

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การศึกษาและสร้างมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์และชุดขับเคลื่อน**  
**Study and Construction of a Switched-Reluctance Machine and its drive**



โดย  
นาย สวการย์ ศรีแสงเพ็ญ  
นาย สุธธิ ลิ้มปนชัยพรกุล  
นาย สุธธิคุณ วิเขตกิจ  
นาย สุรศักดิ์ เมืองแก้ว

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

81808

b. 119 36344  
i.....

**ปฏิญานินพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา**  
**วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**  
**สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ปีการศึกษา 2550**  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การศึกษาและสร้างมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์และชุดขับเคลื่อน  
Study and Construction of a Switched-Reluctance Machine and its drive



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. สุพัฒน์

กิตติรัตน์สัจจา

ดร. สมภาพ

ผลไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและสร้างมอเตอร์ สวิตซ์รีลักแตนซ์และชุดขับเคลื่อน

Study and Construction of a Switched-Reluctance Machine and its drive

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย สวการย์ ศรีแสงเพ็ญ
  2. นาย สุทธิ ลิ้มปนชัยพรกุล
  3. นาย สุทธิคุณ วิเขตกิจ
  4. นาย สุรศักดิ์ เมืองแก้ว

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุวัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา )

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ดร. สมภพ ผลไม้ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาและสร้างมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ และชุดขับเคลื่อน

นาย สวการย์	ศรีแสงเพ็ญ	
นาย สุทธิ	ลิมปนชัยพรกุล	
นาย สุทธิคุณ	วิเขตกิจ	
นาย สุรศักดิ์	เมืองแก้ว	
ผศ.ดร. สุพัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร. สมภพ	ผลไม้	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550		

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้ในอุตสาหกรรมต่างๆจะเห็นได้ว่ามอเตอร์เป็นองค์ประกอบในการขับเคลื่อนกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม ซึ่งในปฏิญานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอ การศึกษาและสร้างมอเตอร์และชุดขับเคลื่อน มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ฟิ่งได้รับความสนใจในหมู่นักวิจัยและอุตสาหกรรมในช่วงไม่กี่ปีสิบปีที่ผ่านมา ถึงแม้ว่าจะเป็นมอเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นซึ่งโดยมีโครงสร้างที่ง่าย แต่การควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานได้นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน เช่น จำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อป้อนพลังงานให้กับเฟสต่างๆได้อย่างเหมาะสม เป็นต้น แต่ในปัจจุบันอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดที่เล็กและถูกลง อีกทั้งยังมีความก้าวหน้าทางด้านอุปกรณ์ควบคุม จึงทำให้มอเตอร์เป็นตัวเลือกหนึ่งในการนำมาใช้งานทดแทนมอเตอร์ประเภทอื่นๆ

ดังนั้นในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นไปที่การเสนอแนวทางการออกแบบ อธิบายการทำงานในส่วนต่างๆ มีผลการทดลองจริงและเก็บผลการทดลองในส่วนต่างๆไว้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นในโอกาสต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Study and Construction of a Switched – Reluctance Machine and its Drive

Sawakarn

Srisangpen

Suthi

Limpanachaipornkul

Suthikun

Wikhetkit

Surasak

Muangkaew

Asst.Prof.Dr.Supat

Kittiratsatcha Advisor

Dr. Sompob

Polmai Advisor

2007

### ABSTRACT

These days, motor is one of the most important parts of machines that drive the industrial process. This thesis presents the study and construction of the switched reluctance motor and its drive.

Since decades ago, the switched reluctance motor has just been interesting among researchers and industries. Although a switched-reluctance motor has the very simple structure, it's still difficult and complicated to control its operation such as, being installed at the exactly right and proper position to distribute the current phases.

Nowadays the electronic devices are smaller and cheaper. So they are one of choices to replace the other types of motors. This thesis emphasizes presenting the switched reluctance motor design approach, describing how it works and showing the significant values of its operation and can be used to develop into more efficient motor.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการรู้สึกซาบซึ้งต่อความกรุณาที่ ผศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตนัสัจจา และ ดร.สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ เพื่อให้โครงการมีความก้าวหน้า เรื่อยมา ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ให้ความรู้แก่คณะผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่าน เหล่านี้ โครงการนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ พี่เอก พี่มน พี่บอล และพวกพี่ๆที่ห้อง PEARL LAB และคณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ (PEARL LAB) ที่คอยเอาใจใส่ และคอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆมาโดยตลอด รวมถึงเพื่อนๆห้องโครงการอื่นๆที่คอย สอบถามถึงความก้าวหน้าของโครงการ และให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ

และที่สำคัญโครงการนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้เลยถ้าปราศจากพ่อและแม่ ที่คอย สนับสนุนไม่ว่าจะเป็นทางด้านทุนทรัพย์ หรือการให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำโครงการนี้หวังว่าทุกท่านที่ได้กล่าวมา คงมีความสุข และประสบความสำเร็จในหน้าที่การงาน รวมถึงการดำเนินชีวิต โดยคณะผู้จัดทำหวังว่าอนาคตถ้ามีโอกาส หน้า คงได้ร่วมงานกับทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้นนี้อีกต่อไป

ขอขอบคุณ  
คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ชื่อโครงการ	1
1.2 ส่วนนำ	1
1.3 วัตถุประสงค์และผลงานที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ผลที่ได้รับจากการศึกษาและวิจัยในงานนี้	2
1.5 ขอบเขตของโครงการ	2
1.6 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	3
1.7 แผนการดำเนินโครงการ	4
1.8 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญาพันธ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ส่วนนำ	6
2.2 ทฤษฎีที่ 1 (วงจรมุมลย์ทางแม่เหล็ก)	6
2.3 ทฤษฎีที่ 2 วงจรขับเคลื่อน	17
บทที่ 3 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบ	19
3.1 การวาดโครงสร้างมอเตอร์	19
3.2 การกำเนิดเมช	25
3.3 การแก้ปัญหา	25
3.4 การดูผลเฉลย	26
3.5 ตัวอย่างผลจากการ simulation ของตำแหน่ง Unaligned	27
3.6 ตัวอย่างผลจากการ simulation ที่ตำแหน่ง Aligned	28
บทที่ 4 การออกแบบมอเตอร์และชุดขับเคลื่อน	31
4.1 แรงบิด	31
4.2 การคำนวณจำนวนรอบ	32
4.3 ความกว้างของช่องอากาศ	35
4.4 ความลึกของ slot ของโรเตอร์	36
4.5 ความหนาของโรเตอร์ Yoke	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา	36
4.7 ความหนาของสเตเตอร์ Yoke	37
4.8 ความลึกของ Slot ของสเตเตอร์	37
4.9 ดัลล์ลูกปืน (Bearing)	37
4.10 เพลลาโรเตอร์ (Shaft)	38
4.11 ฝาครอบมอเตอร์ (Endbell)	38
4.12 การออกแบบวงจรขับเคลื่อน	39
4.13 วงจรขับเคลื่อน	40
บทที่ 5 ผลการทดลอง	41
5.1 การทดลองที่ 1 สัญญาณ encoder	41
5.2 การทดลองที่ 2 การรับค่าสัญญาณ encoder ด้วย dsPIC30F2010	42
5.3 การทดลองที่ 3 การขับมอเตอร์เฟสด้วยสัญญาณ encoder และ current sensor	42
5.4 การทดลองที่ 4 การขับเคลื่อนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา	45
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	48
6.1 วิเคราะห์ผลของโครงการ	48
6.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไขปัญหา	48
6.3 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์	49
6.4 แนวทางในการพัฒนา	49
บรรณานุกรม	50
ภาคผนวก ก รูปชิ้นงาน	51
ภาคผนวก ข โปรแกรม	62
ภาคผนวก ค Data Sheet	68
ประวัติผู้เขียน	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 1.1 วงจรคอนเวอเตอร์	4
รูปที่ 2.1 แสดงวงจรสมมุทธ์ทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก	6
รูปที่ 2.2 แสดงแกนเหล็กที่มีวัตตุสองชนิดวางแบบอนุกรม	7
รูปที่ 2.3 การต่อค้ำรีลักแตนซ์	8
รูปที่ 2.4 แสดงแกนเหล็กที่มีวัตตุสองชนิดวางแบบขนาน	8
รูปที่ 2.5 การต่อค้ำรีลักแตนซ์แบบขนาน	9
รูปที่ 2.6 กราฟ Magnetizing	10
รูปที่ 2.7 มอเตอร์แบบ 12/8 ที่ตำแหน่ง Aligned	10
รูปที่ 2.8 กราฟ Magnetizing แสดงตำแหน่ง Aligned และ Unaligned	11
รูปที่ 2.9 มอเตอร์แบบ 12/8 ที่ตำแหน่ง Unaligned	12
รูปที่ 2.10 แสดงกราฟค่าความเหนี่ยวนำและแรงบิดเมื่อป้อนกระแสเข้าขดลวดเฟส	13
รูปที่ 2.11 แสดงค่าพลังงานสะสมและ Co-energy	14
รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Co-energy	15
รูปที่ 2.13 กราฟ Magnetizing แบบเชิงเส้น	15
รูปที่ 2.14 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตซ์ต่อเฟส	17
รูปที่ 2.15 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตซ์ต่อเฟสขณะเพิ่มพลังงาน	17
รูปที่ 2.16 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตซ์ต่อเฟสขณะลดพลังงาน	18
รูปที่ 2.17 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตซ์ต่อเฟสขณะลดพลังงาน	18
รูปที่ 3.1 หน้าต่างหลักของ FEMM	19
รูปที่ 3.2 หน้าต่างเลือกประเภทของปัญหา	20
รูปที่ 3.3 หน้าต่างกำหนดพารามิเตอร์หลัก	20
รูปที่ 3.4 แสดงโรเตอร์และสเตเตอร์	20
รูปที่ 3.5 หน้าต่างของคุณสมบัติของวัตตุ	21
รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดคุณสมบัติให้กับส่วนต่างๆของมอเตอร์ที่เลือกไว้	21
รูปที่ 3.7 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของส่วนต่างๆ	22
รูปที่ 3.8 การกำหนดค่ากระแสเฟส	22
รูปที่ 3.9 การกำหนดกระแสให้กับขดลวด	23
รูปที่ 3.10 หน้าต่างแสดงรูปวาดมอเตอร์พร้อมที่จะหาผลตอบ	23
รูปที่ 3.11 การกำหนด Boundary Condition	24
รูปที่ 3.12 การตั้งค่า Boundary ให้กับขอบนอกของสเตเตอร์	24
รูปที่ 3.13 เมชที่สร้างจากเครื่องกำเนิดเมช	25
รูปที่ 3.14 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กสมตักย์	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 3.15 แสดงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	26
รูปที่ 3.16 Torque ที่ตำแหน่ง Unaligned	27
รูปที่ 3.17 Torque ที่ตำแหน่ง 12.25 องศา	27
รูปที่ 3.18 Torque ที่ได้จากการทดลอง	28
รูปที่ 3.19 Inductance ที่ตำแหน่ง Aligned	28
รูปที่ 3.20 Inductance ที่ตำแหน่ง unaligned	29
รูปที่ 3.21 กราฟแสดง Inductance	29
รูปที่ 4.1 แสดงค่าแรงบิด ณ ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆ	32
รูปที่ 4.2 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเฟส	33
รูปที่ 4.3 แสดงมิติของโรเตอร์	35
รูปที่ 4.4 ดลับลูกปืน	37
รูปที่ 4.5 แกนโรเตอร์ที่ทำการกลึงขึ้นมาใหม่	38
รูปที่ 4.6 แสดงการออกแบบของเฟลา	38
รูปที่ 4.7 ฝาครอบมอเตอร์	39
รูปที่ 4.8 วงจรขับเคลื่อน	40
รูปที่ 4.9 แสดงวงจรขับนำ IR2110	40
รูปที่ 5.1 สัญญาณ encoder เฟส A,B,INDEX	41
รูปที่ 5.2 แสดงตำแหน่งของโรเตอร์โดยแปลงมาจากสัญญาณ encoder โดยใช้ microcontroller คำนวณ	42
รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณ commutation ของทั้ง 3 เฟส A(บน) , B(กลาง) , C(ล่าง)	43
รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณขั้วเกิดเมื่อการควบคุมกระแสของเฟส A(บน) , B(กลาง) , C(ล่าง) ด้วยสัญญาณจาก microcontroller	43
รูปที่ 5.5 แสดงการควบคุมกระแสด้วยการขับนำจากมอสเฟตโดยที่สัญญาณบนแสดง กระแสเฟส และสัญญาณล่างแสดงสัญญาณขับนำ	44
รูปที่ 5.6 แสดงแรงดันตกคร่อมโหลดเทียบกับกระแสขณะลือกเฟสของมอเตอร์	44
รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณกระแสเฟสAในขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา	45
รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณกระแสเฟสAในขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนในความเร็ว500 rpm ทิศทางตามเข็มนาฬิกา	45
รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A(บน) ในขณะที่มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ที่1500 rpm กับ แรงดันตกคร่อม ขดลวดเฟส A(ล่าง)	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A(บน) ในขณะที่มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ 3900 rpm กับ แรงดันตกคร่อม ขดลวดเฟส A(ล่าง)	46
รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A(บน) ในขณะที่มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ 2000 rpm กับ สัญญาณขับมอสเฟตจาก microcontroller(ล่าง)	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1	4
ตารางที่ 2.1	6
ตารางที่ 3.1	30
ตารางที่ 4.1	32
ตารางที่ 4.2	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### 1.1 ชื่อโครงการ

การศึกษาและสร้างมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์และชุดขับเคลื่อน

(Study and Construction of a Switched - Reluctance Machine and its Drive)

### 1.2 ส่วนนำ

#### 1.2.1 ความสำคัญที่มา

มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหนึ่งที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ประกอบไปด้วยสเตเตอร์และโรเตอร์แบบขั้วยื่น มอเตอร์ชนิดนี้ถูกค้นพบมาเป็นเวลานานแล้ว แต่เพิ่งจะได้รับความสนใจในหมู่นักวิจัยและอุตสาหกรรมในช่วงไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา เพราะถึงแม้ว่าโครงสร้างของมอเตอร์จะง่าย แต่การควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานได้นั้นมีความยุ่งยาก ซับซ้อน เช่นจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อที่จะได้ป้อนพลังงานให้กับเฟสต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและถูกต้องเพื่อที่จะได้สร้างแรงบิดในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งในอดีตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังไม่พัฒนาเท่าที่ควร อีกทั้งยังมีขนาดที่ใหญ่ แต่ในปัจจุบันนั้นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและถูกลงจึงทำให้มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์เป็นตัวเลือกหนึ่งในการนำมาใช้งานทดแทนมอเตอร์ประเภทอื่นๆ

#### 1.2.2 โครงการที่นำเสนอ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการสร้างมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์การออกแบบมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์และการออกแบบวงจรควบคุม ออกแบบโดยการดูลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านภายในแกนสเตเตอร์และโรเตอร์ด้วยโปรแกรม FEMM (โปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์) โดยผู้ออกแบบจะผู้กำหนดขนาดของแรงบิดตามที่ต้องการ ส่วนในการออกแบบวงจรขับเคลื่อนสวิตซ์รีลักแตนซ์มอเตอร์แบบต่างๆจากสมการแรงบิดของมอเตอร์พบว่า แรงบิดที่เกิดขึ้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหลอยู่ในเฟสนั้นๆ แต่ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์ ( $\frac{dL}{d\theta}$ ) นั้นหมายความว่าไม่จำเป็นจะต้องมีแหล่งจ่ายที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ใช้เพียงแค่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้ ซึ่งข้อดีของการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงคือ ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กจะต่ำและทำให้การออกแบบของวงจรกำลังจะมีความง่ายขึ้น ดังนั้นวงจรกำลังสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์จะต้องมีความสามารถในการจ่ายกระแสตรง รวมทั้งมีความสามารถการควบคุมขนาดของกระแสที่ไหลในขดลวดได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 วัตถุประสงค์และผลงานที่คาดว่าจะได้รับ

#### 1.3.1 วัตถุประสงค์

1.3.1.1 เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติการทำงานของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์และชุดขับเคลื่อน

1.3.1.2 เพื่อศึกษาวิธีการนำโปรแกรม Finite Element Analysis มาใช้ในการออกแบบมอเตอร์

1.3.1.3 เพื่อสร้างมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์และชุดขับเคลื่อนตามที่ทำการออกแบบ

#### 1.4 ผลที่ได้รับจากการศึกษาและวิจัยในงานนี้

1. มีความเข้าใจหลักการพื้นฐานและการออกแบบมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

2. สามารถออกแบบและสร้างมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ซึ่งมีคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ดังนี้

- ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์เป็นแบบขั้วยื่น (Salient Poles)
- ที่แต่ละขั้วสเตเตอร์จะมีขดลวดพันอยู่จำนวน 1 ขดเท่านั้น สามารถนำขดลวดที่ขั้วต่างๆ ที่เหมาะสมมาต่อเข้าด้วยกันได้ทั้งแบบขนานหรืออนุกรม และเรียกรวมว่าขดลวดเฟส (Phase Windings)
- ลักษณะการจ่ายพลังงานเข้าขดลวดเฟสจะเป็นลักษณะการเรียงลำดับเฟส เช่น มอเตอร์แบบสามเฟส ก็จะป้อนพลังงานหรือกระแสเข้าขดลวดเฟสในลำดับเฟสเพื่อให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางที่ต้องการได้
- ในขณะที่โรเตอร์หมุนนั้น เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Flux Linkage) ของเฟสนั้นๆ จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม

จากที่กล่าวมา มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ถือว่ามีคุณสมบัติบางประการต่างจากมอเตอร์ที่เรารู้จักกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานบางงานที่ขอบเขตความสามารถของมอเตอร์ในปัจจุบันไม่สามารถทำได้ เพิ่มความสามารถของเทคโนโลยีเก่าหรือสร้างเทคโนโลยีใหม่ๆ ให้เกิดขึ้นเป็นประโยชน์ต่อไป

#### 1.5 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวกับการทำงานของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ โดยเริ่มจากการเรียนรู้พื้นฐานทางด้านวงจรแม่เหล็ก รวมถึงการอธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแม่เหล็กของมอเตอร์ที่มีผลต่อการสร้างแรงบิดและการส่งถ่ายพลังงาน

2. ศึกษาวงจรขับเคลื่อนแบบต่างๆ ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และเรียนรู้วงจรขับเคลื่อนต่างๆ ว่ามีหลักการในการใช้งานอย่างไร แต่ที่นำมาใช้คือวงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตซ์ต่อเฟส โดยที่เลือกใช้ MOSFET เป็นสวิตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.ศึกษาการออกแบบมอเตอร์ ซึ่งเป็นการเรียนรู้เบื้องต้น โดยอาศัยการออกแบบตามที่เราต้องการ โดยส่วนใหญ่แล้วจะออกแบบโดยการกำหนดค่าแรงบิดและความเร็วรอบ

4.ศึกษาการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทางระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite-Element Analysis (FEA)) เพื่อนำไปหาค่าต่างๆไม่ว่าจะเป็น การหา Torque หรือ flux density เป็นต้น เพื่อให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องมากที่สุด ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถเห็นภาพการออกแบบได้อย่างชัดเจนโดยไม่ต้องมีการสร้างมอเตอร์จริงๆขึ้นมา

5.ทำการออกแบบมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์และซบซบเคลื่อนด้วยหลักการที่ศึกษามาข้างต้น

6.ทำการสร้างมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์และซบซบเคลื่อนตามแบบที่ได้ออกแบบไว้

## 1.6 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

### 1.6.1 ศึกษาทฤษฎีของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

ทำการศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีต่างๆของมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ เพื่อให้เข้าใจ และสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการดำเนินโครงการ

### 1.6.2 ทดลองใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

ในการสร้างมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์จำเป็นต้องวิเคราะห์ค่าต่างๆ เช่นเส้นแรงแม่เหล็กแรงบิด แรงทางกล กระแสที่ใช้ในการขับเคลื่อนวงจร เพื่อที่จะให้แน่ใจได้ว่าโครงสร้างของมอเตอร์สามารถใช้ในการออกแบบได้จริง เราใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ต่างๆ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาวิธีการใช้ เครื่องมือต่างๆของโปรแกรมเพื่อนำไปในการวิเคราะห์ต่อไป

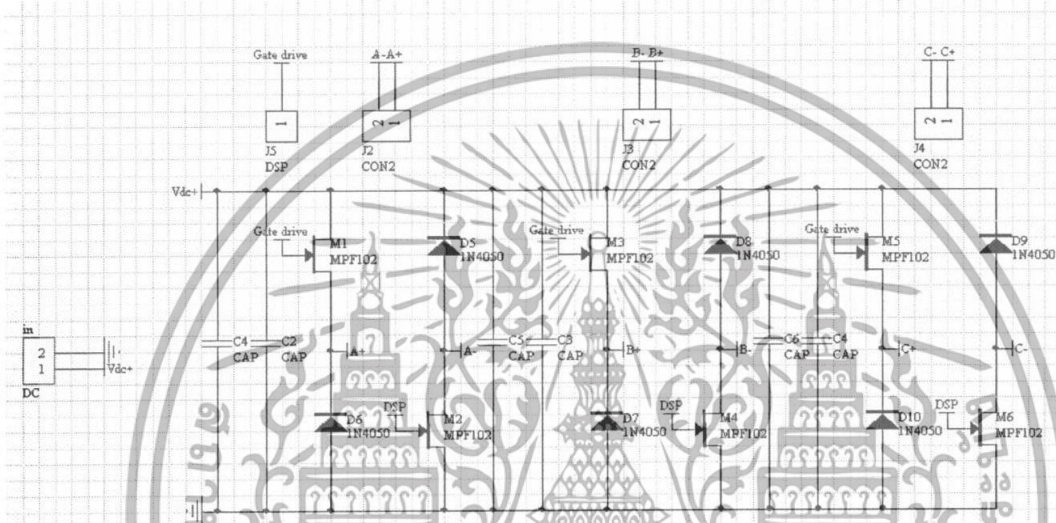
### 1.6.3 กำหนดค่าต่างๆภายในมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์

มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์สามารถทำงานได้ที่ความเร็วรอบสูง กำหนดได้จากลักษณะโครงสร้าง วัสดุ วงจรขับ พิกัดของแรงดันและกระแส เราจำเป็นต้องกำหนดค่าความเร็วรอบที่พิกัด(base speed) ระยะห่างช่องอากาศระหว่างโรเตอร์ สเตเตอร์(gap) ที่อ้างอิงจาก 0.5 เปอร์เซนต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ โดยที่อัตราส่วนระหว่างความยาวของสเตเตอร์ต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์เท่ากับ 1 แต่ถ้าอัตราส่วนนี้เปลี่ยนแปลงไป gap ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ค่าที่กำหนดจะสามารถนำไปหาค่าในส่วนของมอเตอร์คือ กระแส จำนวนรอบขดลวด และแรงดันที่พิกัดความเร็วรอบค่าหนึ่งได้ ในส่วนของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์จะหาค่ากระแสที่ใช้ป้อนอุปกรณ์และกระแสที่จะจ่ายให้กับมอเตอร์ นำไปใช้ในการกำหนดขนาดของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.4 ศึกษาและออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์

เนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับขนาดกระแสและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์ ( $\frac{dL}{d\theta}$ ) ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายที่เป็นกระแสสลับจึงเลือกใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเพราะความสูญเสียในแกนเหล็กจะต่ำและการออกแบบวงจรกำลังจะง่ายขึ้นโดยจะใช้วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟสโดยเลือกใช้ MOSFET เป็นสวิตช์เพราะมีความสามารถในการควบคุมรูปร่างของกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์

1.6.5 สร้าง ประกอบมอเตอร์

ก่อนทำการสร้างมอเตอร์ จำเป็นต้องมีการศึกษาส่วนประกอบส่วนต่างๆนอกเหนือจากส่วนที่ได้ทำการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการกำหนดขนาดต่างๆของมอเตอร์ วาดแบบและสร้างออกมา

1.7 แผนการดำเนินโครงการ

1.7.1 ฝั่งเวลาการดำเนินโครงการ

หัวข้อ (ภาคเรียนที่ 1)	มิถุนายน				กรกฎาคม				สิงหาคม				กันยายน			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ศึกษาทฤษฎีของ SRM	↔															
ศึกษาและทดลองใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์		↔														
ใช้โปรแกรมในการตรวจสอบค่าต่างๆในแบบ			↔	→												
กำหนดค่าต่างๆที่ต้องการใช้กับมอเตอร์					↔	→										
ศึกษาและออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์							↔									
ศึกษาวงจรขับเคลื่อน								↔	→							
สร้างและประกอบมอเตอร์																
ออกแบบวงจรขับเคลื่อน																
เอกสารอ้างอิง																

เอกสารอ้างอิงที่สืบค้นมาไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ออกแบบวงจรขับเคลื่อน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อ ( ภาคเรียนที่ 2 )	พฤศจิกายน				ธันวาคม				มกราคม				กุมภาพันธ์			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ศึกษาตัวควบคุม (dsPIC)			←→													
เขียนโปรแกรมควบคุมมอเตอร์			←→				→									
ทดลองใช้งานมอเตอร์								←→								
ปรับปรุงและแก้ไข									←→							
สรุปผล											←→					→

## 1.8 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิทินพันธ

### บทที่ 1 บทนำ

จะกล่าวถึงชื่อโครงการ ส่วนนำ วัตถุประสงค์ของโครงการ ผลที่คาดว่าจะได้รับจากศึกษาและวิจัย การจัดขอบเขตของโครงการ วิธีการที่ใช้ในโครงการและแผนการดำเนินงาน

### บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์สวิตช์รีลักแตซ์จะประกอบไปด้วย วงจรสมมูลย์แม่เหล็ก การถ่านอินพลังงาน แรงบิด ตำแหน่งของโรเตอร์ ณ จุด aligned และ unaligned และการใช้โปรแกรมระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์

### บทที่ 3 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบ

ในบทนี้จะเป็นการใช้โปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ในการดูผลตอบจากมิติของมอเตอร์ที่ได้ออกแบบ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถทราบตัวแปรต่างๆ อย่างใกล้เคียงเพื่อยืนยันความถูกต้อง ก่อนที่จะมีการสร้างมอเตอร์ต้นแบบ

### บทที่ 4 การออกแบบมอเตอร์และชุดขับเคลื่อน

เป็นบทที่กล่าวถึงค่าแรงบิดที่ได้จากการใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ หาตำแหน่งของโรเตอร์ และยังมีวิธีการคำนวณหาจำนวนรอบ, ความกว้างของช่องอากาศ, ความลึกของ slot โรเตอร์, ความหนาของโรเตอร์, เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา, ความลึกของ slot สเตเตอร์, ตลับลูกปืน, เพลลาโรเตอร์, ฝาครอบมอเตอร์ รวมทั้งการออกแบบวงจรขับเคลื่อน

### บทที่ 5 การทดลอง

### บทที่ 6 สรุปผล

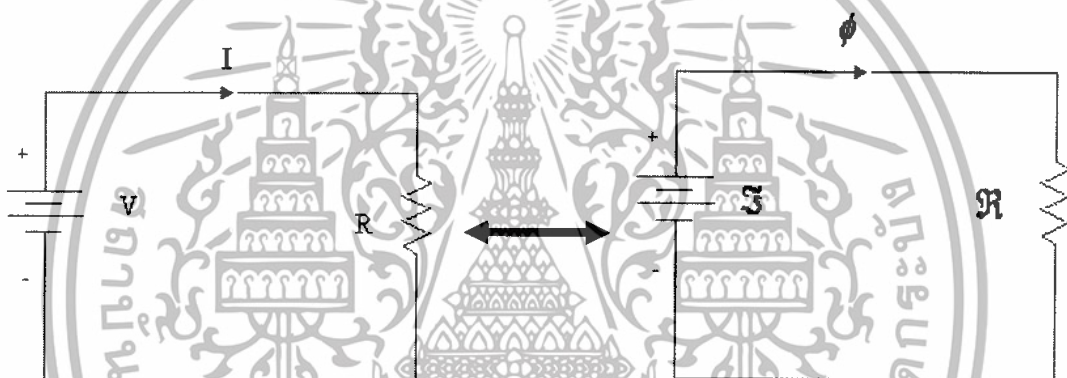
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ส่วนนำ

มอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์นั้น เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ซึ่งมีแรงบิดที่เกิดจากการที่ส่วนเคลื่อนที่ได้ หมุนไปยังตำแหน่งที่ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมากที่สุด และสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมากที่สุดที่ตำแหน่งอื่นได้โดยการเลือกป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเฟสที่อยู่ถัดไป ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยเริ่มจากวงจรสมมูลย์ทางแม่เหล็ก ตำแหน่งของโรเตอร์ที่สำคัญ และการถ่ายโอนพลังงานและการเปลี่ยนรูปพลังงาน

### 2.2 ทฤษฎีที่ 1 (วงจรสมมูลย์ทางแม่เหล็ก)



รูปที่ 2.1 แสดงวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก

วงจรสมมูลย์แม่เหล็กจะคล้ายกับวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าแบบมีเฉพาะความต้านทานดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่จะสามารถเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า เราสามารถใช้หลักการเดียวกับวงจรไฟฟ้าที่มีเฉพาะตัวต้านทาน ในการคำนวณหาผลเฉลยของวงจรได้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้า	วงจรสมมูลย์ทางแม่เหล็ก
Voltage, $v$	Magnetomotive Force (mmf) , $\mathcal{F}$
Current, $i$	Magnetic Flux, $\phi$
Resistance, $R$	รีลักแตนซ์, $\mathcal{R}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mmf จะเปรียบเสมือนกับแรงดันไฟฟ้าโดยที่

$$\mathfrak{F} = Ni \quad (2.1)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนรอบ และ  $i$  คือกระแสในขดลวด เส้นแรงแม่เหล็ก จะเปรียบเสมือนกับกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเราสามารถกำหนดนิยามของ รีลักแตนซ์ ได้ดังนี้

$$\mathcal{R} = \frac{\mathfrak{F}}{\phi} = \frac{N^2}{L} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.2)$$

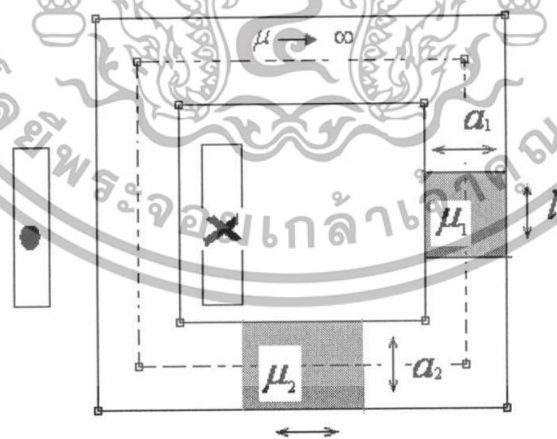
โดยที่  $l$  คือความยาวของวัตถุตามแนวของเส้นแรงแม่เหล็ก และ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่เส้นแรงแม่เหล็กไหล ดังนั้นการรวมของ รีลักแตนซ์ จึงสามารถรวมได้สองรูปแบบคือ แบบอนุกรมและแบบขนาน

กำหนดให้ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็กในรูปที่ 2.2 มีค่าเป็นอนันต์ โดยมีช่องว่างจำนวน 2 ช่อง โดยแต่ละช่องมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กไม่เท่ากัน ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่า รีลักแตนซ์ ของช่องว่างทั้งสองช่องได้ ค่า รีลักแตนซ์ ของช่องว่างที่ 1 คือ

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 a_1 D} \quad (2.3)$$

ค่า รีลักแตนซ์ ของช่องว่างที่ 2 คือ

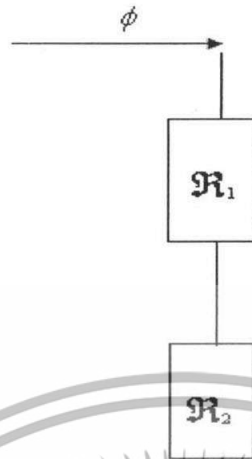
$$\mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 a_2 D} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.2 แสดงแกนเหล็กที่มีวัตถุสองชนิดวางแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากว่าค่า รีลักแตนซ์ ทั้งสองต่ออนุกรมกันอยู่ เราสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การต่อค่ารีลักแตนซ์

ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

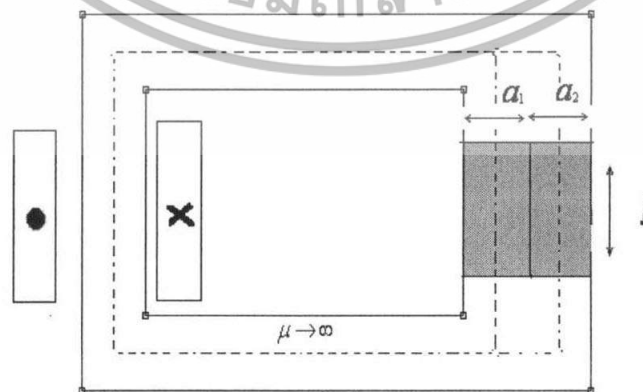
$$\phi = \frac{I}{\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2} \quad (2.5)$$

และค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2} \quad (2.6)$$

แต่ในรูปที่ 2.4 ปรากฏว่ามีช่องว่างสองช่องขนานกันอยู่ ดังนั้นการหาค่า รีลักแตนซ์รวมจึงเป็นแบบขนาน ซึ่งเราจะนิยามส่วนกลับของค่า รีลักแตนซ์ ว่าเป็นค่า Permeance  $\wp$  โดยที่

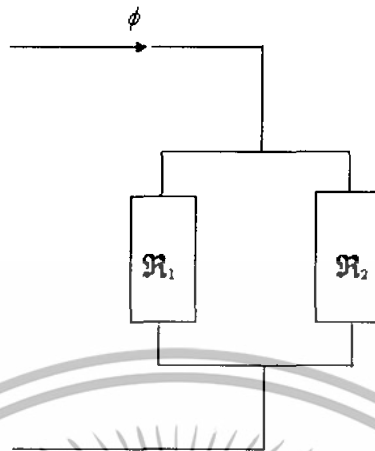
$$\wp = \frac{l}{\mathcal{R}} = \frac{\mu A}{l} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.4 แสดงแกนเหล็กที่มีวัตถุสองชนิดวางแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การต่อค่ารีลักแตนซ์แบบขนาน

ค่า รีลักแตนซ์ ของช่องว่างที่ 1 คือ

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 a_1 D} = \frac{1}{\wp_1} \quad (2.8)$$

ค่า รีลักแตนซ์ ของช่องว่างที่ 2 คือ

$$\mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 a_2 D} = \frac{1}{\wp_2} \quad (2.9)$$

เส้นแรงแม่เหล็กที่ได้คือ

$$\phi = \mathcal{N}(\wp_1 + \wp_2) \quad (2.10)$$

และค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้คือ

$$L = \frac{N\phi}{i} = N^2(\wp_1 + \wp_2) \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กราฟ Magnetizing

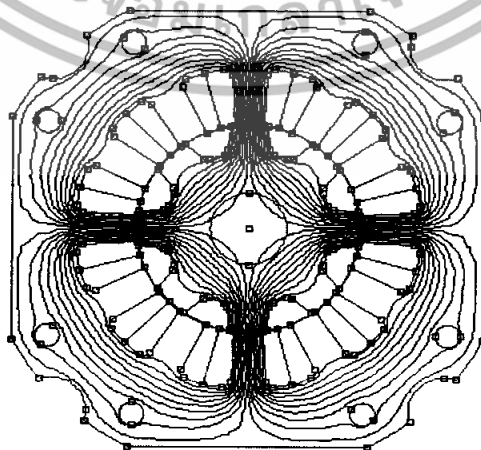
คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคล่อง  $\lambda$  ในแนวตั้งฉาก และกระแสในขดลวดเฟส  $i$  ณ ตำแหน่งของโรเตอร์ใดๆ ดังแสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟเหล่านี้สามารถมีได้หลายเส้น ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์ด้วย ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับ จึงเป็นทั้งฟังก์ชันของกระแสเฟสและตำแหน่งของโรเตอร์



รูปที่ 2.6 กราฟ Magnetizing

### ตำแหน่ง Aligned

ณ ตำแหน่ง aligned นี้คือตำแหน่งที่แกนของขั้วโรเตอร์คู่ใดๆ วางอยู่ในแนวแกนเดียวกันกับแกนของขั้วสเตเตอร์ของเฟสใดเฟสหนึ่ง ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 2.7 แสดงถึงมอเตอร์สามเฟสชนิด 12/8 หมายความว่า เป็นมอเตอร์แบบสามเฟสที่มีสเตเตอร์จำนวน 12 ขั้วและโรเตอร์จำนวน 8 ขั้ว โดยกำหนดให้เฟสที่ 1 คือเฟสในแนวระนาบและแนวตั้งฉาก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าขั้วโรเตอร์อยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่ 1 ณ ตำแหน่งนี้เมื่อมีกระแสไหลเข้าไปยังเฟสที่ 1 แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงที่สุด ถ้าลองขยับโรเตอร์ไปในทิศทางด้านซ้ายหรือด้านขวาเล็กน้อยจะพบว่าโรเตอร์จะถูกดึงกลับมายังที่ตำแหน่ง aligned นี้ แสดงว่าจุดนี้เป็นจุดสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (Stable Equilibrium)



รูปที่ 2.7 มอเตอร์แบบ 12/8 ที่ตำแหน่ง Aligned

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.12 พบว่า ถ้าความกว้างของช่องอากาศระหว่างขั้วของโรเตอร์กับขั้วของสเตเตอร์มีค่าน้อยที่สุดจะทำให้ค่ารีลักแตนซ์  $\mathcal{R}$  มีค่าต่ำที่สุดด้วย

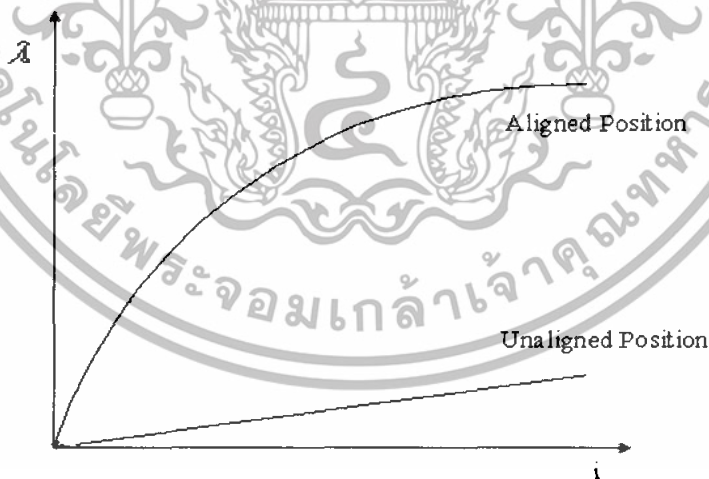
$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.12)$$

โดยที่  $l$  คือความกว้างของช่องอากาศ ค่า  $\mu$  คือค่าความซึมซาบแม่เหล็ก และ  $A$  คือค่าพื้นที่หน้าตัดที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านแบบตั้งฉาก เมื่อค่ารีลักแตนซ์รวมของวงจรมีค่าต่ำสุดทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรมีค่าสูงสุดตามสมการที่ 2.13

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{total}} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำของวงจร  $N$  คือจำนวนรอบขดลวดของเฟส และ  $\mathcal{R}_{total}$  คือค่ารีลักแตนซ์รวมของวงจร

โดยปกติแล้วแล้ววัสดุที่นำมาใช้ทำแกนของมอเตอร์จะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กแบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์อิ่มตัวเกิดขึ้น ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟ magnetizing ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งตำแหน่งของโรเตอร์ ณ aligned จะอยู่ตำแหน่งเส้นบนสุด

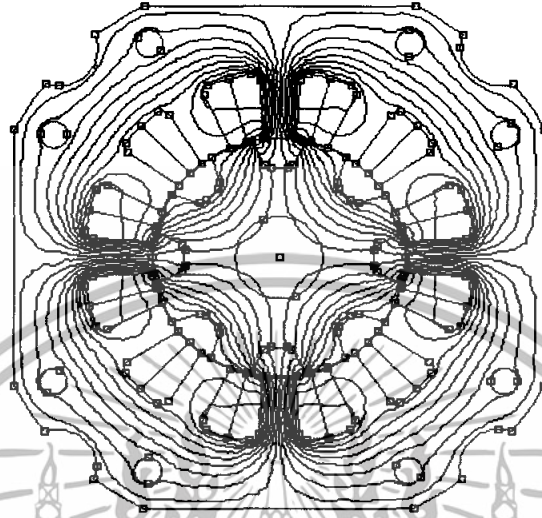


รูปที่ 2.8 กราฟ Magnetizing แสดงตำแหน่ง Aligned และ Unaligned

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตำแหน่ง Unaligned

ณ ตำแหน่งนี้แกนตรงกลางระหว่างขั้วของโรเตอร์ (Interpolar Axis) อยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่ 1 ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 มอเตอร์แบบ 12/8 ที่ตำแหน่ง Unaligned

เมื่อป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดของเฟสที่ 1 แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าเมื่อลองขยับโรเตอร์เพียงเล็กน้อยพบว่าโรเตอร์จะเคลื่อนที่หมุนออกจากตำแหน่งนี้ และไปหยุดที่ตำแหน่ง aligned ดังนั้น ณ จุด unaligned จะเป็นจุดสมดุลแบบไม่มีเสถียรภาพ (Unstable Equilibrium)

จากรูปที่ 2.9 พบว่า ค่าความกว้างของช่องอากาศมีค่ามากที่สุด ดังนั้นจึงทำให้ค่ารีลักแตนซ์มีค่าสูงสุด และทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรต่ำที่สุดด้วย ส่วนเส้นกราฟ magnetizing จะอยู่ในตำแหน่งดังรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า ณ ตำแหน่งนี้เส้นกราฟ magnetizing จะเป็นเส้นตรงและไม่ปรากฏการอิ่มตัวเกิดขึ้น เนื่องจากค่ารีลักแตนซ์ของช่องอากาศมีค่ามากกว่าของแกนมอเตอร์มาก ดังแสดงในสมการที่ 2.14

$$L = N^2 \left( \frac{1}{\mathcal{R}_{core} + \mathcal{R}_{gap}} \right) \quad (2.14)$$

### ตำแหน่ง Intermediate

คือตำแหน่งของโรเตอร์ที่อยู่ระหว่าง และ ตำแหน่ง unaligned จะพบว่าเส้นกราฟ magnetizing จะเริ่มปรากฏให้เห็นปรากฏการณ์อิ่มตัว ณ ตำแหน่งเมื่อขั้วของโรเตอร์เริ่มซ้อนทับกับขั้วของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แรงบิด

เมื่อป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดของเฟสใดเฟสหนึ่ง จะเกิดแรงบิดทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางที่ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุด โดยที่แรงบิดที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหลเข้าขดลวด แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นบวก ( Positive Torque ) ถ้ากระแสที่ป้อนเข้าขดลวดอยู่ในช่วงความชันของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับตำแหน่งของโรเตอร์ เป็นค่าบวกตามทิศทางการหมุนไปข้างหน้า แรงบิดนี้เรียกว่าเป็นแรงบิดแบบมอเตอร์ ( Motoring Torque ) แต่ถ้าป้อนกระแสเข้าในช่วงที่ค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับตำแหน่งของโรเตอร์ เป็นค่าลบตามทิศทางการหมุนไปข้างหน้า แรงบิดนี้จะถูกเรียกว่าแรงบิดแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( Generating torque ) และมีค่าเป็นลบ ( Negative torque )



