

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

Brushless DC Motor Controller

โดย

นายจักรพงษ์ มะลิมาตย์

นายอภิสิทธิ์ ประทุมวัน

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ชินภัทร นันทจิวารัชย์

๒๗
๑๑๑๓ ๕
๑๑๑๐

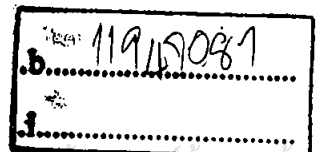
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 82455
วัน,เดือน,ปี..... 11 ก.ค. 2551

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

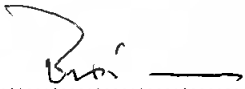
Brushless DC Motor Controller

ผู้จัดทำ

1. นายจักรพงษ์ มะลิมาตย์
2. นายอลิสิทธิ์ ประทุมวัน



รายงานฉบับนี้ได้รับการตรวจสอบแล้วพร้อมที่จะทำการสอบได้


.....

(ชินภัทร นันทจิวงกรชัย)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงาน ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

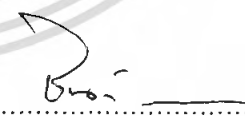
เรื่อง Brushless DC Motor Controller

ผู้จัดทำ

1. นายจักรพงษ์ มะลิมาตย์ รหัส 48015199

2. นายอภิสิทธิ์ ประทุมวัน รหัส 48015235




.....

(ชินภัทร นันทจิวารัชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

โดย

นายจักรพงษ์ มะลิมาตย์ รหัส 48015199

นายอภิสิทธิ์ ประทุมวัน รหัส 48015235

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. ชินภัทร นันทจิวงกรชัย

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ เป็นการนำเสนอโครงสร้าง หลักการทำงาน และส่วนของการควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ในส่วนของการควบคุมนั้นจะมีภาคตรวจจับสัญญาณ Back EMF เพื่อตรวจสอบตำแหน่งแกนแม่เหล็กของมอเตอร์ และนำตำแหน่งที่ได้ไปเข้าภาคควบคุมหลัก ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้เทคนิคพัลส์วิดิมอดูเลชัน (Pulse Width Modulation) สร้างสัญญาณพัลส์ออกมาส่งให้ภาคขั้วมอเตอร์ ภาคนี้จะมีอุปกรณ์หลักคือ เฟต (FET) โดยจะทำงาน 6 สเต็ป เพื่อขั้วมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Brushless DC Motor Controller

By

Mr.Chakrapong Malimat ID 48015199

Mr.Apsit Prathumwan ID 48015235

Advisor

Mr.Chinnapat Nantajiwakornchai

Education year: 2007

Abstract

This report presents structure, operating principle and controller of brushless DC motor. Detect part is detect back-EMF to know rotor position, that use in main control. Microcontroller is employed as a main controller. The tasks of the microcontroller is generate pulse signal, which is generated by PWM techniques and sending the PWM signals to the driver part. The main components of driver part are FET, which operated 6 steps to drive motor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่สำคัญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	3
2.1.1 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	3
2.1.2 โครงสร้างและหลักการทำงาน	3
2.1.3 สเตเตอร์	4
2.1.4 โรเตอร์	5
2.1.5 Hall Sensors	6
2.1.6 หลักการทำงาน	8
2.1.7 กราฟคุณลักษณะของความเร็วรอบต่อแรงบิด	8
2.1.8 การเปรียบเทียบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านกับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ	9
2.1.9 ลำดับในการคอมมิวเตชัน	12
2.1.10 การควบคุมแบบลูปปิด	16
2.1.11 Back EMF	16
2.1.12 Sensorless Control	17
2.1.13 การเลือกขนาดมอเตอร์ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน	18
2.1.14 Speed Range	19
2.1.15 การปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	19
2.1.16 ลักษณะการนำไปใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	21
2.1.17 การควบคุมแบบสามเฟส	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎีที่สำคัญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)	25
2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	25
2.2.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์	25
2.2.2 หลักการทำงานของภาคอินเวอร์เตอร์	26
2.2.2.1 วิธีสร้างไฟฟ้ากระแสสลับจากไฟฟ้ากระแสตรง	26
2.2.2.2 วิธีการแปรความถี่	27
2.2.2.3 กรณีของไฟฟ้าสามเฟส	27
2.2.2.4 โครงสร้างส่วนที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์	28
2.2.2.5 การทำงานของทรานซิสเตอร์	29
2.2.2.6 วิธีการเปลี่ยนขนาดแรงดัน	29
บทที่ 3 ผลการดำเนินงาน	31
3.1 การทดลองและส่วนต่างๆของวงจร	31
3.1.1 มอเตอร์	31
3.1.2 วงจรตรวจจับ Back-EMF	34
3.1.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ ไดรฟ์เวอร์	36
3.1.4 เครื่องวัดความเร็วรอบ	40
3.1.5 การวัดความเร็วรอบมอเตอร์	44
บทที่ 4 สรุปปัญหาและวิจารณ์ผลการทดลอง	47
4.1 สรุปผลของโครงการ	47
4.2 ปัญหาของโครงการ	47
4.3 ข้อเสนอแนะ	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2-1 แสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน	10
ตารางที่ 2-2 แสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ	11
ตารางที่ 2-3 แสดงลำดับสำหรับการหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา	15
ตารางที่ 2-4 แสดงลำดับสำหรับการหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามทวนนาฬิกา	15
ตารางที่ 2-5 แสดงค่าความถี่ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบเครื่องวัดความเร็วรอบ	42
ตารางที่ 2-6 แสดงค่าความถี่ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบเครื่องวัดความเร็วรอบที่ทำการปรับแก้ค่าผิดพลาดแล้ว	43
ตารางที่ 2-7 แสดงตำแหน่งของ DIP SW ที่ความเร็วรอบต่างๆ	44
ตารางที่ 2-8 แสดงค่าความเร็วที่ได้จากการทดสอบวัดความเร็วรอบ	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2-1 แสดงสัญญาณ Back –EMF แบบ Trapezoidal	4
รูปที่ 2-2 แสดงสัญญาณ Back –EMF แบบ Sinusoidal	5
รูปที่ 2-3 แสดงสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	5
รูปที่ 2-4 แสดงลักษณะการจัดวางตำแหน่งของแม่เหล็กโรเตอร์แบบต่างๆ	6
รูปที่ 2-5 แสดงภาพตัดด้านข้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	7
รูปที่ 2-6 แสดงวงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	8
รูปที่ 2-7 แสดงกราฟลักษณะสมบัติของความเร็วรอบต่อแรงบิด	9
รูปที่ 2-8 แสดงสัญญาณ Hall Sensors ,Back EMF, แรงบิดทางเอาต์พุตและกระแสเฟส	13
รูปที่ 2-9 แสดงลำดับของการจ่ายกระแสให้กับขดลวด	14
รูปที่ 2-10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุม	15
รูปที่ 2-11 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ Sensorless Control	18
รูปที่ 2-12 แสดงกราฟความเร็ว Trapezoidal	20
รูปที่ 2-13 แสดงแรงดันพัลส์วัดที่มอเตอร์	21
รูปที่ 2-14 แสดงวงจรบริดจ์สามเฟส (a) มอเตอร์แบบวาย (b) มอเตอร์แบบเคลด้า	23
รูปที่ 2-15 แสดงรูปคลื่นกระแสสามเฟส Square wave Driver และ Sin wave Driver	24
รูปที่ 2-16 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์	25
รูปที่ 2-17 (a) แสดงวิธีการสร้างไฟฟ้ากระแสสลับ (b) แสดงรูปคลื่นกระแส	26
รูปที่ 2-18 แสดงรูปคลื่นไฟสลับความถี่ 1 Hz	27
รูปที่ 2-19 แสดงความถี่	27
รูปที่ 2-20 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสพื้นฐาน	28
รูปที่ 2-21 แสดงการสร้างไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส	28
รูปที่ 2-22 แสดงอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์	29
รูปที่ 2-23 แสดงทรานซิสเตอร์	29
รูปที่ 3-1 แสดงรูปของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	31
รูปที่ 3-2 แสดงลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	31
รูปที่ 3-3 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการหมุนมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยวัดเฟส U V เทียบเฟส W ซึ่งมีความต่างเฟส 60 องศา	32

รูปที่ 3-4 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการหมุนมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยวัดเฟส V เทียบเฟส U ซึ่งมีความต่างเฟส 60 องศา	32
รูปที่ 3-5 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการหมุนมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยวัดเฟส W U เทียบเฟส V ซึ่งมีความต่างเฟส 60 องศา	33
รูปที่ 3-6 แสดงวงจรตรวจจับ Back-EMF แล้วเปลี่ยนสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณที่เหมือนสัญญาณที่ได้จาก Hall Sensor	34
รูปที่ 3-7 แสดงสัญญาณที่ได้จาก Hall Sensor	35
รูปที่ 3-8 แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจร รูปที่ 3.6 คือ Sensor U เปรียบเทียบ Sensor V	35
รูปที่ 3-9 แสดงวงจร แอนด์ (AND) สัญญาณควบคุม กับ สัญญาณพัลส์วิดคมอดูเลชั่นที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจร ไคร์ฟเวอร์	36
รูปที่ 3-10 แสดงสัญญาณ พัลส์วิดคมอดูเลชั่นที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมี Duty Cycle 15 % และมีความถี่ 4 KHz	37
รูปที่ 3-11 แสดงสัญญาณ PWM กับ สัญญาณควบคุม ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์	37
รูปที่ 3-12 แสดงสัญญาณควบคุมที่ผ่านการแอนด์(AND) กับ สัญญาณ PWM	38
รูปที่ 3-13 แสดงสัญญาณที่ขาเกท (G) ของมอสเฟส ตัวบน เทียบกับ ตัวล่าง ของเฟส U	38
รูปที่ 3-14 แสดงสัญญาณที่ขาเกท (G) ของมอสเฟสตัวบนของเฟส U เทียบกับเฟส V	39
รูปที่ 3-15 แสดงสัญญาณที่ขาเกท (G) ของมอสเฟสตัวบนของเฟส U เทียบกับเฟส W	39
รูปที่ 3-16 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวัดความเร็ว	40
รูปที่ 3-17 แสดงวงจรวัดความเร็วรอบ	41
รูปที่ 3-18 แสดงการวัดความเร็วรอบ	41
รูปที่ 3-18 แสดงรูป DIP SW	44
รูปที่ 3-19 แสดง คริปสวิทช์ (DIPSW) ติดตั้งบนบอร์ดควบคุม	45
รูปที่ 3-20 แสดงบล็อกไดอะแกรมของชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	45
รูปที่ 3-21 แสดงสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรตรวจจับ Back emf	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัจจุบันได้มีการพัฒนามอเตอร์ชนิดใหม่ ซึ่งเรียกว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านหรือ Brushless DC Motor ซึ่งได้นำข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยมีลักษณะดังนี้คือ มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนแรงบิดค่อนข้างสูง ต้องการดูแลรักษาน้อยมาก มีอายุการใช้งานนาน ไม่มีแปรงถ่านทำให้ไม่มีกำลังสูญเสียที่แปรงถ่านและไม่มีอาร์คที่แปรงถ่าน จึงสามารถทำงานที่อยู่ใกล้กับสารไวไฟได้ จากข้อดีต่างๆที่กล่าวมาจึงทำให้มอเตอร์ชนิดนี้เริ่มใช้งานอย่างแพร่หลายในงานต่างๆ เพราะสามารถควบคุมความเร็วรอบในย่านที่กว้างและรักษาแรงบิดได้ตลอดย่านการใช้งาน โดยเฉพาะการควบคุมได้เร็วยิ่งขึ้น

คณะผู้จัดทำได้จัดสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยวิธีลูบปิด และควบคุมความเร็วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล AVR เพื่อใช้งานกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ที่ใช้เป็นเครื่องต้นกำลังในการเคลื่อนที่เชิงเส้นหรือการเคลื่อนที่ด้วยการหมุนอื่นๆต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยวิธีลูบปิด
2. เพื่อศึกษาหลักการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน
3. เพื่อศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยการควบคุมจาก PWM และควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ควบคุมการสร้างพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (PWM) เพื่อควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน
2. ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบลูบปิด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยวิธีลูปปิดควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
2. นำไปประยุกต์กับงานที่ต้องการมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านที่มีขนาดใหญ่กว่าได้ แต่อาจต้องปรับปรุงจอร์นเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับขนาดของมอเตอร์
3. ได้ความรู้เกี่ยวกับหลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่สำคัญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านให้เป็นไปได้ตามลักษณะที่ต้องการ ซึ่งในการจัดทำชุดควบคุมนี้ขึ้นมาจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีต่างๆดังต่อไปนี้

- 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน
- 2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR
- 2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

2.1 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

2.1.1 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน เป็นมอเตอร์ชนิดหนึ่งที่มีความนิยมนำมาใช้งานมากในปัจจุบันการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านในงานอุตสาหกรรม เช่น อุปกรณ์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ

จากข้อแสดงให้เห็นว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านนั้นไม่มีแปรงถ่านสำหรับการคอมมิวเตชัน แต่จะให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการคอมมิวเตชัน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านมีข้อดีกว่ามอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน และมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำคือ

- คุณลักษณะของกราฟความเร็วเทียบกับแรงบิดดีกว่า DC Motor
- การตอบสนองทางไดนามิกเร็วกว่า
- มีอายุการใช้งานนาน
- ไม่มีเสียงดังรบกวนขณะใช้งาน
- มีความเร็วสูงกว่า

อีกอย่างหนึ่งอัตราส่วนของแรงบิดเมื่อเทียบกับขนาดของมอเตอร์มีค่าสูงกว่า ทำให้เป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานในที่ที่มีการจำกัดพื้นที่และน้ำหนัก

2.1.2 โครงสร้างและหลักการทำงาน

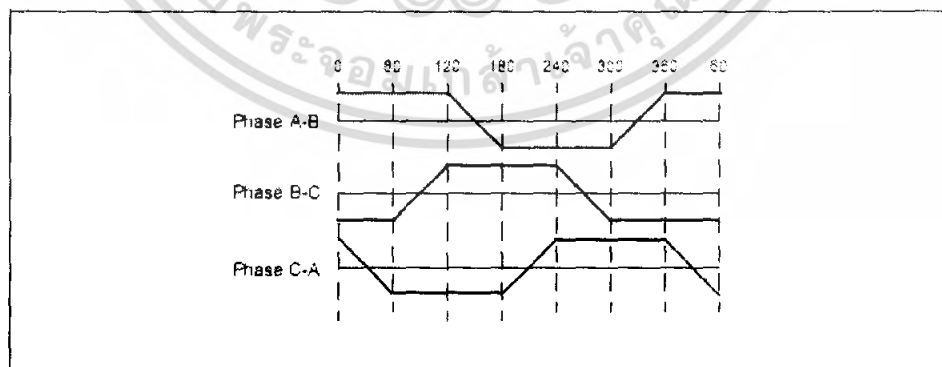
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน เป็นมอเตอร์ชนิดซิงโครนัสมอเตอร์คือ โรเตอร์จะหมุนไปพร้อมกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ ที่ความถี่เดียวกัน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน จะไม่มีค่าสลลิปเหมือนในมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน มีทั้งแบบ 1 เฟส 2 เฟส และ 3 เฟส ตามประเภทของมันซึ่งมีจำนวนของขดลวดที่สเตเตอร์จะสอดคล้องกับจำนวนของเฟส ซึ่งชนิด 3 เฟส เป็นมอเตอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดและนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง

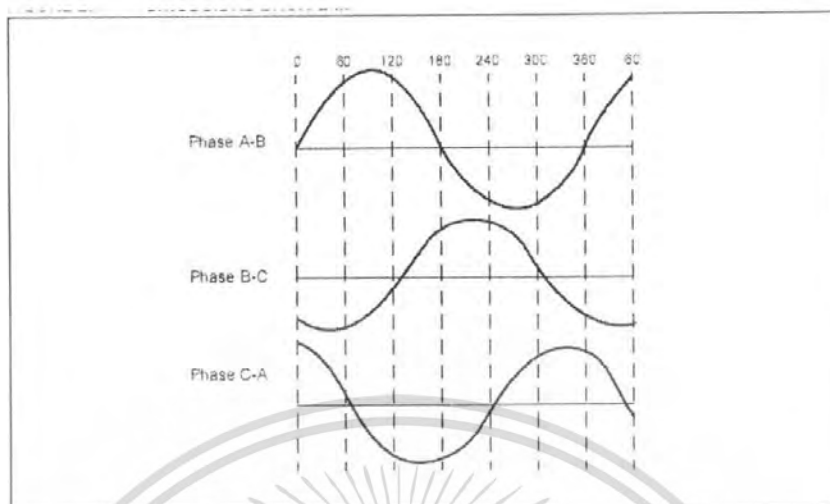
2.1.3 สเตเตอร์

สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ประกอบด้วยแผ่นเหล็กอ่อนอัดกันเป็นชั้นๆ มีขดลวดภายในสลีต ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้ ซึ่งคล้ายกับสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่จะมีการพันขดลวดที่แตกต่างกันไป Brushless DC Motor ส่วนใหญ่จะมีขดลวด สเตเตอร์ 3 ขดต่อกันแบบสตาร์ ขดลวดแต่ละขดมาจากการนำเส้นลวดจำนวนมากมารวมกันเป็นหนึ่งขด ขดลวดหนึ่งขดหรือมากกว่าถูกวางในสลีตและต่อกันเป็นวงจร และขดลวดเหล่านี้จะถูกแผ่ออกไปตามเส้นรอบวงของสเตเตอร์เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กเป็นจำนวนคู่

ขดลวดสเตเตอร์มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ Trapezoidal และ Sinusoidal Motor ความแตกต่างกันนี้ขึ้นอยู่กับวงจรของขดลวดในทั้งสอง สเตเตอร์ เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Back EMF) ในแบบที่แตกต่างกัน จากชื่อที่กล่าวมานั้นบอกได้ว่า มอเตอร์แบบ Trapezoidal มี Back EMF เป็น Trapezoidal และมอเตอร์แบบ Sinusoidal มี Back EMF เป็นแบบ Sinusoidal ดังแสดงในรูปที่ 2-1 และภาพที่ 2-2 นอกจากนี้ยังมีกระแสเฟส Trapezoidal และ Sinusoidal แรงบิดที่เอาท์พุทได้จากมอเตอร์แบบ Sinusoidal เท่ากับแรงบิดเอาท์พุทที่ได้จากมอเตอร์แบบ Trapezoidal แต่มอเตอร์แบบ Trapezoidal จะมีขดลวดในสเตเตอร์มากกว่ามอเตอร์แบบ Sinusoidal การควบคุมแหล่งจ่ายของระดับของแรงดันมอเตอร์ที่ถูกต้องสำหรับสเตเตอร์สามารถเลือก 48 โวลต์ หรือน้อยกว่านั้นมอเตอร์จะถูกใช้ในงานเกี่ยวกับเครื่องจักรกล หุ่นยนต์ แขนกล งานที่ต้องใช้การเคลื่อนที่ และอื่นๆ ที่แรงดัน 100 โวลต์ หรือสูงกว่านั้น มอเตอร์จะถูกนำไปใช้งานเกี่ยวกับเครื่องอัตโนมัติและนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2-1 แสดงสัญญาณ Back-EMF แบบ Trapezoidal



รูปที่ 2-2 แสดงสัญญาณ Back-EMF แบบ Sinusoidal



รูปที่ 2-3 แสดงสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

2.1.4 โรเตอร์

โรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร ที่มีได้แต่ สองขั้วขั้วถึง แปดขั้วสลับกันระหว่างขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้องการความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในโรเตอร์ วัสดุแม่เหล็กเหมาะสมที่จะถูกเลือกใช้ทำโรเตอร์คือ แม่เหล็ก เฟอร์ไรต์ นิยมนำมาใช้สร้างแม่เหล็กถาวรตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยี แม่เหล็กอัลลอยด์ซึ่งหายากกำลังได้รับความนิยม แม่เหล็กเฟอร์ไรต์ มีราคาไม่แพงแต่มีข้อเสียคือให้ปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์ต่ำ ความแตกต่างของวัสดุอัลลอยด์คือ มีความหนาแน่นแม่เหล็กต่อปริมาตรสูง และทำให้โรเตอร์สามารถบีบอัดได้มากขึ้น แม่เหล็กอัลลอยด์ได้มีการปรับปรุงอัตราส่วนขนาดต่อน้ำหนัก และมีแรงบิดสูงกว่ามอเตอร์ที่มีขนาดเดียวกันที่ใช้แม่เหล็กเฟอร์ไรต์

Neodymium (Nd) samarium Cobalt (SmCo) อัลลอยด์ของ Neodymium, Ferrite และ Boron (NdFeB) เป็นบางตัวอย่างของแม่เหล็กอัลลอยด์ซึ่งหายาก งานวิจัยได้กำลังปรับปรุงความหนาแน่นฟลักซ์เพื่อมีบีบอัด โรเตอร์มากขึ้น



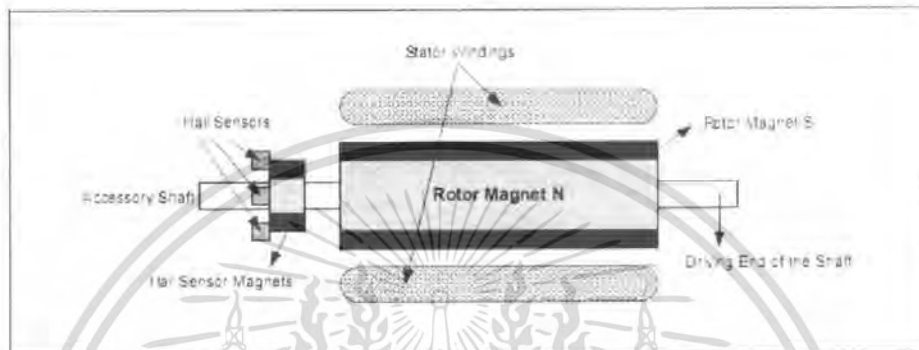
รูปที่ 2-4 แสดงลักษณะการจัดวางตำแหน่งของแม่เหล็กโรเตอร์แบบต่างๆ (ก) แบบแกนเป็นวงกลมกับแม่เหล็กบนเส้นรอบวง (ข) แบบแกนเป็นวงกลมกับแม่เหล็กเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากในโรเตอร์ (ค) แกนเป็นวงกลมกับแม่เหล็กเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากในแกนโรเตอร์

2.1.5 Hall Sensors

การคอมมิวเตชันของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน นั้นไม่เหมือนกับการคอมมิวเตชันของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน จะถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อที่จะหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ขดลวดสเตเตอร์นั้นจะถูกกระตุ้นจะถูกกระตุ้นตามลำดับอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจำเป็นที่จะต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์ โรเตอร์จะถูกกระตุ้นตามลำดับของการกระตุ้น ตำแหน่งของโรเตอร์จับได้โดยใช้ Hall Effect Sensors ที่ติดอยู่ที่สเตเตอร์ซึ่งส่วนใหญ่ มอเตอร์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านจะมี Hall Sensors สามตัวติดตั้งอยู่ด้านของเพลลาที่ไม่ใช้ในการขับ เมื่อใดที่โรเตอร์ผ่านเข้าใกล้ Hall Sensors จะให้สัญญาณออกมาเป็น High หรือ Low เป็นการแสดงว่าขั้ว N หรือขั้ว S กำลังผ่านเข้าใกล้เซนเซอร์ใช้หลักการรวมกันของสามสัญญาณ Hall Sensors ความแม่นยำของลำดับการคอมมิวเตชันสามารถกำหนดได้



รูปที่ 2-5 แสดงภาพตัดด้านข้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

รูปที่ 2-5 แสดงภาพตัดด้านข้างของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน แสดงโรเตอร์ และแม่เหล็กถาวร ตัว Hall Sensors ถูกติดตั้งอยู่กับส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์ การจัดเรียง Hall Sensors เป็นขั้นตอนที่ซับซ้อนเพราะว่าถ้าเกิดการจัดเรียงตัวใดตัวหนึ่งผิด จะทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์ เพื่อให้การติดตั้ง Hall Sensors นั้นง่ายขึ้น มอเตอร์บางตัวอาจมีแม่เหล็ก Hall Sensors อยู่ที่โรเตอร์ Hall Sensors จะถูกติดตั้งบนแผงวงจรและมีฝาปิดด้านท้าย ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถปรับแต่งชิ้นส่วนของ Hall Sensors ได้เต็มที่เพื่อให้เป็นแนวเดียวกันกับแม่เหล็กโรเตอร์เพื่อให้ได้การทำงานที่ดีที่สุด สัญญาณเอาต์พุตของ Hall Sensors มีอยู่ 2 แบบคือ มีมุมต่างเฟส 60 องศา และ 120 องศา

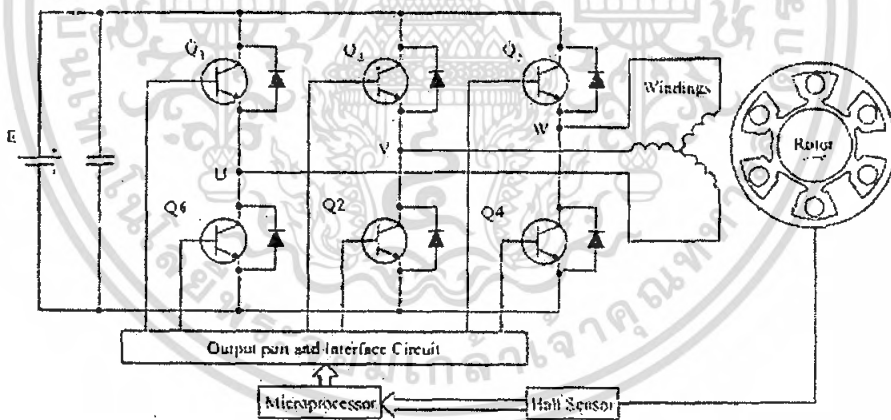
Hall Sensors ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันอยู่ในช่วง 4 โวลต์ ถึง 24 โวลต์ ต้องการกระแสในช่วง 5 ถึง 15 มิลลิแอมป์ ขณะที่ออกแบบระบบควบคุมให้คำนึงถึงคุณสมบัติของมอเตอร์ แรงดันและระดับกระแสที่แน่นอนของ Hall Sensors ที่จะใช้ โดยทั่วไปเอาต์พุตของ Hall Sensors จะเป็นแบบ Open Collector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 หลักการทำงาน

