

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตซ์รีลักแทนซ์ 3 เฟส แบบ 12/8  
A 3 PHASE, 12/8 SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DRIVE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551

การขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟส แบบ 12/8  
A 3 PHASE, 12/8 SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DRIVE



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ภาพ จันท์เจริญสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟส แบบ 12/8

ผู้จัดทำ



  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร.ภาพ จันทร์เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์ 3 เฟส แบบ 12/8

นายกฤษดา ไกรสมดี  
นายกิตติศักดิ์ ไพแก้ว  
นางสาวชณิตา ชุตพิมาย  
นายชัชวาล คำวงศ์ษา  
ดร. ภาพ จันทรเจริณสุข อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2551

### บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอโครงการการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์ 3 เฟส แบบ 12/8 โดยนำวงจรอะซิมเมตริกฮาร์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์มาใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ และตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์โดยการใช้วงจรเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งแบบตัดแสงซึ่งสัมพันธ์กับการป้องกันกระแสให้ขดลวดแต่ละเฟสในลำดับที่เหมาะสมของมอเตอร์ การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เป็นแบบวงรอบปิดโดยมีการควบคุมกระแสแบบวงรอบปิดอยู่ภายใน ในส่วนตัวควบคุมการทำงานและประมวลผลสัญญาณระบบขับเคลื่อนใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC 30F2010 ผลการทดลองโดยสามารถควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์ให้หมุนตามและทวนเข็มนาฬิกาที่ความเร็วรอบสูง กลางและต่ำที่ได้เป็นที่น่าพอใจ และสามารถนำไปสู่การพัฒนาให้การขับเคลื่อนมอเตอร์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้

## A 3 PHASE, 12/8 SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DRIVE

Kritsada            Kraisomdee  
Kittisak            Paikaew  
Chanita            Chutpimai  
Chutchawan      kumwongsa  
Dr. Phob            Chancharoensook      Supervisor  
2008

### ABSTRACT

This thesis presents a 3-phase 12/8 switched reluctance motor drive system. An asymmetric half bridge converter is used as a power electronic converter for the drive. Light-interrupting sensors are installed to detect rotor position of the SRM enabling a proper sequence of phase winding energization. The system has an outer speed control loop and inner phase current control loops. A microcontroller dsPIC 30F2010 is a digital signal controller of the SRM drive. Experimental results have shown that the proposed system can reach an acceptable performance. The SRM can regulate various speeds in both clockwise and counter-clockwise directions.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ไม่ได้มาจากความรู้ความสามารถและความตั้งใจของสมาชิกในกลุ่มเพียงอย่างเดียว แต่ได้มาจากการให้ความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย จึงขออนุญาตกล่าวถึงเพื่อเป็นการขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร. ภพ จันทรเจริญสุข ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลความรู้ทางทฤษฎีของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ 3 เฟส แบบ 12/8 , วงจรขับ Asymmetric half bridge converter ในการทำโครงการ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่เอาใจใส่ ติดตามผลและให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาข้อบกพร่องตลอดระยะเวลาในการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดาของสมาชิกทุกคนในกลุ่มโครงการนี้ ที่มอบความรัก ความปรารถนาดี กำลังใจและให้โอกาสในการศึกษาจนมาถึงในระดับนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และอบรมสั่งสอน ซึ่งสามารถนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการทำโครงการ

ขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนในกลุ่มที่มีความสามัคคีและร่วมมือกันทำงานอย่างเต็มที่ รวมไปถึงเพื่อน ๆ กลุ่มอื่นที่ให้คำแนะนำและคอยช่วยเหลือซึ่งกันและกัน สร้างบรรยากาศที่ดีในการทำงาน

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ธุรการ คุณป้าแม่บ้าน ที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณสถาบันการศึกษาแห่งนี้ ที่เพาะปมให้เราคณะผู้จัดทำเป็นบุคคลที่มีคุณภาพ ไม่ว่าจะด้านการศึกษา ด้านสังคมหรือประสบการณ์ชีวิตหลาย ๆ ด้าน เราคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

นายกฤษฎดา	ไกรสมดี
นายกิตติศักดิ์	ไพแก้ว
นางสาวชณิดา	ชุตพิมาย
นายชัชวาล	คำวงศ์ษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1    ความเป็นมาและที่มาของปัญหา.....	1
1.2    วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3    ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	2
1.4    วิธีการที่ใช้ในโครงการ.....	2
1.5    แผนการดำเนินโครงการ.....	3
1.6    ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
1.7    การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1    ทฤษฎีของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์.....	5
2.1.1    การเปรียบเทียบสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์กับขั้วโรตอร์สมอเตอร์ และสเต็ปิ่งมอเตอร์ในทางอุดมคติ.....	5
2.1.2    วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuits).....	6
2.1.3    กราฟแสดงคุณสมบัติของสนามแม่เหล็ก.....	8
2.1.4    ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์.....	10
2.1.5    แรงบิด.....	10
2.1.6    โครงสร้างของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์.....	14
2.1.7    วงจรสมมูลของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์.....	16
2.1.8    หลักการทํางาน.....	19
2.1.9    หลักการควบคุมมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์.....	20
2.2    Converters สำหรับ Switched Reluctance Machine (SRM).....	24
2.2.1    วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส.....	24
2.2.2    วงจรขับเคลื่อนแบบที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม.....	26
2.2.3    หลักการทํางานของ Asymmetric Half Bridge Converter.....	28
2.3    การตรวจจับกระแสสำหรับการเปลี่ยนแปลงกำลังและการเคลื่อนที่.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

2.4	ข้อมูลเบื้องต้นของ dsPIC.....	35
2.4.1	คุณสมบัติโดยรวมของ dsPIC.....	35
2.4.1.1	คุณสมบัติของซีพียู.....	35
2.4.1.2	คุณสมบัติด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....	36
2.4.1.3	คุณสมบัติของโมดูลฟังก์ชันพิเศษ.....	36
2.4.1.4	คุณสมบัติของซีพียู dsPIC 30F2010.....	36
2.4.1.5	คุณสมบัติด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....	37
2.4.1.6	คุณสมบัติของมอดูลฟังก์ชันพิเศษ.....	38
2.4.2	สถาปัตยกรรมโดยสรุปของ dsPIC30F2010.....	40
2.4.2.1	หน่วยประมวลผลกลาง.....	40
2.4.2.2	หน่วยความจำ.....	40
2.4.2.3	ส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP Engine).....	40
2.4.2.4	โมดูลฟังก์ชันพิเศษ.....	41
2.4.2.5	พอร์ตอินพุตเอาต์พุต.....	41
2.4.2.6	เครื่องมือที่ทางฮาร์ดแวร์สำหรับพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC.....	42
2.5	การควบคุมแบบ PI Control.....	42
บทที่ 3	การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	45
3.1	การจำลองการทำงานของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์โดยทดสอบที่มุมที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณ 15 องศา.....	46
3.1.1	ทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	46
3.1.2	ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	48
3.2	การจำลองการทำงานของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ โดยทดสอบมุมที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณที่ 22.5 องศา.....	49
3.2.1	ทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	49
3.2.2	ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	50
3.3	แบบวงจรของส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ.....	52
3.3.1	วงจรตรงจับตำแหน่ง.....	52
3.3.2	วงจรตรวจวัดกระแส.....	52
บทที่ 4	ผลการทดลอง	
4.1	การทดลองที่ 1 การตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ ด้วยวงจร Position sensor.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

4.2	การทดลองที่ 2 การสร้างสัญญาณอินพุทเพื่อนำไปขับเกตมอสเฟสกำลัง โดยอาศัยการกำเนิดสัญญาณจากการประมวลผลของ dsPIC 30F2010.....	55
4.3	การทดลองที่ 3 การทำงานร่วมกันของวงจร Asymmetric half-bridge converter วงจร Position sensor และวงจร Current sensor.....	57
4.4	การทดลองที่ 4 การรักษาระดับความเร็วของมอเตอร์ให้มีเสถียรภาพ.....	62
	การหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	62
	การหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....	64
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	60
5.1	สรุปผลของโครงการ.....	66
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม	.....	68
ภาคผนวก ก	.....	70
ภาคผนวก ข	.....	74
ภาคผนวก ค	.....	89
ประวัติผู้เขียน	.....	131

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าและวงจรสมมูลย์ทางแม่เหล็ก .....	6
2.2 แสดงความเหนี่ยวนำด้วยตัวเอง.....	7
2.3 ความเหนี่ยวนำร่วมที่เกิดจากขดลวดที่ 1 กระทำต่อขดลวดที่ 2 โดยกระแส $i_1$ .....	8
2.4 กราฟ Magnetizing แสดงตำแหน่ง Aligned และ Unaligned.....	9
2.5 แสดงกราฟค่าความเหนี่ยวนำและแรงบิดเมื่อป้อนกระแสเข้าขดลวดเฟส.....	11
2.6 แสดงค่าพลังงานสะสม.....	12
2.7 แสดงค่า coenergy.....	12
2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Co-energy.....	13
2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง flux-linkage กับกระแสของมอเตอร์.....	14
2.10 โครงสร้างของสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์แบบต่างๆ.....	15
2.11 รูปแสดงวงจรสมมูลย์เบื้องต้นของมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์.....	16
2.12 วงจรสมมูลย์ 1 เฟสของมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์.....	17
2.13 แสดงรูปร่างของเฟสอินดักแทนซ์ , กระแสและแรงบิดในอุดมคติของ สวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ 3 เฟส แบบ 12/8.....	20
2.14 รูปความสัมพันธ์ของเฟสอินดักแทนซ์กับการจ่ายกระแสกระตุ้นใน 1 เฟส.....	21
2.15 รูปคลื่นของ (a) เฟสอินดักแทนซ์ (b) กระแสช่วงเฟสอินดักแทนซ์เพิ่มขึ้น (c) กระแสช่วงเฟสอินดักแทนซ์ลดลง (d) แรงบิด.....	21
2.16 รูปคลื่นของ(a) อินดักแทนซ์ (b)กระแสที่ความเร็วต่ำ (c)กระแสที่ความเร็วสูง.....	22
2.17 วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส.....	24
2.17 (a)วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟสขณะเพิ่มพลังงาน.....	25
2.17 (b)วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟสขณะลดพลังงาน.....	25
2.17 (c)วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟสขณะคืนพลังงานสู่แหล่งจ่าย.....	26
2.18 วงจรขับเคลื่อนแบบที่มีการใช้ส่วนจ่ายพลังงานร่วมกัน.....	27
2.19 วงจรขับเคลื่อนแบบที่มีการใช้ส่วนกระแสไหลวนร่วมกัน.....	28
2.20 วงจร Asymmetric Half Bridge Converter ของสวิตช์รีลักแทนซ์.....	28
2.21 รูปคลื่นแสดงการทำงานของ Asymmetric Half Bridge Converter (strategy 1).....	29
2.22 รูปคลื่นแสดงการทำงานของ Asymmetric Half Bridge Converter (strategy 2).....	31
2.23 แสดง Current Sensor.....	32
2.24 แสดงส่วนประกอบ Current Sensor.....	33
2.25 หลักการทำงานของ dsPIC.....	39
2.26 แสดงขบวนการทำงานต่างๆของ dsPIC30F2010.....	41
2.27 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย Proportional plus Integral.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

2.28	การตอบสนองของ PI controller.....	43
2.29	Block diagram current control การขับมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์.....	44
3.1	แสดงวงจรจำลองการทำงานของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์.....	45
3.2	แสดงโครงสร้างของ convertor.....	45
3.3	แสดงโครงสร้างของ Position sensor.....	46
3.4	แสดงการกำหนดมุมของ Position sensor (15 องศาตามเข็มนาฬิกา).....	46
3.5	แสดงค่าฟลักซ์ กระแส และแรงบิดที่ได้จากการจำลอง.....	47
3.6	แสดงสัญญาณที่ได้จาก Position sensor ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	47
3.7	แสดงการกำหนดมุมของ Position sensor (15 องศาตามเข็มนาฬิกา).....	48
3.8	แสดงสัญญาณที่ได้จาก Position sensor ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	48
3.9	แสดงการกำหนดมุมของ Position sensor (22.5 องศาตามเข็มนาฬิกา).....	49
3.10	แสดงค่าฟลักซ์ กระแส และแรงบิดที่ได้จากการจำลอง.....	49
3.11	แสดงสัญญาณที่ได้จาก Position sensor ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	50
3.12	แสดงการกำหนดมุมของ Position sensor (22.5 องศาตามเข็มนาฬิกา).....	50
3.13	แสดงสัญญาณที่ได้จาก Position sensor ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	51
3.14	แบบวงจรตรวจจับตำแหน่ง.....	52
3.15	แบบวงจรตรวจวัดกระแส.....	52
4.1	แสดงสัญญาณเฟส A,B,C ในทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	53
4.2	แสดงสัญญาณเฟส A,B,C ในทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....	54
4.3	แสดงสัญญาณเฟส A,B,C ในทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	54
4.4	แสดงสัญญาณเฟส A,B,C ในทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา.....	55
4.5	สัญญาณอินพุทขับเกตมอสเฟสกำลังของเฟส A เปรียบเทียบกับเฟส B (ความเร็ว 50 rpm).....	56
4.6	สัญญาณอินพุทขับเกตมอสเฟสกำลังของเฟส A เปรียบเทียบกับเฟส C (ความเร็ว 50 rpm).....	56
4.7	สัญญาณอินพุทขับเกตมอสเฟสกำลังของเฟส B เปรียบเทียบกับเฟส C (ความเร็ว 50 rpm).....	57

## สารบัญภาพ(ต่อ)

4.8	สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส B (ความเร็ว 50 rpm).....	58
4.9	สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส C (ความเร็ว 50 rpm).....	58
4.10	สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส B เปรียบเทียบกับเฟส C (ความเร็ว 500 rpm).....	59
4.11	สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส B (ความเร็ว 50 rpm).....	59
4.12	สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส C (ความเร็ว 500 rpm).....	60
4.13	สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส B เปรียบเทียบกับเฟส C (ความเร็ว 500 rpm).....	60
4.14	แสดงสัญญาณขั้วเกตของสวิตช์ T1, T2, แรงดันและกระแสที่ความเร็วต่ำ (ความเร็ว 50 rpm).....	61
4.15	แสดงสัญญาณขั้วเกตของสวิตช์ T1, T2, แรงดันและกระแสที่ความเร็วสูง (ความเร็ว 500 rpm).....	61
4.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้ ที่ความเร็ว 100 rpm.....	62
4.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้ ที่ความเร็ว 500 rpm.....	63
4.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้ ที่ความเร็ว 1000 rpm.....	63
4.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้ ที่ความเร็ว 100 rpm.....	64
4.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้ ที่ความเร็ว 500 rpm.....	64
4.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้ ที่ความเร็ว 1000 rpm.....	65

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงการเปรียบเทียบสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์กับซิงโครนัสมอเตอร์ในทางอุดมคติ.....5
2.2	แสดงการเปรียบเทียบสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์กับสเต็ปิ่งมอเตอร์ในทางอุดมคติ.....6
2.3	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก.....7
2.4	แสดงคุณสมบัติของ Hall Effect Current Sensor.....33
2.5	แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Open loop กับ Close loop ของตัวตรวจจับกระแส Hall Effect.....34



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหา

มอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ได้รับการค้นคว้าและพัฒนาเรื่อย ๆ มา ในปัจจุบันมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์ได้รับความสนใจอย่างมากในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ราคาถูก ไม่ต้องมีการบำรุงรักษา แต่การควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานได้นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน จำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อที่จะได้ป้อนพลังงานให้กับเฟสต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสมและถูกต้องเพื่อที่จะได้สร้างแรงบิดในทิศทางที่ต้องการ โดยแรงบิดของมอเตอร์ชนิดนี้จะเกิดขึ้นในช่วงที่ส่วนที่เคลื่อนที่ได้ พยายามเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุดซึ่งเกิดจากการถูกกระตุ้นที่ขดลวด โดยในการทำงานในช่วงมอเตอร์แต่ละเฟสจะถูกกระตุ้นเมื่อค่าอินดักแตนซ์กำลังเพิ่มขึ้นและหยุดกระตุ้นเมื่อค่าอินดักแตนซ์มีค่าลดลง การใช้งานมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์นอกจากจะสามารถใช้ในงานปรับเปลี่ยนความเร็วเหมือนมอเตอร์ทั่ว ๆ ไปแล้วยังให้ประสิทธิภาพสูงขณะทำงานที่พิกัดโหลดแต่ละเฟสของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์จะเป็นอิสระต่อกัน ทำให้สามารถทำงานได้แม้กระทั่งเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดความเสียหาย และกระแสที่ไหลเข้าไปในแต่ละเฟสจะไหลเพียงทิศทางเดียว ซึ่งคุณสมบัตินี้เองทำให้ยากต่อการเกิดการลัดวงจรช่วยป้องกันอันตรายต่องานที่นำไปใช้ และในปัจจุบันอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและถูกลงจึงทำให้มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์จึงเป็นตัวเลือกหนึ่งในการนำมาใช้งานทดแทนมอเตอร์ประเภทอื่น ๆ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานและโครงสร้างของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ 3 Phase แบบ 12/8
2. เพื่อศึกษาและออกแบบ Position sensor เพื่อใช้ในการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ 3 Phase แบบ 12/8
3. เพื่อศึกษาและนำวงจร Asymmetric half bridge converter มาใช้ในการควบคุมสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ 3 Phase แบบ 12/8 ในลักษณะการควบคุมกระแสแบบวงรอบปิด
4. เพื่อศึกษาและนำวงจร Asymmetric half bridge converter มาใช้ในการควบคุมสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ 3 Phase แบบ 12/8 ในลักษณะการควบคุมความเร็วแบบวงรอบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาหลักการทํางานและโครงสร้างของสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ 3 Phase แบบ 12/8 เพื่อนำไปใช้ในการขับสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ 3 Phase แบบ 12/8
2. สามารถออกแบบ Position sensor เพื่อใช้ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์
3. สามารถนำวงจร Asymmetric half bridge converter มาใช้ในการขับสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ 3 Phase แบบ 12/8
4. สามารถควบคุมการจ่ายกระแสในแต่ละเฟสของ สวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ 3 Phase แบบ 12/8 แบบวงรอบปิดให้คงที่ได้
5. สามารถทดลองขับสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์แบบวงรอบปิดขณะ No-load โดยให้มีความเร็วคงที่

### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

จากขอบเขตของโครงการที่ได้ทำการศึกษาจะพบว่าเป็นโครงการที่เกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแทนซ์ 3 เฟส แบบ 12/8 ด้วยวงจร Asymmetric half bridge converter ซึ่งวิธีการที่ใช้ในโครงการนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือส่วนของ Hardware และ Software โดยในส่วนของ Hardware จะทำการออกแบบวงจรตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งและลำดับการจ่ายพลังงานให้กับขดลวดในแต่ละเฟส และออกแบบวงจรตรวจวัดกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อใช้ในการป้องกันกระแสซึ่งจะนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ส่วนในด้านของ Software จะเป็นการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในลักษณะต่าง ๆ เช่น การรับค่าจากเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งแล้วสั่งการให้มีลำดับการจ่ายกระแสในแต่ละเฟสที่แตกต่างกัน การเขียนโปรแกรมให้มีการตรวจวัดค่ากระแสเพื่อควบคุมความเร็ว ตลอดจนการสั่งให้แสดงผลทางจอ LCD สุดท้ายเป็นการทดสอบการทำงานร่วมกันระหว่างส่วนของ Hardware และ Software เพื่อให้ได้ผลตามที่คาดหวังไว้

### 1.5 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินการ	2551							2552		
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีของ SRM	■	■								
2. ศึกษาทฤษฎีของวงจร Asymmetric Half-bridge Converter		■								
3. ศึกษาวงจรการทำงานของ Position sensor		■								
4. คิดค้นหาวิธีในการตรวจจับ ตำแหน่งโรเตอร์ทั้ง 3 เฟส		■								
5. ออกแบบและจัดทำ Position sensor		■	■							
6. สร้างชุดตัดแสงสำหรับบอก ตำแหน่งโรเตอร์ (Auto CAD)		■	■							
7. ทดลองวัดสัญญาณการ ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์จาก Position sensor		■	■							
8. จำลองสัญญาณการตรวจจับ ตำแหน่งโรเตอร์จาก Matlab		■	■							
9. เปรียบเทียบผลจากการ ทดลองและผลจากโปรแกรม					■					
10. ศึกษาตัวควบคุม (dsPIC)						■				
11. เขียนโปรแกรมควบคุม มอเตอร์ในลักษณะต่างๆ						■	■			
12. ทดลองในงานมอเตอร์							■	■		
13. ปรับปรุง								■	■	
14. สรุปผล									■	■

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถสร้างตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ 3 Phase แบบ 12/8 โดยใช้ Position sensor เป็นตัวตรวจจับ
2. สามารถนำวงจร Asymmetric half bridge converter มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ SRM ได้
3. สามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ SRM ในลักษณะต่างๆ ได้
4. สามารถนำการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ไปประยุกต์ใช้งานให้มีประสิทธิภาพขึ้นได้

## 1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์

เนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วย

- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีของสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ , ทฤษฎีของวงจรฮาร์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ , dsPIC ไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่เป็นความรู้พื้นฐานในการนำไปปฏิบัติในโครงการ
- บทที่ 3 เป็นการจำลองการทำงานของสวิตช์รีลักแตนซ์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นการจำลอง ให้มุมมองให้เห็นถึงสัญญาณแล้วศึกษาลักษณะของค่าฟลักซ์ กระแส และแรงบิดที่เกิดขึ้น และยังมีการแสดงวงจรที่ออกแบบในส่วนของฮาร์ดแวร์
- บทที่ 4 กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการทดลองขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา
- บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงสิ่งที่ได้สร้างขึ้นในโครงการว่ามีประสิทธิภาพการทำงานอย่างไร ปัญหาและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นและแนวทางการแก้ไขปัญหา

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีของสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์

มอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแทนซ์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่แรงบิดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ส่วนที่เคลื่อนที่ได้เคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุด และสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุดที่ตำแหน่งอื่นได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดที่อยู่เฟสถัดไป ในช่วงการทำงานของมอเตอร์ในแต่ละเฟสจะถูกกระตุ้นเมื่อค่าอินดักแตนซ์มีการเพิ่มขึ้นและหยุดกระตุ้นเมื่อค่าอินดักแตนซ์มีการลดลง การใช้งานมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแทนซ์นอกจากจะสามารถใช้งานปรับเปลี่ยนความเร็วเหมือนมอเตอร์ทั่วๆไปแล้ว ยังให้ประสิทธิภาพสูงขณะทำงานที่พิกัดโหลด มอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแทนซ์นี้จะมีกระแสที่ไหลเข้าในแต่ละเฟสไหลเพียงทิศทางเดียวและเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งทำให้ยากต่อการลัดวงจรและยังป้องกันอันตรายต่องานที่นำไปใช้ จึงเหมาะในงานพวก การขับเคลื่อนปั๊ม คอมเพรสเซอร์ พัดลม รถยนต์ไฟฟ้าและเครื่องซักผ้า

#### 2.1.1 การเปรียบเทียบสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์กับซิงโครนัสมอเตอร์ และ สเต็ปป์มอเตอร์ ในทางอุดมคติ

มอเตอร์ทั้ง 3 ชนิดนี้มีความคล้ายคลึงกันและแตกต่างกันอธิบายได้ดังนี้  
-ความสัมพันธ์ระหว่างสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์กับซิงโครนัสมอเตอร์

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์กับซิงโครนัสมอเตอร์ในทางอุดมคติ

Switched reluctance motor	Synchronous reluctance
1. stator และ rotor เป็นแบบ salient pole	1. สเตเตอร์จะเรียงทำเป็น slot
2. ขดลวดที่สเตเตอร์จะรวมกันเป็นขดหรือ coil แต่ละขดจะพันกันเป็น 1 ขั้วแม่เหล็ก	2. ที่สเตเตอร์มีขดลวด 3 เฟส ซึ่งขดลวดจะกระจายออกและเป็นรูป sine โดยประมาณ
3. ในการกระตุ้นแต่ละเฟสนั้นจะใช้ลำดับเฟสของกระแสพัลส์	3. การกระตุ้นทั้ง 3 เฟส จะใช้สัญญาณกระแส sine wave แบบสมดุล (phase balance)
4. ในขณะที่มอเตอร์หมุน flux - linkage จะเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมหรือ sawtooth แต่จะไม่เปลี่ยนตามกระแส	4. ค่า L ภายใน จะเปลี่ยนตามสัญญาณ sine ตามตำแหน่งของโรเตอร์ แต่ไม่เปลี่ยนกระแสตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### -ความสัมพันธ์ระหว่างสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์กับสเต็ปปีงมอเตอร์

สวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างและส่วนของวงจรทางแม่เหล็กเหมือนกับสเต็ปปีงมอเตอร์ แต่จะแตกต่างกันตรงที่การออกแบบวิธีการในการควบคุมและสมรรถนะของคุณลักษณะในการใช้งานซึ่งข้อแตกต่างจะเปรียบเทียบให้เห็นได้ดังนี้

#### ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์กับสเต็ปปีงมอเตอร์ในทางอุดมคติ

Switched reluctance motor	VR stepper motor
1. ในการทำงานปกติจะต้องทำการตรวจจับตำแหน่งเพลลาและทำการป้อนกลับมายังระบบ โดยให้กระแสเฟสและตำแหน่งของโรเตอร์ไปพร้อมๆกัน	1. ในการทำงานปกติมอเตอร์จะหมุนแบบ open-loop โดยไม่ต้องทำการตรวจจับตำแหน่งของเพลลา
2. ออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการให้พลังงานสูง	2. ออกแบบให้มี step มาสมบูรณ์แล้วเมื่อได้รับการป้อนพลังงาน

#### 2.1.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuits)

- วงจรแม่เหล็กสมมูลย์



ภาพที่ 2.1 แสดงวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าและวงจรสมมูลย์ทางแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสมมูลย์แม่เหล็กจะคล้ายกับวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าแบบมีเฉพาะความต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่จะสามารถเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า เราสามารถใช้หลักการเดียวกันกับวงจรไฟฟ้าที่มีเฉพาะความต้านทาน ในการคำนวณหาผลเฉลยของวงจรได้

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก

วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้า	วงจรสมมูลย์ทางแม่เหล็ก
Voltage , V	Magnetomotive Force (mmf), $\mathcal{F}$
Current , I	Magnetic Flux, $\phi$
Resistance , R	Reluctance, $\mathcal{R}$

- ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance)  
ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self Inductance)

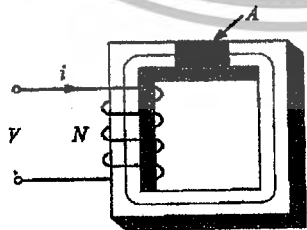
วงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 2.2(a) มีขดลวดพันอยู่บนแกนแม่เหล็กจำนวน N รอบ ซึ่งขดลวดดังกล่าวนี้เรียกว่า ความเหนี่ยวนำตัวเอง หรือความเหนี่ยวนำ และจะใ้วงจรสมมูลย์ดังรูป 2.2(b) โดยที่กำหนดให้เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง ขดลวดต่อแอมแปร์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน ดังสมการข้างล่างนี้

จาก  $\lambda = N\phi$  (2-1)

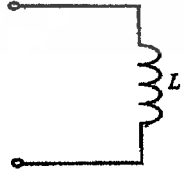
$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (2-2)$$

ดังนั้น  $L = \frac{N\phi}{i}$  (2-3)

เพราะฉะนั้น  $L = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$  (2-4)



(a) กลุ่มขดลวด-แกน



(b) วงจรสมมูลของค่าความเหนี่ยวนำ

ภาพที่ 2.2 แสดงความเหนี่ยวนำด้วยตัวเอง

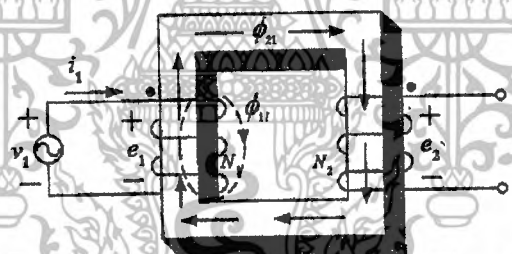
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

การพิจารณาวงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 2.3 นั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแส  $i_1$  ที่ไหลในขดลวดที่ 1 ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi_1$  ขณะที่เปิดวงจรด้านขดลวดที่ 2 โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าวส่งผลให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่ 1 สำหรับเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi_{21}$  ซึ่งเกิดขึ้นจากการผ่านกระแสเข้าไปยังขดลวดที่ 1 นั้นเป็นเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องระหว่างขดลวดที่ 1 ไปยังขดลวดที่ 2 และเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi_{21}$  ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่ 2 และในลักษณะเดียวกันถ้ากระแส  $i_2$  ไหลไปยังขดลวดที่ 2 ขณะที่ขดลวดที่ 1 เปิดวงจรก็จะมีลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องเหมือนกันกับลักษณะแรก ดังนั้นจะได้สมการความเหนี่ยวนำร่วมคือ

$$M_{21} = N_2 \frac{d\phi_{21}}{di_2} \quad (2-5)$$

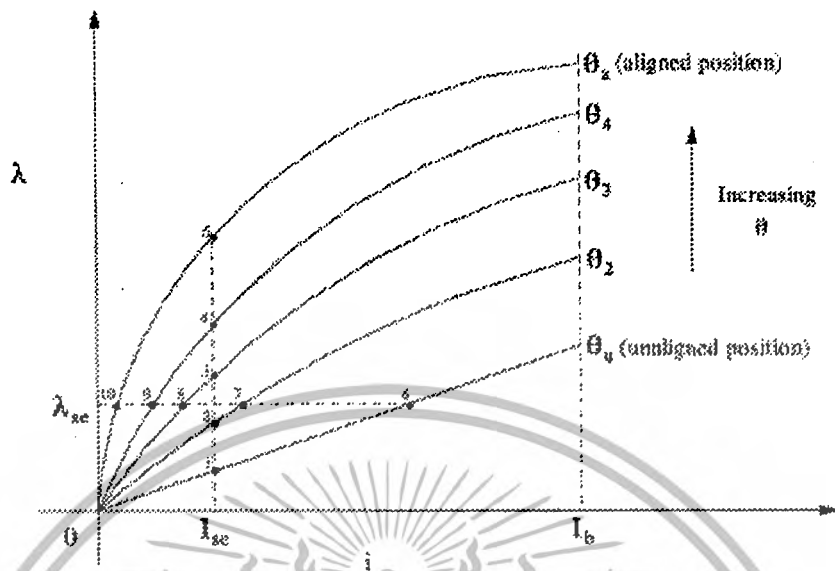
เมื่อ  $\phi_{21}$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องระหว่างขดลวดที่ 1 และขดลวดที่ 2  
 $M_{21}$  คือ ความเหนี่ยวนำร่วมที่เกิดจากขดลวดที่ 2 กระทำต่อขดลวดที่ 1  
 $i_2$  คือ กระแสที่ไหลเข้าขดลวดที่ 2



ภาพที่ 2.3 ความเหนี่ยวนำร่วมที่เกิดจากขดลวดที่ 1 กระทำต่อขดลวดที่ 2 โดยกระแส  $i_1$

#### 2.1.3 กราฟแสดงคุณสมบัติของสนามแม่เหล็ก

ในการวิเคราะห์มอเตอร์แบบสวิตชิ่งที่แน่นอนนั้นเป็นไปได้ยากที่จะหลีกเลี่ยงการวิเคราะห์ในช่วงอิ่มตัว (Saturation) และในส่วนของความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญทางสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ ดังนั้นจึงต้องใช้กราฟคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กมาช่วยในการวิเคราะห์ กราฟคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กเป็นกราฟรูปร่างของฟลักซ์ลิงค์เกจในขดลวดสเตเตอร์ต่อกระแสที่กระตุ้นเข้าไปในแต่ละตำแหน่งของโรเตอร์ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กราฟ Magnetizing แสดงตำแหน่ง Aligned และ Unaligned

จากรูปที่ 2.4 กราฟคุณสมบัติของสนามแม่เหล็ก มีส่วนสำคัญอยู่ 2 ส่วนคือที่ตำแหน่งตรงขั้ว Aligned และตำแหน่งไม่ตรงขั้ว Unaligned ที่ตำแหน่งตรงขั้วกราฟมีลักษณะไม่เชิงเส้น ฟลักซ์ลิ่งค์เกจจะเริ่มอิ่มตัว เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นแต่มีส่วนที่เป็นเชิงเส้นในช่วงกระแสต่ำๆ ที่ตำแหน่งไม่ตรงขั้วกราฟจึงมีลักษณะเป็นเชิงเส้นเพราะผลของช่องอากาศที่กว้างมีการรั่วไหลของฟลักซ์ลิ่งค์เกจมาก จึงทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กน้อยกว่าของตำแหน่งตรงขั้ว และตำแหน่งโรเตอร์อยู่ท่ามกลาง (Intermediate Rotor) ซึ่งเกิดการเหลื่อมกัน (Overlap) ระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่งไม่ตรงขั้วไปยังตำแหน่งตรงขั้วทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเริ่มเกิดการอิ่มตัวขึ้นเรื่อยๆ

#### 2.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์

- **ตำแหน่งตรงขั้ว (Aligned Position)**

ตำแหน่ง Aligned คือตำแหน่งที่แกนของขั้วโรเตอร์วางตัวในแนวเดียวกับแกนของขั้วสเตเตอร์ เมื่อกระแสไหลเข้ามายังเฟส 1 แรงบิดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากว่าโรเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด ถ้าโรเตอร์อยู่ในตำแหน่งข้างๆ ตำแหน่งตรงขั้วซึ่งในตำแหน่งนี้จะมีการสะสมแรงบิด โดยที่โรเตอร์อยู่ในช่วงพยายามกลับเข้าสู่ตำแหน่งตรงขั้ว การที่ตำแหน่งตรงขั้วมีความเหนี่ยวนำสูงสุดก็เนื่องมาจากค่าความต้านทานสนามแม่เหล็กของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าน้อยสุด เนื่องมาจากช่องอากาศระหว่างขั้วโรเตอร์กับขั้วของสเตเตอร์นั้นมีค่าน้อยสุด จะเกิด leakage flux น้อย เส้นแรงแม่เหล็กจะผ่านไปบริเวณโครงของสเตเตอร์ซึ่งจะดูดซับค่า MMF และลดค่าความเหนี่ยวนำลง ณ ตำแหน่งนี้จะเกิดมีปรากฏการณ์อิมตัวเกิดขึ้น

- **ตำแหน่งไม่ตรงขั้ว (Unaligned Position)**

ณ ตำแหน่งนี้จะไม่มีการเกิดขั้วและค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำสุดเพราะค่าความต้านทานสนามแม่เหล็กของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูง เนื่องมาจากที่ตำแหน่งนี้ช่องอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์มีความกว้างมากที่สุดทำให้ค่ารีลักแตนซ์มีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งนี้จะไม่มีการอิมตัวเนื่องจากเกิด leakage flux ค่อนข้างมาก

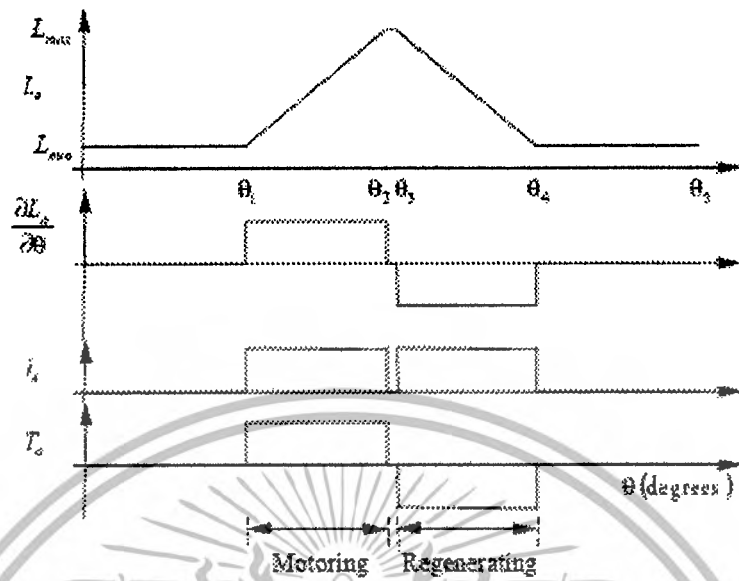
- **ตำแหน่งที่โรเตอร์อยู่ระหว่างกลาง**

ตำแหน่งที่โรเตอร์อยู่ระหว่างตำแหน่ง Aligned กับตำแหน่ง Unaligned ที่ตำแหน่งนี้จะเกิดการอิมตัวเมื่อมุมของขั้วโรเตอร์และมุมของขั้วสเตเตอร์มีการเหลื่อมกัน ถ้าหากเพิ่มกระแสให้ไหลในเฟสเพิ่มขึ้น ช่วงของการอิมตัวจะขยายเพิ่มมากขึ้น

#### 2.1.5 แรงบิด

แรงบิดของมอเตอร์ในแต่ละเฟสจะเกิดขึ้นเมื่อทำการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าไป ค่าแรงบิดนั้นจะขึ้นกับค่ากระแสกระตุ้นและตำแหน่งของโรเตอร์ ช่วงที่มีผลต่อแรงบิดก็คือช่วงที่ขั้วโรเตอร์กับขั้วของสเตเตอร์มีการเหลื่อมกัน ส่วนที่ตำแหน่ง Unaligned จะไม่มีผลต่อแรงบิด

การที่ป้อนกระแสกระตุ้นให้ขดลวดในช่วงความชันของค่าความเหนี่ยวนำที่เป็นบวกตามทิศทางการหมุนไปข้างหน้า แรงบิดที่ได้จะมีค่าเป็นบวก ซึ่งแรงบิดนี้เรียกว่า แรงบิดแบบมอเตอร์ (Motoring torque) แต่ถ้าป้อนกระแสเข้าในช่วงที่ค่าความเหนี่ยวนำเป็นค่าลบตามทิศทางการหมุนไปข้างหน้า ค่าแรงบิดที่ได้จะมีค่าเป็นลบซึ่งจะเรียกว่า แรงบิดแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generating torque)



ภาพที่ 2.5 แสดงกราฟค่าความเหนี่ยวนำและแรงบิดเมื่อป้อนกระแสเข้าขดลวดเฟส

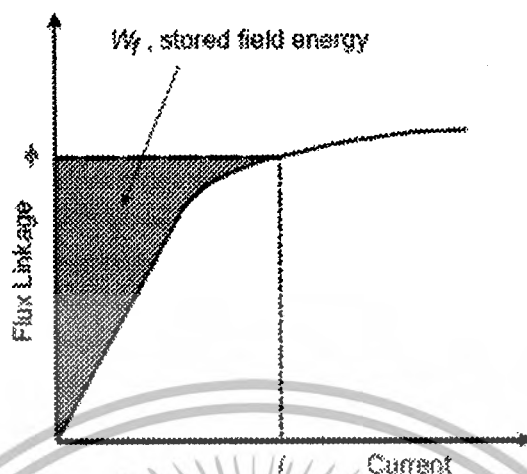
สมการทั่วไปที่แสดงถึงแรงบิดที่เกิดขึ้นของเฟสใดเฟสหนึ่ง ณ ตำแหน่งใดๆของโรเตอร์

$$T = \left[ \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right]_{i=\text{constant}} \tag{2-6}$$

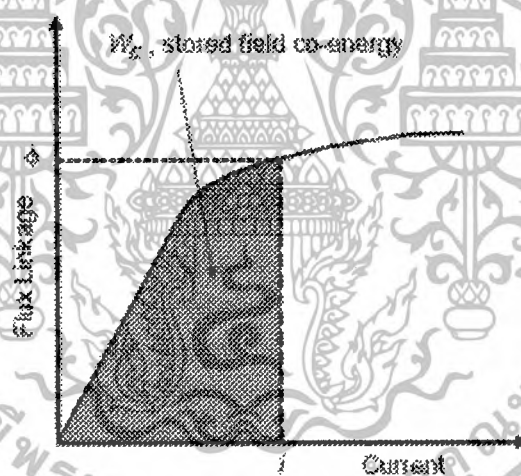
เมื่อ  $W'$  คือ coenergy โดยสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ magnetizing

$$W' = \int_0^i \lambda di \tag{2-7}$$

โดยที่พื้นที่เหนือกราฟคือ stored field energy,  $W_f$



ภาพที่ 2.6 แสดงค่าพลังงานสะสม



ภาพที่ 2.7 แสดงค่า coenergy

จากการกล่าวในสมการที่ 2-6 และ 2-7 เราจะสามารถอธิบายค่า instantaneous torque โดยใช้รูปที่ 2.8 ซึ่งทำการกำหนดให้มอเตอร์มีการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง  $\theta_1$  ไปยังตำแหน่ง  $\theta_2$  โดยที่กระแสที่ไหลในเฟสมีค่าคงที่ ซึ่งในขณะนั้นมอเตอร์จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกับแหล่งจ่ายและยังมีการเปลี่ยนแปลงของ stored field energy และ coenergy ซึ่งค่า instantaneous torque สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของ coenergy  $\Delta W'_m$  และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโรเตอร์  $\Delta\theta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่เปลี่ยนถ่ายกับแหล่งแสดงได้ดังนี้คือ

$$\Delta W_e = ABCD \quad (2-8)$$

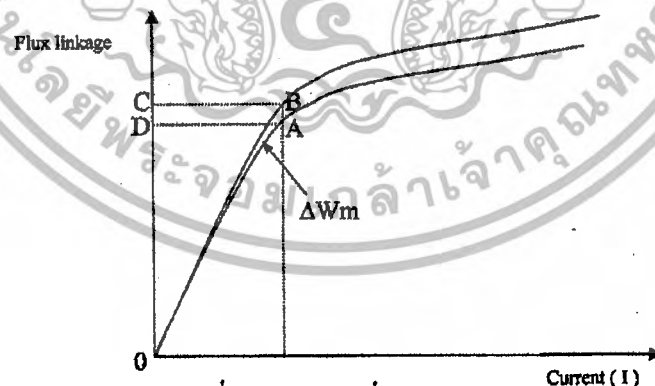
Coenergy ที่ถูกแลกเปลี่ยน คือ

$$\Delta W_f = OBC - OAD \quad (2-9)$$

เพราะฉะนั้นงานทางกลที่ได้ คือ

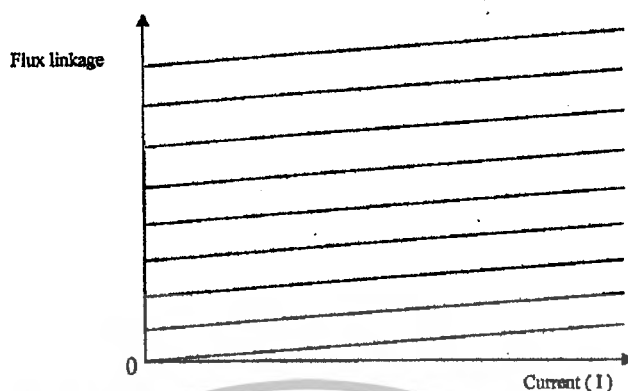
$$\begin{aligned} \Delta W_m &= \Delta W_e - \Delta W_f \\ &= ABCD - (OBC - OAD) \\ &= (ABCD + OAD) - OBC \\ &= OAB \end{aligned} \quad (2-10)$$

