

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบนุ่มนวล  
3 PHASE INDUCTION MOTOR SOFT STARTER

นายกนธี จารума  
นายกิตติคุณ นิตน์สันติคุณ  
นายเขมรัฐ เหมชาติลือชัย  
นายจรฤทธิ์ วัชรศิลป์

รฟ.  
ค.ร.ก.  
2549

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 72987  
วันเดือนปี..... 27 ส.ย. 2550

b. 11446031  
i.....

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549  
การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบนุ่มนวล  
3 PHASE INDUCTION MOTOR SOFT STARTER



อาจารย์ที่ปรึกษา

ร.ศ.ดร. วิจิตร	กสินเรศ
อ. ชัยทัต	มณีอินทร์
อ. เฉลิมชาติ	มานพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสแตร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบนิ่มนวล  
3 PHASE INDUCTION MOTOR SOFT STARTER

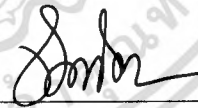
ผู้จัดทำ

- 
1. นายกนธิ จารума 46010003
  2. นายกิตติคุณ นิต์ศน์สันติคุณ 46010039
  3. นายเขมรัฐ เหมชาติลือชัย 46010079
  4. นายจรฤทธิ์ วัชรศิลป์ 46010093



(รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(อ.ชัยทัต มณีอินทร์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(อ.เจลิมชาติ มานพ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การสแตร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบนิมทวล

นายกนธิ จารุมา

นายกิตติคุณ นิตส์สันติคุณ

นายเขมรัฐ เหมชาติลือชัย

นายจรฤทธิ์ วัชรศิลป์

รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ เฉลิมชาติ มานพ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

#### บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอชุดสแตร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบนิมทวล โดยใช้หลักการควบคุมกระแสที่ขดสเตเตอร์ ในขณะที่สแตร์ทให้คงที่ โดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 ควบคุมมุมจุดชนวนของ ไทริสเตอร์ ด้วยการควบคุมแบบอินทิกรัล ทำให้แรงดันเฉลี่ยที่ขดสเตเตอร์ ปรับเปลี่ยนอย่างอัตโนมัติ กระแสที่ขดสเตเตอร์ขณะทำการสแตร์ทน้อยกว่าการสแตร์ทแบบสแตร์ทโดยตรงด้วยแหล่งจ่ายไฟ ส่งผลให้ยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์ นอกจากนี้ยังได้ทำการหาค่ากระแสและเวลาที่เหมาะสมในการขับโหลดขนาดต่างๆกัน

### 3 Phase Induction Motor Soft Starter

Kontee	Jaruma
Kittikhun	Nitatsuntikhun
Khammarat	Hemnachatluechai
Jorrarit	Watcharasil
Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinnaret	Advisor
Chaitat Maneein	Advisor
Chalermchart Manop	Advisor

2006

#### Abstract

This project proposes a soft starter set for three phase induction motor designed on basis of constant stator current control during starting up. A Microcontroller dsPIC30F4011 is used to control thyristor's firing angle with integral control resulting in automatic average stator voltage adjustment. With this method the stator current during starting up is less than when comparing with the direct on line method. As a consequence motor lifetime is extended. In addition finding the optimum current and starting time which is suitable for driving motor at different load level is given.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการนัฐศึกษาซึ่งต่อความกรุณาที่ ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ เฉลิมชาติ มานพ และ อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนอาจารย์ใน ภาควิชาที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านโครงการนี้ก็คงไม่ สำ เสร็จลุล่วงไปได้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณพี่สมศักดิ์ พี่ตัวเล็ก เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของ โครงการ และผู้จัดทำต้องขอบคุณพี่คังและพี่ๆนักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่ให้คำปรึกษา ตลอดจนเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ(lab) ที่คอยเอาใจใส่คอยถามไถ่ตลอดเวลา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยส่งเสียเงินทอง ให้ ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญรูป	III
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของปัญหา	2
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดโครงการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 เนื้อหาปริญญานิพนธ์	3
บทที่ 2 เนื้อหาปริญญานิพนธ์	
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ	4
2.1.1 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ	5
2.1.2 การหมุนของโรเตอร์	8
2.1.3 สลิป	9
2.1.4 แรงบิดเริ่มต้น	9
2.1.5 แรงบิดขณะสแตร์ทของโรเตอร์แบบกรงกระรอก	10
2.1.6 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	10
2.1.7 คลื่น mmf ภายใน Machine	11
2.1.8 การทดสอบมอเตอร์	15
2.2 การสแตร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก	19
2.2.1 การสแตร์ทแบบต่อเข้ากับแหล่งจ่ายโดยตรง	20
2.2.2 การสแตร์ทแบบใช้ขดลวดบางส่วน	23
2.2.3 การสแตร์ทแบบสแตร์ท-เคลด้า	26
2.2.4 การสแตร์ทโดยใช้หม้อแปลงออโต	29
2.2.5 การสแตร์ทโดยใช้ตัวต้านทาน	31
2.2.6 การสแตร์ทโดยใช้ตัวรีแอกเตอร์	32
2.2.7 การสแตร์ทโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
2.3 การควบคุมแรงดันที่สแตเตอร์	43
2.3.1 การควบคุมแรงดันแบบ 3 เฟส	43
2.3.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียการควบคุมแต่ละแบบ	44
2.3.3 การควบคุมแบบไลน์	45
2.3.4 การต่อโหลดแบบสตาร์	45
2.4 วงจรจุดชนวน วงจรขับ SCR และชุด Zero Crossing	49
2.4.1 พื้นฐานการจุดชนวนไครซิสเตอร์	49
2.4.2 วงจรจุดชนวนไครซิสเตอร์ด้วยหม้อแปลงแบบแยกกราวด์	50
2.4.3 วงจรสับเบอร์สำหรับสวิตช์ตระกูลไครซิสเตอร์	51
2.4.4 Zero Crossing Voltage	52
2.4.5 วงจรสร้างแรงดัน	53
2.4.6 วงจร Feed Back กระแส	54
2.5 หลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011	55
2.5.1 dsPIC กับการตอบสนองสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอก	55
2.5.2 Timer	59
2.5.3 การเชื่อมต่อกับคีย์แพดหรือสวิตช์เมตริก 4 x 4	64
2.5.4 การขับโมดูลแบบผลึกเหลว	68
บทที่ 3 แบบจำลองการทำงานของวงจร	76
3.1 หลักการทำงานของวงจรหลัก	76
3.2 หลักการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์	78
3.3 หลักการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณ Feedback	79

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	81
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	117
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 แสดงภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดฟันขดลวด	5
รูปที่ 2-2 ลักษณะของร่องสลีตในโรเตอร์ชนิดต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ กรงกระรอก	6
รูปที่ 2-3 สมบัติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ เหนี่ยวนำที่ใช้โรเตอร์แบบกรงกระรอก	7
รูปที่ 2-4 รูป a แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ ตามกฎมือขวาของเฟลมมิง รูป b แสดงการเกิดกระแสเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ ตามกฎของเลนซ์ และเกิด ความเร็วสัมพันธ์ระหว่างโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุน รูป c แสดงการเกิดแรงบิดของโรเตอร์ แล้วโรเตอร์หมุนทิศเดียวกับสนาม แม่เหล็กหมุน	8
รูปที่ 2-5 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Equivalent Circuit)	10
รูปที่ 2-6 ลักษณะของ mmf ซึ่งเกิดจากขดลวด 1 ชุด, N-รอบด้านทั้งสองของ ขดลวดห่างกัน $180^\circ$	12
รูปที่ 2-7 คลื่น mmf ที่เกิดจากขดลวด 1 เฟส ขดลวดจำนวน 3 เฟส	13
รูปที่ 2-8 วงจรทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในลักษณะ No-Load	15
รูปที่ 2-9 วงจรสมมูลย์มอเตอร์เหนี่ยวนำในลักษณะ No-Load	15
รูปที่ 2-10 วงจรทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในลักษณะ Block-Rotor	16
รูปที่ 2-11 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในลักษณะ Block-Rotor	16
รูปที่ 2-12 การจำแนกวิธีสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก	19
รูปที่ 2-13 วงจรสมมูลย์ต่อเฟส ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	20
รูปที่ 2-14 การแบ่งชุดขดลวดเพื่อการสตาร์ท	23
รูปที่ 2-15 การต่อชุดขดลวดตั้งแต่เริ่มสตาร์ทจนถึงภาวะทำงานปกติ	24
รูปที่ 2-16 รูปกราฟลักษณะสมบัติของการสตาร์ทแบบใช้ชุดขดลวดบางส่วน	25
รูปที่ 2-17 ไดอะแกรมของวงจรสตาร์ทแบบใช้ชุดขดลวดบางส่วน รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส, ทอร์ก, และความเร็ว	25
รูปที่ 2-18 การสตาร์ทโดยต่อแบบสตาร์ท-เคลด้า	26
รูปที่ 2-19 วงจรสมมูลย์เริ่มสตาร์ทเมื่อต่อชุดขดลวดแบบ สตาร์ท-เคลด้า	27

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2-20 ความสัมพันธ์ของกระแสมอเตอร์และทอร์กที่มอเตอร์สร้างได้กับ ความเร็วรอบที่สตาร์ทเมื่อต่อแบบสตาร์ท-เคลด้า	28
รูปที่ 2-21 รูปกราฟการเปรียบเทียบกระแสช่วงสตาร์ท	29
รูปที่ 2-22 การสตาร์ทโดยใช้หม้อแปลงออโต	29
รูปที่ 2-23 ความสัมพันธ์ของกระแสและทอร์กกับความเร็	30
รูปที่ 2-24 การสตาร์ทโดยใช้ตัวต้านทาน	31
รูปที่ 2-25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ทอร์ก และความเร็ว	32
รูปที่ 2-26 การสตาร์ทแบบใช้รีแอคเตอร์	33
รูปที่ 2-27 การขนาน Inverter โดยผ่านหม้อแปลงอินเตอร์เฟส	33
รูปที่ 2-28 การขนาน Inverter โดยใช้มอเตอร์แบบขดลวดขนาน	34
รูปที่ 2-29 การต่อ SCR สำหรับการสตาร์ทโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	36
รูปที่ 2-30 การแสดงลักษณะการต่อการควบคุม โหลด 3 เฟส แบบต่างๆ	43
รูปที่ 2-31 โหลดต่อแบบสตาร์ท และสัญญาณจุดชนวนเกิด $\alpha = 90^\circ$	46
รูปที่ 2-32 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของวงจร	46
รูปที่ 2-33 คุณสมบัติของสัญญาณจุดชนวนไครซิสเตอร์	49
รูปที่ 2-34 แสดงการใช้ Pulse Transformer ในการแยกวงจร	50
รูปที่ 2-35 วงจรสับเบอร์สำหรับไครซิสเตอร์	51
รูปที่ 2-36 วงจร Zero Crossing Voltage	52
รูปที่ 2-37 วงจรสร้างแรงดัน +15 และ -15 โวลต์และ วงจรสร้างแรงดัน 5 โวลต์	53
รูปที่ 2-38 วงจร Feed Back กระแส	54
รูปที่ 2-39 แสดงรายละเอียดของการอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์หลักของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC	56
รูปที่ 2-40 แสดงไคอะแกรมการทำงานพื้นฐานของไทมเมอร์ 1 ที่ทำงานด้วย ฐานเวลาแบบ A	60
รูปที่ 2-41 ไคอะแกรมเวลาแสดงการทำงานของไทมเมอร์ในโหมดเกิดไทมเมอร์	62
รูปที่ 2-43 ไคอะแกรมแสดงเวลาการเกิดอินเทอร์รัปต์เมื่อค่าของรีจิสเตอร์ TMRx เท่ากับรีจิสเตอร์คาบเวลา PRx โดยสังเกตได้จากการเซตบิตเฟล็ก TxIF	63