ในแต่ละลำดับของคอมมิวเตชัน มีหนึ่งขดที่จ่ายพลังงานเป็นบวก (กระแสไหลเข้าขดลวด) ขดที่สองเป็นลบ (กระแสไหลออกจากขดลวด) และขดที่สามไม่มีการกระตุ้น เกิดแรงบิด เพราะมีการตัดกันระหว่าง สนามแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์กับแม่เหล็กถาวร แรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อสนามทั้งสองอยู่ที่ 90 องศาซึ่งกันและกัน และตกลงมาเมื่อสนามเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน เพื่อจะให้มอเตอร์หมุนอย่างต่อเนื่อง สนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างโดยขดลวด จะต้องเลื่อนตำแหน่งของโรเตอร์หมุนตามให้ทันสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ ในการจ่ายพลังงานให้กับขดลวดมีอยู่ 6 ขั้นตอนลำดับของการคอมมิวเตชัน รายละเอียดและตัวอย่างใน หกขั้นตอนการคอมมิวเตชัน

เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ กำหนดให้มีขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ 6 ขั้ว รูปที่ 2-6 แสดงการทำงานวงจรขับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ซึ่งมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ (Hall Sensors) โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับสัญญาณจาก Hall Sensors มาประมวลผลเพื่อควบคุมอุปกรณ์กำลัง เพื่อให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กที่สเตเตอร์ตัดกับฟลักซ์แม่เหล็กที่โรเตอร์ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน คือชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

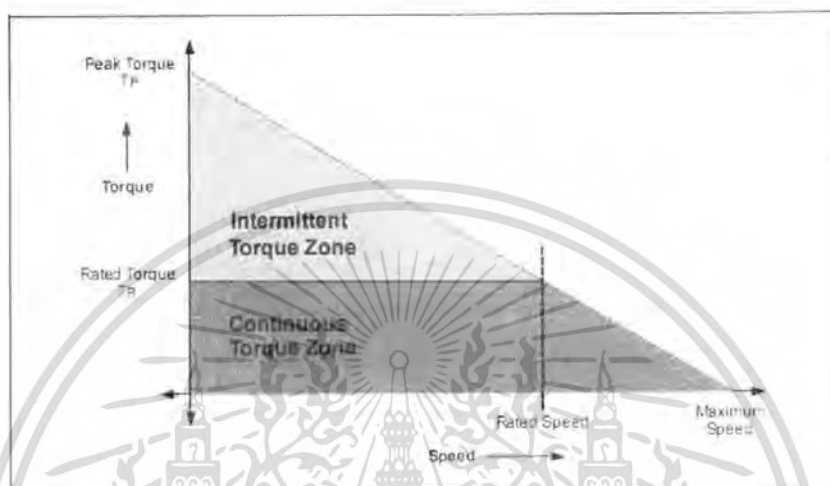


รูปที่ 2-6 แสดงวงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

2.1.7 กราฟคุณลักษณะของความเร็วรอบต่อแรงบิด

รูปที่ 2-7 กราฟคุณลักษณะของความเร็วรอบต่อแรงบิด มีอยู่ 2 ตัวแปรที่จะใช้อธิบาย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน คือแรงบิดสูงสุด (TP) และอัตราของแรงบิด (TR) ในระหว่างที่มอเตอร์ทำงานอยู่สามารถเพิ่ม โหลดถึงพิกัดของแรงบิดสูงสุดในมอเตอร์ไฟฟ้า

กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน แรงบิดยังมีค่าคงที่ สำหรับช่วงเร่งความเร็วที่เพิ่มขึ้นถึงอัตราของความเร็วระดับหนึ่ง มอเตอร์สามารถหมุนถึงความเร็วสูงสุด ซึ่งสามารถหมุนได้ถึง 150% ของอัตราความเร็ว แต่แรงบิดคอนสแตร์ทนั้นจะลดลง



รูปที่ 2-7 แสดงกราฟลักษณะสมบัติของความเร็วรอบต่อแรงบิด

ในการใช้งานที่มีการหมุนการหยุดและการกลับทางหมุนของมอเตอร์บ่อยๆ ในขณะที่มอเตอร์มีโหลด จะต้องการแรงบิดที่มากกว่าอัตราของแรงบิดนี้ มีความต้องการในระยะเวลาสั้นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนจากที่หยุดนิ่ง ในระหว่างระยะเวลาการเร่งนี้ แรงบิดที่ต้องการที่จะชนะแรงเฉื่อยของโหลดและของตัวโรเตอร์เอง มอเตอร์สามารถให้แรงบิดที่สูงมากจนถึงแรงบิดสูงสุด ดังแสดงในกราฟแสดงความเร็วต่อแรงบิด ในการเลือกมอเตอร์ไปใช้ให้เหมาะสมกับงาน จะต้องรู้ถึงวิธีการเลือกตัวแปรเหล่านี้สำหรับการนำไปใช้

2.1.8 การเปรียบเทียบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านกับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ

การเปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านมีข้อดีหลายอย่าง และมีข้อเสียเพียงเล็กน้อยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ต้องการการบำรุงรักษาน้อย และมีอายุการใช้งานมากกว่า เมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ผลิตพลังงานเอาต์พุตเมื่อเทียบกับขนาดได้มากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านและมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะโรเตอร์ทำจากแม่เหล็กถาวรทำให้มีความเฉื่อยของโรเตอร์น้อย เมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ ทำให้การเร่งดีขึ้น ลดลักษณะเฉพาะที่ทำให้ความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลง กราฟคุณลักษณะของความเร็วต่อแรงบิดเป็นเชิงเส้น สามารถควบคุมความเร็วได้คงที่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน แปรงถ่านได้ถูกตัดออกไป เพราะในการนำไปใช้งาน จะต้องมีการบำรุงรักษาซึ่งยุ่งยาก มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน มีการทำงานที่เงียบมากกว่ามอเตอร์ที่มีแปรงถ่าน ลดการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI)

ตารางที่ 2-1 แสดงการเปรียบเทียบกันระหว่าง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านกับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน

คุณลักษณะ	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน
การคอมมิวเตชัน	ใช้อิเล็กทรอนิกส์ในการคอมมิวเตชัน โดยใช้เซนเซอร์บอกตำแหน่ง	ใช้แปรงถ่านในการคอมมิวเตชัน
การบำรุงรักษา	ต้องการการบำรุงรักษาน้อยกว่าเพราะไม่มีแปรงถ่าน	ต้องการบำรุงรักษาเป็นระยะๆ
อายุการใช้งาน	นาน	สั้น
คุณลักษณะของกราฟความเร็วต่อแรงบิด	เป็นเชิงเส้นทำให้สามารถทำงานได้ทุกความเร็วขณะมีโหลด	เป็นเชิงเส้นเล็กน้อยที่ความเร็วสูงกว่า การเสียดสีของแปรงถ่านเพิ่มขึ้นทำให้แรงบิดลดลง
กำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต/ขนาดเฟรม	สูง-ลดขนาดลงเนื่องจากคุณลักษณะทางความร้อนสูง เพราะมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านมีขดลวดอยู่กับสเตเตอร์ซึ่งถูกต่ออยู่กับตัวถังระบายความร้อนได้ดีกว่า	ต่ำ - ความร้อนเกิดจากอาร์เมเจอร์กระจายในช่องว่างอากาศ ดังนั้นเป็นการเพิ่มอุณหภูมิในช่องว่างอากาศและการกำจัดสเปคของกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต/ขนาดเฟรม
ความเฉื่อยของโรเตอร์	ต่ำ- เพราะมีแม่เหล็กที่อยู่บนโรเตอร์เป็นการทำให้ผลการตอบสนองไดนามิกดีขึ้น	ความเฉื่อยของโรเตอร์สูงซึ่งจำกัดคุณลักษณะทางไดนามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-1 แสดงการเปรียบเทียบกันระหว่าง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านกับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน

คุณลักษณะ	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน
ขอบเขตความเร็ว	สูง- ไม่มีข้อจำกัดในทางกลที่กำหนดโดยแปรงถ่าน และคอมมิวเตเตอร์	ต่ำ- มีข้อจำกัดโดยทางกลโดยแปรงถ่าน
การกำเนิดสัญญาณรบกวน	ต่ำ	การอาร์คที่แปรงถ่านสร้างสัญญาณรบกวน EMI เข้าอุปกรณ์ใกล้เคียง
ราคา	แพง-เนื่องจากแม่เหล็กถาวรให้ราคาสูง	ถูก
การควบคุม	มีความซับซ้อนและราคาแพง	ง่ายและราคาไม่แพง
ความต้องการในการควบคุม	ตัวควบคุมจะต้องทำให้มอเตอร์หมุน ตลอดตัวคุมตัวเดียวกัน สามารถใช้สำหรับควบคุมความเร็วได้	ไม่มีตัวควบคุมสำหรับกำหนดความเร็ว ต้องการตัวควบคุมขกเว้นถ้าต้องการความเร็วที่เปลี่ยนแปลงได้

ตารางที่ 2-2 แสดงการเปรียบเทียบกันระหว่าง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านกับ มอเตอร์เหนี่ยวนำ

คุณลักษณะ	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	มอเตอร์เหนี่ยวนำ
คุณลักษณะของกราฟความเร็วต่อแรงบิด	เป็นเชิงเส้น-ทำให้สามารถทำงานได้ทุกความเร็วขณะมีโหลด	ไม่เป็นเชิงเส้น-แรงบิดต่ำที่ความเร็วต่ำ
กำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต/ขนาดเฟรม	สูง-เนื่องจากมีแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ขนาดเล็กสามารถทำให้เกิดกำลังเอาต์พุตได้	ปานกลาง-เนื่องจากที่สเตเตอร์กับโรเตอร์มีขดลวดพันอยู่ทำให้เกิดกำลังด้านเอาต์พุตต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

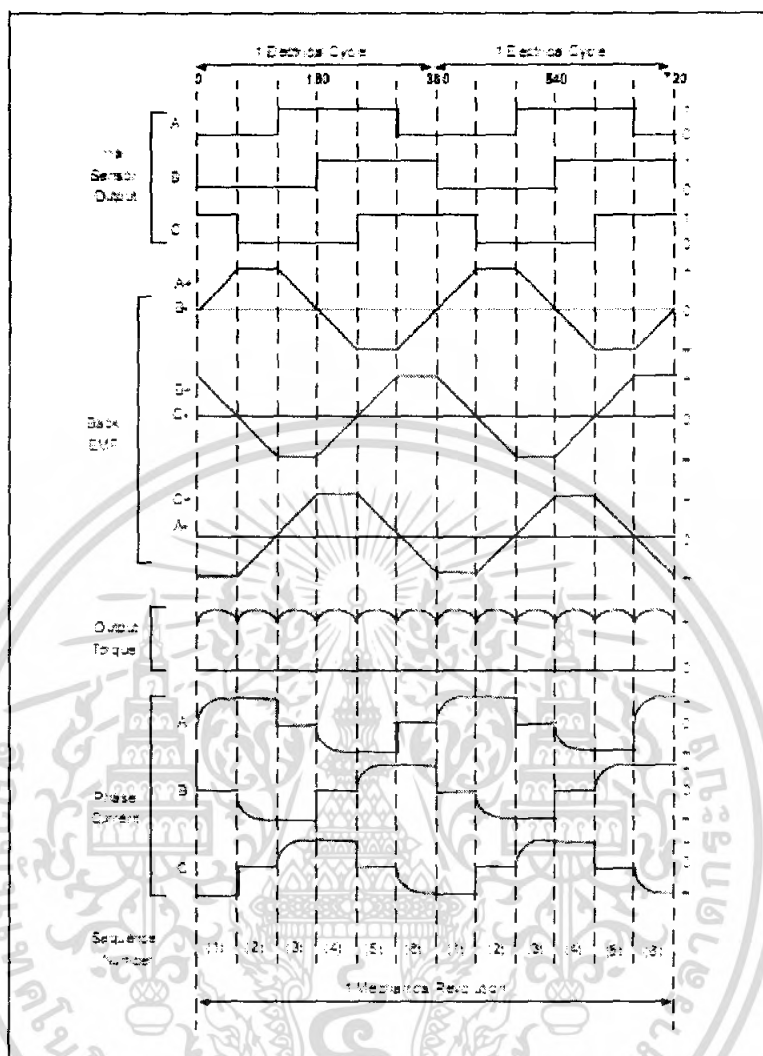
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-2 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบกันระหว่าง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความถี่ของโรเตอร์	ต่ำ-คุณลักษณะทางไดนามิค ดีกว่า	สูง-คุณลักษณะทางไดนามิค ไม่ดี
กระแสสตาร์ท	Rate - ไม่ต้องการวงจรพิเศษในการสตาร์ท	ประมาณเจ็ดเท่าของ Rate-Starter ขนาดของวงจรควรเลือกอย่างรอบคอบโดยทั่วไปให้สตาร์ท-เดลต้าในการสตาร์ท
ความต้องการในการควบคุม	ตัวควบคุมจะต้องทำให้มอเตอร์หมุนตลอดตัวเดียวกัน สามารถใช้สำหรับควบคุมความเร็วได้	ไม่มีตัวควบคุมสำหรับกำหนดความเร็ว ต้องการตัวควบคุมยกเว้นถ้าต้องการความเร็วที่เปลี่ยนแปลงได้
ค่าสลลิป	ไม่มีค่าสลลิปเกิดขึ้นในช่วงความถี่ของสเตเตอร์กับโรเตอร์	โรเตอร์หมุนที่ความเร็วต่ำกว่าสเตเตอร์ โดยความถี่สลลิปและค่าสลลิปทำให้เพิ่มขึ้นโดยโหลดของมอเตอร์

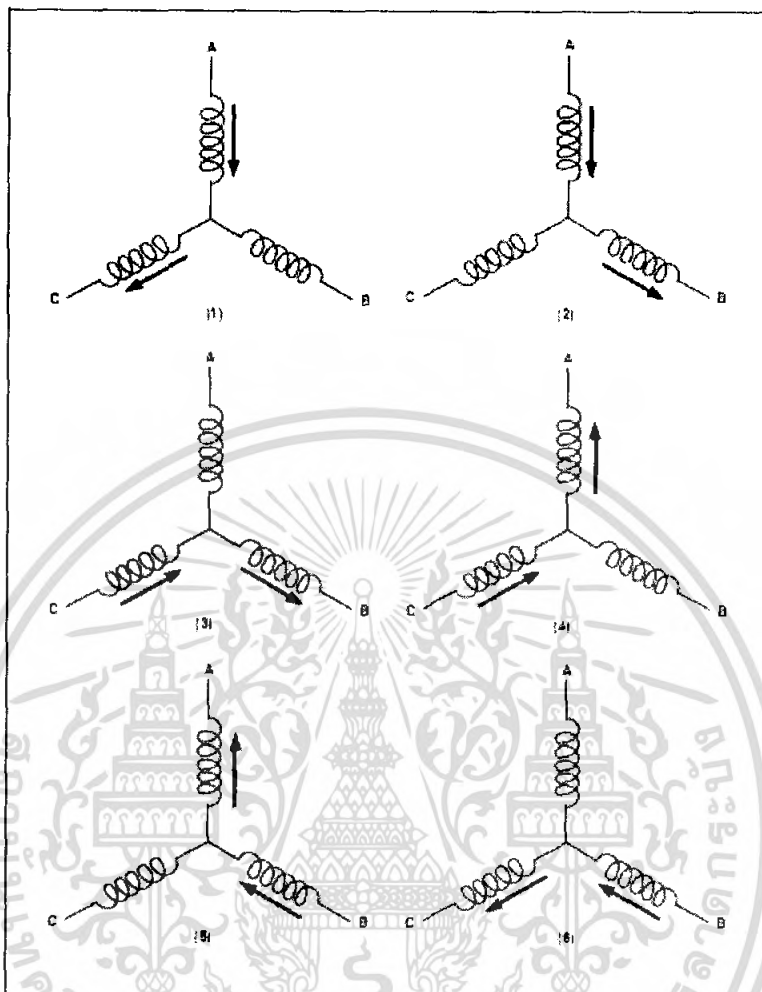
2.1.9 ลำดับในการคอมมิวเตชัน

รูปที่ 2-8 แสดงตัวอย่างของสัญญาณ Hall Sensors กับ Back EMF และกระแสเฟส รูปที่ 2-9 แสดงลำดับการสวิตช์ที่สัมพันธ์กับ Hall Sensors รูปที่ 2-8 สอดคล้องกับรูปที่ 2-9 ในการหมุนทุกๆ 60 องศาไฟฟ้า หนึ่งใน Hall Sensors จะเปลี่ยนสถานะ จะต้องทำหกขั้นตอนจึงครบหนึ่งรอบทางไฟฟ้าในเวลาเดียวกัน ทุกๆ 60 องศาทางไฟฟ้าการสวิตช์กระแสเฟสจะต้องเปลี่ยนไปเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามหนึ่งรอบทางไฟฟ้า อาจจะไม่เหมือนหนึ่งรอบในทางกลของโรเตอร์ จำนวนรอบทางไฟฟ้าจะวนซ้ำจนครบการหมุนทางกล กำหนดโดยคู่ขั้วโรเตอร์ สำหรับในแต่ละคู่ขั้วของโรเตอร์หนึ่งรอบทางไฟฟ้าจึงครบ ดังนั้นจำนวนของรอบทางไฟฟ้าต่อการหมุนเท่ากับคู่ขั้วโรเตอร์



รูปที่ 2-8 แสดงสัญญาณ Hall Sensors ,Back EMF, แรงบิดทางเอาต์พุตและกระแสเฟส

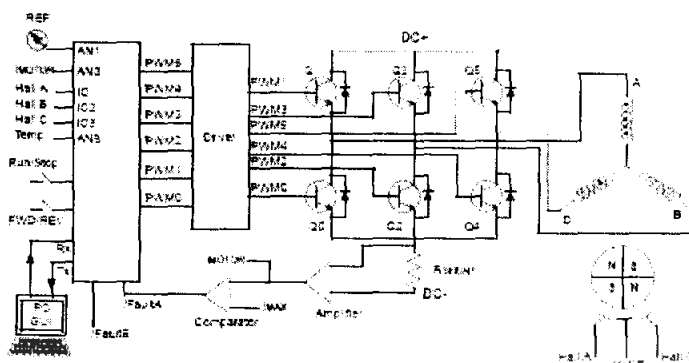
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-9 แสดงลำดับของการจ่ายกระแสให้กับขดลวด

รูปที่ 2-10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุม ที่ใช้ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ทรานซิสเตอร์ Q0 ถึง Q5 เป็นอุปกรณ์สวิตช์กำลังควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอุปกรณ์ในการสวิตช์สามารถใช้ MOSFETs , IGBTs หรือ Bipolar Transistors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุม

ตารางที่ 2-3 แสดงลำดับสำหรับการหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

Sequence Number	Hall Sensor Input			Active PWMs		Phase Current		
	A	B	C			A	B	C
1	0	0	1	PWM1(Q1)	PWM1(Q4)	DC-	Off	DC-
2	0	0	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	Off
3	1	0	0	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	Off	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC-	Off	DC+
5	1	1	1	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC-	DC-	Off
6	0	1	1	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	Off	DC+	DC-

ตารางที่ 2-4 แสดงลำดับสำหรับการหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามทวนนาฬิกา

Sequence Number	Hall Sensor Input			Active PWMs		Phase Current		
	A	B	C			A	B	C
1	0	1	1	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	Off	DC-	DC+
2	1	1	1	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	Off
3	1	1	0	PWM1(Q1)	PWM4(Q4)	DC+	Off	DC-
4	1	0	0	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	Off	DC+	DC-
5	0	0	0	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC-	DC+	Off
6	0	0	1	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC-	Off	DC+

จากตารางที่ 2-3 สำหรับการหมุนของมอเตอร์ตามเข็มนาฬิกา และตารางที่ 2-4 สำหรับการหมุนของมอเตอร์ทวนเข็มนาฬิกา นี่เป็นตัวอย่างของสัญญาณ Hall Sensor ที่มีมุมต่างเฟส 60 องศา อย่างไรก็ตามได้เคยกล่าวไว้แล้วในตอนแรกในส่วนของการ Hall Sensor ซึ่งอาจมีมุมต่างเฟส 60 องศา หรือ 120 องศาแล้วแต่ชนิด

จากรูปที่ 2-10 ถ้าสัญญาณถูกกำหนดโดย PWMx สวิตช์ปิดและเปิดอย่างต่อเนื่อง มอเตอร์ที่จะหมุนที่ระดับความเร็วที่กำหนด สมมติว่าแรงดัน DC Bus เท่ากับระดับแรงดันของ

มอเตอร์บวกกับค่าสูญเสียในสวิทช์ การเปลี่ยนแปลงความเร็วควรจะเป็นสัญญาณ PWM ที่ ความถี่ สูงกว่าความถี่ของมอเตอร์ ในการคำนวณแบบหยาบๆ ความถี่ PWM อย่างน้อยที่สุดควรเป็น 10 ครั้งของความถี่สูงสุดของมอเตอร์ เมื่อคิดถึงหลักการของ PWM เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องแรงดันเฉลี่ย ที่จ่ายให้สเตเตอร์ลดลง ดังนั้นการลดความเร็วเป็นประโยชน์อีกอย่างที่ได้จาก PWM ถ้าแรงดัน DC Bus สูงมากกว่าขนาดแรงดันของมอเตอร์ มอเตอร์สามารถควบคุมได้โดยกำหนดอัตราส่วนร้อยละ ของ PWM Duty Cycle ให้มีลักษณะเดียวกันกับขนาดของแรงดันมอเตอร์เพื่อเพิ่มการยึดหยุ่นต่อ การควบคุม เพื่อใช้กับมอเตอร์ที่ขนาดแรงดันแตกต่างกันและปรับแรงดันเอาท์พุทเฉลี่ยโดยตัว ควบคุมต่อขนาดแรงดันมอเตอร์โดยการควบคุม PWM Duty Cycle ถ้าสัญญาณ PWM กำหนดจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ สวิทช์ด้านสูงสามารถเปิด ในคาบเวลาที่มีลำดับตรงกัน และเช่นเดียวกัน สวิทช์ด้านต่ำสามารถควบคุมโดยใช้ Duty Cycle จาก PWM

2.1.10 การควบคุมแบบลูปปิด

การควบคุมแบบลูปปิด สามารถทำได้โดยการวัดความเร็วที่แท้จริงของมอเตอร์ ค่า ผิดพลาดในการตั้งความเร็วและความเร็วจริงถูกคำนวณโดยตัวควบคุม Proportional Plus Integral Plus Derivative (P.I.D) ซึ่งสามารถใช้ขยายความผิดพลาดของความเร็วและปรับ PWM Duty Cycle สำหรับการวัดความเร็วความละเอียดต่ำ สัญญาณ Hall สามารถใช้วัดความเร็วโดยโหมด Timer จาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถใช้นับระหว่างการเปลี่ยนแปลงของ Hall ทั้งสอง ด้วยการนับนี้ ความเร็วจริงของมอเตอร์สามารถคำนวณได้

สำหรับการวัดความเร็วความละเอียดสูง สามารถใส่ตัว Encoder ส่วนใหญ่จะให้สัญญาณ สามตัว ซึ่งเป็นหนึ่งพัลส์ต่อหนึ่งรอบ ซึ่งสามารถใช้ในการบอกตำแหน่งการใช้งาน Optical Encoder เป็นทางเลือกที่เหมาะสมกับ Pulse Per Revolution (PPR) อยู่ในลำดับจากร้อยไปถึงพัน

2.1.11 Back EMF

เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน หมุน ทำให้ในแต่ละขดลวดสร้าง แรงดันขึ้นมา ดังที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ Back Electromotive Force หรือ Back EMF ซึ่งต้านแรงดัน แหล่งจ่ายหลักกับขดลวดตาม Lenz's Law ลักษณะชั่วของ Back EMF มีทิศทางตรงกันข้ามกับ แรงดันที่จ่าย Back EMF ขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยหลักดังนี้

- อัตราความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์
- หนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กโรเตอร์
- จำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$\text{Back EMF} = (E) \propto NlrB\omega \quad (2.1)$$

- เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวดต่อเฟส
 l คือ ความยาวของโรเตอร์
 r คือ รัศมีภายในของโรเตอร์
 B คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กโรเตอร์
 ω คือ อัตราความเร็วเชิงมุม

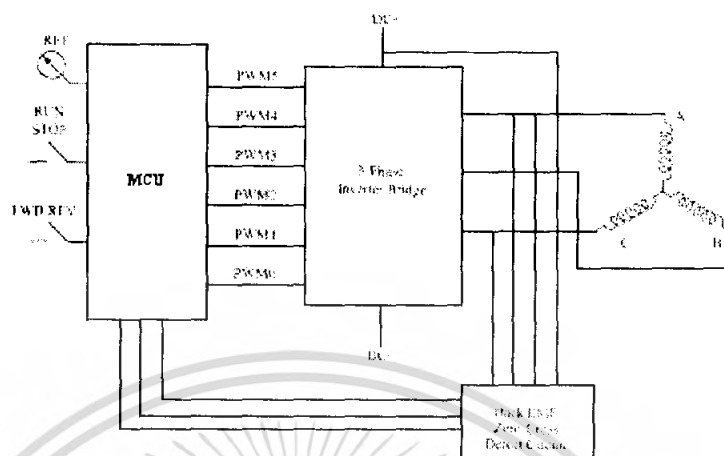
จากที่มอเตอร์ถูกออกแบบสนามแม่เหล็กโรเตอร์ และจำนวนรอบในขดลวดสเตเตอร์ ยังคงคงที่ มีปัจจัยเดียวที่จะควบคุม Back EMF คืออัตราความเร็วเชิงมุมหรือความเร็วโรเตอร์ เช่น การเพิ่มความเร็ว Back EMF ก็เพิ่มขึ้นด้วย เรียกตัวแปรเฉพาะทางเทคนิคของมอเตอร์นี้ว่าค่าคงที่ Back EMF ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ Back EMF สำหรับให้ความเร็วได้