ดังนั้นพบว่าพลังงานทั้งหมดจากแหล่งจ่ายไม่ได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานกลทั้งหมด แต่จะมีพลังงานบางส่วนถูกเก็บไว้ในรูปของสนามแม่เหล็กและพลังงานที่สะสมในรูปสนามแม่เหล็กจะไม่สูญหายไปไหนแต่ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ สิ่งที่สำคัญ คือ จะทำให้มี C filter ที่ขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Co-energy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง flux-linkage กับกระแสของมอเตอร์

ในรูปที่ 2.9 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง flux-linkage กับกระแสของมอเตอร์ ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อโรเตอร์อยู่ในตำแหน่ง aligned position จะมีค่า flux-linkage สูง และเมื่อโรเตอร์อยู่ในตำแหน่ง unaligned position จะมีค่า flux-linkage ต่ำ

### 2.1.6 โครงสร้างของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแทนซ์

Switch Reluctance Motor (SRM) ประกอบด้วยสเตเตอร์และโรเตอร์ที่เป็นแบบขั้วยื่น สามารถสร้างให้มีจำนวนเฟสกี่จำนวนก็ได้ตั้งแต่หนึ่งเฟสจนถึงหลายเฟสขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่นำไปใช้และปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์

#### - SRM ชนิด 1 เฟส

มอเตอร์แบบเฟสเดียวก็จะมีลำดับเฟสอยู่เพียงลำดับเดียวในทิศทางการหมุนไปข้างหน้า และย้อนกลับ มีข้อดีตรงที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมน้อยและมีความสามารถที่จะมี Power Density ได้สูง ส่วนข้อด้อยนั้นเมื่อพิจารณาแรงบิด แรงบิดรวมที่ได้จะมีการกระเพื่อมสูง และจะต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการสตาร์ท เพราะไม่สามารถเริ่มสตาร์ทเองได้

#### - SRM ชนิด 2 เฟส

มอเตอร์แบบ 2 เฟสนี้มีลำดับการทำงานในรูปแบบเดียว จึงนิยมใช้กับงานที่หมุนในทางเดียว โดยการให้โรเตอร์ของมอเตอร์แบบนี้มีลักษณะขั้วเป็นแบบ Stepped Gap ซึ่งช่วยในการสตาร์ท แต่มอเตอร์แบบนี้ก็ยังให้แรงบิดที่มีการกระเพื่อมสูงอยู่

- SRM ชนิด 3 เฟสและมากกว่า

ถ้าหากในลักษณะงานที่ต้องการกลับทิศทางการหมุนก็จะต้องเลือกใช้มอเตอร์จำนวนตั้งแต่ 3 เฟสขึ้นไป มอเตอร์แบบ SRM 3 เฟส เป็นชนิดที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เพราะสามารถควบคุมการหมุนได้ 2 ทิศทาง โดยที่ไม่ต้องมีหลักการหรืออุปกรณ์ช่วยในการเริ่มต้นสตาร์ทและยังมีการกระเพื่อมของแรงบิดน้อย ส่วนในมอเตอร์แบบ SRM ที่มีเฟสเพิ่มขึ้น เช่น มอเตอร์แบบ SRM 4 เฟส จะเป็นมอเตอร์ที่ลดแรงกระเพื่อมได้ดีมาก แต่ในขณะที่จำนวนเฟสที่เพิ่มมากขึ้น ค่าใช้จ่ายในส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็มากขึ้นตาม วงจรขับก็จะราคาแพงขึ้น และยังทำให้การควบคุมการทำงานของมอเตอร์มีความซับซ้อนมากขึ้นอีกด้วย ลักษณะการพันขดลวดของ SRM จะพันที่ขั้วของสเตเตอร์อย่างเดี่ยวโดยแยกพันแต่ละเฟส โดยมีเฟสละ 2 ขั้ว ที่อยู่ตำแหน่งตรงข้ามกันซึ่งขดลวดทั้งสองนี้จะสามารถต่อกันได้ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน ส่วนตัวโรเตอร์นั้นจะไม่มีพันขดลวด



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์แบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.7 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

ในการที่จะวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์เราสามารถทำการวิเคราะห์ได้จากวงจรสมมูลย์ที่ไม่นำค่า Mutual Inductance ระหว่างเฟสของมอเตอร์มาคิด จากรูปที่ 2.11 แสดงวงจรสมมูลย์เบื้องต้นของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ โดยแรงดันที่จ่ายให้ในแต่ละเฟสจะแสดงดังสมการที่ (2-11)

$$v = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2-11)$$

โดย  $R_s$  คือค่าความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์ส่วน

$$\lambda = L(\theta, i) \cdot i \quad (2-12)$$

โดย  $\lambda$  คือ ฟลักซ์ลิงค์เกจ



ภาพที่ 2.11 รูปแสดงวงจรสมมูลย์เบื้องต้นของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

$L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของโรเตอร์และค่ากระแสเราสามารถเขียนสมการแรงดันเฟสได้ดังสมการที่ (2-13)

$$v = R_s i + \frac{d[L(\theta, i) \cdot i]}{dt} \quad (2-13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2-14)$$

$$v = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2-15)$$

จาก  $\frac{d\theta}{dt} = \omega_m$  จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$v = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta, i)}{dt} \cdot \omega_m \cdot i \quad (2-16)$$

จากสมการ (2-16) จะพบว่ามี 3 เทอม โดย  $R_s i$  คือค่าแรงดันตกคร่อมที่ตัวต้านทาน  $L(\theta, i) \frac{di}{dt}$  คือค่าแรงดันตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำและ  $\frac{dL(\theta, i)}{dt} \cdot \omega_m \cdot i$  คือค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \omega_m \cdot i = K_b \cdot \omega_m \cdot i \quad (2-17)$$

โดย  $K_b = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta}$  คือค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากสมการที่ (2-16) จะสามารถนำมาเขียนวงจรสมมูลย์ 1 เฟสได้ดังรูป



ภาพที่ 2.12 วงจรสมมูลย์ 1 เฟสของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

จะสามารถเขียนสมการกำลังต้านอินพุตได้ดังสมการ (2-18)

$$p_m = v \cdot i = R_s \cdot i^2 + i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i) \cdot i \cdot \frac{di}{dt} \quad (2-18)$$

19) นำวิธีการทางคณิตศาสตร์มาช่วยจัดการในเทอมสุดท้ายของสมการ(2-18)จะได้สมการ(2-

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L(\theta, i) \cdot i^2 \right) = L(\theta, i) \cdot i \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2-19)$$

จัดรูปสมการที่(2-19) ได้เป็นสมการที่(2-20)

$$L(\theta, i) \cdot i \cdot \frac{di}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) - \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2-20)$$

นำสมการที่(2-20)แทนลงในสมการที่(2-18)จะได้สมการที่(2-21)ออกมา

$$p_m = v i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) - \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt} + i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2-21)$$

$$p_m = v i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2-22)$$

โดย  $p_m$  คือค่ากำลังทางต้านอินพุต จากสมการที่(2-22)จะมองเห็นความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กทางกล (Electromechanics) ซึ่งพบว่ากำลังทางต้านอินพุตประกอบด้วยค่าสูญเสียในขดลวด(Resistive Loss) อยู่ในเทอม  $R_s i^2$  ค่าพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงและสะสมในสนามแม่เหล็กอยู่ในเทอมของ  $\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right)$  และค่าพลังงานที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงานกลอยู่ในเทอมของ  $\frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{dt}$  ค่าพลังงานกลสามารถเขียนได้ดังสมการที่(2-23)

$$p_a = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \omega_m \quad (2-23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_a = T_e \omega_m \quad (2-24)$$

และ

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2-25)$$

โดย  $P_a$  คือค่าพลังงานทางกลทางด้านเอาต์พุต  $T_e$  คือค่าแรงบิด  $\omega_m$  คือ ค่าความเร็วของโรเตอร์สมการทางกลจะเขียนได้ดังสมการที่ (2-26)

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (2-26)$$

$T_L$  คือค่าแรงบิดที่โหลด (Load Torque)  $J$  คือค่าแรงเฉื่อย (Inertia) รวมของมอเตอร์และโหลด  $B$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (Friction) รวม

### 2.1.8 หลักการทำงาน

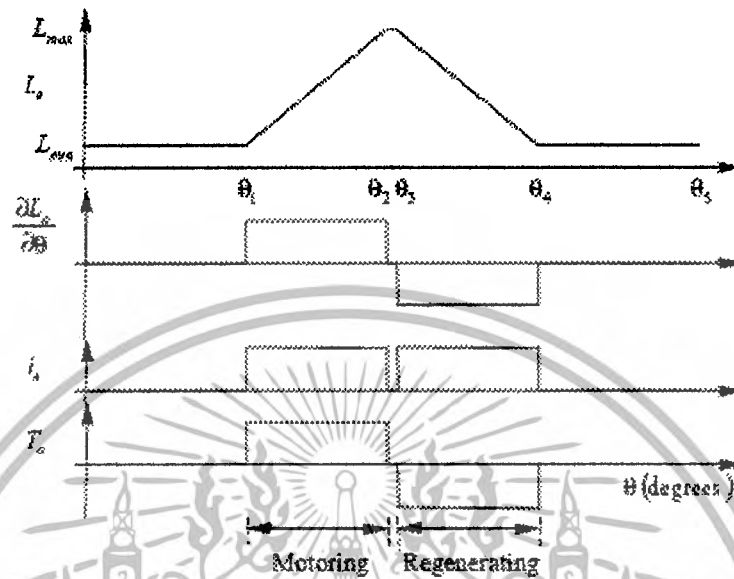
ในการที่จะทำให้โรเตอร์หมุนเราจะต้องจ่ายกระแสกระตุ้นเข้าไปในแต่ละเฟส เช่น หากต้องการให้โรเตอร์หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา เราจะต้องจ่ายกระแสกระตุ้น ( $\theta_{on}$ ) ที่เลข 1 จนกระทั่งขั้วของโรเตอร์และขั้วของสเตเตอร์ใกล้เคียงจะมาตรงขั้วกันที่เฟส 1 (เลข 1) ก็ทำการหยุดจ่ายกระแสกระตุ้น ( $\theta_{off}$ ) ให้เฟส 1 แล้วทำการจ่ายกระแสกระตุ้นที่เฟส 2 จนกระทั่งขั้วของโรเตอร์และสเตเตอร์จะตรงขั้วกันก็หยุดจ่ายกระแสกระตุ้นให้เฟส 2 ทำการจ่ายกระแสกระตุ้นที่เฟส 3 จนกระทั่งขั้วของโรเตอร์กับสเตเตอร์จะตรงกัน หยุดจ่ายกระแสกระตุ้นให้เฟส 3 จากลักษณะดังกล่าวจะสามารถทำการจ่ายกระแสเพื่อให้โรเตอร์หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา เขียนแสดงลำดับเป็น A-B-C-A-B-C-A... ส่วนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ทำการจ่ายเรียงลำดับเป็น C-B-A-C-B-A-C... การกระตุ้นซ้ำจะเกิดขึ้นในทุกๆ 45 องศา โดยจำนวนการกระตุ้นในแต่ละรอบสามารถหาได้จากสมการ

$$N_{stroke} = N_{ph} N_r \quad (2-27)$$

โดย  $N_{ph}$  คือจำนวนเฟส  $N_r$  คือจำนวนขั้วของโรเตอร์ มุมของจังหวะกระตุ้น (Stroke Angle [°]) ในแต่ละครั้ง สามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Stroke Angle [°]} = \frac{2\pi}{N_{ph} N_r} \quad (2-28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



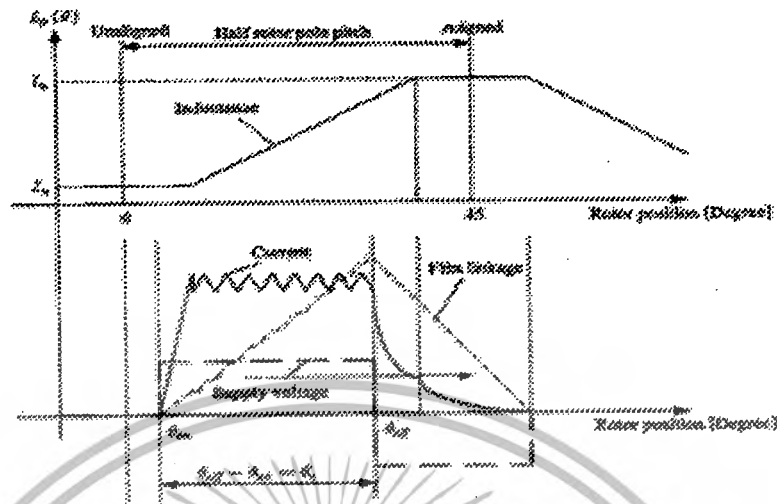
ภาพที่ 2.13 แสดงรูปร่างของเฟสอินดักแทนซ์ , กระแสและแรงบิดในอุดมคติของสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์

รูปร่างของเฟสอินดักแทนซ์ , กระแสและแรงบิดในอุดมคติของสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

แรงบิดจะสร้างขึ้นพร้อมกับกระแสกระตุ้น ซึ่งจึงหะการกระตุ้นจะกระตุ้นมอเตอร์ให้หมุนครั้งละ 15 องศา ซึ่งในเฟสเดียวกันจะถูกกระตุ้นซ้ำทุกๆ 45 องศา ค่าของแรงบิดรวมของมอเตอร์ที่สร้างขึ้นจะได้มาจากแรงบิดในแต่ละเฟสรวมกัน

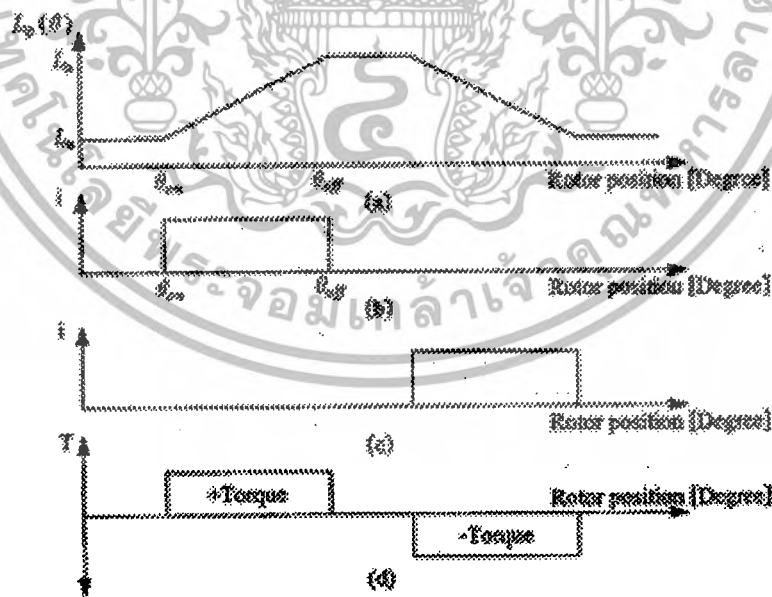
### 2.1.9 หลักการควบคุมมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแทนซ์

ในการควบคุมมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแทนซ์ส่วนที่สำคัญที่สุดเป็นส่วนของการควบคุมมุมของการสวิตซ์ ซึ่งต้องควบคุมให้สวิตซ์จ่ายแรงดันและกระแสให้สอดคล้องกันกับรูปร่างของค่าอินดักแทนซ์ในช่วงที่ทำงานเป็นมอเตอร์ในกระบวนการควบคุมมีตัวแปรที่สำคัญ เช่น มุมนำกระแส ( $\theta_{on}$ ) มุมหยุดนำกระแส ( $\theta_{off}$ ) และช่วงของมุมนำกระแส ( $\theta_c = \theta_{off} - \theta_{on}$ ) รูปแบบของการสวิตซ์จะเป็นดังรูปที่ 2.14 เป็นรูปคลื่นของแรงดันเฟส , กระแสเฟส , เฟสฟลักซ์ลิงค์เกจและเฟสอินดักแทนซ์ในอุดมคติในขณะที่มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ



ภาพที่ 2.14 รูปความสัมพันธ์ของฟลักซ์อินดักแตนซ์กับการจ่ายกระแสกระตุ้นใน 1 เฟส

ค่าม้วนกระแสควรที่จะเลือกในตำแหน่งที่ค่ากระแสกำลังเพิ่มขึ้นให้เหมาะสมสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าอินดักแตนซ์ซึ่งแรงบิดที่ได้จะเป็นแรงบิดทางด้านบวกและเพื่อหลีกเลี่ยงแรงบิดในด้านลบ มุมหยุดนำกระแสก็ต้องเลือกให้หยุดนำกระแสก่อนที่ค่าอินดักแตนซ์จะเข้าสู่ช่วงที่กำลังลดลง ซึ่งแรงบิดจะสอดคล้องกันกับรูปคลื่นของค่าอินดักแตนซ์และตำแหน่งของโรเตอร์ดังรูปที่ 2.15

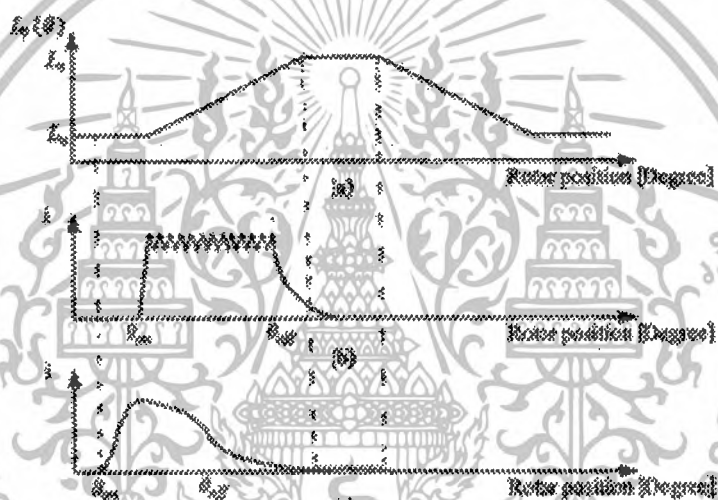


ภาพที่ 2.15 รูปคลื่นของ (a) ฟลักซ์อินดักแตนซ์ (b) กระแสช่วงฟลักซ์อินดักแตนซ์เพิ่มขึ้น (c) กระแสช่วงฟลักซ์อินดักแตนซ์ลดลง (d) แรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์ให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีนั้นก็คือการควบคุมกระแสซึ่งรูปคลื่นกระแสในแต่ละเฟสของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการทำงานและโหลดทางกลรูปร่างของรูปคลื่นกระแสที่ความเร็วรอบต่ำและที่ความเร็วรอบสูงจะเป็นดังรูปที่ 2.16

มอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์เมื่อทำงานที่ความเร็วตามพิกัด ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back-emf) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงดันที่แหล่งจ่าย ดังนั้นต้องมีการจำกัดกระแสเพื่อไม่ให้มีค่าสูงจนอันตรายเกินไป ซึ่งวิธีการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Current Control) เป็นวิธีที่ใช้ในการควบคุมโดยการกำหนดค่ากระแสที่สร้างขึ้นไม่ให้มีค่าสูงเกินค่ากระแสที่กำหนด โดยเรียกการทำงานในโหมดนี้ว่าการควบคุมกระแส (Current Control Mode)



ภาพที่ 2.16 รูปคลื่นของ (a) อินดักแตนซ์ (b) กระแสที่ความเร็วต่ำ (c) กระแสที่ความเร็วสูง

เมื่อทำงานที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วตามพิกัดค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะเริ่มมีอิทธิพล ดังนั้นค่ากระแสเกิดการหักล้างกับค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่มีค่าสูง มอเตอร์จะทำงานในโหมดซิงเกิลพัลส์ (Single Pulse Mode) รูปคลื่นของกระแสจะขึ้นไปตามพัลส์และค่าสูงสุดของรูปคลื่นกระแสไม่เกิดค่าพิกัดของกระแส ค่าม้วนนำกระแสจะต้องเลือกในช่วงก่อนที่ค่าอินดักแตนซ์เพิ่มขึ้นหรือเลือกขยับไปข้างหน้ามากขึ้น และมุมหยุดนำกระแสจะต้องหยุดนำกระแสก่อนในช่วงที่ค่าอินดักแตนซ์กำลังถึงค่าสูงสุดเพื่อให้กระแสลดลงเป็นศูนย์หมดก่อนที่จะเข้าไปยังช่วงแรงบิดทางดาวน์ลอป จากรูปที่ 2.16 จะเห็นว่าที่ความเร็วสูงค่าม้วนนำกระแสและมุมหยุดนำกระแสจะขยับเลื่อนไปข้างหน้ามากกว่าที่ความเร็วต่ำ

### ข้อดี ของสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์

สวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์มีลักษณะเฉพาะพิเศษที่ถูกสร้างขึ้นมาให้มีความแข็งแรงกว่า AC และ DC มอเตอร์และมีหลายความเร็วในการหมุน ซึ่งข้อดีของสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ กล่าวได้ ดังนี้

1. เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีโครงสร้างง่ายและราคาถูก ไม่มีขดลวดที่โรเตอร์และแม่เหล็กถาวร
2. ไม่ช้อตถึงกันระหว่าง DC buses เพราะแต่ละขดลวดต่ออนุกรมกัน
3. การระบายความร้อนทำได้ง่าย
4. คุณสมบัติของ torque – speed ของมอเตอร์ สามารถออกแบบสำหรับใช้งานเฉพาะได้ ง่ายกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นๆ
5. แรงบิดเริ่มเดินสูงและไม่มีปัญหากระแสอินรัช (inrush current) เพราะค่า L ภายในสูงมาก
6. แรงดันเบ็ดดวงจร และกระแสลัดดวงจรในขณะที่เกิดฟอลต์ เป็นศูนย์หรือน้อยมาก
7. โรเตอร์ทนความร้อนได้สูงมาก เนื่องจากไม่มีแม่เหล็กถาวร
8. สามารถออกแบบมอเตอร์ให้ใช้งานที่ความเร็วรอบสูงในขณะทำงานในช่วงกำลังที่ได้
9. ขดลวดของสเตเตอร์แยกอิสระต่อกัน ขั้วแยกเฟสเดียวหรือมากกว่านั้นพร้อมกันได้
10. เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งล้มเหลวก็ยังสามารถหมุนต่อไปได้

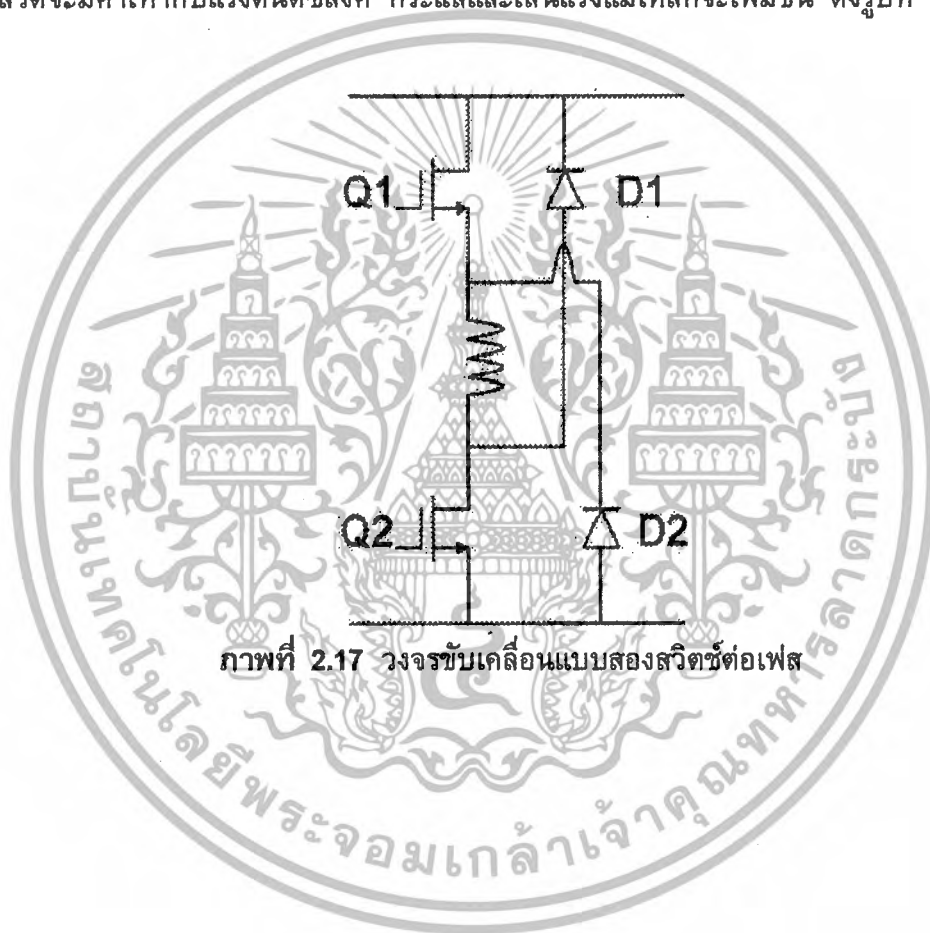
### ข้อเสีย ของสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์

1. มอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแทนซ์ต้องการช่องอากาศ (Air Gap) ที่แคบ ซึ่งจะมีผลกับกำลังและแรงบิด ทำให้ยุ่งยากในการผลิต ดังนั้น แรงบิดที่สร้างจึงมีการกระเพื่อมของแรงบิด (Ripple Torque) เกิดขึ้น
2. ต้องมีการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์
3. ค่าใช้จ่ายสูงในส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุม
4. เสียงรบกวน (Acoustic Noise) เกิดจากตัวโครงสร้างของโรเตอร์
5. สายที่ออกมาจากมอเตอร์มีจำนวนมาก
6. ไม่สามารถต่อใช้งานโดยตรงกับไฟฟ้ากระแสสลับหรือกระแสตรง จะต้องมีการชดเชยเคลื่อนทำงานร่วมกัน
7. กระแสที่แหล่งจ่ายกระแสตรงมีการกระเพื่อมมากจึงจำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุตัวใหญ่หรือแก้ไขโดยเพิ่มตัวเก็บประจุความถี่สูงเข้าไป

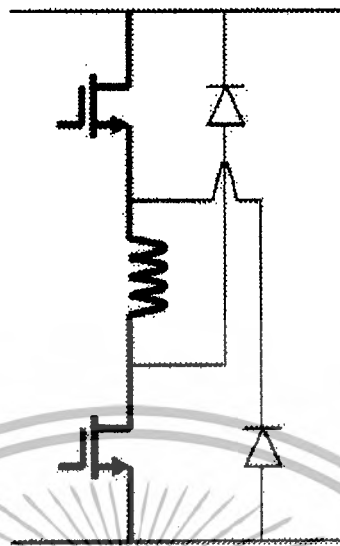
## 2.2 Converters สำหรับ Switched Reluctance Machine (SRM)

### 2.2.1 วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส

วงจรที่นิยมใช้กันมากแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 เนื่องจากว่าวงจรมีสามารถสร้างแรงดันตกคร่อมขดลวดที่เฟสได้ทั้งค่าบวก ค่าศูนย์ และค่าลบ ดังนั้นจึงมีความสามารถในการควบคุมรูปร่างของกระแสเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวด การทำงานของวงจรสามารถแบ่งออกได้ 3 กรณี กรณีแรกคือ เมื่อสวิตช์ Q1 และ Q2 ทั้งคู่ ON แรงดันตกคร่อมที่ขดลวดจะมีค่าเท่ากับแรงดันดีซีลิงค์ กระแสและเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.17(a)

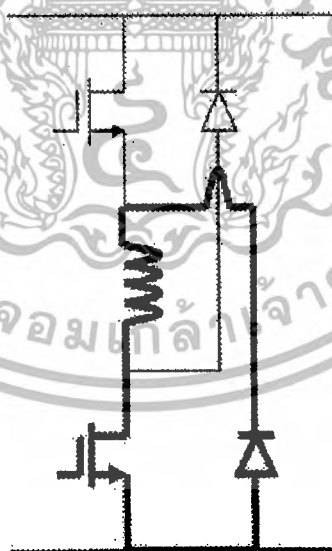


ภาพที่ 2.17 วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส



ภาพที่ 2.17(a) วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟสขณะเพิ่มพลังงาน

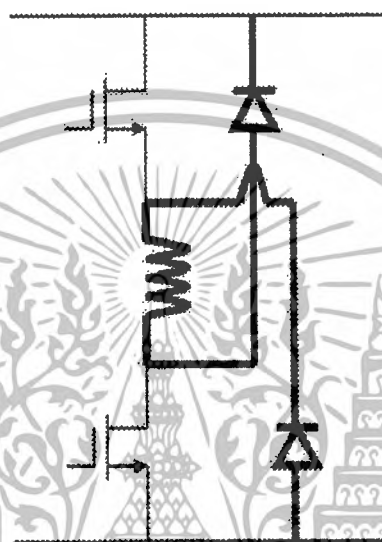
กรณีที่ 2 ถ้าสวิตช์ Q1 OFF ในขณะที่ Q2 ON กระแสจะไหลผ่านไดโอด D2 แรงดันตกคร่อมขดลวดในขณะนั้นจะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมไดโอดรวมกับแรงดันตกคร่อมสวิตช์ขณะ ON ซึ่งมีค่าน้อยมาก และในทำนองเดียวกันถ้าสวิตช์ Q1 ON ในขณะที่ Q2 OFF ดังรูปที่ 2.17(b) กระแสจะไหลผ่านไดโอด D1 แรงดันตกคร่อมขดลวดจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์



ภาพที่ 2.17(b) วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟสขณะลดพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในกรณีที่ 3 ถ้าต้องการสร้างแรงดันค่าลบตกคร่อมขดลวดเพื่อลดกระแส หรือเส้นแรงแม่เหล็ก สามารถทำได้โดยการ OFF สวิตช์ Q1 และ Q2 กระแสจะไหลผ่านไดโอดทั้งคู่และคืนพลังงานสู่แหล่งจ่ายดังรูปที่ 2.17(c) จะเห็นว่ารูปแบบของวงจรขับเคลื่อนแบบนี้จะมีความยืดหยุ่นในการควบคุมรูปร่างของกระแสได้ดี นอกจากนี้ถ้าอุปกรณ์ของเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดความเสียหาย เฟสที่เหลือก็ยังสามารถทำงานได้

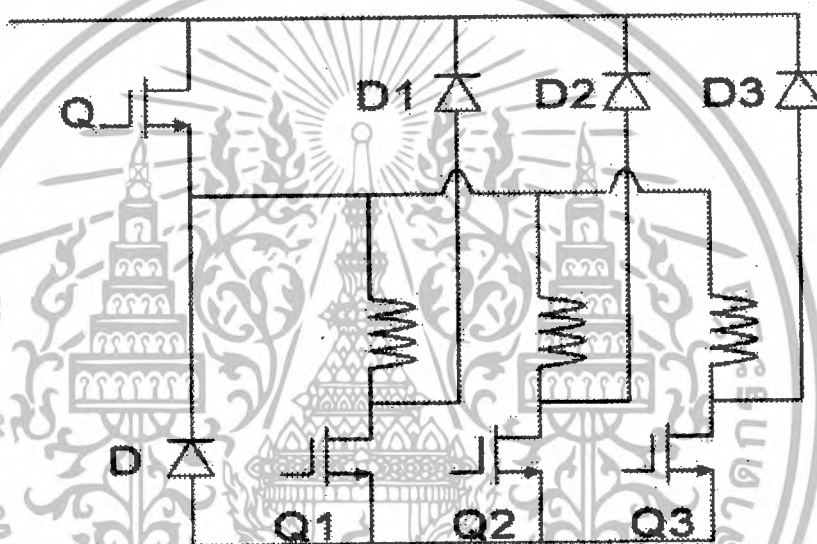


ภาพที่ 2.17(c) วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟสขณะคืนพลังงานสู่แหล่งจ่าย

### 2.2.2 วงจรขับเคลื่อนแบบที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม

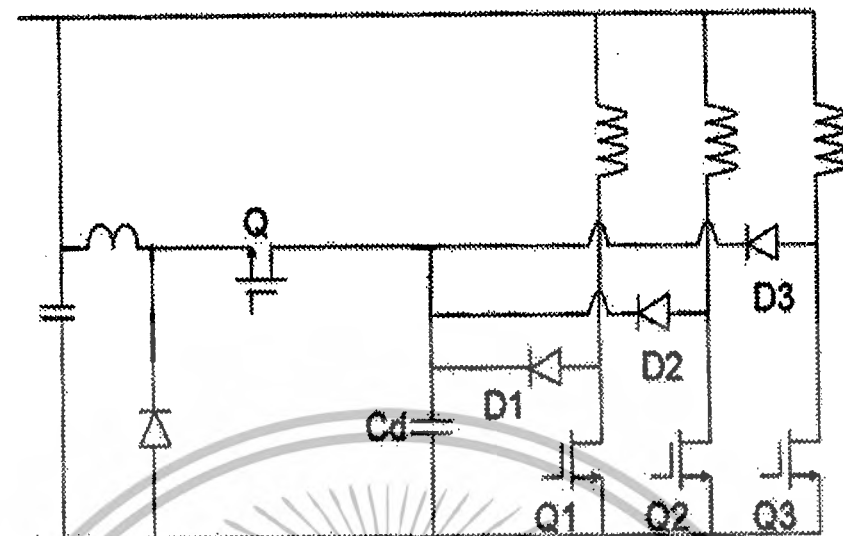
เนื่องจากว่าสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ดังนั้นราคาของตัวมอเตอร์เองจึงมีราคาถูกเมื่อเทียบกับราคาของวงจรขับเคลื่อนจากที่ได้กล่าวมาแล้ว วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส ถึงแม้จะมีความยืดหยุ่นในการควบคุมที่สูง แต่ต้องใช้อุปกรณ์ในการสวิตช์ถึง 4 ตัว นั่นคือสวิตช์ที่ควบคุมได้ 2 ตัว และไดโอด 2 ตัว ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดที่จะใช้อุปกรณ์ร่วมกันของทุกเฟส ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การใช้สวิตช์ควบคุมร่วมกันและการใช้ส่วนกระแสไหลวนร่วมกัน

จากรูปที่ 2.18 แสดงวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์แบบสามเฟส ซึ่งทั้งสามเฟสนั้นใช้สวิตช์ Q ร่วมกันในการควบคุมกระแส ในขณะที่สวิตช์ของแต่ละเฟสคือ Q1 Q2 และ Q3 ทำหน้าที่ในการควบคุมการเลือกเฟส ตัวอย่างเช่น ในขณะที่เฟสที่ 1 ทำงาน ถ้าต้องการสร้างกระแสในขดลวดของเฟสที่ 1 สวิตช์ Q และ Q1 ต้อง ON พร้อมกัน แต่ถ้าสวิตช์ Q OFF ไตโอด D และ D1 จะนำกระแสและแรงดันตกคร่อมขดลวดจะเท่ากับแรงดันดีซีลิงค์ แต่เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวใช้อุปกรณ์ร่วมกัน ดังนั้นเมื่อเทียบกับวงจรแบบสองสวิตช์ต่อเฟสแล้ว พบว่าจะใช้อุปกรณ์น้อยลงไปถึง 4 ตัว นอกจากนี้ถ้าอุปกรณ์ของเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดความเสียหายหรือทำงานผิดพลาดก็จะส่งผลไปถึงเฟสอื่นๆที่เหลือนด้วย



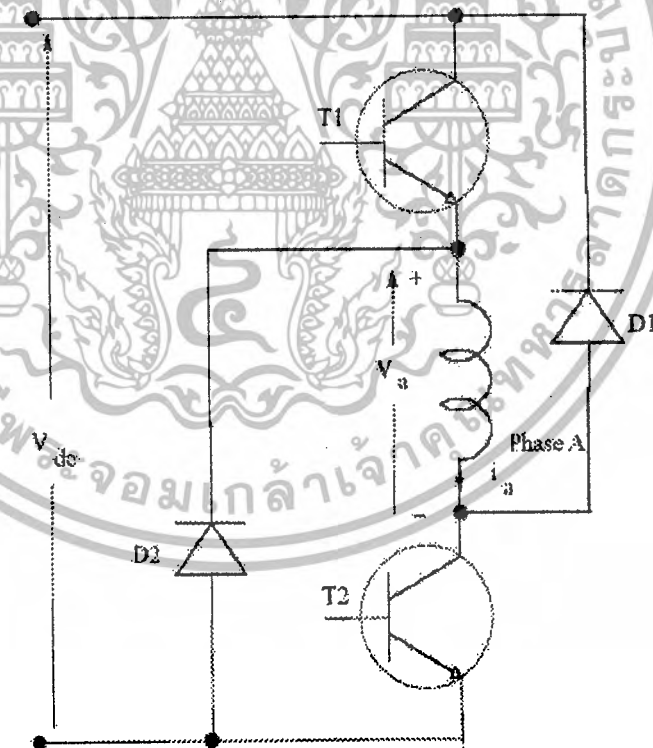
ภาพที่ 2.18 วงจรขับเคลื่อนแบบที่มีการใช้ส่วนจ่ายพลังงานร่วมกัน

สำหรับวงจรที่ใช้ส่วนกระแสไหลวนนั้นจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าการต่อ ไตโอดสำหรับคืนพลังงานกลับไปสู่ตัวเก็บประจุ Cd ซึ่งวงจรนี้มีชื่อเรียกว่า C-damp ซึ่งแรงดันของตัวเก็บประจุ Cd นี้จะถูกควบคุมให้อยู่ที่ประมาณสองเท่าของแรงดันดีซีลิงค์ โดยที่มิวงจรลดทอนแรงดันของ Cd โดยการควบคุมพลังงานคืนกลับไปยังแหล่งจ่าย เช่นเดียวกับวงจรที่มีอุปกรณ์ร่วมประเภทแรก ถ้าเกิดความเสียหายกับวงจรลดทอนแรงดันนี้ อาจจะทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ Cd เพิ่มขึ้นสูงจนเกิดความเสียหายกับวงจรได้



ภาพที่ 2.19 วงจรขับเคลื่อนแบบที่มีการใช้ส่วนกระแสไหลวนร่วมกัน

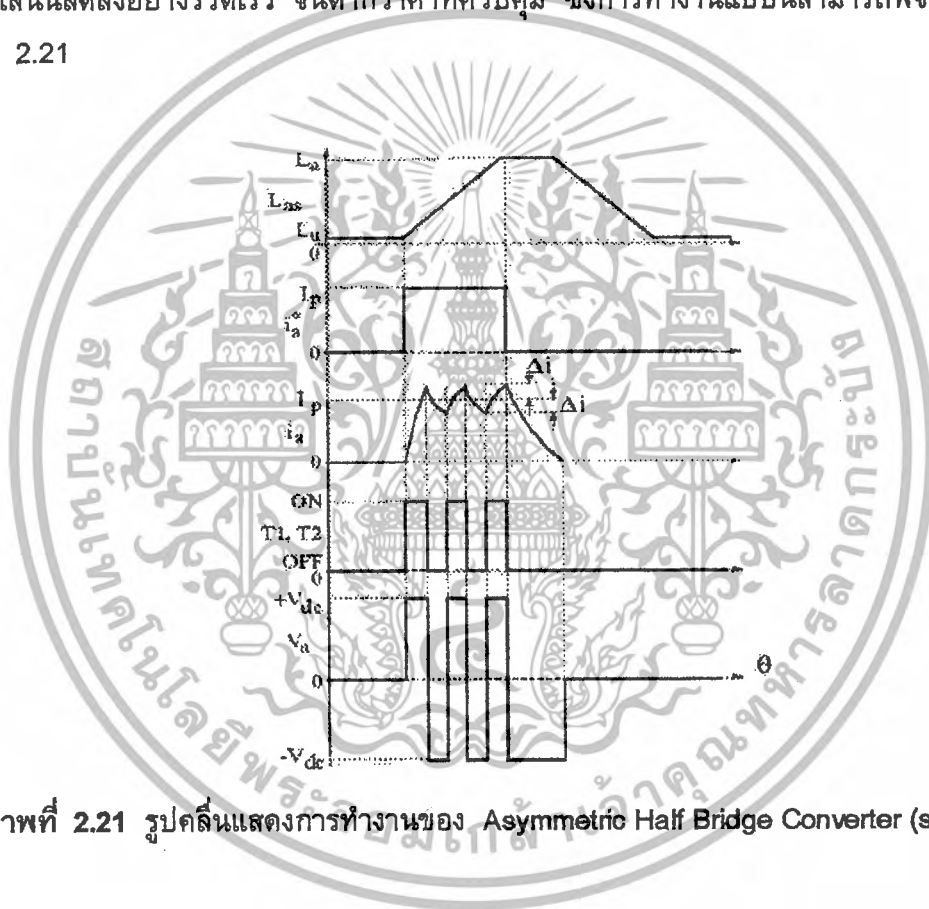
### 2.2.3 หลักการทำงานของ Asymmetric Half Bridge Converter