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2-44 วงจรของสวิตช์แบบต่อเข้ากับไฟเลี้ยงและกราวด์	65
รูปที่ 2-45 วงจรสวิตช์แบบเมตริกซ์หรือคีย์แพด	66
รูปที่ 2-46 แสดงพอร์ตที่เชื่อมต่อกับคีย์แพด	67
รูปที่ 2-47 โฟล์ดการแก้ปัญหาสัญญาณ Bounce ด้วย Software	67
รูปที่ 3-1 วงจรการทำงานวงจรหลัก	76
รูปที่ 3-2 รูปกราฟของกระแส ทอร์ก และความเร็วรอบ เมื่อใช้ Soft Start เมื่อ ทอร์ก โหลดเป็น 50 N (ขวา)และกราฟของกระแส ทอร์ก และ ความเร็วรอบ เมื่อต่อ Direc Online เมื่อทอร์ก โหลดเป็น 50 N (ซ้าย)	77
รูปที่ 3-3 การทำงานของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ (Subsystem 5)	78
รูปที่ 3-4 แสดงสัญญาณการทริกที่การจุดชนวนที่มุม 90 องศา	79
รูปที่ 3-5 หลักการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณ Feedback (Subsystem 4)	79
รูปที่ 3-6 รูปกราฟแสดงการจุดชนวนที่มุม 90 องศา	80
รูปที่ 3-6 (ต่อ) รูปกราฟแสดงการจุดชนวนที่มุม 90 องศา รูปกราฟแรงดันและกระแสไลน์ในกรณีโหลดหลอดไฟ (R)	80
รูปที่ 4-1 มุมจุดชนวนเป็น 30 องศา	82
รูปที่ 4-2 มุมจุดชนวนเป็น 60 องศา	82
รูปที่ 4-3 มุมจุดชนวนเป็น 90 องศา	82
รูปที่ 4-4 มุมจุดชนวนเป็น 120 องศา	82
รูปที่ 4-5 มุมจุดชนวนเป็น 150 องศา รูปกราฟแรงดันและกระแสไลน์กรณีโหลดบัลลาสต์และหลอดไฟ (R , L)	82
รูปที่ 4-6 มุมจุดชนวนเป็น 30 องศา	83
รูปที่ 4-7 มุมจุดชนวนเป็น 60 องศา	83
รูปที่ 4-8 มุมจุดชนวนเป็น 90 องศา	83
รูปที่ 4-9 มุมจุดชนวนเป็น 120 องศา	83
รูปที่ 4-10 มุมจุดชนวนเป็น 150 องศา	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
การสตาร์ทแบบ Direct Online ที่ขนาดน้ำหนักรีดค่าต่างๆ	
รูปที่ 4-11 No – Load	84
รูปที่ 4-12 Load 22% $T_{rated}$	84
รูปที่ 4-13 Load 44% $T_{rated}$	84
รูปที่ 4-14 Load 66% $T_{rated}$	84
รูปที่ 4-15 Load 88% $T_{rated}$	84
รูปที่ 4-16 Load 110% $T_{rated}$	84
การใช้ Soft Starter ขับมอเตอร์ขนาด 1000 W ต่อแบบสตาร์ท การป้อนกระแสควบคุมขับโหลดขนาดต่างๆและทำการเพิ่มกระแสควบคุม เมื่อมอเตอร์ไม่สามารถขับโหลดได้	
รูปที่ 4-17 No – Load กระแสควบคุม 1.76 A	85
รูปที่ 4-18 No – Load กระแสควบคุม 1.90 A	85
รูปที่ 4-19 No – Load กระแสควบคุม 2.05 A	85
รูปที่ 4-20 No – Load กระแสควบคุม 2.19 A	85
รูปที่ 4-21 No – Load กระแสควบคุม 2.34 A	85
รูปที่ 4-22 No – Load กระแสควบคุม 2.49 A	85
รูปที่ 4-23 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 2.64 A	86
รูปที่ 4-24 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 2.78 A	86
รูปที่ 4-25 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 2.93 A	86
รูปที่ 4-26 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.08 A	86
รูปที่ 4-27 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.22 A	86
รูปที่ 4-28 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.37 A	86
รูปที่ 4-29 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.52 A	87
รูปที่ 4-30 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.66 A	87
รูปที่ 4-31 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.81 A	87
รูปที่ 4-32 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.96 A	87
รูปที่ 4-33 Load 41% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.10 A	87
รูปที่ 4-34 Load 41% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.25 A	87

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-35 Load 58% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.69 A	88
รูปที่ 4-36 Load 58% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.83 A	88
รูปที่ 4-37 Load 58% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 5.13 A	88
รูปที่ 4-38 Load 67% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.69 A	88
รูปที่ 4-39 Load 67% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.83 A	88
รูปที่ 4-40 Load 67% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.98 A	88
รูปที่ 4-41 Load 67% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 5.13 A	89
รูปที่ 4-42 Load 67% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 5.27 A	89
รูปที่ 4-43 Load 85% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 5.42 A	89
รูปที่ 4-44 Load 85% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 5.57 A	89
การป้อนกระแสควบคุมขับโหลดขนาดต่างๆและทำการเพิ่มกระแสควบคุม เมื่อมอเตอร์ไม่สามารถขับโหลดได้	
รูปที่ 4-45 No - Load กระแสควบคุม 1.76 A	90
รูปที่ 4-46 No - Load กระแสควบคุม 1.90 A	90
รูปที่ 4-47 No - Load กระแสควบคุม 2.05 A	90
รูปที่ 4-48 No - Load กระแสควบคุม 2.19 A	90
รูปที่ 4-49 No - Load กระแสควบคุม 2.34 A	90
รูปที่ 4-50 No - Load กระแสควบคุม 2.49 A	90
รูปที่ 4-51 No - Load กระแสควบคุม 2.64 A	91
รูปที่ 4-52 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 2.78 A	91
รูปที่ 4-53 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 2.93 A	91
รูปที่ 4-54 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.08 A	91
รูปที่ 4-55 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.22 A	91
รูปที่ 4-56 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.37 A	91
รูปที่ 4-57 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.52 A	92
รูปที่ 4-58 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.66 A	92
รูปที่ 4-59 Load 21% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.81 A	92
รูปที่ 4-60 Load 41% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.66 A	92
รูปที่ 4-61 Load 41% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.81 A	92

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-62 Load 41% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 3.96 A	92
รูปที่ 4-63 Load 41% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.10 A	93
รูปที่ 4-64 Load 58% $T_{rated}$ v กระแสควบคุม 4.69 A	93
รูปที่ 4-65 Load 58% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.83 A	93
รูปที่ 4-66 Load 58% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.98 A	93
รูปที่ 4-67 Load 58% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 5.13 A	93
รูปที่ 4-68 Load 65% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.69 A	93
รูปที่ 4-69 Load 65% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 4.83 A	94
รูปที่ 4-70 Load 65% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 5.13 A	94
รูปที่ 4-71 Load 65% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 5.27 A	94
รูปที่ 4-72 Load 85% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 5.42 A	94
รูปที่ 4-73 Load 85% $T_{rated}$ กระแสควบคุม 5.57 A	94
รูปที่ 5-1 รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสควบคุมและ กระแสสูงสุดช่วงสตาร์ท	98
รูปที่ 5-2 รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสควบคุมและเวลาในการสตาร์ท	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เป็นมอเตอร์ยอดนิยมใช้กันทั่วไป ปัจจุบันได้มีการพัฒนา มอเตอร์ชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจนเป็นที่ยอมรับในวงการอุตสาหกรรมทั่วไป และนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม เพราะ มีข้อดีคือ ไม่มีแปรงถ่านทำให้การสูญเสียเนื่องจาก ความฝืดมีค่าน้อยมาก มีตัวประกอบกำลังสูง การบำรุงรักษาน้อย เริ่มหมุนได้ง่ายโดยเฉพาะชนิด กรงกระรอก สร้างง่าย ทนทาน ราคาถูก ไม่เสียหายง่ายและมีประสิทธิภาพสูง มีข้อเสียอยู่บ้างคือ การปรับความเร็วรอบมอเตอร์ทำได้ยากเนื่องจากความเร็วรอบจะแปรผันตรงกับภาระ แรงบิดเริ่ม หมุนค่อนข้างต่ำ อีกทั้งกระแสในช่วงสตาร์ท แบบ Direct on line ยังมีค่าสูง

การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แบบ Direct on line จะทำให้กระแสช่วงสตาร์ทมีสูง มากๆ โดยเฉลี่ยจะอยู่ประมาณ 6 – 7 เท่า บางตัวอาจขึ้นไปถึง 9 – 10 เท่า การที่สตาร์ทด้วยกระแส สูงๆดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อทางกลหรือทางไฟฟ้าแก่มอเตอร์ จึงได้มีการเริ่มนำเอา Soft Starter มา ใช้ ซึ่งในปัจจุบันได้มีแนวโน้มการใช้งาน Soft Starter ทางด้านไฟฟ้าเป็น 2 ทางด้วยกัน คือ เพื่อลด กระแสขณะสตาร์ทของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้เราสามารถลดขนาดหม้อแปลง หรือถ้ามีหม้อแปลงอยู่ แล้วจะสามารถนำส่วนที่ต้องเผื่อไว้สำหรับการสตาร์ทมอเตอร์ไปใช้อย่างอื่นซึ่งเท่ากับการเพิ่ม ความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลง และลดกำลังสูญเสียขณะทำงานแบบโหลดมีน้อย กล่าวคือเป็นการลด Loss ในสายเนื่องจากกระแสสูงขณะสตาร์ท และไม่ต้องเพิ่มขนาดสายเพื่อ รองรับกระแสสูงๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ทางอ้อม

ในโครงการนี้จึงทำการเสนอ การสตาร์ทมอเตอร์แบบ Soft Starter ซึ่งจะทำการใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ควบคุมการจุดชนวนของ SCR ที่มุมมองต่างๆ และควบคุมให้ขนาด กระแสในช่วงสตาร์ทมีค่าคงที่ตามเวลาที่ต้องใช้ในการสตาร์ท และแรงบิดเริ่มสตาร์ทมีค่าเพียงพอที่ โหลดต้องการ

## 1.1 ความสำคัญของปัญหา

เครื่องจักรในงานอุตสาหกรรมใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลัง ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากไม่มีแปรงถ่านทำให้การสูญเสียเนื่องจากความฝืดมีค่าน้อยมาก มีตัวประกอบกำลังสูง การบำรุงรักษาบ่อย เริ่มหมุนได้ง่ายโดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก สร้างง่าย ทนทาน ราคาถูก ไม่เสียหายง่ายและมีประสิทธิภาพสูง แต่จะมีปัญหาในเรื่องแรงบิดของมอเตอร์ขณะเริ่มหมุนมีค่าน้อย และกระแสในช่วงสตาร์ทมีค่าสูง จึงได้มีการนำซอร์ฟสตาร์ท มาทำการควบคุมการสตาร์ทมอเตอร์เพื่อทำการควบคุมกระแสและแรงบิดให้เป็นไปตามต้องการซึ่งจะช่วยลดปัญหาต่างๆได้ อีกทั้งได้มีการนำเทคโนโลยีทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์มาช่วยทำการควบคุมเพื่อให้ผลที่ได้มีประสิทธิภาพและความเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการศึกษา การควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสามเฟส แบบนิ่มนวล
2. เพื่อทำการศึกษาการใช้ Simulink เพื่อจำลองการทำงาน
3. เพื่อทำการศึกษาการควบคุมการสตาร์ททำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสามเฟส โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
4. เพื่อทำการศึกษาไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC และนำมาควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสามเฟสแบบนิ่มนวล

## 1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูล
  - มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
  - หลักการทำงานของ SCR
  - ไมโครคอนโทรลเลอร์ DSPIC
  - Simulink
2. ทำการ Simulate วงจรการทำงาน
3. ออกแบบ Hardware และติดตั้ง Software
4. แก้ไขปรับปรุงข้อผิดพลาด
5. สรุปผลการทำโครงการ พร้อมข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการเป็นโครงการการควบคุมการสตาร์ทของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้เทคนิค Soft starter ซึ่งจะทำให้การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ DSPIC มาทำการควบคุมการจุดชนวนของ SCR โดยการป้อนเวลาในการสตาร์ทและควบคุมกระแสในช่วงสตาร์ทให้คงที่ เพื่อปรับ ความเร็วที่พิกัดใช้งานแล้วปรับค่าทอร์กให้คงที่

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถออกแบบชุดสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบนี้มีนวล และนำความรู้ทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ มาควบคุมการทำงานชุดสตาร์ทมอเตอร์ให้เป็นไปตามที่ต้องการ

#### 1.6 เนื้อหาปริญญาโท

1. อธิบายการทำงานและโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส
2. อธิบายหลักการการทำงานและ โครงสร้างของ SCR
3. อธิบายหลักการการทำงานของการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปแบบต่างๆ และเลือกใช้วิธีการสตาร์ทเหมาะสมกับการใช้งาน
4. อธิบายหลักการวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 เนื้อหา ปริญญานิพนธ์