ความต่างศักย์ที่ผ่านเข้าขดลวดสามารถคำนวณได้โดยการลบค่า Back EMF ออกจาก แหล่งจ่ายแรงดัน มอเตอร์ถูกออกแบบด้วยค่า Back EMF คงที่ ซึ่งเมื่อมอเตอร์กำลังหมุนที่ความเร็ว สูงสุด ความต่างศักย์ระหว่าง Back EMF กับแหล่งจ่ายแรงดันเพียงพอสำหรับมอเตอร์เพื่อตั้งกระแส และทำให้เกิดแรงบิด ถ้ามอเตอร์หมุนอยู่ห่างจากความเร็วสูงสุด Back EMF อาจเพิ่มขึ้นมาก ดังนั้น การลดความต่างศักย์ในขดลวดเป็นการลดการตั้งกระแส และผลของกราฟแสดงแรงบิดลดต่ำลง จุดสุดท้ายบนกราฟความเร็วควรเป็นเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันเท่ากับผลรวมของ Back EMF กับค่า สูญเสียในมอเตอร์ที่ซึ่งกระแสและแรงดันเท่ากับศูนย์

2.1.12 Sensorless Control

ที่ผ่านมาเป็นการคอมมิวเตชัน โดยใช้หลักการของการบอกตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้ Hall Sensors ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน สามารถคอมมิวเตชันโดยใช้ สัญญาณ Back EMF แทนที่ใช้สัญญาณ Hall Sensors ได้ ความสัมพันธ์ระหว่าง Hall Sensors กับ Back EMF มีความสัมพันธ์กับแรงดันเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2-11 ในทุกลำดับการคอมมิวเตชัน มีหนึ่งขดที่ให้พลังงานเป็นบวกขดที่สองเป็นลบและขดที่สามไม่มีกระแสไหล ดังแสดงในรูปที่ 2-11 สัญญาณ Hall Sensors เปลี่ยนสถานะเมื่อขั้วแรงดันของ Back EMF เปลี่ยนจากบวกเป็นลบ หรือจากลบเป็นบวกในทางอุดมคติ ซึ่งปรากฏใน Zero-Crossing ของ Back EMF แต่ในทางปฏิบัติ นั้นจะช้ากว่า เนื่องจากลักษณะเฉพาะของขดลวด และการหน่วงเวลานี้สามารถชดเชยได้ โดยการ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ดังแสดงในรูปที่ 2-14 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ Sensor less Control ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

82455



รูปที่ 2-11 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ Sensor less Control

หลักเกณฑ์อื่นที่ใช้พิจารณาคือความเร็วต่ำๆ เพราะ Back EMF เป็นสัดส่วนกับความเร็วในการหมุน ที่ความเร็วต่ำ Back EMF มีแอมป์ริจูดต่ำมากจนถึงจุด Zero-Crossing เมื่อมอเตอร์ทำงานแบบลูปเปิดจากที่หยุดนิ่งและมี Back EMF เพียงพอที่จะไปถึงจุด Zero-Crossing การควบคุมต้องเปลี่ยนแปลงเพื่อตรวจจับ Back EMF ความเร็วต่ำที่สุดจึงจับ Back EMF ได้ สามารถคำนวณได้จากค่า Back EMF คงที่ของมอเตอร์ ด้วยวิธีการคอมมิวเตชันนี้ Hall Sensors ถูกตัดออกไปและในมอเตอร์บางตัวแม่เหล็กสำหรับ Hall Sensors ก็ถูกตัดออกไปด้วย เป็นการทำให้สร้างมอเตอร์ได้ง่ายขึ้นและราคาลดลง นี่เป็นประโยชน์ถ้ามอเตอร์ทำงานในสิ่งแวดล้อมที่เต็มไปด้วยฝุ่นหรือเป็นน้ำมัน ซึ่งต้องมีการทำความสะอาดบ้างเป็นครั้งคราว

2.1.13 การเลือกขนาดมอเตอร์ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

การเลือกประเภทของมอเตอร์ให้เหมาะสมในการนำไปใช้งานมีความสำคัญมากโดยยึดลักษณะของโหลดเป็นหลัก มอเตอร์จะต้องได้รับการเลือกขนาดที่เหมาะสม

มีสามตัวแปรที่เป็นปัจจัยหลักในการเลือกมอเตอร์ให้เป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานมีดังนี้คือ

- แรงบิดสูงสุดที่ต้องการนำไปใช้
- แรงบิด RMS ที่ต้องการ
- ขอบเขตความเร็วในการทำงาน

แรงบิดสูงสุด (TP) ที่ต้องการสำหรับนำไปใช้งานคำนวณได้จากการรวมแรงบิดของ โหลด (TL) แรงบิดที่เกิดจากแรงเฉื่อยของมอเตอร์ (TJ) และแรงบิดที่ต้องการขณะแรงเสียดทาน (TF)

ยังมีปัจจัยอื่น ซึ่งสนับสนุนถึงความต้องการแรงบิดสูงสุดทั้งหมด สำหรับตัวอย่างการสูญเสียคือ จากกำลังลม ซึ่งเสริมโดยค่าการต้านของอากาศในช่องว่างอากาศ ปัจจัยเหล่านี้ทำให้เกิดความยุ่งยากในการพิจารณา ซึ่งคำนวณแรงบิดได้ตามสมการ

$$\therefore TP=(TL+TJ+TF)*1.2 \quad (2-2)$$

แรงบิดที่เกิดจากความเฉื่อย (TJ) คือแรงบิดที่ต้องการที่จะเร่งโหลดจากหยุดนิ่ง หรือ จากความเร็วต่ำสุดไปสู่ความเร็วสูงกว่า สามารถคำนวณได้โดยนำผลคูณของความเฉื่อยของโหลด รวมกับความเฉื่อยของโรเตอร์และอัตราเร่งของโหลด

$$TJ=JL+M*\alpha \quad (2-3)$$

เมื่อ JL+M คือ เป็นผลรวมของโหลดและความเฉื่อยโรเตอร์
 α คือ อัตราเร่งที่ต้องการ

การเชื่อมต่อระบบเครื่องกลกับเฟลตามอเตอร์กำหนดแรงบิด โหลด และแรงบิดที่เกิด จากแรงเสียดทาน

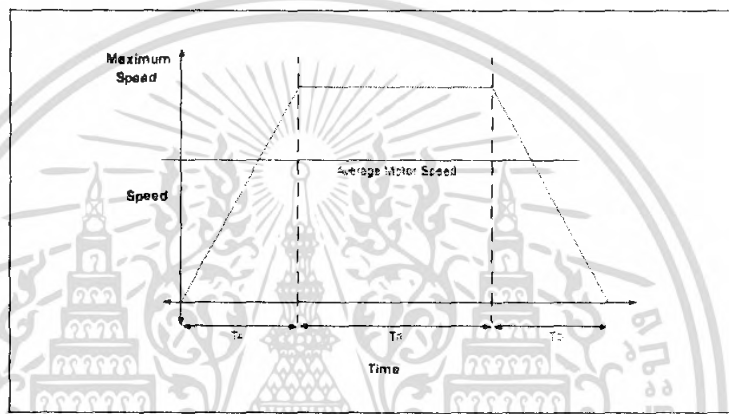
แรงบิด RMS ที่ต้องการ แรงบิด RMS สามารถแปลความหมายอย่างคร่าวๆถึงแรงบิด ต่อเนื่องเฉลี่ยที่ต้องการในการใช้งาน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น แรงบิดสูงสุด (TP) , แรงบิด โหลด (TL) , แรงบิดที่เกิดจากแรงเฉื่อย (TJ),แรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทาน (TF) และอัตราเร่ง

สมการต่อไปนี้จะให้แรงบิด RMS ที่ต้องการสำหรับนำไปใช้งานตามชนิด ซึ่ง TA เป็น เวลาในการเร่ง TR เป็นเวลาในการทำงานและ TD เป็นเวลาในการทำให้หยุดทำงาน

$$T_{RMS} = \sqrt{\{(TP^2TA+(TL+TF)^2TR+(TJ-TL-TF)^2TD)\}/(TA+TR+TD)} \quad (2-4)$$

2.1.14 Speed Range

นี่เป็นความเร็วมอเตอร์ที่ต้องการจะนำไปใช้และกำหนดโดยชนิดของงาน ยกตัวอย่าง เช่น ใช้สำหรับเป็นเครื่องเป่าลม ซึ่งใช้ความเร็วเปลี่ยนแปลงไม่บ่อยและความเร็วของเครื่องเป่าลม เป็นความเร็วเฉลี่ยของความเร็วมอเตอร์ ในทางตรงกันข้ามในกรณีของการวางระบบ Point-to-Point เช่น ในสายพานลำเลียงหรือแขนกล ซึ่งต้องการมอเตอร์ที่มีอัตราความเร็วในการทำงานสูงกว่าความเร็วในการเคลื่อนที่เฉลี่ย ความเร็วในการทำงานที่สูงกว่า สามารถพิจารณาที่ ส่วนประกอบของกราฟความเร็ว Trapezoidal ผลลัพธ์ของความเร็วเฉลี่ยเท่ากับความเร็วในการเคลื่อนที่กราฟความเร็ว Trapezoidal แสดงในรูปที่ 2-12



รูปที่ 2-12 แสดงกราฟความเร็ว Trapezoidal

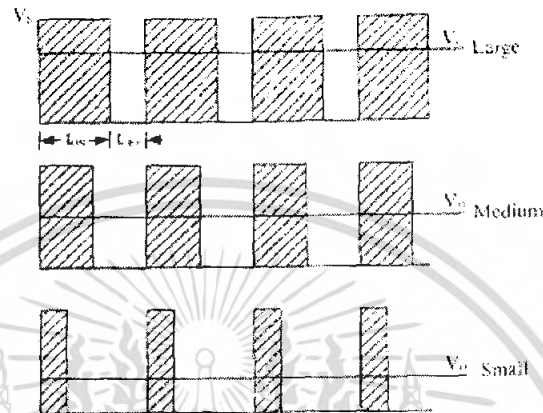
2.1.15 การปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ขึ้นอยู่กับขนาดของ แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะควบคุมการสวิตช์อุปกรณ์กำลัง เพื่อปรับ ระดับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยใช้การปรับเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลของ PWM ดังรูปที่ 2-13 เป็นสัญญาณที่ใช้ในการสวิตช์อุปกรณ์กำลังให้เปิดหรือปิดที่ความถี่คงที่ โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดัน (V_s) คงที่แรงดันที่ตกคร่อมโหลด (V_o) สามารถปรับได้ โดยการปรับเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลซึ่งหา ได้จากสมการที่ 2-5

$$d = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \quad (2-5)$$

เมื่อแหล่งจ่ายแรงดัน (V_s) คงที่ แรงดันที่ตกคร่อมโหลดจะหาได้จากสมการที่ 2-6

$$V_o = d \cdot V_s \quad (2-6)$$



รูปที่ 2-13 แสดงแรงดันพัลส์วิตช์มอดูเลชัน

เมื่อค่าคงที่ของมอเตอร์ (K') และเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) มีค่าคงที่ ความเร็วรอบของมอเตอร์ จะหาได้จากสมการที่ 2-7

$$n = V_o / K' \cdot \phi \quad (2-7)$$

จากรูปที่ 2-13 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างระดับเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิลของ PWM ถ้าเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิลยิ่งมาก ระดับแรงดัน V_o ก็ยิ่งมาก ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าเปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิล ยิ่งลดลง ระดับแรงดัน V_o ก็ยิ่งลดลง ซึ่งทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์หมุนช้าลงไปด้วย

2.1.16 ลักษณะการนำไปใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน พบในการนำไปใช้งานในทุกส่วนของตลาด เกี่ยวกับรถยนต์ เครื่องกล การควบคุมในงานอุตสาหกรรม เครื่องอัตโนมัติ การบิน สามารถจัดประเภท ของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ในสามประเภทหลักคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. โหลดคงที่
2. โหลดไม่คงที่
3. การควบคุมตำแหน่ง

1. โหลดคงที่ การนำไปใช้กับโหลดคงที่ ประเภทของงานนี้การเปลี่ยนแปลงความเร็วมีความสำคัญมากกว่าการรักษาความแม่นยำ ของความเร็วที่ได้กำหนดไว้ นอกจากนี้การเพิ่มความเร่งและการลดค่าไม่เปลี่ยนแปลงการหมุนในการใช้งานประเภทนี้ โหลดจะเชื่อมต่อโดยตรงกับเพลลาของมอเตอร์ ตัวอย่างเช่น พัดลม บีม และเครื่องเป่าผม จะอยู่ในการใช้งานประเภทนี้ สำหรับการนำไปใช้เหล่านี้ต้องการตัวควบคุมราคาถูก ส่วนใหญ่ใช้งานเป็นแบบลูปเปิด

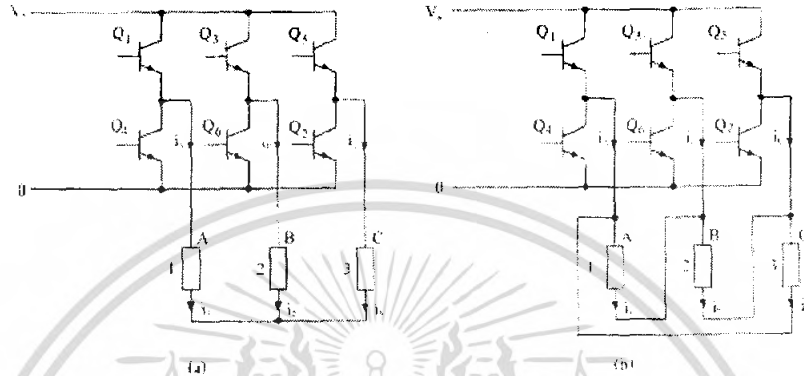
2. โหลดไม่คงที่ การนำไปใช้งานกับโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง การใช้งานเหล่านี้ อาจต้องการความแม่นยำในการควบคุมความเร็วที่สูง และผลการตอบสนองทางไดนามิกที่ดี เครื่องกลที่ใช้ภายในบ้านเช่น เครื่องซักผ้า เครื่องเป่าแห้ง และคอมเพรสเซอร์ เป็นตัวอย่างที่ดีในแบบอัตโนมัติ เช่นควบคุมบีมเชื้อเพลิง อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมทิศทาง ควบคุมเครื่องยนต์ ควบคุมรถไฟฟ้า เป็นต้น ในยานอวกาศ มีการนำไปใช้งานเช่น Centrifuges บีม การควบคุมแขนกล และการควบคุมการทรงตัว ในการใช้งานเหล่านี้ อาจใช้อุปกรณ์ป้อนผลย้อนกลับ และอาจทำงานในแบบกึ่งลูปปิดหรือลูปเปิด ในงานเหล่านี้ให้การควบคุมขั้นสูง ดังนั้นจึงทำให้ตัวควบคุมมีความซับซ้อน ับราคาที่เพิ่มขึ้นของระบบที่สมบูรณ์

3. การควบคุมตำแหน่ง ส่วนมากในงานอุตสาหกรรมประเภทเครื่องอัตโนมัติมีการใช้งานอยู่ ในการใช้งานประเภทนี้ มีบางชนิดของการส่งผ่านกำลัง ซึ่งสามารถเป็นกลไกเกียร์ หรือ times belts หรือ ระบบขับเคลื่อนสายพาน ในการใช้งานเหล่านี้ การตอบสนองทางไดนามิกของความเร็วและแรงบิดเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นในการใช้งานนี้อาจจะมีการกลับทิศทางของการหมุนอยู่บ่อยๆ ลักษณะของคาบเวลาจะมีการเร่งความเร็วเฟส หรือ ความเร็วเฟสคงที่ และชะลอตำแหน่งของเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2-13 โหลดที่มอเตอร์อาจจะเปลี่ยนแปลงเฟสเหล่านี้ทั้งหมด ทำให้เกิดความควบคุมที่มีความซับซ้อน ระบบเหล่านี้ส่วนมากทำงานในแบบลูปปิด ซึ่งมีการควบคุมสามอย่างในเวลาเดียวกันคือ Torque Control Loop, Speed Control Loop และ Position Control Loop

Optical Encoder หรือ Synchronous Revolvers ถูกใช้สำหรับวัดความเร็วที่แท้จริงของมอเตอร์ ในบางกรณีตัวเซนเซอร์ที่เหมือนกันจะถูกใช้รับข้อมูลตำแหน่งที่สัมพันธ์กัน ในอีกทางหนึ่งตัวเซนเซอร์ที่มีตำแหน่งแยกกันอยู่อาจจะถูกใช้สำหรับวัดตำแหน่งที่แท้จริง เครื่อง Computer

Numeric Controlled (CNC) เป็นตัวอย่างที่ดีของการควบคุมนี้ การควบคุมเครื่องจักรและควบคุม การขนส่งมีมากมายในการใช้งานประเภทนี้

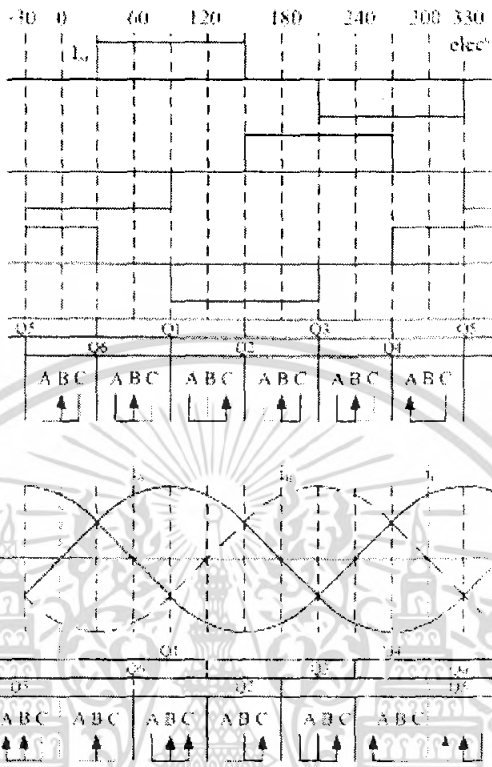
2.1.17 การควบคุมแบบสามเฟส



รูปที่ 2-14 แสดงวงจรบริดจ์สามเฟส (a) มอเตอร์แบบวาย (b) มอเตอร์แบบเดลต้า

จากรูปที่ 2-14 แสดงให้เห็นวงจรสามเฟสแบบฟูลบริดจ์ รูปที่ 2-14 (a) เป็นการต่อ ขดลวดมอเตอร์แบบวาย และจากรูปที่ 2-14 (b) เป็นการต่อมอเตอร์แบบเดลต้าทั้งสอง กรณีนี้วงจร อิเล็กทรอนิกส์กำลังและลำดับการสวิตช์ของอุปกรณ์กำลังจะเหมือนกัน โดยเป็นเฟส A, B และ C การทำงานเป็นแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแสดงให้เห็นในรูปที่ 2-15 ในการทำงาน แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่ตำแหน่ง 60 องศา กระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายโดยผ่านเข้าที่มอเตอร์ เฟส A และ B ในช่วง ระหว่างเวลานั้นที่ เฟส C จะไม่มีกระแสไหลผ่าน และเมื่อโรเตอร์หมุนผ่านไป 60 องศากระแส จะเปลี่ยนทิศทางการไหลไปเป็นไหลเข้าเฟส A ไปสู่เฟส C และจะเป็นเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆตามลำดับ โดยปกติแล้วในแต่ละช่วงเวลาทรานซิสเตอร์กำลังจะนำกระแสที่ละ 2 ตัว

จากรูปที่ 2-15 แสดงให้เห็นถึงสถานะของทรานซิสเตอร์กำลังจาก Q_1-Q_6 และลูกศรที่ ชี้ให้เห็นถึงทิศทางการนำกระแสที่มุมต่างๆกัน ส่วนการทำงานในรูปแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแสดงให้ เห็นในรูปที่ 2-15 ด้านล่าง ซึ่งกระแสจะไหลผ่านในลักษณะที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะเกิดรีปเปิดตาม การสวิตช์ของทรานซิสเตอร์กำลัง โดยปกติแล้วกระแสทั้งสามเฟสจะไม่เท่ากับศูนย์ตลอดเวลาแต่จะ ยกเว้น เมื่อกระแสที่ไหลผ่านมีค่าเท่ากับศูนย์ และผลที่ได้ก็คือ ในแต่ละเวลาต้องมี ทรานซิสเตอร์กำลังกระแสสามตัวตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2-15 ให้เห็นถึงสถานะทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1-Q_6 และลูกศรการบอกทิศทางการนำกระแส



รูปที่ 2-15 แสดงรูปคลื่นกระแสสามเฟส Square wave Driver และ Sin wave Driver

ในการทำงานทั้งแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม และแบบรูปคลื่นไซน์จะปรากฏรูปคลื่นในอุดมคติตามรูปที่ 2-15 ส่วนกระแสที่จะนำมาใช้ในการสวิตช์ หรือการคอมมิวเตชันจะใช้กระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนั้น นั้นหมายความว่า สามารถวัดกระแสโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสเพียงตัวเดียว โดยทำการวัดกระแสที่ใหญ่จากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและการบังคับกระแสทำได้ โดยการสวิตช์ทรานซิสเตอร์กำลังเพียงตัวเดียวอย่างไรก็ตามการทำงานของ Freewheel Diode และ Back EMF จะทำให้วงจรมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากกระแสทั้งสามที่ไหลผ่านไดโอด ไม่สามารถวัดจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสที่ติดตั้งไว้ที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในการควบคุมกระแสไฟฟ้า สามารถใช้การควบคุมแบบตรวจจับกระแสไฟฟ้าทุกเฟสโดยปกติแล้วจะวัดทิศทางกระแสโดยใช้ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส การต่อสายแบบสามเฟสสามารถกระแสไฟฟ้าเพียง 2 เฟสก็ได้โดยที่ $i_a + i_b + i_c = 0$ ซึ่งกระแสไฟฟ้าในเฟสที่สามสามารถได้จากผลรวมของกระแสไฟฟ้าของเฟสทั้งสอง เพื่อประหยัดอุปกรณ์ตรวจจับ

กระแสไฟฟ้าได้หนึ่งตัว ในหารควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบ PWM เป็นการใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าเพียงตัวเดียววัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งการตรวจจับแบบนี้ไม่เพียงแต่ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินได้ แต่ยังสามารถควบคุมแรงบิดได้ ในการใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส สามารถป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินในแต่ละสาขาของวงจรขึ้นอยู่กับวิธีการนำสัญญาณป้อนกลับมาควบคุมช่วงเวลา การสวิตซ์ของทรานซิสเตอร์

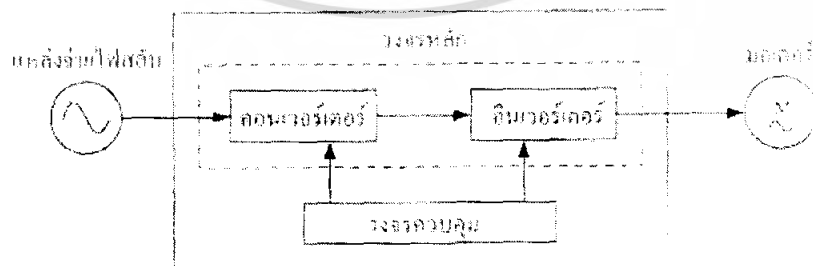
2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ในที่นี้จะกล่าวถึงการทำงาน ของวงจรภายในอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถสร้างความถี่และแรงดันขนาดต่างๆ มาขับมอเตอร์เพื่อหมุนด้วยความเร็วต่างๆ อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์แปลงไฟชนิดหนึ่งี่แปลงไฟกระแสสลับ ที่มีความถี่และแรงดันคงที่ไปเป็นไฟกระแสสลับที่มีความถี่และแรงดันขนาดต่างๆกันไป แหล่งจ่ายไฟที่ป้อนเป็นอินพุตของอินเวอร์เตอร์จะเป็นแหล่งจ่ายไฟสลับทั่วไปที่มีรูปคลื่นไซน์ แต่เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์จะมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปไซน์

2.2.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 2-16 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ อินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟ (50Hz หรือ 60Hz) ไฟสลับที่ถูกแปลงเป็นไฟตรง ได้โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter) จากนั้นไฟตรงจะถูกแปลงเป็นไฟสลับที่สามารถแปรขนาดแรงดัน และความถี่ได้โดย วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) วงจรทั้งสองส่วนนี้เป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่นและผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์ นอกจากนั้นยังมีวงจรควบคุมสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรทั้งสองส่วนนั้น

อินเวอร์เตอร์ชนิดใช้งานทั่วไป จะประกอบด้วยส่วนคอนเวอร์เตอร์ และอินเวอร์เตอร์รวมอยู่ในเครื่องเดียวกันเสมอ คอนเวอร์เตอร์มีหน้าที่แปลงไฟสลับเป็นไฟตรงเป็นอุปกรณ์แปลงไฟชนิดหนึ่งส่วนอินเวอร์เตอร์ก็เป็นอุปกรณ์แปลงไฟตรงเป็นไฟสลับ ทั้งสองส่วนนี้จะใช้องค์ประกอบวงจรที่แตกต่างกัน และมีการทำงานที่แตกต่างกันซึ่งจะอธิบายในรายละเอียดต่อไป