ภาพที่ 2.20 วงจร Asymmetric Half Bridge Converter ของสวิตซ์รีลักแทนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

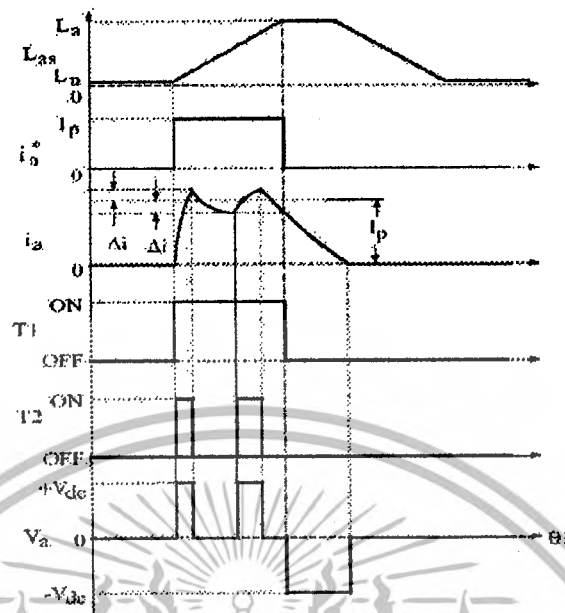
จากรูปที่ 2.20 เป็นการแสดงวงจร Asymmetric Half Bridge Converter โดยพิจารณาเพียงเฟสเดียวสมมติเป็น Phase A ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ (SRM) โดยวงจรที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเฟสที่เหลือก็จะมีลักษณะของวงจรที่เหมือนกัน เมื่อพิจารณาการ Turn ON ของทรานซิสเตอร์ (Transistors) T1 และ T2 จะเป็นการปล่อยกระแสให้ไหลเข้าไปใน Phase A ของ SRM จนกระทั่งค่าฟลักซ์ของกระแสเพิ่มขึ้นไปจนมากกว่าค่าที่ควบคุมไว้ T1 และ T2 ก็จะทำให้การ Turn OFF พลังงานที่ถูกเก็บสะสมในขดลวดเฟส A จะทำการรักษาทิศทางของกระแสให้มีทิศทางเดิมจนกระทั่งกระแสหมดลง ดังนั้นไดโอด D1 และ D2 จะถูกทำให้นำกระแส (Forward biased) เพื่อส่งพลังงานกลับคืนสู่แหล่งจ่าย ซึ่งจะทำให้กระแสนั้นลดลงอย่างรวดเร็ว จนต่ำกว่าค่าที่ควบคุม ซึ่งการทำงานแบบนี้สามารถพิจารณาได้จาก รูปที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 รูปคลื่นแสดงการทำงานของ Asymmetric Half Bridge Converter (strategy 1)

จากรูปที่ 2.21 สมมุติให้ขนาดของกระแสที่ต้องการมีค่าเท่ากับ  $I_p$  ในช่วงที่ค่าความชันของความเหนี่ยวนำเป็นบวก (Positive inductance slope) สำหรับการแสดงค่ากระแสในเฟส A ที่ต้องการซึ่งถูกสร้างจากค่าความเหนี่ยวนำที่เป็นเชิงเส้น กระแสที่เราต้องการในที่นี้คือ  $i_d^*$  ซึ่งจะเป็นตัวอ้างอิงใช้กับกระแสที่ถูกป้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบกับกระแสในเฟส A  $i_d$  ความแตกต่างของกระแสจะผ่านกระบวนการ Hysteresis controller ด้วยหน้าตาของ  $\Delta i$  เมื่อความแตกต่างของกระแสเกิน  $-\Delta i$  สวิตช์ T1 และ T2 จะทำการ Turn OFF พร้อมกัน Hysteresis current controller จะถูกพิจารณาที่เวลานั้น ไดโอด D1 และ D2 จะมีกระแสไหลผ่านและถูกส่งคืนไปที่แหล่งจ่าย dc จะสังเกตเห็นว่าแรงดันของเฟส A ในช่วงนี้จะมีค่าเป็นลบและมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย ระหว่างช่วงนี้พลังงานที่ถูกสะสมในค่าความเหนี่ยวนำที่ขดลวดของมอเตอร์จะถูกส่งคืนสู่แหล่งจ่าย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างโหนดและแหล่งจ่ายอย่างช้าๆในหนึ่งรอบของเฟสกระแสหลังจากเริ่มสตาร์ทระหว่าง Turn ON และ Turn OFF ของ T1 และ T2 ขดลวดในเฟสจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันของ dc link ด้วยกันสองครั้ง โดยผลลัพธ์นี้จะทำให้เกิดการเสื่อมลงของฉนวน การควบคุมแบบนี้ (Strategy I) เป็นผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการกระเพื่อม (ripple) ใน dc link capacitor ซึ่งทำให้อายุการทำงานลดลงและเป็นการเพิ่มการสูญเสียของการสวิตช์ซึ่งของสวิตช์ในการทำงาน เนื่องจากมีความถี่ในการเปลี่ยนสถานะจากการเปลี่ยนแปลงพลังงาน โดยทั้งหมดนี้สามารถทำการปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยการทำงานแบบ Alternate switching strategy

พลังงานที่ถูกสะสม (Energy stored) ในเฟส A สามารถจะเกิดการแพร่กระจายในตัวเอง โดยการ Turn OFF เพียง T2 เท่านั้น (Strategy II) ในกรณีนี้กระแสจะเกิดการไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง ผ่าน T1, Phase A และ D1 โดย D1 จะถูกนำกระแส (Forward biased) หลังจาก T2 ถูก Turn OFF ทันที แรงดันที่ขดลวดจะกลายเป็นศูนย์ ถ้าไม่คิดแรงดันตกคร่อมที่ไดโอดและทรานซิสเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 รูปคลื่นแสดงการทำงานของ Asymmetric Half Bridge Converter (strategy 2)

ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่าง  $I_p + \Delta i$  ถึง  $I_p - \Delta i$  ในเวลานี้จะทำให้เกิดแรงต่อต้านแรงดันจากแหล่งจ่ายในกระบวนการก่อนหน้านี้ ซึ่งจะทำให้การลดความเร็วของการสวิตช์ซึ่งลดลงและส่งผลกระทบต่อความสูญเสียจากการสวิตช์ซึ่งลดลง (Switching losses) เมื่อกระแสที่ต้องการมีค่าเป็นศูนย์ทั้ง T1 และ T2 จะถูก Turn OFF พร้อมกันทันที ในช่วงแรกแรงดันที่ขดลวดจะมีค่าเป็น  $-V_{dc}$  ซึ่งเป็นช่วงที่ D1 และ D2 นั้นนำกระแสและหลังจากนั้นแรงดันที่ขดลวดจะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อม T2 ระหว่างที่ตัวมัน Turn OFF และ T1 ON จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย  $V_{dc}$

ดังนั้นพิกัดของกำลัง Power switches และ ไดโอด ควรจะมีค่าต่ำสุดที่ค่าน้อยสุดของแรงดันที่แหล่งจ่าย ส่วนพิกัดของกระแสควรจะมีค่าเท่ากับหรือเป็นอย่างน้อยเท่ากับ  $I_p / \sqrt{q}$  เมื่อ  $q$  เป็นจำนวนเฟสโดยการเปลี่ยนแปลงช่วงหยุดทำงานระหว่าง T1 และ T2 ในหนึ่งรอบการทำงานของการนำเฟส (phase conduction) จะคล้ายพิกัดของกระแสของไดโอดซึ่งสามารถคำนวณได้ ขณะที่การแพร่กระจายด้วยตัวเอง (self-circulation) จะรักษากระแสที่ผ่านตัวมันเองสำหรับการเปรียบเทียบการส่งคืนที่แหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งจะทำให้มีประโยชน์ในการแปรผันพลังงานที่ถูกเก็บสะสมไว้ที่การทำงานของ SRM ขณะที่รูปแบบการควบคุมที่สามารถที่จะใช้การควบคุมของกระแสหรือการส่งคืนของแหล่งจ่าย ซึ่งได้เปรียบเมื่อกระแสถูก Turn OFF อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของพลังงานจะต้องมีความเหนียวแน่นในลักษณะที่เรียบหรือ การ Start จะต้องมีความชันที่เป็นลบ นอกจากนี้เงื่อนไขอื่นๆของกระแสที่มีการบังคับการสูญเสียของพลังงาน หรือแรงบิดที่เป็นลบแล้วยังเป็นการลดค่าเฉลี่ยแรงบิดอีกด้วย

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดจะสรุปได้ว่าวงจรแปลงผัน (Converter) ชนิดนี้นั้นต้องการทรานซิสเตอร์หรือสวิตช์ 2 ตัว และไดโอด 2 ตัว สำหรับแต่ละเฟส ซึ่งคล้ายๆกับวงจรแปลงผันในมอเตอร์กระแสสลับ (AC Motor) และจะมีการแบ่งการทำงานเป็น 3 ลักษณะ ตามขนาดของแรงดันที่ป้อนเข้าขดลวดในแต่ละเฟสของ SRM ดังนี้

ลักษณะที่ 1 T1 และ T2 ทำงาน ON ทั้งคู่เรียกว่า " fluxing " โดยแรงดันที่ได้จะมีค่าเท่ากับ  $+V_{dc}$  (Positive voltage loop) ส่วนกระแส  $i_a$  จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

ลักษณะที่ 2 จะเกิดขึ้นเมื่อมีสวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งทำงาน ON และอีกตัวไม่ทำงาน OFF อาจเป็น T1: ON และ T2: OFF หรือ T1: OFF และ T2: ON ก็ได้ โดยแรงดันที่ได้จะมีค่าเท่ากับศูนย์ (Zero-voltage loop) ลักษณะนี้จะมีไดโอดอีกตัวหนึ่งนำกระแส ส่วน  $i_a$  จะมีการลดลงอย่างช้าๆ ในการทำงานลักษณะนี้ กระแสในเฟส  $i_a$  จะ freewheel ผ่านสวิตช์ หนึ่งตัว และไดโอดหนึ่งตัว

ลักษณะที่ 3 จะเกิดขึ้นเมื่อสวิตช์ทั้งสองตัวไม่ทำงาน OFF ทั้งคู่เรียกว่า " defluxing " โดยแรงดันที่ได้จะมีค่าเท่ากับ  $-V_{dc}$  (Negative voltage loop) ในการทำงานลักษณะนี้กระแสในเฟส  $i_a$  จะ freewheel ผ่านไดโอดทั้งสองตัวทำให้ เสมือนแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับขดลวดถูกกับขั้ว  $V_{dc}$  จึงเป็นลบ  $i_a$  จะลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์

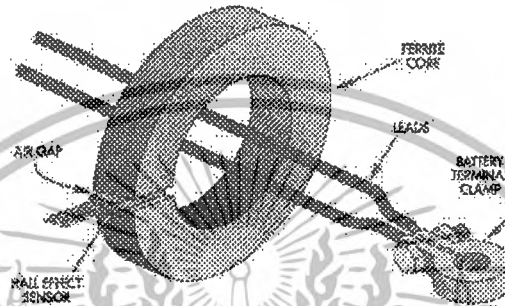
### 2.3 การตรวจจับกระแสสำหรับการเปลี่ยนแปลงกำลังและการเคลื่อนที่

รายละเอียดของ Current Sensor ที่นำไปใช้งานเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสม จะพิจารณาจาก โดยผลกระทบต่อสัญญาณรบกวน ความน่าเชื่อถือ การจัดการกับความร้อน และด้านเศรษฐศาสตร์



ภาพที่ 2.23 แสดง Current Sensor

ในการตรวจจับกระแสสำหรับการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าและการเคลื่อนที่ สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ได้ 3 ชนิดคือ R shunt, หม้อแปลงกระแส, และ Hall effect sensor โดยนำ sensor มาต่อเป็นวงปิด เพื่อช่วยป้องกันและช่วยควบคุมพารามิเตอร์ ส่วนในกรณีที่ทำกรต่อภายนอกของระบบจะทำการวัดที่ตำแหน่ง specific circuit ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะการตรวจจับกระแสแบบ Hall effect



ภาพที่ 2.24 แสดงส่วนประกอบ Current Sensor

ภายในตัว Hall effect จะมีอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นชิ้นของแข็งที่เสถียร ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตออกมา โดยแปลงจากสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม และจากการป้องกันกระแสควบคุมซึ่งสามารถอธิบายคุณสมบัติได้ดังตาราง

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของ Hall Effect Current Sensor

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- วัดได้ทั้งกระแสสลับและกระแสสลับ</li> <li>- เป็นวิธีการค่าใช้จ่ายต่ำ เมื่อใช้วัดทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ (&gt; 500A)</li> <li>- มีการแยกโดดทางไฟฟ้า</li> <li>- มีความน่าเชื่อถือสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดจาก zero current</li> <li>- ต้องอาศัยกำลังจากแหล่งจ่ายภายนอก</li> <li>- มีความซับซ้อน</li> <li>- มีเงื่อนไข เมื่อต้องใช้งานที่สภาวะ Overtemperature, Overcurrent และแหล่งจ่ายกำลังมีการเปลี่ยนแปลง</li> </ul>

ตัวตรวจจับกระแส Hall Effect นั้นไม่ว่าจะเป็นแบบ Open loop หรือ Close loop จะมีอุปกรณ์หลักๆที่เหมือนกันดังนี้ Hall generator, แกนเหล็ก และ Amplifier แต่วิธีการ 2 แบบนี้ก็ยังมีข้อแตกต่างกันอย่างชัดเจนอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก Hall Effect แบบ Open loop

ตัว Hall generator ติดตั้งที่บริเวณ Air gap ของแกนเหล็กและการวางตัวของตัวนำกระแสคือวางตัวผ่านช่องของแกนเหล็ก เมื่อมีกระแสไหลจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก ซึ่งตัว Hall generator จะเป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เนื่องจากสัญญาณที่ได้จาก Hall generator มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงทำการติดตั้ง Amplifier เข้าไปเพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตที่เหมาะสม

### ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก Hall Effect แบบ Close loop

ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก Hall Effect แบบ Close loop จะมีการพันขดลวดบนแกนเหล็กเพิ่มขึ้นทำให้เกิดสนามแม่เหล็กมาหักล้างสนามแม่เหล็กของแกนเหล็ก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของการตรวจจับสนามแม่เหล็กจะดีขึ้น หลักการก็จะเหมือนกับแบบ Open loop แต่จะมีวงจรขับ push-pull มาต่อจาก Amplifier หลังทำการป้อนกลับสัญญาณไปยังขดลวดที่พันบนแกนเหล็ก การใช้รูปแบบ Close loop นี้ จะเป็นการลดปัญหาของแกนเหล็กและ Hall generator ในเรื่องของความเป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Open loop กับ Close loop ของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก Hall Effect

ข้อดีของ Open loop	ข้อดีของ Close loop
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาถูก ใช้ในช่วงกระแสสูง</li> <li>- ใช้กำลังน้อยในกาวัดกระแส</li> <li>- ขนาดเล็ก น้ำหนักเบาแม้จะใช้วัดกระแสในช่วงที่มีค่าสูง</li> <li>- ไม่เกิดการเสียหายจากการได้รับกระแสเกิน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ให้ความแม่นยำสูงที่สภาวะวแตล่อมและอุณหภูมิสูง</li> <li>- เกิดกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ถือได้ว่าสัญญาณรบกวนเป็นค่าในอุดมคติ</li> <li>- ใช้ในช่วงความถี่สูง (&gt; 150kHz)</li> <li>- ไม่เกิด Hysteresis loss</li> </ul>

## การนำไปใช้งาน

ผู้ใช้งานส่วนใหญ่จะนำเอา current sensor ไปใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านที่เป็นกลุ่มก้อนและเป็นรางเลื่อนในอุตสาหกรรม โดยใช้ Hall effect current sensor ทั้งแบบวงปิดและวงเปิดเพื่อที่จะนำไปใช้ได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ เช่น กระแสที่คงที่จะไปสร้างแรงดึงในการขับเคลื่อนมอเตอร์ของเพล่าให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ในส่วนที่นำไปใช้ในด้านอื่น อาทิเช่น การหยุดการขับเคลื่อนในระหว่างการวัดกระแส โดยจะมีการเปิดปิดของ Blower ในมอเตอร์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีกับ Open loop sensor ลักษณะการทดสอบของตัว sensor ควรจะให้ระบบมีการทดสอบเป็นระยะโดยมีการแยกช่องของตัว sensor หรือแบ่งแกนเหล็กออกเป็น 2 ส่วน เพื่อให้การติดตั้งเป็นไปได้อย่างมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานกับระบบ PLC

## 2.4 ข้อมูลเบื้องต้นของ dsPIC

dsPIC คือชื่อของไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิต จาก Microship Technology Inc. ผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC โดย Microship Technology ได้กำหนดชื่ออย่างเป็นทางการสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรมใหม่นี้ว่า Digital Signal Controller หรือ DSC นั้นหมายความว่า dsPIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับกาออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่องานประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถสูง

### 2.4.1 คุณสมบัติโดยรวมของ dsPIC

#### 2.4.1.1 คุณสมบัติของซีพียู

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ซีพียูแบบ RISC
- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- มี 84 คำสั่งภาษาแอสเซมบลีมาตรฐาน รองรับรูปแบบการอ้างแอดเดรสได้อย่างอิสระ
- ชุดคำสั่งมี 24 บิตสามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลช สามารถลบและเขียนได้ใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 100,000 ครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้ และสามารถโปรแกรมตัวเองโดยใช้กระบวนการทางซอฟต์แวร์
- มีหน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอมที่สามารถลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 100,000,000 ครั้ง
- มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์จำนวนมาก จึงรองรับการตอบสนองสัญญาณอินเตอร์รัปต์ได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีวงจรตรวจจับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีเพาเวอร์-อนรีเซต มีเพาเวอร์-อัฟไทเมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ท-อัฟไทเมอร์
- มีวอร์ทซ์ด็อกไทเมอร์แบบโปรแกรมได้
- มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรถ้าเกิดสัญญาณนาฬิกา
- รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม (ICSP: In-Circuit Serial Programming)

- สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้

#### 2.4.1.2 คุณสมบัติด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

- มีแอกคิวมูเลเตอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว รองรับการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ได้เป็นอย่างดี
- มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและหารเลข 17 บิตในรูปฮาร์ดแวร์ จึงทำให้สามารถคูณและหารเลขได้อย่างรวดเร็ว

#### 2.4.1.3 คุณสมบัติของโมดูลฟังก์ชันพิเศษ

- สามารถจ่ายกระแสออกทางขาพอร์ตได้ 25 mA ทั้งแบบกระแสซิงก์และซอร์ส
- ไทเมอร์/เคาน์เตอร์มีขนาด 16 บิต ไม่น้อยกว่า 3 ตัว ต่อใช้งานร่วมกันเป็นไทเมอร์ 32 บิตได้
- มีโมดูลตรวจจับและเปรียบเทียบสัญญาณดิจิทัล
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมทั้งแบบ SPI และผ่านระบบบัส I2C
- มีโมดูลสื่อสารข้อมูลอนุกรม UART พร้อมบัฟเฟอร์แบบ FIFO
- มีวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล ความละเอียด 10 หรือ 12 บิต
- มีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์
- มีโมดูลเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์

#### 2.4.1.4 คุณสมบัติของซีพียู dsPIC 30F2010

- มี 84 คำสั่งมาตรฐาน รองรับรูปแบบการอ้างแอดเดรสได้อย่างอิสระ
- ชุดคำสั่งมี 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลช ความจุ 12 กิโลไบต์ สามารถลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 100,000 ครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้
- สามารถโปรแกรมหน่วยความจำโปรแกรมตัวเอง โดยใช้กระบวนการทางซอฟต์แวร์
- มีหน่วยความจำข้อมูลอีพีรอม 1 กิโลไบต์ ที่สามารถลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 100,000 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีหน่วยความจำข้อมูลแรม 512 ไบต์
  - รีจิสเตอร์ W จัดในรูปของอะเรย์ มีขนาด 16 บิต จำนวน 16 ตัว
  - ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
  - ความถี่สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก ตั้งแต่ย่านไฟตรงจนถึง 40MHz ถึง 10MHz
- เลือกได้ 3 ระดับ คือ 48 หรือ 16 เท่า

- รองรับแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์ได้สูงสุด 62 แหล่ง รวมทั้งการอินเตอร์รัปต์จากภายนอก 3 แหล่ง

- สามารถกำหนดระดับความสำคัญในการตอบสนองอินเตอร์รัปต์ได้ 8 ระดับ
  - มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ 48 ตำแหน่ง
  - มีวงจรตรวจจับวงจรไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
  - มีเพาเวอร์-อนรีเซต เพาเวอร์-อัฟไทเมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ท-อัฟไทเมอร์
  - มีวอร์ทช์ด็อกไทเมอร์แบบโปรแกรมได้
  - มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา หากผิดพลาดจะเข้าสู่โหมดสัญญาณนาฬิกา RC พลังงานต่ำทันที
  - รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม (ICSP: In-Circuit Serial Programming)
  - สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้
  - ย่านไฟเลี้ยง 2.5 ถึง 5.5V กระแสไฟฟ้า 2.6 ถึง 44mA ที่ไฟเลี้ยง -5V ขึ้นอยู่กับ
- การกำหนดความเร็วในการทำงาน

#### 2.4.1.5 คุณสมบัติด้านการประมวลสัญญาณดิจิทัล

- มีแอกคิวมูเลเตอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว รองรับการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ได้เป็นอย่างดี
- มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและหารเลข 17 บิตในรูปฮาร์ดแวร์ จึงทำให้สามารถคูณและหารเลขได้อย่างรวดเร็ว
- ทำการคูณเลข 16 บิต ได้ภายในสัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ไซเคิล
- มีตัวเลื่อนข้อมูลบาร์เรล 40 สเตจ ช่วยให้ประมวลผลข้อมูลจำนวนมาก ๆ ทำได้รวดเร็ว
- มีวงจรเพตซ์ข้อมูลคู่ จึงทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

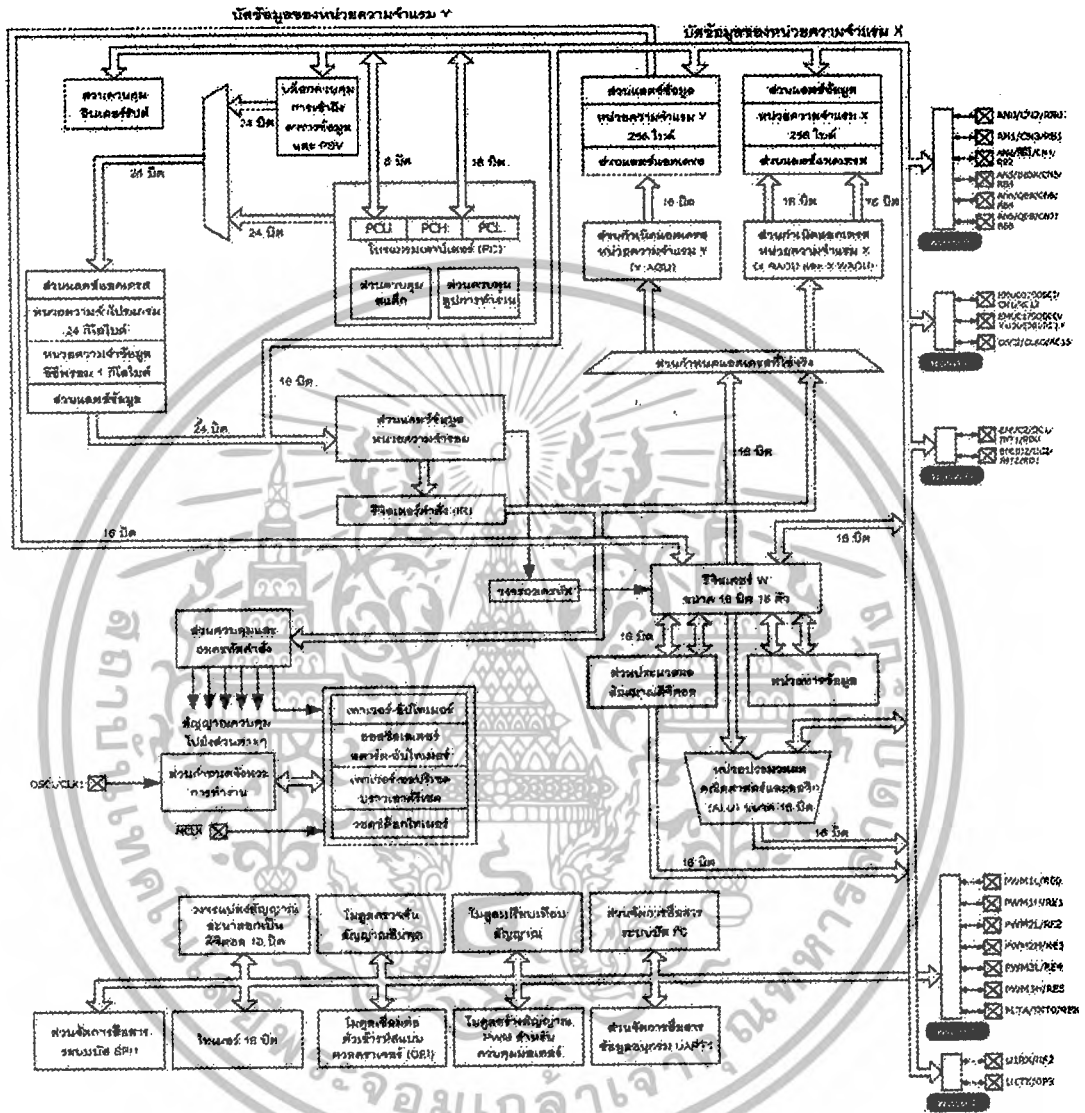
#### 2.4.1.6 คุณสมบัติของไมโครพิงก์ซีเอ็นพีพิเศษ

- สามารถจ่ายกระแสออกทางขาพอร์ตได้ 25 mA ทั้งแบบกระแสซิงก์และซอร์ส
- ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์มีขนาด 16 บิต ไม่น้อยกว่า 3 ตัว ต่อใช้งานร่วมกันเป็นไทเมอร์ 32 บิตได้
- มีไมโครตรวจจับสัญญาณดิจิตอลขนาด 16 บิต 4 ชุด
- มีไมโครเปรียบเทียบข้อมูลและกำเนิดสัญญาณ PWM ความละเอียด 16 บิต 2 ชุด
- ในการเปรียบเทียบข้อมูลสามารถเลือกการทำงานได้ 2 โหมด
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมทั้งแบบ SPI
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์ผ่านระบบบัส I2C ทั้งแบบ 7 และ 10 บิต กำหนดเป็นมาสเตอร์หรือ สเลฟได้
- มีไมโครสื่อสารข้อมูลอนุกรม UART พร้อมบัฟเฟอร์แบบ FIFO
- มีไมโครสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์ 6 ช่อง
- เลือกรูปแบบเอาต์พุตได้ทั้งแบบคอมพลีเมนต์และแบบอิสระ
- มีโหมดการปรับตำแหน่งการหมุนทั้งแบบรับขอบสัญญาณและแบบกึ่งกลาง
- มีส่วนกำเนิดคิวตี้ไซเคิล 4 ชุด
- กำหนดฐานเวลาได้ 4 โหมด
- สามารถเลือกขั้วของสัญญาณทางเอาต์พุตได้
- มีสัญญาณกระตุ้นเพื่อให้ทำงานสัมพันธ์กับวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์
- สามารถควบคุมสัญญาณเอาต์พุตได้
- มีไมโครเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดร่าเจอร์
- มีอินพุตเฟส A เฟส B และรับสัญญาณพัลส์เพื่อกำหนดตำแหน่ง
- มีตัวนับตำแหน่งขนาด 16 บิต นับได้ทั้งขึ้นทั้งลง
- แสดงสถานะของทิศทางการนับได้
- กำหนดโหมดของการวัดตำแหน่งได้ 2 โหมด คือ x2 และ x4
- มีวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบดิจิตอลจากอินพุตแบบโปรแกรมได้
- สำหรับกำหนดให้ทำงานเป็นไทเมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 16 บิตได้
- กำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากตำแหน่งที่นับเกิน (rollover) หรือ นับขาด (underflow)
- มีวงจรแปลงสัญญาณแปลงอะนาลอกเป็นดิจิตอล ความละเอียด 10 บิต 6 ช่อง
- อัตราการสุ่มและแปลงสัญญาณ 500 กิโลแซมเปิลต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถแปลงสัญญาณเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานในโหมดสลิปและไอเดิล

ได้



ภาพที่ 2.25 หลักการทำงานของ dsPIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 สถาปัตยกรรมโดยสรุปของ dsPIC30F2010

### 2.4.2.1 หน่วยประมวลผลกลาง

หน่วยประมวลผลของ dsPIC30F2010 ใช้คำสั่งที่มีความยาว 1 เวิร์ด ขนาด 24 บิต โดยมีโปรแกรมเคาน์เตอร์ขนาด 23 บิต เพื่อแจ้งแอดเดรสของหน่วยความจำโปรแกรมที่เข้าไปประมวลผลใน dsPIC30F2010 มีความจุของหน่วยความจำโปรแกรม 12 กิโลไบต์ เมื่อคำสั่งมีความยาว 24 บิต จึงบรรจุคำสั่งได้จริง 4 กิโลเวิร์ด

รีจิสเตอร์หลักที่ใช้ทำงานคือ รีจิสเตอร์ W (Working register) สำหรับใน dsPIC30F2010 จะแตกต่างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC อย่างมาก โดยรีจิสเตอร์ W ได้รับการจัดโครงสร้างเป็นอะเรย์ขนาด 16 บิต จึงทำให้รองรับทั้งข้อมูล, ค่าแอดเดรส หรือค่าของรีจิสเตอร์ใดๆที่ต้องนำมาประมวลผลโดยใน dsPIC30F2010 มีรีจิสเตอร์ W ให้ใช้ทำงานถึง 16 ตัว ส่วนใหญ่ใช้ในการประมวลผลหลัก ส่วนอีกตัวหนึ่งคือ รีจิสเตอร์ W15 จะใช้ร่วมกับตัวชี้สแต็กในการทำงานของโปรแกรมย่อยและบริการอินเทอร์รัปต์

### 2.4.2.2 หน่วยความจำ

DsPIC30F2010 มีหน่วยความจำโปรแกรม 4 กิโลเวิร์ด แอดเดรสอยู่ในช่วง 8x000100 ถึง 0x001FFE

สามารถโปรแกรมหรือเขียนข้อมูลลงไป ได้ 2 วิธีคือ

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

ส่วนหน่วยความจำข้อมูลแรมนั้น dsPIC30F2010 ได้จัดสรรเป็น 2 ส่วนคือหน่วยความจำข้อมูลแรม X และ Y แต่ละส่วนมีขนาด 16 บิตความจุ 256 ไบต์ รวมเป็น 512 ไบต์ โดยในแต่ละส่วนจะมีตัวกำหนดแอดเดรสแยกออกจากกัน เรียกว่า AGU (Address Generation Unit)

ในขณะที่หน่วยความจำอีอีพรอม dsPIC30F2010 จัดสรรไว้ที่แอดเดรส 0x7FFC00 ถึง 0x7FFFFE มีความจุ 1 กิโลไบต์

### 2.4.2.3 ส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP Engine)

นับเป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างยิ่งของ dsPIC30F2010 เนื่องจาก dsPIC30F2010 ได้รับการออกแบบมาให้ทำงานในด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเป็นหลัก ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มความสามารถในหน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิกอย่างมากโดยในส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิตอลมีหน่วยจัดการคูณเลขขนาด 17x17 บิตความเร็วสูง หรือ ALU ขนาด 40 บิต แอกริวมูลเตอร์ขนาด 40 บิต อีก 2 ตัว และตัวเลื่อนข้อมูล 2 ทิศทางแบบบาเรล (barrel shifter) ขนาด 40 บิต จึงทำให้สามารถจัดการข้อมูลขนาด 16 บิตได้เสร็จสิ้นภายในสัญญาณนาฬิกาเพียงไซเคิลเดียว

#### 2.4.2.4 โมดูลฟังก์ชันพิเศษ

dsPIC30F2010 ได้รวมเอาโมดูลสำหรับทำงานเฉพาะทางไว้อย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็นโมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล ความละเอียด 10 บิต โมดูลเชื่อมต่ออุปกรณ์หรือ SPI โมดูลสื่อสารข้อมูลผ่านระบบบัส I<sup>2</sup>C โมดูลสื่อสารข้อมูลพอร์ตนุกรมหรือ UART ไทเมอร์ขนาด 16 บิตถึง 3 ตัว และที่เป็นพิเศษอีก 2 โมดูลคือ โมดูลสร้างสัญญาณ PWM เพื่อการควบคุมมอเตอร์และข้อมูลเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์ โดยสามารถใช้งานร่วมกันเพื่อสร้างระบบควบคุมมอเตอร์แบบปิดประสิทธิภาพสูง

#### 2.4.2.5 พอร์ตอินพุตเอาต์พุต

dsPIC30F2010 มีพอร์ตให้ใช้งานมากถึง 5 พอร์ต รวม 20 ขา ดังนี้

พอร์ต B มี 6 ขาคือ RB0-RB5 โดยทุกขาสามารถกำหนดให้เป็นพอร์ตอินพุตหรือเอาต์พุตได้ และยังขั้กระแสทั้งแบบซิงก์และซอร์สได้สูงถึง 25 mA

พอร์ต C มี 3 ขาคือ RC13-RC15

พอร์ต D มี 2 ขาคือ RD0 และ RD1

พอร์ต E มี 7 ขาคือ RE0-RE5 และ RE8

พอร์ต F มี 2 ขาคือ RF2 และ RF3

MCLR	1	26	AVDD
EMUD3/AN0/REF+/CN2/RB0	2	27	AVss
EMUC3/AN1/REF-/CN3/RB1	3	28	PWM1L/RE0
AN2/SS1/CN4/RB2	4	29	PWM1H/RE1
AN3/INDX/CN5/RB3	5	24	PWM2L/RE2
AN4/QEA/IC7/CN6/RB4	6	23	PWM2H/RE3
AN5/QEB/IC8/CN7/RB5	7	22	PWM3L/RE4
Vss	8	21	PWM3H/RE5
OSC1/CLKI	9	20	VDD
OSC2/CLKO/RC15	10	19	Vss
EMUD1/SOSC1/T2CK/U1ATX/CN1/RC13	11	18	PGC/EMUC/U1RX/SD11/SDA/RF2
EMUC1/SOSCQ/T1CK/U1ARX/CN0/RC14	12	17	PGD/EMUD/U1TX/SD01/SCL/RF3
VDD	13	16	FLTA/INT0/SCK1/OCFA/RE8
EMUD2/OC2/IC2/INT2/RD1	14	15	EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0

ภาพที่ 2.26 แสดงขาการทำงานต่างๆของ dsPIC30F2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

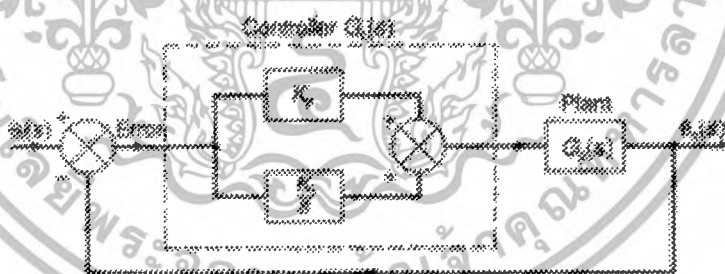
### 2.4.2.6 เครื่องมือทางฮาร์ดแวร์สำหรับพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC

ในการพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบชิปเดี่ยวนั้น ต้องใช้เครื่องมือร่วมกัน 2 ประเภทคือ เครื่องมือทางซอฟต์แวร์และทางฮาร์ดแวร์ โดยเครื่องมือทางซอฟต์แวร์ประกอบด้วย เท็กซ์เอดิเตอร์ (text editor) สำหรับเขียนโปรแกรม , ตัวแปลโปรแกรมเป็นภาษาเครื่อง หากแปลจากภาษาสูง (เบสิก หรือ ซี) เป็นภาษาแอสเซมบลีจะเรียกว่าคอมไพเลอร์ (compiler) ส่วนตัวแปลภาษาแอสเซมบลีเป็นภาษาเครื่องเพื่อเขียนลงในหน่วยความจำโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์จะเรียกว่า แอสเซมเบลอร์ (assembler) นอกจากนี้อาจมีโปรแกรมจำลองการทำงานหรือซิมูเลเตอร์ (simulator) เพื่อทดสอบการทำงานบนคอมพิวเตอร์มาช่วยด้วยก็ได้

ทางด้านเครื่องมือทางฮาร์ดแวร์หลักๆประกอบด้วย เครื่องโปรแกรม (programmer) ใช้เขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำโปรแกรม มิมูเลเตอร์ (emulator) หรือตัวเลียนแบบการทำงานและดีบักเกอร์ (debugger) หรือบอร์ดตรวจสอบการทำงาน

## 2.5 การควบคุมแบบ PI Control

การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional plus integral Control) การที่ระบบควบคุมมีความเสถียรสัมพัทธ์ลดลง เมื่อใช้การควบคุมแบบปริพันธ์สามารถที่จะแก้ไขได้ในระดับหนึ่งโดยการใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์ (Proportional plus Integral, PI) ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมจะเป็นตามภาพที่ 2.27

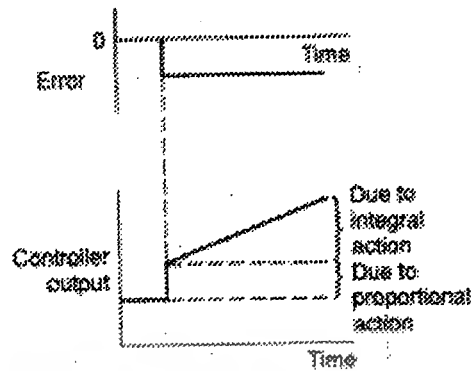


ภาพที่ 2.27 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย Proportional plus Integral

สำหรับระบบดังกล่าวจะมีเอาต์พุทของคอนโทรลเลอร์เป็น

$$output = K_p e + K_i \int_0^t e dt \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.28 การตอบสนองของ PI controller

ภาพที่ 2.28 แสดงเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับเมื่อมีอินพุตเป็นสัญญาณความผิดพลาดแบบ step ถ้าเราเปลี่ยนรูปลาปลาซ เราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์แบบ PI เป็น

$$\begin{aligned}
 G_0(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} \\
 &= \frac{sK_p + K_i}{s} \\
 &= K_p \left( \frac{s + K/K_i}{s} \right)
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

เราให้ integral time constant  $\tau_i$  เป็น

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i} \tag{2.31}$$

ดังนั้นเราจะได้

$$G_c(s) = \frac{K_p \left[ s + \left( \frac{1}{\tau_i} \right) \right]}{s} \tag{2.32}$$

และจะทำให้เราได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น

$$\begin{aligned}
 G_0(s) &= G_c(s)G_p(s) \\
 &= \frac{K_p \left[ s + \left( \frac{1}{\tau_i} \right) G_p(s) \right]}{s}
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

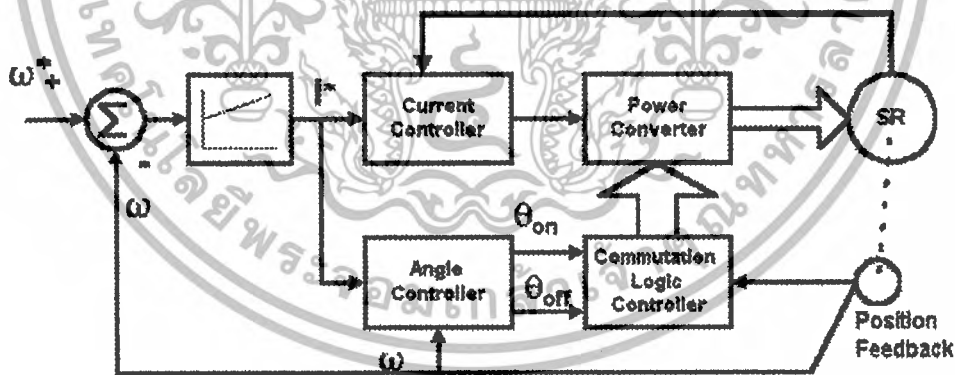
จะเห็นว่ามีศูนย์ที่  $s = -\frac{1}{\tau_i}$  และโพลที่  $S=0$  เพิ่มให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อทำการควบคุมแบบ PI การที่เราเพิ่มตัวประกอบ S เข้ากับเทอมส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนก็เสมือนกับว่าเพิ่มแบบของระบบขึ้นไป 1 จึงทำให้ระบบนี้จะไม่มีความผิดพลาดที่สภาพคงตัวสำหรับอินพุทแบบขั้นบันได นอกจากนั้นการที่เราเพิ่มศูนย์ให้กับระบบไปพร้อม ๆ กัน ก็จะทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล n และจำนวนศูนย์ m มีค่าคงที่ ดังนั้นมุมของ asymptote สำหรับทางเดินของรากมีค่าคงเดิม