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟค่าความเหนี่ยวนำและแรงบิดเมื่อป้อนกระแสเข้าขดลวดเฟส

สมการที่ 2.15 แสดงถึงแรงบิดที่เกิดขึ้นของเฟสใดเฟสหนึ่ง ณ ตำแหน่งของโรเตอร์ใดๆ

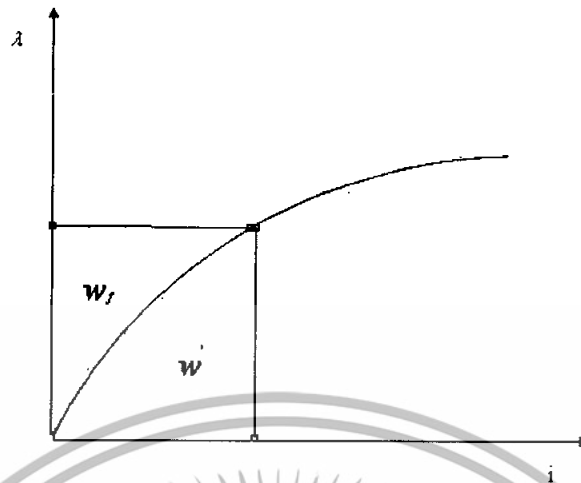
$$T = \left[ \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right]_{i=\text{constant}} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $W'$  คือ coenergy ซึ่งสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ magnetizing ณ ตำแหน่งโรเตอร์ใดๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.16

$$W' = \int_0^{i_i} \lambda di \quad (2.16)$$

โดยพื้นที่เหนือกราฟนั้นคือก็คือ stored field energy ,  $W_f$  ดังแสดงในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงค่าพลังงานสะสมและCo-energy

จากสมการที่ 2.15 และ 2.16 เราสามารถอธิบายว่า instantaneous torque ได้โดยการ ใช้รูปที่ 2.12 กำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง  $\theta_1$  ไปยังตำแหน่ง  $\theta_2$  โดยที่กระแสที่ ไหลในเฟสยังมีค่าคงที่ ในขณะที่นั้นมอเตอร์จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกับแหล่งจ่ายและมีการ เปลี่ยนแปลงของทั้ง stored field energy และ coenergy และ instantaneous torque สามารถ คำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของ coenergy  $\Delta W_m$  และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตำแหน่ง ของโรเตอร์  $\Delta\theta$  พลังงานที่เปลี่ยนถ่ายกับแหล่งจ่ายคือ

$$\Delta W_e = ABCD \quad (2.17)$$

การเปลี่ยนแปลงของ coenergy สามารถที่อธิบายได้ดังนี้

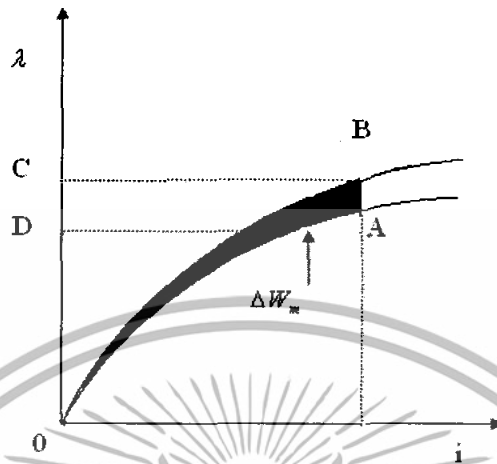
$$\Delta W_f = OBC - OAD \quad (2.18)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของ coenergy ซึ่งเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกล คือ

$$\begin{aligned} \Delta W_m &= \Delta W_e - \Delta W_f \\ &= ABCD - (OBC - OAD) \\ &= (ABCD + OAD) - OBC \\ &= OAB \end{aligned} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

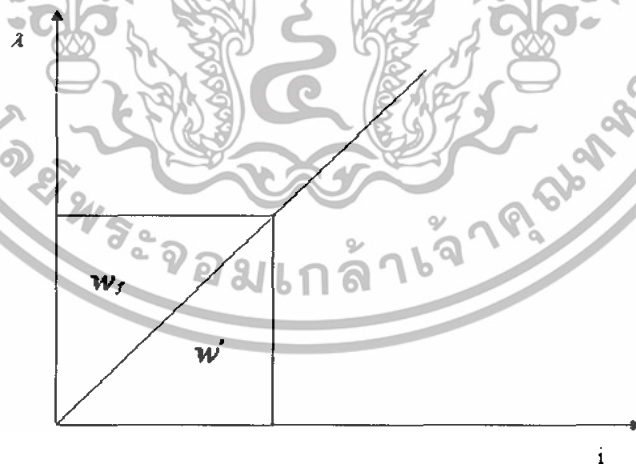
จะเห็นว่าพลังงานทั้งหมดที่ได้รับจากแหล่งจ่าย ไม่ได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานกลทั้งหมด บางส่วนถูกเก็บไว้ในรูปของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Co-energy

มอเตอร์แบบไม่อิมตัว

ถ้าคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเหล็กที่ใช้ทำมอเตอร์เป็นแบบเชิงเส้น หมายความว่าไม่เกิดปรากฏการณ์อิ่มตัวของแกนเหล็ก ดังนั้นเส้น magnetizing จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟ Magnetizing แบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น stored field energy และ coenergy จะมีขนาดเท่ากัน คือ พื้นที่สามเหลี่ยมใต้หรือเหนือเส้นกราฟ จะได้ว่า

$$W' = \frac{1}{2} i \lambda \quad (2.20)$$

แต่

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (2.21)$$

ดังนั้น

$$W' = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.22)$$

เมื่อ  $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งโรเตอร์ใดๆ ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ 2.22 ในสมการที่ 2.15 จะได้สมการของ instantaneous torque ดังนี้

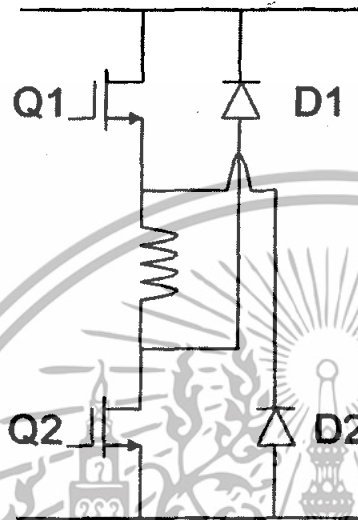
$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.23)$$

จากสมการแรงบิดของมอเตอร์แบบเชิงเส้น พบว่า แรงบิดจะไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแส เนื่องจากว่าตัวแปร  $i$  ยกกำลังสอง และเครื่องหมายหรือทิศทางของแรงบิดจะขึ้นอยู่กับ  $\frac{dL}{d\theta}$  ถ้าความชันนี้เป็นค่าบวกในทิศทางของโรเตอร์ไปข้างหน้า แรงบิดจะเป็นแบบเสริม แต่ถ้าความชันเป็นลบในทิศทางของโรเตอร์ไปข้างหน้าจะได้แรงบิดเป็นแบบต้านมอเตอร์แบบอิมิตัวสมมติว่ามอเตอร์มีคุณสมบัติของความอิมิตัวสูง นั้นหมายความว่า เมื่อโรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของ stored field energy มีค่าน้อยมาก หรือ อาจจะประมาณว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น พลังงานทั้งหมดที่ได้มาจากแหล่งจ่าย จะเป็น coenergy สำหรับการเปลี่ยนเป็นพลังงานกลทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

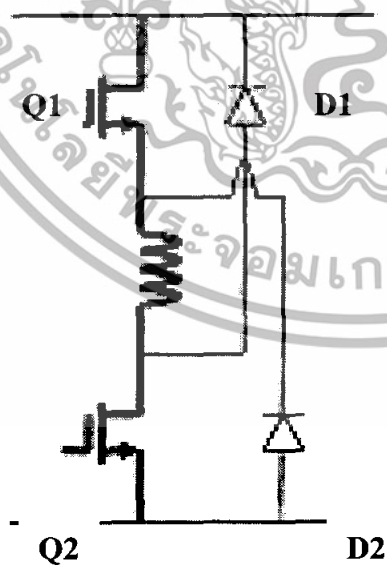
2.3 ทฤษฎีที่ 2 วงจรขับเคลื่อน

วงจรขับเคลื่อนที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์จะใช้แบบ 2 สวิตช์ต่อเฟสเพราะว่าวงจรนี้สามารถสร้างแรงดันตกคร่อมขดลวดได้ทั้งค่าบวก ค่าศูนย์ และค่าลบ ซึ่งวงจรขับเคลื่อนแบบนี้จะมีความยืดหยุ่นในการควบคุมรูปร่างของกระแสได้ดี นอกจากนี้ถ้าอุปกรณ์ของเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดความเสียหาย เฟสที่เหลือยังสามารถทำงานต่อไปได้



รูปที่ 2.14 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟส

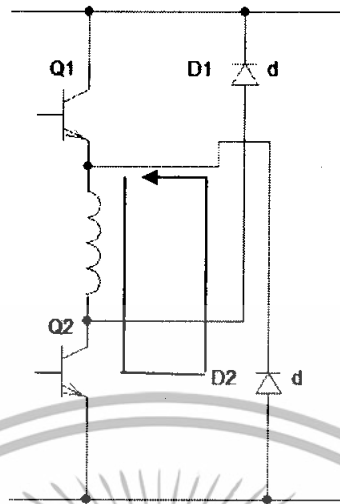
การทำงานของวงจรสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี กรณีที่ 1 เมื่อ สวิตช์ Q1 และ Q2 ทั้งคู่ ON แรงดันตกคร่อมขดลวดจะมีค่าเท่ากับแรงดันดีซีลิงค์ กระแสและเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในรูป



รูปที่ 2.15 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟส ขณะเพิ่มพลังงาน

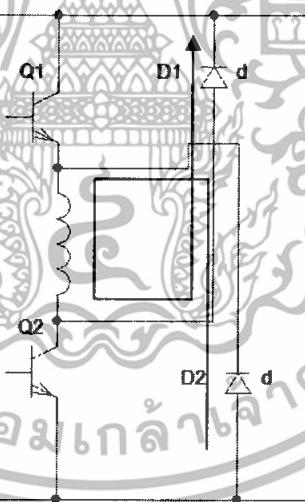
กรณีที่ 2 ถ้าสวิตช์ Q1 OFF ในขณะที่สวิตช์ Q2 ON กระแสจะไหลวนผ่านไดโอด D2 แรงดันตกคร่อมสวิตช์ขณะ ON มีค่าน้อยมากในทำนองเดียวกันถ้าสวิตช์ Q1 ON ในขณะที่ Q2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 81808 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OFF กระแสจะไหลวนผ่านไดโอด D1 แรงดันตกคร่อมขดลวดก็มีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่แสดง



รูปที่ 2.16 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟสขณะลดพลังงาน

กรณีที่ 3 ถ้าต้องการสร้างแรงดันค่าลบคร่อมขดลวดเพิ่มลดกระแส หรือเส้นแรงแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการ OFF สวิตช์ Q1 และ Q2 กระแสจะไหลผ่านไดโอดทั้งคู่และคืนพลังงานสู่แหล่งจ่ายดังรูป



รูปที่ 2.17 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟสขณะลดพลังงาน

แต่ในการทำงานจริงจำเป็นต้องติดตัวเก็บประจุเข้าไปโดยติดตัวเก็บประจุแบบ electrolyte และ ชนิด film ขนานกันเพื่อเป็นตัวรองรับพลังงานที่จะมีการคืนในกรณีที่ 3 ที่ต้องนำมาขนาดกันนั้นเพราะว่า ตัวเก็บประจุชนิด electrolyte ทำงานที่ความถี่ต่ำ แต่ในการทำงานของวงจรนี้มีความถี่ของการสวิตช์สูงซึ่งจะทำให้ตัวเก็บประจุชนิด electrolyte การเป็นตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งการขนานตัวเก็บประจุชนิด film เข้าไปเพื่อให้ตัวเก็บประจุยังคงสภาพเป็นตัวเก็บประจุต่อไปที่ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบ

ในบทนี้จะเป็นการใช้โปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ในการดูผลตอบจากมิติของมอเตอร์ที่ได้ออกแบบ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถทราบตัวแปรต่างๆ อย่างใกล้เคียงเพื่อยืนยันความถูกต้อง ก่อนที่จะมีการสร้างมอเตอร์ต้นแบบ

#### โปรแกรม FEMM

การออกแบบสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์นั้น จะใช้โปรแกรม FEMM เวอร์ชัน 4.0 ซึ่งเป็นโปรแกรม Finite Element Analysis แบบสองมิติ

#### 3.1 การวาดโครงสร้างมอเตอร์

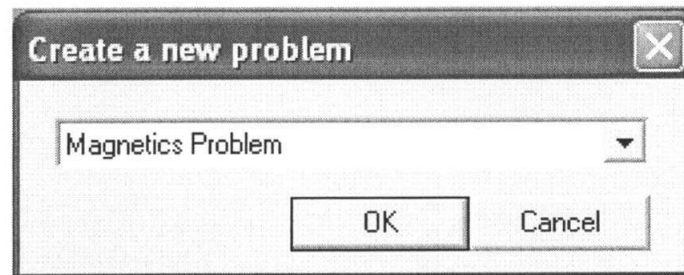
ขั้นตอนแรกของการทำระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ คือ การวาดโครงสร้างของมอเตอร์ลงในโปรแกรม ซึ่งโปรแกรม FEMM จะมี Graphic Editor อยู่ ให้เริ่มต้นโดยการเปิดโปรแกรม FEMM จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หน้าต่างหลักของ FEMM

กดปุ่ม  เพื่อเปิดปัญหาใหม่ จะปรากฏหน้าต่างให้เลือกดังรูปที่ 2.14 ให้เลือกเป็นปัญหาทางแม่เหล็ก "Magnetics Problem"

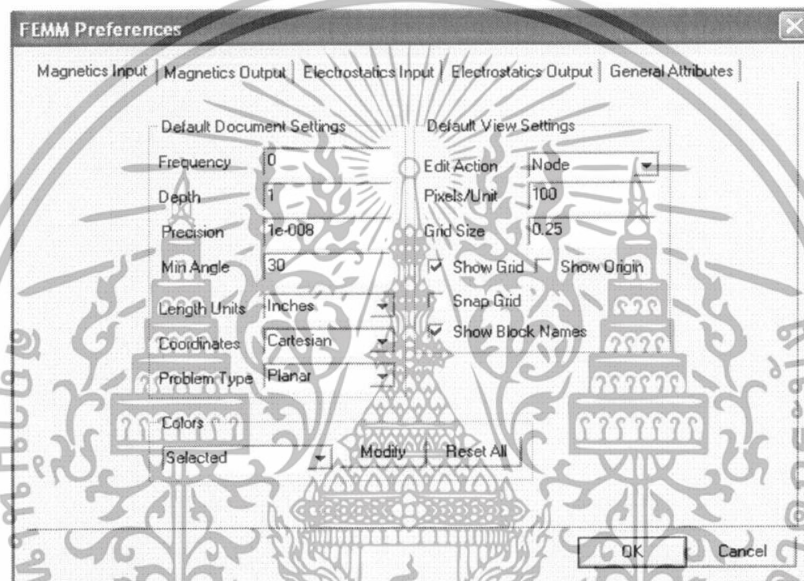
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 หน้าต่างเลือกประเภทของปัญหา

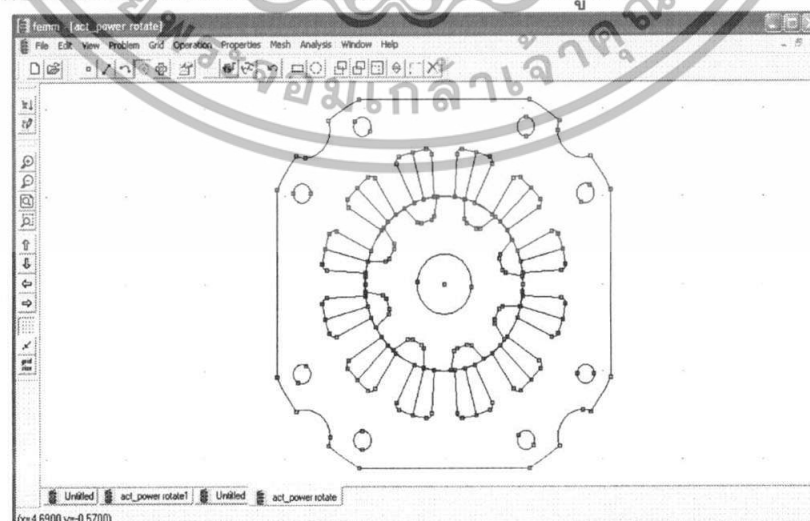
กดปุ่ม “Edit” และเลือก “Preferences” ให้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์ดังรูปที่

3.3



รูปที่ 3.3 หน้าต่างกำหนดพารามิเตอร์หลัก

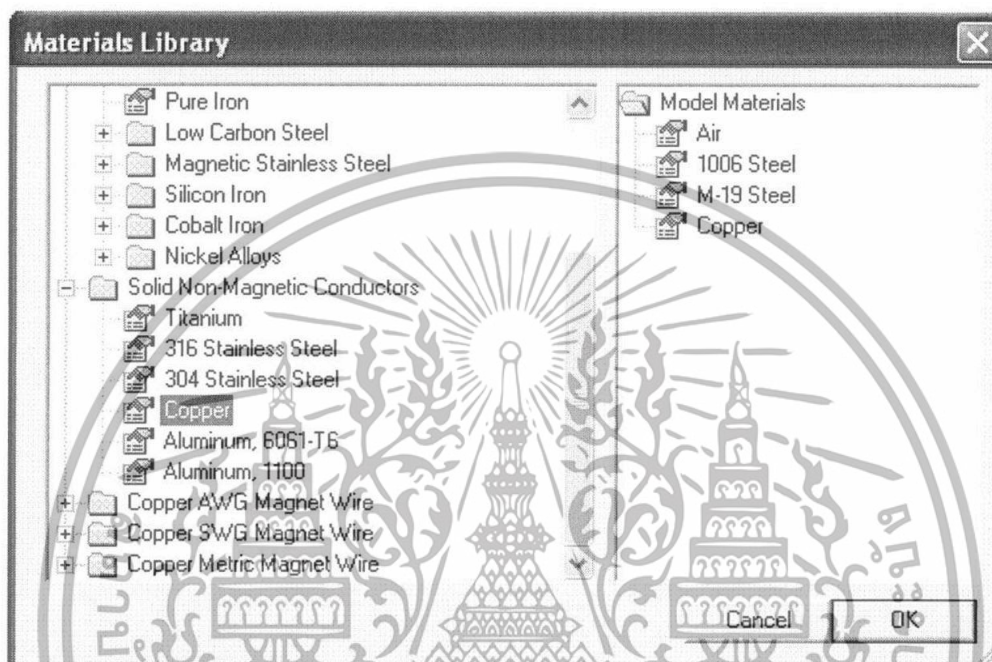
ทำการวาดโรเตอร์และสเตเตอร์ตามแบบที่ต้องการจะได้แบบดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงโรเตอร์และสเตเตอร์

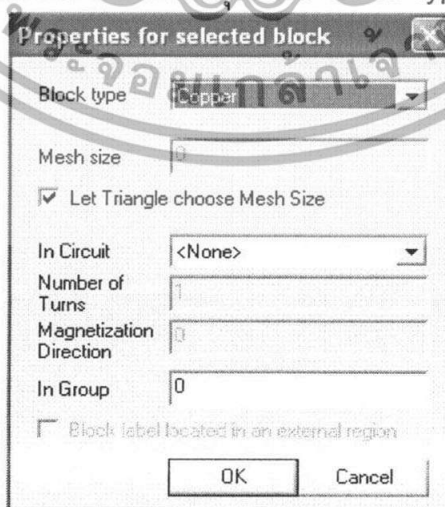
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อไป เป็นการเลือกชนิดของวัสดุเข้ามาในแบบจำลองที่วาดขึ้น ให้เลือก “Properties” และ “Materials Library” ก็จะมีปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.5 ให้เลือก Air, Copper, M-19 Steel และ 1006 Steel จาก Library ทางช่องซ้ายมือแล้วลากมาใส่ในช่องขวามือ สำหรับใช้เป็นพารามิเตอร์ของมอเตอร์



รูปที่ 3.5 หน้าต่างของคุณสมบัติของวัตถุ

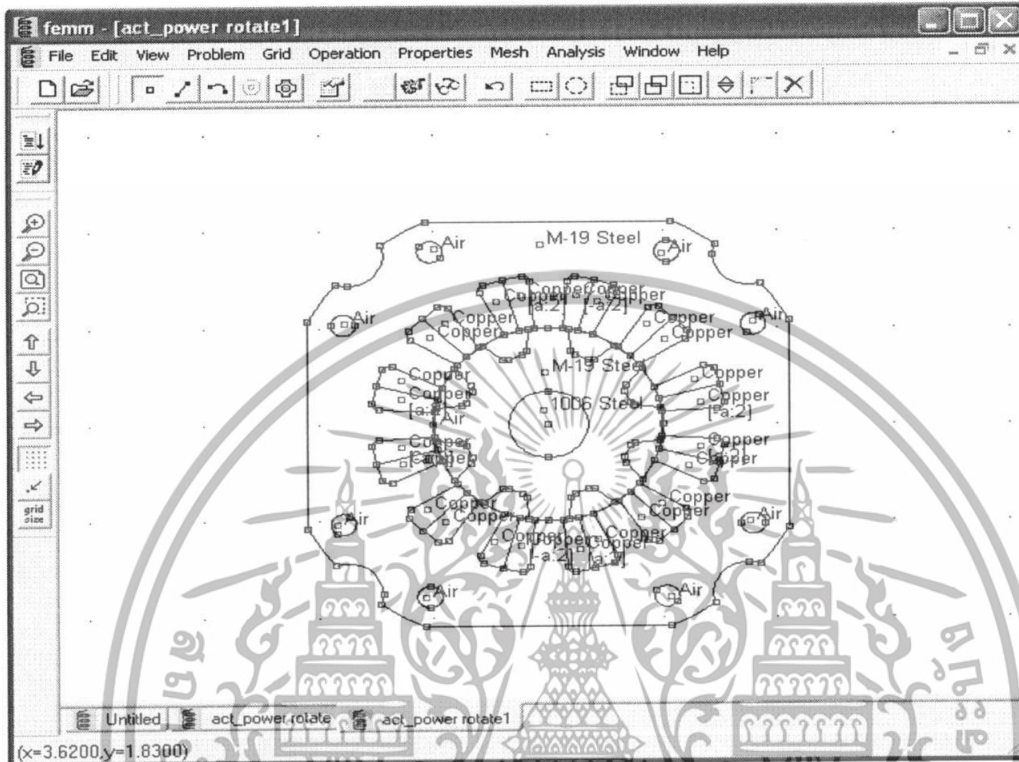
ในการกำหนดวัสดุให้กับจุดคุณสมบัติ ให้เลือกปุ่ม  และคลิกเมาส์ปุ่มขวาที่จุดคุณสมบัติและจุด จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.6 ให้เลือกวัสดุในช่อง “Block Type”



รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดคุณสมบัติให้กับส่วนต่างๆของมอเตอร์ที่เลือกไว้

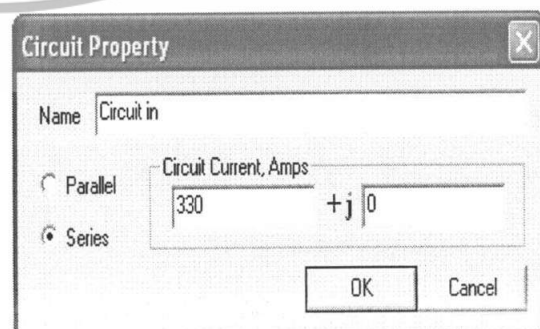
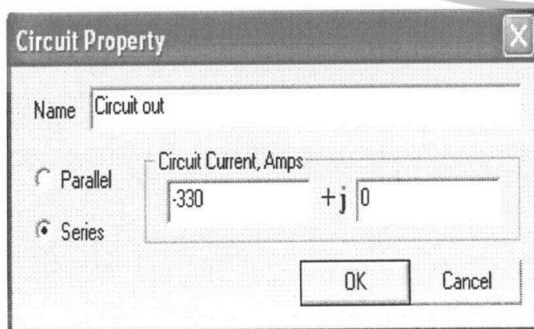
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กำหนดวัสดุต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของส่วนต่างๆ

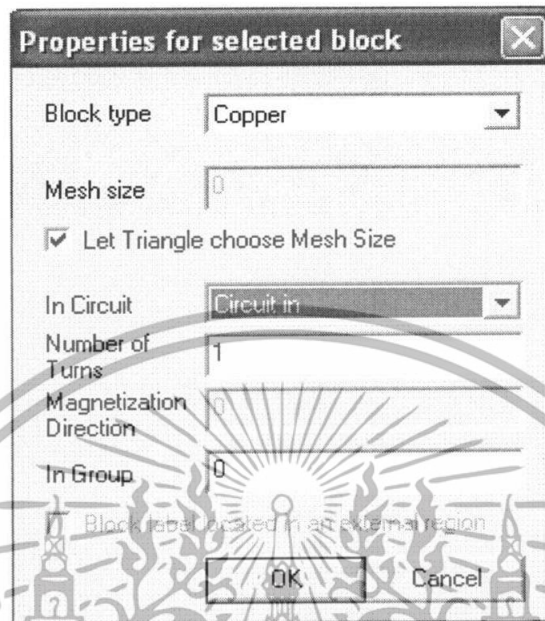
สำหรับช่อง slot ที่กำหนดเป็น Copper นั้นจะเป็นขดลวดสเตเตอร์ซึ่งเราจะกำหนดเฟสเดียวเท่านั้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นกระแสเข้า และกระแสออก วิธีการกำหนดพิกัดและทิศทางของกระแสที่ไหลเข้าหรือออกจากขดลวด ให้เลือก “Properties” “Circuits” และ “Add property” จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 3.8 กำหนดให้กระแสไหลเข้าเป็นค่าบวก และกระแสขาออกเป็นค่าลบ



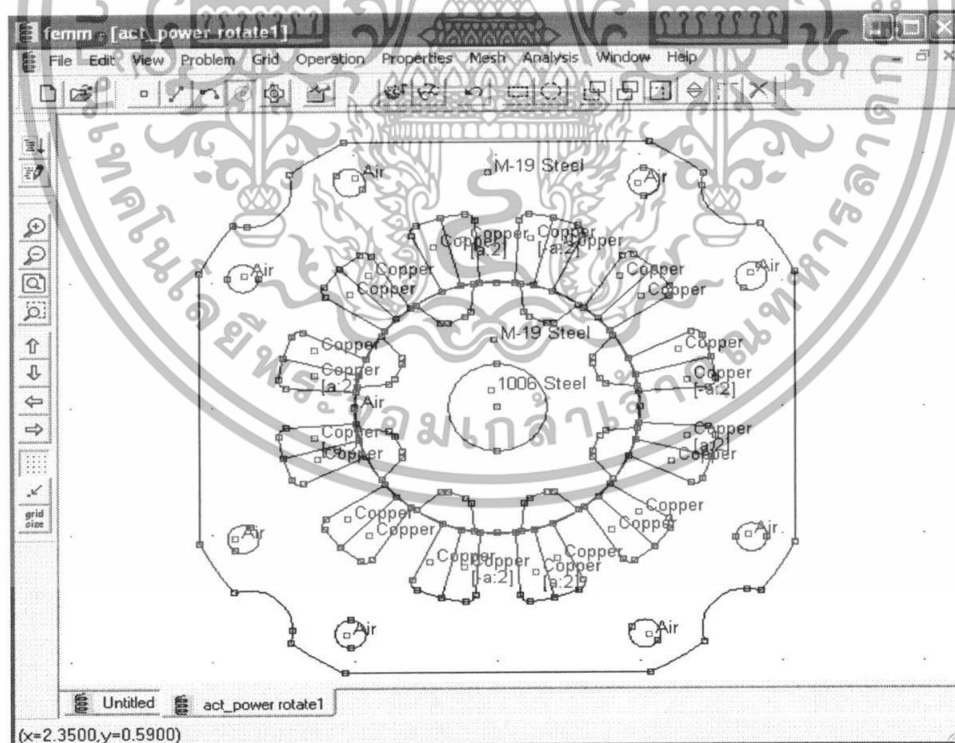
รูปที่ 3.8 การกำหนดค่ากระแสเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนี้ให้กำหนดคุณสมบัติของขดลวดในจุดคุณสมบัติ Copper ในช่อง "In Circuit" ดังแสดงในหน้าต่างคุณสมบัติดังรูปที่ 3.9 สุดท้ายก็จะได้นักตาของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 การกำหนดกระแสให้กับขดลวด

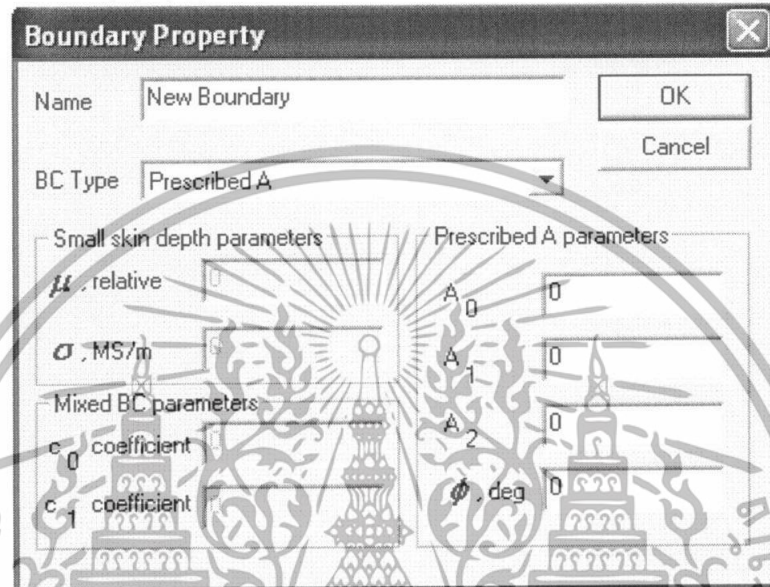


รูปที่ 3.10 หน้าต่างแสดงรูปวาดมอเตอร์พร้อมที่จะหาผลตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดท้ายสุดก่อนวิเคราะห์คือการกำหนดคุณสมบัติขอบเขต หรือ Boundary Condition ซึ่งถ้าเป็นมอเตอร์นั้นจะกำหนดให้เป็นแบบ

วิธีการสร้างคุณสมบัติขอบเขตให้เลือก “Properties” “Boundary” และ “Add Property” กำหนดค่าต่างดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การกำหนด Boundary Condition


ให้กำหนด Boundary Condition ที่เส้นโค้งด้านนอกของสเตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.12

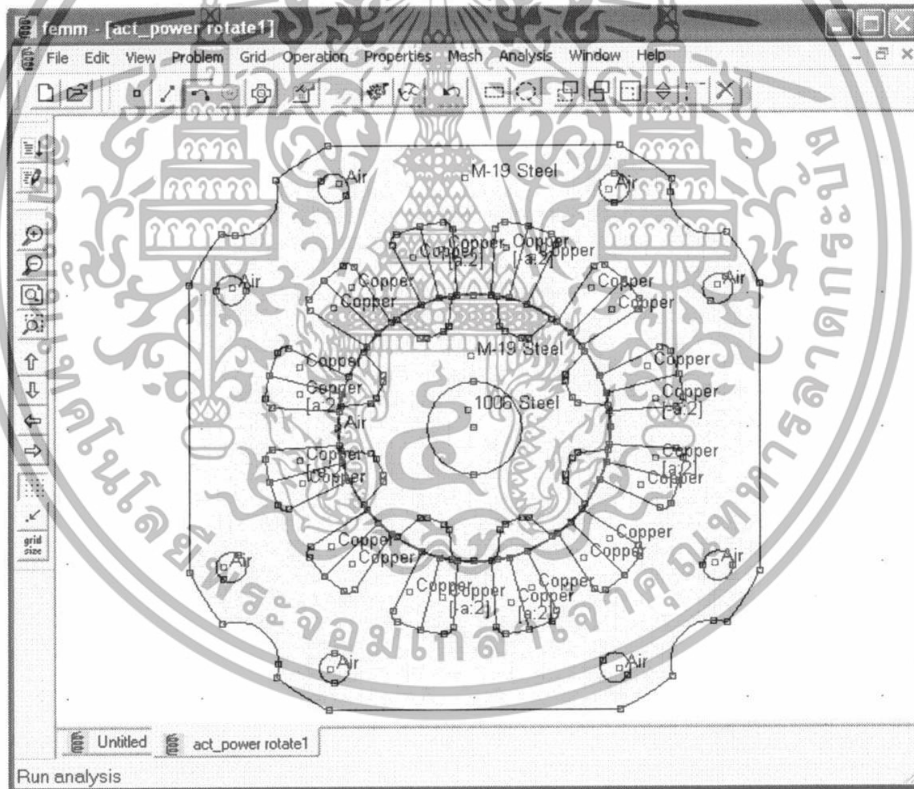


รูปที่ 3.12 การตั้งค่า Boundary ให้กับขอบนอกของสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


### 3.2 การกำเนิดเมช

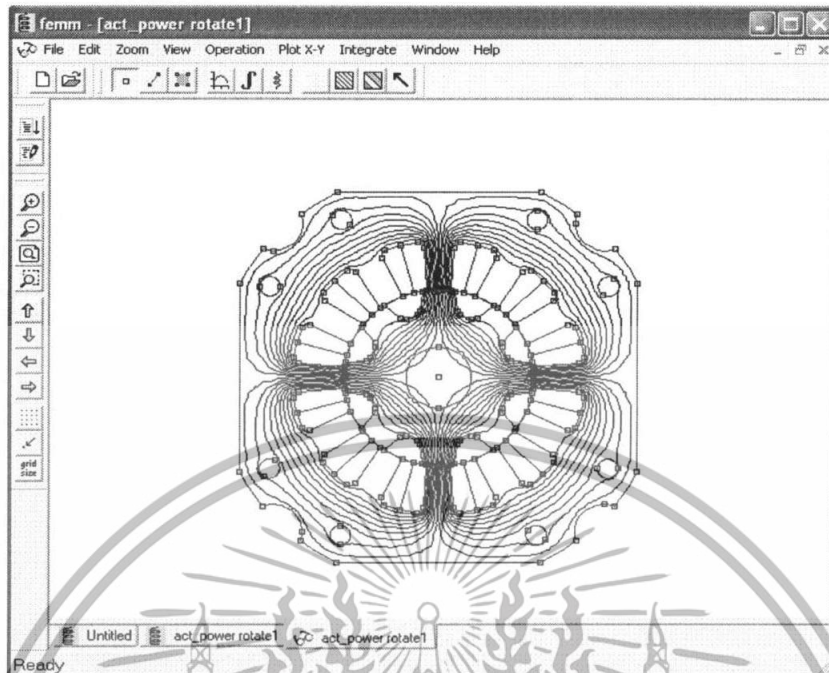
ต่อไปให้สร้างเมช หรือ Mesh สำหรับการวิเคราะห์ตามระเบียบวิธี Finite Element ซึ่งสามารถสร้างได้โดยกดปุ่ม  ตัวโปรแกรมจะสร้างเมชขึ้นมาโดยอัตโนมัติ ดังรูปที่ 3.13 เราสามารถกำหนดขนาดของเมชขึ้นมาได้โดยการคลิกเมาส์ปุ่มขวา เส้นที่เลือกดังกล่าวจะเปลี่ยนเป็นสีแดง ที่หน้าต่างคุณสมบัติ ให้เลือกเครื่องหมายถูกของ “Choosing Mesh Spacing Automatically” ออก จากนั้นให้กำหนดจำนวนเมชที่ “Local element size long line” ซึ่งค่าอย่างน้อยหมายความว่าจำนวนเมชยิ่งมากบริเวณพื้นที่ไหนต้องการความละเอียดหรือความถูกต้องของคำตอบสูง จำเป็นต้องมีจำนวนเมชนั้นยิ่งมาก เช่นที่บริเวณช่องอากาศหรือมุมของหัวของโรเตอร์หรือข้อเสเตอร์ ซึ่งยิ่งโครงสร้างของมอเตอร์ที่สร้างมีจำนวนเมชมากเท่าไร ความละเอียดและความถูกต้องของคำตอบก็ยิ่งมากขึ้นเช่นกัน แต่ยังมีจำนวนเมชมากโปรแกรมก็ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากดังนั้นผู้ใช้จึงจำเป็นต้องเลือกกำหนดจำนวนเมชให้เหมาะสมกับปัญหา



รูปที่ 3.13 เมชที่สร้างจากเครื่องกำเนิดเมช

### 3.3 การแก้ปัญหา

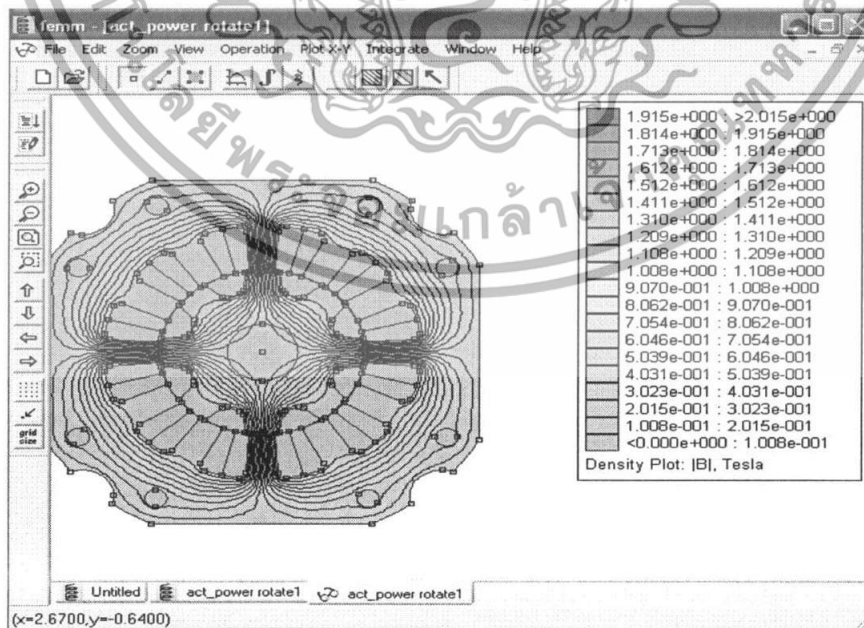
หลังจากที่ได้กำหนดจำนวนเมชแล้ว ให้เลือกที่ปุ่ม  เพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณหาผลเฉลย จำนวนเมชจะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ระหว่างการคำนวณจะปรากฏหน้าต่างแสดงจำนวนครั้งของ Iteration และความก้าวหน้าของการคำนวณเมื่อคำนวณเสร็จหน้าต่างดังกล่าวจะหายไป จะสามารถดูผลเฉลยต่อไปได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กสมตัย

### 3.4 การดูผลเฉลย

เมื่อกดปุ่ม  จะปรากฏเส้น Equipotential Flux Line ขึ้นมาดังรูปที่ 3.14 ผู้ใช้สามารถเลือกดูผลเฉลยอย่างอื่น ได้โดยการเลือก "View" ตัวอย่างเช่น ต้องการดูความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ให้เลือก "View" "Density Plot" จะปรากฏหน้าต่าง Dialog ให้เลือก "Flux Density Plot" ผลเฉลยจะปรากฏดังแสดงในรูปที่ 3.15

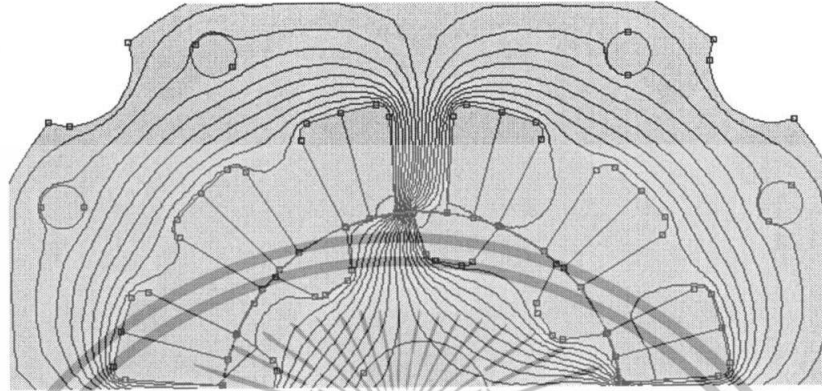


รูปที่ 3.15 แสดงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

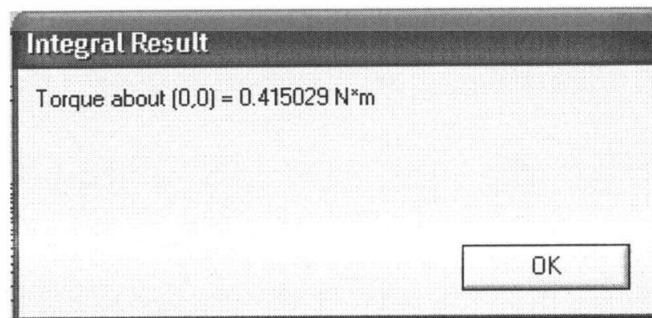
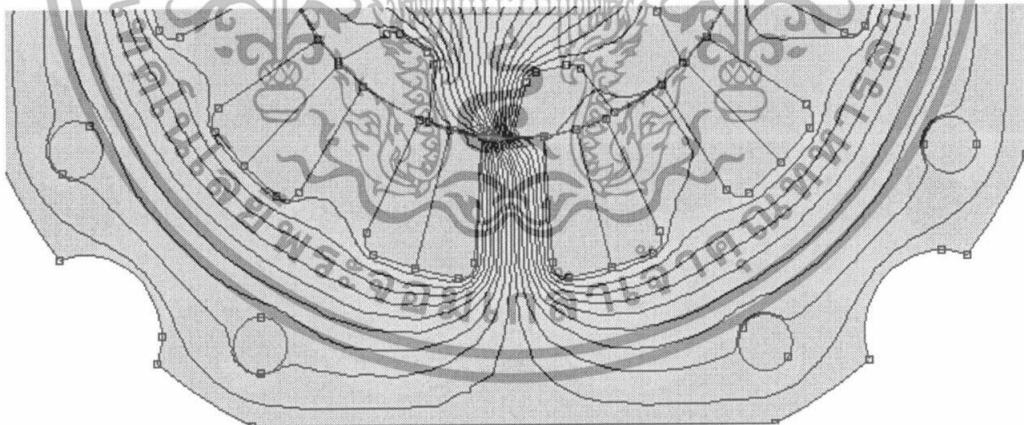
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ตัวอย่างผลจากการ simulation ของตำแหน่ง Unaligned