รูปที่ 2-16 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

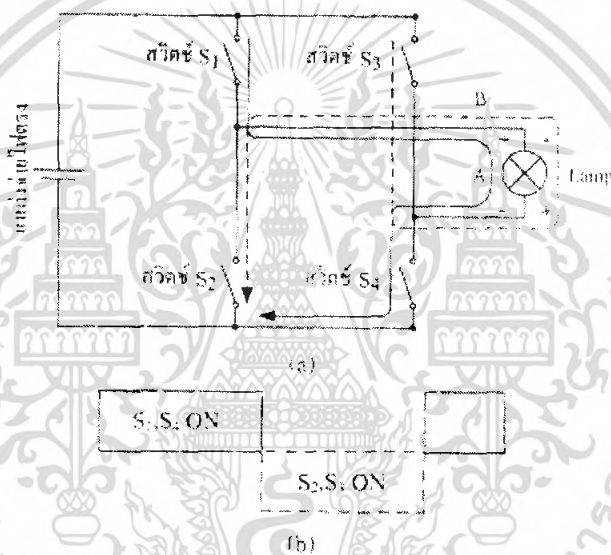
2.2.2 หลักการทำงานของภาคอินเวอร์เตอร์

2.2.2.1 วิธีสร้างไฟฟ้ากระแสสลับจากไฟฟ้ากระแสตรง

อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง การทำความเข้าใจกับหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ก็ควรเริ่มจากวงจรสร้างไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวก่อน

รูปที่ 2-17 (a) อธิบายหลักการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเปลี่ยนโหนดจากมอเตอร์เป็นหลอดไฟเพื่อให้เข้าใจง่าย

สวิตช์ 4 ตัว S_1 , S_2 , S_3 และ S_4 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและโหนด จะเปิด-ปิด สลับกันเป็นจังหวะเพื่อสร้างไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้กับหลอดไฟตามรูปที่ 2-17



รูปที่ 2-17 (a) แสดงวิธีการสร้างไฟฟ้ากระแสสลับ (b) แสดงรูปคลื่นกระแส

เมื่อสวิตช์ S_1 และ S_2 ปิด จะมีกระแสวิ่งผ่านสวิตช์และหลอดไฟตามทิศทาง A

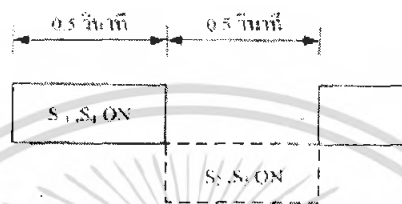
เมื่อสวิตช์ S_2 และ S_3 ปิด จะมีกระแสวิ่งผ่านสวิตช์และหลอดไฟตามทิศทาง B

ซึ่งย้อนทางกับทิศทาง A

ดังนั้นถ้าให้สวิตช์ S_1 และ S_3 เปิด-ปิดสลับกับสวิตช์ S_2 และ S_4 ก็จะทำให้กระแสที่ไหลไปที่หลอดกลับทิศทางกันสลับไปมาเป็นไฟฟ้ากระแสสลับนั่นเอง

2.2.2.2 วิธีการแปรความถี่

ถ้าทำการควบคุมเวลาที่เปิด-ปิดสวิตช์ $S_1 - S_4$ ได้ก็สามารถแปรความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ ได้ตัวอย่างเช่น ให้สวิตช์ S_1 และ S_3 ปิด 0.5 วินาที และทำการเปิด-ปิด สลับกันเช่นนี้เรื่อยไป ดังนั้นใน 1 วินาที ไฟฟ้ากระแสสลับ ก็จะวิ่งไปกลับครบ 1 รอบ หรือไซเคิล ไฟฟ้ากระแสสลับ ไฟฟ้ากระแสสลับนี้จึงมีความถี่ 1 H_z นั่นเอง

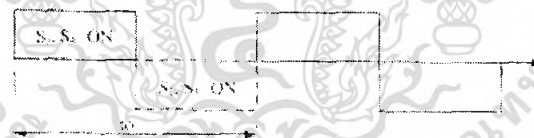


รูปที่ 2-18 แสดงรูปคลื่น ไฟสลับความถี่ 1 H_z

ทั่วไปช่วงเวลาที่ S_1, S_2 และ S_3, S_4 ปิดจะเท่ากันเมื่อรวมเวลาที่สวิตช์ทั้งสองชุด ปิดเท่ากับ t_0 วินาที เป็นหนึ่งไซเคิล

$$f = \frac{1}{t_0} \text{ (Hz)}$$

(2-8)

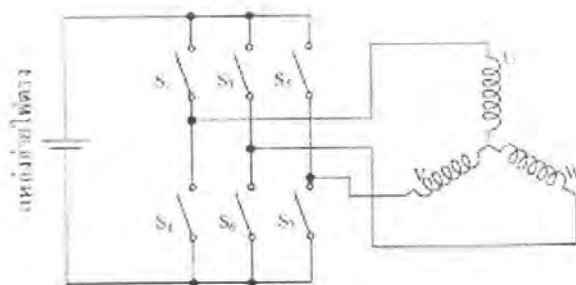


รูปที่ 2-19 แสดงความถี่

2.2.2.3 กรณีของไฟฟ้าสามเฟส

ถ้าให้สวิตช์ S_1 ถึง S_6 ในวงจรเปิด-ปิด ตามจังหวะที่แสดงในรูปที่ 2- 20 ก็จะมีกระแสไหลผ่านขั้ว U-V, V-W และ W-U ของมอเตอร์ ตามรูปคลื่นที่แสดงในรูปที่ 2-20 รูปคลื่นของกระแสจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีช่วงกว้าง และช่วงห่างระหว่างคลื่นเท่ากัน ถ้าทำการเปลี่ยนช่วงเวลาของการเปิด-ปิด สวิตซ์เหล่านี้ ก็จะทำให้ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ เปลี่ยนไปได้ และถ้าทำการเปลี่ยนขนาดของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ก็จะทำให้ขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเปลี่ยนไปได้เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-20 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสพื้นฐาน

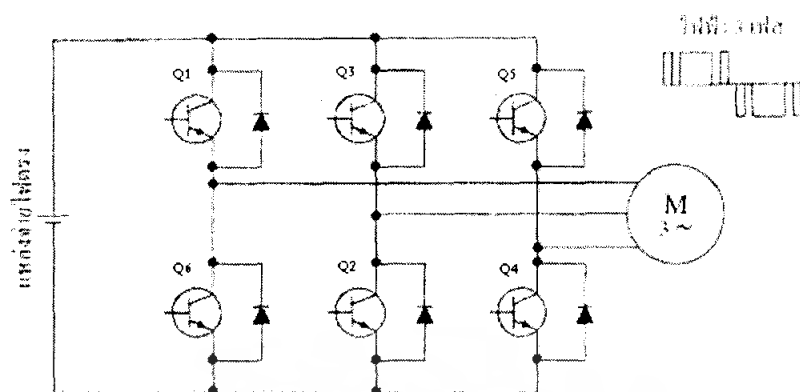


รูปที่ 2-21 แสดงการสร้างไฟฟ้กระแสสลับ 3 เฟส

2.2.2.4 โครงสร้างส่วนที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์จะใช้ทรานซิสเตอร์สวิตช์ทั้ง 6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2- 20 เมื่อต่อเอาท์พุทเข้ากับมอเตอร์ 3 เฟส และควบคุมให้ทรานซิสเตอร์ ON-OFF ตามจังหวะใน รูปที่ 2-21 ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนได้และถ้าเปลี่ยนลำดับการ ON-OFF ของทรานซิสเตอร์ก็สามารถบังคับให้มอเตอร์หมุนกลับทางได้

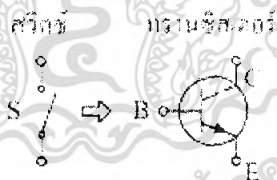
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-22 แสดงอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์

2.2.2.5 การทำงานของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์มี 3 ขา คือ คอลเลคเตอร์ (C) อิมิตเตอร์ (E) และเบส (B) ทรานซิสเตอร์ที่เป็น IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) จะมีขาเกต (G) แทนขาเบส เมื่อไม่จ่ายกระแสให้ขาเบสระหว่างขั้ว C และ E จะไม่นำกระแส มีสถานะเหมือนกับสวิตช์ปิด (OFF) แต่ถ้าจ่ายกระแสให้ขาเบสกระแสจะไหลระหว่างขั้ว C และ E ซึ่งเหมือนกับสวิตช์เปิด (ON) นั่นเอง การ ON-OFF ของทรานซิสเตอร์สามารถทำได้เร็วกว่าสวิตช์มาก



รูปที่ 2-23 แสดงทรานซิสเตอร์

2.2.2.6 วิธีการเปลี่ยนขนาดแรงดัน

เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์ นอกจากการแปรความถี่ เพื่อปรับความเร็วมอเตอร์แล้ว ยังต้องแปรขนาดแรงดันตามความถี่ที่เปลี่ยนไป เพื่อรักษาอัตราส่วน v/f ให้คงที่

การแปรขนาดแรงดัน ของอินเวอร์เตอร์มีหลายวิธี และวิธีที่นิยมใช้กันมากในอินเวอร์เตอร์ ชนิดใช้งานทั่วไป คือ วิธีการแปรรูปคลื่นของแรงดันขาออกที่ป้อนให้มอเตอร์ การแปรรูปคลื่นแรงดันนี้ก็ยังมีหลายวิธีดังนี้

- แปรรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้ามอเตอร์
- แปรขนาดแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรง (PWM)
- แปรขนาดความกว้างของพัลส์ที่เปิด-ปิด ทรานซิสเตอร์ (PAM)

การแปรแรงดันด้วยวิธีการต่างๆนี้จะมีผลต่อลักษณะของสมบัติของการควบคุมมอเตอร์เช่น การสั่นสะเทือน สัญญาณรบกวน การกระเพื่อม หรือ ริปเปิ้ล (Ripple) ของแรงบิด และของกระแส และผลการตอบสนองของแรงบิด เป็นต้น

วิธี PWM นั้นจะต้องกำหนดพัลส์ที่ ON-OFF หลายครั้งในหนึ่งไซเคิล ความกว้างของแต่ละพัลส์จะไม่เท่ากัน เพื่อให้แรงดันเฉลี่ยมีรูปคลื่นไซน์จำนวนพัลส์ที่กำหนดใน 1 วินาที เรียกว่าความถี่ แครเรียร์ (Carrier Frequency) การควบคุมแรงดันด้วยวิธี PWM นี้จะทำให้เกิดการสั่นที่มอเตอร์ และเสียงรบกวนซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับความถี่แครเรียร์นี้

อินเวอร์เตอร์ที่มีเสียงรบกวนน้อย (Low Noise Inverter) จะใช้ความถี่แครเรียร์สูงมากประมาณ 15- 20 KHz ซึ่งความถี่ย่านนี้มนุษย์จะไม่ค่อยได้ยินเสียง เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดเสียงรบกวนต่ำนี้ไปขับมอเตอร์ก็เกือบจะไม่ได้ยินเสียงรบกวนเลย การเลือกความถี่แครเรียร์ได้สูงนี้จะต้องใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็น MOSFET หรือ ไอจีบีที เนื่องจากทรานซิสเตอร์กำลังที่ใช้งานทั่วไปไม่มีขีดจำกัดของความเร็วในการสวิตซ์ซึ่งไม่เกิน 2 KHz

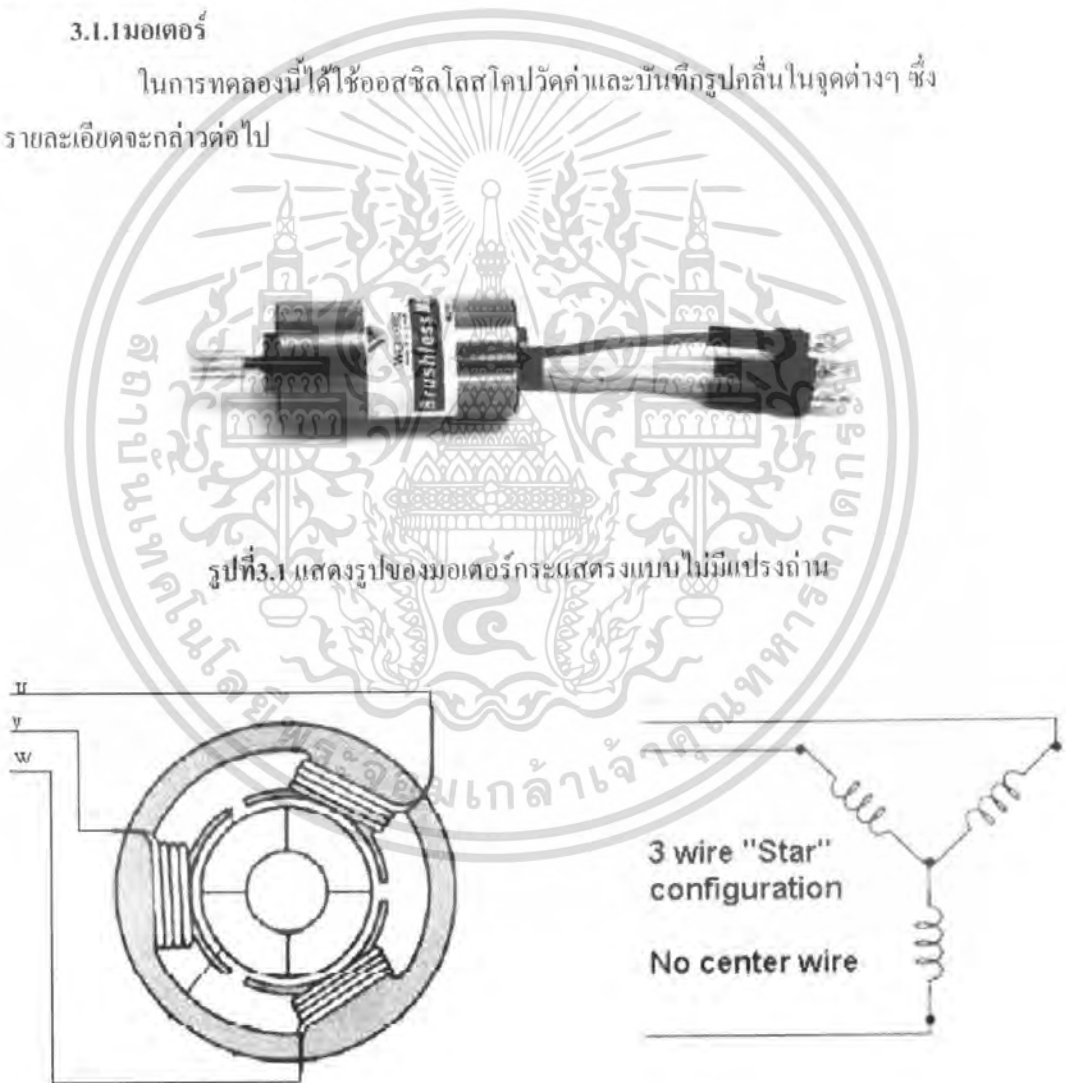
บทที่ 3 ผลการดำเนินงาน

จากการปฏิบัติงานในบางส่วนของโครงการนี้ ซึ่งยังไม่สมบูรณ์ ในบทนี้ได้นำผลการปฏิบัติงานในส่วนต่างๆ ของวงจรมานำเสนอ โดยประกอบไปด้วยรูปคลื่นสัญญาณในส่วนต่างๆ

3.1 การทดลองและส่วนต่างๆของวงจร

3.1.1 มอเตอร์

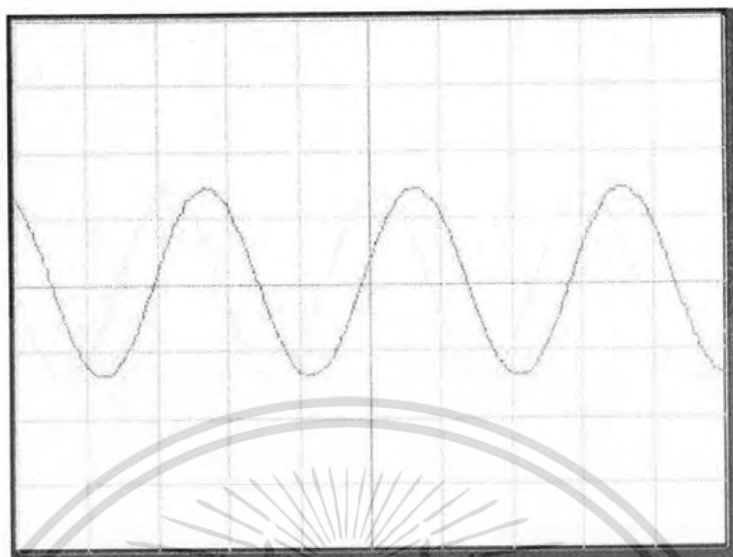
ในการทดลองนี้ได้อาศัยซิลิโตนีโคไซด์และบันทึกรูปคลื่นในจุดต่างๆ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 3.1 แสดงรูปของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

รูปที่ 3-2 แสดงลักษณะ โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

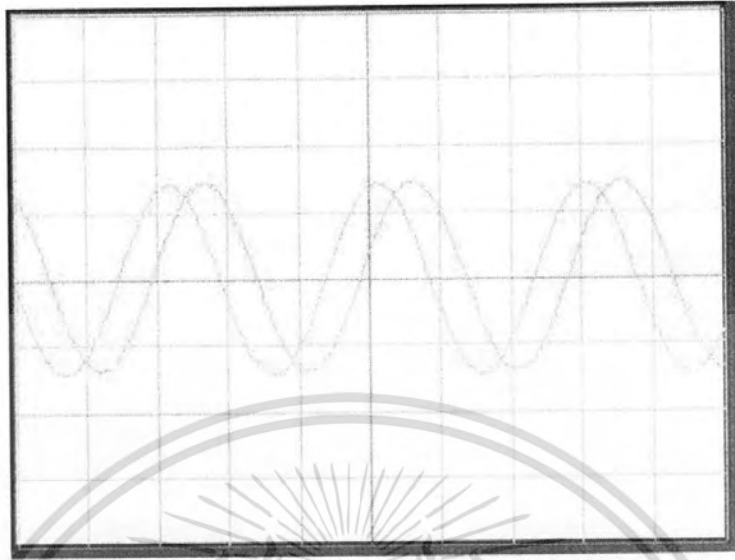


รูปที่ 3-3 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการหมุนมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยวัดเฟส U V เทียบเฟส W ซึ่งมีความต่างเฟส 60 องศา



รูปที่ 3-4 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการหมุนมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยวัดเฟส V W เทียบเฟส U ซึ่งมีความต่างเฟส 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



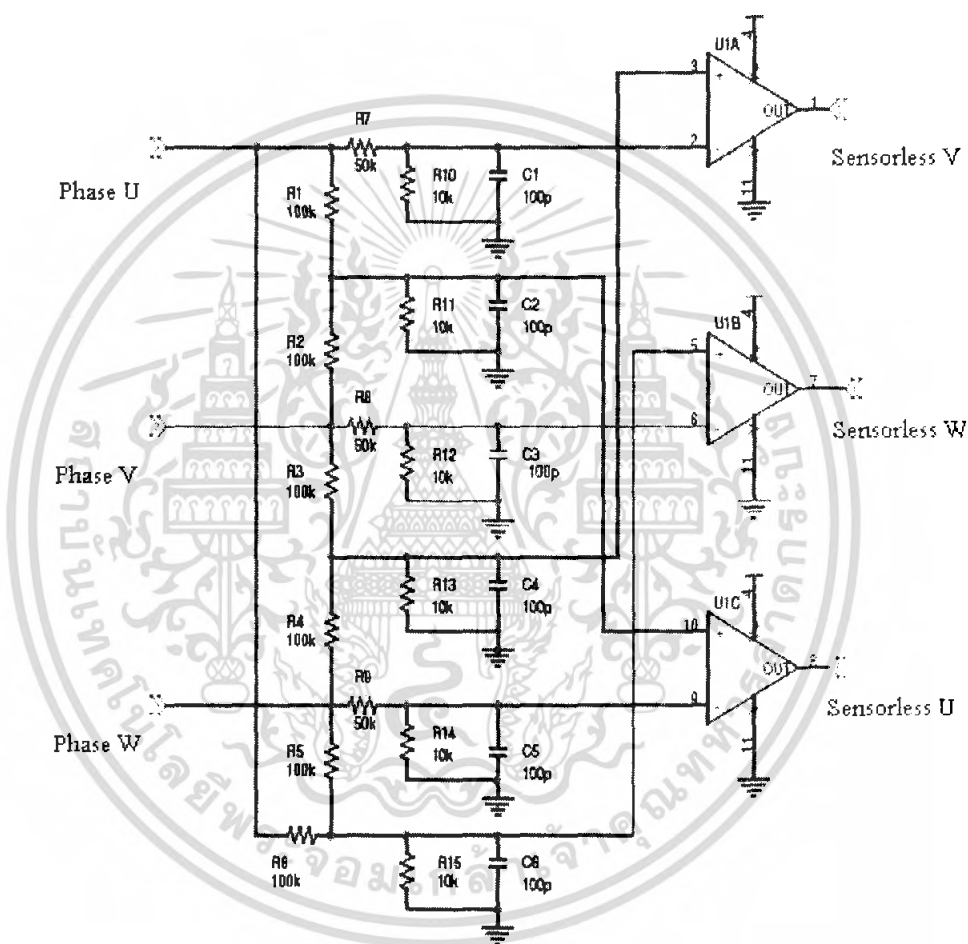
รูปที่ 3-5 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการหมุนมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยวัดเฟส ω U เทียบเฟส V ซึ่งมีความต่างเฟส 60 องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

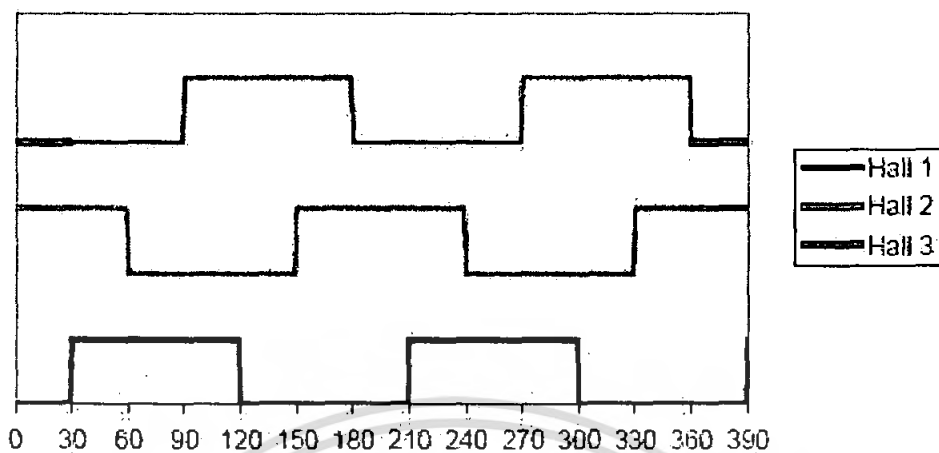
3.1.2 วงจรตรวจจับ Back-EMF

ในส่วนของวงจรตรวจจับสัญญาณ Back-EMF จะทำการตรวจจับสัญญาณแล้วนำสัญญาณเหล่านั้นมาผ่านวงจรเพื่อแปลงสัญญาณให้เหมือนกับสัญญาณที่ได้จาก Hall Sensor แล้วนำสัญญาณที่ได้มาควบคุมการทำงานของวงจรขับต่อไป

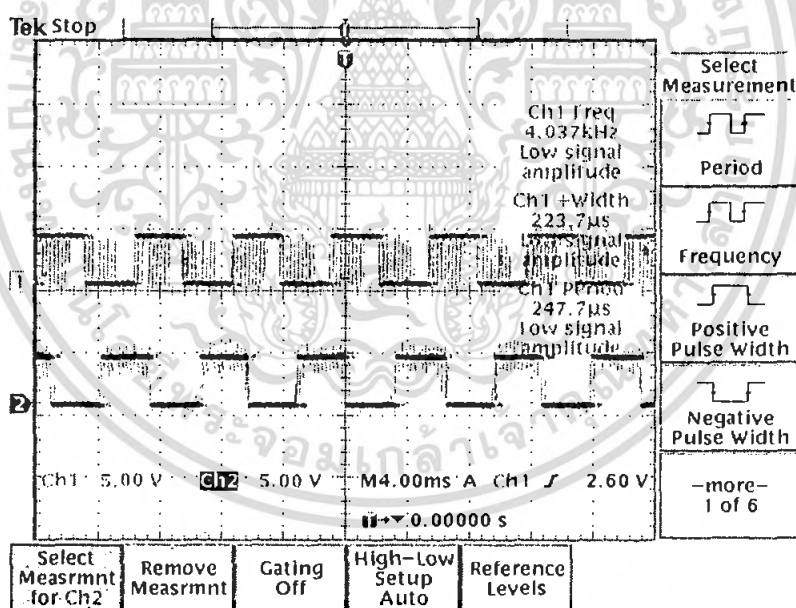


รูปที่ 3-6 แสดงวงจรตรวจจับ Back-EMF แล้วเปลี่ยนสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณที่เหมือนสัญญาณที่ได้จาก Hall Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-7 แสดงสัญญาณที่ได้จาก Hall Sensor