อย่างไรก็ตามจุดตัดของเส้น asymptotes บนแกนจริง จะเคลื่อนที่เข้าหาจุดกำเนิดมากขึ้น ยังผลให้ความเสถียรของระบบลดลงบ้าง

$$\text{intersection/point} = (\text{ผลรวมของโพล} - \text{ผลรวมของศูนย์}) / (n - m) \tag{2.34}$$

การเพิ่มโพลที่  $S=0$  และศูนย์ที่  $s = -\frac{1}{\tau_i}$  จะทำให้จุดตัดเปลี่ยนไปเท่ากับ  $\pm \frac{(1/\tau_i)}{(n-m)}$  ซึ่ง

จะทำให้มีค่าเป็นบวกมากขึ้น และจุดตัดจะเคลื่อนที่มาทางขวามือเข้าใกล้จุดกำเนิดมากขึ้น อย่างไรก็ตามการลดลงของความเสถียรสัมพัทธ์นี้จะน้อยกว่าการที่เราใช้การควบคุมแบบปริพันธ์เพียงอย่างเดียว ค่าของ  $K_p$  และ  $K_i$  จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดตำแหน่งของศูนย์และโพลของระบบ โดยตำแหน่งของศูนย์จะกำหนดด้วยค่า  $K_i$  ในขณะที่  $K_p$  จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดโพลระบบปิด

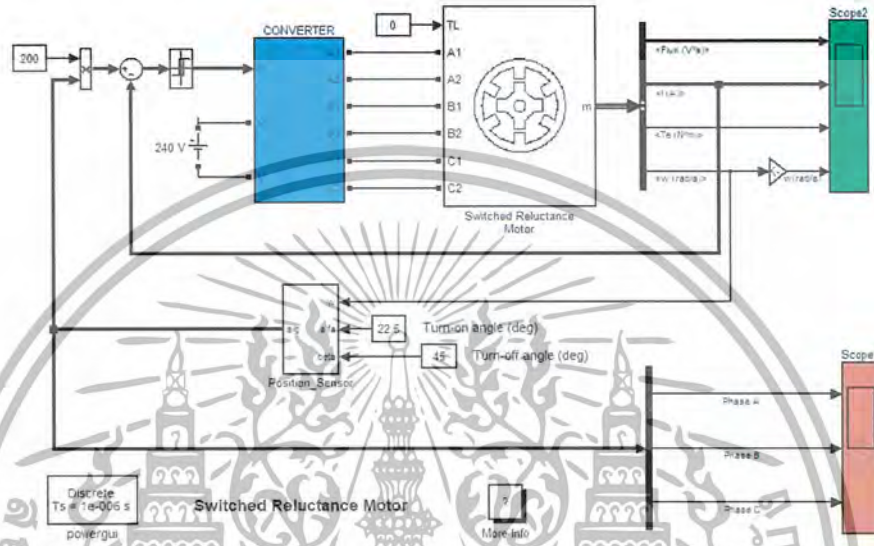


ภาพที่ 2.29 Block diagram current control การขับมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

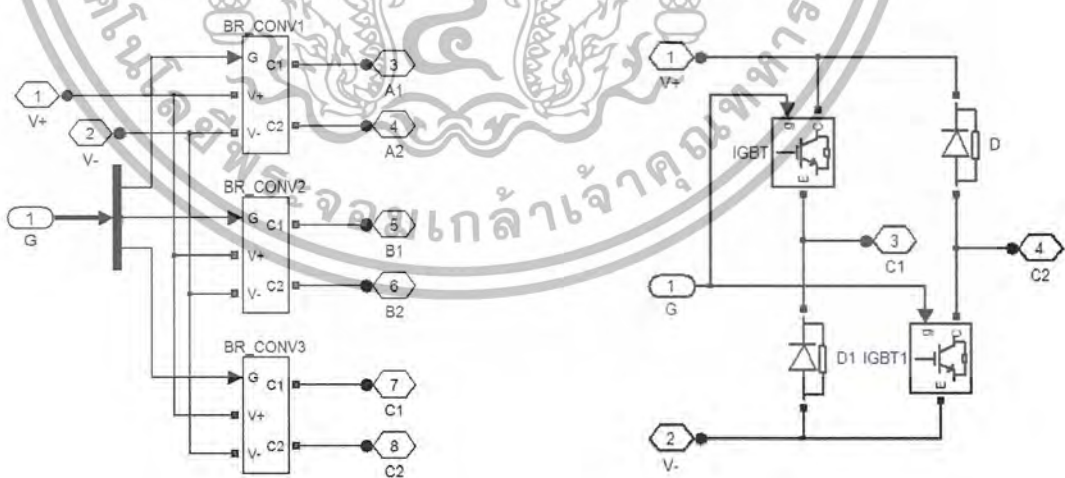
### บทที่ 3

## การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการออกแบบ

ในบทนี้จะทำการกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ โดยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab

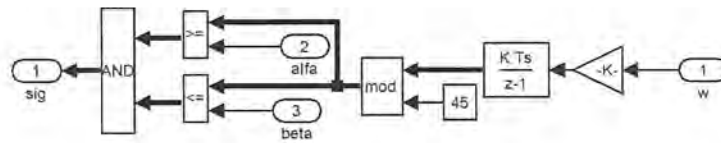


ภาพที่ 3.1 แสดงวงจรจำลองการทำงานของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์



ภาพที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของ convector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

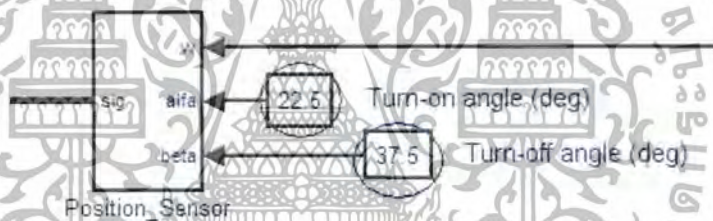


ภาพที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของ Position sensor

3.1 การจำลองการทำงานของมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ โดยทดสอบที่มุมที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณ 15 องศา

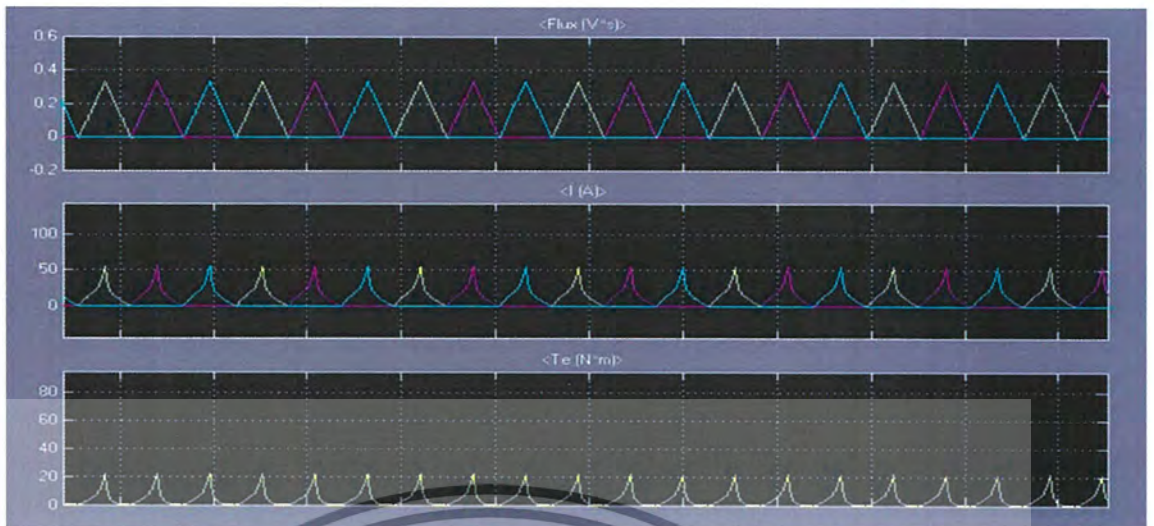
3.1.1 ทิศทางตามเข็มนาฬิกา

โดยกำหนดมุมที่ Position sensor มีค่ามุม Turn-on angle (deg) ที่ 22.5 องศาและมุม Turn-off angle (deg) ที่ 37.5 องศา



ภาพที่ 3.4 แสดงการกำหนดมุมของ Position sensor (15 องศาตามเข็มนาฬิกา)

จากการจำลองจะพบว่าเมื่อได้รับสัญญาณจาก Position sensor จะเกิดการจ่ายกระแสขึ้นในเฟสที่มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดค่าฟลักซ์เพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง Aligned จากนั้นจะหยุดจ่ายกระแส และเปลี่ยนไปจ่ายกระแสในเฟสถัดไปตามลำดับ ส่วนค่าแรงบิดจะได้ดังรูปที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 แสดงค่าฟลักซ์ กระแส และแรงบิดที่ได้จากการจำลอง

เมื่อขั้วยื่นของสเตเตอร์และโรเตอร์เริ่มมีการซ้อนทับกัน sensor ของเฟสนั้นก็ทำการสร้างสัญญาณเป็น unit step ซึ่งจะเกิดขึ้นเพียง 15 องศาของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของเฟสนั้น ซึ่งสัญญาณจาก Position sensor ของแต่ละเฟสจะต่อเนื่องกันพอดี เพราะโครงสร้างของโรเตอร์นั้นมีขนาดมุมของขั้วยื่น 15 องศา สัญญาณที่ได้จะถูกส่งไปยัง converter เพื่อให้จ่ายกระแสของเฟสนั้น ๆ ตามลำดับ A-B-C-A-B-C-A...

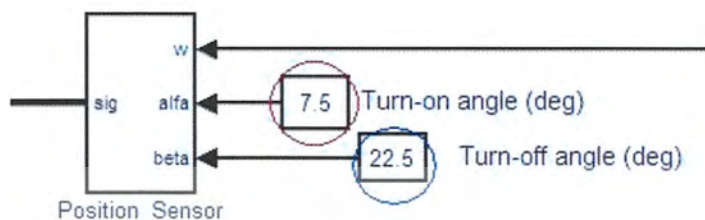


ภาพที่ 3.6 แสดงสัญญาณที่ได้จาก Position sensor ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

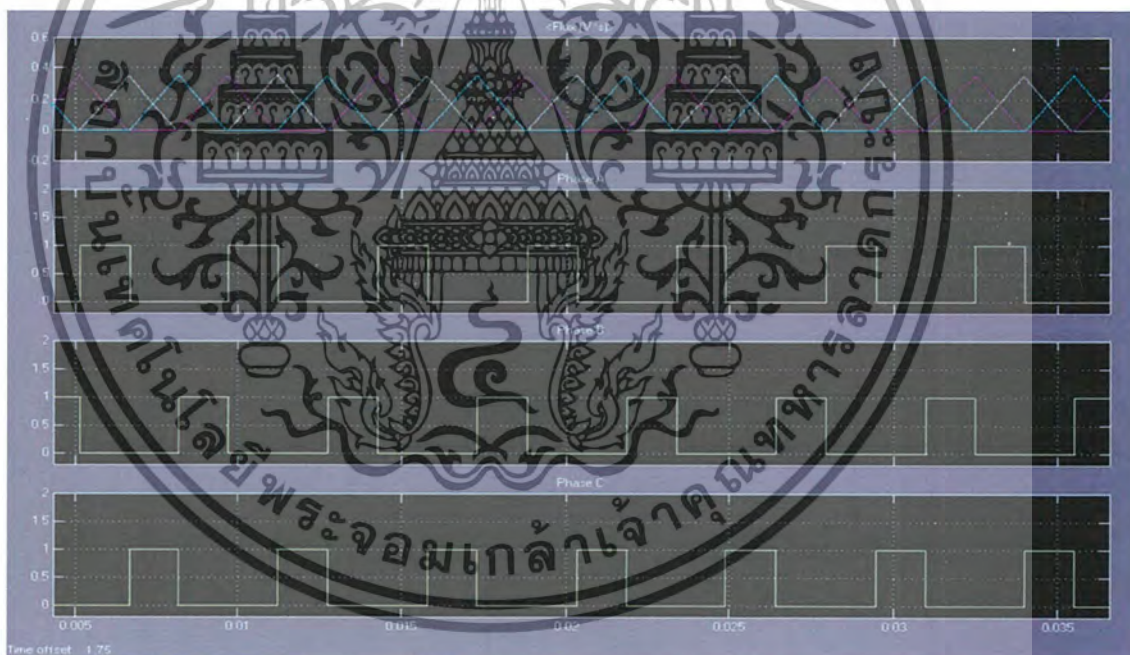
### 3.1.2 ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

โดยกำหนดมุมที่ Position sensor มีค่ามุม Turn-on angle (deg) ที่ 7.5 องศาและมุม Turn-off angle (deg) ที่ 22.5 องศา



ภาพที่ 3.7 แสดงการกำหนดมุมของ Position sensor (15 องศาทวนเข็มนาฬิกา)

ลักษณะของสัญญาณที่ได้จะคล้ายกับการหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาแต่ลำดับในการจ่ายกระแสในแต่ละเฟสจะเป็น C-B-A-C-B-A-C... ตามลำดับ



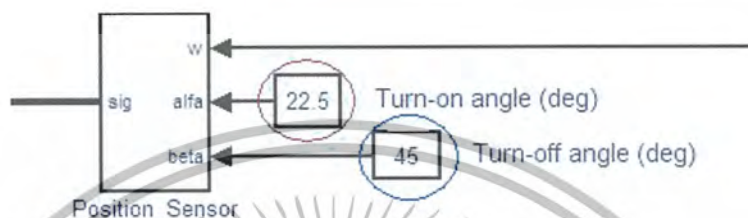
ภาพที่ 3.8 แสดงสัญญาณที่ได้จาก Position sensor ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การจำลองการทำงานของมอเตอร์สวิตช์รีล็กแทนซ์ โดยทดสอบมุมที่ใช้ในการกำหนดสัญญาณที่ 22.5 องศา

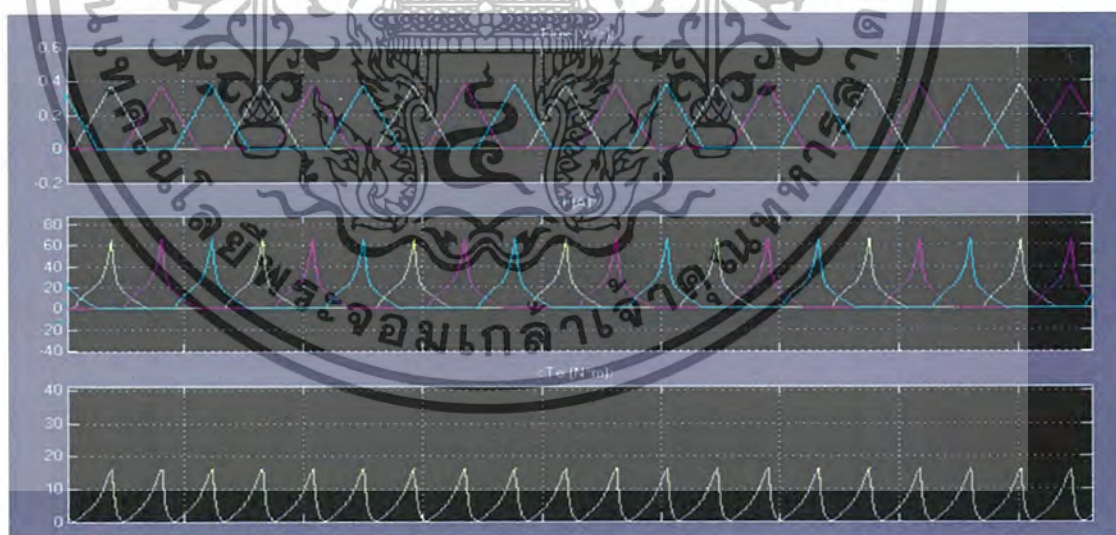
#### 3.2.1 ทิศทางตามเข็มนาฬิกา

โดยกำหนดมุมที่ Position sensor มีค่ามุม Turn-on angle (deg) ที่ 22.5 องศาและมุม Turn-off angle (deg) ที่ 45 องศา



ภาพที่ 3.9 แสดงการกำหนดมุมของ Position sensor (22.5 องศาตามเข็มนาฬิกา)

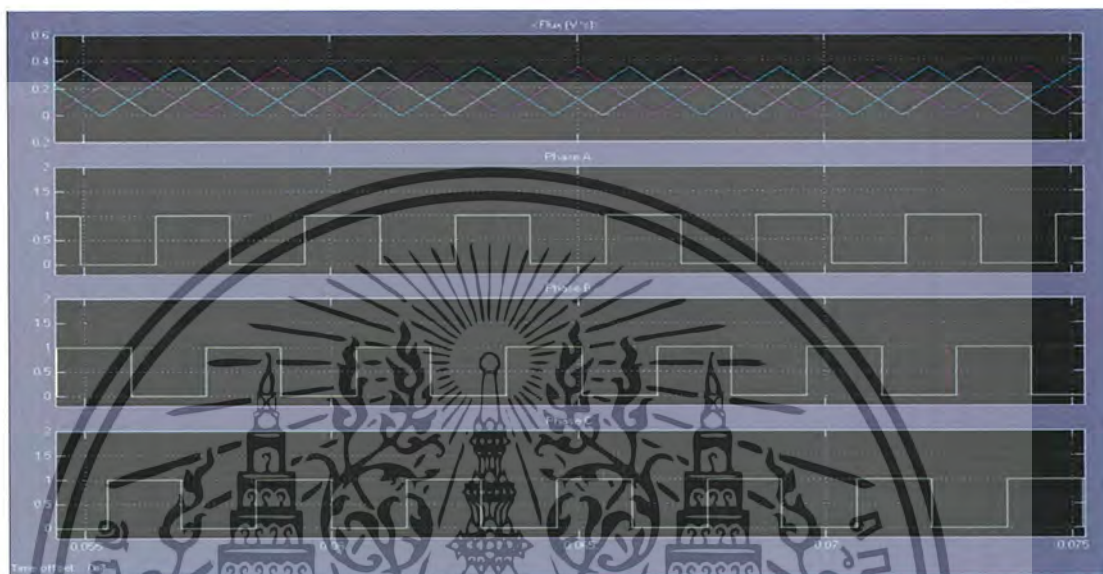
จากการจำลองจะพบว่าเมื่อได้รับสัญญาณจาก Position sensor จะเกิดการจ่ายกระแสขึ้นในเฟสที่มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดค่าฟลักซ์เพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง Aligned จากนั้นจะหยุดจ่ายกระแส และเปลี่ยนไปจ่ายกระแสในเฟสถัดไปตามลำดับ ส่วนค่าแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสในแต่ละเฟส จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แสดงค่าฟลักซ์ กระแส และแรงบิดที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

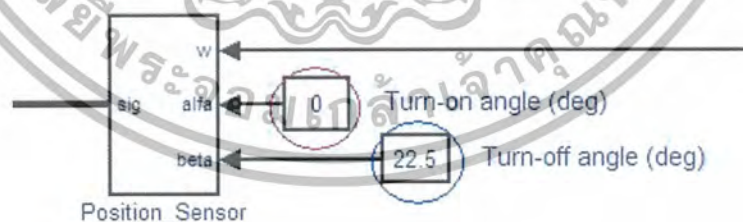
เมื่อขั้วยื่นของสเตเตอร์และโรเตอร์เริ่มมีการซ้อนทับกัน sensor ของเฟสนั้นก็ทำการสร้างสัญญาณเป็น unit step ซึ่งจะเกิดขึ้นเพียง 22.5 องศาของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของเฟสนั้น ซึ่งสัญญาณจาก Position sensor ของแต่ละเฟสจะซ้อนทับกันเป็นมุม 7.5 องศา (โครงสร้างของโรเตอร์นั้นมีขนาดมุมของขั้วยื่น 15 องศา) สัญญาณที่ได้จะถูกส่งไปยัง converter เพื่อให้จ่ายกระแสของเฟสนั้น ๆ ตามลำดับ A-B-C-A-B-C-A...



ภาพที่ 3.11 แสดงสัญญาณที่ได้จาก Position sensor ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

### 3.2 ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

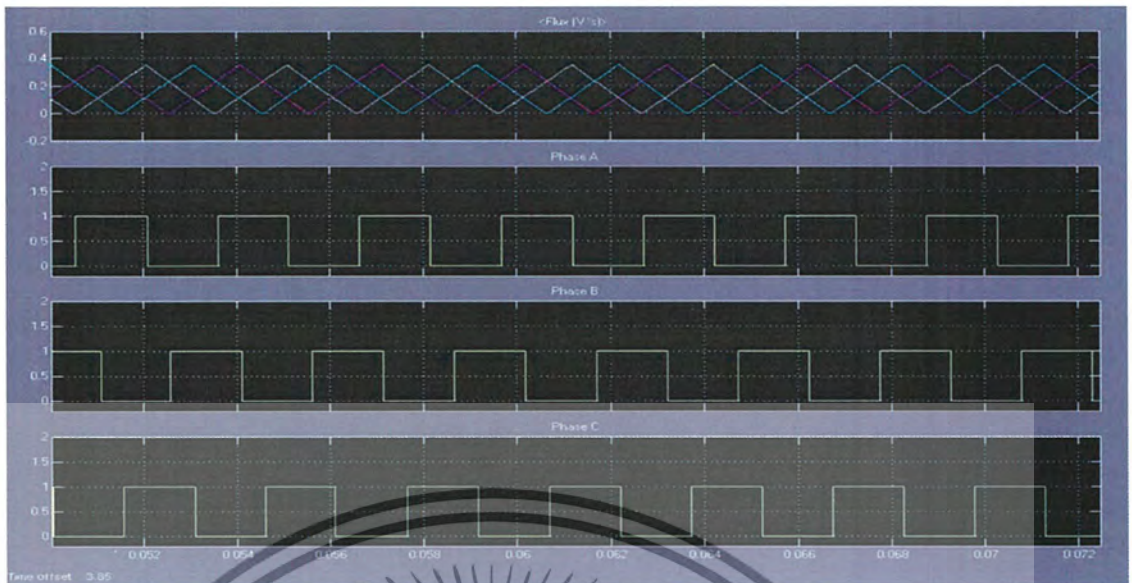
โดยกำหนดมุมที่ Position sensor มีค่ามุม Turn-on angle (deg) ที่ 0 องศาและมุม Turn-off angle (deg) ที่ 22.5 องศา



ภาพที่ 3.12 แสดงการกำหนดมุมของ Position sensor (22.5 องศาทวนเข็มนาฬิกา)

ลักษณะของสัญญาณที่ได้จะคล้ายกับการหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาแต่ลำดับในการจ่ายกระแสในแต่ละเฟสจะเป็น C-B-A-C-B-A-C... ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.13 แสดงสัญญาณที่ได้จาก Position sensor ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

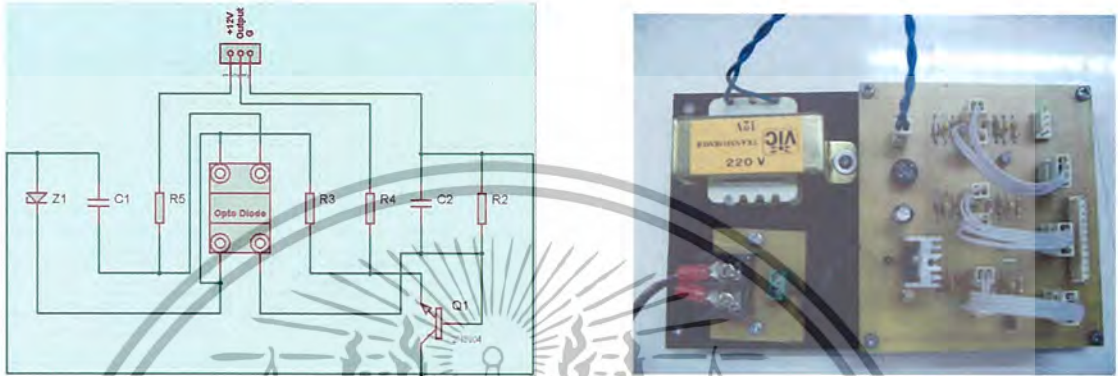


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 แบบวงจรของส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ

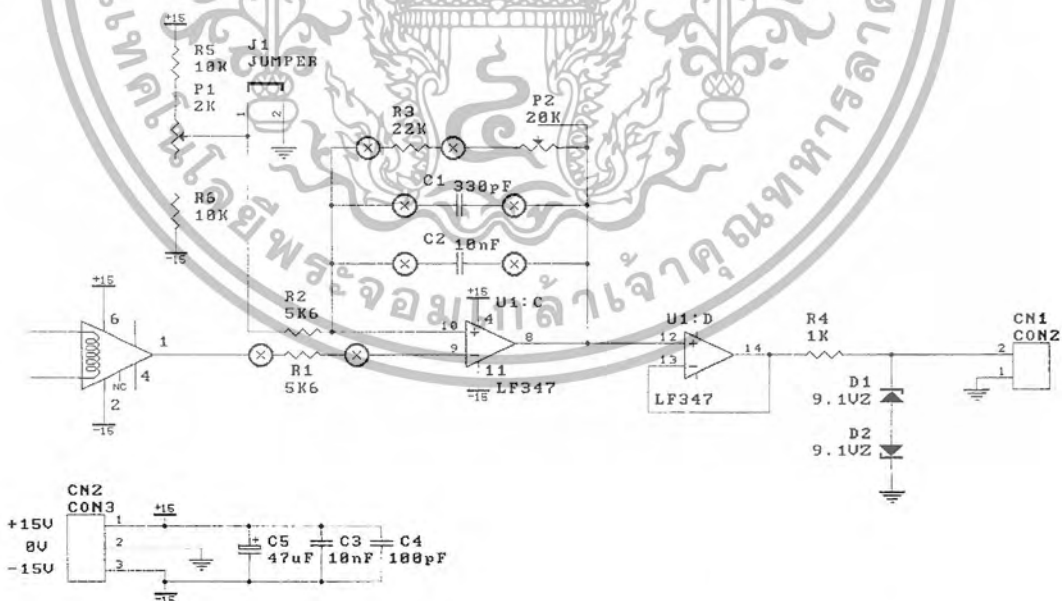
ในโครงการการขับมอเตอร์สวิตช์รีลักเตนซ์นี้จะมีการนำอุปกรณ์มาทำงานร่วมกันซึ่งสามารถแยกเป็นส่วนย่อยได้ดังนี้ ส่วนของตัวมอเตอร์ วงจรขับ วงจรตรวจจับตำแหน่งและวงจรตรวจวัดกระแส

#### 3.3.1 วงจรตรวจจับตำแหน่ง



ภาพที่ 3.14 แบบวงจรตรวจจับตำแหน่ง

#### 3.3.2 วงจรตรวจวัดกระแส



ภาพที่ 3.15 แบบวงจรตรวจวัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

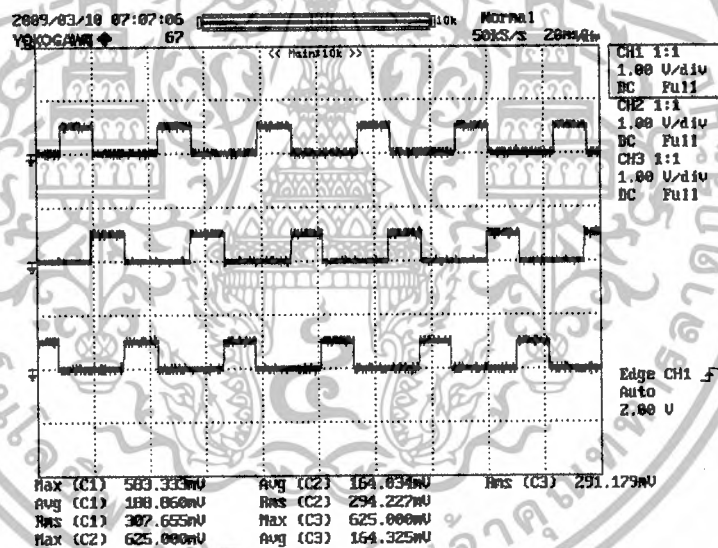
### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะทำการกล่าวถึงการทดลองการทำงานต่าง ๆ ของวงจรในส่วนต่าง ๆ พร้อมทั้งบันทึกผลสัญญาณที่ได้จากการทดลองต่าง ๆ

#### 4.1 การทดลองที่ 1 การตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ด้วยวงจร Position sensor

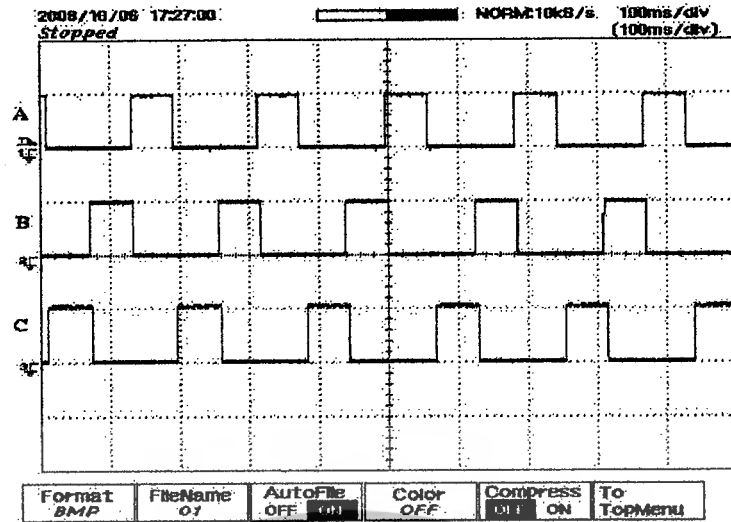
การทดลองนี้เป็นการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์โดยอาศัยวงจร Position sensor เป็นตัวบอกว่าในขณะนี้ขั้วโรเตอร์อยู่ ณ ตำแหน่งใดเมื่อเทียบกับขั้วของสเตเตอร์ ซึ่งนั่นหมายถึงการที่จะต้องป้อนพลังงานให้กับขดลวดเฟสนั้น ๆ โดยการตรวจจับจะใช้แผ่นตัดแสงจาก Optodiode ทำให้เกิดลักษณะเป็นพัลส์ของทั้ง 3 เฟสขึ้น

ผลการทดลองที่ 1.1 สัญญาณที่ได้จาก Position sensor โดยมีมุมในการตัดแสง 15 องศา



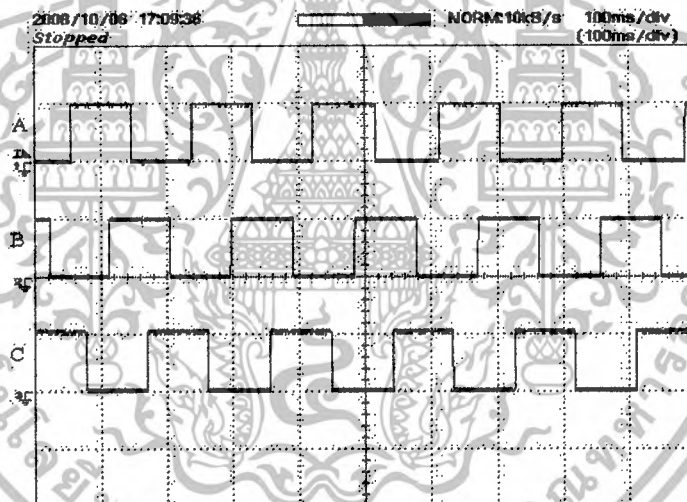
ภาพที่ 4.1 แสดงสัญญาณเฟส A,B,C ในทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



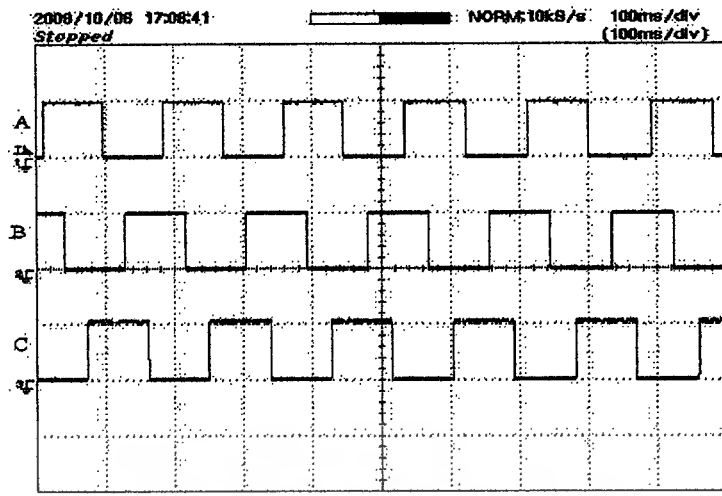
ภาพที่ 4.2 แสดงสัญญาณเฟส A,B,C ในทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ผลการทดลองที่ 1.2 สัญญาณที่ได้จาก Position sensor โดยมีมุมในการตัดแสง 22.5 องศา



ภาพที่ 4.3 แสดงสัญญาณเฟส A,B,C ในทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 แสดงสัญญาณเฟส A,B,C ในทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกา

#### 4.2 การทดลองที่ 2 การสร้างสัญญาณอินพุตเพื่อนำไปขับเกตมอสเฟสกำลัง โดยอาศัย การกำเนิดสัญญาณจากการประมวลผลของ dsPIC 30F2010

การทดลองนี้สัญญาณที่ออกจากตัว dsPIC 30F2010 เพื่อนำไปเป็นอินพุตสำหรับขับ เกตนั้นมาจากการเปรียบเทียบปริมาณกระแสที่ตั้งไว้กับกระแสที่ป้อนกลับมาโดยเกิดจากส่วน ของโปรแกรมภายใน โดยถ้ากระแสถึงระดับที่ตั้งไว้แล้วจะส่งผลให้ สวิตช์ตัวที่ 2 ของวงจรขับ เกิดการล๊อปสัญญาณในขณะที่ตัวที่ 1 จะไม่เกิดการล๊อปของสัญญาณเป็นการรักษาระดับของ กระแสไว้

โดยเราจะแยกสัญญาณการทำงานออกเป็นเฟสต่าง ๆ 3 เฟส ได้แก่ เฟส A เฟส B และเฟส C ซึ่งแต่ละเฟสจะได้รับสัญญาณอินพุตมาจาก Port ขาสัญญาณต่าง ๆ ดังนี้

##### หมุนตามเข็มนาฬิกา

เฟส A ได้รับสัญญาณจาก PWM1L/RE0 และ PWM1H/RE1

เฟส B ได้รับสัญญาณจาก PWM2L/RE2 และ PWM2H/RE3

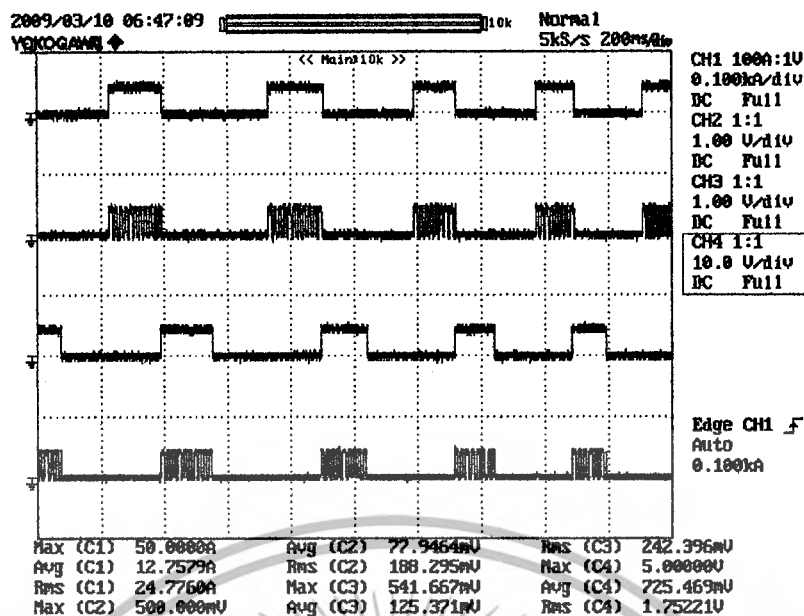
เฟส C ได้รับสัญญาณจาก PWM3L/RE4 และ PWM3H/RE5

##### หมุนทวนเข็มนาฬิกา

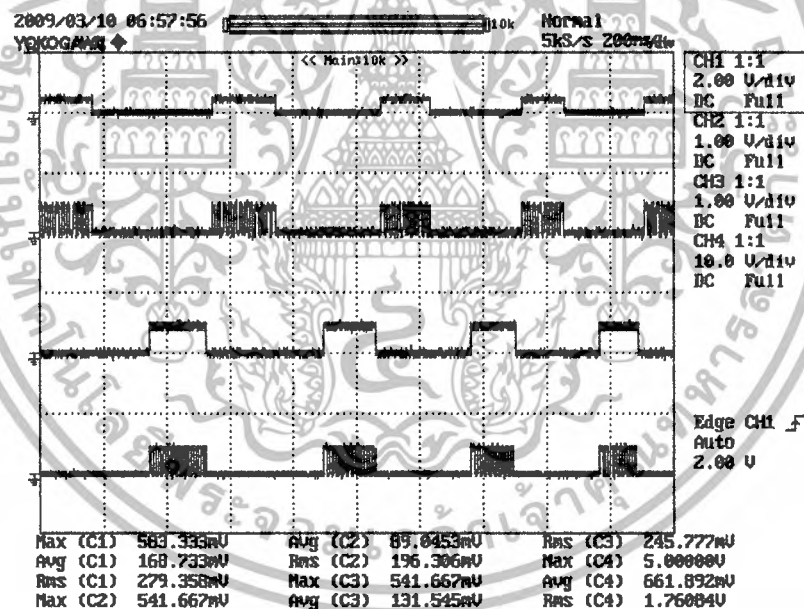
เฟส A ได้รับสัญญาณจาก PWM1L/RE4 และ PWM1H/RE5

เฟส B ได้รับสัญญาณจาก PWM2L/RE0 และ PWM2H/RE1

เฟส C ได้รับสัญญาณจาก PWM3L/RE2 และ PWM3H/RE3

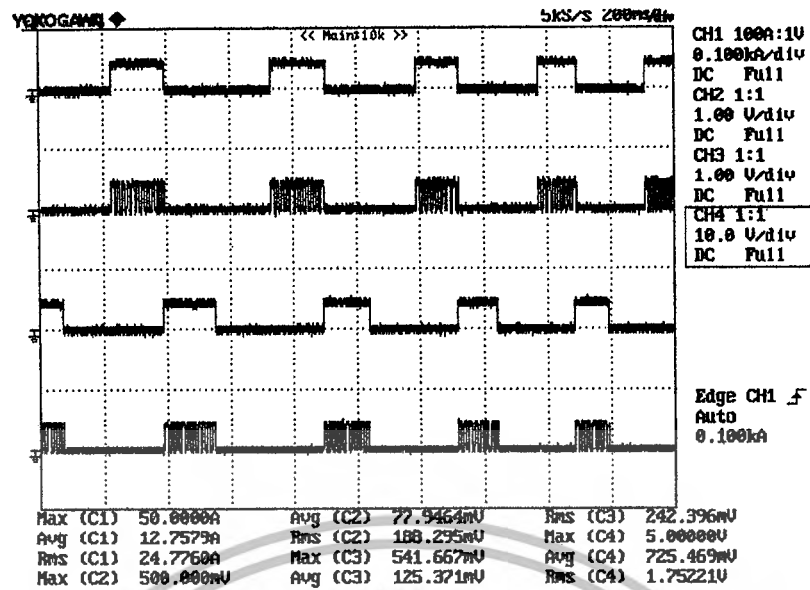


ภาพที่ 4.5 สัญญาณอินพุตขั้วเบตมอสเฟสกำลังของเฟส A เปรียบเทียบกับเฟส B  
(ความเร็ว 50 rpm)



ภาพที่ 4.6 สัญญาณอินพุตขั้วเบตมอสเฟสกำลังของเฟส A เปรียบเทียบกับเฟส C  
(ความเร็ว 50 rpm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



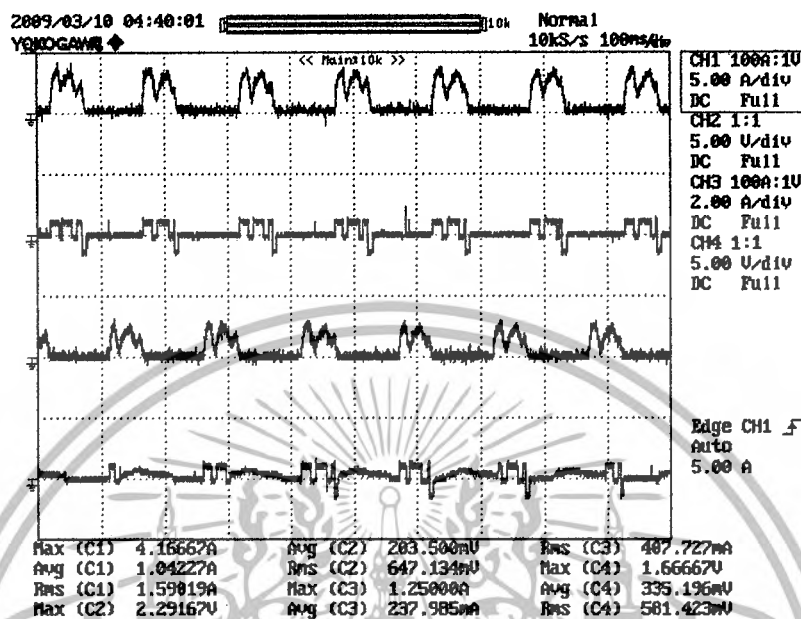
ภาพที่ 4.7 สัญญาณอินพุตขับเกตมอสเฟสกำลังของเฟส B เปรียบเทียบกับเฟส C  
(ความเร็ว 50 rpm)

#### 4.3 การทดลองที่ 3 การทำงานร่วมกันของวงจร Asymmetric half-bridge converter วงจร Position sensor และวงจร Current sensor