### 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลักการการทำงานทั่วไปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ก็คือ การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล จึงทำให้เกิดการหมุนของมอเตอร์ โดยมอเตอร์กระแสตรงนั้น พลังงานจะต่อโดยตรงกับอาร์เมเจอร์ (Amature) ผ่านไปยังแปรงถ่าน(Brushes) และคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) นั้นและมอเตอร์เหนี่ยวนำจะส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังโรเตอร์ ด้วยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า คล้ายกับหลักการของหม้อแปลงจึงเป็นที่มาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีทั้งแบบ 1 เฟส และหลายเฟส นิยมใช้กันมากทางอุตสาหกรรม เพราะมีข้อดีและข้อเสีย แตกต่างกันดังนี้

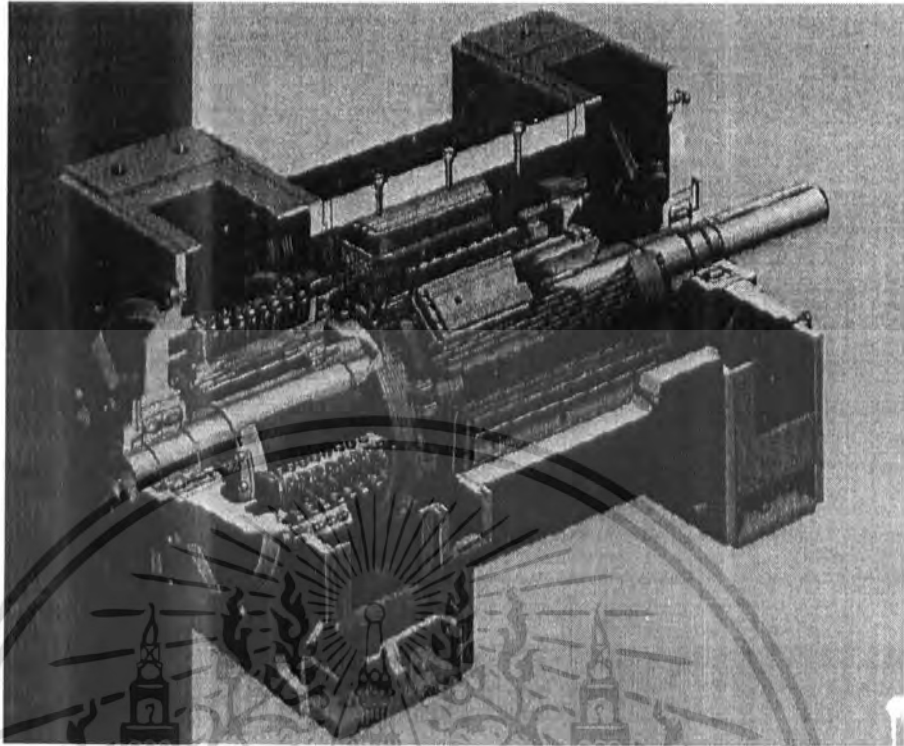
#### ข้อดี

1. มีโครงสร้างที่ง่าย แข็งแรง ทนทาน ไม่ค่อยมีปัญหาโดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก (Squirrel-cage type)
2. มีราคาไม่แพง
3. มีประสิทธิภาพเพียงพอกับการใช้งาน
4. บำรุงรักษาง่าย
5. ไม่มีแปรงถ่านจึงเป็นผลให้แรงเสียดทานน้อยกว่ามอเตอร์ชนิดอื่น
6. เพาเวอร์แฟกเตอร์ดีพอใช้
7. สามารถสตาร์ทได้เอง ไม่เหมือนซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor)

#### ข้อเสีย

1. กินกระแสขณะสตาร์ทสูง อาจจะต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการสตาร์ท
2. มีคุณสมบัติคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรงต่อแบบขนาน(D.C.Shunt Motor) โดยความเร็วจะขึ้นอยู่กับโหลด
3. มีค่าแรงบิดขณะสตาร์ทค่อนข้างน้อยกว่ามอเตอร์กระแสตรงต่อแบบขนาน
4. เมื่อมีการปรับความเร็วมอเตอร์จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-1 แสดงภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดฟันขดลวด

### 2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

#### 1.1.1 สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเหมือนซิงโครนัสมอเตอร์ มีขั้วสต๊อตสำหรับรองรับขดลวด และสเตเตอร์ของขดลวดสามเฟส ดังรูป ลักษณะการวางของขดลวดขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก ถ้าจำนวนขั้วแม่เหล็กมาก ความเร็วรอบก็จะต่ำ ในทางกลับกัน ถ้าจำนวนขั้วแม่เหล็กน้อย ความเร็วรอบก็จะสูง เมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟสามเฟส ให้กับขดลวด 3 ชุด ซึ่งทำมุมห่างกัน 120 องศา จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น และสนามแม่เหล็กหมุนนี้จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสตามสมการ

$$N_s = \frac{120f}{P}$$

$N_s$  = ความเร็วซิงโครนัส

$f$  = ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ

$P$  = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.1.2 โรเตอร์(Rotor) สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดดังนี้

(1) ชนิดโรเตอร์กรงกระรอก(Squirrel-cage Rotor) ซึ่งโรเตอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและแข็งแรงทนทาน ประกอบด้วยแกนของโรเตอร์ซึ่งมีร่องสลิตที่อยู่ในแนวขนานกัน เพื่อใส่แท่งตัวนำ โดยที่ปลายทั้งสองข้างของแกนจะมีวงแหวนที่สำหรับลัดวงจร โรเตอร์แบบกรงกระรอกสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆดังนี้

#### (A) โรเตอร์กรงกระรอกแบบธรรมดา

โครงสร้างของสลิตของโรเตอร์เป็นไปดังแสดงในรูปที่ 2.3 ก ซึ่งนิยมไปใช้มอเตอร์ขนาดเล็กซึ่งมีพิกัดกำลังตั้งแต่ 3.75 กิโลวัตต์ (5 แรงม้า) ลงมา มีแรงบิดขณะสตาร์ทประมาณ 150 % ตามกราฟรูป A มีช่วงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบน้อย เป็นมอเตอร์ที่มีสภาพการใช้งานไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการเปลี่ยนความเร็วรอบ

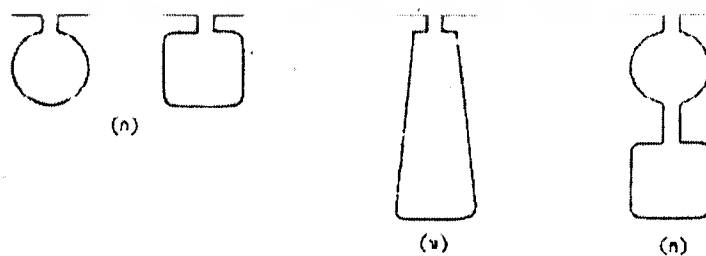
#### (B) โรเตอร์กรงกระรอกพิเศษ (สลิตลึก)

ค่าแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทสูงกว่าเดิมเล็กน้อยและค่าแรงบิดจะลดลงเล็กน้อยเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์กรงกระรอกแบบธรรมดา ดังที่แสดงดังกราฟ B เหมาะสมที่จะใช้กับงานที่ต้องการ โหลดความเร็วรอบคงที่เหมือนกัน

#### (C) โรเตอร์กรงกระรอกพิเศษ(กรงกระรอกสองชั้น - แท่งตัวนำอย่างธรรมดา)

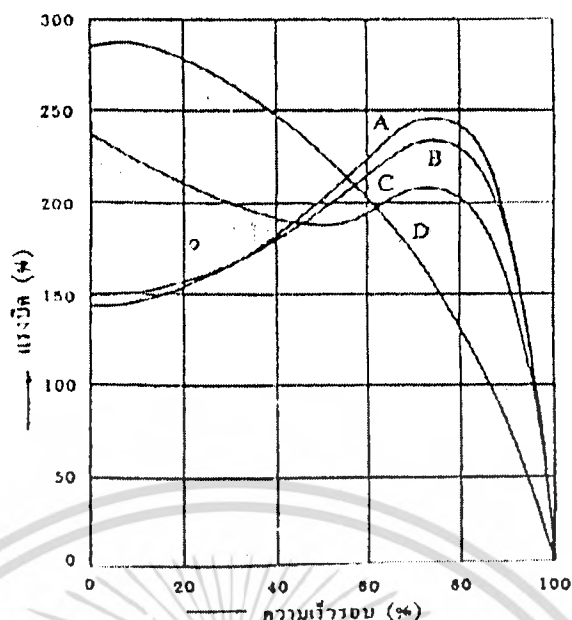
(D) โรเตอร์กรงกระรอกพิเศษ(กรงกระรอกสองชั้นแท่งตัวนำความต้านทานสูง)ช่วงสลิตของโรเตอร์จะแยกเป็นสองแถวดังแสดงในรูปที่ 2.3 ค และค่าความต้านทานของตัวนำมีค่าต่ำโดยทำจากทองแดงหรืออลูมิเนียม ซึ่งโรเตอร์ชนิดนี้จะมีแรงบิดขณะสตาร์ทสูงขึ้นไปเป็น 200 – 250 % ของแรงบิดเต็มพิกัดดังแสดงในกราฟ C แต่ค่าแรงบิดจะน้อยกว่าใน 2 แบบแรก โดยเหมาะที่จะนำไปใช้งานในโหลดความเร็วรอบคงที่

ช่องสลิตของตัวโรเตอร์เป็นเช่นเดียวกับข้อที่ 3 แต่ใช้ตัวนำที่มีความต้านทานสูงแทน โดยค่าสมบัติความเร็วรอบและแรงบิดเป็นไปตามกราฟ D ค่าแรงบิดเริ่มสตาร์ทจะเพิ่มมากขึ้นเป็นราว 250 – 350 % ของแรงบิดเต็มพิกัดแต่ค่าแรงบิดสูงสุดจะลดลง และมีค่าสลิปสูงถึงราว 12 – 16 %



รูปที่ 2-2 ลักษณะของร่องสลิตในโรเตอร์ชนิดต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงกระรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์เผยแพร่เอกสารนี้เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-3 สมบัติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิด  
ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้โรเตอร์แบบกรงกระรอก

#### (2) ชนิด โรเตอร์พันลวด

ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์กรงกระรอก วงจรโรเตอร์ถูกตัดวงจรด้วยวงแหวนตอนปลายและค่าความต้านทานของโรเตอร์ตายตัวปรับไม่ได้ แต่ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดพันลวด การพันวงจรโรเตอร์(หรือวงจรทุติยภูมิ) เป็นการพันลวดแบบ 3 เฟส และมีการต่อวงจรเข้าสู่วงแหวนลื่นแล้วผ่านแปรงถ่านเข้าสู่ความต้านทานภายนอก ดังนั้นค่าความต้านทานของโรเตอร์ จึงสามารถปรับคืนได้โดยเปลี่ยนความต้านทานภายนอก ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆดังนี้

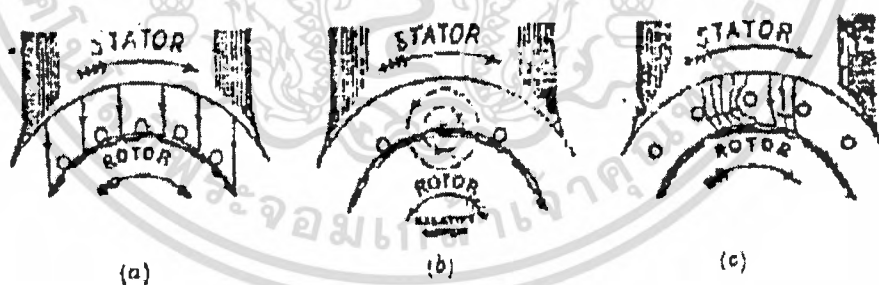
1. โครงรอบนอก(Frame) ทำจากเหล็กกล้าผสม
2. แกนสเตเตอร์และแกนโรเตอร์ ทำจากเหล็กผสมคุณภาพดี ความสูงเฉลี่ยต่ำเป็นแผ่นบางเคลือบมันวาวทั้งสองด้าน
3. ขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์
4. ช่องอากาศ (Air - Gap)
5. เพลาและลูกปืน (Shafts and Bearing)
6. วงแหวนสลีป (Slip - Ring)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิดโรเตอร์พันขลวด ค่าความต้านทานของวงจรโรเตอร์จะสามารถปรับค่าได้ สำหรับปรับค่าความเร็วรอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ต่ออยู่ภายนอก ในขณะที่ขบวนการเพิ่มค่าความต้านทานของวงจรโรเตอร์ จะเพิ่มค่าแรงบิดขณะเริ่มสตาร์ทและอัตราเร่งเป็นไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามมอเตอร์ชนิดนี้จะมีน้ำหนัก และราคาสูง และมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ และมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับโรเตอร์กรงกระรอกขนาดชนิดเดียวกัน