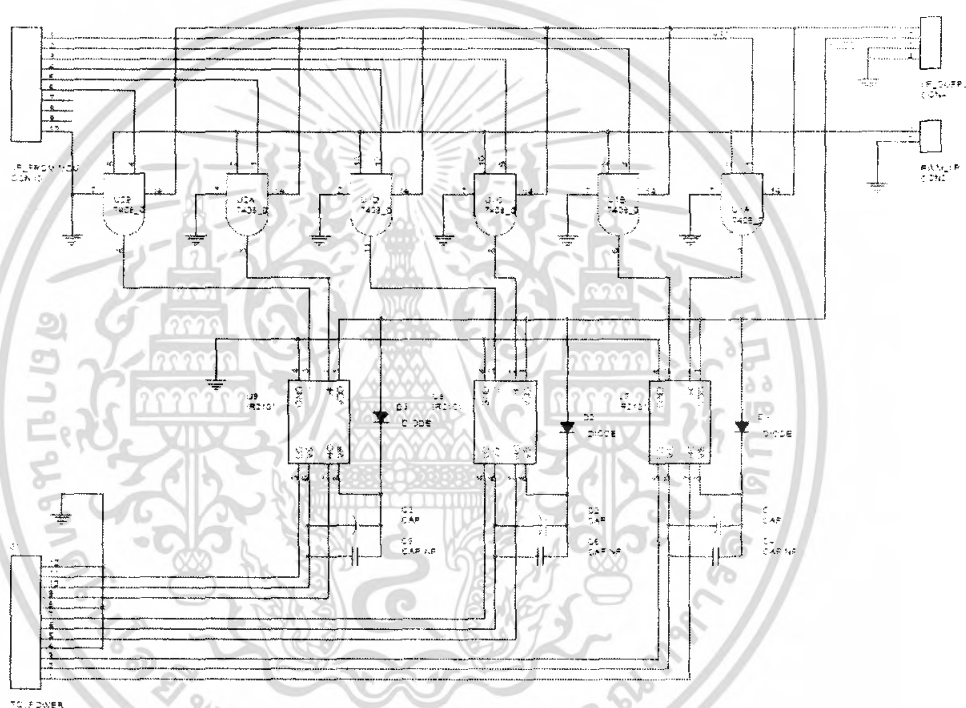


รูปที่ 3-8 แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจร รูปที่ 3.5 คือ Sensor U เปรียบเทียบ Sensor V

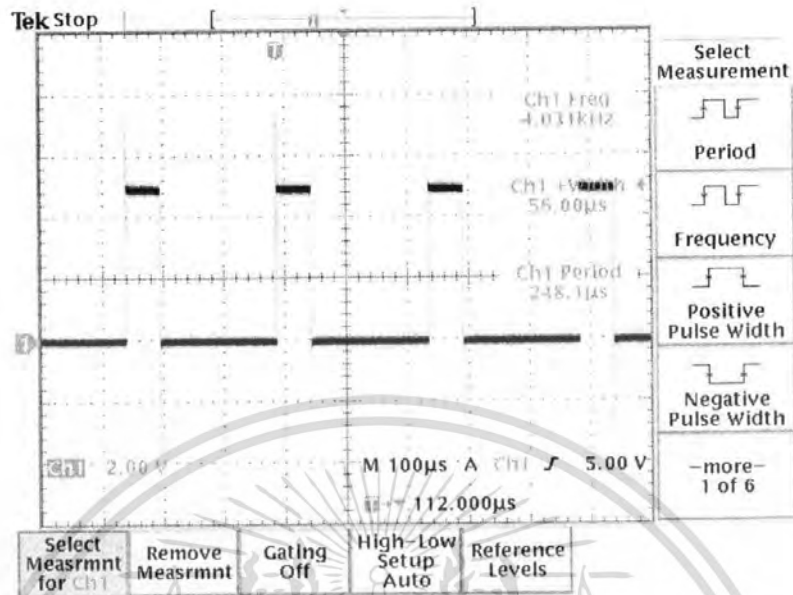
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ ไคร์ฟเวอร์

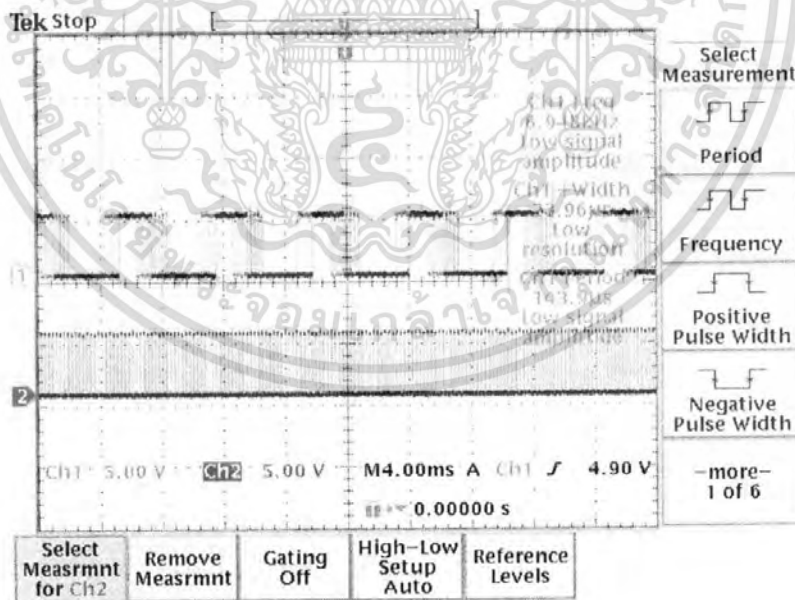
ในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ นี้จะได้รับสัญญาณจากวงจรตรวจจับ Back-EMF แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปประมวลผลเพื่อให้ได้สัญญาณที่เป็นจังหวะการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งจังหวะที่ได้นั้นจะนำไป แอนด์ (AND) กับ สัญญาณพัลส์วัดมอดูเลชั่น (PWM) เพื่อนำไปควบคุมความเร็ว สัญญาณที่ได้ผ่านการ แอนด์ แล้วจะถูกส่งไปยังไคร์ฟเวอร์ต่อไป ซึ่งในที่นี้ใช้ไคร์ฟเวอร์เบอร์ IR 2101 โดยทำหน้าที่ขับเกทของภาคเอาต์พุท ซึ่งใช้เบอร์ IRFZ44N



รูปที่ 3-9 แสดงวงจร แอนด์ (AND) สัญญาณควบคุม กับ สัญญาณพัลส์วัดมอดูเลชั่น ที่ได้จาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจร ไคร์ฟเวอร์

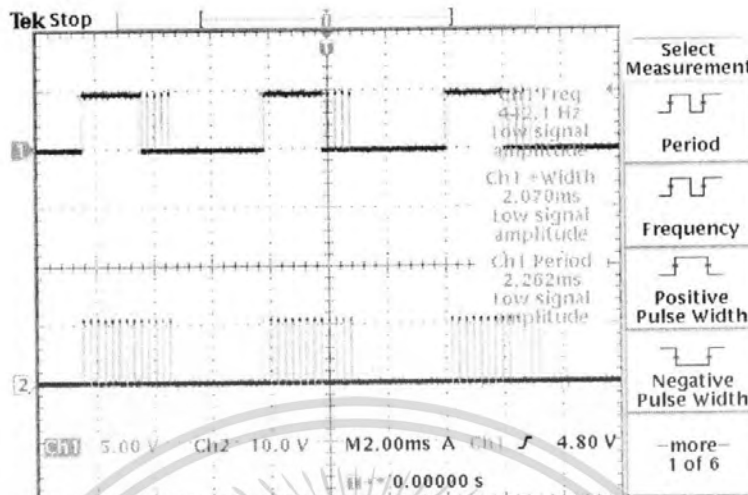


รูปที่ 3-10 แสดงสัญญาณ พัลส์สี่เหลี่ยมที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมี Duty Cycle 15 % และมีความถี่ 4 KHz



รูปที่ 3-11 แสดงสัญญาณควบคุม กับ สัญญาณ PWM ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

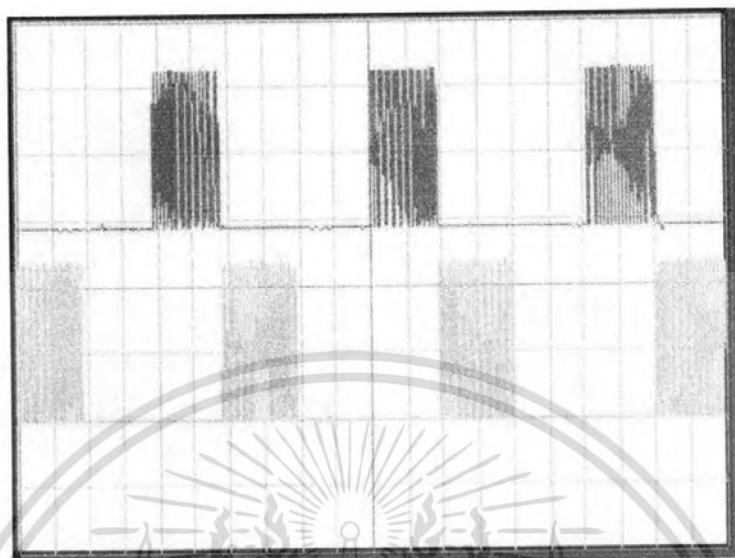


รูปที่ 3-12 แสดงสัญญาณควบคุมและสัญญาณควบคุมที่ผ่านการแอนด์(AND)

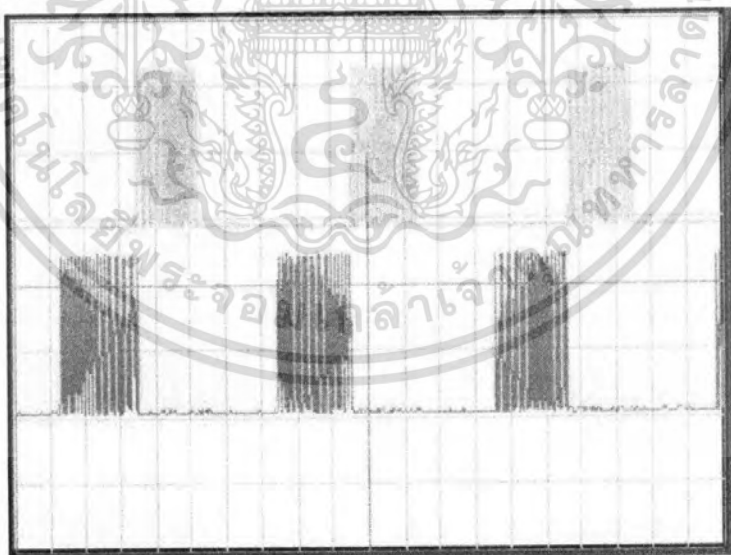


รูปที่ 3-13 แสดงสัญญาณที่ขาเกต (G) ของมอสเฟส ตัวบน เทียบกับ ตัวล่าง ของเฟส U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-14 แสดงสัญญาณที่ขากท (G) ของมอสเฟสตัวบนของเฟส U เทียบกับเฟส V

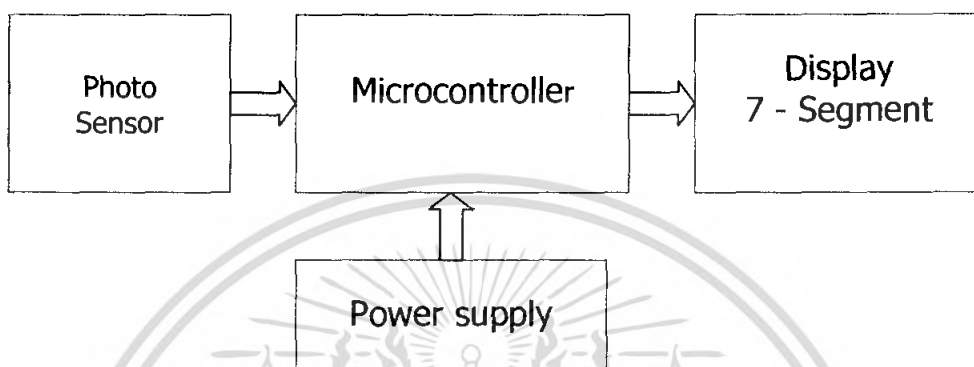


รูปที่ 3-15 แสดงสัญญาณที่ขากท (G) ของมอสเฟสตัวบนของเฟส U เทียบกับเฟส W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 เครื่องวัดความเร็วรอบ

เนื่องจากโครงการนี้เราได้ทำการสร้างเครื่องวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ขึ้นเอง โดยอาศัยการตรวจจับด้วยแสง ซึ่งโครงสร้างโดยรวมแสดงดัง บล็อกไดอะแกรมด้านล่าง

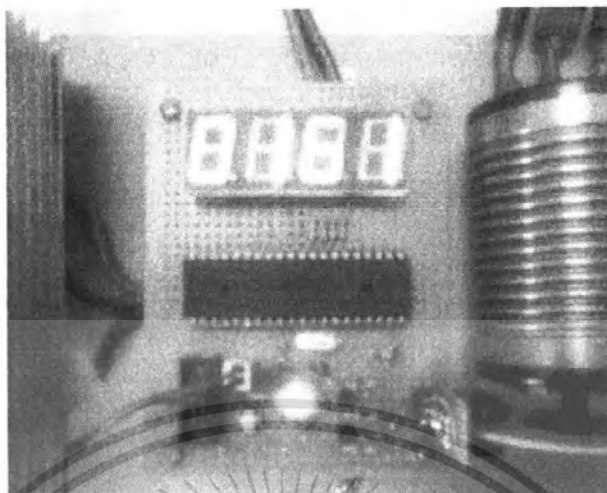


รูปที่ 3-16 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวัดความเร็ว

ส่วนของโฟโต้เซ็นเซอร์ จะประกอบด้วย ไดโอดเปล่งแสง โฟโตทรานซิสเตอร์ วงจรขยายสัญญาณ ซึ่งการทำงานของวงจร คือ ในสภาวะปกติโฟโตทรานซิสเตอร์จะรับแสงจาก ไดโอดเปล่งแสงตลอดเวลาจะทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์ นำกระแสตลอดเวลา และเมื่อโฟโตทรานซิสเตอร์ไม่ได้รับแสงจากไดโอดเปล่งแสงจะทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส จากการทำงานนี้จึงนำไปสู่การสร้างสัญญาณ ปิด / เปิด เพื่อใช้ในการนับจำนวนรอบของมอเตอร์ ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำการนับสัญญาณที่ได้จากการ ปิด/เปิด ใน 1 วินาที จากนั้นนำค่าที่ได้คูณด้วย 60 เพื่อให้เป็นรอบต่อนาที จากนั้นนำค่าที่ได้จากการวัดแสดงผลทาง 7-Segment ดังสมการ (ในกรณีปิด / เปิด 1 ครั้ง ต่อ 1 รอบ)

$$\text{จำนวนรอบ} = \text{สัญญาณที่ได้จากการวัดใน 1 วินาที} \times 60 \quad (\text{รอบ/นาที})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-17 แสดงวงจรวัดความเร็วรอบ



รูปที่ 3-18 แสดงการวัดความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรที่เราสร้างขึ้นนี้มีค่าผิดพลาดอยู่ซึ่งได้ทำการทดลองป้อนสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ค่าต่าง แล้วทำการอ่านค่าจากเครื่องวัดความเร็วรอบที่สร้างขึ้นเทียบกับ ออสซิลโลสโคป ซึ่งได้ผลตาม ตาราง

ตารางที่ 2-5 แสดงค่าความถี่ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบเครื่องวัดความเร็วรอบ

ความถี่ (ฟังก์ชันเจน)	ค่าที่อ่านได้		% ผิดพลาด
	เครื่องวัดรอบ	ออสซิลโลสโคป	
500	503	500	0.60
1000	1005	1000	0.50
1500	1507	1500	0.47
2000	2009	2000	0.45
2500	2511	2500	0.44
3000	3014	3000	0.47
3500	3516	3500	0.46
4000	4017	4000	0.43
4500	4519	4500	0.42
5000	5021	5000	0.42
5500	5523	5500	0.42
6000	6025	6000	0.42
6500	6527	6500	0.42
7000	7029	7000	0.41
7500	7531	7500	0.41
8000	8033	8000	0.41
8500	8535	8500	0.41
9000	9037	9000	0.41
9500	9539	9500	0.41
		ค่าเฉลี่ย % ผิดพลาด	0.44

จากตารางจะเห็นว่าในการวัดที่ค่าต่างๆจะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นดังนั้นเราจึงหาค่าเฉลี่ยตลอดย่านการวัดออกมาเพื่อที่จะนำค่าที่ได้นั้นไปทำการแก้ไขปรับแต่งความผิดพลาดนั้นให้เครื่องวัดมีความถูกต้องมากขึ้น จากนั้นก็ทำการวัดค่าต่างๆใหม่อีกครั้ง โดยค่าต่างๆแสดงดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-6 แสดงค่าความถี่ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบเครื่องวัดความเร็วรอบที่ทำกรปรับแก้ค่าผิดพลาดแล้ว

ความถี่	ค่าที่อ่านได้		% ผิดพลาด
	เครื่องวัดรอบ	ออสซิลโลสโคป	
500	500	500	0.00
1000	1000	1000	0.00
1500	1500	1500	0.00
2000	2000	2000	0.00
2500	2499	2500	0.04
3000	2999	3000	0.03
3500	3499	3500	0.03
4000	3999	4000	0.03
4500	4499	4500	0.02
5000	4998	5000	0.04
5500	5498	5500	0.04
6000	5998	6000	0.03
6500	6498	6500	0.03
7000	6998	7000	0.03
7500	7497	7500	0.04
8000	7997	8000	0.04
8500	8497	8500	0.04
9000	8997	9000	0.03
9500	9497	9500	0.03
		ค่าเฉลี่ย % ผิดพลาด	0.03

จากตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการแก้ไขค่าผิดพลาดแล้ว เปรอร์เซ็นต์ค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดลดลงแต่ไม่มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากการอ่านค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์ยังมีการอ่านที่ผิดพลาดอยู่จึงต้องมีการแก้ไขต่อไป

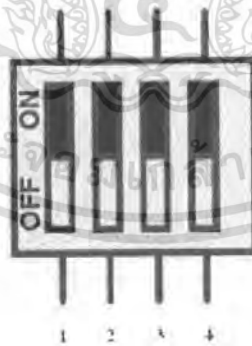
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 การวัดความเร็วรอบมอเตอร์

จากการที่เราสร้างเครื่องวัดความเร็วรอบขึ้นมาแล้วและได้ปรับแต่งเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็มาถึงขั้นตอนการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยการออกแบบของโครงงานนี้จะเป็นการออกแบบให้มอเตอร์รักษาความเร็วรอบคงที่ ซึ่งเราได้ตั้งไว้ 4 ระดับโดยในการปรับระดับความเร็วต่าง ๆ นั้นทำได้โดยการปรับที่ คริปสวิทช์ (DIP SW) ซึ่งความเร็วที่ตั้งไว้ 4 ระดับนั้น คือ 6000 7200 8400 และ 9000 รอบ ต่อ นาที (RPM) และในการปรับเปลี่ยนรอบแต่ละครั้งจะต้องทำการปรับ คริปสวิทช์ ไปในตำแหน่งที่ต้องการความเร็วแล้วจึงนำไปทดสอบการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์

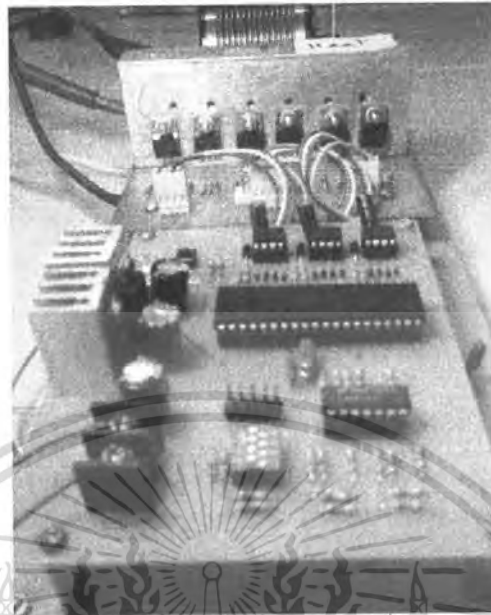
ตารางที่ 2-7 แสดงตำแหน่งของ DIP SW ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ตำแหน่งของสวิทช์				ความเร็วรอบ (RPM)
1	2	3	4	
OFF	ON	ON	ON	6000
ON	OFF	ON	ON	7200
ON	ON	OFF	ON	8400
ON	ON	ON	OFF	9000



รูปที่ 3-18 แสดงรูป DIP SW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-19 แสดง คริปสวิทช์ (DIPSW) ที่ติดตั้งบนบอร์ดควบคุม



รูปที่ 3-20 แสดงบล็อกไดอะแกรมของชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบ ไม่มีแปรงถ่าน

การทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์ ในการตรวจสอบความเร็วรอบของวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบ ไม่มีแปรงถ่านนี้ ได้ทำการวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับ Back emf ซึ่งลักษณะของสัญญาณนั้นจะอยู่ในรูปของพัลส์ของซึ่งมีความถี่ที่สัมพันธ์ กับความเร็วของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมอเตอร์เป็นแบบ 1 ขั้ว หมุน 1 รอบใช้คอมมิวเตชัน 6 สภาวะและมีพัลส์ออกมา 1 พัลส์ต่อรอบโดยความเร็วรอบสามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

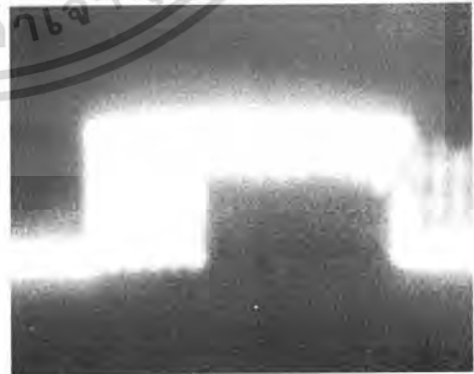
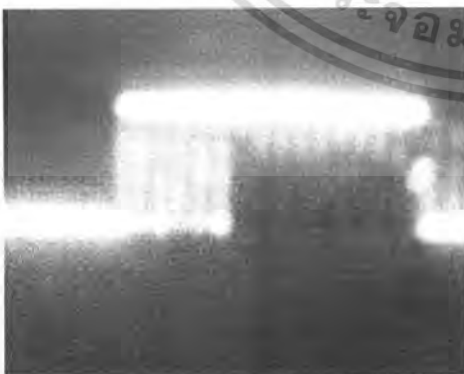
$$\text{ความเร็วรอบ} = \text{จำนวนพัลส์จากเอาต์พุตของวงจรตรวจจับ Back emf} * 60$$

ความเร็วรอบที่ได้จากการวัดแสดงดังตาราง โดยได้ทำการวัดที่สภาวะไม่มีโหลด (No load) ซึ่งได้ทำการวัดเป็นจำนวน 3 ครั้งต่อ 1 ความเร็วรอบ

ตารางที่ 2-8 แสดงค่าความเร็วที่ได้จากการทดสอบวัดความเร็วรอบ

ความเร็วรอบ (No load)	ค่าที่อ่านได้ (ครั้ง)		
	1	2	3
6000	6120	6000	6120
7200	7200	7260	7260
8400	8460	8400	8400
9000	9060	8940	8940

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าของความเร็วรอบมีค่าที่ไม่คงที่มีค่าที่วิ่งขึ้นลงอยู่ที่บริเวณค่าความเร็วรอบที่กำหนดซึ่งสิ่งที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลมาจากความเพี้ยนของสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับ Back emf จึงส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านค่าของ เคา์เตอร์ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3-21 แสดงสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรตรวจจับ Back emf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุปปัญหาและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สรุปผลของโครงการ

โครงการที่จัดทำขึ้นนี้เป็นชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยส่วนประกอบ จะประกอบไปด้วย วงจรควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ใช้ควบคุมพัลส์วิดมอดูเลชัน และ สร้างสัญญาณควบคุมโดยการนำเอาสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับ Back-EMF มาเป็นตัวกำหนดสัญญาณควบคุมเพื่อส่งออกไปยังเอาต์พุต วงจรตรวจจับ Back-EMF จะทำหน้าที่เสมือน Hall Sensor โดยจะสร้างสัญญาณป้อนให้วงจรควบคุมเพื่อควบคุมจังหวะการทำงานของมอเตอร์ วงจรไดรฟ์เวอร์ (Driver) และวงจรเอาต์พุตเพาเวอร์ จะทำหน้าที่ขับมอเตอร์ตามจังหวะที่ได้จากวงจรควบคุม ซึ่งวงจรทั้งหมดที่ได้จัดทำขึ้นนี้จะรองรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่เกิน 48 โวลต์

4.2 ปัญหาของโครงการ

ในระหว่างการทำโครงการ ชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานมีดังนี้

1. ในการวัดสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคปนั้นช่องสัญญาณในการวัดไม่เพียงพอซึ่งในการทดลองจะต้องวัดสัญญาณถึง 3 ช่องเปรียบเทียบกับโดยใช้ฐานเวลาเดียวกันเพื่อความถูกต้องและแม่นยำของสัญญาณ

2. มีปัญหาในการเลือกใช้ เกทไดรฟ์เวอร์ (Gate Driver) โดยในตอนแรกเลือกใช้ เกทไดรฟ์เวอร์ เบอร์ TC4427 ซึ่งทำให้สัญญาณที่ไปขับเกทของมอเตอร์ไม่สมบูรณ์ จึงได้ทำการแก้ไขมาเป็น เบอร์ IR 2101 ซึ่งเป็น High/Low Gate Driver

4.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาวงจรให้มีความเสถียรกว่าเป็นที่เป็นอย่างงี้
2. มีการป้องกันการโอเวอร์โหลด (Overload) หรือ ลัดวงจร (Short circuit) ทางด้านเอาต์พุต

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

วีรพงษ์ วิไลพันธ์ , พรเทพ ทองภิรมย์ และ ชีรไนย แสงกระจ่าง “ ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรง แบบปราศจากแปรงถ่านแบบดิจิทัลคอนโทรล ” ปรินิพนธ์
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิตวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ , 2549.

ประจัน พลังสันติกุล .การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ด้วยภาษา C
WinAVR (C Compiler). กรุงเทพมหานคร: บริษัท แอพซอพต์แวร์เทค จำกัด , 2549.

ภาษาอังกฤษ

Miller,T.J.E. (Timothy John Eastham). Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor
Drive. New York : Oxford University Press. 1989.