การทดลองนี้เป็นการทำงานของทุ กวงจรร่วมกันเพื่อทำการขับสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ ซึ่งจะเป็นการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบปิดของกระแส กล่าวคือการนำกระแสที่ป้อนกลับมา นำมาเปรียบเทียบกับกระแสที่เราได้ทำการปรับตั้งไว้ ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังนี้

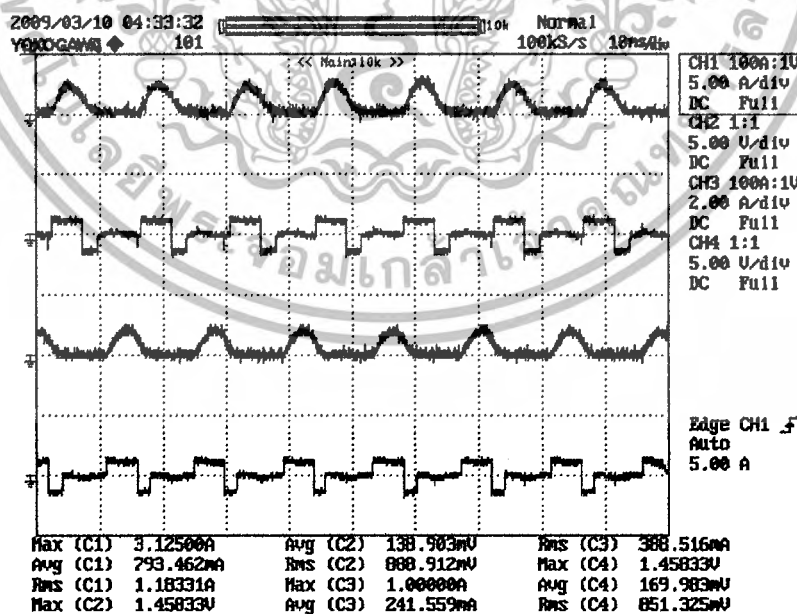
หมุนตามเข็มนาฬิกา

ผลการทดลองที่ 3.1 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส B



ภาพที่ 4.8 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส B (ความเร็ว 50 rpm)

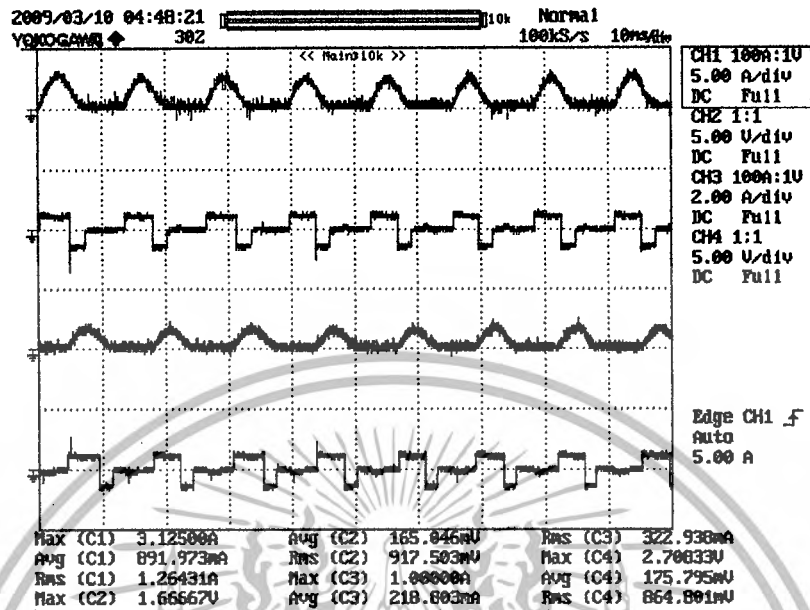
ผลการทดลองที่ 3.2 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส C



ภาพที่ 4.9 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส C (ความเร็ว 50 rpm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

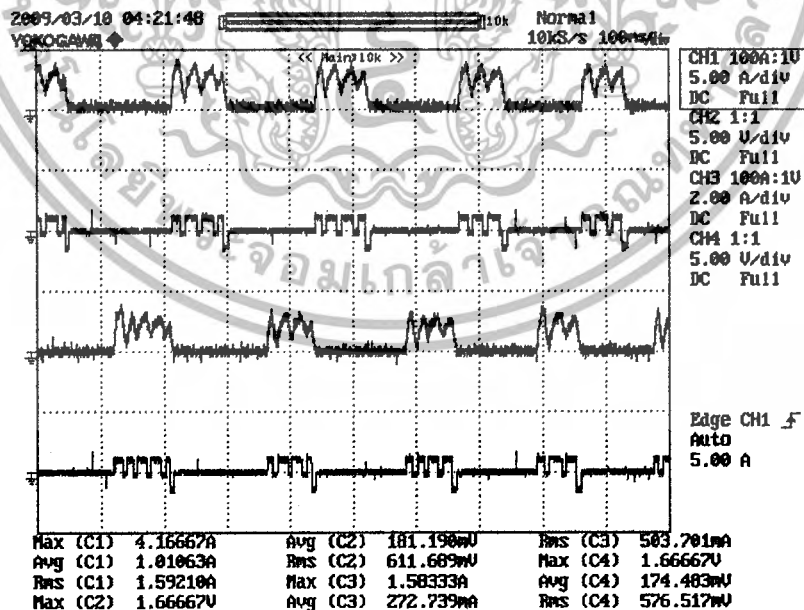
ผลการทดลองที่ 3.3 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส B เปรียบเทียบกับเฟส C



ภาพที่ 4.10 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส B เปรียบเทียบกับเฟส C (ความเร็ว 500 rpm)

หมუნทวนเข็มนาฬิกา

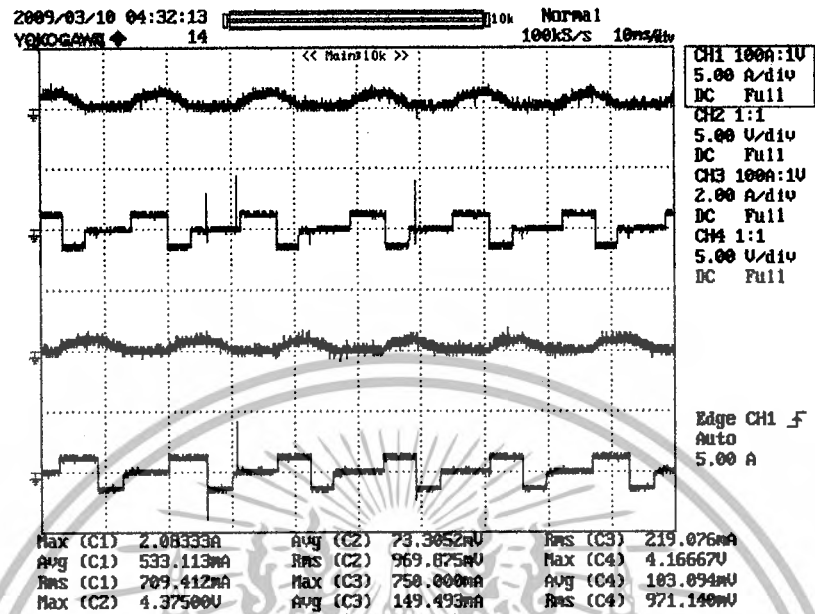
ผลการทดลองที่ 3.4 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส B



ภาพที่ 4.11 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส B (ความเร็ว 50 rpm)

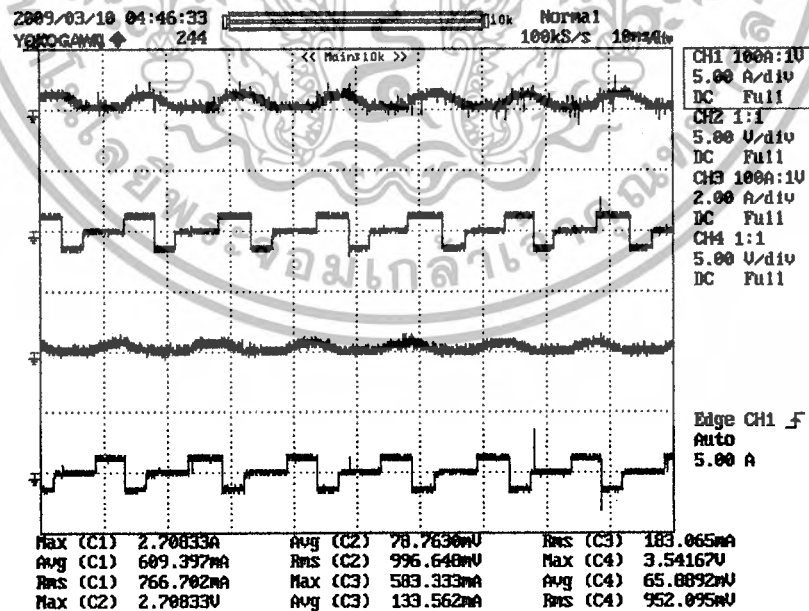
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 3.5 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส C



ภาพที่ 4.12 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส A เปรียบเทียบกับเฟส C (ความเร็ว 500 rpm)

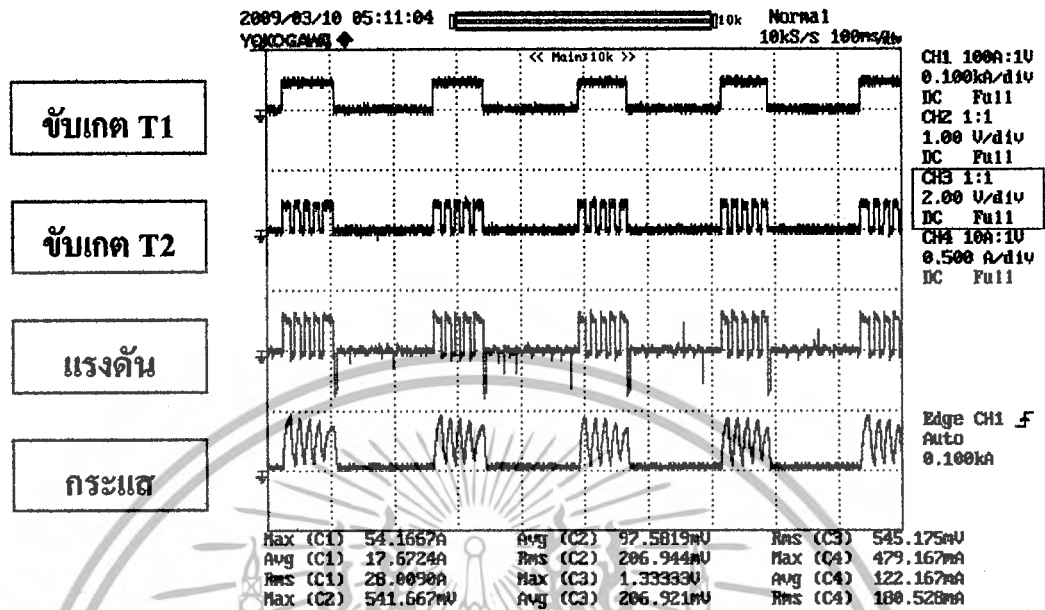
ผลการทดลองที่ 3.6 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส B เปรียบเทียบกับเฟส C



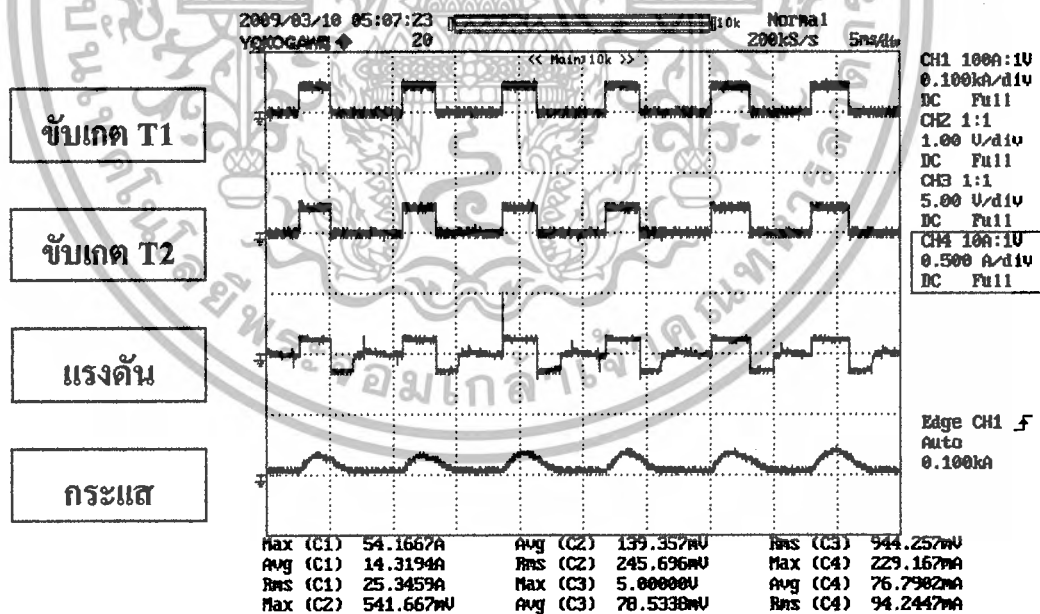
ภาพที่ 4.13 สัญญาณกระแสและแรงดันที่จ่ายเข้าที่มอเตอร์เฟส B เปรียบเทียบกับเฟส C (ความเร็ว 500 rpm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 4.14 แสดงสัญญาณขั้วเกิดของสวิตช์ T1, T2, แรงดันและกระแสที่ความเร็วต่ำ (ความเร็ว 50 rpm)



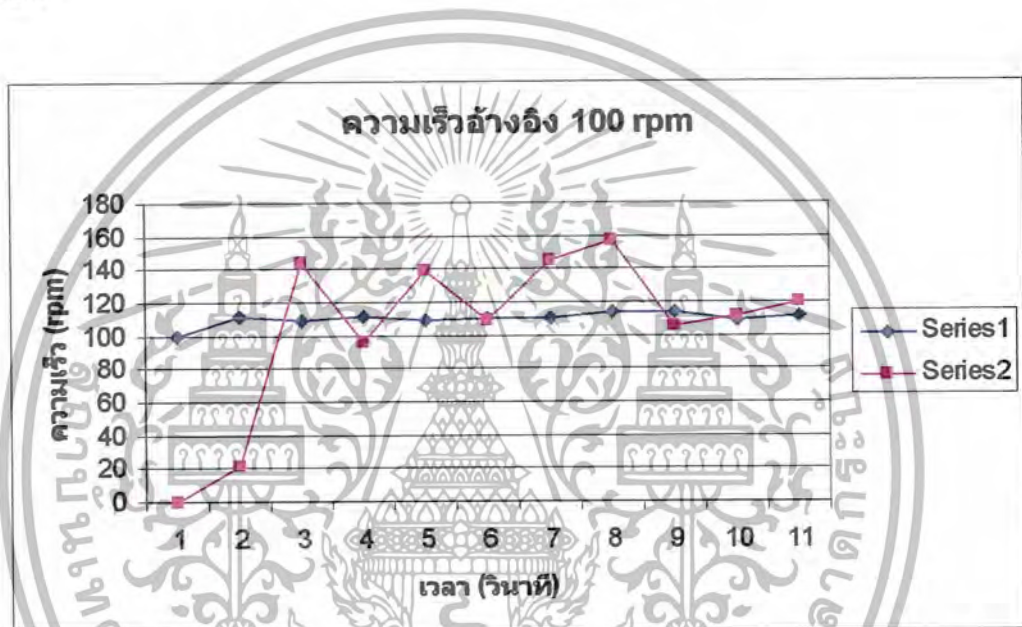
ภาพที่ 4.15 แสดงสัญญาณขั้วเกิดของสวิตช์ T1, T2, แรงดันและกระแสที่ความเร็วสูง (ความเร็ว 500 rpm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การทดลองที่ 4 การรักษาระดับความเร็วของมอเตอร์ให้มีเสถียรภาพ

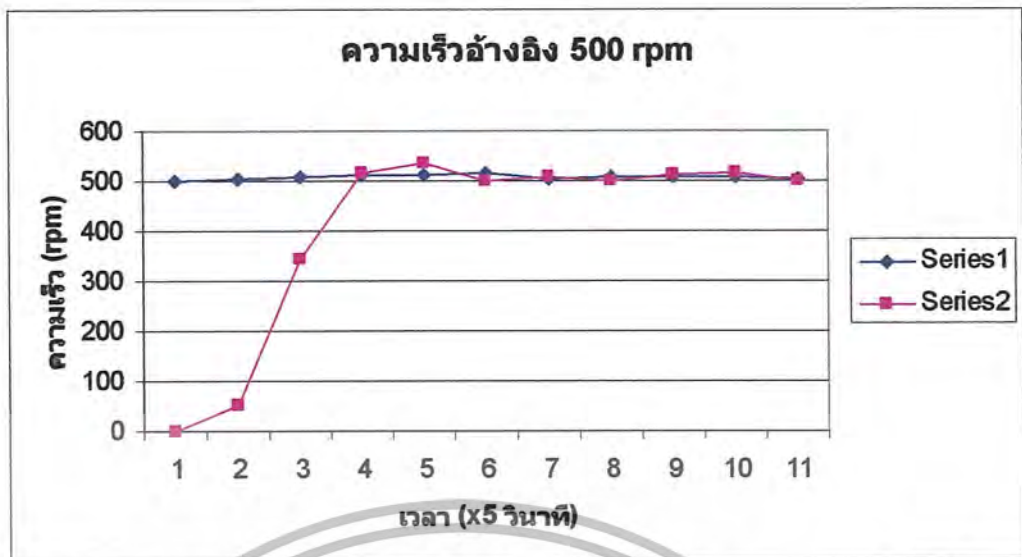
##### การหมุนตามเข็มนาฬิกา

จากการทดลองวัดค่าความเร็วรอบที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าความเร็วรอบที่ตั้งไว้ของการหมุนตามเข็มนาฬิกาจะเห็นได้ว่า จากกราฟเมื่อเริ่มต้นการทำงานความเร็วรอบจะค่อย ๆ เพิ่มมากขึ้นไปจนถึงระดับความเร็วรอบที่ตั้งไว้และเกิด Over shoot ขึ้นจากนั้นความเร็วจะลดลงและพยายาลู่เข้าสู่ค่าความเร็วรอบที่ตั้งไว้ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยน sequence ในการกระตุ้นขดลวด โดยในการทดลองจะทำการวัดความเร็วรอบที่แตกต่างกันทั้งความเร็วรอบต่ำ (100 rpm) ความเร็วรอบปานกลาง (500 rpm) และความเร็วรอบสูง (1000 rpm) ซึ่งจะแสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้

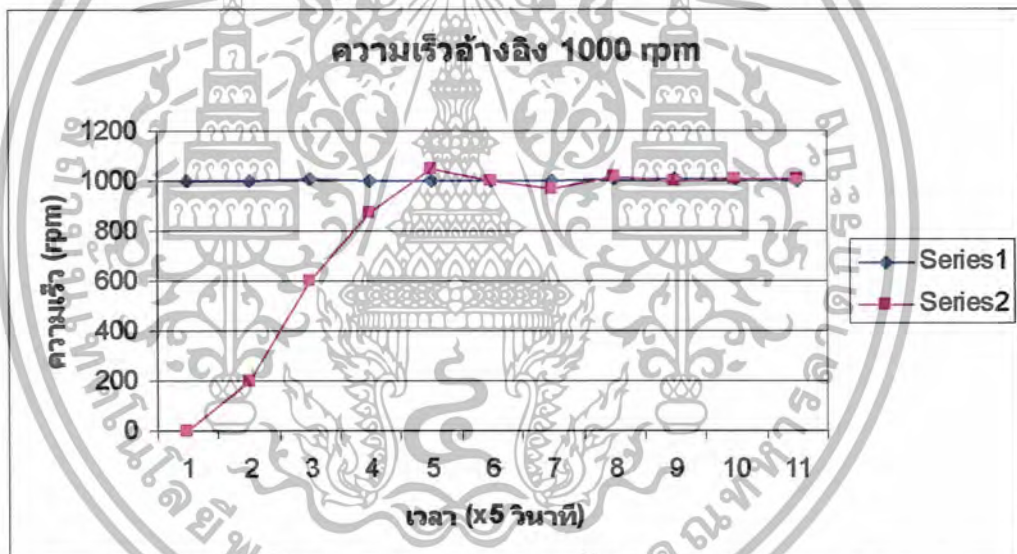


ภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้ ที่ความเร็ว 100 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้ ที่ความเร็ว 500 rpm

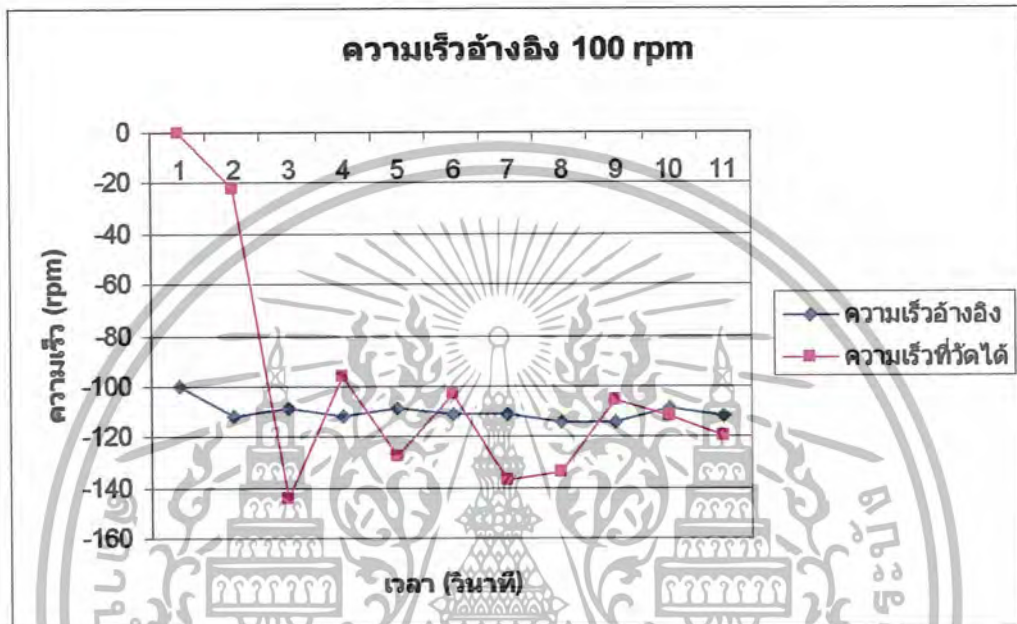


ภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้ ที่ความเร็ว 1000 rpm

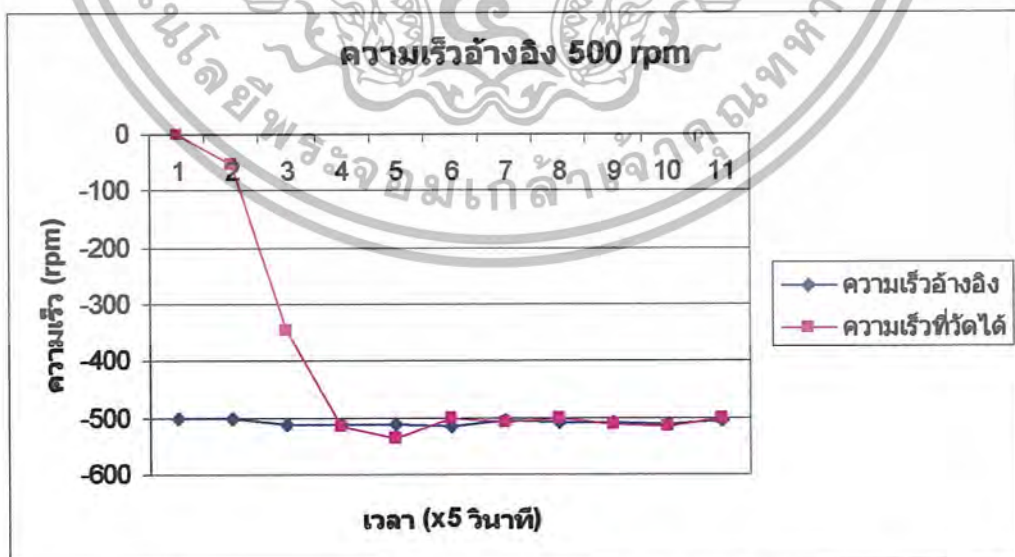
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การหมุนทวนเข็มนาฬิกา

จากการทดลองวัดค่าความเร็วรอบในทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะคล้ายกับการหมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความความเร็วรอบต่ำ (100 rpm) ความเร็วรอบปานกลาง (500 rpm) และความเร็วรอบสูง (1000 rpm) แต่ค่าความเร็วรอบที่วัดได้จะเป็นค่าที่ติดลบเนื่องจากการหมุนกลับทิศ ซึ่งแสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้

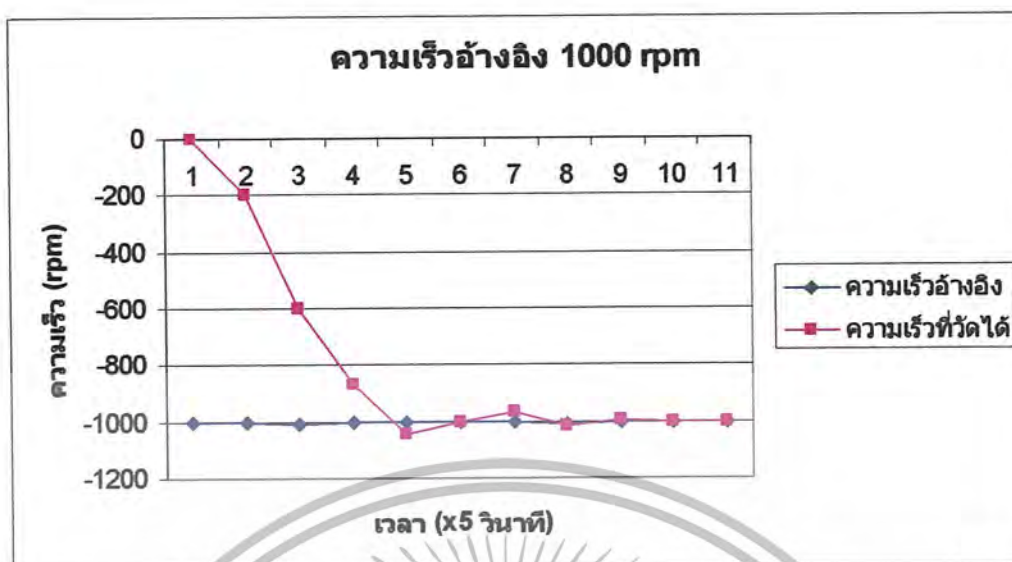


ภาพที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้ ที่ความเร็ว 100 rpm



ภาพที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้ ที่ความเร็ว 500 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอ้างอิงกับการความเร็วที่วัดได้  
ที่ความเร็ว 1000 rpm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลของโครงการ

โครงการนี้เป็นการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ 3 เฟสแบบ 12/8 ด้วยวงจระขั้วมเมตริกซ์ฮาร์ฟบริดคอนเวอร์เตอร์ ในส่วนของโครงการจะแบ่งย่อยออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์โดยส่วนของฮาร์ดแวร์ได้ทำการจัดสร้างวงจรตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์และวงจรตรวจวัดกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดของมอเตอร์ เพื่อใช้ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์และวัดค่ากระแส ตามลำดับ โดยกระแสที่วัดได้จะใช้ในการป้อนกลับเพื่อนำไปเทียบกับค่ากระแสอ้างอิงที่เราได้ตั้งค่าไว้ ซึ่งจะส่งผลต่อการสร้างสัญญาณขั้วเบตตามลำดับ ในส่วนของซอฟต์แวร์ ได้ทำการโปรแกรมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC 30F2010 ซึ่งใช้เป็นตัวประมวลผล

ในการทดลองเมื่อนำส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์มาทำงานร่วมกัน โดยโปรแกรมที่ได้จะเป็นตัวควบคุมให้ระบบทำงานได้อย่างสัมพันธ์กัน ซึ่งในส่วนฮาร์ดแวร์จะมี Position sensor เป็นตัวกำหนดสัญญาณว่าควรป้อนกระแสให้เฟสใดตามลำดับเฟสที่ต้องการตามทิศทางหมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา ทำการทดสอบโดยตั้งขนาดความเร็วให้กับมอเตอร์เพื่อเป็นความเร็วอ้างอิงเพื่อให้มอเตอร์หมุนได้ตามที่ตั้งไว้ ซึ่งการควบคุมความเร็วจะใช้หลักการการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Current Control) กล่าวคือ การสั่งงานให้สวิตช์ทั้ง 2 ตัว on ทั้งคู่แต่เมื่อค่าของกระแสที่วัดได้สูงเกินค่าที่กำหนดสวิตช์ตัวที่ 2 จะ off และ on ใหม่อีกครั้งเมื่อค่ากระแสต่ำกว่าที่กำหนดในเฟสนั้น ๆ เพื่อเป็นการรักษาระดับกระแสที่ใช้ในการป้อนขดลวดเฟส ในการทดลองจะมีการเปลี่ยน sequence การกระตุ้นขดลวดเฟสเพื่อทำให้เกิดการกลับทางการหมุนของโรเตอร์ รูปคลื่นกระแสส่วนใหญ่จะเป็น Single pulse โดยเฉพาะที่ความเร็วสูง โดยในการทดลองสามารถควบคุมความเร็วรอบที่ระดับความเร็วรอบสูง (1000 rpm) ความเร็วรอบปานกลาง (500 rpm) และความเร็วรอบต่ำ (100 rpm) ทั้งการหมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยการรักษาความเร็วที่กำหนดจะอาศัยการกลับ sequence การกระตุ้นขดลวดเฟสเป็นตัวช่วยในการรักษาความเร็ว

จากการขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์แบบวงรอบปิดนี้จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันและกระแสเป็นไปตามที่ทฤษฎีที่วางไว้ ซึ่งผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง ซึ่งการที่จะควบคุมสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นจะต้องอาศัยการใช้ PI Controller เป็นตัวควบคุม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาและปรับปรุงการควบคุมกระแสและความเร็วรอบแบบวงรอบปิดโดยใช้ PI Controller ที่เหมาะสมโดยมีค่า Gain  $K_p$  และ  $K_i$  ทั้ง Loop กระแสและ Loop ความเร็วรอบที่เหมาะสม จะทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมความเร็วรอบและกระแสมีค่าดีทั้งในสภาวะพลวัต (Dynamic) และสภาวะอยู่ตัว (Steady State)
- ปรับปรุงให้การ Fix ค่า  $\theta_{on}$  และ  $\theta_{off}$  ที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ถ้าใช้ Encoder ตรวจจับตำแหน่งจะทำให้  $\theta_{on}$  และ  $\theta_{off}$  เป็นตัวแปรควบคุมเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อสภาพการหมุนของมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงมากยิ่งขึ้น และได้แรงบิดสูงขึ้นด้วย
- พัฒนาระบบให้ทำงานกับ DC-Link Voltage ที่มีค่าสูงขึ้น เช่น (170 V) มอเตอร์จะทำงานที่ความเร็วรอบได้สูงมากกว่านี้ (11000 rpm)
- ควรปรับปรุงระบบ SRM Drive ให้มีการควบคุมแรงบิด (Torque Control) เพื่อให้ SRM มีคุณภาพการควบคุมแบบเซอร์โว (Servo Grid Control)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา , มอเตอร์สวิตซ์รีลักแทนซ์: ทฤษฎีและการออกแบบ ,  
แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,  
เมษายน 2550
- [2] รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราธิ์เรษฐ , อิเล็กทรอนิกส์กำลัง , คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 4 มกราคม 2549
- [3] นคร ภัคดีชาติ และชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตวิไล, คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller  
เบื้องต้น ด้วยโปรแกรมภาษา C กับ MPLAB C30, 25 เม.ย 2549
- [4] ณัฐกมล มาลากุล ณ อยุธยา และคณะ, “ การพัฒนาวงจระขิมเมตริกฮาร์ฟบริดจ์คอน  
เวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์สวิตซ์รีลักแทนซ์, ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร  
บัณฑิต,สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551
- [5] พรชัย ชินาสัย และคณะ, “ การขับเคลื่อนสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์ (Switch reluctance  
motor drives )” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2547
- [6] T.J.E. Miller, **Switched Reluctance Motors and their Physics** publications  
oxford science publication, 1993
- [7] Krishnan, R., **Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation. Analysis  
Design and Applications, Industrial Electronics Series, CRC Press, Boca Raton,**  
2001
- [8] Michael T. DiRenzo, “Switched Reluctance Motor Control – Basic Operation and  
Example Using the TMS320F240” Application Report,” **TEXAS INSTRUMENTS**, 2000
- [9] “การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional plus integral Control),”  
<http://www.sut.ac.th/e-texts/Eng/Automatic/chapter6.htm>, access March 13,2009



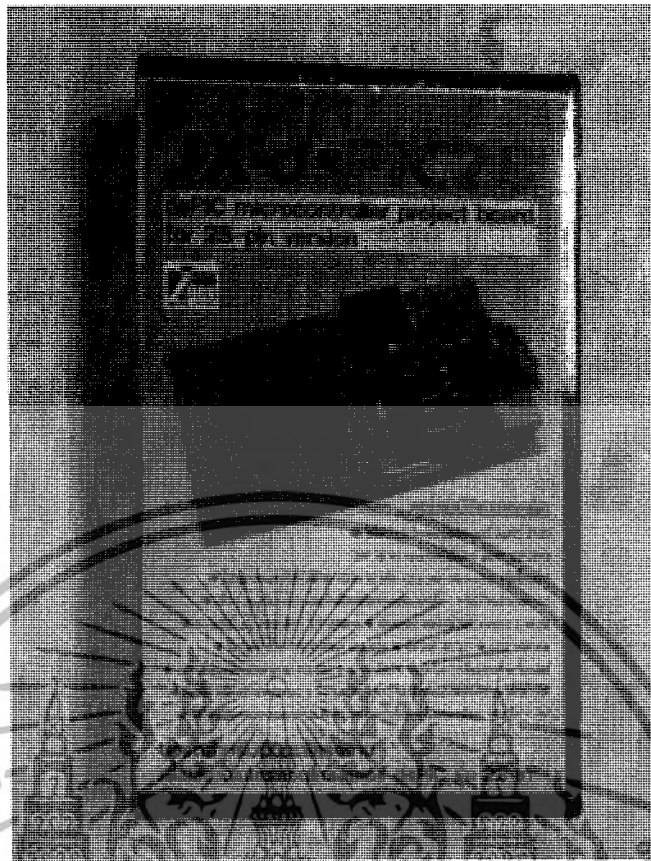
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

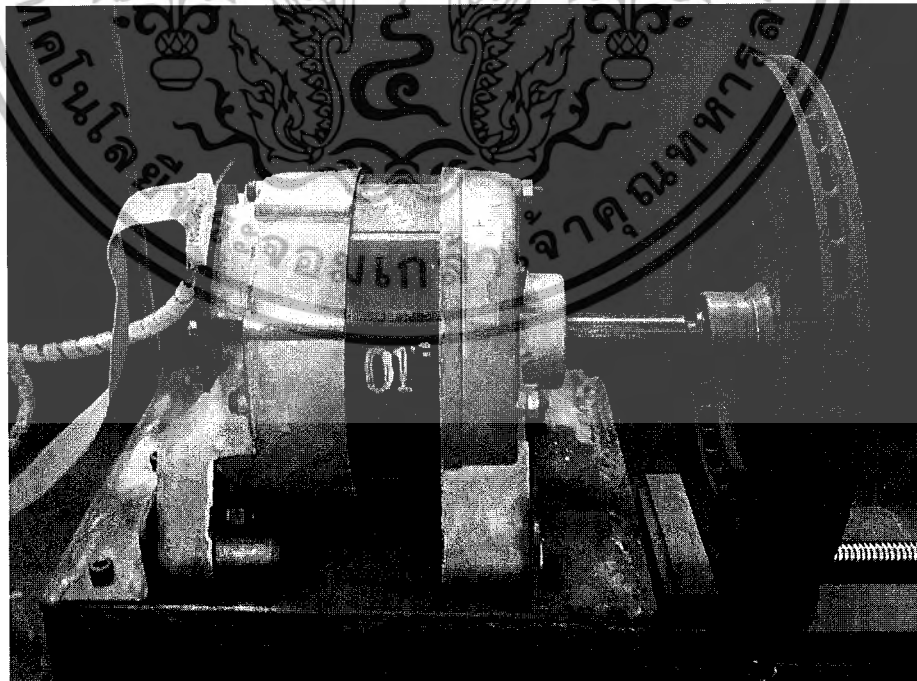


ภาคผนวก ก.  
ภาพชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

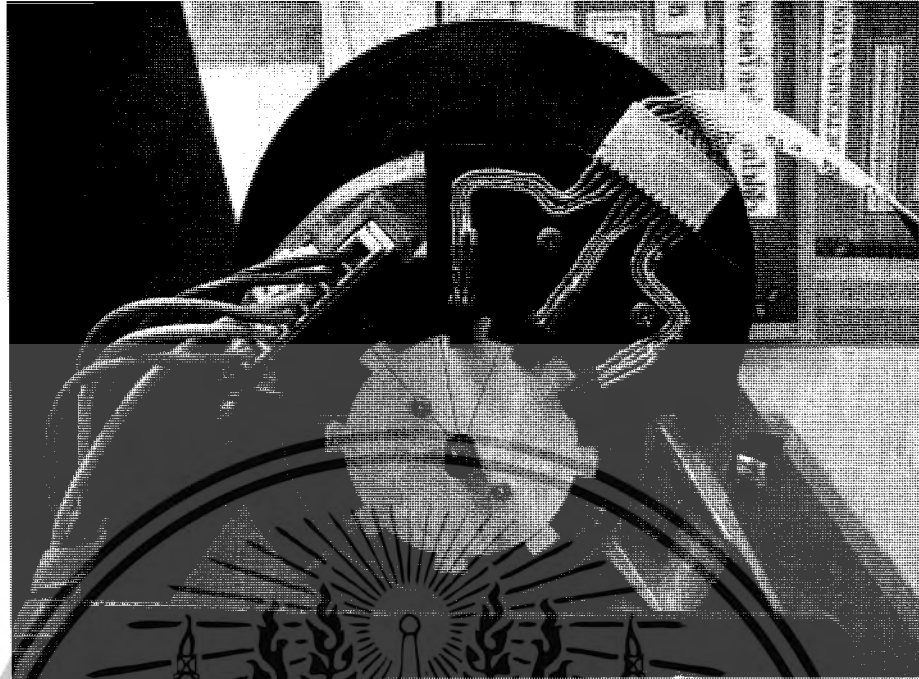


ภาพที่ ก.1 บอร์ดทดลอง JX – dsPIC28



ภาพที่ ก.2 สวิตช์รีลัดแดนซ์มอเตอร์ 3 เฟสแบบ 12/8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