## 2. 1.2 การหมุนของโรเตอร์

เมื่อขดฟ้งสเตเตอร์ได้รับป้อนไฟ 3 เฟส แต่ละเฟสทำมุมกัน 120 องศา จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส สนามแม่เหล็กจะผ่านช่องอากาศไปยังโรเตอร์ กวาดไปรอบโรเตอร์แล้วตัดผ่านเส้นตัวนำจึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induce emf) ตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday 's Laws) ซึ่งความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะเท่ากับทางด้านแหล่งจ่ายไฟ แล้วเกิดสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ตามกฎมือขวาของเฟลมมิง(Fleming 's Right-hand rule ) และตามกฎของเลนส์(Lens's Laws) ในขณะนั้นความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุนจะเกิดขึ้น ผลสุดท้ายก็จะเกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางสนามแม่เหล็กหมุนและโรเตอร์ก็จะพยายามหมุนตามด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส แต่จะไม่เท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัส แต่จะไม่เกินความเร็วเชิงโคโรนัส เพราะโรเตอร์ต้องการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อที่จะรักษาสภาพการหมุนต่อไป



- รูปที่ 2-4 รูป a แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ ตามกฎมือขวาของเฟลมมิง  
รูป b แสดงการเกิดกระแสเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ ตามกฎของเลนส์ และเกิดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุน  
รูป c แสดงการเกิดแรงบิดของโรเตอร์ แล้วโรเตอร์หมุนทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน

### 2.1.3 สลิป (Slip)

ในทางปฏิบัติโรเตอร์นั้นจะไม่สามารถมีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสได้ เพราะถ้าไม่มีความเร็วสัมพัทธ์เหลืออยู่จะไม่เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก็จะไม่สามารถรักษาสภาพแรงบิดของโรเตอร์ให้หมุนอยู่ได้ ซึ่งความเร็วของโรเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับภาระทางกลของมอเตอร์ด้วยเมื่อโรเตอร์มีความเร็วที่ต่างกับความเร็วซิงโครนัส จะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนความเร็วของโรเตอร์เรียกว่า 'สลิป' โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ดังนี้

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

$N_s$  = ความเร็วซิงโครนัส

$N_r$  = ความเร็วโรเตอร์

ความถี่กระแสไฟฟ้าที่ตัวหมุน (Frequency of rotor current)

ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ตัวหมุนจะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวอยู่กับที่ในขณะที่ตัวหมุนยังไม่หมุน แต่เมื่อตัวหมุนเริ่มหมุนจะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ (relative speed) หรือความเร็วสลิป ถ้ากำหนดให้ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ตัวหมุนที่ความเร็วสลิปใดๆ มีค่า  $f'$  ดังนั้น

### 2.1.4 แรงบิดเริ่มต้น (Starting Torque)

เป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นทันทีทันใดขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุน

กำหนดให้  $T_{ST}$  = แรงบิดเริ่มต้น

$E^2$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่โรเตอร์ต่อ 1 เฟส ขณะหยุดนิ่ง

$R_2$  = ค่าความต้านทานของโรเตอร์ 1 เฟส

$X_2$  = ค่ารีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ต่อ 1 เฟส

$Z_2 = \sqrt{(R_2^2 + X_2^2)}$  = ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของโรเตอร์ต่อ 1 เฟส

ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V) คงที่ จะได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็ก และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะคงที่ด้วย

$$T_{st} = K_2 \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 แรงบิดขณะสตาร์ทของโรเตอร์แบบกรงกระรอก

ค่าความต้านทานของโรเตอร์ไม่สามารถปรับค่าได้มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรีแอกแตนซ์ (Reactance) โดยเฉพาะจะเห็นได้ชัดเมื่อเริ่มสตาร์ท เพราะฉะนั้นขณะเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ แรงบิดจะมีค่าน้อยประมาณ 1/5 เท่าของแรงบิดภาระเต็มพิกัด กระแสจะมีค่าสูงประมาณ 5-7 เท่าของพิกัด และมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำ หลังจากนั้นกระแสจะลดลง และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ก็จะดีขึ้น

แรงบิดขณะสตาร์ทของโรเตอร์แบบมีขดลวด ค่าความต้านทานของโรเตอร์สามารถปรับค่าได้ โดยการใช้ รีโอสแตท (Rheostat) โดยเฉพาะขณะสตาร์ทนั้นจะเพิ่มค่าความต้านทานก่อนแล้วค่อยๆ ลดความต้านทานลง เพราะฉะนั้นขณะเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ แรงบิดจะมีค่ามาก กระแสจะมีค่าน้อย ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์สูง หลังจากสตาร์ทก็จะสามารถนำความต้านทานออกจากวงจรได้ แต่ถ้าไม่นำความต้านทานออกจะสามารถแก้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้ดีขึ้นได้ แต่ประสิทธิภาพจะลดลง

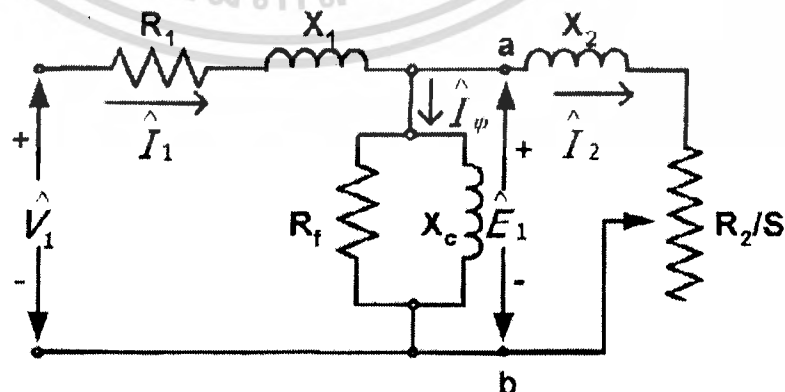
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดขณะสตาร์ทและแรงบิดสูงสุด

$$T_M \propto \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2}$$

$$T_{\max} \propto \frac{1}{2X_2}$$

$$\frac{T_M}{T_{\max}} = \frac{2R_2X_2}{R_2^2 + X_2^2} = \frac{2R_2/X_2}{1 + (R_2/X_2)^2} = \frac{2a}{1 + a^2}$$

### 2.1.6 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Equivalent Circuit)



รูปที่ 2-5 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Equivalent Circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเขียนวงจรสมมูลเราจะเขียนแบบ 1 เฟส ดังนั้นเมื่อนำมาคำนวณจึงต้องคำนวณแบบ 3 เฟส กำหนดให้  $P_G$  คือกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องอากาศ

$P_{w,2}$  คือ กำลังงานที่สูญเสียจากความร้อนบนลวดทองแดงด้าน โรเตอร์

$$\text{ดังนั้น } P_G = 3|I_2|^2 \frac{R_2}{S}$$

$$\text{ดังนั้น } T_c = \frac{P}{(1-S)\omega_s} = \frac{P_G}{S}$$

เมื่อ  $\omega_s$  : ความเร็วเชิงมุมที่ซิงโครนัส

$\omega_r$  : ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

$f$  : ความถี่แหล่งจ่ายไฟ

$P$  : จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$P_{o/p}$  : กำลังสูญเสียทางกล

$T_{SH}$  :  $P_{o/p} / \omega_r$

เมื่อ  $P_m$  : พลังงานทางกล (ยังไม่หักกำลังสูญเสียทางกล)

$P_{o/p}$  : พลังงานที่เพลลา

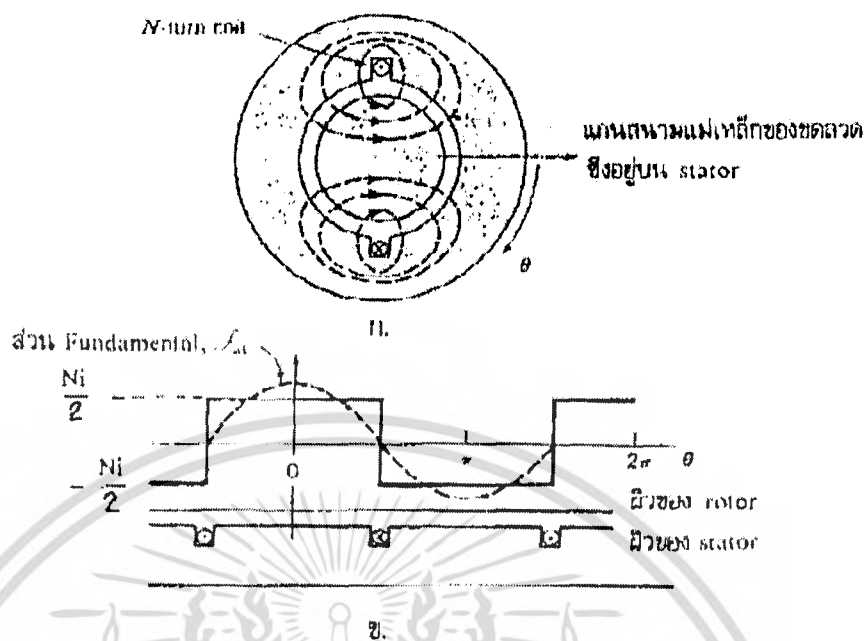
$T_e$  : แรงบิดที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Electromagnetic Torque)

$T_{sh}$  : แรงบิดที่เพลลา

### 2.1.7 คลื่น mmf ภายใน Machine

ขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์มีหลายชุด และถูกจัดเรียงอยู่รอบช่องอากาศ โดยที่ขดลวดแต่ละชุดถูกต่อเข้าด้วยกันเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กมีจำนวนขั้วตามที่ต้องการ

การศึกษาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดหลายชุด ทำได้โดยการพิจารณาขดลวดชุดเดียวซึ่งจำนวน  $N$  รอบ และด้านทั้งสองของขดลวดห่างกัน  $180^\circ$  ซึ่งเรียกว่า full-pitch-coil เช่นที่แสดงในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 ลักษณะของ mmf ซึ่งเกิดจากขดลวด 1 ชุด, N-รอบค้ำทั้งสองของขดลวดห่างกัน  $180^\circ$

การกำหนดให้โรเตอร์มีลักษณะทรงกระบอกสม่ำเสมอตั้ง ก็เพื่อให้การศึกษาลักษณะของคลื่น mmf ที่เกิดง่ายขึ้น ทิศทางสนามแม่เหล็กเป็นไปตามกฎมือขวา และเนื่องจากค่า Permeability ของส่วนที่เป็นโลหะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับอากาศ ดังนั้นจึงสมมุติได้ว่า Reluctance ภายในวงจรแม่เหล็กจะมีค่าเฉพาะในช่องอากาศ

เนื่องจากโครงสร้างของ Stator สมมาตร สนามแม่เหล็กในช่องอากาศจะมีมุม  $\theta$  ภายใต้วงหนึ่งจะมีขนาดเท่ากับ  $\pi + \theta$  ซึ่งภายใต้วงตรงกันข้าม โดยสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งทั้งสองมีทิศทางตรงกันข้ามกัน

mmf โดยรอบเส้นทางปิด ซึ่งแสดงด้วยกราฟเส้นฟลักซ์ดังรูปที่ 2-6(ก) มีค่า  $Ni$  และจากสมมติฐานที่กำหนดให้ Reluctance ในส่วนที่เป็นโลหะต่ำ ดังนั้นเทอม  $\int H \cdot dl$  ในส่วนที่เป็นโลหะจึงมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ดังนั้น mmf-drop ที่เกิดขึ้นภายในวงจรแม่เหล็กจึงมีเฉพาะในช่องอากาศเท่านั้น

ในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ขดลวดจะถูกออกแบบการจัดวางอย่างเหมาะสม เพื่อให้ mmf ที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียง Sinusoidal มากที่สุด เมื่อพิจารณาคลื่น mmf ดังที่แสดงในรูป 2-6 (ข) ซึ่งเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม แล้วเมื่อวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูเรียร์ ก็จะพบว่า สัญญาณประกอบด้วยส่วน Fundamental และส่วนที่เป็น ฮาร์มอนิกคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน Fundamental ,  $F_{a1}$  จากการวิเคราะห์จะมีค่า

$$F_{a1} = \frac{4 N}{\pi} i \cos \phi$$

โดยที่  $i$  เป็นมุมที่วัดจากแกนของขดลวดซึ่งส่วน Fundamental นี้เป็นคลื่นที่มีขนาด  $F_{1,peak}$

$$F_{1, peak} = \frac{4 N i}{\pi} \frac{1}{2}$$

อยู่ในแนวแกนสนามแม่เหล็กของขดลวด  
การศึกษาผลที่เกิดจากขดลวดที่วางอยู่หลายช่อง เช่นรูปที่ 2-6 ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้า ชนิด  
2 ขั้ว 3 เฟส เป็นดังนี้



รูปที่ 2-7 คลื่น mmf ที่เกิดจากขดลวด 1 เฟส ขดลวดจำนวน 3 เฟส

และด้านทั้งสองของขดลวดอยู่ห่างกัน  $180^\circ$

ขดลวดแต่ละเฟสมีลักษณะเหมือนกัน และถูกจัดวางเพื่อให้แนวแกนแม่เหล็กที่เกิดจากแต่ละ  
เฟสทำมุมกัน ในรูปที่ 2-7 ขดลวดถูกจัดวางเป็น 2 ชั้น ขดลวดแต่ละชุดจะมีจำนวน  $N$  รอบ มีกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

i ไหลผ่าน ซึ่งทำให้เกิดคลื่น mmf ในกรณีที่ขดลวดถูกออกแบบจัดวางให้เกิดสนามแม่เหล็ก P ขั้ว โดยที่ขดลวดจำนวน  $N\phi$  รอบต่ออนุกรมกันในแต่ละเฟสคือ

$$F_{al} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_\phi}{P} i_a \cos \phi$$

โดยเทอม  $4/\pi$  มาจากการใช้อนุกรมฟูเรียร์วิเคราะห์คลื่น mmf ลักษณะที่เกิดจากด้านของขดลวดที่วางห่างกัน  $180^\circ$

$K_w$  : Winding Factor มีค่าขึ้นกับลักษณะการจัดวางขดลวด

ดังนั้น  $K_w, N\phi$  คือจำนวนรอบประสิทธิผลที่ต่ออนุกรมในแต่ละเฟส ซึ่งทำให้เกิดส่วน

Fundamental ของคลื่น mmf

$I_a$  : คือกระแสในเฟส A ส่วน Fundamental ของคลื่น mmf นี้เท่ากับ mmf ที่เกิดจากการผ่านกระแสสมมูลที่มีลักษณะการจัดวางแบบ Sinusoidal เช่นที่แสดงในรูปที่ 2-9 คลื่น mmf ที่กล่าวมามีลักษณะเป็น Standing Wave จะกระจายอยู่ในช่องอากาศแบบ Cosine ขนาดสูงสุดของส่วน

Fundamental,  $F_{\max}$  คือ

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_\phi}{P} i_m$$

โดยที่  $I_{\max}$  คือขนาดสูงสุดของกระแส  $I_a$

$I_a = I_{\max} \cos \omega t$  และ  $F_{\max}$  อยู่ในแนวสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฟส A

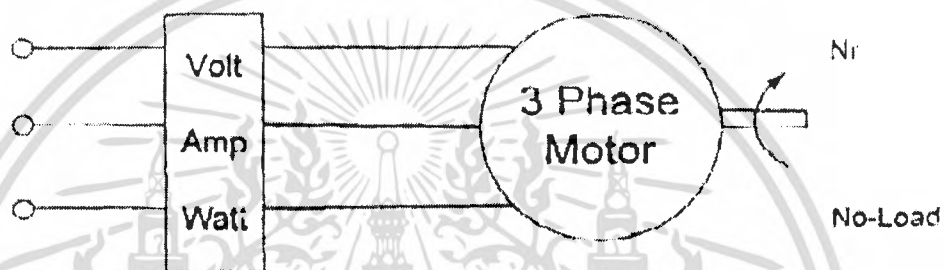
ด้วยหลักการเดียวกันขดลวดที่พันอยู่บน โรเตอร์ก็จะถูกออกแบบจัดวางเพื่อให้เกิดคลื่น mmf ที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับ Sinusoidal ให้มากที่สุด เพื่อเป็นการลดส่วนฮาร์โมนิก ซึ่งขดลวดในแต่ละช่อง อาจมีจำนวนรอบที่ต่างกัน เช่น ขดลวดที่อยู่ใกล้บริเวณ Pole Face จะมีจำนวนรอบน้อยกว่าขดลวดชุดอื่นๆ ที่อยู่ช่องอื่น

### 2.1.8 การทดสอบมอเตอร์ (Three-Phase Induction Motor Test)

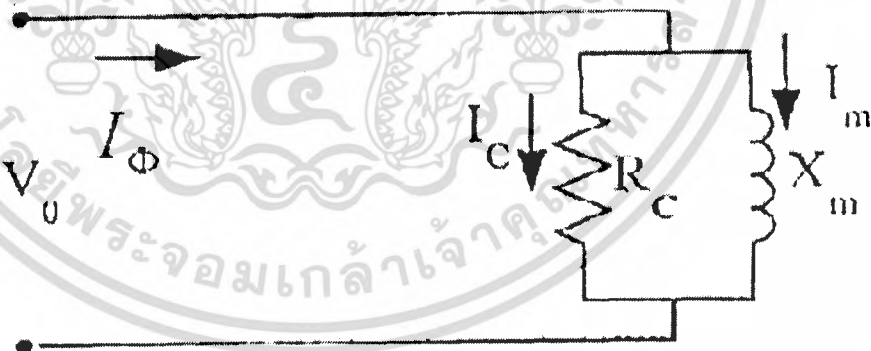
การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำมี 2 วิธี คือ

#### 1. No-Load Test

ทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าขณะที่มอเตอร์อยู่ในสภาพ No-Load แล้วบันทึกค่า  $V$ ,  $A$ ,  $W$  พิจารณาค่าต่อเฟส  $V_0$ ,  $I_0$ ,  $P_0$



รูปที่ 2-8 วงจรทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในลักษณะ No-Load



รูปที่ 2-9 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำในลักษณะ No-Load

จากการทดสอบสามารถหาค่า  $\phi_0$ ,  $R_c$ ,  $X_m$  ได้จาก

$$\phi_0 = \cos^{-1} \frac{P_0}{V_0 I_0}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_c = \frac{V_0^2}{P_0}$$

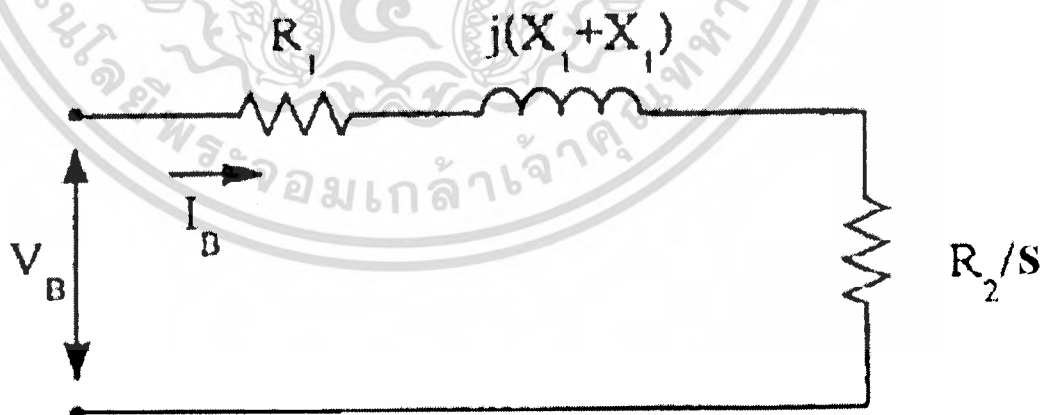
$$X_m = \frac{V_0}{I_0 \sin \theta}$$

6. Block-Rotor Test

ทดสอบที่พิกัดกระแสไฟฟ้าในขณะที่มอเตอร์อยู่ในสภาพ Block-Rotor แล้วบันทึกค่า V , A , W เปลี่ยนเป็นค่าต่อเฟส



รูปที่ 2-10 วงจรทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในลักษณะ Block-Rotor



รูปที่ 2-11 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในลักษณะ Block-Rotor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบจะได้

$$\phi_b = \cos^{-1} \frac{P_b}{V_b I_b}$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b}$$

$$R_b = \frac{P_b}{I_b^2}$$

$$X_b = \sqrt{Z_b^2 + R_b^2}$$

$$X_b = X_1 + X_2$$

$$R_b = R_1 + R_2$$

ค่า R1 (Amature Winding Resistance per Phase) สามารถหาได้จากวิธี V-I Method (DC)

Maximum Torque สามารถหาค่าประมาณได้ดังนี้

$$\frac{R_2}{S_{\max, T}} = \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

ดังนั้น Maximum Torque จะเกิดขึ้นที่ค่าสลิปเท่ากัน

$$T_e = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{3I_2^2 R_2}{\omega_s} = \frac{3R_2}{\omega_s} \frac{V_1^2}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

$$S_{\max, T} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

72987

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Start Motor

ขณะมอเตอร์เริ่มหมุนจะเกิดกระแสสูงกว่าผิดปกติพิจารณาที่ Slip = 1

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

แรงบิดขณะหมุน

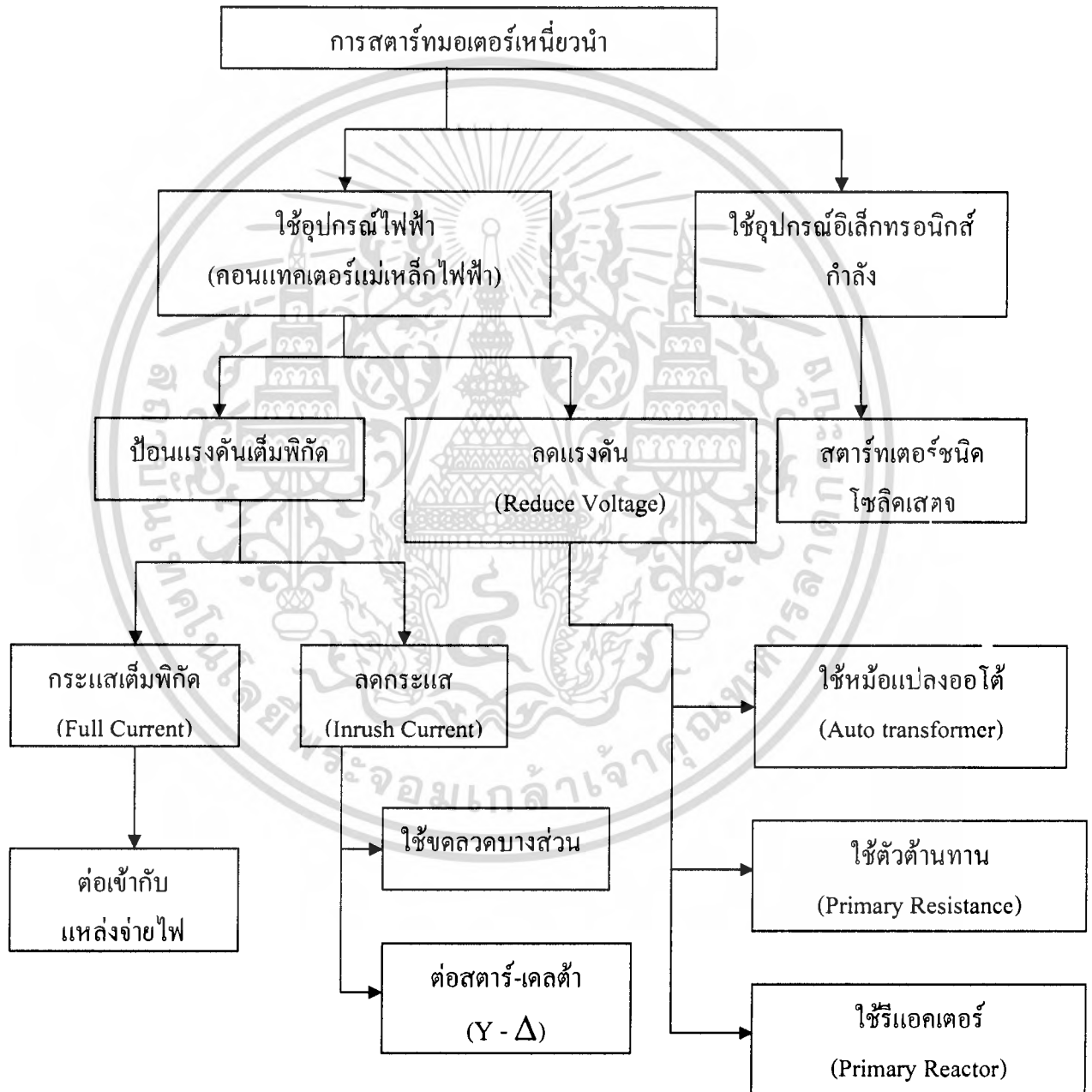
$$T_e = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{3I_2^2 R_2}{\omega_s} = \frac{3R_2}{\omega_s} \frac{V_1^2}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}^2}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

เราสามารถสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ที่ต้องการ เช่น ต้องการลดกระแสเริ่มเดินเครื่องหรือต้องการลดทอร์กเริ่มเดินเครื่อง หรือทั้งสองอย่าง เพื่อลดผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ทางกลวิธีสตาร์ทสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบใหญ่ๆ รูปที่ 2 – 23



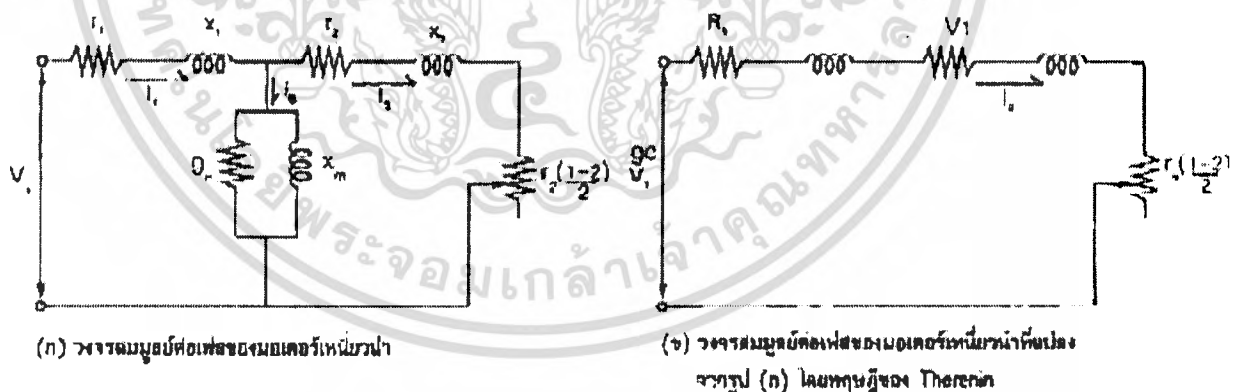
รูปที่ 2-12 การจำแนกวิธีสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ ใช้สตาร์ทเตอร์ที่ใช้อุปกรณ์กลไฟฟ้า จำพวกคอนแทคเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับตัดวงจรระหว่างมอเตอร์กับแหล่งจ่ายซึ่งเป็นสตาร์ทเตอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมานานแล้ว ส่วนสตาร์ทเตอร์อีกแบบที่ได้รับความนิยม ในการใช้งานเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ คือสตาร์ทเตอร์ที่ใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น SCR หรือ Triac เป็นตัวควบคุมแรงดันที่ป้อนในระหว่างเริ่มเดินเครื่อง เนื่องจากแรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ในช่วงเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันพิกัดเสมอจึงจัดเป็นสตาร์ทเตอร์ประเภทลดแรงดันชนิดหนึ่ง สำหรับสตาร์ทเตอร์ที่ใช้อุปกรณ์กลไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นสองแบบใหญ่ๆ คือ แบบป้อนด้วยแรงดันเต็มพิกัด และแบบลดแรงดัน การสตาร์ทแบบนี้มอเตอร์จะได้รับแรงดันต่ำกว่าพิกัดระหว่างสตาร์ท ซึ่งทำได้โดยใช้หม้อแปลงออโต้ลดแรงดันก่อนที่จะป้อนให้มอเตอร์ หรือใช้อิมพีแดนซ์ (ตัวต้านทานหรือตัวรีแอกเตอร์) ต่ออนุกรมกับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เพื่อให้เกิดแรงดันตกในตัวอิมพีแดนซ์นั้นๆ อันจะมีผลทำให้แรงดันที่ข้ามมอเตอร์ต่ำกว่าแรงดันแหล่งไฟที่ป้อนเข้ามา

### 2.2.1 การสตาร์ทแบบต่อเข้ากับแหล่งจ่ายโดยตรง

การสตาร์ทด้วยวิธีการต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟโดยตรง (DOL) มอเตอร์จะได้รับแรงดันตามค่าพิกัด กระแสเริ่มสตาร์ทหรือเริ่มเดินเครื่องและทอร์กเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าสูง ดังจะแสดงให้เห็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-13 วงจรสมมูลต่อเฟส ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2-24

$$I_2 = \frac{V_{1a}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

จากรูปที่ 2-24

$$P_{OUT} = T\omega_r = 3I_2^2 r_2 \frac{(1-s)}{s}$$

$$T = \frac{3(1-s)}{\omega_r} \frac{V_{1a}^2}{\left(R_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2} \frac{r_2}{s}$$

$$T = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{1a}^2}{\left(R_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2} \frac{r_2}{s}$$

ถ้าให้

$I_N$  = กระแสไหลลัดเต็มพิกัดของมอเตอร์

$I_{st}$  = กระแสเริ่มเดินเครื่องเมื่อป้อนด้วยแรงดันเต็มพิกัด

$I'_{st}$  = กระแสเริ่มเดินเครื่องเมื่อป้อนด้วยแรงดันต่ำกว่าพิกัด

$T_N$  = ทอร์กที่ไหลลัดเต็มพิกัดที่มอเตอร์สร้างได้

$T_{st}$  = ทอร์กเริ่มเดินเครื่องเมื่อป้อนด้วยแรงดันเต็มพิกัด

$T'_{st}$  = ทอร์กเริ่มเดินเครื่องเมื่อป้อนด้วยแรงดันต่ำกว่าพิกัด

จากสมการข้างบนจะได้

$$I_N = \frac{V_{1a}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{r_2}{s_N}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

$$I_{st} = \frac{V_{1a}}{\sqrt{(R_1 + r_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{I_{s1}}{I_N} = \sqrt{\frac{\left(R_1 + \frac{r_2}{s_N}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}{(R_1 + r_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

มีค่าประมาณ 0.03-0.08 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของมอเตอร์ทำให้  $I_{s1} / I_N$  มีค่าประมาณ 4-8 เท่าจากสมการข้างบนจะได้

$$T_N = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{1a}^2}{\left(R_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

$$T_{s1} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{1a}^2}{(R_1 + r_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} r_2$$

$$\frac{T_{s1}}{T_N} = S_N \frac{\left(R_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}{(R_1 + r_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

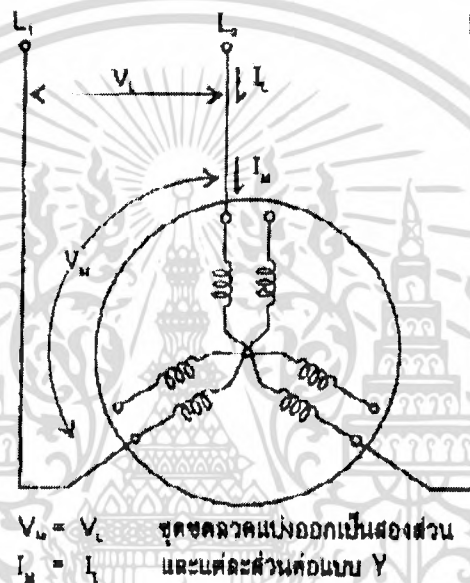
$T_{s1} / T_N$  จะมีค่าประมาณ 1-3 เท่า

โดยทั่วไปวิธีนี้จะใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็กจนถึง 7.5 Kw. ลักษณะการต่อใช้งานขดลวดมอเตอร์จะได้รับแรงดันเต็มพิกัด เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนจะสร้างแรงบิดมหาศาล ทำให้ต้องการกระแสไฟฟ้ามากกว่าการทำงานปกติ 6-9 เท่า ส่วนทอร์คจะมีค่า 0.5-1.5 เท่า ของแรงบิดพิกัด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติด้านทอร์คของมอเตอร์แต่ละตัว การสตาร์ทด้วยวิธีนี้ หากใช้กับเครื่องจักรที่มีโหลดน้อยๆ จะทำให้อัตราเร่งของโรเตอร์สูงเกินไป เนื่องจากมอเตอร์มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูง จะทำให้เกิดการกระชาก เกิดการแกว่ง(oscillations)ของทอร์คที่เพลลา ซึ่งจะนำไปสู่การสั่นหรือของชุดส่งกำลัง,ชุดเกียร์ และชุดขับเคลื่อน หรือหากใช้กับเครื่องจักรที่มีโหลดหนักก็อาจจะทำให้เกิดปัญหาอื่นๆได้เหมือนกัน เช่นอานส่งผลทำให้สายพานและมู่เล่ เกิดการลื่นไถล ทำให้เกิดการชำรุดและสึกหรออย่างรวดเร็ว หรือหากใช้กับปั๊มก็จะทำให้ปั๊มเกิดการคลอนตัว เกิดการกระแทกของท่อในขณะที่มอเตอร์ทำงานและหยุดทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสตาร์ทแบบ DOL โดยทั่วไปเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวงจรสตาร์ทที่ทำได้ง่าย ๆ, ค่าใช้จ่ายต่ำ, ความผิดพลาดในการสตาร์ทก็มีน้อย จึงทำให้มีเสน่ห์และแรงดึงดูด จนทำให้หลายท่านลืมนึกถึงค่าใช้จ่ายแฝงที่จะส่งผลกระทบต่อในระยะยาว เช่น ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่เพิ่มขึ้น อายุการใช้งานอุปกรณ์ส่งกำลังและอื่นๆลดลง นอกจากนี้ยังเสี่ยงต่อความเสียหายของมอเตอร์ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะการใช้งานที่มีการสตาร์ทและหยุดบ่อยๆ

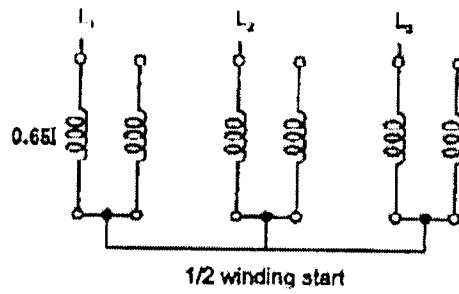
### 2.2.2 การสตาร์ทแบบใช้ขดลวดบางส่วน



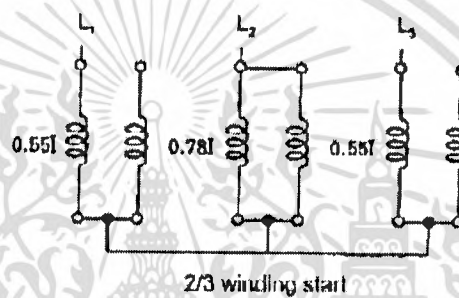
รูปที่ 2-14 การแบ่งขดขดลวดเพื่อการสตาร์ท

การสตาร์ทด้วยวิธีใช้ขดลวดบางส่วน (Part Winding) จะใช้ได้กับมอเตอร์ที่มีขดขดลวด สเตเตอร์มากกว่า 1 ส่วน ในรูปที่ 2-14 ขดขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนต่อกันแบบสตาร์ ในการสตาร์ทจะต่อขดขดลวดชุดแรกเข้ากับแหล่งจ่ายไฟโดยตรง หลังจากนั้นจึงค่อยต่อขดขดลวดที่เหลือเข้ากับแหล่งจ่ายไฟโดยตรงต่อไป การสตาร์ทแบบนี้มอเตอร์จะได้รับแรงดันตามค่าพิกัดแต่กระแสเริ่มต้นจะมีค่าต่ำกว่าการสตาร์ทแบบต่อเข้าแหล่งจ่ายไฟโดยตรง เพราะจังหวะสตาร์ทไม่ได้ต่อขดขดลวดเข้ากับแหล่งจ่ายไฟทั้งหมดแต่ต่อเข้าไปที่ละส่วน ขนาดของกระแสเริ่มเดินเครื่องและทอร์คเริ่มเดินเครื่องจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของขดขดลวดส่วนแรกที่ต้องเข้ากับระบบไฟฟ้า กระแสเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าประมาณ 0.65-0.7 เท่าของกระแสเริ่มเดินเครื่องเมื่อสตาร์ทแบบ DOL ที่ไม่เป็น 0.5 เท่าทั้งๆที่ต่อขดขดลวดเข้าไปครึ่งหนึ่ง เพราะค่ารีแอกแตนซ์รั่ว มีค่าแตกต่างจากการต่อขดขดลวดเข้าไปทีเดียวทั้งหมด สำหรับทอร์คเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าประมาณ 0.45-0.5 เท่าของการสตาร์ทแบบ DOL