Padmaraja Yedamala . Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals : Microchip Technology
Inc.2003.

www.atmcl.com. sensorless control of 3-phase brushless DC motors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Features

- High-performance, Low-power AVR[®] 8-bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 131 Powerful Instructions – Most Single-clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 16 MIPS Throughput at 16 MHz
 - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory segments
 - 16K Bytes of In-System Self-programmable Flash program memory
 - 512 Bytes EEPROM
 - 1K Byte Internal SRAM
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C⁽¹⁾
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
 - In-System Programming by On-chip Boot Program
 - True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
- JTAG (IEEE std. 1149.1 Compliant) Interface
 - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
 - Extensive On-chip Debug Support
 - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescalers and Compare Modes
 - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Four PWM Channels
 - 8-channel, 10-bit ADC
 - 8 Single-ended Channels
 - 7 Differential Channels in TQFP Package Only
 - 2 Differential Channels with Programmable Gain at 1x, 10x, or 200x
 - Byte-oriented Two-wire Serial Interface
 - Programmable Serial USART
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated RC Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 32 Programmable I/O Lines
 - 40-pin PDIP, 44-lead TQFP, and 44-pad QFN/MLF
- Operating Voltages
 - 2.7 - 5.5V for ATmega16L
 - 4.5 - 5.5V for ATmega16
- Speed Grades
 - 0 - 8 MHz for ATmega16L
 - 0 - 16 MHz for ATmega16
- Power Consumption @ 1 MHz, 3V, and 25°C for ATmega16L
 - Active: 1.1 mA
 - Idle Mode: 0.35 mA
 - Power-down Mode: < 1 μ A



8-bit AVR[®]
Microcontroller
with 16K Bytes
In-System
Programmable
Flash

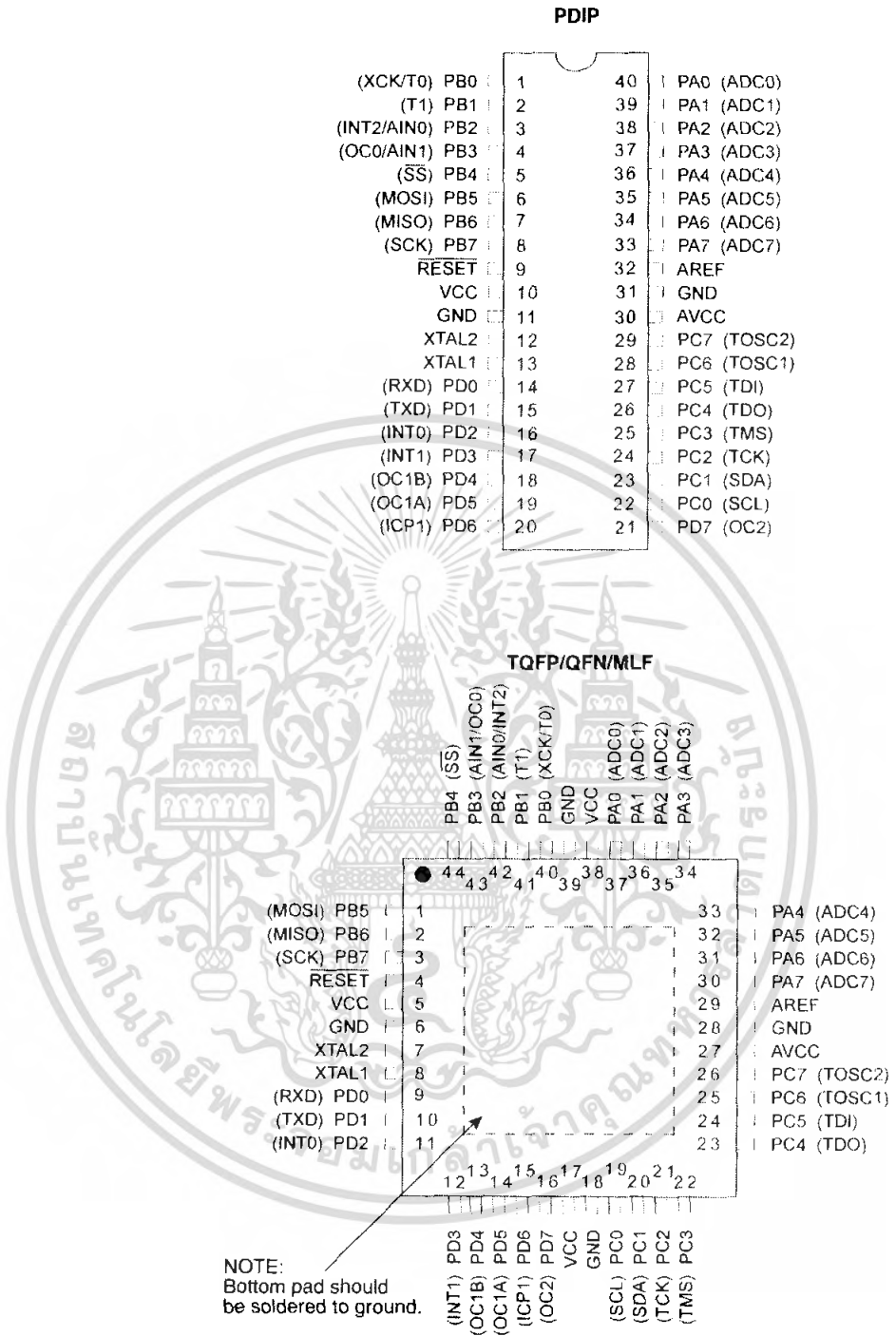
ATmega16
ATmega16L



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pin Configurations

Figure 1. Pinout ATmega16



Disclaimer

Typical values contained in this datasheet are based on simulations and characterization of other AVR microcontrollers manufactured on the same process technology. Min and Max values will be available after the device is characterized.

2 ATmega16(L)

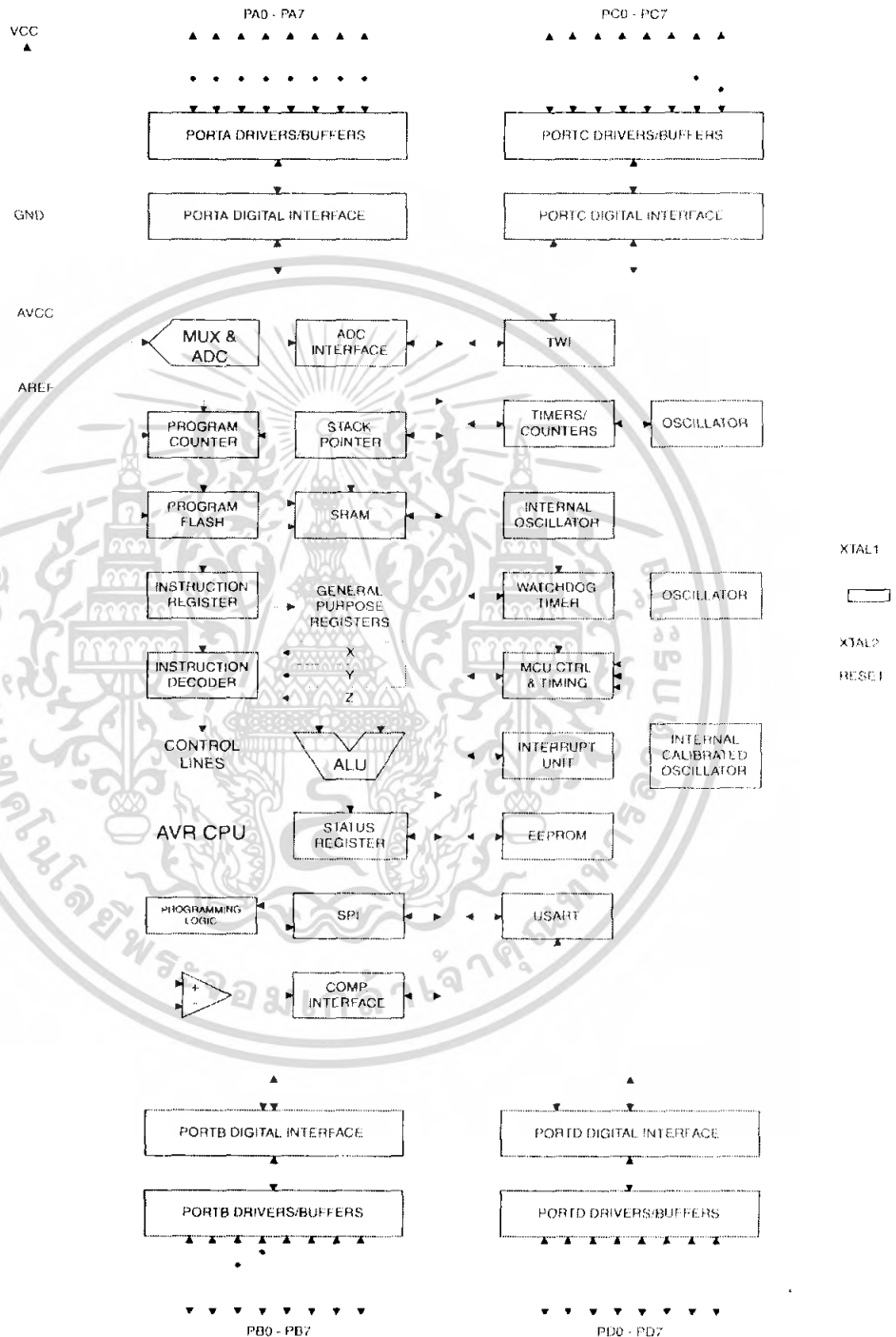
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Overview

The ATmega16 is a low-power CMOS 8-bit microcontroller based on the AVR enhanced RISC architecture. By executing powerful instructions in a single clock cycle, the ATmega16 achieves throughputs approaching 1 MIPS per MHz allowing the system designer to optimize power consumption versus processing speed.

Block Diagram

Figure 2. Block Diagram





The AVR core combines a rich instruction set with 32 general purpose working registers. All the 32 registers are directly connected to the Arithmetic Logic Unit (ALU), allowing two independent registers to be accessed in one single instruction executed in one clock cycle. The resulting architecture is more code efficient while achieving throughputs up to ten times faster than conventional CISC microcontrollers.

The ATmega16 provides the following features: 16K bytes of In-System Programmable Flash Program memory with Read-While-Write capabilities, 512 bytes EEPROM, 1K byte SRAM, 32 general purpose I/O lines, 32 general purpose working registers, a JTAG interface for Boundary-scan, On-chip Debugging support and programming, three flexible Timer/Counters with compare modes, Internal and External Interrupts, a serial programmable USART, a byte oriented Two-wire Serial Interface, an 8-channel, 10-bit ADC with optional differential input stage with programmable gain (TQFP package only), a programmable Watchdog Timer with Internal Oscillator, an SPI serial port, and six software selectable power saving modes. The Idle mode stops the CPU while allowing the USART, Two-wire interface, A/D Converter, SRAM, Timer/Counters, SPI port, and interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the register contents but freezes the Oscillator, disabling all other chip functions until the next External Interrupt or Hardware Reset. In Power-save mode, the Asynchronous Timer continues to run, allowing the user to maintain a timer base while the rest of the device is sleeping. The ADC Noise Reduction mode stops the CPU and all I/O modules except Asynchronous Timer and ADC, to minimize switching noise during ADC conversions. In Standby mode, the crystal/resonator Oscillator is running while the rest of the device is sleeping. This allows very fast start-up combined with low-power consumption. In Extended Standby mode, both the main Oscillator and the Asynchronous Timer continue to run.

The device is manufactured using Atmel's high density nonvolatile memory technology. The On-chip ISP Flash allows the program memory to be reprogrammed in-system through an SPI serial interface, by a conventional nonvolatile memory programmer, or by an On-chip Boot program running on the AVR core. The boot program can use any interface to download the application program in the Application Flash memory. Software in the Boot Flash section will continue to run while the Application Flash section is updated, providing true Read-While-Write operation. By combining an 8-bit RISC CPU with In-System Self-Programmable Flash on a monolithic chip, the Atmel ATmega16 is a powerful microcontroller that provides a highly-flexible and cost-effective solution to many embedded control applications.

The ATmega16 AVR is supported with a full suite of program and system development tools including: C compilers, macro assemblers, program debugger/simulators, in-circuit emulators, and evaluation kits.

Pin Descriptions

VCC	Digital supply voltage.
GND	Ground.
Port A (PA7..PA0)	Port A serves as the analog inputs to the A/D Converter. Port A also serves as an 8-bit bi-directional I/O port, if the A/D Converter is not used. Port pins can provide internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port A output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. When pins PA0 to PA7 are used as inputs and are externally pulled low, they will source current if the internal pull-up resistors are activated. The Port A pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

ATmega16(L)

2466P-AVR-08/07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Port B (PB7..PB0)

Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port B also serves the functions of various special features of the ATmega16 as listed on page 58.

Port C (PC7..PC0)

Port C is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port C output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running. If the JTAG interface is enabled, the pull-up resistors on pins PC5(TDI), PC3(TMS) and PC2(TCK) will be activated even if a reset occurs.

Port C also serves the functions of the JTAG interface and other special features of the ATmega16 as listed on page 61.

Port D (PD7..PD0)

Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port D also serves the functions of various special features of the ATmega16 as listed on page 63.

RESET

Reset Input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a reset, even if the clock is not running. The minimum pulse length is given in Table 15 on page 38. Shorter pulses are not guaranteed to generate a reset.

XTAL1

Input to the inverting Oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

XTAL2

Output from the inverting Oscillator amplifier.

AVCC

AVCC is the supply voltage pin for Port A and the A/D Converter. It should be externally connected to V_{CC} , even if the ADC is not used. If the ADC is used, it should be connected to V_{CC} through a low-pass filter.

AREF

AREF is the analog reference pin for the A/D Converter.



IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

HIGH AND LOW SIDE DRIVER Product Summary

Features

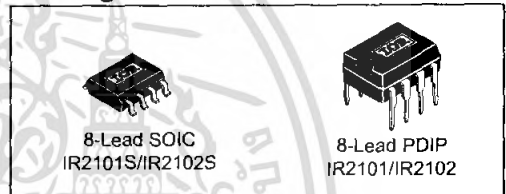
- Floating channel designed for bootstrap operation
Fully operational to +600V
Tolerant to negative transient voltage
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout
- 3.3V, 5V, and 15V logic input compatible
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs (IR2101) or out of phase with inputs (IR2102)
- Also available LEAD-FREE

V_{OFFSET}	600V max.
$I_{O+/-}$	130 mA / 270 mA
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{on/off}$ (typ.)	160 & 150 ns
Delay Matching	50 ns

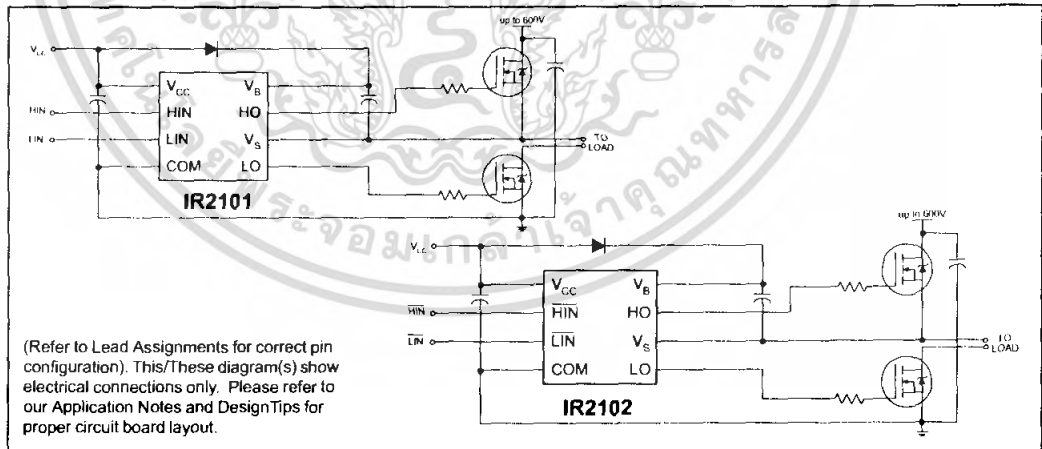
Description

The IR2101(S)/IR2102(S) are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. The logic input is compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 600 volts.

Packages



Typical Connection



IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

International
IR Rectifier

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units	
V _B	High side floating supply voltage	-0.3	625	V	
V _S	High side floating supply offset voltage	V _B - 25	V _B + 0.3		
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S - 0.3	V _B + 0.3		
V _{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	-0.3	25		
V _{LO}	Low side output voltage	-0.3	V _{CC} + 0.3		
V _{IN}	Logic input voltage (HIN & LIN)	-0.3	V _{CC} + 0.3		
dV _S /dt	Allowable offset supply voltage transient	—	50	V/ns	
P _D	Package power dissipation @ T _A ≤ +25°C	(8 lead PDIP)	—	1.0	W
		(8 lead SOIC)	—	0.625	
R _{thJA}	Thermal resistance, junction to ambient	(8 lead PDIP)	—	125	°C/W
		(8 lead SOIC)	—	200	
T _J	Junction temperature	—	150	°C	
T _S	Storage temperature	-55	150		
T _L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300		

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S offset rating is tested with all supplies biased at 15V differential.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply absolute voltage	V _S + 10	V _S + 20	V
V _S	High side floating supply offset voltage	Note 1	600	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S	V _B	
V _{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	10	20	
V _{LO}	Low side output voltage	0	V _{CC}	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN & LIN) (IR2101) & (HIN & LIN) (IR2102)	0	V _{CC}	
T _A	Ambient temperature	-40	125	°C

Note 1: Logic operational for V_S of -5 to +600V. Logic state held for V_S of -5V to -V_{BS}. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS}) = 15V, C_L = 1000 pF and T_A = 25°C unless otherwise specified.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	—	160	220	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	—	150	220		$V_S = 600V$
t_r	Turn-on rise time	—	100	170		
t_f	Turn-off fall time	—	50	90		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	—	—	50		

Static Electrical Characteristics

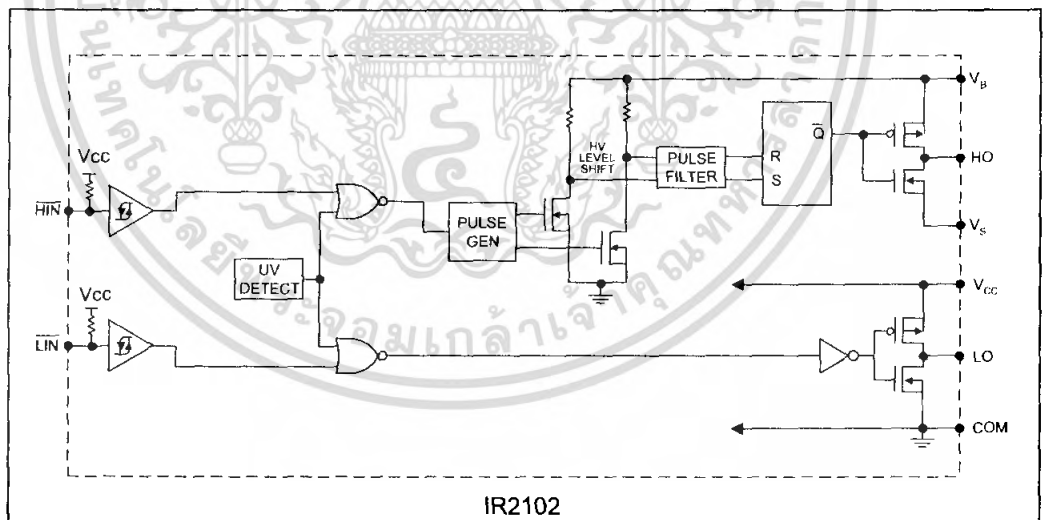
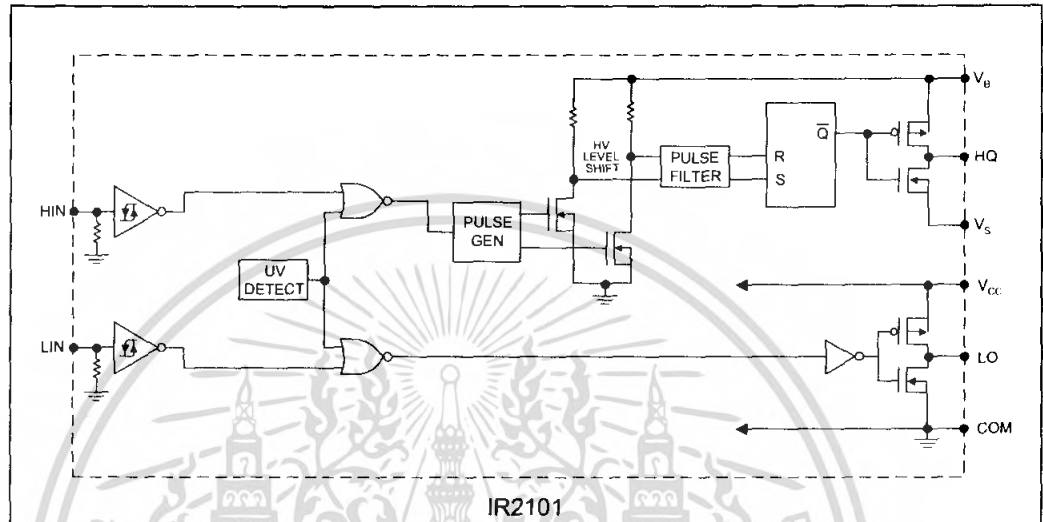
V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS}) = 15V and T_A = 25°C unless otherwise specified. The V_{IN} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to COM. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" input voltage (IR2101) Logic "0" input voltage (IR2102)	3	—	—	V	$V_{CC} = 10V$ to 20V
V_{IL}	Logic "0" input voltage (IR2101) Logic "1" input voltage (IR2102)	—	—	0.8		$V_{CC} = 10V$ to 20V
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	—	—	100	mV	$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	—	—	100		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 600V$
I_{QBS}	Quiescent V_{BS} supply current	—	30	55		$V_{IN} = 0V$ or 5V
I_{QCC}	Quiescent V_{CC} supply current	—	150	270		$V_{IN} = 0V$ or 5V
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	—	3	10	μA	$V_{IN} = 5V$ (IR2101) $V_{IN} = 0V$ (IR2102)
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	—	—	1		$V_{IN} = 0V$ (IR2101) $V_{IN} = 5V$ (IR2102)
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	8	8.9	9.8	V	
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	7.4	8.2	9		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	130	210	—	mA	$V_O = 0V$ $V_{IN} = \text{Logic "1"}$ $PW \leq 10 \mu s$
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	270	360	—		$V_O = 15V$ $V_{IN} = \text{Logic "0"}$ $PW \leq 10 \mu s$

IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

International
IR Rectifier

Functional Block Diagram

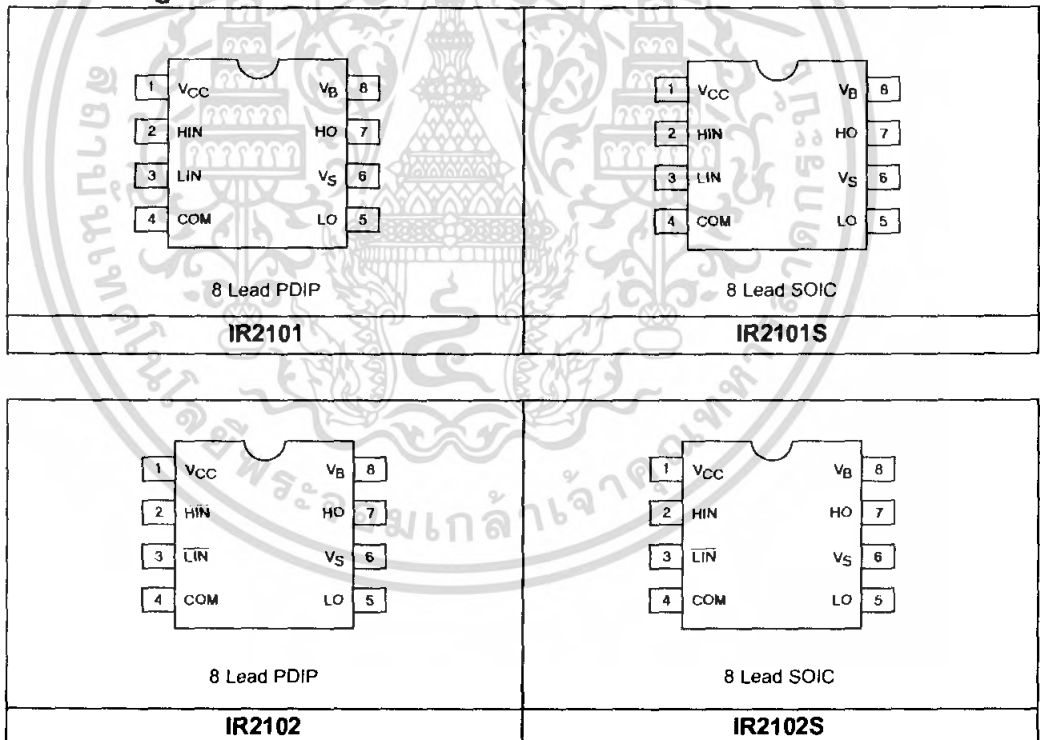


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lead Definitions

Symbol	Description
HIN	Logic input for high side gate driver output (HO), in phase (IR2101)
$\overline{\text{HIN}}$	Logic input for high side gate driver output (HO), out of phase (IR2102)
LIN	Logic input for low side gate driver output (LO), in phase (IR2101)
$\overline{\text{LIN}}$	Logic input for low side gate driver output (LO), out of phase (IR2102)
V _B	High side floating supply
HO	High side gate drive output
V _S	High side floating supply return
V _{CC}	Low side and logic fixed supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

Lead Assignments



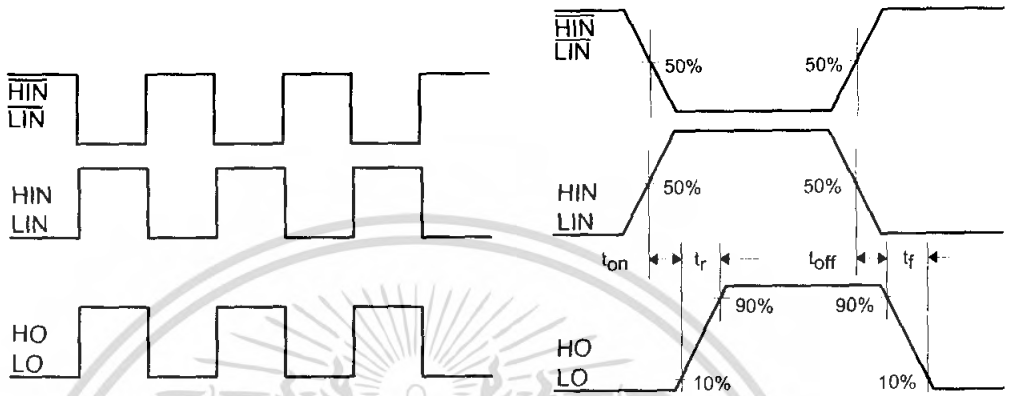


Figure 1. Input/Output Timing Diagram

Figure 2. Switching Time Waveform Definitions

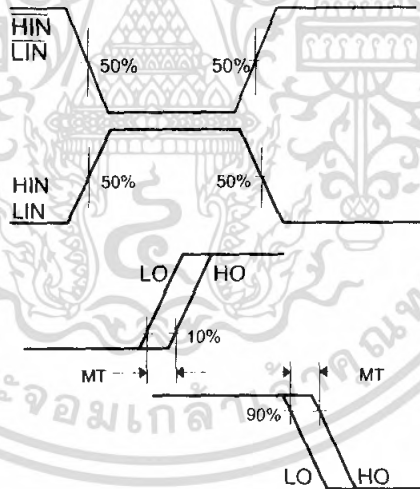


Figure 3. Delay Matching Waveform Definitions

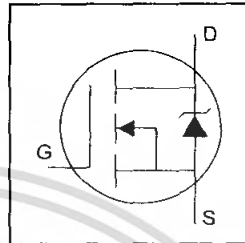
- Advanced Process Technology
- Surface Mount (IRFZ44NS)
- Low-profile through-hole (IRFZ44NL)
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated

Description

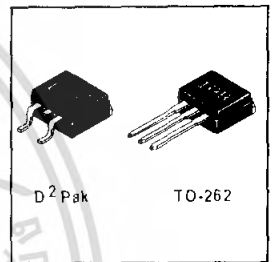
Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer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

The D²Pak is a surface mount power package capable of accommodating die sizes up to HEX-4. It provides the highest power capability and the lowest possible on-resistance in any existing surface mount package. The D²Pak is suitable for high current applications because of its low internal connection resistance and can dissipate up to 2.0W in a typical surface mount application.