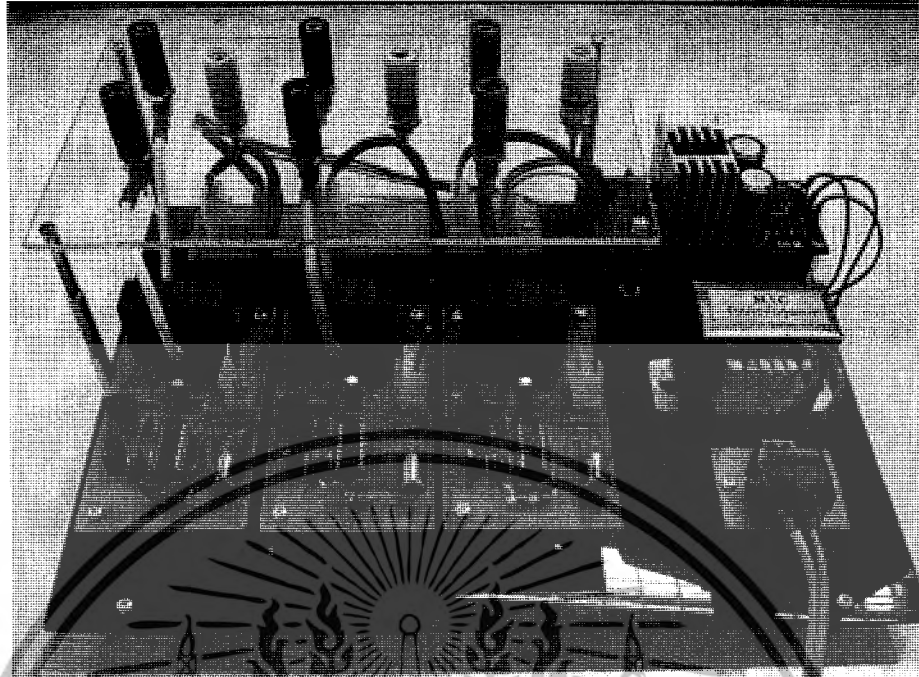


ภาพที่ ก.3 การติดตั้งแผ่นตัดแสงของ Position sensor

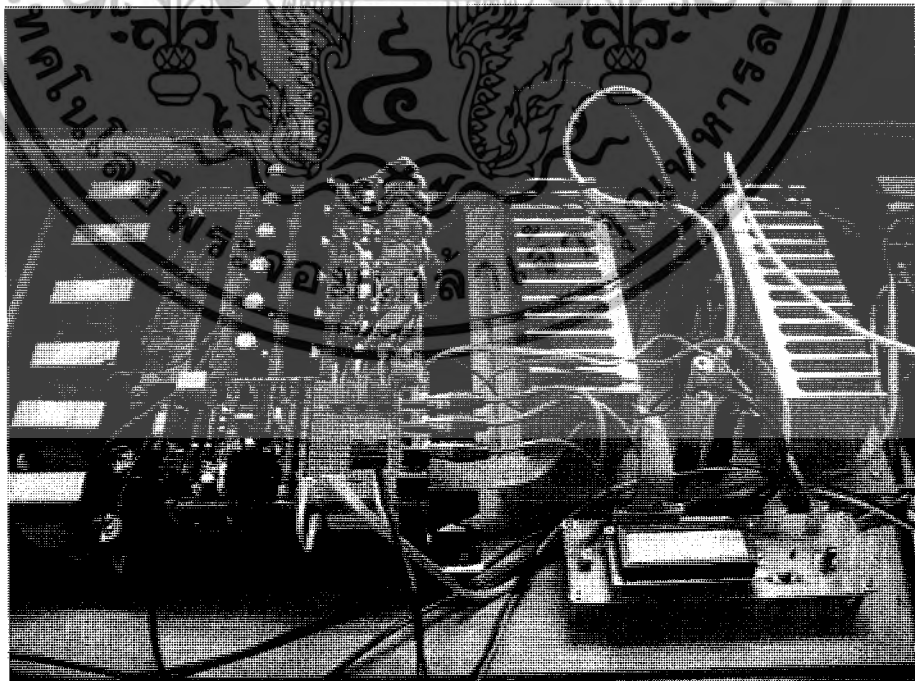


ภาพที่ ก.4 วงจร Position sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

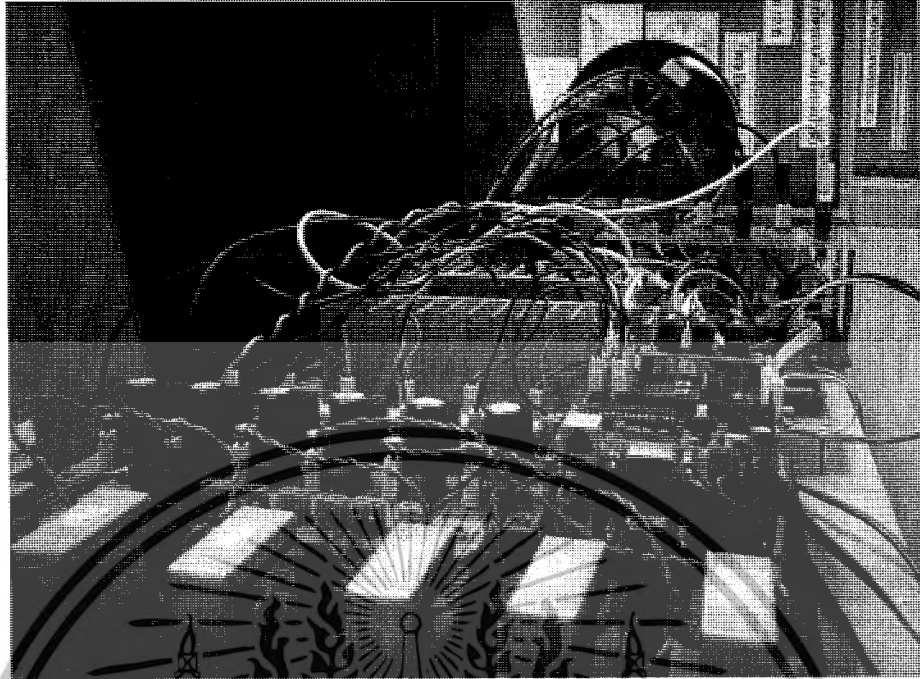


ภาพที่ ก.5 วงจร Current sensor



ภาพที่ ก.6 วงจรอะซิมเมตริกซ์ฮาร์ฟบริดคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.7 การต่อวงจรทุกส่วนทำงานร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โค้ดโปรแกรมส่วนที่ใช้แสดงผล

```

//-----//
// Program           : Speed Display
// Description       : Detect pulse input pin IC1 and convert to Speed
// Frequency         : 7.3738 MHz at PLL 4x
// Filename          : speed.c
// C compiler        : C30 Compiler by Microchip Technology
//-----//

#include <p30f2010.h>    // Header file for dsPIC30F2010
#include<InCap.h>      // Module function for Input Capture
#include<lcd.h>         // Module function for LCD display 4 bit mode
#include<timer.h>      // Module function for timer
#include <ports.h>
#include <adc10.h>

float speed_count,speed;    // Count frequency variable
int count=0;                // Count time variable
unsigned int speed_ref,result[2],Speed[10],i,result_b;
float value,Speed_ref,speed_,result_a,result_c;

//-----//
//-----// Function display screen title //-----//
//-----//

void display_title()
{
    lcd_puts(LINE1,"S R Motor Drive");    // Display message start at address 00H
    lcd_puts(LINE2,"By dsPIC30F2010");    // Display message start at address 40H
    lcd_delay(3000);                       // Delay 1 sec
}

//-----//
-//
//-----// Interrupt service routine Timer 1 every 5 ms //-----//
//-----//
-//

void _ISR_T1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T1IF = 0;                    // Clear Timer interrupt flag
    WriteTimer1(0);                       // Clear count value at TMR1 register
    count++;
    if(count>=200)                        // Block for 1 sec

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    {
        count = 0;           // Clear counter value
        speed = speed_count; // Keep frequency count value
        speed_count = 0;     // Clear frequency count value
    }
}

/*****
The ADC interrupt reads the demand pot value.

*****/

void __attribute__((__interrupt__)) _ADCInterrupt (void)
{
    IFS0bits.ADIF = 0;
    speed_ref = ADCBUF0;
}
//-----
-//
//----- Interrupt service routine Capture every Falling edge -----//
//-----
-//
void _ISR_IC1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.IC1IF = 0; // Clear IC1 interrupt flag
    speed_count++;     // Increase frequency counter value 1 time
}
//-----
-//
//----- Capture every Falling edge -----//
//-----
-//
void display_speed(unsigned char addr,float value)
{
    char i;
    lcd_command(2); // Set origin of LCD
    lcd_command(addr); // Set address of LCD
    for(i=0;i<4;i++)
    {
        lcd_text (0x20); // send character to LCD
    }
    inttolcd(addr,value); // Display integer
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//-----
-//
//----- Function for Initial Input Capture -----//
//-----
-//
void capture_init()
{
    unsigned int match_value;
    ConfigIntTimer1(T1_INT_PRIOR_1 & T1_INT_ON);    // Timer 1 Enable interrupt

    /***** Configuration Timer 1 for interrupt every 5 ms *****/
    WriteTimer1(0);                                // Timer 1 clear period
    match_value = 36864;                            // Timer1 interval 5 ms
    OpenTimer1(T1_ON & T1_GATE_OFF & T1_IDLE_STOP &
    T1_PS_1_1 & T1_SYNC_EXT_OFF & T1_SOURCE_INT, match_value);
    /***** Configuration IC1 *****/
    ConfigIntCapture1(IC_INT_PRIOR_2 & IC_INT_ON); // Enable IC1 interrupt
    T3CON = 0x8000;                                // Start timer 3
    OpenCapture1(IC_IDLE_STOP &                   // Capture disable in idle mode
    IC_TIMER3_SRC &                                // Timer 3 count for IC1
    IC_INT_1CAPTURE &                             // Capture per 1 count for interrupt
    IC_EVERY_FALL_EDGE); // Capture every falling edge only
}
//-----
//----- Function initialize ACD module -----//
//-----
void adc_init()
{
    unsigned int Channel, PinConfig, Scanselct, Adcon3_reg, Adcon2_reg,
    Adcon1_reg;

    ADCON1bits.ADON = 0;                            // Turn off ADC
    Channel =    ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN0 & // Channel 0 positive input select AN0
                ADC_CH0_NEG_SAMPLEA_NVREF ;    // Channel 0 negative VREF
    SetChanADC10(Channel);                          // Set channel configuration
    ConfigIntADC10(ADC_INT_DISABLE);               // Disable interrupt for ADC
    PinConfig   =    ENABLE_AN0_ANA;              // Enable AN0-AN3 analog port
    Scanselct   =    SKIP_SCAN_AN1 &
                    SKIP_SCAN_AN2 &
                    SKIP_SCAN_AN3 &
                    SKIP_SCAN_AN4 &
                    SKIP_SCAN_AN5 &

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SKIP_SCAN_AN6 &
SKIP_SCAN_AN7;

Adcon3_reg = ADC_SAMPLE_TIME_2 & // Sample for 2 time
            ADC_CONV_CLK_INTERNAL_RC & // Internal Clock
            ADC_CONV_CLK_13Tcy;

Adcon2_reg = ADC_VREF_AVDD_AVSS & // Vref at Vdd and Vss
            ADC_SCAN_ON & // Enable scan for ADC
            ADC_ALT_BUF_OFF & // Disable alternate buffer
            ADC_ALT_INPUT_OFF & // Disable alternate input
            ADC_CONVERT_CH0 & // Select CH0 convert
            ADC_SAMPLES_PER_INT_2; // 2 sample between interrupt

Adcon1_reg = ADC_MODULE_ON & // Enable module ADC
            ADC_IDLE_CONTINUE & // ADC run on idle mode
            ADC_FORMAT_INTG & // Output value integer format
            ADC_CLK_MANUAL & // ADC manual clock
            ADC_SAMPLE_SIMULTANEOUS & // ADC sampling simultaneous
            ADC_AUTO_SAMPLING_ON; // ADC auto sampling

OpenADC10(Adcon1_reg, Adcon2_reg, Adcon3_reg, PinConfig, Scanselct); // Turn on
ADC module
}

//-----
//
//----- Main Program -----//
//-----
//
int main(void)
{

    TRISEbits.TRISE8 = 1;
    TRISBbits.TRISB4 = 0;
    TRISBbits.TRISB5 = 0;
    LATBbits.LATB4 = 0;
    LATBbits.LATB5 = 0;
    LATEbits.LATE8 = 0;

    adc_init(); // Initial ADC
    capture_init(); // Initial IC1
    lcd_init(); // Initial LCD
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

display_title(); // Display title
lcd_clear(); // Clear LCD display
lcd_puts(0x80,"SP_REF.");
lcd_puts(0x8D,"rpm");
lcd_puts(0xC0,"SPEED :"); // Show message
lcd_puts(0xCD,"rpm."); // Show message

while(1)
{
    if (PORTEbits.RE8 = 1)
    {
        LATBbits.LATB4 = 1;
        LATBbits.LATB5 = 0;
    }
    else
    {
        LATBbits.LATB4 = 0;
        LATBbits.LATB5 = 1;
    }

    ADCON1bits.SAMP = 1; // Start Sampling
    while(!ADCON1bits.SAMP); // Wait for End Sampling process
    ConvertADC10(); // Convert ADC
    while(ADCON1bits.SAMP); // Ensure for Sampling success
    //while(BusyADC10()); // Ensure for Sampling success
    Speed[0] = ReadADC10(0);

    speed_ref = (speed_ref + Speed[0])/2;
    Speed_ref = speed_ref*1.5;
    value = ((speed/8)*60);

    display_speed(0xC7,value); // Convert and Display speed count
    display_speed(0x87,Speed_ref);

    delay_ms(100);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โค้ดโปรแกรมส่วนที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์

```
//-----//
// Program      : Switch Reluctance Motor
// Description   : Test input External Interrupt by push button and display by LED
// Frequency    : 7.3738 MHz at PLL 4x
// Filename     : srm.c
// C compiler   : C30 Compiler by Microchip Technology
//-----//

#include<p30f2010.h>    // Header file for dsPIC30F2010
#include<ports.h>      // Module function for Interrupt configuration port
#include<adc10.h>
#include<InCap.h>
#include<timer.h>
#include<math.h>
#include<stdio.h>

#define KP 750
#define KI 20

/*unsigned int result_a,result_b,result_c,result_sp,speed_ref,i;
float Speed,Current_a,Current_b,Current_c,Speed_ref,current_a = 0,current_b = 0,current_c = 0,Current_ref
speed_count,speed,speed_error,error_speed_p,error_speed_i,u_speed_error,error_speed,old_current_ref,SpeedIntegral,speed_out;
int count=0; */

unsigned int result_a,result_b,result_c,result_sp,speed_ref,i;
float Current_a,Current_b,Current_c,current_a = 0,current_b = 0,current_c = 0,Current_ref
speed_count,speed,error_speed_p,error_speed_i,error_speed,old_current_ref;
int count=0,SpeedIntegral,speed_out,Speed_ref,Speed,speed_error,u_speed_error;

//-----//
//----- Interrupt service routine Timer 1 every 5 ms -----//
//-----//

void _ISR_T1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T1IF = 0;           // Clear Timer interrupt flag
    WriteTimer1(0);             // Clear count value at TMR1 register
    count++;
    if(count>=200)              // Block for 1 sec
    {
        count = 0;              // Clear counter value
    }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        speed = speed_count;           // Keep frequency count value
        speed_count = 0;               // Clear frequency count value
    }
}
//-----//
//-----Interrupt service routine Capture every Falling edge -----//
//-----//

void _ISR_IC1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.IC1IF = 0;                // Clear IC1 interrupt flag
    speed_count++;                     // Increase frequency counter value 1 time
}

//-----//
//-----Function for Initial Input Capture -----//
//-----//

void capture_init()
{
    unsigned int match_value;
    ConfigIntTimer1(T1_INT_PRIOR_1 & T1_INT_ON); // Timer 1 Enable interrupt
    /****** Configuration Timer 1 for interrupt every 5 ms *****/
    WriteTimer1(0);                       // Timer 1 clear period
    match_value = 36864;                   // Timer1 Interval 5 ms
    OpenTimer1(T1_ON & T1_GATE_OFF & T1_IDLE_STOP &
    T1_PS_1_1 & T1_SYNC_EXT_OFF & T1_SOURCE_INT, match_value);
    /****** Configuration IC1 *****/
    ConfigIntCapture1(IC_INT_PRIOR_2 & IC_INT_ON); // Enable IC1 interrupt
    T3CON = 0x8000;                          // Start timer 3

    OpenCapture1(IC_IDLE_STOP &           // Capture disable in idle mode
    IC_TIMER3_SRC &                       // Timer 3 count for IC1
    IC_INT_1CAPTURE &                     // Capture per 1 count for interrupt
    IC_EVERY_FALL_EDGE);                  // Capture every falling edge only
}
//-----//
//-----Function initialize ACD module -----//
//-----//

void adc_init()
{
    unsigned int Channel, PinConfig, Scanselect, Adcon3_reg, Adcon2_reg, Adcon1_reg;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ADCON1bits.ADON = 0; // Turn off ADC
Channel = ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN0 & // Channel 0 positive input select AN0
          ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN1 & // Channel 0 positive input select AN1
          ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN2 & // Channel 0 positive input select AN2
          ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN3 & // Channel 0 positive input select AN3
          ADC_CH0_NEG_SAMPLEA_NVREF ;// Channel 0 negative VREF
SetChanADC10(Channel); // Set channel configuration
ConfigIntADC10(ADC_INT_DISABLE); // Disable interrupt for ADC
PinConfig = ENABLE_AN0_ANA & // Enable AN0-AN3 analog port
           ENABLE_AN1_ANA &
           ENABLE_AN2_ANA &
           ENABLE_AN3_ANA ;
Scanselct = SKIP_SCAN_AN4 & // Scan for AN0-AN3
           SKIP_SCAN_AN5 &
           SKIP_SCAN_AN6 &
           SKIP_SCAN_AN7;
Adcon3_reg = ADC_SAMPLE_TIME_4 & // Sample for 4 time
            ADC_CONV_CLK_INTERNAL_RC & // Internal Clock
            ADC_CONV_CLK_13Tcy;
Adcon2_reg = ADC_VREF_AVDD_AVSS & // Vref at Vdd and Vss
            ADC_SCAN_ON & // Enable scan for ADC
            ADC_ALT_BUF_OFF & // Disable alternate buffer
            ADC_ALT_INPUT_OFF & // Disable alternate input
            ADC_CONVERT_CH0 & // Select CH0 convert
            ADC_SAMPLES_PER_INT_4; // 4 sample between interrupt
Adcon1_reg = ADC_MODULE_ON & // Enable module ADC
            ADC_IDLE_CONTINUE & // ADC run on idle mode
            ADC_FORMAT_INTG & // Output value integer format
            ADC_CLK_MANUAL & // ADC manual clock
            ADC_SAMPLE_SIMULTANEOUS & // ADC sampling simultaneous
            ADC_AUTO_SAMPLING_ON; // ADC auto sampling

OpenADC10(Adcon1_reg, Adcon2_reg, Adcon3_reg,PinConfig, Scanselct); // Turn on
ADC module

}
//-----//
//-----Read ADC-----//
//-----//
void read_adc(void)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ADCON1bits.SAMP = 1; // Start Sampling
//while(!ADCON1bits.SAMP); // Wait for End Sampling process
ConvertADC10(); // Convert ADC
//while(ADCON1bits.SAMP); // Ensure for Sampling success
//while(BusyADC10()); // Ensure for Sampling success

    result_c = ReadADC10(0);
    result_b = ReadADC10(1);
    result_a = ReadADC10(2); // Keep value for ADC value
    result_sp = ReadADC10(3);

current_a = (current_a+result_a)/2;
current_b = (current_b+result_b)/2;
current_c = (current_c+result_c)/2;
speed_ref = (speed_ref+result_sp)/2;
Current_a = current_a*0.012218963831;
Current_b = current_b*0.012218963831;
Current_c = current_c*0.012218963831;
}

//-----//
//----- Forward Drive -----//
//-----//

void forwarddrive(void)
{
    if(PORTCbits.RC13 = 1)
    {
        LATEbits.LATE0 = 1;
        if (Current_a < Current_ref)
        {
            LATEbits.LATE1 = 1;
        }
        else
        {
            LATEbits.LATE1 = 0;
        }
    }
    else
    {
        LATEbits.LATE0 = 0;
        LATEbits.LATE1 = 0;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
    if (PORTDbits.RD1 = 1)
    {
        LATEbits.LATE2 = 1;
        if (Current_b < Current_ref)
        {
            LATEbits.LATE3 = 1;
        }
        else
        {
            LATEbits.LATE3 = 0;
        }
    }
    else
    {
        LATEbits.LATE2 = 0;
        LATEbits.LATE3 = 0;
    }
    if (PORTCbits.RC14 = 1)
    {
        LATEbits.LATE4 = 1;
        if (Current_c < Current_ref)
        {
            LATEbits.LATE5 = 1;
        }
        else
        {
            LATEbits.LATE5 = 0;
        }
    }
    else
    {
        LATEbits.LATE4 = 0;
        LATEbits.LATE5 = 0;
    }
}

//-----//
//-----Backward Drive-----//
//-----//
void backwarddrive(void)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (PORTCbits.RC13 = 1)
{
    LATEbits.LATE4 = 1;

    if (Current_c < Current_ref)
    {
        LATEbits.LATE5 = 1;
    }
    else
    {
        LATEbits.LATE5 = 0;
    }
}
else
{
    LATEbits.LATE4 = 0;
    LATEbits.LATE5 = 0;

    if (PORTDbits.RD1 = 1)
    {
        LATEbits.LATE0 = 1;

        if (Current_a < Current_ref)
        {
            LATEbits.LATE1 = 1;
        }
        else
        {
            LATEbits.LATE1 = 0;
        }
    }
}
else
{
    LATEbits.LATE0 = 0;
    LATEbits.LATE1 = 0;
}
if (PORTCbits.RC14 = 1)
{
    LATEbits.LATE2 = 1;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        if (Current_b < Current_ref)
        {
            LATEbits.LATE3 = 1;
        }
        else
        {
            LATEbits.LATE3 = 0;
        }
    }

else
{
    LATEbits.LATE2 = 0;
    LATEbits.LATE3 = 0;
}
}

//-----//
//-----//
//-----//
void pi_control(void)
{
    speed_error = Speed_ref - Speed;
    if (Speed_ref == 0)
    {
        Current_ref = 0.0;
    }
    else
    {
        u_speed_error = speed_error;
        Speedintegral += u_speed_error;
        //error_speed_p = KP * u_speed_error;
        //error_speed_i = KI * Speedintegral;
        //u_speed_error + error_speed_i;
        //speed_out = (error_speed_p + error_speed_i);
        speed_out = (((long)KP*(long)u_speed_error + (long)KI*(long)Speedintegral) >>
16);

        Current_ref = Current_ref + speed_out;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        if (Current_ref<0.001)
        {
            Current_ref = 0.001;
            SpeedIntegral = 0;
        }
        if (Current_ref>2.5)
        {
            Current_ref = 2.5;
            SpeedIntegral = 0;
        }
    }

}

//-----//
//-----//
//-----//
int main()
{
    TRISCbits.TRISC13 = 1;
    TRISCbits.TRISC14 = 1;
    TRISDbits.TRISD1 = 1;
    TRISEbits.TRISE0 = 0;
    TRISEbits.TRISE1 = 0;
    TRISEbits.TRISE2 = 0;
    TRISEbits.TRISE3 = 0;
    TRISEbits.TRISE4 = 0;
    TRISEbits.TRISE5 = 0;
    LATEbits.LATE0 = 0;
    LATEbits.LATE1 = 0;
    LATEbits.LATE2 = 0;
    LATEbits.LATE3 = 0;
    LATEbits.LATE4 = 0;
    LATEbits.LATE5 = 0;
    LATEbits.LATE8 = 0;

    adc_init();
    capture_init();

    while(1)
    {
        read_adc();
        Speed_ref = speed_ref*1.5;
        Speed = ((speed/8)*60);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

speed_error = Speed_ref - Speed;
pi_control();
// Current_ref = 2.5;
if (PORTEbits.RE8 = 1)
{
    if(speed_error > 0 )
    {
        forwarddrive();
    }
    if(speed_error < 0 )
    {
        backwarddrive();
    }
}
else
{
    if(speed_error > 0 )
    {
        backwarddrive();
    }
    if(speed_error < 0 )
    {
        forwarddrive();
    }
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

Data sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**MICROCHIP**

---

# **dsPIC30F2010** **Data Sheet**

**28-pin High-Performance  
Digital Signal Controllers**



---

**Note the following details of the code protection feature on Microchip devices:**

Microchip products meet the specification contained in their particular Microchip Data Sheet.

Microchip believes that its family of products is one of the most secure families of its kind on the market today, when used in the intended manner and under normal conditions.

There are dishonest and possibly illegal methods used to breach the code protection feature. All of these methods, to our knowledge, require using the Microchip products in a manner outside the operating specifications contained in Microchip's Data Sheets. Most likely, the person doing so is engaged in theft of intellectual property.

Microchip is willing to work with the customer who is concerned about the integrity of their code.

Neither Microchip nor any other semiconductor manufacturer can guarantee the security of their code. Code protection does not mean that we are guaranteeing the product as "unbreakable."

Code protection is constantly evolving. We at Microchip are committed to continuously improving the code protection features of our products. Attempts to break Microchip's code protection feature may be a violation of the Digital Millennium Copyright Act. If such acts allow unauthorized access to your software or other copyrighted work, you may have a right to sue for relief under that Act.

---

Information contained in this publication regarding device applications and the like is intended through suggestion only and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. No representation or warranty is given and no liability is assumed by Microchip Technology Incorporated with respect to the accuracy or use of such information, or infringement of patents or other intellectual property rights arising from such use or otherwise. Use of Microchip's products as critical components in life support systems is not authorized except with express written approval by Microchip. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, under any intellectual property rights.

#### Trademarks

The Microchip name and logo, the Microchip logo, Accuron, dsPIC, KEELoQ, microID, MPLAB, PIC, PICmicro, PICSTART, PRO MATE, PowerSmart, rfPIC, and SmartShunt are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.


AmPLab, FilterLab, Migratable Memory, MXDEV, MXLAB, PICMASTER, SEEVAL, SmartSensor and The Embedded Control Solutions Company are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

Analog-for-the-Digital Age, Application Maestro, dsPICDEM, dsPICDEM.net, dsPICworks, ECAN, ECONOMONITOR, FanSense, FlexROM, fuzzyLAB, In-Circuit Serial Programming, ICSP, ICEPIC, MPASM, MPLIB, MPLINK, MPSIM, PICkit, PICDEM, PICDEM.net, PICLAB, PICtail, PowerCal, PowerInfo, PowerMate, PowerTool, rLAB, rfPICDEM, Select Mode, Smart Serial, SmartTel and Total Endurance are trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.

SQTP is a service mark of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

All other trademarks mentioned herein are property of their respective companies.

© 2004, Microchip Technology Incorporated, Printed in the U.S.A., All Rights Reserved.

 Printed on recycled paper. 11/12/04

**QUALITY MANAGEMENT SYSTEM  
CERTIFIED BY DNV  
== ISO/TS 16949:2002 ==**

*Microchip received ISO/TS-16949:2002 quality system certification for its worldwide headquarters, design and wafer fabrication facilities in Chandler and Tempe, Arizona and Mountain View, California in October 2003. The Company's quality system processes and procedures are for its PICmicro® 8-bit MCUs, KEELoQ® code hopping devices, Serial EEPROMs, microperipherals, non-volatile memory and analog products. In addition, Microchip's quality system for the design and manufacture of development systems is ISO 9001:2000 certified.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 28-pin dsPIC30F2010 Enhanced Flash 16-bit Digital Signal Controller

**Note:** This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the *dsPIC30F Family Reference Manual* (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the *dsPIC30F Programmer's Reference Manual* (DS70030).

### High-Performance Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture
- 84 base instructions with flexible addressing modes
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 12 Kbytes on-chip Flash program space
- 512 bytes on-chip data RAM
- 1 Kbyte non-volatile data EEPROM
- 16 x 16-bit working register array
- Up to 30 MIPS operation:
  - DC to 40 MHz external clock input
  - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 27 interrupt sources
- Three external interrupt sources
- 8 user selectable priority levels for each interrupt
- 4 processor exceptions and software traps

### DSP Engine Features:

- Modulo and Bit-Reversed modes
- Two, 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single cycle hardware fractional/integer multiplier
- Single cycle Multiply-Accumulate (MAC) operation
- 40-stage Barrel Shifter
- Dual data fetch

### Peripheral Features:

- High current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Three 16-bit timers/counters; optionally pair up 16-bit timers into 32-bit timer modules
- Four 16-bit Capture input functions
- Two 16-bit Compare/PWM output functions
  - Dual Compare mode available
- 3-wire SPI™ modules (supports 4 Frame modes)
- I<sup>2</sup>C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- Addressable UART modules with FIFO buffers

### Motor Control PWM Module Features:

- 6 PWM output channels
  - Complementary or Independent Output modes
  - Edge and Center Aligned modes
- 4 duty cycle generators
- Dedicated time base with 4 modes
- Programmable output polarity
- Dead time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for synchronized A/D conversions

### Quadrature Encoder Interface Module Features:

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

### Analog Features:

- 10-bit Analog-to-Digital Converter (A/D) with:
  - 500 Ksps (for 10-bit A/D) conversion rate
  - Six input channels
  - Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Brown-out Detection and Reset generation

# dsPIC30F2010

## Special Microcontroller Features:

Enhanced Flash program memory:

- 10,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 100K (typical)

Data EEPROM memory:

- 100,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 1M (typical)

Self-reprogrammable under software control

Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)

Flexible Watchdog Timer (WDT) with on-chip low power RC oscillator for reliable operation

Fail-Safe clock monitor operation

- Detects clock failure and switches to on-chip low power RC oscillator
- Programmable code protection
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
- Selectable Power Management modes
  - Sleep, Idle and Alternate Clock modes

## CMOS Technology:

- Low power, high speed Flash technology
- Wide operating voltage range (2.5V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption

## dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family\*

Device	Pins	Program Mem. Bytes/Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	A/D 10-bit 500 Ksps	Quad Enc	UART	SP™	PC™	CAN
dsPIC30F2010	28	12K/4K	512	1024	3	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F3010	28	24K/8K	1024	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F3011	40/44	24K/8K	1024	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	-
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1
dsPIC30F5015	64	66K/22K	2048	1024	5	4	4	3 ch	16 ch	Yes	1	2	1	1
dsPIC30F6010	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2

\* This table provides a summary of the dsPIC30F2010 peripheral features. Other available devices in the dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family are shown for feature comparison.

## Pin Diagrams

### 28-Pin SDIP and SOIC

MCLR	1	28	AVDD
EMUD3/AN0/VREF+/CN2/RB0	2	27	AVSS
EMUC3/AN1/VREF-/CN3/RB1	3	26	PWM1L/RE0
AN2/SS1/CN4/RB2	4	25	PWM1H/RE1
AN3/INDX/CN5/RB3	5	24	PWM2L/RE2
AN4/QEA/IC7/CN6/RB4	6	23	PWM2H/RE3
AN5/QEB/IC8/CN7/RB5	7	22	PWM3L/RE4
VSS	8	21	PWM3H/RE5
OSC1/CLKI	9	20	VDD
OSC2/CLKO/RC15	10	19	VSS
EMUD1/SOSCI/T2CK/U1ATX/CN1/RC13	11	18	PGC/EMUC/U1RX/SDI1/SDA/RF2
EMUC1/SOSCO/T1CK/U1ARX/CN0/RC14	12	17	PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/RF3
VDD	13	16	FLTA/INT0/SCK1/OCFA/RE8
EMUD2/OC2/IC2/INT2/RD1	14	15	EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0

### 28-Pin QFN

EMUC3/AN1/VREF-/CN3/RB1	28	EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0	15
EMUD3/AN0/VREF+/CN2/RB0	27	PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/RF3	14
MCLR	26	FLTA/INT0/SCK1/OCFA/RE8	13
AVDD	25	EMUC2/OC2/IC2/INT2/RD1	12
AVSS	24	VDD	11
PWM1L/RE0	23	EMUC1/SOSCO/T1CK/U1ARX/CN0/RC14	10
PWM1H/RE1	22	VSS	9
PWM2L/RE2	21	EMUD1/SOSCI/T2CK/U1ATX/CN1/RC13	8
PWM2H/RE3	20	OSC2/CLKO/RC15	7
PWM3L/RE4	19	OSC1/CLKIN	6
PWM3H/RE5	18	VSS	5
VDD	17	AN5/QEB/IC8/CN7/RB5	4
VSS	16	AN4/QEA/IC7/CN6/RB4	3
PGC/EMUC/U1RX/SDI1/SDA/RF2	15	AN3/INDX/CN5/RB3	2
		AN2/SS1/CN4/RB2	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# dsPIC30F2010

## Table of Contents

0.0 Device Overview .....	5
1.0 CPU Architecture Overview .....	9
1.0 Memory Organization .....	19
1.0 Address Generator Units .....	31
1.0 Interrupts .....	37
1.0 Flash Program Memory .....	43
1.0 Data EEPROM Memory .....	49
1.0 I/O Ports .....	53
1.0 Timer1 Module .....	57
1.0.0 Timer2/3 Module .....	61
1.1.0 Input Capture Module .....	67
1.2.0 Output Compare Module .....	71
1.3.0 Quadrature Encoder Interface (QEI) Module .....	75
1.4.0 Motor Control PWM Module .....	81
1.5.0 SPI™ Module .....	91
1.6.0 I2C Module .....	95
1.7.0 Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) Module .....	103
1.8.0 10-bit High Speed Analog-to-Digital Converter (A/D) Module .....	111
1.9.0 System Integration .....	119
2.0 Instruction Set Summary .....	133
2.1.0 Development Support .....	141
2.2.0 Electrical Characteristics .....	147
2.3.0 Packaging Information .....	187
On-Line Support .....	197
Systems Information and Upgrade Hot Line .....	197
Reader Response .....	198
Product Identification System .....	199

### TO OUR VALUED CUSTOMERS

It is our intention to provide our valued customers with the best documentation possible to ensure successful use of your Microchip products. To this end, we will continue to improve our publications to better suit your needs. Our publications will be refined and enhanced as new volumes and updates are introduced.

If you have any questions or comments regarding this publication, please contact the Marketing Communications Department via E-mail at [docerrors@mail.microchip.com](mailto:docerrors@mail.microchip.com) or fax the Reader Response Form in the back of this data sheet to (480) 792-4150. We welcome your feedback.

#### Most Current Data Sheet

To obtain the most up-to-date version of this data sheet, please register at our Worldwide Web site at:

<http://www.microchip.com>

You can determine the version of a data sheet by examining its literature number found on the bottom outside corner of any page. The last character of the literature number is the version number, (e.g., DS30000A is version A of document DS30000).

#### Errata

An errata sheet, describing minor operational differences from the data sheet and recommended workarounds, may exist for current devices. As device/documentation issues become known to us, we will publish an errata sheet. The errata will specify the revision of silicon and revision of document to which it applies.

To determine if an errata sheet exists for a particular device, please check with one of the following:

- Microchip's Worldwide Web site; <http://www.microchip.com>
- Your local Microchip sales office (see last page)
- The Microchip Corporate Literature Center; U.S. FAX: (480) 792-7277

When contacting a sales office or the literature center, please specify which device, revision of silicon and data sheet (include literature number) you are using.

#### Customer Notification System

Register on our web site at [www.microchip.com/cn](http://www.microchip.com/cn) to receive the most current information on all of our products.

## 1.0 DEVICE OVERVIEW

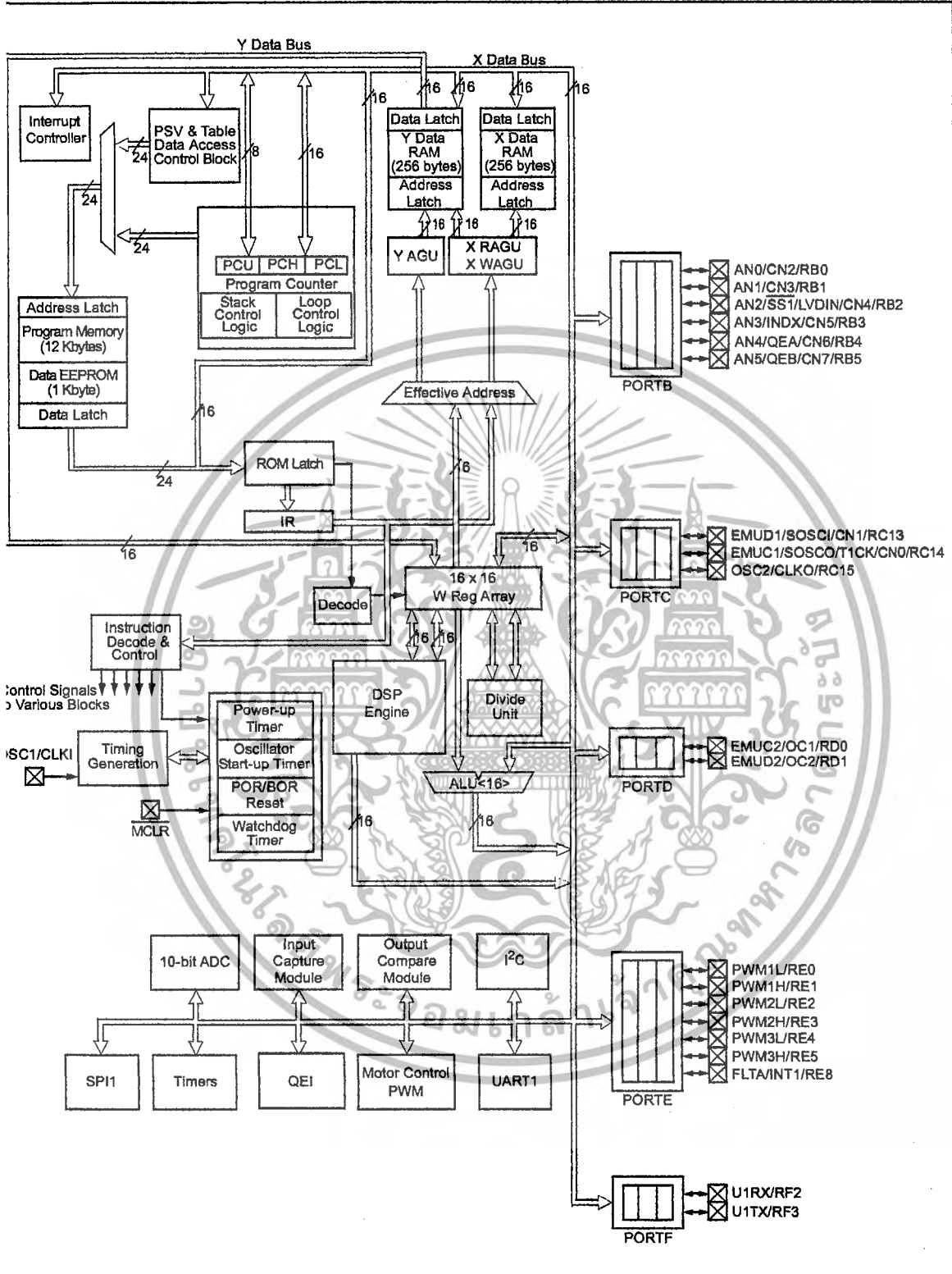
**Note:** This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the *dsPIC30F Family Reference Manual* (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the *dsPIC30F Programmer's Reference Manual* (DS70030).

This document contains device specific information for the dsPIC30F2010 device. The dsPIC30F devices contain extensive Digital Signal Processor (DSP) functionality within a high-performance 16-bit microcontroller (MCU) architecture. Figure 1-1 shows a device block diagram for the dsPIC30F2010 device.



# dsPIC30F2010

FIGURE 1-1: dsPIC30F2010 BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1-1 provides a brief description of device I/O pinouts and the functions that may be multiplexed to a port pin. Multiple functions may exist on one port pin. When multiplexing occurs, the peripheral module's functional requirements may force an override of the data direction of the port pin.

**TABLE 1-1: PINOUT I/O DESCRIPTIONS**

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
AN0-AN5	I	Analog	Analog input channels.
AVdd	P	P	Positive supply for analog module.
AVss	P	P	Ground reference for analog module.
CLKI CLKO	I O	ST/CMOS —	External clock source input. Always associated with OSC1 pin function. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes. Always associated with OSC2 pin function.
CN0-CN7	I	ST	Input change notification inputs. Can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.
EMUD EMUC EMUD1 EMUC1 EMUD2 EMUC2 EMUD3 EMUC3	I/O I/O I/O I/O I/O I/O I/O I/O	ST ST ST ST ST ST ST ST	ICD Primary Communication Channel data input/output pin. ICD Primary Communication Channel clock input/output pin. ICD Secondary Communication Channel data input/output pin. ICD Secondary Communication Channel clock input/output pin. ICD Tertiary Communication Channel data input/output pin. ICD Tertiary Communication Channel clock input/output pin. ICD Quaternary Communication Channel data input/output pin. ICD Quaternary Communication Channel clock input/output pin.
IC1, IC2, IC7, IC8	I	ST	Capture inputs. The dsPIC30F2010 has 4 capture inputs. The inputs are numbered for consistency with the inputs on larger device variants.
INDX QEA QEB	I I I	ST ST ST	Quadrature Encoder Index Pulse input. Quadrature Encoder Phase A input in QEI mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode. Quadrature Encoder Phase A input in QEI mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode.
INT0 INT1 INT2	I I I	ST ST ST	External interrupt 0 External interrupt 1 External interrupt 2
FLTA PWM1L PWM1H PWM2L PWM2H PWM3L PWM3H	I O O O O O O	ST — — — — — —	PWM Fault A input PWM 1 Low output PWM 1 High output PWM 2 Low output PWM 2 High output PWM 3 Low output PWM 3 High output
MCLR	I/P	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active low Reset to the device.
OCFA OC1-OC2	I O	ST —	Compare Fault A input (for Compare channels 1, 2, 3 and 4). Compare outputs.
OSC1 OSC2	I I/O	ST/CMOS —	Oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog= Analog input  
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O= Output  
 I = Input P = Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# sPIC30F2010

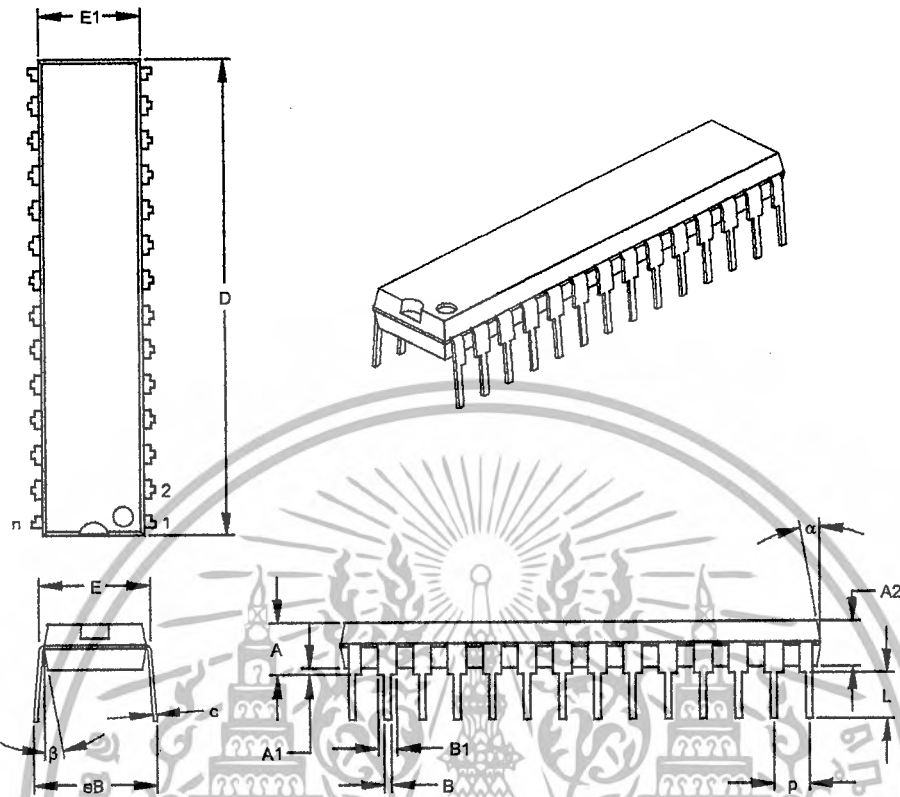
**BLE 1-1: PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)**

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
SD	I/O	ST	In-Circuit Serial Programming data input/output pin.
SC	I	ST	In-Circuit Serial Programming clock input pin.
30-RB5	I/O	ST	PORTB is a bidirectional I/O port.
13-RC14	I/O	ST	PORTC is a bidirectional I/O port.
0-RD1	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port.
0-RE5, E8	I/O	ST	PORTE is a bidirectional I/O port.
2, RF3	I/O	ST	PORTF is a bidirectional I/O port.
CK1	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI™ #1.
DI1	I	ST	SPI #1 Data In.
DO1	O	—	SPI #1 Data Out.
S1	I	ST	SPI #1 Slave Synchronization.
CL	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I <sup>2</sup> C.
CA	I/O	ST	Synchronous serial data input/output for I <sup>2</sup> C.
OSCO	O	—	32 kHz low power oscillator crystal output.
OSCI	I	ST/CMOS	32 kHz low power oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
1CK	I	ST	Timer1 external clock input.
2CK	I	ST	Timer2 external clock input.
1RX	I	ST	UART1 Receive.
1TX	O	—	UART1 Transmit.
1ARX	I	ST	UART1 Alternate Receive.
1ATX	O	—	UART1 Alternate Transmit.
DD	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
SS	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
REF+	I	Analog	Analog Voltage Reference (High) input.
REF-	I	Analog	Analog Voltage Reference (Low) input.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input  
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output  
 I = Input P = Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 28-Lead Skinny Plastic Dual In-line – 300 mil (PDIP)



Dimension Limits	Units	INCHES*			MILLIMETERS		
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
Number of Pins	n		28			28	
Pitch	p		.100			2.54	
Top to Seating Plane	A	.140	.150	.160	3.56	3.81	4.06
Molded Package Thickness	A2	.125	.130	.135	3.18	3.30	3.43
Base to Seating Plane	A1	.015			0.38		
Shoulder to Shoulder Width	E	.300	.310	.325	7.62	7.87	8.26
Molded Package Width	E1	.275	.285	.295	6.99	7.24	7.49
Overall Length	D	1.345	1.365	1.385	34.16	34.67	35.18
Tip to Seating Plane	L	.125	.130	.135	3.18	3.30	3.43
Lead Thickness	c	.008	.012	.015	0.20	0.29	0.38
Upper Lead Width	B1	.040	.053	.065	1.02	1.33	1.65
Lower Lead Width	B	.016	.019	.022	0.41	0.48	0.56
Overall Row Spacing	§ eB	.320	.350	.430	8.13	8.89	10.92
Mold Draft Angle Top	α	5	10	15	5	10	15
Mold Draft Angle Bottom	β	5	10	15	5	10	15

\* Controlling Parameter

§ Significant Characteristic

Notes:

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

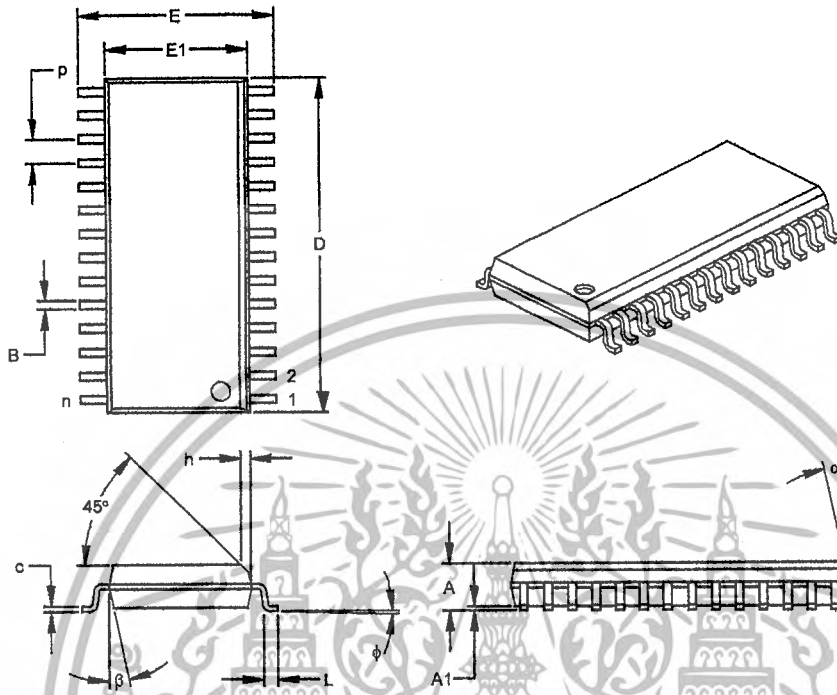
.010" (0.254mm) per side.