#### 1. Torque ที่ตำแหน่ง Unaligned

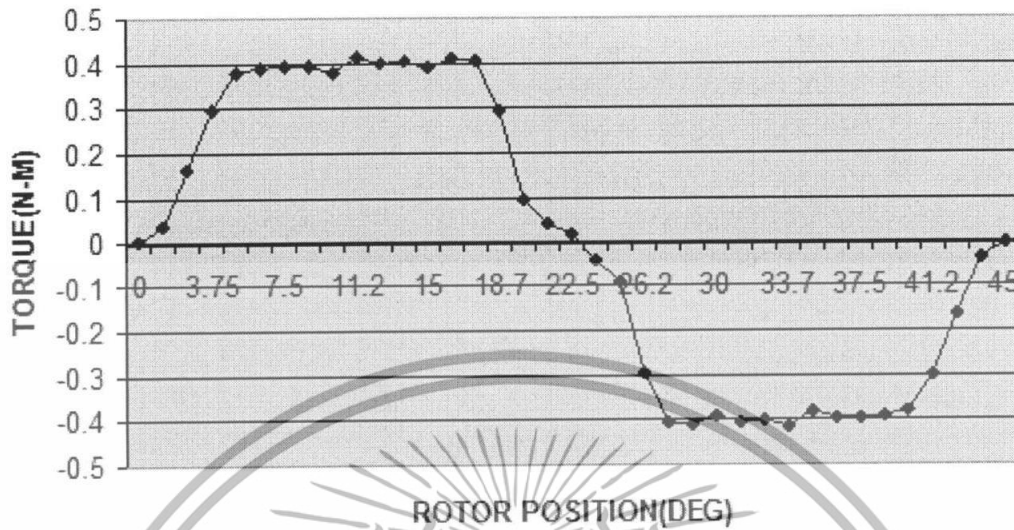


รูปที่ 3.16 Torque ที่ตำแหน่ง Unaligned



รูปที่ 3.17 Torque ที่ตำแหน่ง 12.25 องศา

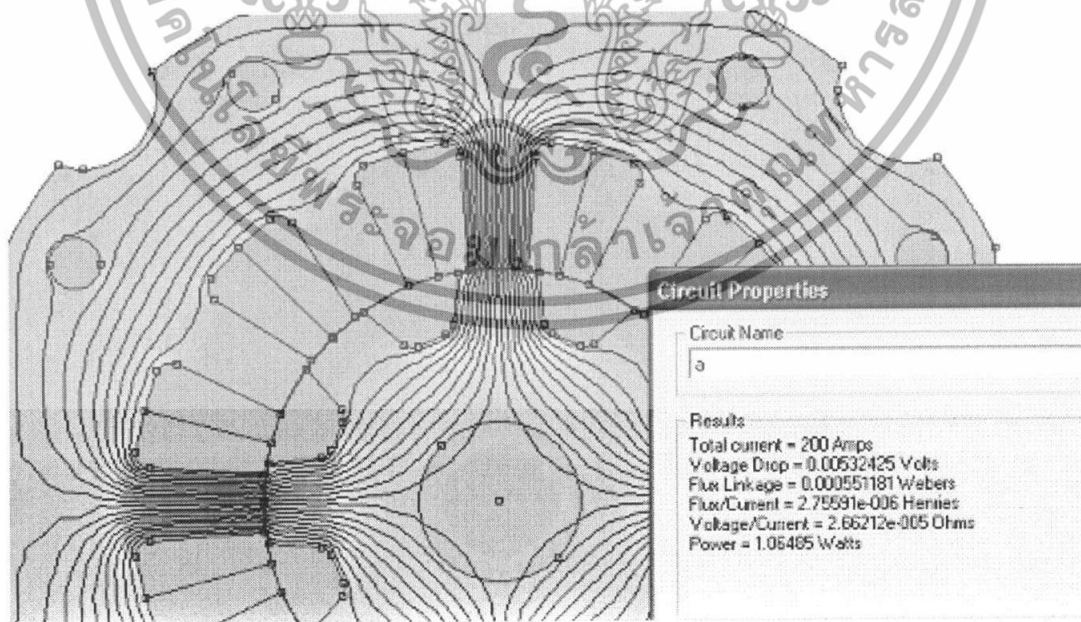
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 Torque ที่ได้จากการทดลอง

3.6 ตัวอย่างผลจากการ simulation ที่ตำแหน่ง Aligned

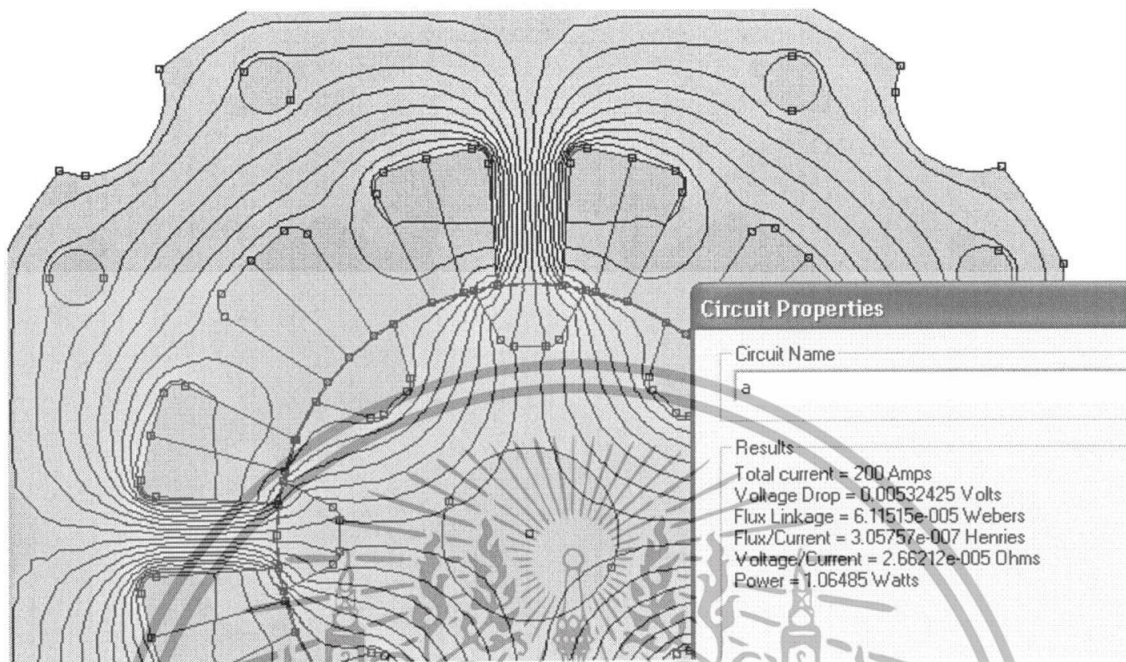
2. Torque ที่ตำแหน่ง Aligned



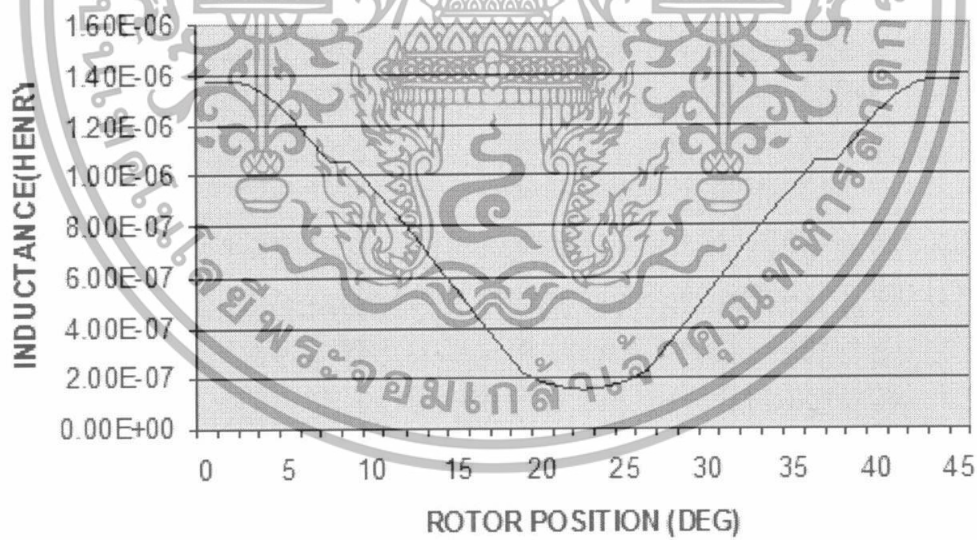
รูปที่ 3.19 Inductance ที่ตำแหน่ง Aligned

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 Inductance ที่ตำแหน่ง Unaligned



รูปที่ 3.20 Inductance ที่ตำแหน่ง unaligned



รูปที่ 3.21 กราฟแสดง Inductance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulation

Rotor position (Deg)	inductance		L (henry)	Torque (N.m)
	a(+)	a(-)		
0	2.76E-06	2.76E-06	1.38E-06	0.000458
1.25	2.75E-06	2.75E-06	1.38E-06	0.035956
2.5	2.73E-06	2.73E-06	1.37E-06	0.16215
3.75	2.63E-06	2.64E-06	1.32E-06	0.299195
5	2.48E-06	2.48E-06	1.24E-06	0.378237
6.25	2.30E-06	2.30E-06	1.15E-06	0.389279
7.5	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	0.395885
8.75	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	0.39588
10	1.89E-06	1.89E-06	9.47E-07	0.378935
11.25	1.69E-06	1.69E-06	8.46E-07	0.411259
12.5	1.49E-06	1.49E-06	7.45E-07	0.399759
13.75	1.28E-06	1.28E-06	6.39E-07	0.405042
15	1.07E-06	1.07E-06	5.33E-07	0.386532
16.25	8.61E-07	8.61E-07	4.30E-07	0.40705
17.5	6.52E-07	6.52E-07	3.26E-07	0.404344
18.75	4.54E-07	4.54E-07	2.27E-07	0.294272
20	3.61E-07	3.61E-07	1.81E-07	0.092024
21.25	3.26E-07	3.26E-07	1.63E-07	0.04248
22.5	3.10E-07	3.10E-07	1.55E-07	0.017606
23.75	3.26E-07	3.26E-07	1.63E-07	-0.04248
25	3.61E-07	3.61E-07	1.81E-07	-0.09024
26.25	4.54E-07	4.54E-07	2.27E-07	-0.29427
27.5	6.52E-07	6.52E-07	3.26E-07	-0.40434
28.75	8.61E-07	8.61E-07	4.30E-07	-0.40705
30	1.07E-06	1.07E-06	5.33E-07	-0.38653
31.25	1.28E-06	1.28E-06	6.39E-07	-0.40504
32.5	1.49E-06	1.49E-06	7.45E-07	-0.39976
33.75	1.69E-06	1.69E-06	8.46E-07	-0.41126
35	1.89E-06	1.89E-06	9.47E-07	-0.37894
36.25	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	-0.39588
37.5	2.10E-06	2.10E-06	1.05E-06	-0.39589
38.75	2.30E-06	2.30E-06	1.15E-06	-0.38928
40	2.48E-06	2.48E-06	1.24E-06	-0.37824
41.25	2.64E-06	2.64E-06	1.32E-06	-0.2992
42.5	2.73E-06	2.73E-06	1.37E-06	-0.16215
43.75	2.75E-06	2.75E-06	1.38E-06	-0.03596
45	2.76E-06	2.76E-06	1.38E-06	-0.00046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

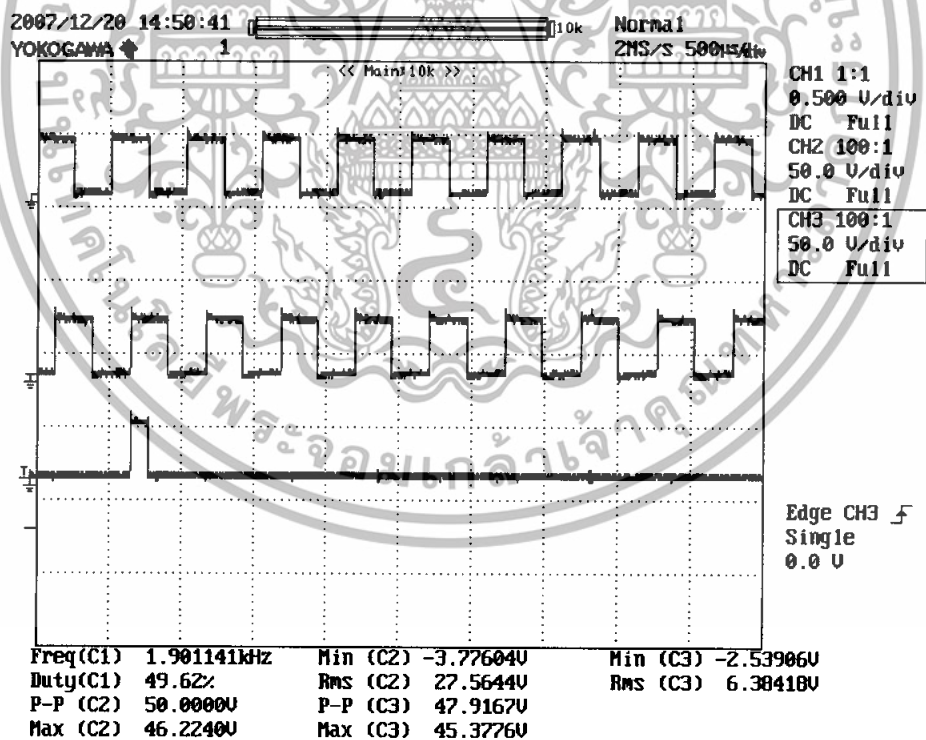
## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

การทดลองในโครงการจะเป็นการทดลองเพื่อพิจารณาความถูกต้องในการดำเนินโครงการ

#### 5.1 การทดลองที่ 1 สัญญาณ encoder

การทดลองนี้เป็นการพิจารณาการทำงานของตัวเข้ารหัสอินครีเมนตัล (incremental encoder) ซึ่งจะทำงานเป็นสัญญาณ 3 เส้นคือ สัญญาณเฟส A,B และ INDEX โดยสัญญาณของเฟส A และ B มีเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งสามารถพิจารณาการทิศทางการหมุนของ encoder ได้จากมุมต่างเฟสได้ ถ้าหากสัญญาณเฟส A นำหน้าเฟส B นั้นหมายความว่าทิศทางการหมุนเป็นบวกหรืออาจพิจารณาการหมุนไปข้างหน้า ในทางตรงข้ามหากสัญญาณเฟส A ตามหลังเฟส B ทิศทางการหมุนของมอเตอร์จะเป็นลบหรือหมุนกลับทิศทาง สำหรับสัญญาณชี้ตำแหน่งหรือ INDEX ใช้สำหรับตรวจจับจุดเริ่มต้นการหมุนโดยจะส่งสัญญาณออกมาเมื่อมีการหมุนครบรอบ



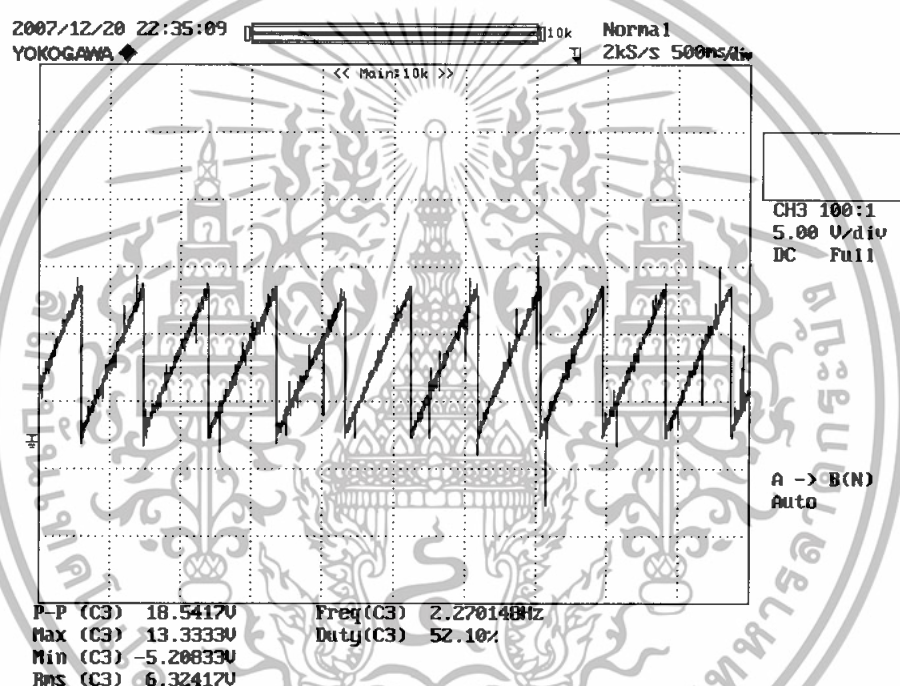
รูปที่ 5.1 สัญญาณ encoder เฟส A (บน),B (กลาง),INDEX (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การทดลองที่ 2 การรับค่าสัญญาณ encoder ด้วย dsPIC30F2010

การทดลองนี้เป็นการทดลองการรับและแปลงค่าสัญญาณ encoder ของ microcontroller ด้วย โมดูล QE1 ใน dsPIC30F2010 ซึ่งได้รับการออกแบบมาให้เชื่อมต่อกับตัวเข้ารหัสอินครีเมนตัล ทำงานโดยการถอดรหัสของสัญญาณเฟสและสัญญาณที่ตำแหน่งออกมาเป็นข้อมูลของจำนวนสัญญาณพัลส์ที่นับได้ โดยค่าของการนับจะเพิ่มขึ้นเมื่อแกนหมุนไปในทิศทางเดิมและลดลงเมื่อกลับทิศทาง ซึ่งจะแปลงค่าการนับค่าการนับของ dsPIC จากค่าดิจิทัลเป็นค่าอะนาลอกด้วยโมดูล SPI ต่อกับไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอะนาลอกเบอร์ MCP4922

จากรูปที่ 5.2 ค่าแรงดันอะนาลอกจะเพิ่มขึ้นเป็นรูปสามเหลี่ยมในลักษณะ sawtooth แสดงค่าการนับและการรีเซ็ตค่าการนับสัญญาณตัวเข้ารหัสของ microcontroller



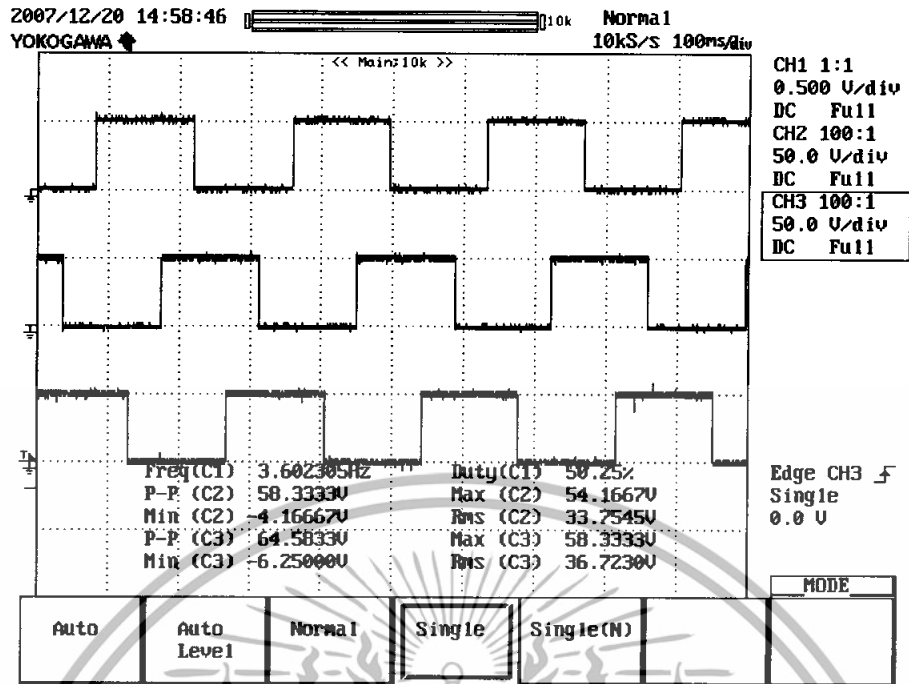
รูปที่ 5.2 แสดงตำแหน่งของโรเตอร์โดยแปลงมาจากสัญญาณ encoder โดยใช้ microcontroller จำนวน

## 5.3 การทดลองที่ 3 การขับมอเตอร์เฟสด้วยสัญญาณ encoder และ current sensor

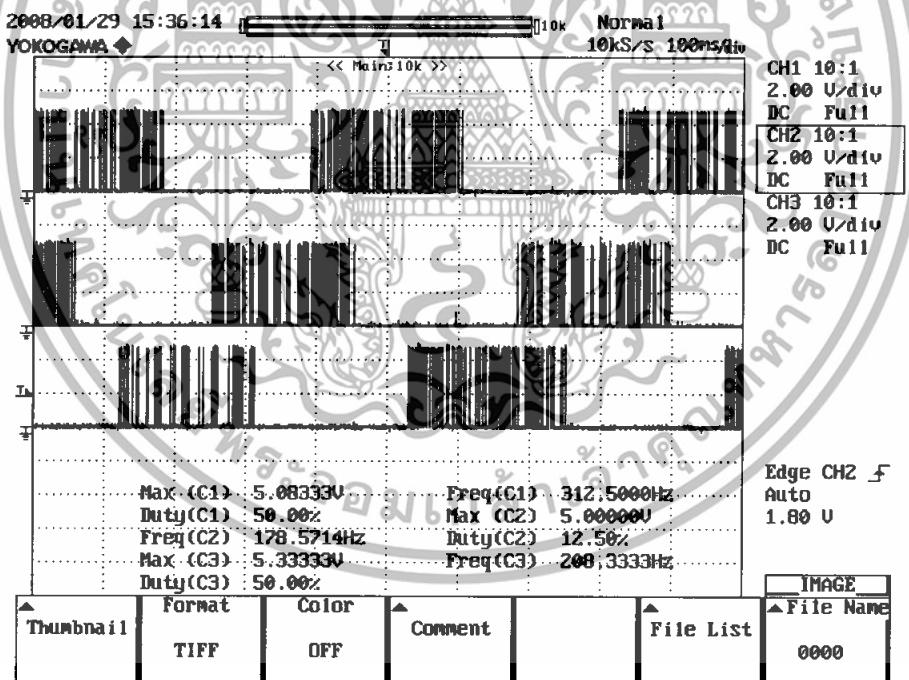
การทดลองนี้เป็นการนำค่าการนับของ microcontroller dsPIC30F2010 เปรียบเทียบกับตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อนำมาพิจารณาการขับมอเตอร์เฟสในการควบคุมการจ่ายกระแสในแต่ละเฟสให้ไหลในขณะที่ความชันของค่าความเหนี่ยวนำในมอเตอร์แต่ละเฟสเป็นบวก