The through-hole version (IRFZ44NL) is available for low-profile applications.



$V_{DSS} = 55V$
$R_{DS(on)} = 0.0175\Omega$
$I_D = 49A$



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	49	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	35	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	160	
$P_D @ T_A = 25^\circ C$	Power Dissipation	3.8	W
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	94	W
	Linear Derating Factor	0.63	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current ①	25	A
E_{AR}	Repelitive Avalanche Energy ①	9.4	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	---	1.5	°C/W
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	---	40	

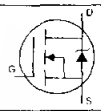
IRFZ44NS/IRFZ44NL

International
IR Rectifier

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

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.058	—	$V/^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	17.5	$\text{m}\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 25A$ ⑥
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	19	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 25A$ ⑥
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	63	nC	$I_D = 25A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	14		$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	23		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	12	—		$V_{DD} = 28V$
t_r	Rise Time	—	60	—		$I_D = 25A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	44	—		$R_G = 12\Omega$
t_f	Fall Time	—	45	—		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ④
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—	nH	Between lead, and center of die contact
C_{iss}	Input Capacitance	—	1470	—		$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	360	—		$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	88	—	pF	$f = 1.0\text{MHz}$, See Fig. 5
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	—	530 ③	150 ③	mJ	$I_{AS} = 25A, L = 0.47\text{mH}$

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	49	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	160		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 25A, V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	63	95	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 25A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	170	260	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

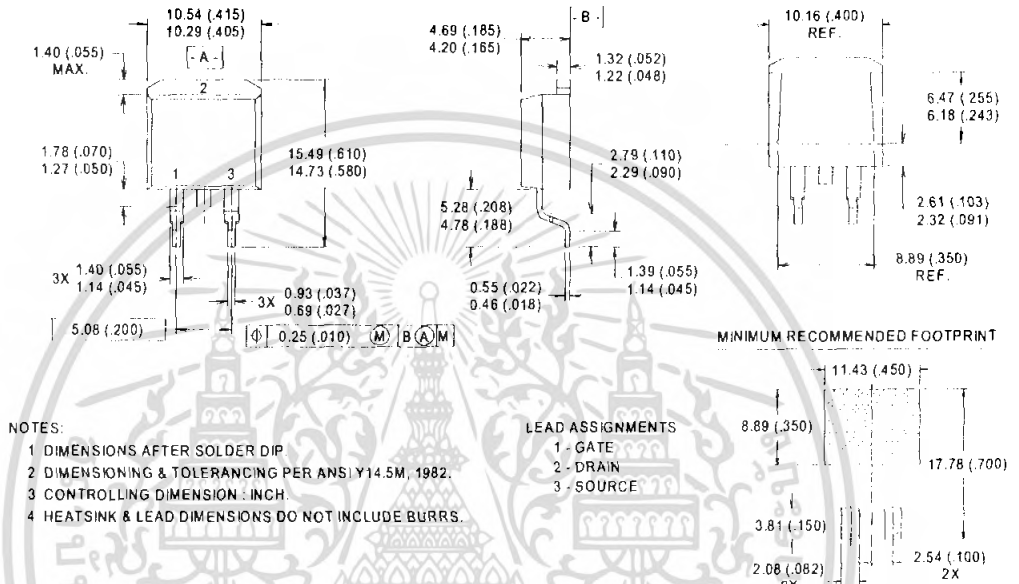
- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 0.48\text{mH}$
 $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 25A$. (See Figure 12)
- ③ $I_{SD} \leq 25A$, $di/dt \leq 230A/\mu s$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$,
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 400\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑥ This is a calculated value limited to $T_J = 175^\circ\text{C}$.

** When mounted on 1" square PCB (FR-4 or G-10 Material).
For recommended footprint and soldering techniques refer to application note #AN-994.

IRFZ44NS/IRFZ44NL

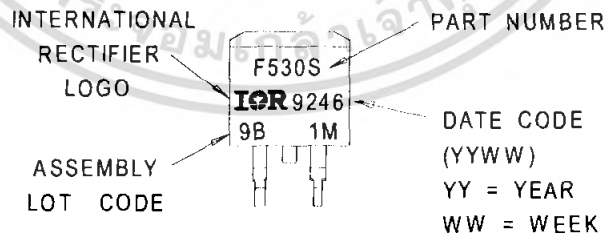
International
IR Rectifier

D²Pak Package Outline

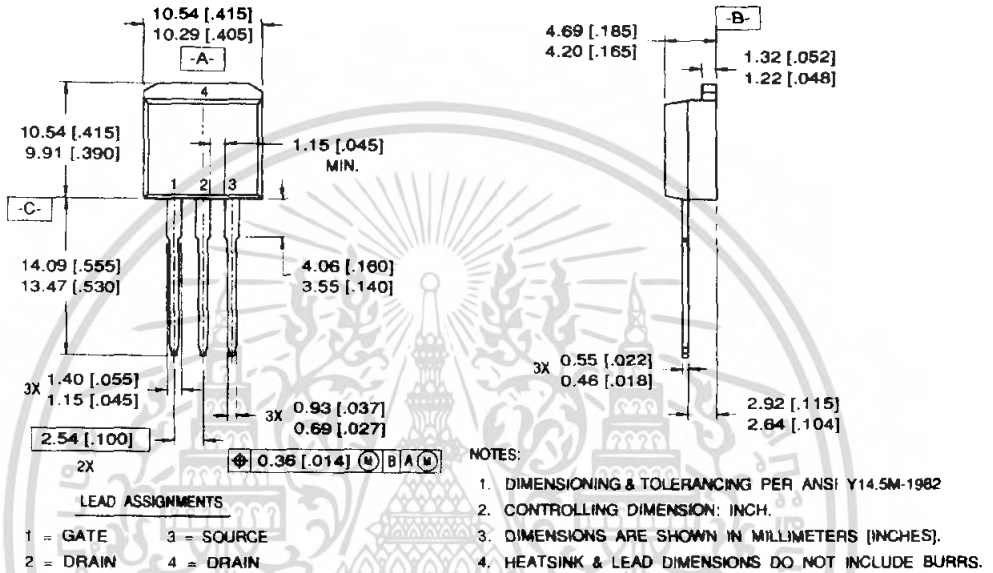


Part Marking Information

D²Pak

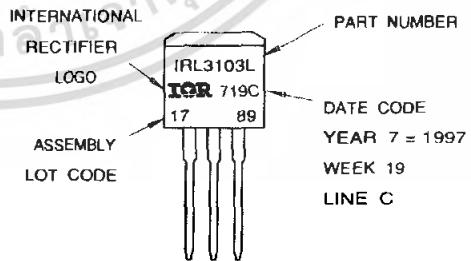


Package Outline
TO-262 Outline



Part Marking Information
TO-262

EXAMPLE: THIS IS AN IRL3103L
LOT CODE 1789
ASSEMBLED ON WW 19, 1997
IN THE ASSEMBLY LINE "C"

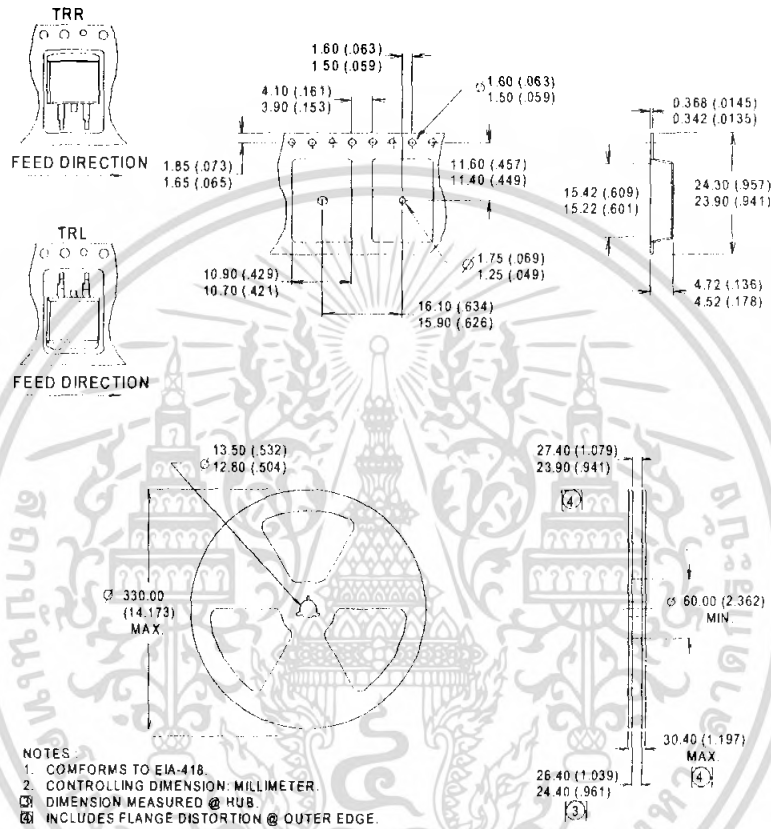


IRFZ44NS/IRFZ44NL

International
IOR Rectifier

Tape & Reel Information

D²Pak



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

International
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 for sales contact information. 3/01

www.irf.com

Quad, 1MHz, Operational Amplifiers for Commercial, Industrial, and Military Applications

The CA124, CA224, CA324, LM324, and LM2902 consist of four independent, high-gain operational amplifiers on a single monolithic substrate. An on-chip capacitor in each of the amplifiers provides frequency compensation for unity gain. These devices are designed specially to operate from either single or dual supplies, and the differential voltage range is equal to the power-supply voltage. Low power drain and an input common-mode voltage range from 0V to V+ -1.5V (single-supply operation) make these devices suitable for battery operation.

Part Number Information

PART NUMBER (BRAND)	TEMP. RANGE (°C)	PACKAGE	PKG. NO.
CA0124E	-55 to 125	14 Ld PDIP	E14.3
CA0124M (124)	-55 to 125	14 Ld SOIC	M14.15
CA0124M96 (124)	-55 to 125	14 Ld SOIC Tape and Reel	M14.15
CA0224E	-40 to 85	14 Ld PDIP	E14.3
CA0224M (224)	-40 to 85	14 Ld SOIC	M14.15
CA0324E	0 to 70	14 Ld PDIP	E14.3
CA0324M (324)	0 to 70	14 Ld SOIC	M14.15
CA0324M96 (324)	0 to 70	14 Ld SOIC Tape and Reel	M14.15
LM324N	0 to 70	14 Ld PDIP	E14.3
LM2902N	-40 to 85	14 Ld PDIP	E14.3
LM2902M (2902)	-40 to 85	14 Ld SOIC	M14.15
LM2902M96 (2902)	-40 to 85	14 Ld SOIC Tape and Reel	M14.15

Features

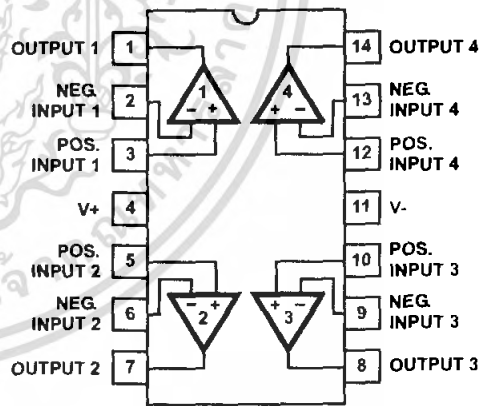
- Operation from Single or Dual Supplies
- Unity-Gain Bandwidth 1MHz (Typ)
- DC Voltage Gain 100dB (Typ)
- Input Bias Current 45nA (Typ)
- Input Offset Voltage 2mV (Typ)
- Input Offset Current
 - CA224, CA324, LM324, LM2902 5nA (Typ)
 - CA124 3nA (Typ)
- Replacement for Industry Types 124, 224, 324

Applications

- Summing Amplifiers
- Multivibrators
- Oscillators
- Transducer Amplifiers
- DC Gain Blocks

Pinout

CA124, CA224, CA324, LM2902 (PDIP, SOIC)
LM324 (PDIP)
TOP VIEW



CA124, CA224, CA324, LM324, LM2902

Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage	32V or ±16V
Differential Input Voltage	32V
Input Voltage	-0.3V to 32V
Input Current ($V_I < -0.3V$, Note 1)	50mA
Output Short Circuit Duration ($V+ \leq 15V$, Note 2)	Continuous

Thermal Information

Thermal Resistance (Typical, Note 3)	θ_{JA} (°C/W)
PDIP Package	95
SOIC Package	175
Maximum Junction Temperature (Die)	175°C
Maximum Junction Temperature (Plastic Package)	150°C
Maximum Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
Maximum Lead Temperature (Soldering 10s)	300°C
(SOIC - Lead Tips Only)	

Operating Conditions

Temperature Range	
CA124	-55°C to 125°C
CA224, LM2902	-40°C to 85°C
CA324, LM324	0°C to 70°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.

NOTES:

- This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. This current is due to the collector base junction of the input p-n-p transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral n-p-n parasitic transistor action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the amplifiers to go to the $V+$ voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This transistor action is not destructive and normal output states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than -0.3V.
- The maximum output current is approximately 40mA independent of the magnitude of $V+$. Continuous short circuits at $V+ > 15V$ can cause excessive power dissipation and eventual destruction. Short circuits from the output to $V+$ can cause overheating and eventual destruction of the device.
- θ_{JA} is measured with the component mounted on an evaluation PC board in free air.

Electrical Specifications

Values Apply for Each Operational Amplifier. Supply Voltage $V+ = 5V$, $V- = 0V$, Unless Otherwise Specified

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TEMP. (°C)	CA124			CA224, CA324, LM324			LM2902			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage (Note 6)		25	-	2	5	-	2	7	-	-	-	mV
		Full	-	-	7	-	-	9	-	-	10	mV
Average Input Offset Voltage Drift	$R_S = 0\Omega$	Full	-	7	-	-	7	-	-	7	-	$\mu V/^\circ C$
Differential Input Voltage (Note 5)		Full	-	-	$V+$	-	-	$V+$	-	-	$V+$	V
Input Common Mode Voltage Range (Note 5)	$V+ = 30V$	25	0	-	$V+ - 1.5$	0	-	$V+ - 1.5$	-	-	-	V
	$V+ = 30V$	Full	0	-	$V+ - 2$	0	-	$V+ - 2$	-	-	-	V
	$V+ = 26V$	Full	-	-	-	-	-	-	0	-	$V+ - 2$	V
Common Mode Rejection Ratio	DC	25	70	85	-	65	70	-	-	-	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	DC	25	65	100	-	65	100	-	-	-	-	dB
Input Bias Current (Note 4)	I_{I+} or I_{I-}	25	-	45	150	-	45	250	-	-	-	nA
	I_{I+} or I_{I-}	Full	-	-	300	-	-	500	-	40	500	nA
Input Offset Current	$I_{I+} - I_{I-}$	25	-	3	30	-	5	50	-	-	-	nA
	$I_{I+} - I_{I-}$	Full	-	-	100	-	-	150	-	45	200	nA
Average Input Offset Current Drift		Full	-	10	-	-	10	-	-	10	-	$pA/^\circ C$
Large Signal Voltage Gain	$R_L \geq 2k\Omega$, $V+ = 15V$ (For Large V_O Swing)	25	94	100	-	88	100	-	-	-	-	dB
	$R_L \geq 2k\Omega$, $V+ = 15V$ (For Large V_O Swing)	Full	88	-	-	83	-	-	83	-	-	dB

CA124, CA224, CA324, LM324, LM2902

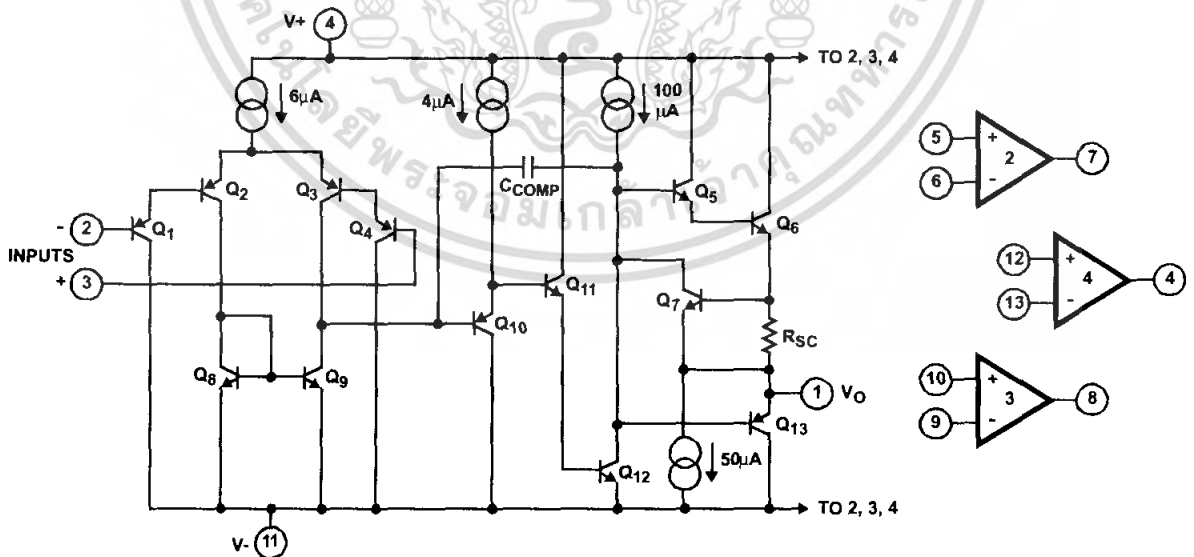
Electrical Specifications Values Apply for Each Operational Amplifier. Supply Voltage $V_+ = 5V$, $V_- = 0V$, Unless Otherwise Specified **(Continued)**

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TEMP. (°C)	CA124			CA224, CA324, LM324			LM2902			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Output Voltage Swing	$R_L = 2k\Omega$	25	0	-	$V_+ - 1.5$	0	-	$V_+ - 1.5$	-	-	-	V
	High Level											
	$R_L = 2k\Omega, V_+ = 30V$	Full	26	-	-	26	-	-	-	-	-	V
	$R_L = 2k\Omega, V_+ = 26V$	Full	-	-	-	-	-	-	22	-	-	V
	$R_L = 10k\Omega, V_+ = 30V$	Full	27	28	-	27	28	-	23	28	-	V
Low Level												
$R_L = 10k\Omega$	Full	-	5	20	-	5	20	-	5	100	mV	
Output Current	Source											
	$V_{I+} = +1V, V_{I-} = 0V, V_+ = 15V$	25	20	40	-	20	40	-	-	-	-	mA
	Full	10	20	-	10	20	-	10	20	-	-	mA
	Sink											
	$V_{I+} = 0V, V_{I-} = 1V, V_+ = 15V$	25	10	20	-	10	20	-	-	-	-	mA
	Full	12	50	-	12	50	-	-	-	-	-	μA
$V_{I+} = 0V, V_{I-} = 1V, V_O = 200mV$	25	5	8	-	5	8	-	5	8	-	mA	
$V_{I-} = 1V, V_{I+} = 0, V_+ = 15V$	Full	5	8	-	5	8	-	5	8	-	mA	
Crosstalk	$f = 1$ to $20kHz$ (Input Referred)	25	-	-120	-	-	-120	-	-	-	-	dB
Total Supply Current	$R_L = \infty$	Full	-	0.8	2	-	0.8	2	-	0.7	1.2	mA
	$R_L = \infty, V_+ = 26V$	Full	-	-	-	-	-	-	-	1.5	3	mA

NOTES:

- Due to the PNP input stage the direction of the input current is out of the IC. No loading change exists on the input lines because the current is essentially constant, independent of the state of the output.
- The input signal voltage and the input common mode voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3V. The positive limit of the common mode voltage range is $V_+ - 1.5V$, but either or both inputs can go to +32V without damage.
- $V_O = 1.4V, R_S = 0\Omega$ with V_+ from 5V to 30V, and over the full input common mode voltage range (0V to $V_+ - 1.5V$).

Schematic Diagram (One of Four Operational Amplifiers)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Curves

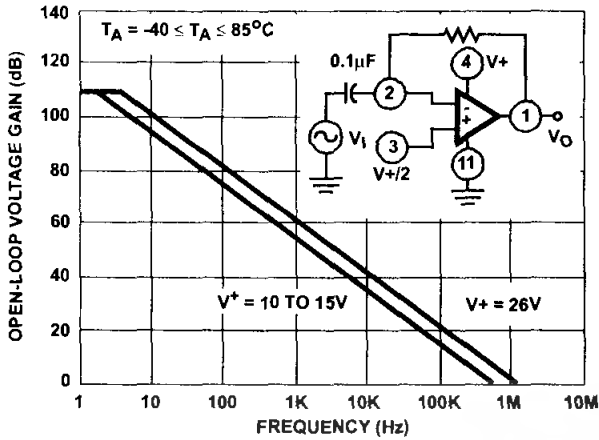


FIGURE 1. OPEN LOOP FREQUENCY RESPONSE

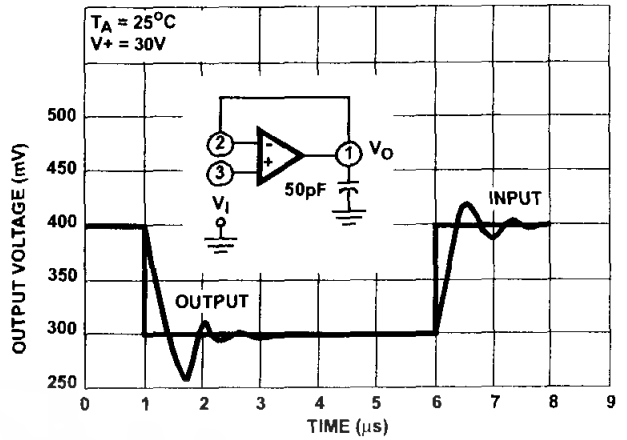


FIGURE 2. VOLTAGE FOLLOWER PULSE RESPONSE (SMALL SIGNAL)

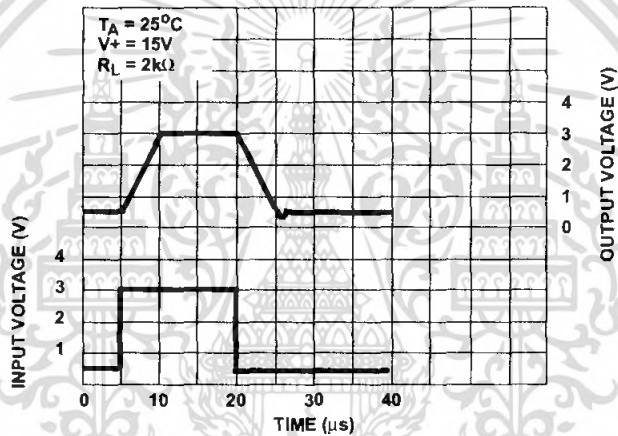


FIGURE 3. VOLTAGE FOLLOWER PULSE RESPONSE (LARGE SIGNAL)

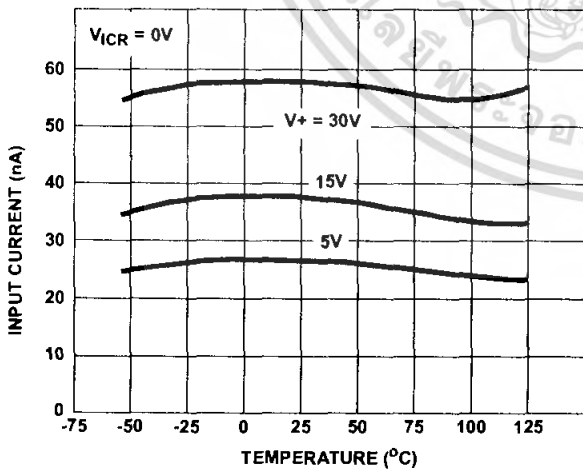


FIGURE 4. INPUT CURRENT vs AMBIENT TEMPERATURE

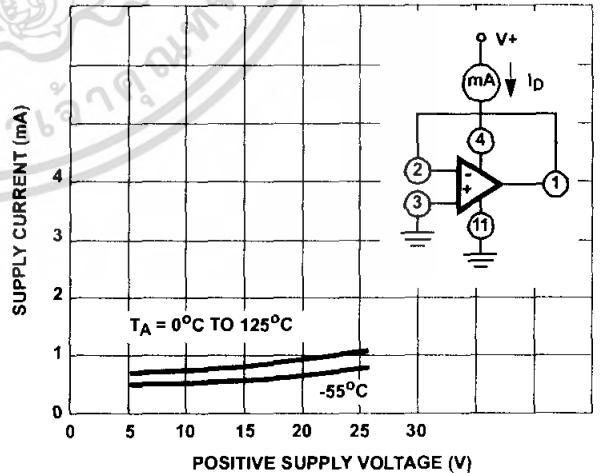


FIGURE 5. SUPPLY CURRENT vs SUPPLY VOLTAGE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Curves (Continued)