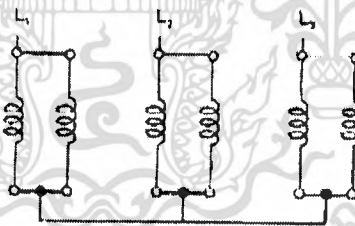
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) เริ่มสตาร์ทด้วยชุดขดลวด  $\frac{1}{2}$  ส่วน



ข) เริ่มสตาร์ทด้วยชุดขดลวด  $\frac{2}{3}$  (หรือ  $\frac{4}{6}$ ) ส่วน

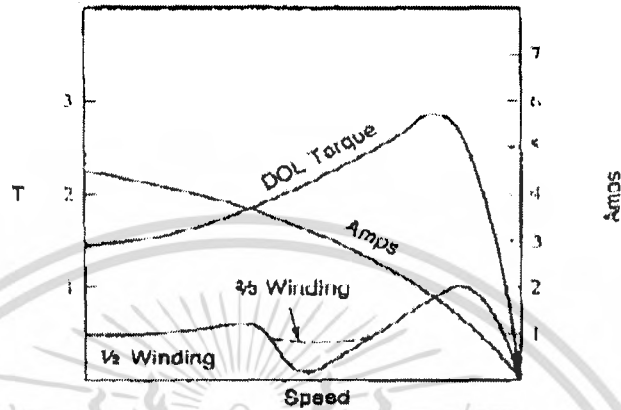


ค) การต่อขดลวดในภาวะการทำงานปกติ

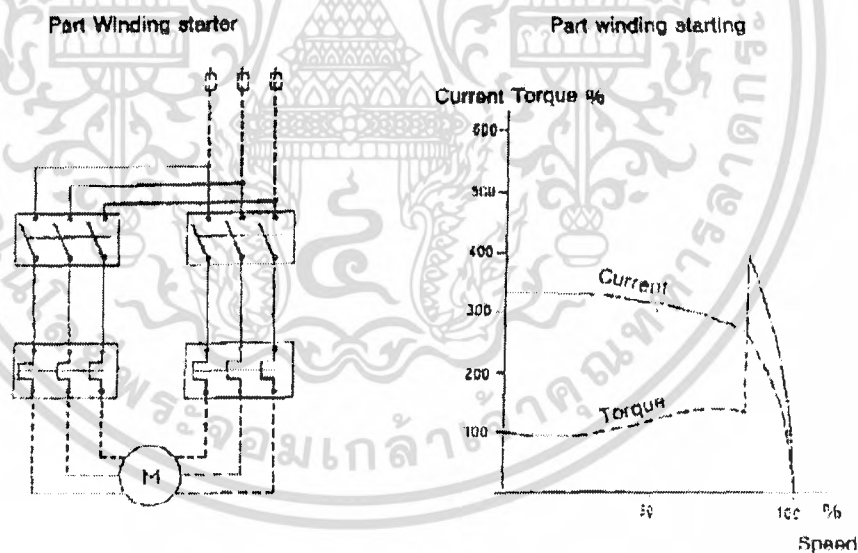
รูปที่ 2-15 การต่อชุดขดลวดตั้งแต่เริ่มสตาร์ทจนถึงภาวะทำงานปกติ

ในรูปที่ 2-15 แสดงการชุดขดลวด  $\frac{2}{3}$  ส่วน ( 4 ชุดจาก 6 ชุด) เข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ การต่อแบบนี้กระแสเริ่มเดินเครื่องจะไม่สมดุล โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.63 เท่าของการเริ่มสตาร์ทแบบ DOL ในขณะที่ทอร์คเริ่มเดินเครื่องก็มีค่าประมาณ 0.45-0.5 เท่าของการสตาร์ทแบบ DOL คือ ประมาณใกล้เคียงกับการสตาร์ทด้วยชุดขดลวดเพียง  $\frac{1}{2}$  ส่วน อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ากระแสเริ่มเดินเครื่องจะไม่สมดุล อาจจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า และทอร์คเริ่มเดินเครื่องก็ไม่ได้แตกต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่การสตาร์ทโดยการต่อชุดขดลวดเข้าไป 2/3 เท่า ส่วนตรงที่ทอร์กในช่วงเร่งรอบที่ความเร็วประมาณครึ่งหนึ่งของความเร็วซิงโครนัสจะไม่ตกลงมาก



รูปที่ 2-16 รูปกราฟลักษณะสมบัติของการสตาร์ทแบบใช้ชุดขดลวดบางส่วน



รูปที่ 2-17 ไดอะแกรมของวงจรสตาร์ทแบบใช้ชุดขดลวดบางส่วน รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส, ทอร์ก, และความเร็ว

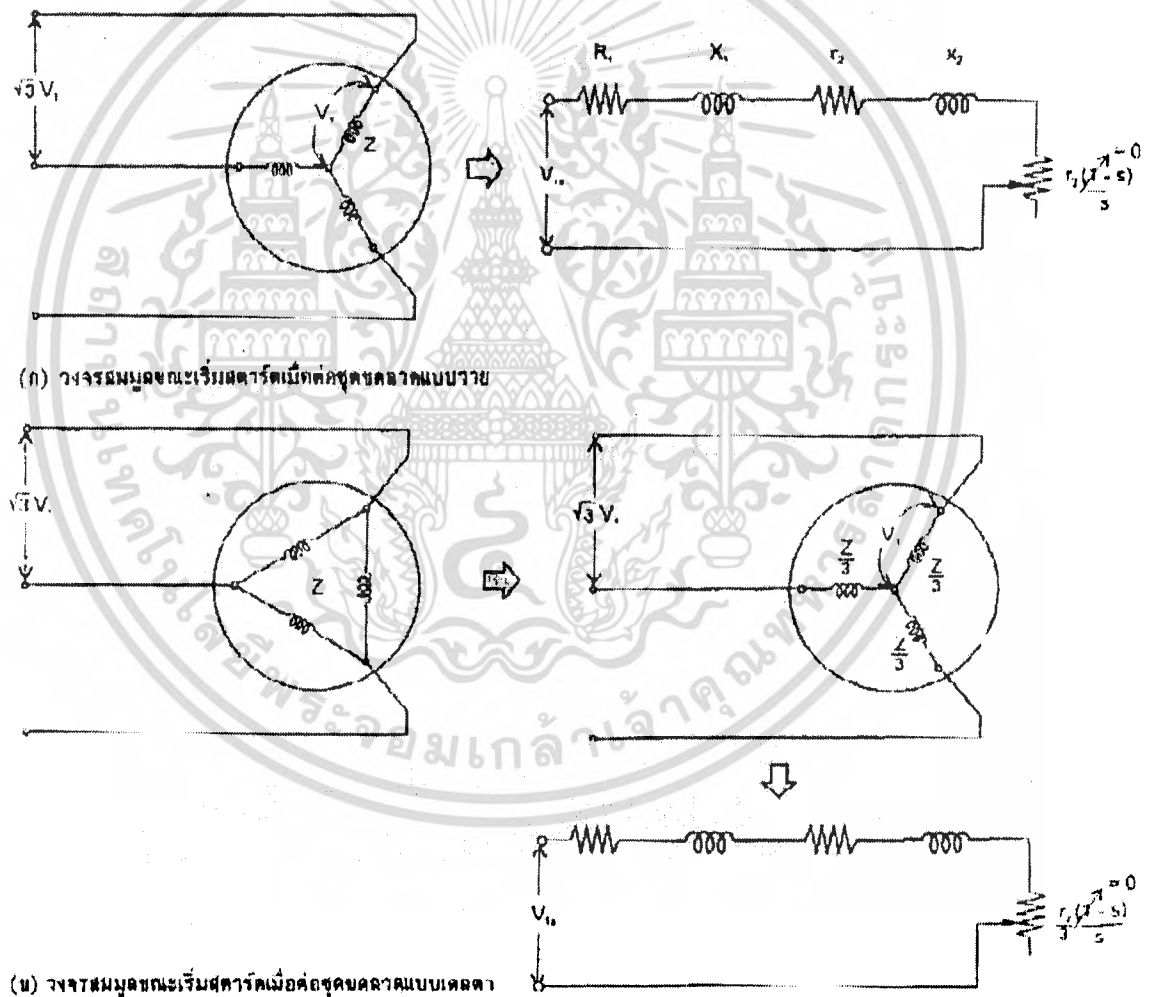
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ดังนั้น

$$\frac{\sqrt{3}V_m I_{stY}}{\sqrt{3}Z_{st} I_{st\Delta}} = \frac{1}{3}$$

นั่นคือกระแสเริ่มต้นเดินเครื่องเมื่อสตาร์ทโดยต่อแบบสตาร์ท-เดลต้า จะมีขนาดเพียง 1/3 เท่าของการสตาร์ทแบบ DOL สำหรับทอร์กเริ่มต้นเดินเครื่องเมื่อต่อชุดขดลวดแบบสตาร์ทจะมีค่าเพียง 1/3 เท่าของการสตาร์ทแบบ DOL เท่านั้น



รูปที่ 2-19 วงจรสมมุติขณะเริ่มสตาร์ทเมื่อต่อชุดขดลวดแบบ สตาร์ท-เดลต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2-19 จะได้

$$T_{stY} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{1a}^2 r_2}{(R_1 + r_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

และ

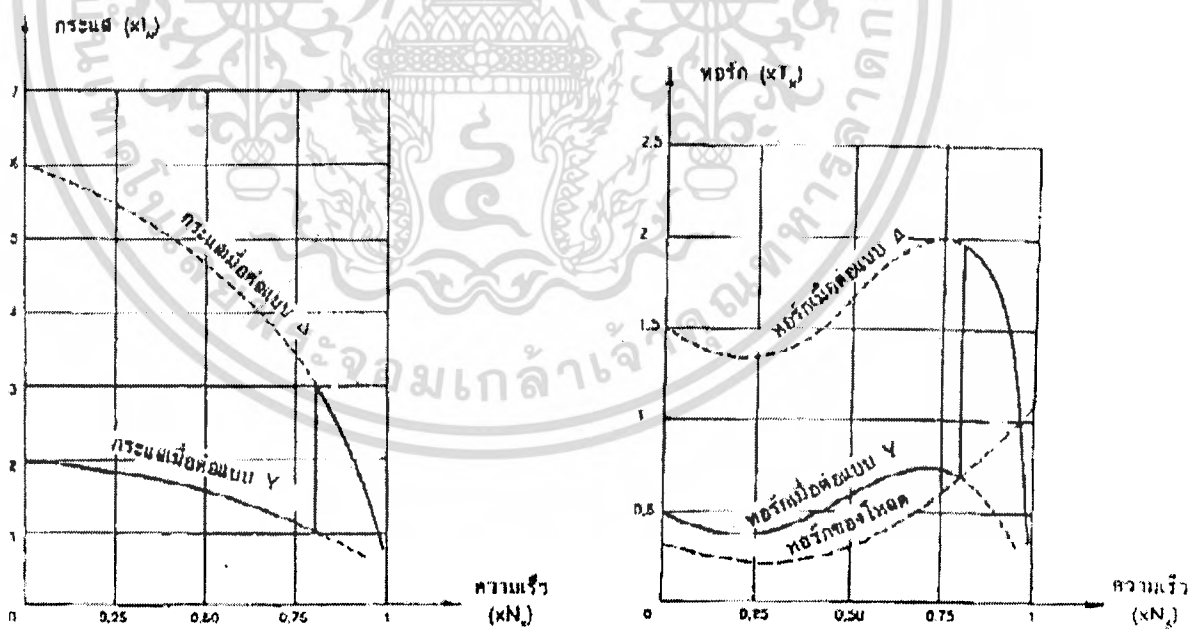
$$\frac{T_{stY}}{st_{\Delta}} = \frac{1}{3}$$

$$T_{st\Delta} = \frac{3}{\omega_s} \frac{v_{1a}^2 r_2}{\left(\frac{R_1}{3} + \frac{r_2}{3}\right)^2 + \left(\frac{X_1}{3} + \frac{X_2}{3}\right)^2}$$

$$= \frac{3}{\omega_s} \frac{3V_{1a}^2 r_2}{(R_1 + r_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