จากรูปที่ 5.3 เป็นการกำหนดมุมขั้วนำมอสเฟสให้ต่างกัน 120 องศาและมีลักษณะซ้อนกันเพื่อลดปัญหาแรงบิดกระเพื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

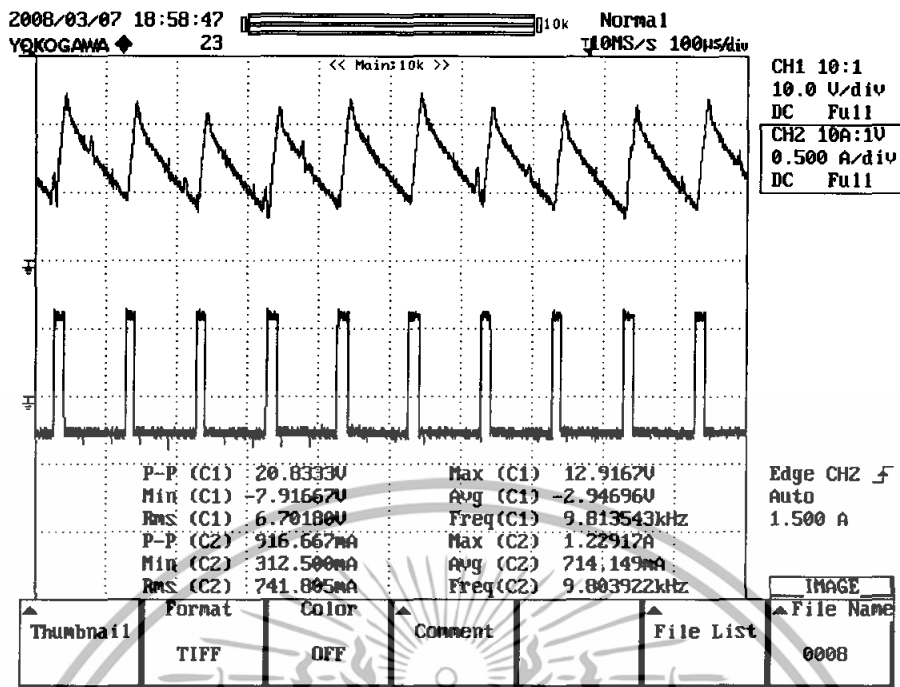


รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณ commutation ของทั้ง 3 เฟส A(บน) , B(กลาง) , C(ล่าง)

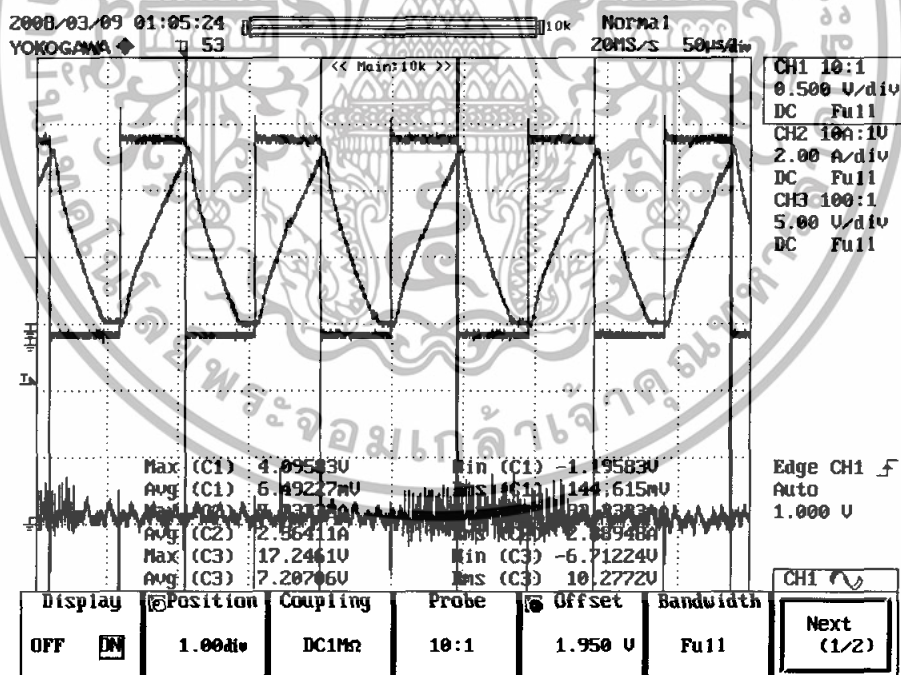


รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณขั้วเกิดเมื่อการควบคุมกระแสของเฟส A(บน) , B(กลาง) , C(ล่าง) ด้วยสัญญาณจาก microcontroller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แสดงการควบคุมกระแสด้วยการขับนำจากมอสเฟตโดยที่สัญญาณบนแสดงกระแสเฟส และสัญญาณล่างแสดงสัญญาณขับนำ

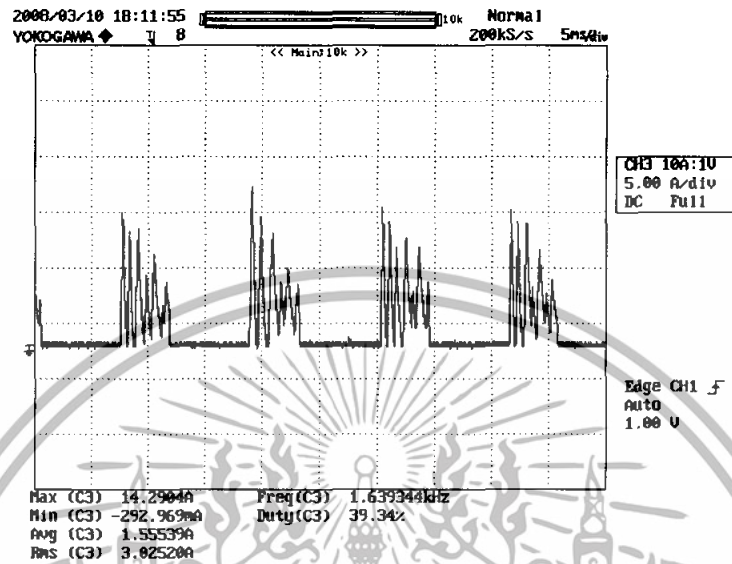


รูปที่ 5.6 แสดงแรงดันตกคร่อมโวลต์เทียบกับกระแสขณะลือกเฟสของมอเตอร์

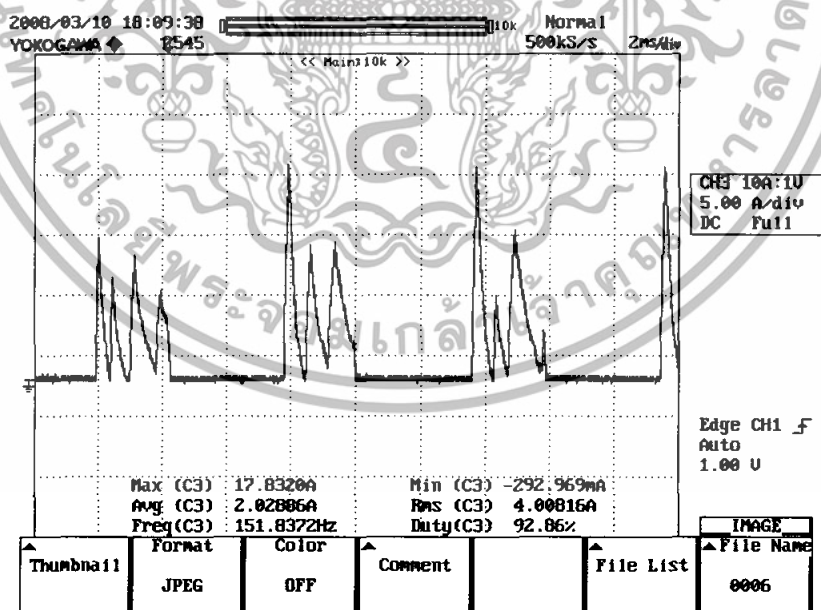
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4 การทดลองที่ 4 การขับเคลื่อนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

การทดลองนี้เป็นการจ่ายกระแสพัลส์ให้กับมอเตอร์ครบทั้ง 3 เฟส โดยการใช้ระบบควบคุมแบบเปิด ผลที่ได้จากการวัดกระแส ดังรูป

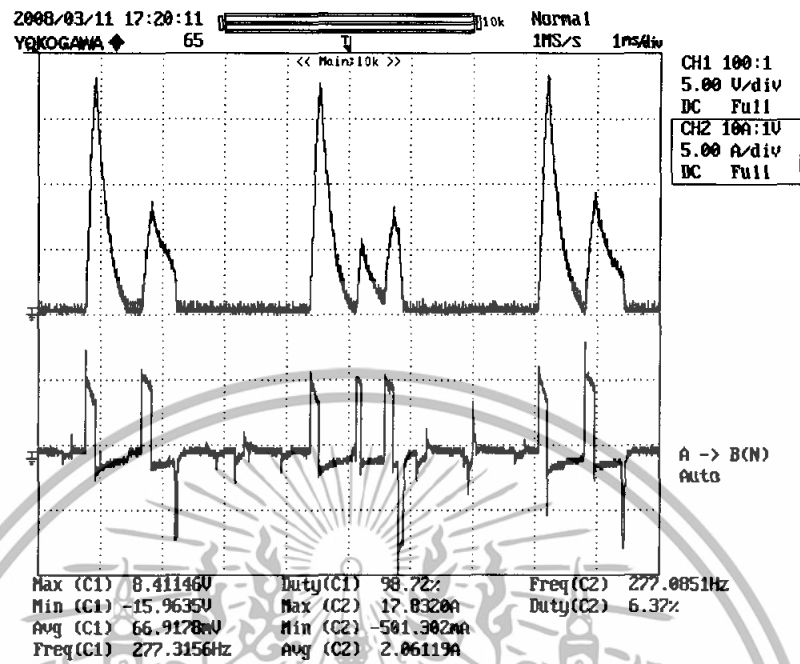


รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A ในขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

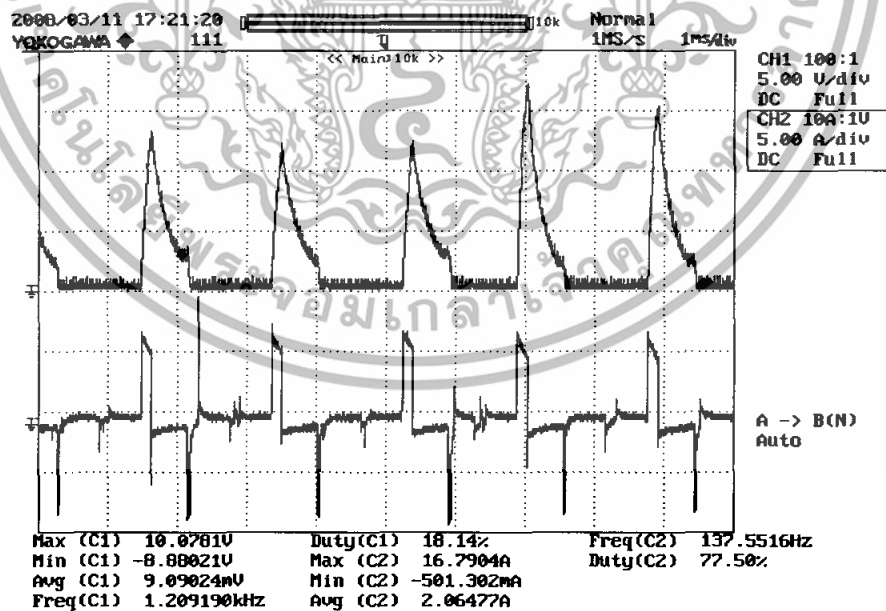


รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A ในขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนในความเร็ว 500 rpm ทิศทางตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

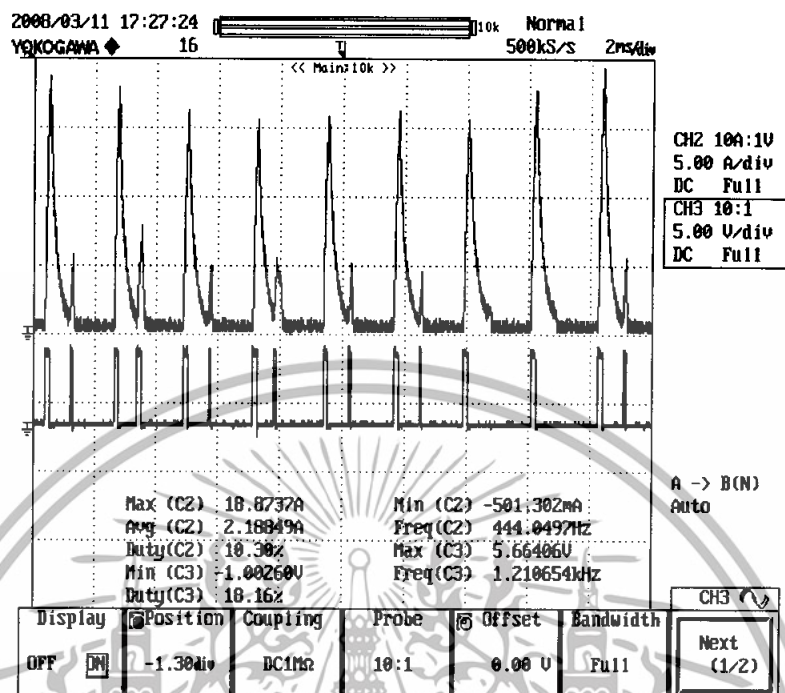


รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A(บน) ในขณะที่มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ 1500 rpm กับ แรงดันตกคร่อม ขดลวดเฟส A(ล่าง)



รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A(บน) ในขณะที่มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ที่ 3900 rpm กับ แรงดันตกคร่อม ขดลวดเฟส A(ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณกระแสเฟส A(บน) ในขณะที่มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ 2000 rpm กับ สัญญาณขับมอเตอร์เฟตจาก microcontroller(ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### บทวิจารณ์และสรุป

#### 6.1 วิเคราะห์ผลของโครงการ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและสร้างมอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์และชุดขับเคลื่อน มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์ เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหนึ่งที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ประกอบไปด้วย สเตเตอร์และโรเตอร์แบบขั้วยื่น ซึ่งในอดีตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังไม่พัฒนาเท่าที่ควร อีกทั้งยังมีขนาดที่ใหญ่ แต่ในปัจจุบันนั้นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและถูกลงจึงทำให้มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์เป็นตัวเลือกหนึ่งในการนำมาใช้งานทดแทนมอเตอร์ประเภทอื่นๆ

#### หลักการออกแบบ

การออกแบบมอเตอร์ ในการออกแบบจะใช้โปรแกรม Finite Element เพื่อหาเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าแรงบิด แรงดัน กระแสที่ได้ในความเร็วรอบของมอเตอร์ในระดับต่างๆ และค่า inductance ในขณะที่โรเตอร์อยู่ในตำแหน่งต่างๆ เพื่อพิจารณาหามุมของการนำกระแสแต่ละเฟส ใช้โปรแกรม AutoCAD ในการเขียนแบบมอเตอร์ โดยใช้มอเตอร์ตัวแรกที่มีอยู่เป็นต้นแบบ แต่ทำการปรับเปลี่ยนบางส่วนให้เหมาะสมกับวัสดุอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ ซึ่งระดับความถูกต้องแม่นยำของการออกแบบอยู่ที่ระดับ 1/1000 นิ้ว หรือ 1 mil

การออกแบบวงจรขั้วนำ สวิตช์ที่ใช้ในคอนเวอร์เตอร์คือมอสเฟส ในตอนแรกได้สร้างวงจรขั้วโดยใช้ HCPL 316J ซึ่งผลปรากฏว่าเกิดการProtect ขึ้นบ่อยครั้งทำให้ไม่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ จึงได้เปลี่ยนมาใช้เป็น IR 2110 โดยไม่มีการแยกกราวด์

การออกแบบคอนเวอร์เตอร์ ในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์จะวงจรแบบสองสวิตช์ต่อเฟสโดยเลือกใช้ MOSFET เป็นสวิตช์เพราะมีความสามารถในการควบคุมรูปร่างของกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้โปรแกรม Protel ในการออกแบบวงจรโดยทำเป็น 4 Layer เพื่อลดพื้นที่ของบอร์ด

การเขียนโปรแกรมควบคุม โปรแกรมจะรับสัญญาณพัลส์จาก encoder เพื่อนำมาวิเคราะห์หาตำแหน่งของโรเตอร์และมุมการ turn on turn off ของการนำกระแสแต่ละเฟส โดย encoder จะถูกจัดให้สร้างสัญญาณ index ในตำแหน่ง alinement ของเฟส A และทำการจำกัดกระแสเฟสโดยรับค่าขนาดกระแสจาก current sensor

#### 6.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข

จากข้อผิดพลาดต่างๆที่กล่าวมา พอจะสรุปเป็นปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไขปัญหาได้ดังนี้

##### 6.2.1 ปัญหาที่พบ

-อุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นต้องสั่งให้ทางร้านที่มีความชำนาญเป็นผู้ทำนั้น บางครั้งเกิด

ความล่าช้าของทางร้าน และของบางอย่างที่สั่งยังไม่ได้ตามที่ตกลงกันไว้

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ความละเอียดของช่องอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์มีค่าต่ำมากซึ่งทางร้านกลึงไม่สามารถกลึงได้ละเอียดตามต้องการ

-จากการที่แปลงค่าสัญญาณอะนาลอก เป็นดิจิตอลเข้า microcontroller ของการนำกระแสเฟส มีค่าละเอียดมาก จนเป็นอุปสรรคในการหาค่าที่ต้องการ

#### 6.2.2 แนวทางการแก้ไขปัญหา

-ศึกษาเนื้อหาด้านวิชาการให้ละเอียดและครอบคลุมหลายๆ เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจการออกแบบ และวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น

-ควรจัดตารางเวลาให้เหมาะสมเพื่อให้โครงการสำเร็จได้ตามเวลาที่กำหนด

#### 6.3 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

จากการศึกษาและออกแบบมอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์และชุดขับเคลื่อนสามารถทำงานได้ตามทฤษฎี ซึ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบเปิดคือไม่สามารถควบคุมความเร็วได้ ในการทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์ มอเตอร์จะทำงานในสภาวะไร้โหลด มอเตอร์จะเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งไปสู่ความเร็วที่ประมาณ 3500 rpm

#### 6.4 แนวทางการพัฒนา

6.4.1 พัฒนาให้สามารถควบคุมความเร็วได้โดยอาศัยการควบคุมแบบปิดเพื่อเลือกความเร็วให้เหมาะสมกับโหลดที่ต้องการ

6.4.2 หาโปรแกรมซึ่งนำมาช่วยในการออกแบบเพื่อให้ได้มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

6.4.3 พัฒนาให้สามารถกลับทวนของมอเตอร์ได้

## บรรณานุกรม

[1] ผศ.ดร. สุวัฒน์ กิตติรัตนสัจจา, “มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์:ทฤษฎีและการออกแบบ”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, เมษายน 2550

[2] นาย สิทธิชัย แก้วไทย, “วิธีการประมาณค่าแรงบิดสำหรับเครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์”,วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,2549

[3] Sisavath Khotpanya ,“A magnetic model of three-phase switched reluctance machine using cubic spline interpolation technique”, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master engineering,2006

[4].T.J.E. Miller, “Switched Reluctance Motors and their Control”, Magna Physics publications oxford science publication, 1993



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

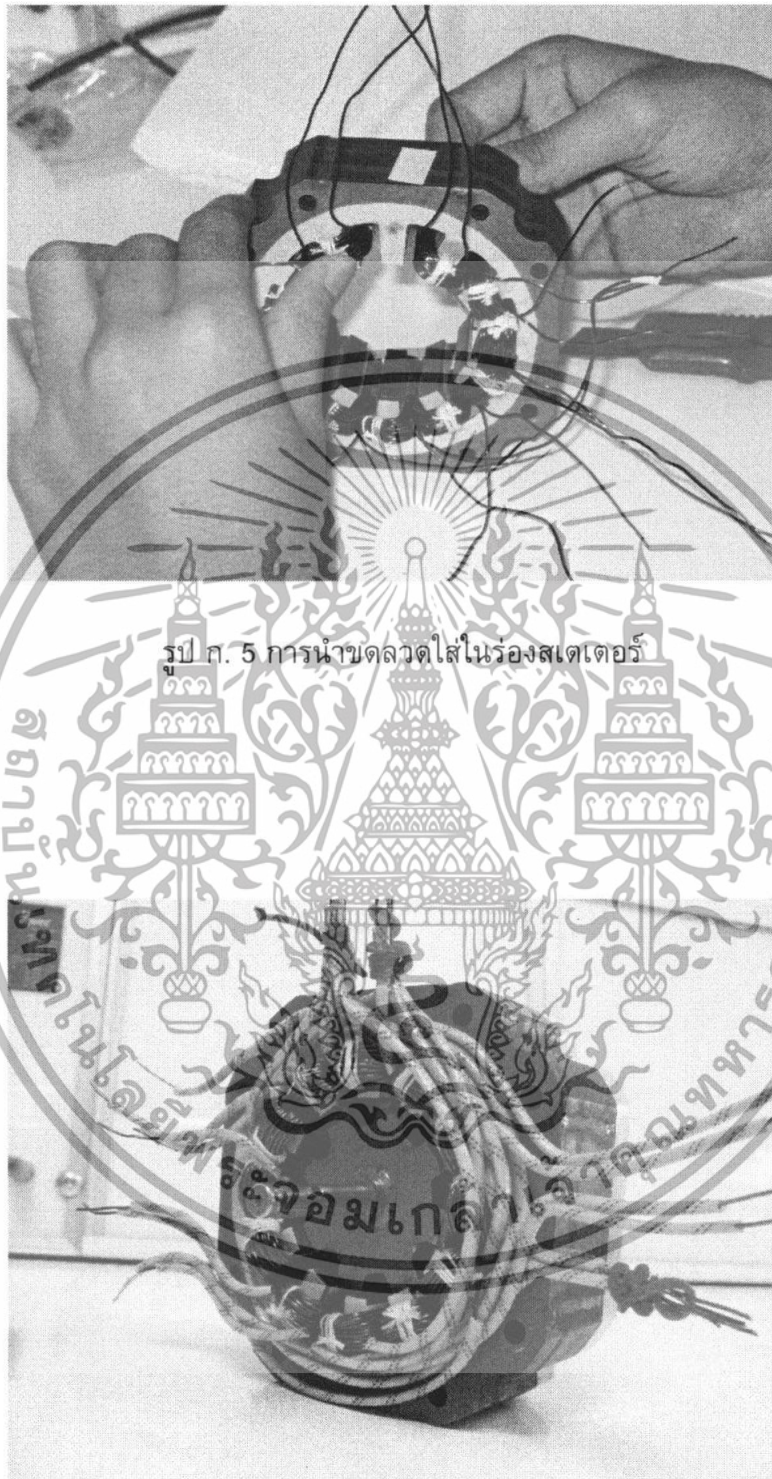
## โครงสร้างของสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์