JEDEC Equivalent: MO-095

Drawing No. C04-070

# sPIC30F2010

8-Lead Plastic Small Outline – Wide, 300 mil (SOIC)



Dimension	Units	INCHES*			MILLIMETERS		
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
Number of Pins	n		28			28	
Pitch	p		.050			1.27	
Overall Height	A	.093	.099	.104	2.36	2.50	2.64
Molded Package Thickness	A2	.088	.091	.094	2.24	2.31	2.39
Standoff §	A1	.004	.008	.012	0.10	0.20	0.30
Overall Width	E	.394	.407	.420	10.01	10.34	10.67
Molded Package Width	E1	.288	.295	.299	7.32	7.49	7.59
Overall Length	D	.695	.704	.712	17.65	17.87	18.08
Chamfer Distance	h	.010	.020	.029	0.25	0.50	0.74
Foot Length	L	.018	.033	.050	0.41	0.84	1.27
Foot Angle Top	φ	0	4	8	0	4	8
Lead Thickness	c	.009	.011	.013	0.23	0.28	0.33
Lead Width	B	.014	.017	.020	0.36	0.42	0.51
Mold Draft Angle Top	α	0	12	15	0	12	15
Mold Draft Angle Bottom	β	0	12	15	0	12	15

\* Controlling Parameter

§ Significant Characteristic

Notes:

Dimensions D and E1 do not include mold flash or protrusions. Mold flash or protrusions shall not exceed .010" (0.254mm) per side.

JEDEC Equivalent: MS-013

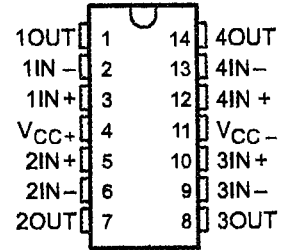
Drawing No. C04-052

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LF347, LF347B**  
**JFET-INPUT**  
**QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS**  
 SLOS013B – MARCH 1987 – REVISED AUGUST 1994

- Low Input Bias Current . . . 50 pA Typ
- Low Input Noise Current  
0.01 pA/√Hz Typ
- Low Total Harmonic Distortion
- Low Supply Current . . . 8 mA Typ
- Gain Bandwidth . . . 3 MHz Typ
- High Slew Rate . . . 13 V/μs Typ
- Pin Compatible With the LM348

D OR N PACKAGE  
(TOP VIEW)



**Description**

These devices are low-cost, high-speed, JFET-input operational amplifiers. They require low supply current yet maintain a large gain-bandwidth product and a fast slew rate. In addition, their matched high-voltage JFET inputs provide very low input bias and offset current.

The LF347 and LF347B can be used in applications such as high-speed integrators, digital-to-analog converters, sample-and-hold circuits, and many other circuits.

The LF347 and LF347B are characterized for operation from 0°C to 70°C.

**Symbol (each amplifier)**



AVAILABLE OPTIONS

T <sub>A</sub>	V <sub>IO</sub> max AT 25°C	PACKAGE	
		SMALL OUTLINE (D)	PLASTIC DIP (N)
0°C to 70°C	10 mV	LF347D	LF347N
	5 mV	LF347BD	LF347BN

The D packages are available taped and reeled. Add R suffix to the device type (e.g., LF347DR).

**absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)**

Supply voltage, V <sub>CC</sub> +	18 V
Supply voltage, V <sub>CC</sub> -	-18 V
Differential input voltage, V <sub>ID</sub>	±30 V
Input voltage, V <sub>I</sub> (see Note 1)	±15 V
Duration of output short circuit	unlimited
Continuous total power dissipation	See Dissipation Rating Table
Operating temperature range	0°C to 70°C
Storage temperature range	-65°C to 150°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C

NOTE 1: Unless otherwise specified, the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1994, Texas Instruments Incorporated



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LF347, LF347B**  
**JFET-INPUT**  
**QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS013B – MARCH 1987 – REVISED AUGUST 1994

**DISSIPATION RATING TABLE**

PACKAGE	$T_A \leq 25^\circ\text{C}$ POWER RATING	DERATING FACTOR	DERATE ABOVE $T_A$	$T_A = 70^\circ\text{C}$ POWER RATING
D	608 mW	7.6 mW/°C	61°C	608 mW
N	680 mW	N/A	N/A	680 mW

**recommended operating conditions**

	MIN	MAX	UNIT
Supply voltage, $V_{CC+}$	3.5	18	V
Supply voltage, $V_{CC-}$	-3.5	-18	V

**electrical characteristics over operating free-air temperature range,  $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$  (unless otherwise specified)**

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_A^\dagger$	LF347			LF347B			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
$V_{IO}$ Input offset voltage	$V_{IC} = 0$ , $R_S = 10\text{ k}\Omega$	25°C Full range		5 10	10 13	3 5	5 7	mV	
$\alpha_{VIO}$ Average temperature coefficient of input offset voltage	$V_{IC} = 0$ , $R_S = 10\text{ k}\Omega$			18		18		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
$I_{IO}$ Input offset current $\ddagger$	$V_{IC} = 0$	25°C 70°C		25 4	100 4	25 4	100 4	pA nA	
$I_{IB}$ Input bias current $\ddagger$	$V_{IC} = 0$	25°C 70°C		50 8	200 8	50 8	200 8	pA nA	
$V_{ICR}$ Common-mode input voltage range			$\pm 11$	-12 to 15		$\pm 11$	-12 to 15	V	
$V_{OM}$ Maximum peak output voltage swing	$R_L = 10\text{ k}\Omega$		$\pm 12$	$\pm 13.5$		$\pm 12$	$\pm 13.5$	V	
$A_{VD}$ Large-signal differential voltage	$V_O = \pm 10\text{ V}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$	25°C Full range		25 15	100 100	50 25	100 100	V/mV	
$r_i$ Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$			$10^{12}$		$10^{12}$		$\Omega$	
CMRR Common-mode rejection ratio	$R_S \leq 2\text{ k}\Omega$			70	100	80	100	dB	
kSVR Supply-voltage rejection ratio	See Note 2			70	100	80	100	dB	
$I_{CC}$ Supply current				8	11	8	11	mA	

$^\dagger$  Full range is 0°C to 70°C.

$\ddagger$  Input bias currents of a FET-input operational amplifier are normal junction reverse currents, which are temperature sensitive. Pulse techniques must be used that will maintain the junction temperatures as close to the ambient temperature as possible.

NOTE 2: Supply-voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously.

**operating characteristics,  $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$**

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$V_{O1}/V_{O2}$ Crosstalk attenuation	$f = 1\text{ kHz}$		120		dB
SR Slew rate		8	13		V/ $\mu\text{s}$
$B_1$ Unity-gain bandwidth			3		MHz
$V_n$ Equivalent input noise voltage	$f = 1\text{ kHz}$ , $R_S = 20\ \Omega$		18		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
$I_n$ Equivalent input noise current	$f = 1\text{ kHz}$		0.01		pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments and its subsidiaries (TI) reserve the right to make changes to their products or to discontinue any product or service without notice, and advise customers to obtain the latest version of relevant information to verify, before placing orders, that information being relied on is current and complete. All products are sold subject to the terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgement, including those pertaining to warranty, patent infringement, and limitation of liability.

TI warrants performance of its semiconductor products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are utilized to the extent TI deems necessary to support this warranty. Specific testing of all parameters of each device is not necessarily performed, except those mandated by government requirements.

CERTAIN APPLICATIONS USING SEMICONDUCTOR PRODUCTS MAY INVOLVE POTENTIAL RISKS OF DEATH, PERSONAL INJURY, OR SEVERE PROPERTY OR ENVIRONMENTAL DAMAGE ("CRITICAL APPLICATIONS"). TI SEMICONDUCTOR PRODUCTS ARE NOT DESIGNED, AUTHORIZED, OR WARRANTED TO BE SUITABLE FOR USE IN LIFE-SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS OR OTHER CRITICAL APPLICATIONS. INCLUSION OF TI PRODUCTS IN SUCH APPLICATIONS IS UNDERSTOOD TO BE FULLY AT THE CUSTOMER'S RISK.

In order to minimize risks associated with the customer's applications, adequate design and operating safeguards must be provided by the customer to minimize inherent or procedural hazards.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right of TI covering or relating to any combination, machine, or process in which such semiconductor products or services might be or are used. TI's publication of information regarding any third party's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

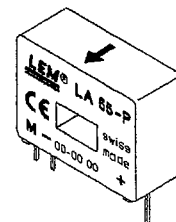
Copyright © 1998, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Current Transducer LA 55-P

$I_{PN} = 50 \text{ A}$

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed..., with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



## Electrical data

$I_N$	Primary nominal r.m.s. current	50	A				
$I_M$	Primary current, measuring range	$0 \dots \pm 70$	A				
$R_M$	Measuring resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$		$T_A = 85^\circ\text{C}$			
		$R_{M \min}$	$R_{M \max}$	$R_{M \min}$	$R_{M \max}$		
		with $\pm 12 \text{ V}$	@ $\pm 50 \text{ A}_{\max}$	10	100	60	95 $\Omega$
		with $\pm 15 \text{ V}$	@ $\pm 70 \text{ A}_{\max}$	10	50	60 <sup>1)</sup>	60 <sup>1)</sup> $\Omega$
$I_N$	Secondary nominal r.m.s. current	@ $\pm 50 \text{ A}_{\max}$	50	160	135	155 $\Omega$	
		@ $\pm 70 \text{ A}_{\max}$	50	90	135 <sup>2)</sup>	135 <sup>2)</sup> $\Omega$	
$C_N$	Conversion ratio	1 : 1000					
$V_C$	Supply voltage ( $\pm 5\%$ )	$\pm 12 \dots 15$	V				
$I_C$	Current consumption	$10 (@ \pm 15 \text{ V}) + I_s$	mA				
$V_d$	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn	2.5	kV				

## Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Printed circuit board mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

## Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

## Accuracy - Dynamic performance data

$\epsilon$	Accuracy @ $I_{PN}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 15 \text{ V} (\pm 5\%)$	$\pm 0.65$	%
$\epsilon_L$	Linearity	@ $\pm 12 \dots 15 \text{ V} (\pm 5\%)$	$\pm 0.90$	%
			$< 0.15$	%
$I_0$	Offset current @ $I_p = 0$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	Max	mA
$I_{0M}$	Residual current <sup>3)</sup> @ $I_p = 0$ , after an overload of $3 \times I_{PN}$		$\pm 0.3$	mA
$\Delta I_0$	Thermal drift of $I_0$	$0^\circ\text{C} \dots +70^\circ\text{C}$	$\pm 0.1$	$\pm 0.5$
		$-25^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$	$\pm 0.1$	$\pm 0.6$
$t_{ra}$	Reaction time @ 10 % of $I_{p \max}$	$< 500$	ns	
$t_r$	Response time @ 90 % of $I_{p \max}$	$< 1$	$\mu\text{s}$	
$di/dt$	di/dt accurately followed	$> 200$	A/ $\mu\text{s}$	
$f$	Frequency bandwidth (-1 dB)	DC .. 200	kHz	

## Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

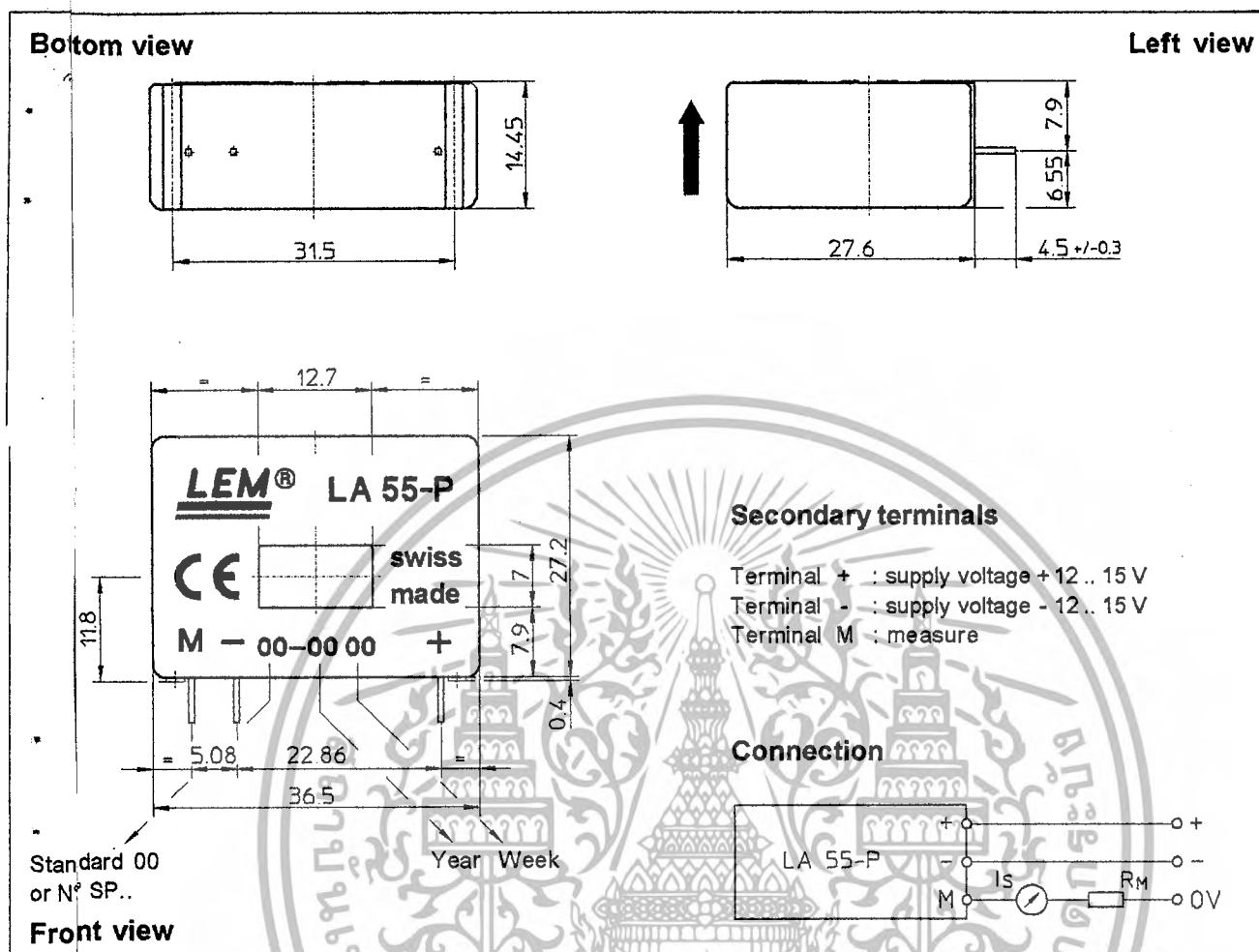
## General data

$T_A$	Ambient operating temperature	$-25 \dots +85$	$^\circ\text{C}$
$T_s$	Ambient storage temperature	$-40 \dots +90$	$^\circ\text{C}$
$R_s$	Secondary coil resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$	80 $\Omega$
		$T_A = 85^\circ\text{C}$	85 $\Omega$
$m$	Mass	18	g
	Standards <sup>4)</sup>	EN 50178	

- Notes :
- 1) Measuring range limited to  $\pm 60 \text{ A}_{\max}$
  - 2) Measuring range limited to  $\pm 55 \text{ A}_{\max}$
  - 3) Result of the coercive field of the magnetic circuit
  - 4) A list of corresponding tests is available

980706/8

## Dimensions LA 55-P (in mm, 1 mm = 0.0394 inch)



### Mechanical characteristics

- General tolerance
- Primary through-hole
- Fastening & connection of secondary

± 0.2 mm  
 12.7 x 7 mm  
 3 pins  
 0.63 x 0.56mm  
 0.9 mm

Recommended PCB hole

### Remarks

- $I_s$  is positive when  $I_p$  flows in the direction of the arrow.
- Temperature of the primary conductor should not exceed 90°C.
- Dynamic performances ( $di/dt$  and response time) are best with a single bar completely filling the primary hole.
- In order to achieve the best magnetic coupling, the primary windings have to be wound over the top edge of the device.
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This datasheet has been downloaded from:

[www.DatasheetCatalog.com](http://www.DatasheetCatalog.com)

Datasheets for electronic components.



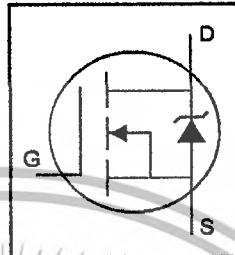
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# International IR Rectifier

# IRFP460P

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Solder Plated for Reflowing

HEXFET® Power MOSFET

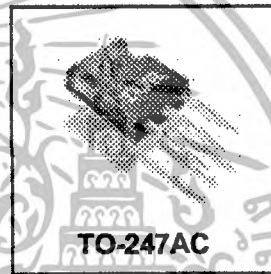


$V_{DSS} = 500V$
$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$
$I_D = 20A$

### Description

Third Generation HEXFET®s from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

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



The solder plated version of the TO-247 allows the reflow soldering of the package heatsink to a substrate material.

### Absolute Maximum Ratings

Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	20	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	13	
$I_{DM}$	80	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	280	W
	2.2	W/°C
$V_{GS}$	$\pm 20$	V
$E_{AS}$	960	mJ
$I_{AR}$	20	A
$E_{AR}$	28	mJ
dv/dt	3.5	V/ns
$T_J$	-55 to + 150	°C
$T_{STG}$		
	300 (1.6mm from case )	
	10 lbf·in (1.1N·m)	
	230 (Time above 183 °C should not exceed 100s)	

### Thermal Resistance

Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	—	40	

www.irf.com

1

01/17/01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IRFP460P

International  
IGR 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	500	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	$V/^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	$\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 12A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	13	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 12A$
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	$\mu A$	$V_{DS} = 500V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 400V, V_{GS} = 0V, T_J = 125^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	210	nC	$I_D = 20A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	29		$V_{DS} = 400V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110		$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	$V_{DD} = 250V$
$t_r$	Rise Time	—	59	—		$I_D = 20A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	110	—		$R_G = 4.3\Omega$
$t_f$	Fall Time	—	58	—		$R_D = 13\Omega$ , See Fig. 10 ④
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
$L_S$	Internal Source Inductance	—	13	—		
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	4200	—	pF	$V_{GS} = 0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	870	—		$V_{DS} = 25V$
$C_{rss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—		$f = 1.0\text{MHz}$ , See Fig. 5

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80		
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 20A, V_{GS} = 0V$ ④
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 20A$
$Q_{rr}$	Reverse Recover Charge	—	5.7	8.6	$\mu C$	$di/dt = 100A/\mu s$ 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  $T_J = 25^\circ\text{C}$ ,  $L = 4.8\text{mH}$ ,  $R_G = 25\Omega$ ,  $I_{AS} = 20A$ . (See Figure 12)
- ③  $I_{GD} \leq 20A$ ,  $di/dt \leq 160A/\mu s$ ,  $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$ ,  $T_J \leq 150^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width  $\leq 300\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .

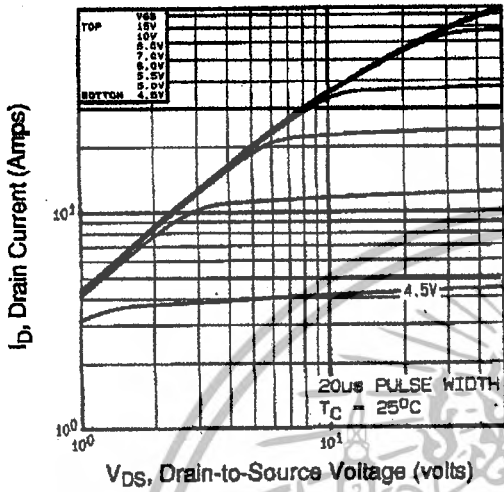


Fig 1. Typical Output Characteristics

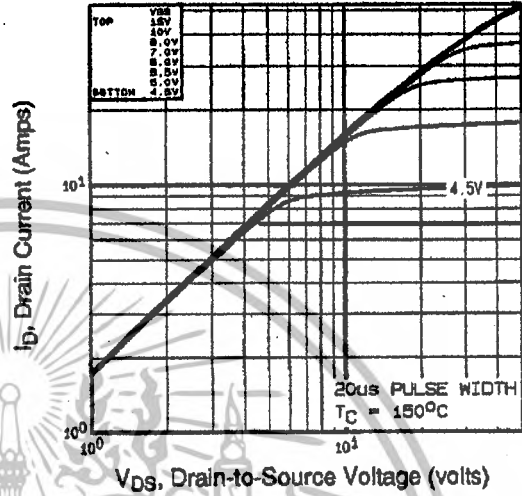


Fig 2. Typical Output Characteristics

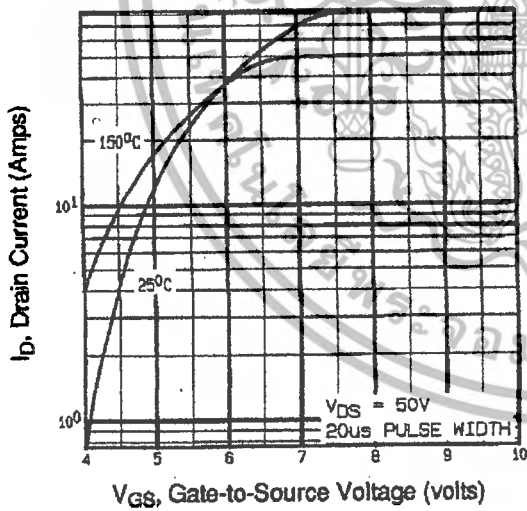


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

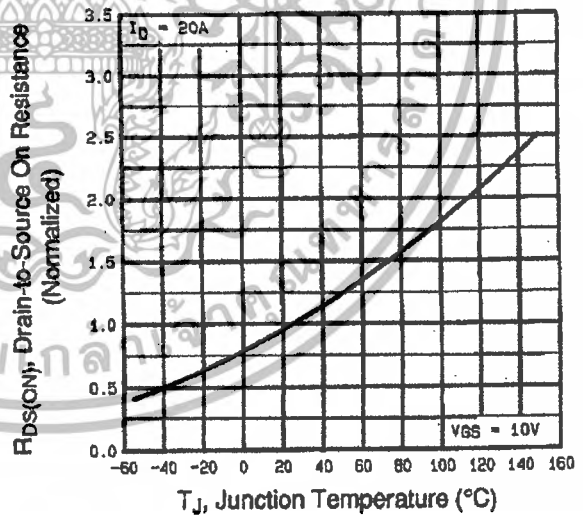


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IRFP460P

International  
IOR Rectifier

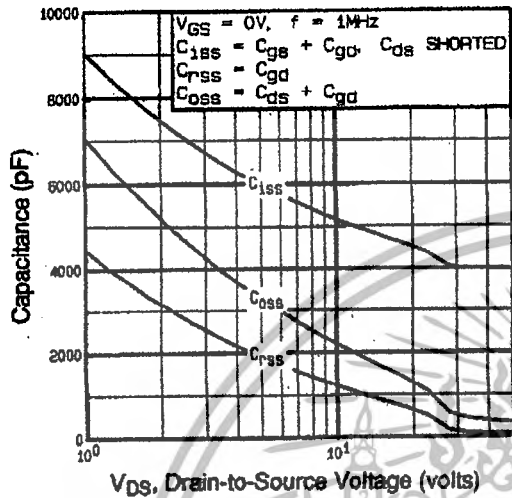


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

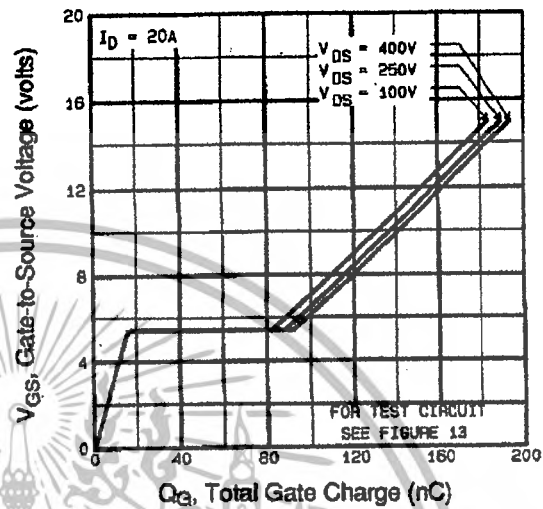


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

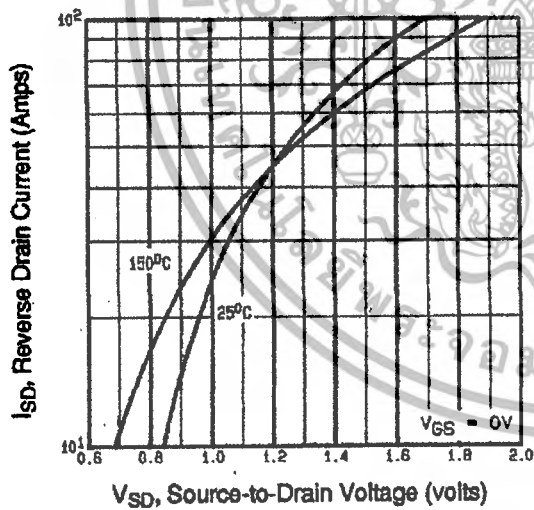


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

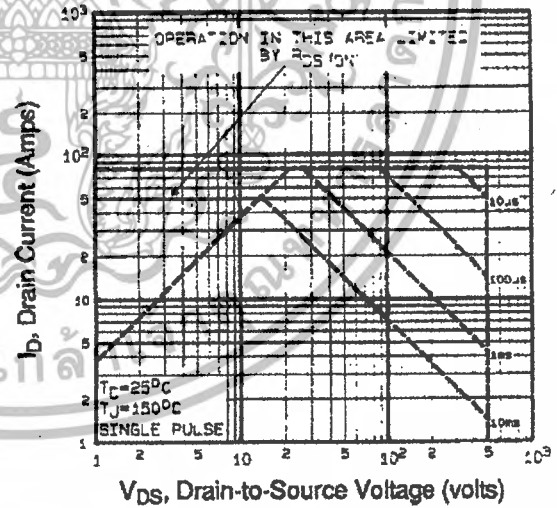


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

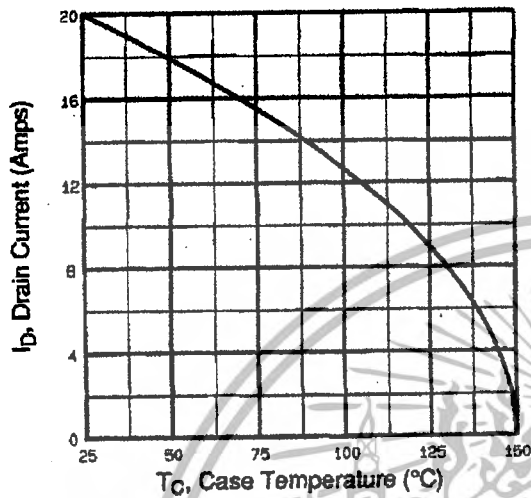


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

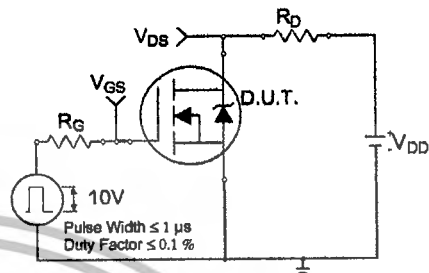


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

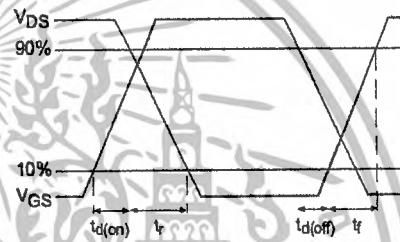


Fig 10b. Switching Time Waveforms

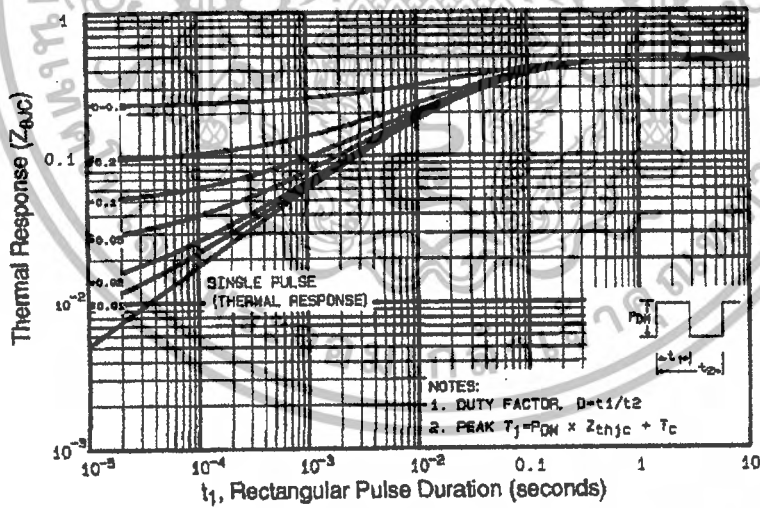


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

# IRFP460P

International  
**IOR** Rectifier

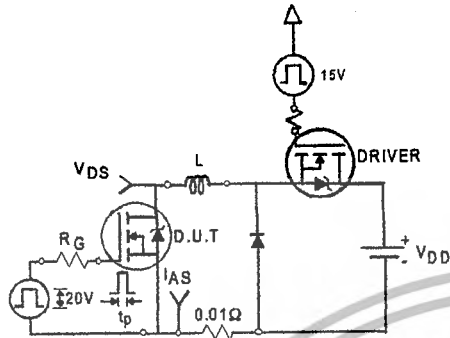


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

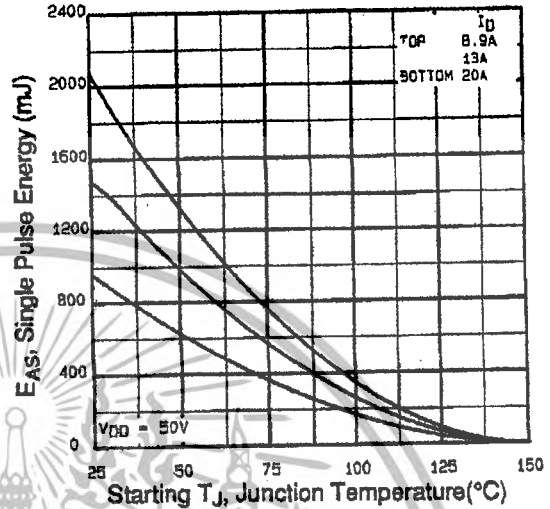


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

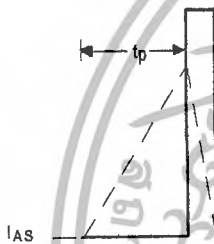


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

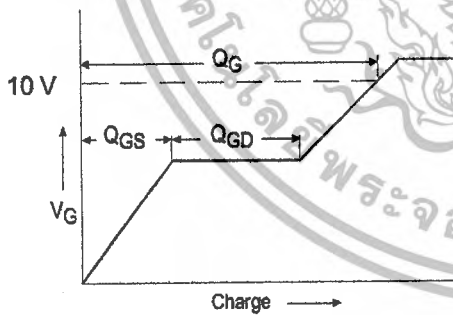


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

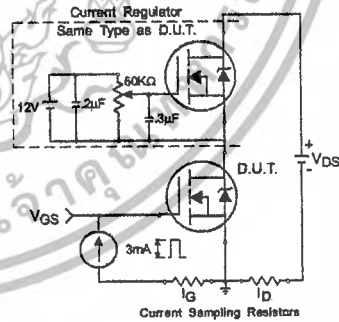
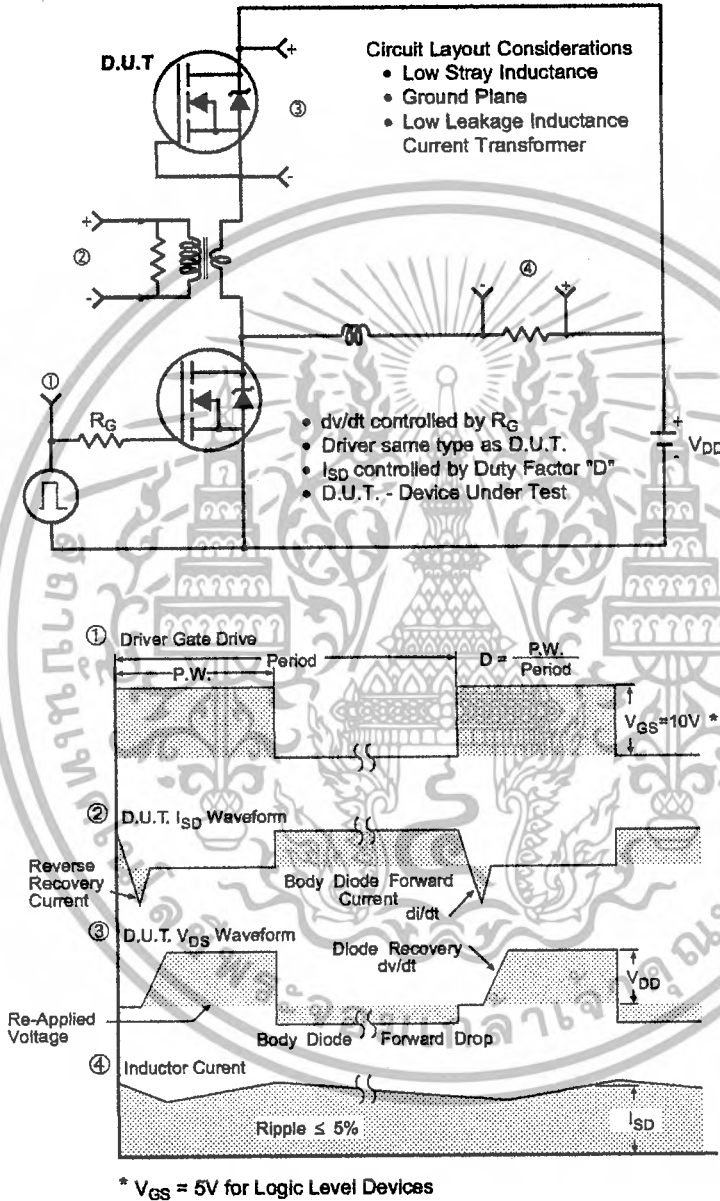


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit



**Fig 14. For N-Channel HEXFET<sup>®</sup>s**

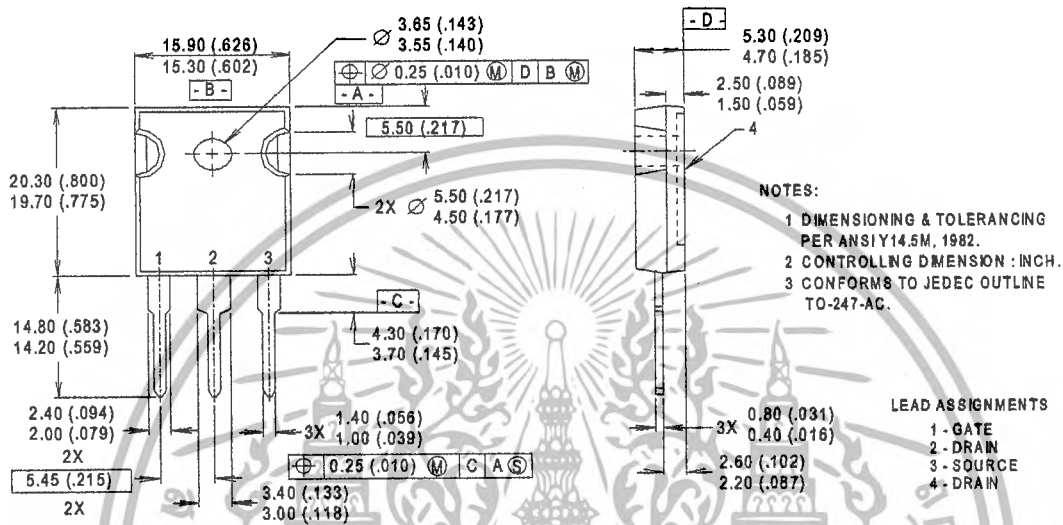
# IRFP460P

International  
**IOR** Rectifier

## Package Outline

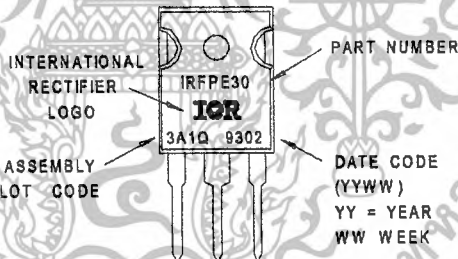
### TO-247AC

Dimensions are shown in millimeters (inches)



### Part Marking Information TO-247AC

EXAMPLE: THIS IS AN IRFPE30  
WITH ASSEMBLY  
LOT CODE 3A1Q



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](http://www.irf.com) for sales contact information.12/00

[www.irf.com](http://www.irf.com)

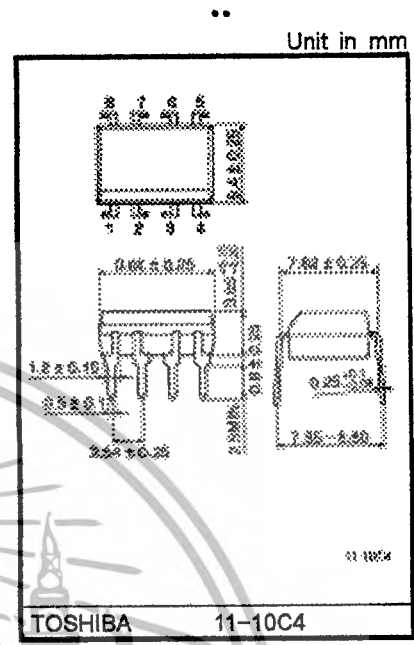
# TLP250

- Transistor Inverter
- Inverter For Air Conditionor
- IGBT Gate Drive
- Power MOS FET Gate Drive

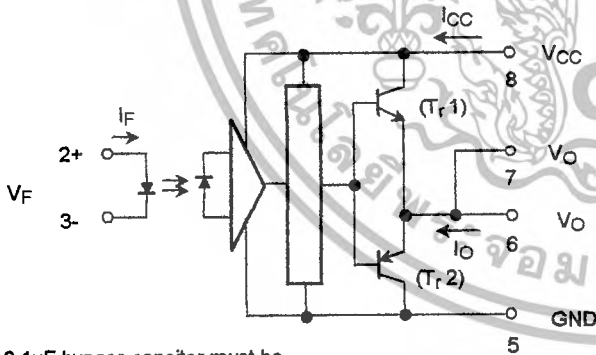
The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.  
 This unit is 8-lead DIP package.  
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current:  $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current ( $I_{CC}$ ):  $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage ( $V_{CC}$ ):  $10\text{--}35\text{V}$
- Output current ( $I_O$ ):  $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time ( $t_{pLH}/t_{pHL}$ ):  $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage:  $2500\text{V}_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type
  - VDE approved: DIN VDE0884/06.92, certificate No.76823
  - Maximum operating insulation voltage:  $630\text{V}_{\text{PK}}$
  - Highest permissible over voltage:  $4000\text{V}_{\text{PK}}$

**(Note)** When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"  
 Creepage distance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$   
 Clearance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$

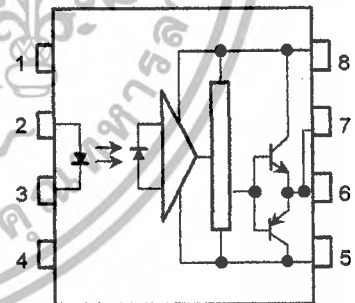


**Schematic**



A  $0.1\mu\text{F}$  bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5. (See Note 5).

