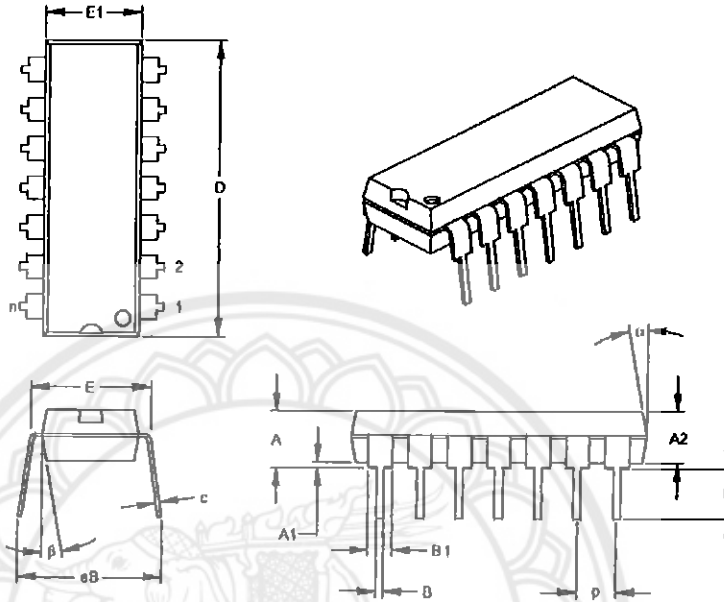
Legend: XX..X	Customer specific information*
YY	Year code (last 2 digits of calendar year)
WW	Week code (week of January 1 is week '01')
NNN	Alphanumeric traceability code

**Note:** In the event the full Microchip part number cannot be marked on one line, it will be carried over to the next line thus limiting the number of available characters for customer specific information.

\* Standard OTP marking consists of Microchip part number, year code, week code, facility code, mask rev#, and assembly code.

# TC4467/TC4468/TC4469

## 14-Lead Plastic Dual In-line (P) – 300 mil (PDIP)



Dimension Limits	Units	INCHES*			MILLIMETERS		
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
Number of Pins	n		14			14	
Pitch	p		.100			2.54	
Top to Sealing Plane	A	.140	.155	.170	3.58	3.94	4.32
Molded Package Thickness	A2	.115	.130	.145	2.92	3.30	3.68
Base to Sealing Plane	A1	.015			0.38		
Shoulder to Shoulder Width	E	.300	.313	.325	7.62	7.94	8.28
Molded Package Width	E1	.240	.250	.260	6.10	6.35	6.60
Overall Length	D	.740	.750	.760	18.80	19.05	19.30
Tip to Sealing Plane	L	.125	.130	.135	3.18	3.30	3.43
Lead Thickness	c	.008	.012	.015	0.20	0.29	0.38
Upper Lead Width	B1	.045	.058	.070	1.14	1.46	1.78
Lower Lead Width	B	.014	.018	.022	0.33	0.46	0.56
Overall Row Spacing	§ eB	.310	.370	.430	7.87	9.40	10.92
Mold Draft Angle Top	α	5	10	15	5	10	15
Mold Draft Angle Bottom	β	5	10	15	5	10	15

\* Controlling Parameter

§ Significant Characteristic

Notes:

Dimensions D and E1 do not include mold flash or protrusions. Mold flash or protrusions shall not exceed

.010" (0.254mm) per side.

JEDEC Equivalent: MS-001

Drawing No. CD4-005

## TC4467/TC4468/TC4469

### 14-Lead Ceramic Dual In-line – 300 mil (CERDIP)