รูป ก.2 bearing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

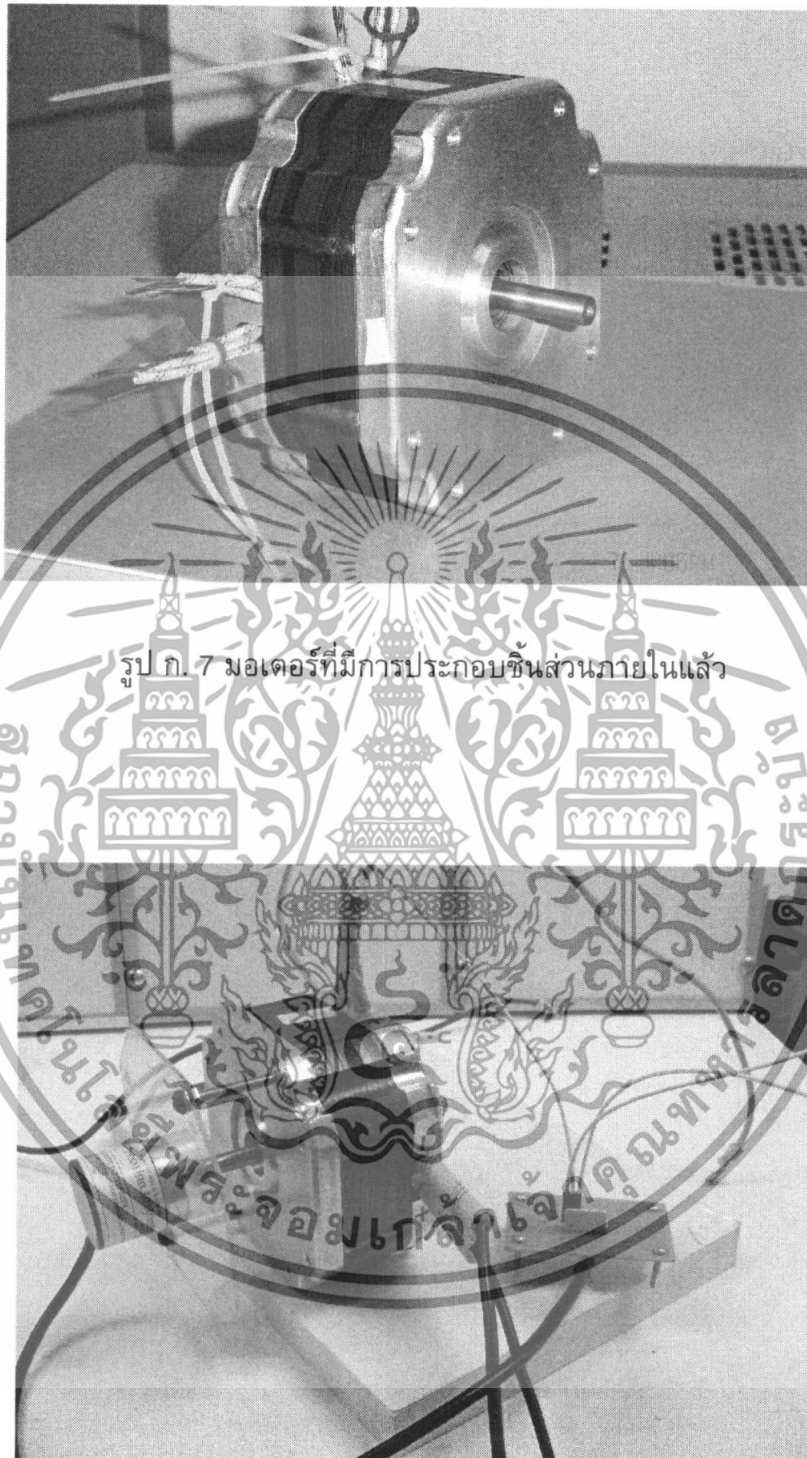




รูป ก. 5 การนำขดลวดใส่ในร่องสเตเตอร์

รูป ก. 6 การหุ้มสายขดลวดทองแดงด้วยฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

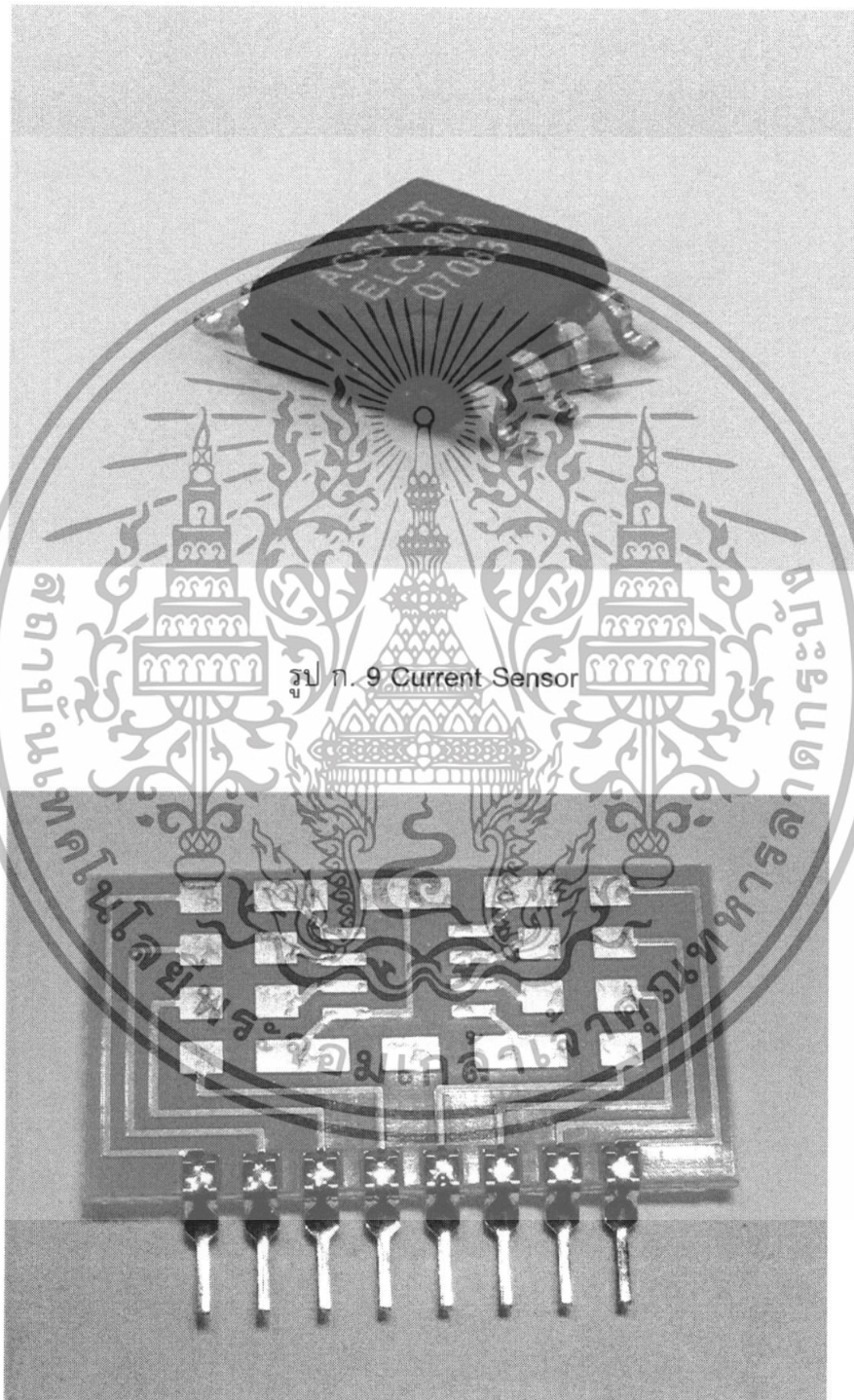


รูป ก. 7 มอเตอร์ที่มีการประกอบชิ้นส่วนภายในแล้ว

รูป ก. 8 มอเตอร์ที่มีการติดตั้ง encoder แล้ว

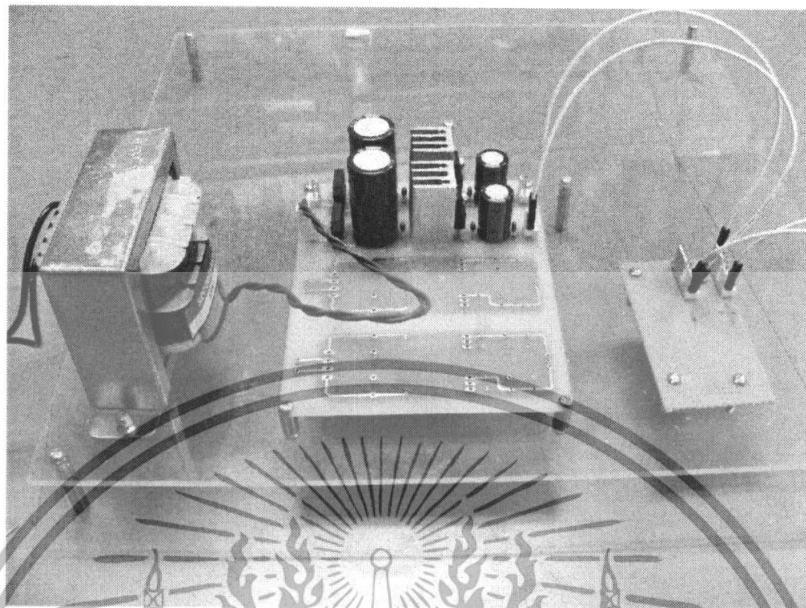
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Converter



รูป ก. 10 Suft Board

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก. 11 Supply 5 V



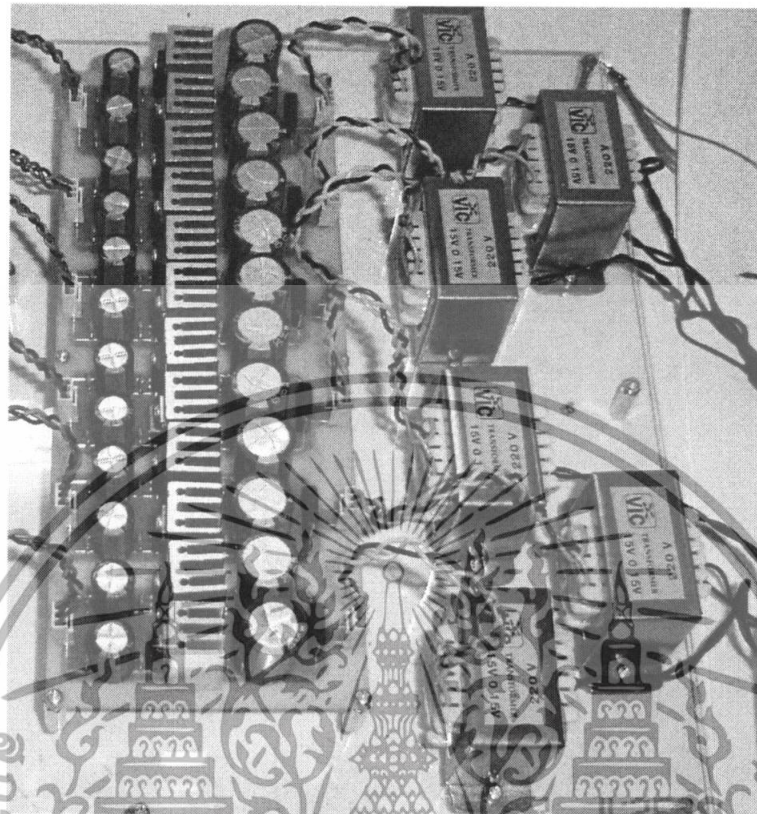
รูป ก. 12 แผ่นบอร์ด Converter 4 layers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

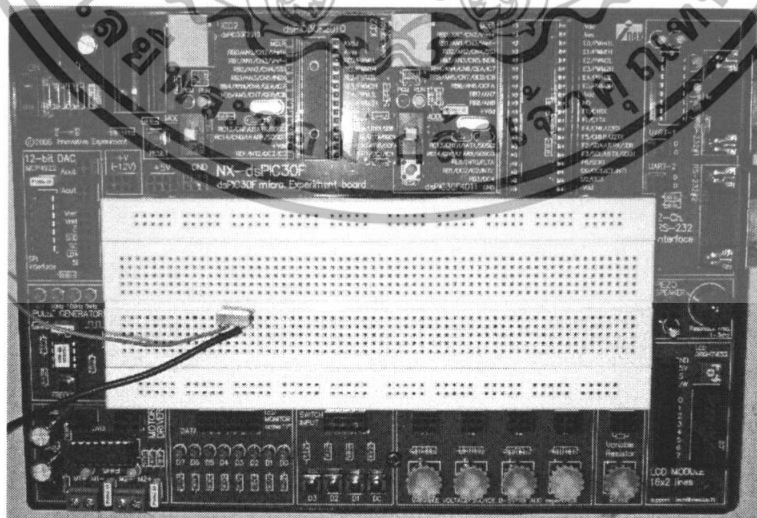


รูป ก. 14 วงจรขับนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



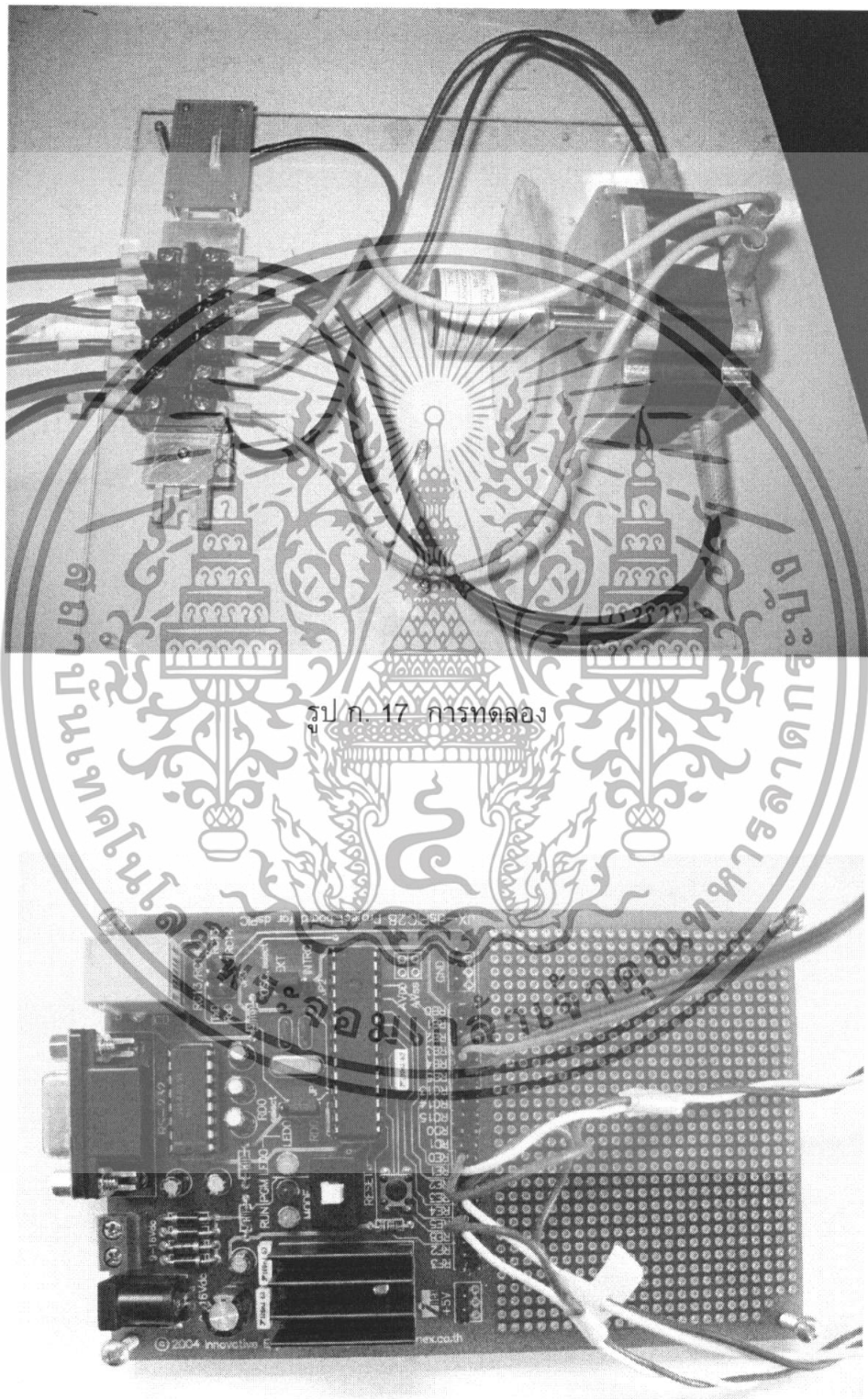
รูป ก. 15 Supply +15V



รูป ก. 16 บอร์ด microcontroller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

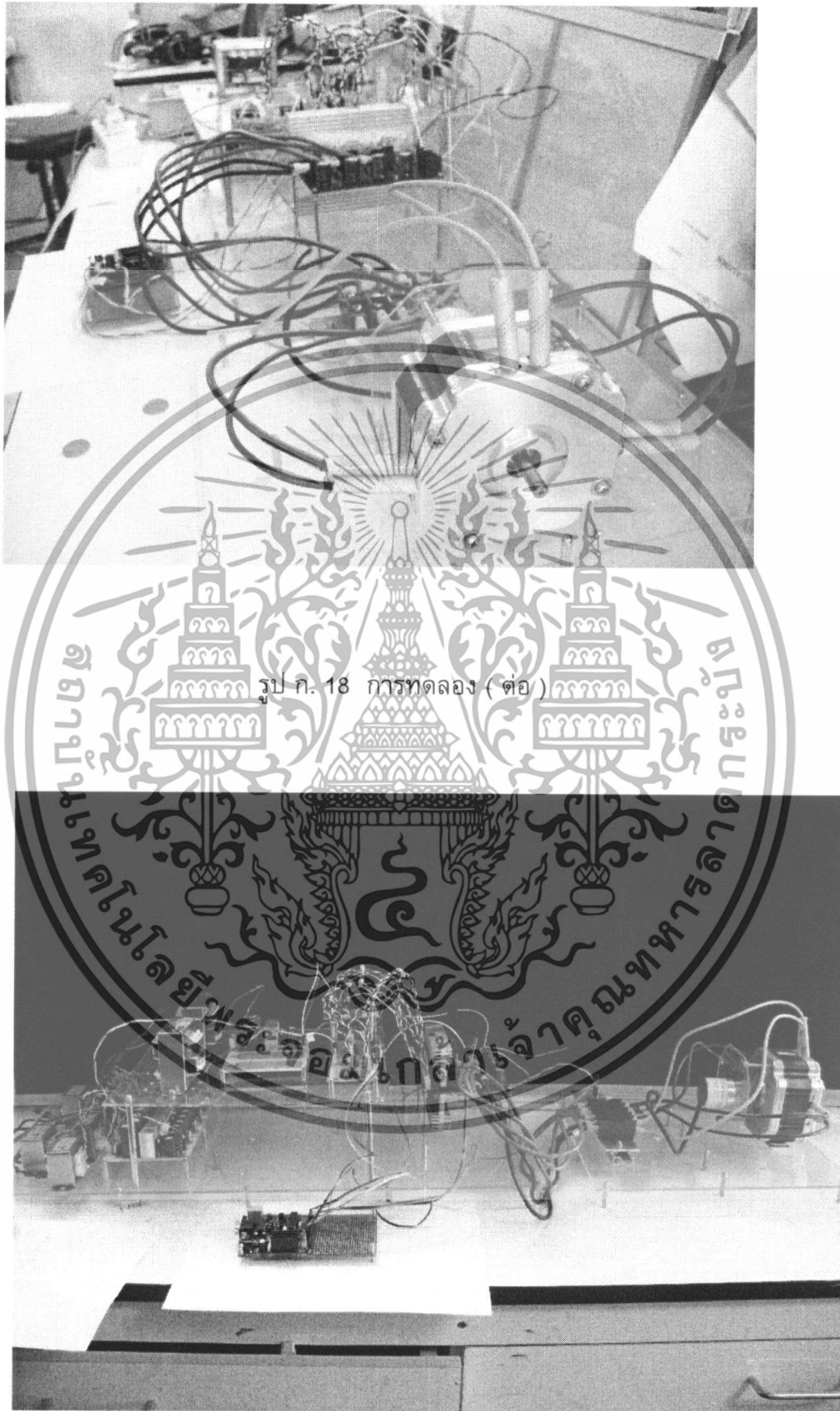
## รูปการทดลอง



รูป ก. 17 การทดลอง

รูป ก. 18 บอร์ดทดลองที่ใช้ในการทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก. 18 การทดลอง ( ต่อ )