**Pin Configuration (top view)**



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

**Truth Table**

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**bsolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)**

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	I <sub>F</sub>	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	ΔI <sub>F</sub> / ΔTa	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	I <sub>FPT</sub>	1	A	
	Reverse voltage	V <sub>R</sub>	5	V	
	Junction temperature	T <sub>J</sub>	125	°C	
Detector	"H" peak output current (P <sub>W</sub> ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	I <sub>OPH</sub>	-1.5	A	
	"L" peak output current (P <sub>W</sub> ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	I <sub>OPL</sub>	+1.5	A	
	Output voltage	V <sub>O</sub>	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Supply voltage	V <sub>CC</sub>	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	ΔV <sub>O</sub> / ΔTa	-0.73	V / °C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	ΔV <sub>CC</sub> / ΔTa	-0.73	V / °C	
	Junction temperature	T <sub>J</sub>	125	°C	
Operating frequency (Note 3)	f	25	kHz		
Operating temperature range	T <sub>opr</sub>	-20~85	°C		
Storage temperature range	T <sub>stg</sub>	-55~125	°C		
Lead soldering temperature (10 s) (Note 4)	T <sub>sol</sub>	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 5)	BV <sub>S</sub>	2500	V <sub>rms</sub>		

Note 1: Pulse width P<sub>W</sub> ≤ 1μs, 300pps

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform, I<sub>OPH</sub> ≤ -1.0A( ≤ 2.5μs), I<sub>OPL</sub> ≤ +1.0A( ≤ 2.5μs)

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

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

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

**Recommended Operating Conditions**

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

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

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

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

\* All typical values are at Ta = 25°C (\*1): Duration of I<sub>O</sub> time ≤ 50μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Characteristic	Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Propagation delay time	L→H	t <sub>pLH</sub>	I <sub>F</sub> = 8mA (Note 7) V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω	—	0.15	0.5	μs
	H→L	t <sub>pHL</sub>		—	0.15	0.5	
Output rise time	t <sub>r</sub>	6		—	—	—	
Output fall time	t <sub>f</sub>			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output	C <sub>MH</sub>	7	V <sub>CM</sub> = 600V, I <sub>F</sub> = 8mA V <sub>CC</sub> = 30V, Ta = 25°C	-5000	—	—	V / μs
Common mode transient immunity at low level output	C <sub>ML</sub>	7	V <sub>CM</sub> = 600V, I <sub>F</sub> = 0mA V <sub>CC</sub> = 30V, Ta = 25°C	5000	—	—	V / μs

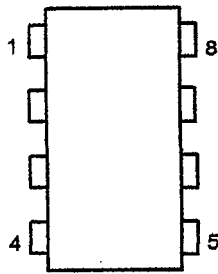
\* All typical values are at Ta = 25°C

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

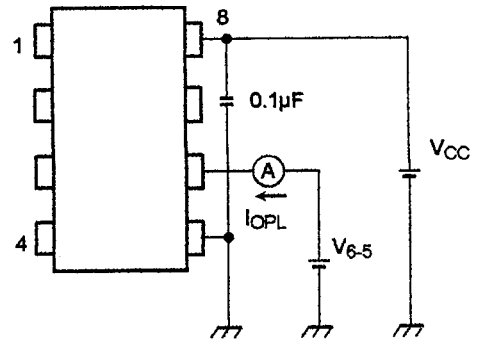


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

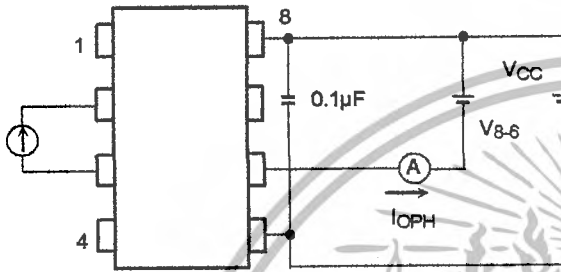
Test Circuit 1 :



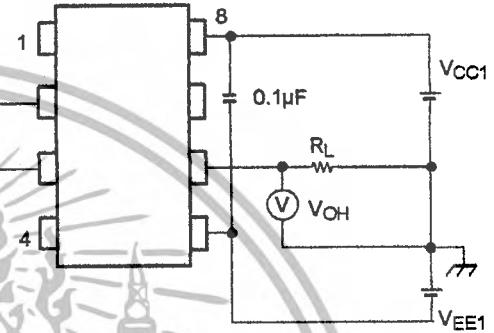
Test Circuit 2 : IOPL



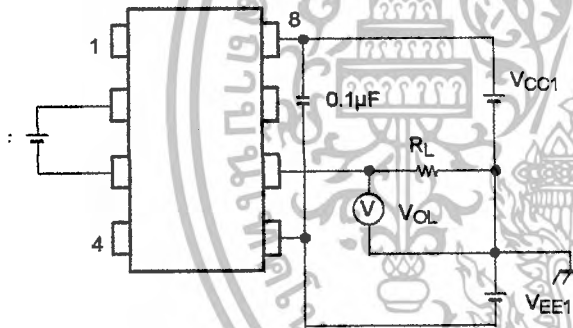
Test Circuit 3 : IOPH



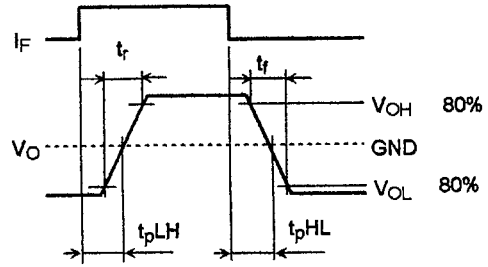
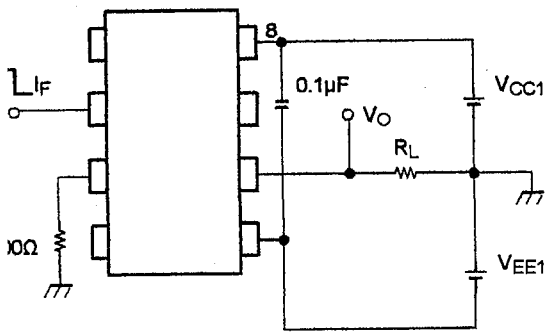
Test Circuit 4 : VOH



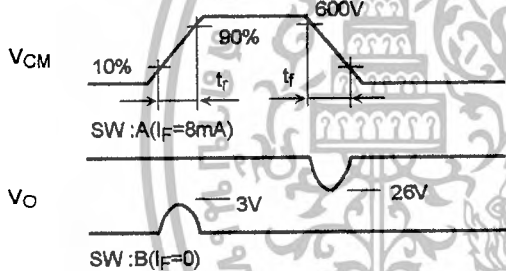
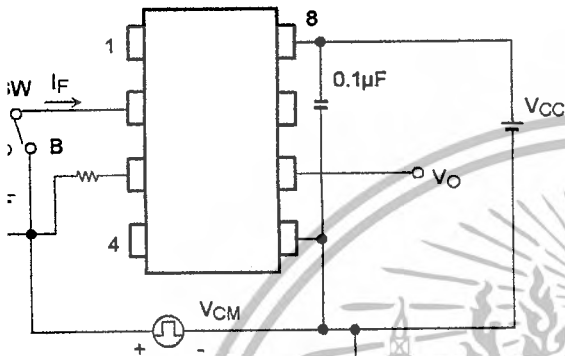
Test Circuit 5 : VOL



Circuit 6:  $t_{pLH}$ ,  $t_{pHL}$ ,  $t_r$ ,  $t_f$



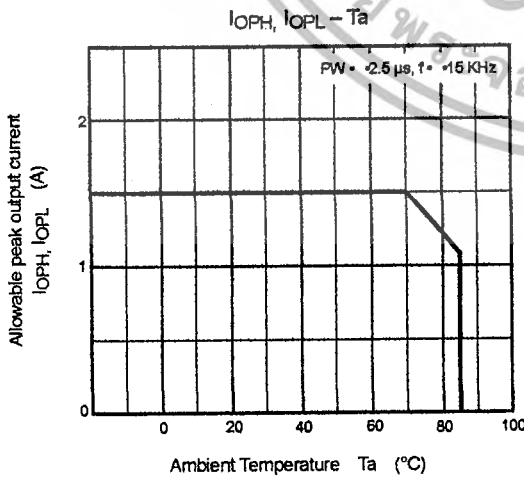
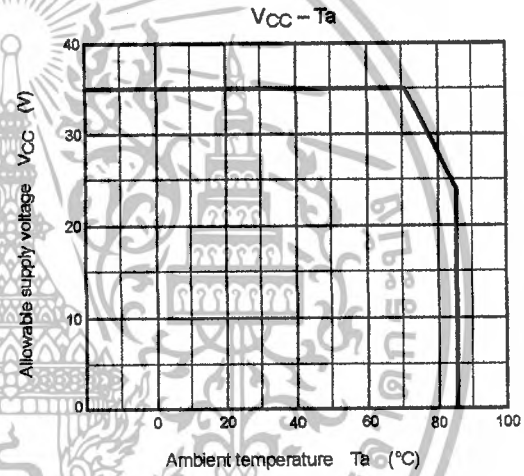
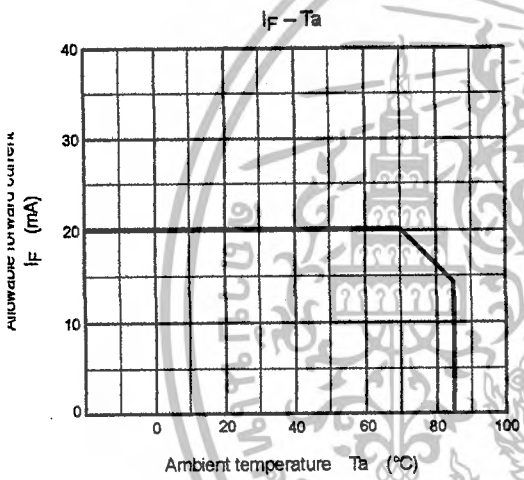
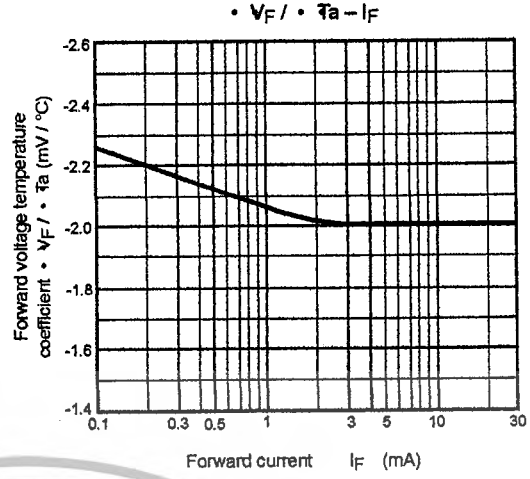
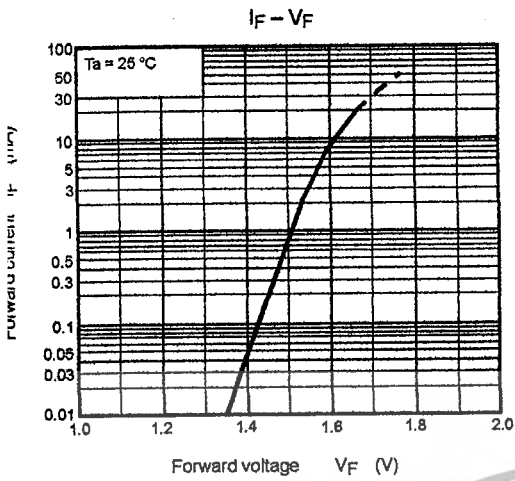
Circuit 7:  $C_{MH}$ ,  $C_{ML}$



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

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

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

# MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

Preferred Devices

## SWITCHMODE™ Power Rectifiers

These state-of-the-art devices are a series designed for use in switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes.

### Features

- Ultrafast 35 and 60 Nanosecond Recovery Time
- 175°C Operating Junction Temperature
- Popular TO-220 Package
- High Voltage Capability to 600 V
- Low Forward Drop
- Low Leakage Specified @ 150°C Case Temperature
- Current Derating Specified @ Both Case and Ambient Temperatures
- Pb-Free Packages are Available\*

### Mechanical Characteristics:

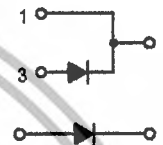
- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 1.9 Grams (Approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds



ON Semiconductor®

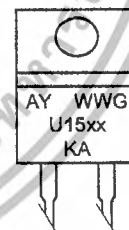
<http://onsemi.com>

## ULTRAFAST RECTIFIERS 15 AMPERES, 100-600 VOLTS



TO-220AC  
CASE 221B  
PLASTIC

### MARKING DIAGRAM



- A = Assembly Location
- Y = Year
- WW = Work Week
- G = Pb-Free Package
- U15xx = Device Code  
xx = 10, 15, 20, 40 or 60
- KA = Diode Polarity

### ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 6 of this data sheet.

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

\*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

## MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	MUR					Unit
		1510	1515	1520	1540	1560	
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	$V_{RRM}$ $V_{RWM}$ $V_R$	100	150	200	400	600	V
Average Rectified Forward Current (Rated $V_R$ )	$I_{F(AV)}$	15 @ $T_C = 150^\circ\text{C}$			15 @ $T_C = 145^\circ\text{C}$		A
Peak Rectified Forward Current (Rated $V_R$ , Square Wave, 20 kHz)	$I_{FRM}$	30 @ $T_C = 150^\circ\text{C}$			30 @ $T_C = 145^\circ\text{C}$		A
Nonrepetitive Peak Surge Current (Surge applied at rated load conditions halfwave, single phase, 60 Hz)	$I_{FSM}$	200			150		A
Operating Junction Temperature and Storage Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-65 to +175					$^\circ\text{C}$

Maximum ratings are those values beyond which device damage can occur. Maximum ratings applied to the device are individual stress limit values (not normal operating conditions) and are not valid simultaneously. If these limits are exceeded, device functional operation is not implied, damage may occur and reliability may be affected.

## THERMAL CHARACTERISTICS

Parameter	Symbol	Value	Unit
Maximum Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	1.5	$^\circ\text{C/W}$

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	1520	1540	1560	Unit
Maximum Instantaneous Forward Voltage (Note 1) ( $I_F = 15\text{ A}, T_C = 150^\circ\text{C}$ ) ( $I_F = 15\text{ A}, T_C = 25^\circ\text{C}$ )	$V_F$	0.85 1.05	1.12 1.25	1.20 1.50	V
Maximum Instantaneous Reverse Current (Note 1) (Rated DC Voltage, $T_C = 150^\circ\text{C}$ ) (Rated DC Voltage, $T_C = 25^\circ\text{C}$ )	$I_R$	500 10	500 10	1000 10	$\mu\text{A}$
Maximum Reverse Recovery Time ( $I_F = 1.0\text{ A}, di/dt = 50\text{ A}/\mu\text{s}$ )	$t_{rr}$	35		60	ns

1. Pulse Test: Pulse Width = 300  $\mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2.0\%$ .

# MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

## MUR1510, MUR1515, MUR1520

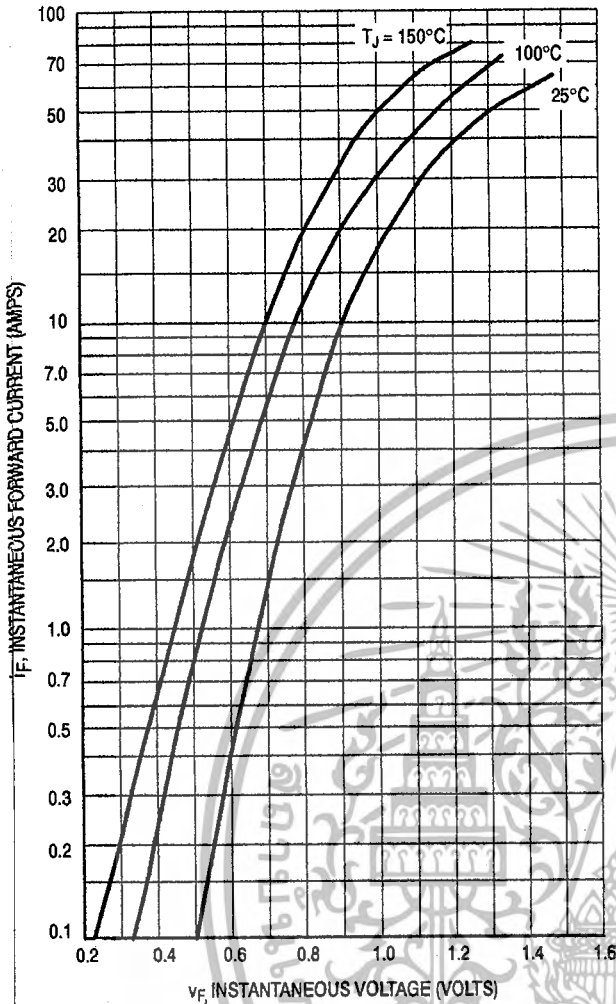


Figure 1. Typical Forward Voltage

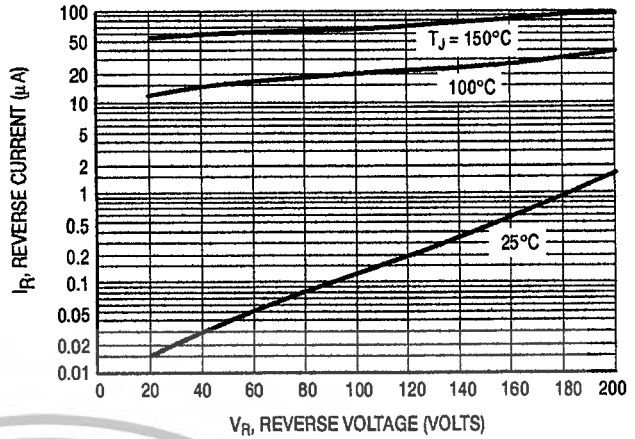


Figure 2. Typical Reverse Current

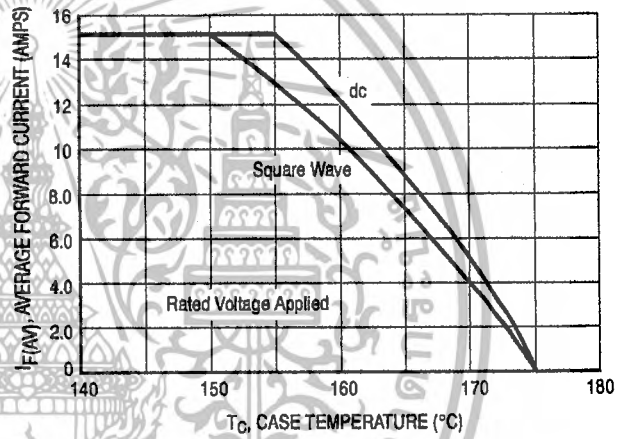


Figure 3. Current Derating, Case

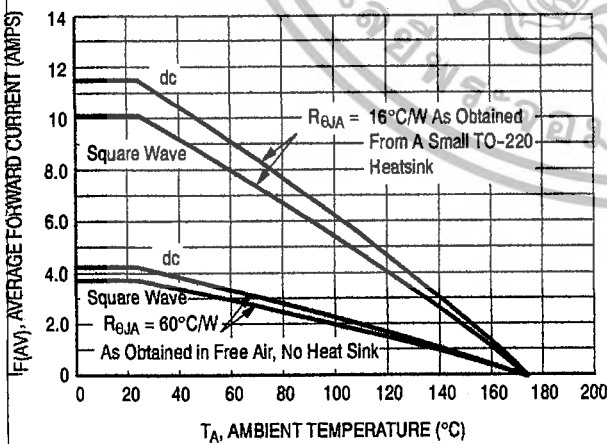


Figure 4. Current Derating, Ambient

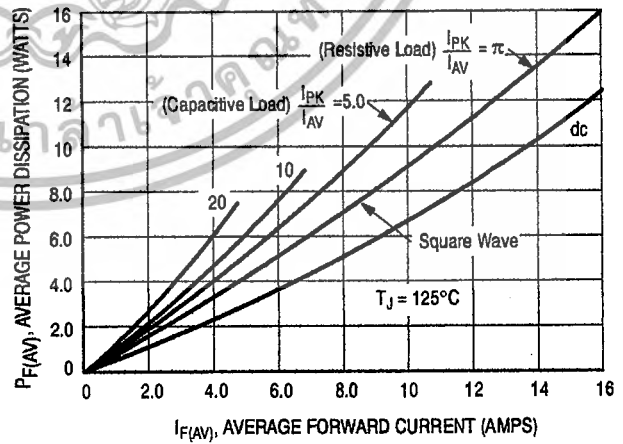


Figure 5. Power Dissipation

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

MUR1540

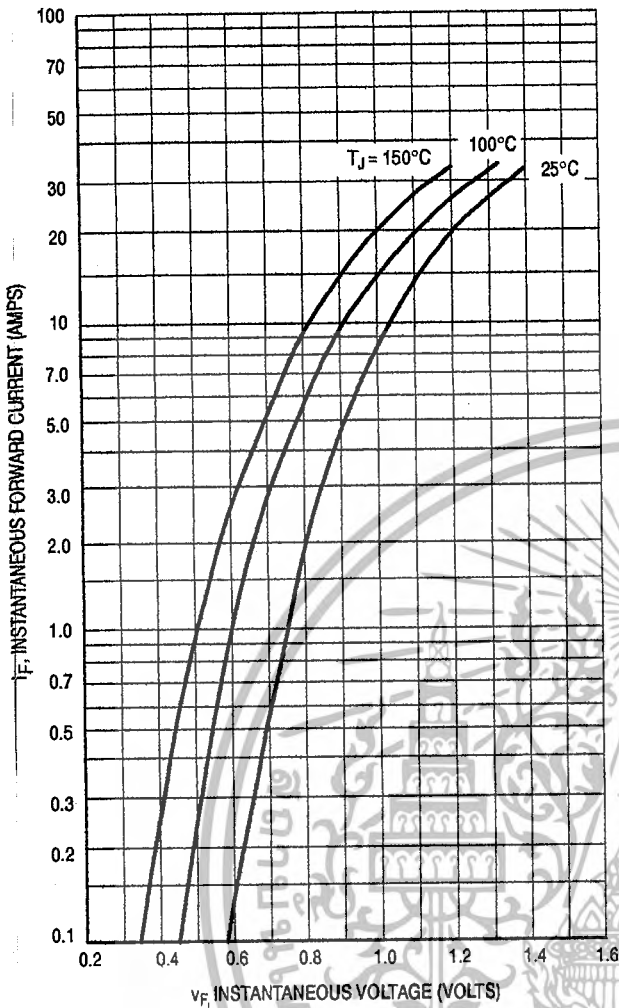


Figure 6. Typical Forward Voltage

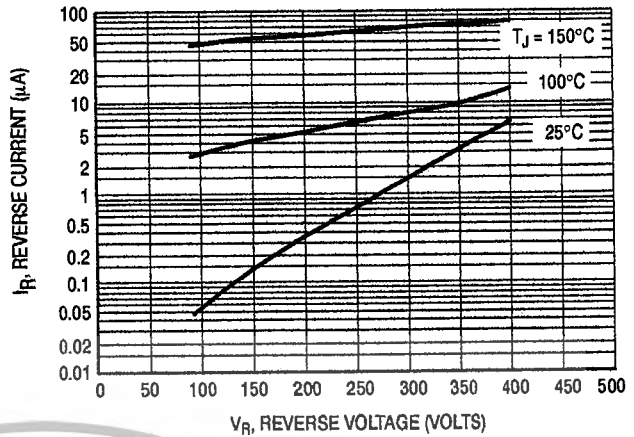


Figure 7. Typical Reverse Current

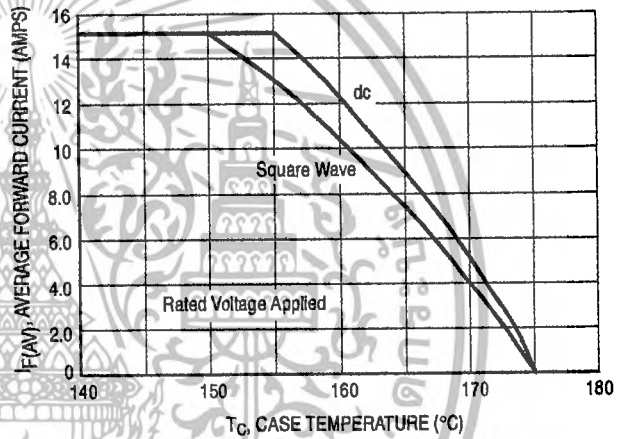


Figure 8. Current Derating, Case

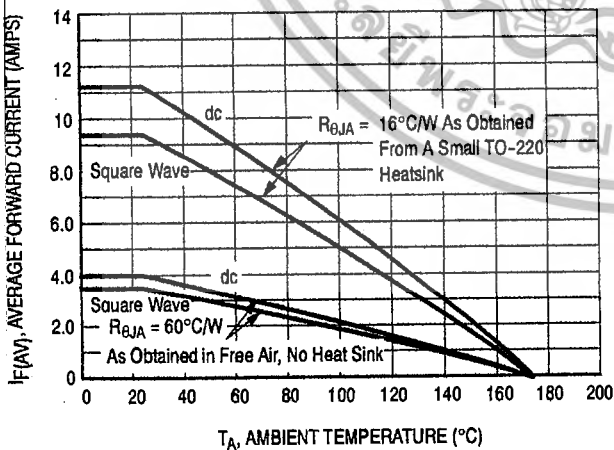


Figure 9. Current Derating, Ambient

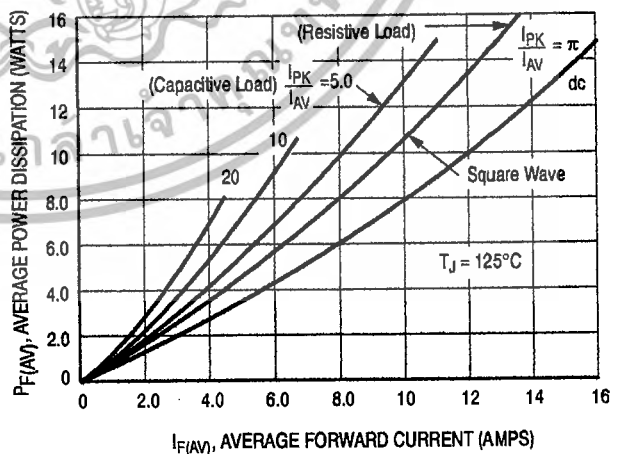


Figure 10. Power Dissipation

MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

MUR1560

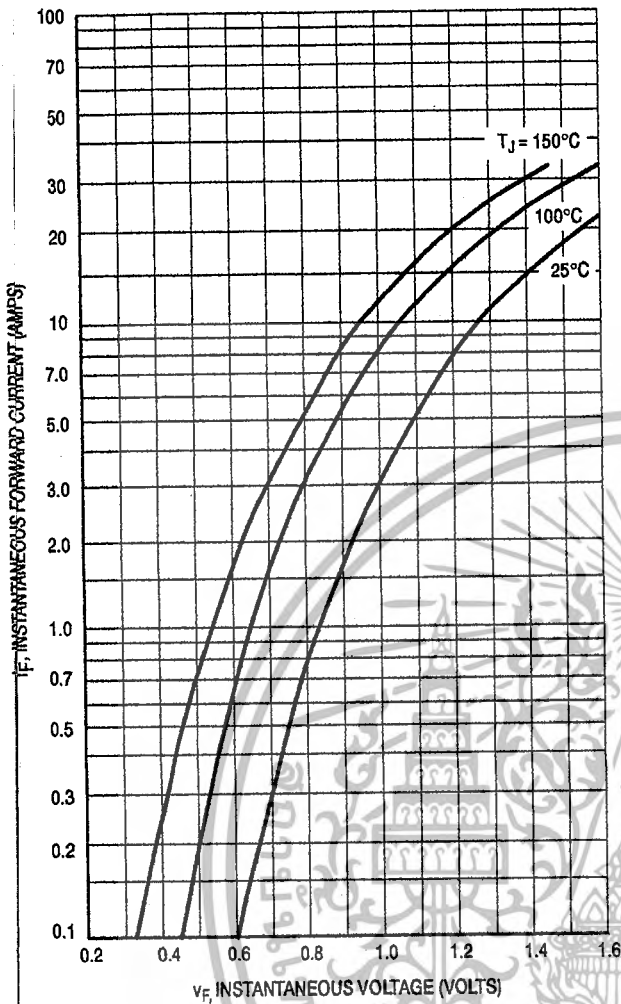


Figure 11. Typical Forward Voltage

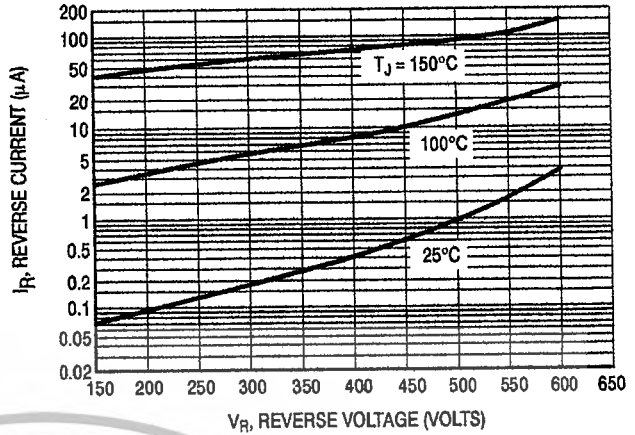


Figure 12. Typical Reverse Current

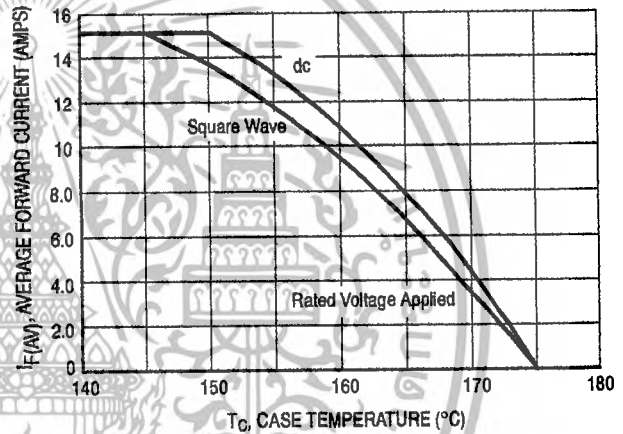


Figure 13. Current Derating, Case

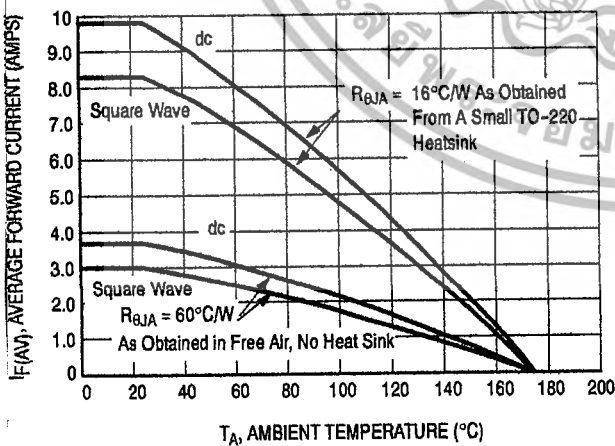


Figure 14. Current Derating, Ambient

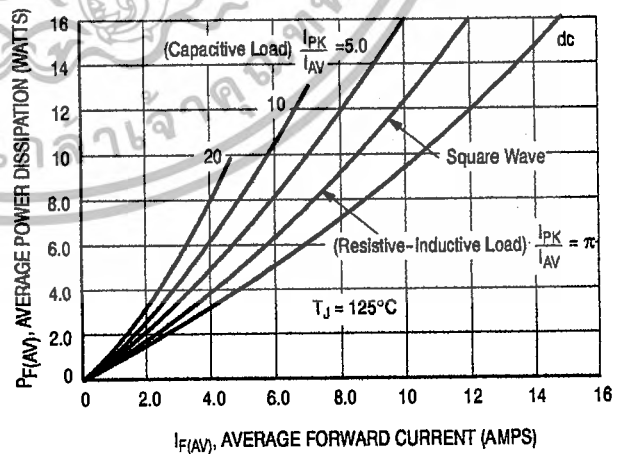


Figure 15. Power Dissipation

# MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

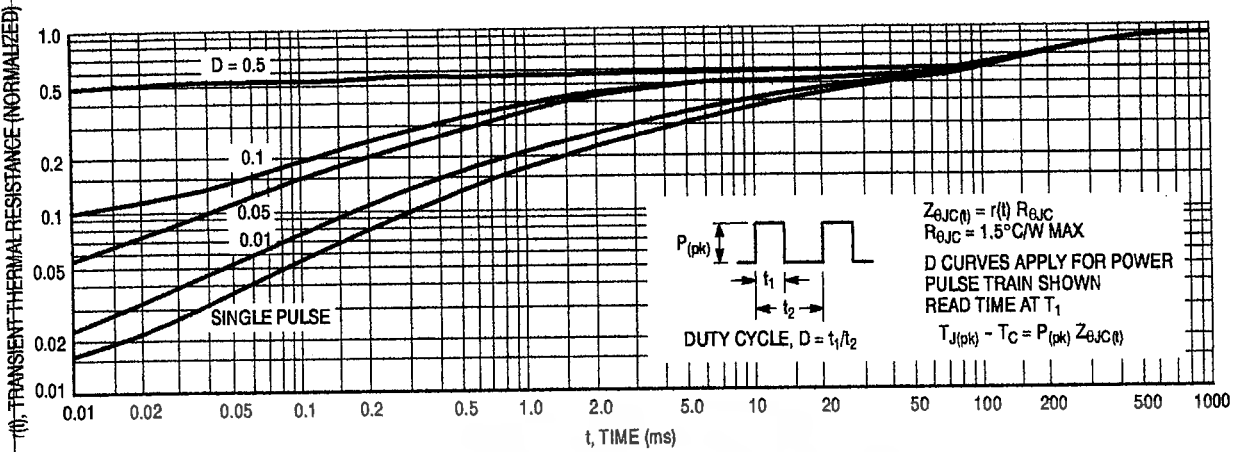


Figure 16. Thermal Response

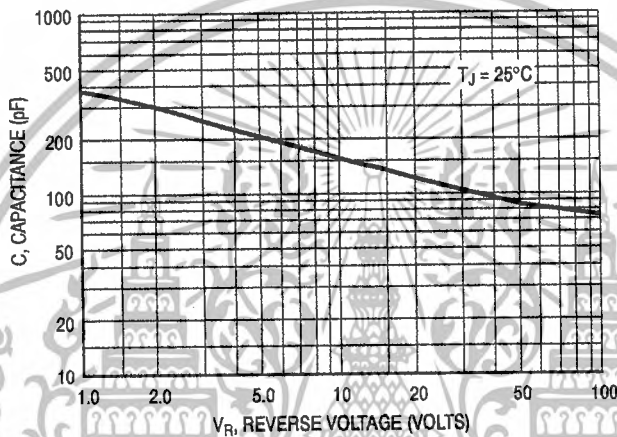


Figure 17. Typical Capacitance

## ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping†
MUR1510	TO-220	50 Units / Rail
MUR1510G	TO-220 (Pb-Free)	
MUR1515	TO-220	
MUR1515G	TO-220 (Pb-Free)	
MUR1520	TO-220	
MUR1520G	TO-220 (Pb-Free)	
MUR1540	TO-220	
MUR1540G	TO-220 (Pb-Free)	
MUR1560	TO-220	
MUR1560G	TO-220 (Pb-Free)	

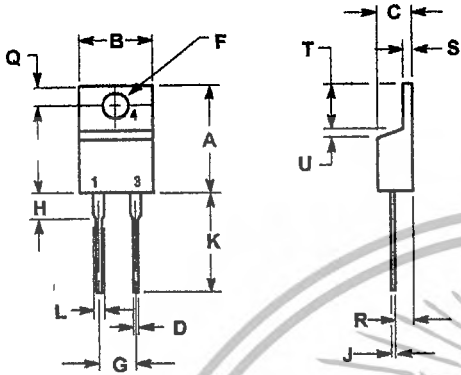
†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

## PACKAGE DIMENSIONS

### TO-220 TWO-LEAD CASE 221B-04 ISSUE D



- NOTES:  
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.  
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.595	0.620	15.11	15.75
B	0.380	0.405	9.65	10.29
C	0.160	0.180	4.06	4.82
D	0.025	0.035	0.64	0.89
F	0.142	0.147	3.61	3.73
G	0.190	0.210	4.83	5.33
H	0.110	0.130	2.79	3.30
J	0.018	0.025	0.46	0.64
K	0.500	0.562	12.70	14.27
L	0.045	0.060	1.14	1.52
Q	0.100	0.120	2.54	3.04
R	0.080	0.110	2.04	2.79
S	0.045	0.055	1.14	1.39
T	0.235	0.255	5.97	6.48
U	0.000	0.050	0.000	1.27

SWITCHMODE is a trademark of Semiconductor Components Industries, LLC.

ON Semiconductor and are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

#### PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:  
Literature Distribution Center for ON Semiconductor  
P.O. Box 61312, Phoenix, Arizona 85082-1312 USA  
Phone: 480-829-7710 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada  
Fax: 480-829-7709 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada  
Email: [orderlit@onsemi.com](mailto:orderlit@onsemi.com)

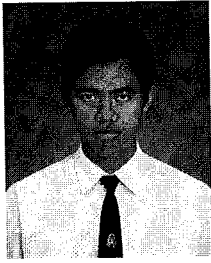
N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free  
USA/Canada  
Japan: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center  
2-9-1 Kamimeguro, Meguro-ku, Tokyo, Japan 153-0051  
Phone: 81-3-5773-3850

ON Semiconductor Website: <http://onsemi.com>  
Order Literature: <http://www.onsemi.com/litorder>  
For additional information, please contact your local Sales Representative.

MUR1520/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายกฤษฎดา ไกรสมดี

เกิดวันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529

สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจาก

โรงเรียนวัดมโนรม จังหวัดชลบุรี

สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจาก

โรงเรียนชลราษฎรอำรุง จังหวัดชลบุรี

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2548 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงไฟฟ้ากำลัง ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม Microsoft Office ทักษะภาษาต่างประเทศ ภาษาอังกฤษ ฝึกงานที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ระหว่างวันที่ 1 เมษายน - 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2551



นายกิตติศักดิ์ ไพแก้ว

เกิดวันที่ 17 เมษายน พ.ศ. 2529

สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจาก

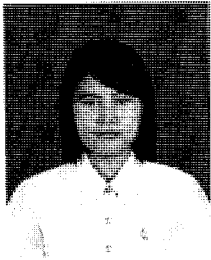
โรงเรียนปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจาก

โรงเรียนปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

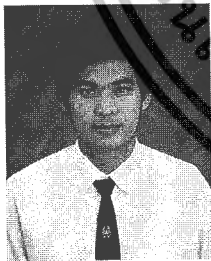
เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2548 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงไฟฟ้ากำลัง ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม Microsoft Office ทักษะภาษาต่างประเทศ ภาษาอังกฤษ ฝึกงานที่บริษัทจาร์ตินแมททีสัน (ประเทศไทย) จำกัด ระหว่างวันที่ 1 เมษายน - 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นางสาวชนิดา ชูดพิมาย  
เกิดวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2528  
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจาก  
โรงเรียนลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์  
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจาก  
โรงเรียนลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2548 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงไฟฟ้ากำลัง ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม Microsoft Office ทักษะภาษาต่างประเทศ ภาษาอังกฤษ ฝึกงานที่ บริษัทการบินไทย จำกัด (มหาชน) ระหว่างวันที่ 1 เมษายน - 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2551



นายชวัล ค้างศิษา  
เกิดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529  
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้นจาก  
โรงเรียนมัธยมตระการ จังหวัดอุบลราชธานี  
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจาก  
โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช จังหวัดอุบลราชธานี

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2548 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงไฟฟ้ากำลัง ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม Microsoft Office ทักษะภาษาต่างประเทศ ภาษาอังกฤษ ฝึกงานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ระหว่างวันที่ 1 เมษายน - 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้