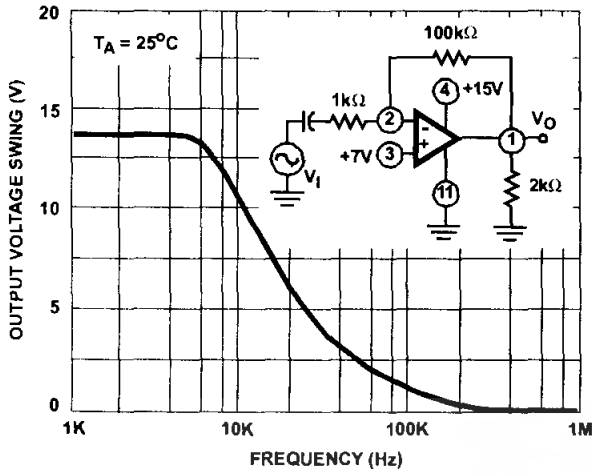


FIGURE 6. LARGE SIGNAL FREQUENCY RESPONSE

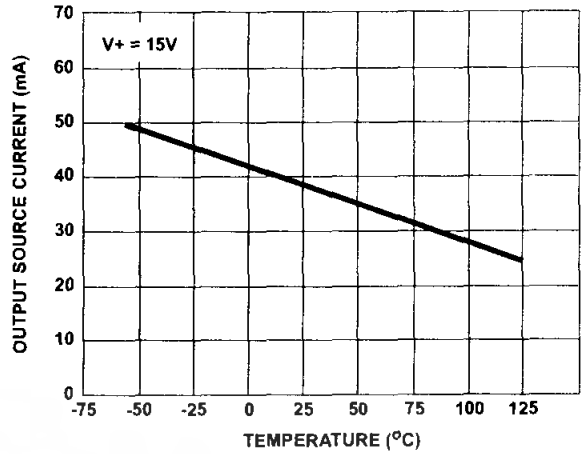


FIGURE 7. OUTPUT CURRENT vs AMBIENT TEMPERATURE

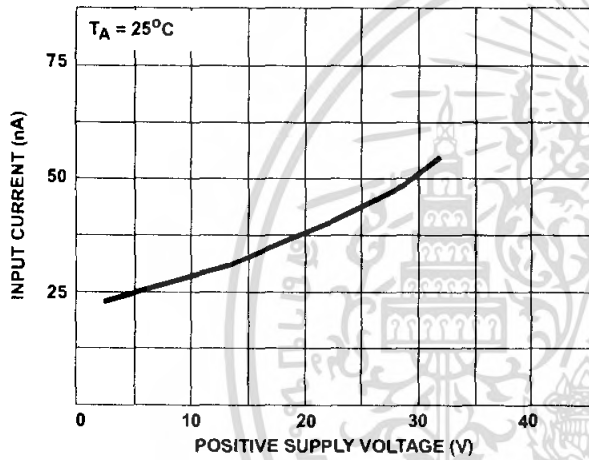


FIGURE 8. INPUT CURRENT vs SUPPLY VOLTAGE

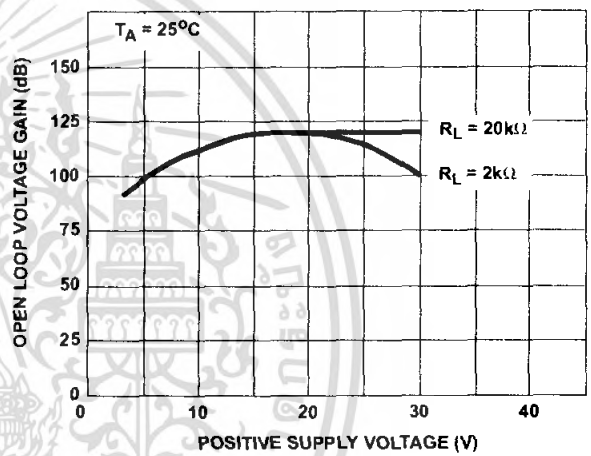
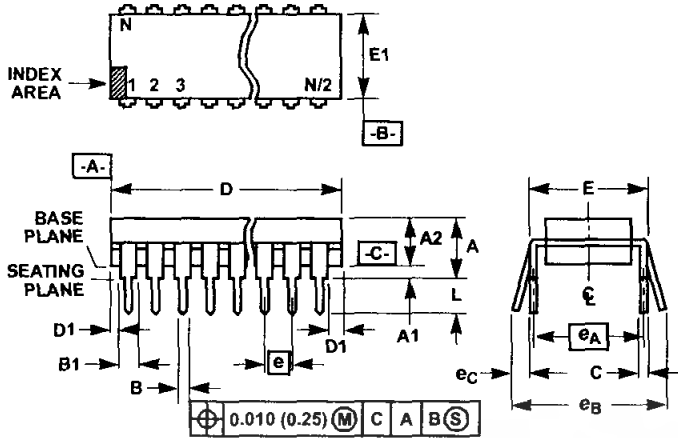


FIGURE 9. VOLTAGE GAIN vs SUPPLY VOLTAGE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dual-In-Line Plastic Packages (PDIP)



E14.3 (JEDEC MS-001-AA ISSUE D)
14 LEAD DUAL-IN-LINE PLASTIC PACKAGE

SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS		NOTES
	MIN	MAX	MIN	MAX	
A	-	0.210	-	5.33	4
A1	0.015	-	0.39	-	4
A2	0.115	0.195	2.93	4.95	-
B	0.014	0.022	0.356	0.558	-
B1	0.045	0.070	1.15	1.77	8
C	0.008	0.014	0.204	0.355	-
D	0.735	0.775	18.66	19.68	5
D1	0.005	-	0.13	-	5
E	0.300	0.325	7.62	8.25	6
E1	0.240	0.280	6.10	7.11	5
e	0.100 BSC		2.54 BSC		-
eA	0.300 BSC		7.62 BSC		6
eB	-	0.430	-	10.92	7
L	0.115	0.150	2.93	3.81	4
N	14		14		9

NOTES:

- Controlling Dimensions: INCH. In case of conflict between English and Metric dimensions, the inch dimensions control.
- Dimensioning and tolerancing per ANSI Y14.5M-1982.
- Symbols are defined in the "MO Series Symbol List" in Section 2.2 of Publication No. 95.
- Dimensions A, A1 and L are measured with the package seated in JEDEC seating plane gauge GS-3.
- D, D1, and E1 dimensions do not include mold flash or protrusions. Mold flash or protrusions shall not exceed 0.010 inch (0.25mm).
- E and eA are measured with the leads constrained to be perpendicular to datum -C-.
- eB and eC are measured at the lead tips with the leads unconstrained. eC must be zero or greater.
- B1 maximum dimensions do not include dambar protrusions. Dambar protrusions shall not exceed 0.010 inch (0.25mm).
- N is the maximum number of terminal positions.
- Corner leads (1, N, N/2 and N/2 + 1) for E8.3, E16.3, E18.3, E28.3, E42.6 will have a B1 dimension of 0.030 - 0.045 inch (0.76 - 1.14mm).

Rev. 0 12/93

MIC INVESTMENTS (CHINA) COMPANY LIMITED

FAST RECOVERY RECTIFIER

IN4933 THRU IN4937

VOLTAGE RANGE
CURRENT

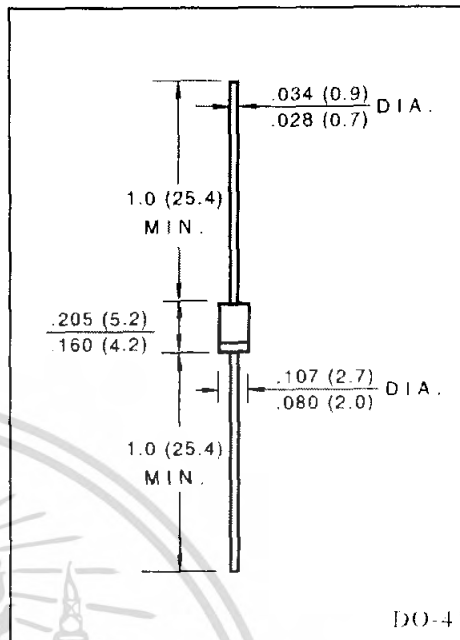
50 to 600 Volts
1.0 Ampere

FEATURES

- Low cost construction.
- Fast switching for high efficiency.
- Low reverse leakage
- High forward surge current capability.
- High temperature soldering guaranteed:
260°C/10 seconds, 0.375" (9.5mm) lead length
at 5 lbs (2.3kg) tension.

MECHANICAL DATA

- Case: transfer molded plastic
- Epoxy: UL94V - 0 rate flame retardant.
- Polarity: Color band denotes cathode end.
- Lead: Plated axial lead, solderable per MIL - STD - 202E
method 208C
- Mounting position: Any
- Weight: 0.012 ounce, 0.33grams



MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

- Ratings at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified
- Single phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.
- For capacitive load derate current by 20%

	SYMBOLS	IN4933	IN4934	IN4935	IN4936	IN4937	UNIT
Maximum Repetitive Peak Reverse Voltage	V_{RRM}	50	100	200	400	600	Volts
Maximum RMS Voltage	V_{RMS}	35	70	140	280	420	Volts
Maximum DC Blocking Voltage	V_{DC}	50	100	200	400	600	Volts
Maximum Average Forward Rectified Current, 0.375" (9.5mm) lead length at $T_A=75^\circ\text{C}$	$I_{(AV)}$	1.0					Amp
Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine - wave superimposed on rated load (JEDEC method)	I_{FSM}	30					Amps
Maximum Instantaneous Forward Voltage at 1.0A	V_F	1.2					Volts
Maximum DC Reverse Current at rated DC blocking voltage	I_R	5.0					μA
		100					
Maximum Reverse Recovery Time (Note 3) $T_j = 25^\circ\text{C}$	t_{rr}	200					nS
Maximum Reverse Recovery Current (Note 3)	$I_{RM(REC)}$	2.0					Amps
Typical Junction Capacitance (Note 1)	C_j	15					pF
Typical Thermal Resistance (Note2)	$R_{\theta JA}$	50					$^\circ\text{C/W}$
Operating and Storage Temperature Range	T_j	(-65 to +150)					$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{STG}	(-65 to +150)					$^\circ\text{C}$

NOTES:

1. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0 Volts.
2. Thermal Resistance from Junction to Ambient at 0.375" (9.5mm) lead length, P.C. board mounted.
3. Reverse Recovery Test Condition: $I_f = 1.0\text{A}$, $V_R = 30\text{V}$, $dI/dt = 50\text{A}/\mu\text{s}$, $I_{RR} = 10\% I_{RM}$ for the measurement of t_{rr} .

MIC INVESTMENTS (CHINA) COMPANY LIMITED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RATINGS AND CHARACTERISTIC CURVES IN4933 THRU IN4937

FIG.1-TYPICAL FORWARD CURRENT DERATING CURVE

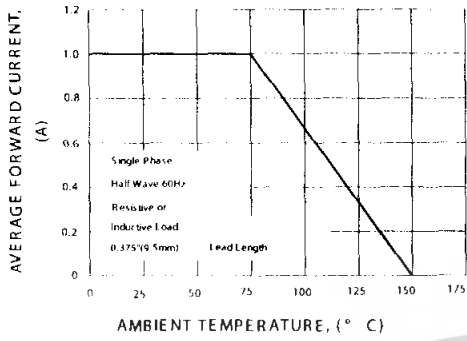


FIG.2-MAXIMUM NON-REPETITIVE PEAK FORWARD SURGE CURRENT

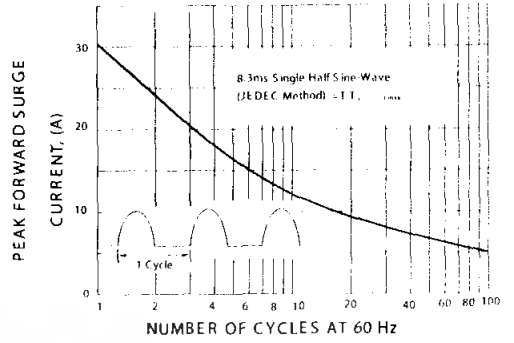


FIG.3-TYPICAL INSTANTANEOUS FORWARD CHARACTERISTICS

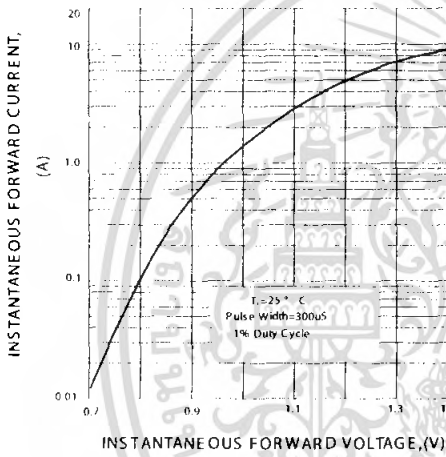


FIG.4-TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS

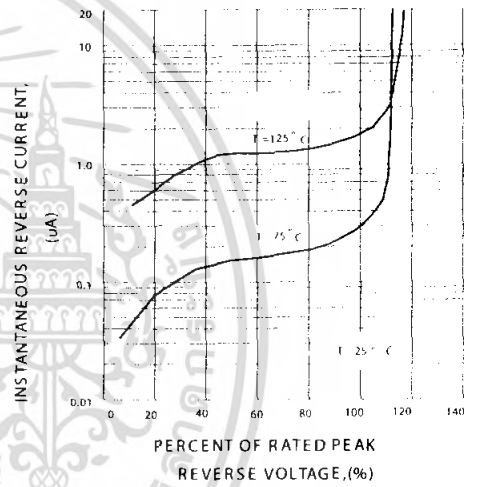
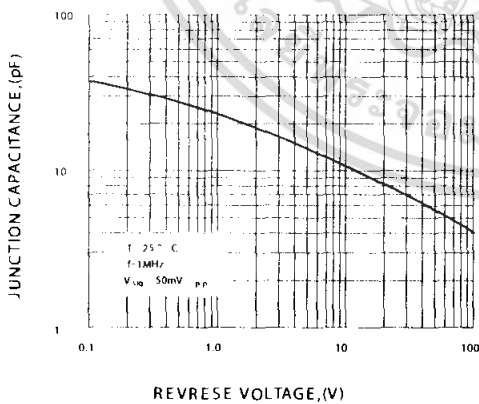


FIG.5-TYPICAL JUNCTION CAPACITANCE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1N/FDLL 914/A/B / 916/A/B / 4148 / 4448



DO-35



LL-34

THE PLACEMENT OF THE EXPANSION GASKET HAS NO RELATIONSHIP TO THE LOCATION OF THE CATHODE TERMINAL

COLOR BAND MARKING

DEVICE	1ST BAND	2ND BAND
FDL914	BLACK	BROWN
FDL914A	BLACK	GRAY
FDL914B	BROWN	BLACK
FDL916	BLACK	RED
FDL916A	BLACK	WHITE
FDL916B	BROWN	BROWN
FDL4148	BLACK	BROWN
FDL4448	BROWN	BLACK

Small Signal Diode

Absolute Maximum Ratings* T_J = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V _{RRM}	Maximum Repetitive Reverse Voltage	100	V
I _{F(AV)}	Average Rectified Forward Current	200	mA
I _{FSM}	Non-repetitive Peak Forward Surge Current	1.0	A
	Pulse Width = 1.0 second		
	Pulse Width = 1.0 microsecond	4.0	A
T _{stg}	Storage Temperature Range	-65 to +200	°C
T _J	Operating Junction Temperature	175	°C

* These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

NOTES

- 1) These ratings are based on a maximum junction temperature of 200 degrees C.
- 2) These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operations.

Thermal Characteristics

Symbol	Characteristic	Max	Units
		1N/FDLL 914/A/B / 4148 / 4448	
P _D	Power Dissipation	500	mW
R _{θJA}	Thermal Resistance, Junction to Ambient	300	°C/W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Small Signal Diode
(continued)

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

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Max	Units
V_R	Breakdown Voltage	$I_R = 100 \mu\text{A}$	100		V
		$I_R = 5.0 \mu\text{A}$	75		V
V_F	Forward Voltage	1N914B/4448 $I_F = 5.0 \text{ mA}$	620	720	mV
		1N916B $I_F = 5.0 \text{ mA}$	630	730	mV
		1N914/916/4148 $I_F = 10 \text{ mA}$		1.0	V
		1N914A/916A $I_F = 20 \text{ mA}$		1.0	V
		1N916B $I_F = 20 \text{ mA}$		1.0	V
		1N914B/4448 $I_F = 100 \text{ mA}$		1.0	V
I_R	Reverse Current	$V_R = 20 \text{ V}$		25	nA
		$V_R = 20 \text{ V}, T_A = 150^\circ\text{C}$		50	μA
		$V_R = 75 \text{ V}$		5.0	μA
C_T	Total Capacitance	1N916A/B/4448 $V_R = 0, f = 1.0 \text{ MHz}$		2.0	pF
		1N914A/B/4148 $V_R = 0, f = 1.0 \text{ MHz}$		4.0	pF
t_{rr}	Reverse Recovery Time	$I_F = 10 \text{ mA}, V_R = 6.0 \text{ V (60mA)},$ $I_R = 1.0 \text{ mA}, R_L = 100\Omega$		4.0	ns

Typical Characteristics

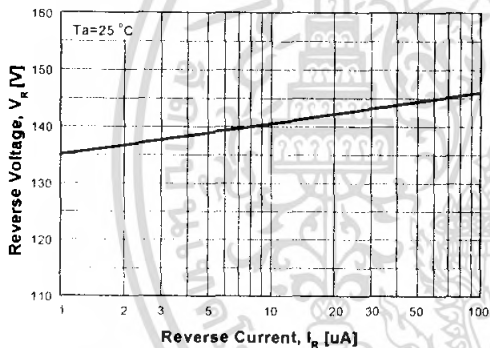


Figure 1. Reverse Voltage vs Reverse Current
BV - 1.0 to 100 μA

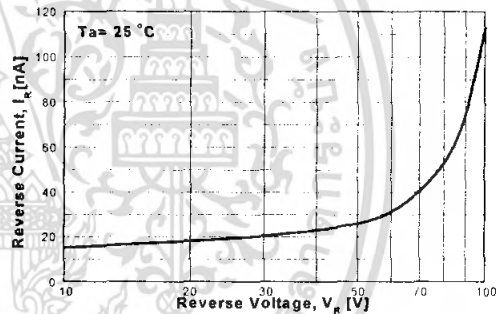


Figure 2. Reverse Current vs Reverse Voltage
IR - 10 to 100 V
GENERAL RULE: The Reverse Current of a diode will approximately double for every ten (10) Degree C increase in Temperature

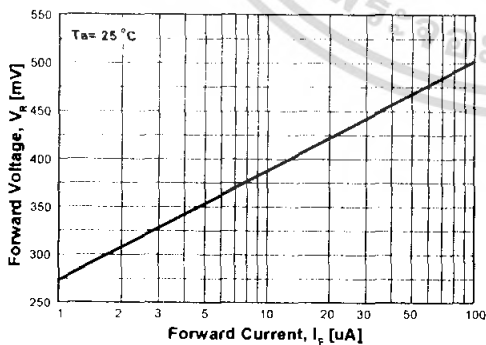


Figure 3. Forward Voltage vs Forward Current
VF - 1 to 100 μA

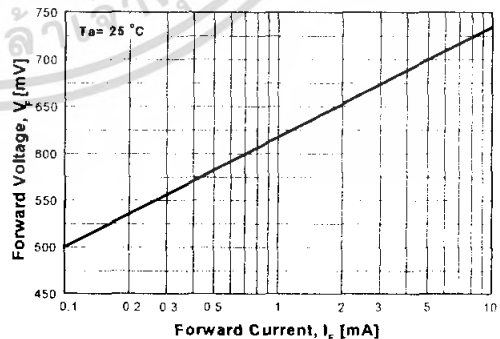


Figure 4. Forward Voltage vs Forward Current
VF - 0.1 to 10 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Characteristics (continued)

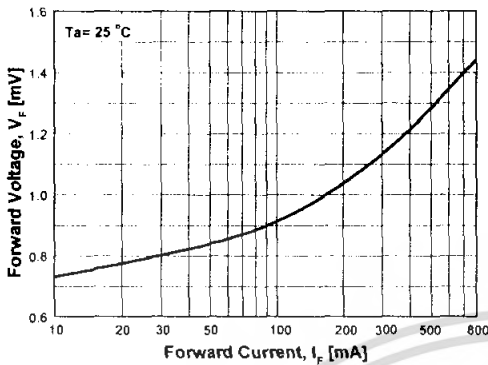


Figure 5. Forward Voltage vs Forward Current
VF - 10 to 800 mA

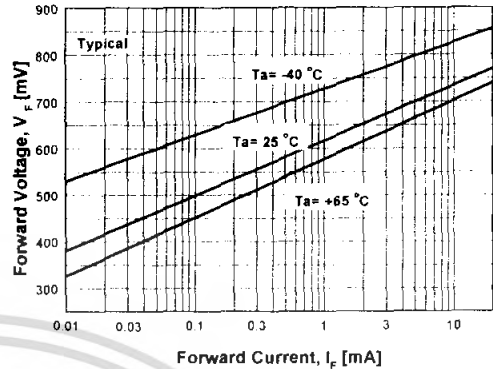


Figure 6. Forward Voltage vs Ambient Temperature
VF - 0.01 - 20 mA (-40 to +65 Deg C)

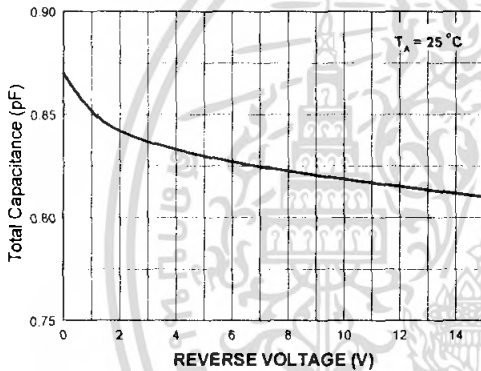


Figure 7. Total Capacitance

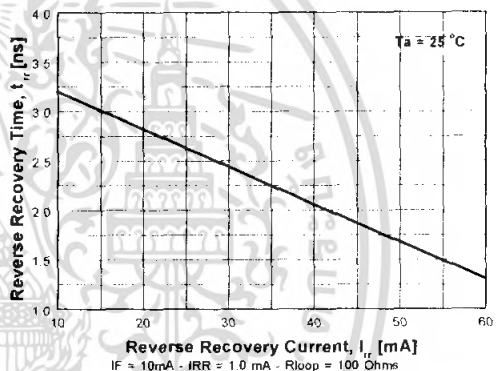


Figure 8. Reverse Recovery Time vs Reverse Recovery Current
IF = 10mA - IRR = 1.0 mA - Rloop = 100 Ohms

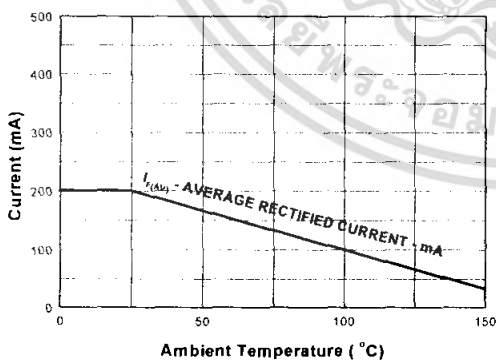


Figure 9. Average Rectified Current ($I_{F(AV)}$) versus Ambient Temperature (T_A)

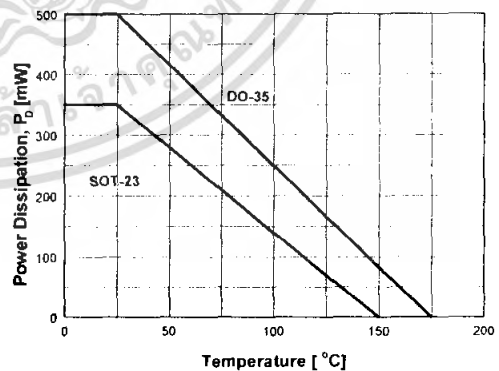


Figure 10. Power Derating Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRADEMARKS

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

ACE ^x TM	FAST [®]	MICROWIRE TM	SILENT SWITCHER [®]	UHC TM
Bottomless TM	FAST ^r TM	OPTOLOGIC [®]	SMART START TM	UltraFET [®]
CoolFET TM	FRFET TM	OPTOPLANAR TM	SPM TM	VCX TM
CROSSVOLT TM	GlobalOptoisolator TM	PACMAN TM	STAR*POWER TM	
DenseTrench TM	GTO TM	POP TM	Stealth TM	
DOME TM	HiSeC TM	Power247 TM	SuperSOT TM -3	
EcoSPARK TM	PC TM	PowerTrench [®]	SuperSOT TM -6	
E ² CMOS TM	ISOPLANAR TM	QFET TM	SuperSOT TM -8	
EnSigna TM	LittleFET TM	QS TM	SyncFET TM	
FACT TM	MicroFET TM	QT Optoelectronics TM	TinyLogic TM	
FACT Quiet Series TM	MicroPak TM	Quiet Series TM	TruTranslation TM	

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.

Rev. H5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้