รูป ก. 19 การทดลอง ( ต่อ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

//----- Function initialize ACD module -----//
//-----//

void adc_init()
{
    unsigned int Channel, PinConfig, Scansselect, 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_POS_SAMPLEA_AN1 & // Channel 0 positive Input select AN1
              ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN2 & // Channel 0 positive input select AN2
              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 ;

    Scansselect = SKIP_SCAN_AN3 &
                  SKIP_SCAN_AN4 &
                  SKIP_SCAN_AN5 &
                  SKIP_SCAN_AN6 &
                  SKIP_SCAN_AN7 ;

    Adcon3_reg = ADC_SAMPLE_TIME_31 & // Sample for 10 time
                 ADC_CONV_CLK_SYSTEM & // Internal Clock
                 ADC_CONV_CLK_Tcy2;

    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_16; // 16sample 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_AUTO & // ADC manual clock

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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
}

//-----//
//-----//
//-----//
void _ISR_T1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T1IF = 0;
    ///TIMER///

    LATDbits.LATD1 = 1; // เช็คว่าโปรแกรมใช้เวลาเท่าไร
    LATDbits.LATD0 = !LATDbits.LATD0; //เช็คเวลาการเข้า interrupt timer

    ADCON1bits.SAMP = 1; // Start Sampling
    ConvertADC10(); // Convert ADC
    result[0] = ReadADC10(0); // Keep value for ADC value
    result[1] = ReadADC10(1);
    result[2] = ReadADC10(2);

    pos_value = ReadQEI(); // Read position count

    if(pos_value < 899)
    {
        if (pos_value >= 450 && pos_value <= 790) //check position count
        {
            LATEbits.LATE1 = 1;
            if (result[0] <= 645) //check value for ADC value
            {
                LATEbits.LATE0 = 1;
            }
            else LATEbits.LATE0 = 0;
        }
        else
        {
            LATEbits.LATE0 = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        LATEbits.LATE1 = 0 ;
    }

    if (pos_value >= 750 || pos_value <= 190)
    {
        LATEbits.LATE3 = 1;
        if (result[1] <= 645)
        {
            LATEbits.LATE2 = 1 ;
        }
        else LATEbits.LATE2 = 0 ;
    }
    else
    {
        LATEbits.LATE2 = 0;
        LATEbits.LATE3 = 0;
    }

    if (pos_value >= 150 && pos_value <= 490)
    {
        LATEbits.LATE5 = 1;
        if (result[2] <= 645 )
        {
            LATEbits.LATE4 = 1 ;
        }
        else LATEbits.LATE4 = 0 ;
    }
    else
    {
        LATEbits.LATE4 = 0;
        LATEbits.LATE5 = 0;
    }
}

else POSCNT = 0;

LATDbits.LATD1 =0 ;
}

//-----//
//-----//
//-----//

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void timer_init()
{
    unsigned int match_value;
    ConfigIntTimer1 (T1_INT_PRIOR_1 & T1_INT_ON);
    WriteTimer1(0);
    match_value = 553;
    IFS0bits.T1IF = 0;
    OpenTimer1 (T1_ON &
                T1_GATE_OFF &
                T1_IDLE_STOP &
                T1_PS_1_1 &
                T1_SYNC_EXT_OFF &
                T1_SOURCE_INT, match_value);
}

//-----
//----- Main Program -----
//-----

int main(void)
{
    qei_init(); // Initial QEI
    timer_init(); // Initial Timer
    adc_init(); // Initial ADC

    while(1) // Infinite loop
    {
        TRISDbits.TRISD0 = 0;
        TRISDbits.TRISD1 = 0;
        TRISBbits.TRISB0 = 1;
        TRISBbits.TRISB1 = 1;
        TRISBbits.TRISB2 = 1;
        TRISE = 0;
        DFLTCON = 0x0390 ;
        QEICON = 0x240E ;
    }
    return 0;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



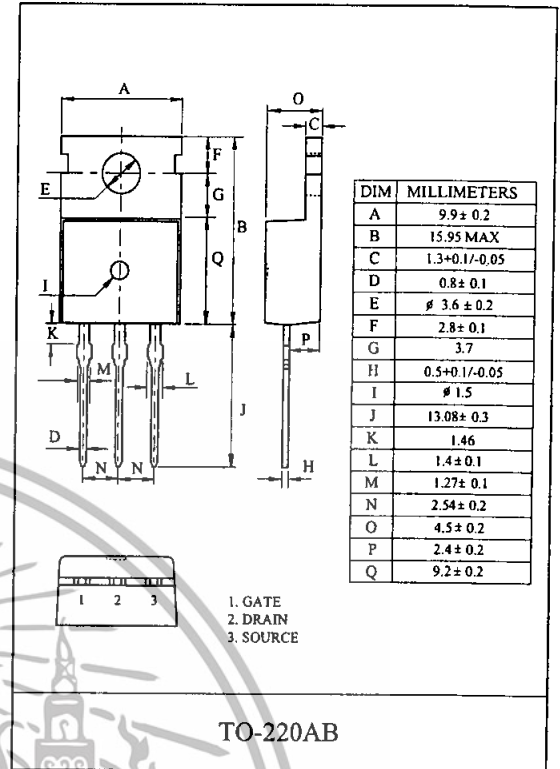
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## General Description

This planar stripe MOSFET has better characteristics, such as fast switching time, low on resistance, low gate charge and excellent avalanche characteristics. It is mainly suitable for active power factor correction, electronic lamp ballasts based on half bridge topology and switching mode power supplies.

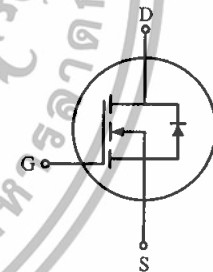
## FEATURES

- $V_{DSS} = 60V$ ,  $I_D = 50A$
- Drain-Source ON Resistance :  
 $R_{DS(ON)} = 0.022 \Omega$  @  $V_{GS} = 10V$
- $Q_g(\text{typ.}) = 32nC$
- Improved dv/dt capacity, high Ruggedness
- Maximum Junction Temperature Range (175°C)



## MAXIMUM RATING (Tc=25°C)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT
Drain-Source Voltage	$V_{DSS}$	60	V
Gate-Source Voltage	$V_{GSS}$	±20	V
Drain Current	@Tc=25°C	50	A
	@Tc=100°C	35	
	Pulsed (Note1)	200	
Single Pulsed Avalanche Energy (Note 2)	$E_{AS}$	493	mJ
Repetitive Avalanche Energy (Note 1)	$E_{AR}$	12	mJ
Peak Diode Recovery dv/dt (Note 3)	dv/dt	7.0	V/ns
Drain Power Dissipation	Tc=25°C	120	W
	Derate above 25°C	0.8	W/°C
Maximum Junction Temperature	$T_j$	175	°C
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-55~175	°C
<b>Thermal Characteristics</b>			
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{thJC}$	1.24	°C/W
Thermal Resistance, Case-to-Sink	$R_{thCS}$	0.5	°C/W
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{thJA}$	62.5	°C/W



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

### Features and Benefits

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5  $\mu$ s output rise time in response to step input current
- 50 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , and 4% at  $-40^\circ\text{C}$  to  $85^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m $\Omega$  internal conductor resistance
- 2.1 kV<sub>RMS</sub> minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage

### Package: 8 pin SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1



### Description

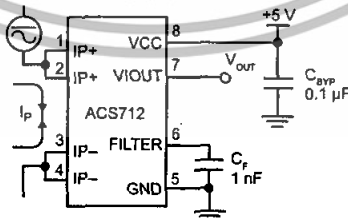
The Allegro® ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, automotive, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switched-mode power supplies, and overcurrent fault protection.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall sensor circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which is sensed by the integrated Hall IC and converted into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ( $>V_{IOUT(Q)}$ ) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sensing. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m $\Omega$  typical, providing low power

*Continued on the next page...*

### Typical Application



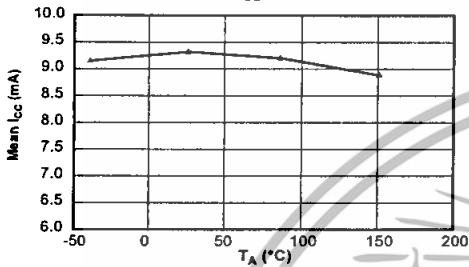
Application 1. The ACS712 outputs an analog signal,  $V_{OUT}$ , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sensed current,  $I_p$ , within the range specified.  $C_f$  is recommended for noise management, with values that depend on the application.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

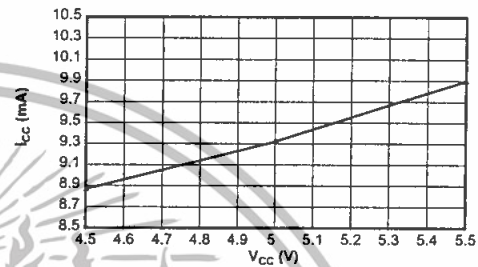
### Characteristic Performance

$I_p = 30\text{ A}$ , Sens = 66 mV/A unless otherwise specified

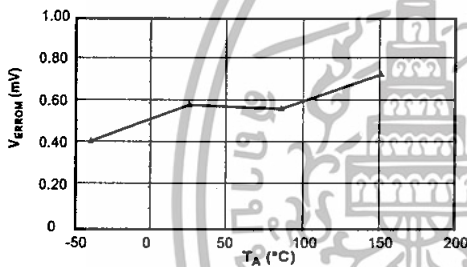
Mean Supply Current versus Ambient Temperature  
 $V_{CC} = 5\text{ V}$



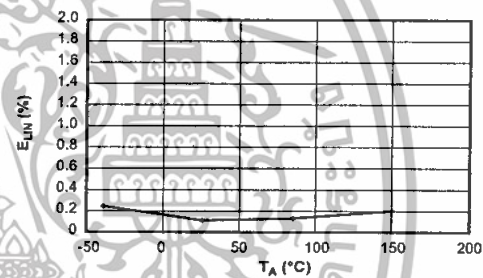
Supply Current versus Supply Voltage



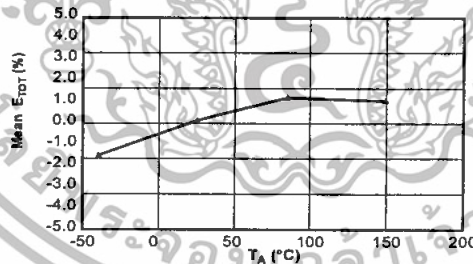
Magnetic Offset Current versus Ambient Temperature



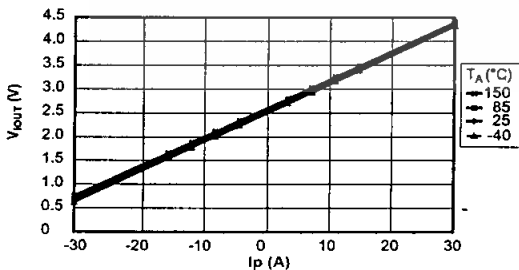
Nonlinearity versus Ambient Temperature



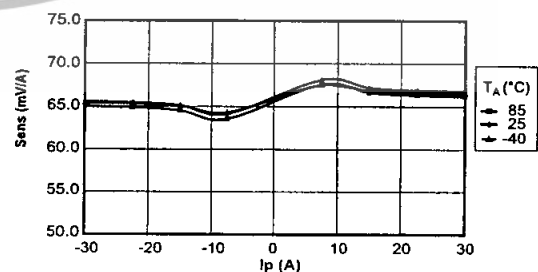
Mean Total Output Error versus Ambient Temperature



Output Voltage versus Sensed Current



Sensitivity versus Sensed Current



# MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560

Preferred Devices

## SWITCHMODE™ Power Rectifiers

... designed for use in switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes, these state-of-the-art devices have the following features:

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

### 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
- Shipped 50 units per plastic tube
- Marking: U1510, U1515, U1520, U1540, U1560

### MAXIMUM RATINGS

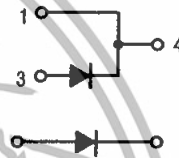
Please See the Table on the Following Page



ON Semiconductor™

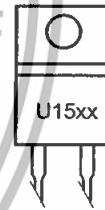
<http://onsemi.com>

**ULTRAFAST  
RECTIFIERS  
15 AMPERES  
100-600 VOLTS**



TO-220AC  
CASE 221B  
PLASTIC

### MARKING DIAGRAM



U15xx = Device Code  
xx = 10, 15, 20,  
40 or 60

### ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
MUR1510	TO-220	50 Units/Rail
MUR1515	TO-220	50 Units/Rail
MUR1520	TO-220	50 Units/Rail
MUR1540	TO-220	50 Units/Rail
MUR1560	TO-220	50 Units/Rail

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## IR2110(S)/IR2113(S) & (PbF)

### HIGH AND LOW SIDE DRIVER

#### Features

- Floating channel designed for bootstrap operation  
Fully operational to +500V or +600V  
Tolerant to negative transient voltage  
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible  
Separate logic supply range from 3.3V to 20V  
Logic and power ground  $\pm 5V$  offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs
- Also available LEAD-FREE

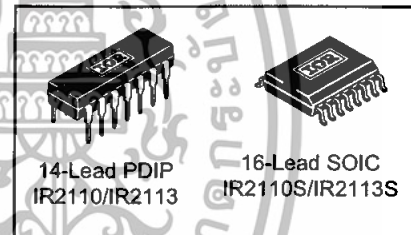
#### Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

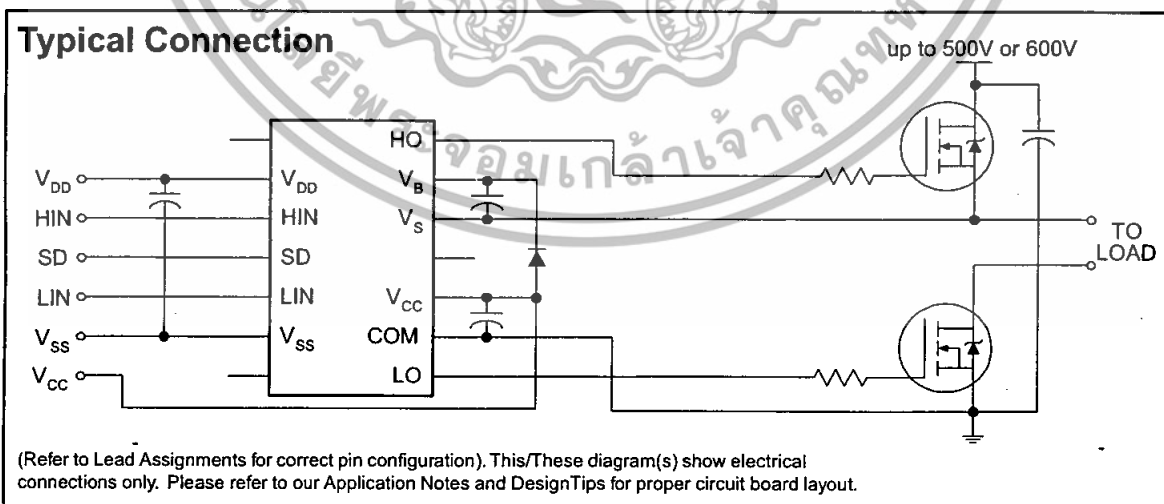
#### Product Summary

$V_{OFFSET}$ (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{O+/-}$	2A / 2A
$V_{OUT}$	10 - 20V
ton/off (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

#### Packages



#### Typical Connection





# dsPIC30F2010

## 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/33F Programmer's Reference Manual" (DS70157).

### High-Performance Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture
- 83 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 nonvolatile 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 (ADC) with:
  - 1 Msps (for 10-bit A/D) conversion rate
  - Six input channels
  - Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Brown-out Reset

## 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/LVDIN/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/SOSC1/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	21	PWM2L/RE2
EMUD3/AN0/VREF+/CN2/RB0	27	20	PWM2H/RE3
MCLR	26	19	PWM3L/RE4
AVDD	25	18	PWM3H/RE5
AVSS	24	17	VDD
PWM1L/RE0	23	16	VSS
PWM1H/RE1	22	15	PGC/EMUC/U1RX/SDI1/SDA/RF2
AN2/SS1/LVDIN/CN4/RB2	1		
AN3/INDX/CN5/RB3	2		
AN4/QEA/IC7/CN6/RB4	3		
AN5/QEB/IC8/CN7/RB5	4		
VSS	5		
OSC1/CLKI	6		
OSC2/CLKO/RC15	7		
EMUD1/SOSC1/T2CK/U1ATX/CN1/RC13	8		
EMUC1/SOSCO/T1CK/U1ARX/CN0/RC14	9		
VDD	10		
EMUD2/OC2/IC2/INT2/RD1	11		
EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0	12		
FLTA/INT0/SCK1/OCFA/RE8	13		
PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/RF3	14		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

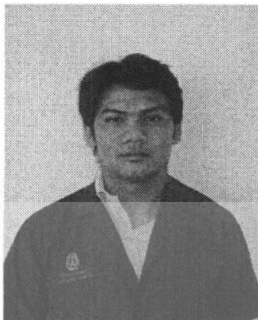
# dsPIC30F2010

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

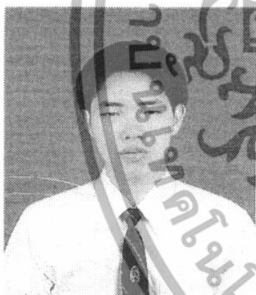
Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
PGD	I/O	ST	In-Circuit Serial Programming™ data input/output pin.
PGC	I	ST	In-Circuit Serial Programming clock input pin.
RB0-RB5	I/O	ST	PORTB is a bidirectional I/O port.
RC13-RC14	I/O	ST	PORTC is a bidirectional I/O port.
RD0-RD1	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port.
RE0-RE5, RE8	I/O	ST	PORTE is a bidirectional I/O port.
RF2, RF3	I/O	ST	PORTF is a bidirectional I/O port.
SCK1	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI #1.
SDI1	I	ST	SPI #1 Data In.
SDO1	O	—	SPI #1 Data Out.
SS1	I	ST	SPI #1 Slave Synchronization.
SCL	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I <sup>2</sup> C™.
SDA	I/O	ST	Synchronous serial data input/output for I <sup>2</sup> C.
SOSCO	O	—	32 kHz low-power oscillator crystal output.
SOSCI	I	ST/CMOS	32 kHz low-power oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
T1CK	I	ST	Timer1 external clock input.
T2CK	I	ST	Timer2 external clock input.
U1RX	I	ST	UART1 Receive.
U1TX	O	—	UART1 Transmit.
U1ARX	I	ST	UART1 Alternate Receive.
U1ATX	O	—	UART1 Alternate Transmit.
VDD	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
VSS	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VREF+	I	Analog	Analog Voltage Reference (High) input.
VREF-	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

## ประวัติคณะผู้จัดทำ

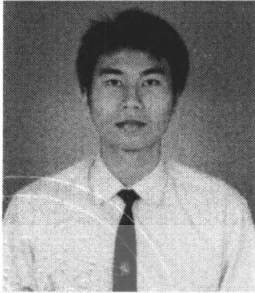


นายสวการย์ ศรีแสงเพ็ญ เกิดวันที่ 6 มิถุนายน 2528 ที่จังหวัด สระบุรี สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนสระบุรีวิทยาคม จังหวัด สระบุรี เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันบัณฑิตเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปี 2547 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงELECTRICAL MACHINE ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม Finite Element Analysis , Ms-office , Internet & E-mail ฝึกงานที่บริษัท ซีเมนต์ไทย(ท่าหลวง) จำกัด ระหว่างเดือน เมษายน ถึง พฤษภาคม 2550  
E-mail : act\_jung@hotmail.com



นายสุทธิ ลิ้มปนชัยพรกุล เกิดวันที่ 24 มกราคม 2529 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนอัสสัมชัญ สมุทรปราการ เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันบัณฑิตเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปี 2547 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงELECTRICAL MACHINE ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม Finite Element Analysis , MPLab, Ms-office , Internet & E-mail ฝึกงานที่มหาชัยโตโก ประเทศญี่ปุ่นระหว่าง เดือน เมษายน ถึง พฤษภาคม 2550  
E-mail : oiji\_greentea@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นายสุทธิคุณ วิเขตกิจ เกิดวันที่ 31 ตุลาคม 2528  
ที่จังหวัด ชัยนาท สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและ  
ตอนปลายจากโรงเรียนนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ เข้า  
ศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ.  
2547 มีความสนใจและความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
แขนง Machine ความสามารถในการใช้โปรแกรม AutoCad ,  
Finite Element Analysis , Ms-office , Internet & E-mail  
ได้รับการฝึกงานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สำนักงานใหญ่ ระหว่าง  
เดือนเมษายน ถึง เดือน พฤษภาคม 2550  
E-mail : suthikun\_w@hotmail.com



นายสุศักดิ์ เมืองแก้ว เกิดวันที่ 30 กรกฎาคม 2529  
ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้น  
มัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจาก โรงเรียนราชวินิตบาง  
แก้วในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดสมุทรปราการ เข้าศึกษาที่  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2547 มีความสนใจและความ  
ถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนง Power Electronics  
ความสามารถในการใช้โปรแกรม Auto CAD , PLC , Protel  
99 SE ฝึกงานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำนักงานใหญ่ ระหว่าง  
เดือน เมษายน ถึง พฤษภาคม 2550  
E-mail : kala\_kasang@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้