ดังนั้น

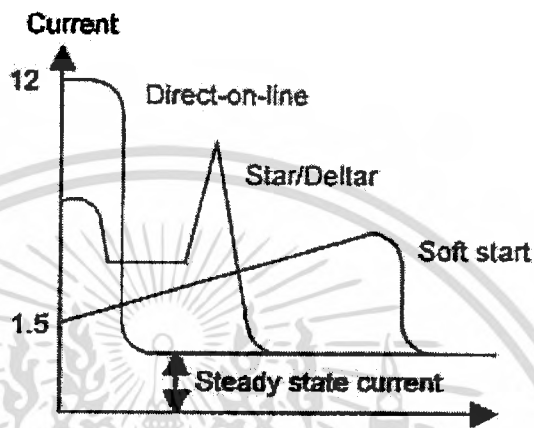
$$\frac{T_{stY}}{st_{\Delta}} = \frac{1}{3}$$



รูปที่ 2-20 ความสัมพันธ์ของกระแสมอเตอร์และทอร์กที่มอเตอร์สร้างได้กับความเร็วยกที่สตาร์ทเมื่อต่อแบบสตาร์-เดลต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

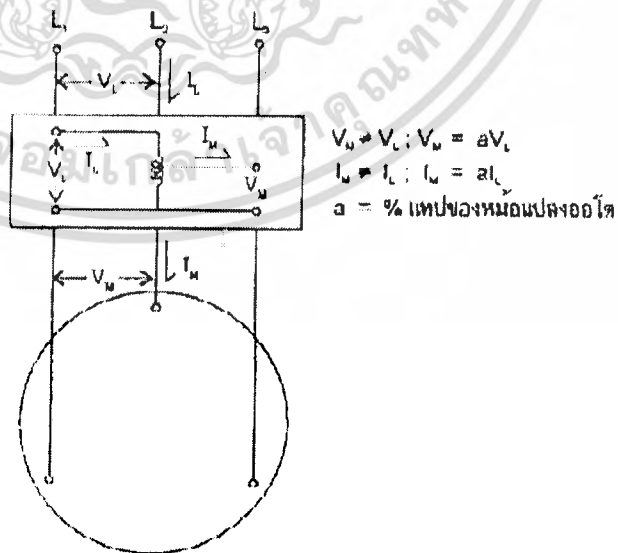
การสตาร์ทแบบ Star - Delta ได้รับการนิยมนมากที่สุด เพราะค่าใช้จ่ายจะน้อยที่สุด (เปรียบเทียบกับ Auto - transformer การstep R , L) แต่สามารถใช้ช่วยแก้ปัญหาได้เพียงบางส่วน เท่านั้นในช่วงการเปลี่ยน Star เป็น Delta ยังมีการกระชากของกระแสและแรงบิด มอเตอร์จะหมุนช้าลงอาจทำให้เกิดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดซ้ำ ๆ กัน ซึ่งอาจสูงกว่าการตอแบบ Direct on Line



รูปที่ 2-21 รูปกราฟการเปรียบเทียบกระแสช่วงสตาร์ท

ในขบวนการที่ใช้มอเตอร์กับของเหลว มอเตอร์ที่หยุดการทำงานอย่างกะทันหัน อาจทำให้เกิดพลังงานศักย์ต่อ ท่อและรอยต่อได้จากการที่มอเตอร์หยุดทำงานก่อนของเหลว

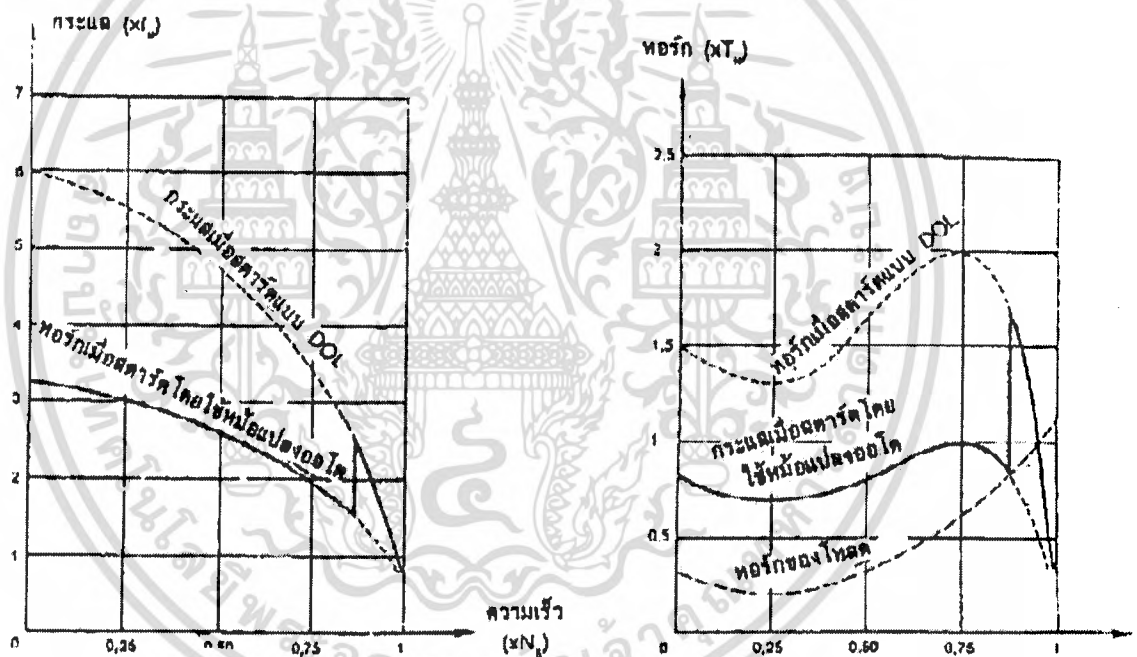
### 2.2.4 การสตาร์ทโดยใช้หม้อแปลงออโต



รูปที่ 2-22 การสตาร์ทโดยใช้หม้อแปลงออโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสตาาร์ทโดยใช้หม้อแปลงออโต แรงดันที่มอเตอร์ได้รับในจังหวะที่เริ่มสตาาร์ทจะต่ำกว่าค่าพิกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับแทปของหม้อแปลงออโตที่เลือกต่อใช้งานที่แรงดัน 80%, 65% หรือ 50% เนื่องจากกระแสเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์แปรโดยตรงกับแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ ดังนั้น เมื่อเลือกต่อที่แทป 80% กระแสเริ่มเดินเครื่องก็จะมีขนาดเพียง 80% ของกระแสเริ่มเดินเครื่องเมื่อต่อแบบ DOL แต่กระแสเริ่มเดินเครื่องที่ดึงจากแหล่งจ่ายไฟจะขึ้นอยู่กับอัตราทดของหม้อแปลงออโตด้วย ซึ่งจะทำให้กระแสเริ่มเดินเครื่องจากแหล่งจ่ายไฟลดลงเหลือเพียง  $0.8 \times 0.8 = 0.64$  หรือ 64% เท่านั้น เนื่องจากทอร์กแปรผันตามแรงดันยกกำลังสอง ดังนั้นถ้าเลือกต่อที่แทป 80% ทอร์กเริ่มเดินเครื่องก็จะมีขนาดเพียง 64% ของทอร์กเริ่มเดินเครื่องเมื่อต่อแบบ DOL การสตาาร์ทโดยใช้หม้อแปลงออโตนี้จึงสามารถเลือกกระแสเริ่มเดินเครื่องและทอร์กเริ่มเดินเครื่องที่เหมาะสมกับความต้องการได้โดยการเลือกแทปหม้อแปลงออโตซึ่งปกติจะมีให้เลือก 2-3 แทป

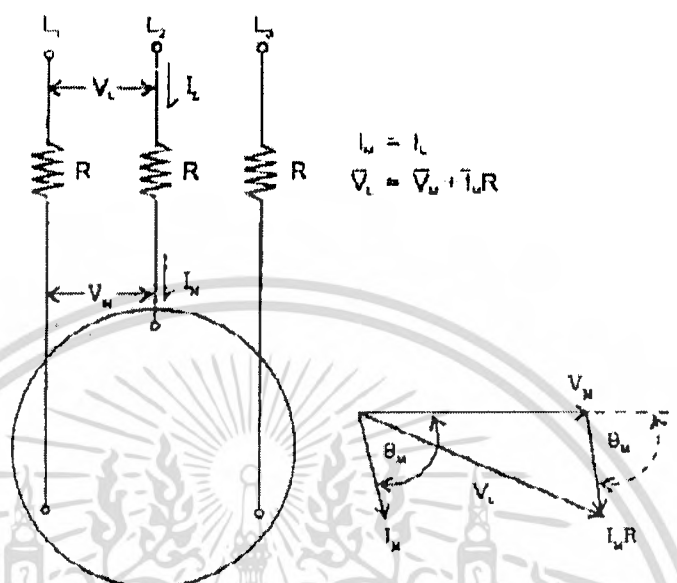


รูปที่ 2-23 ความสัมพันธ์ของกระแสและทอร์กกับความเร็ว

Auto transformer มีรูปแบบการสตาาร์ทที่นี้มนวล แต่การสตาาร์ทแบบนี้มีข้อจำกัดคือ ต้นทุนสูง และไม่เหมาะกับมอเตอร์ขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

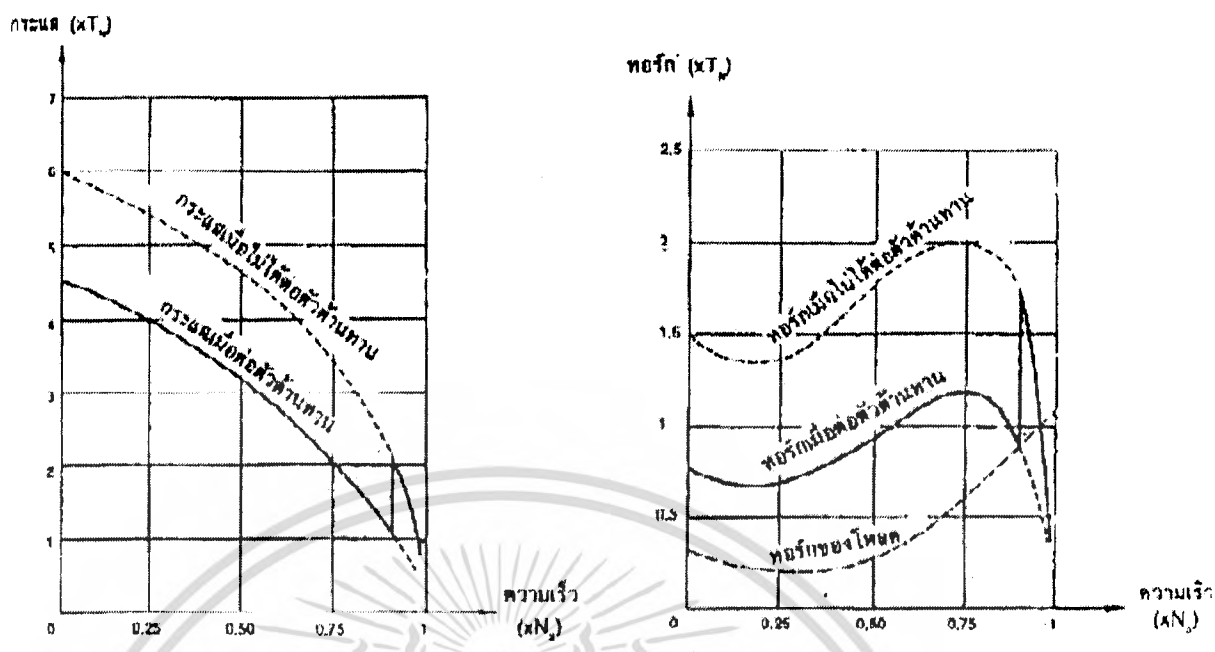
## 2.2.5 การสตาร์ทโดยใช้ตัวต้านทาน



รูปที่ 2-24 การสตาร์ทโดยใช้ตัวต้านทาน

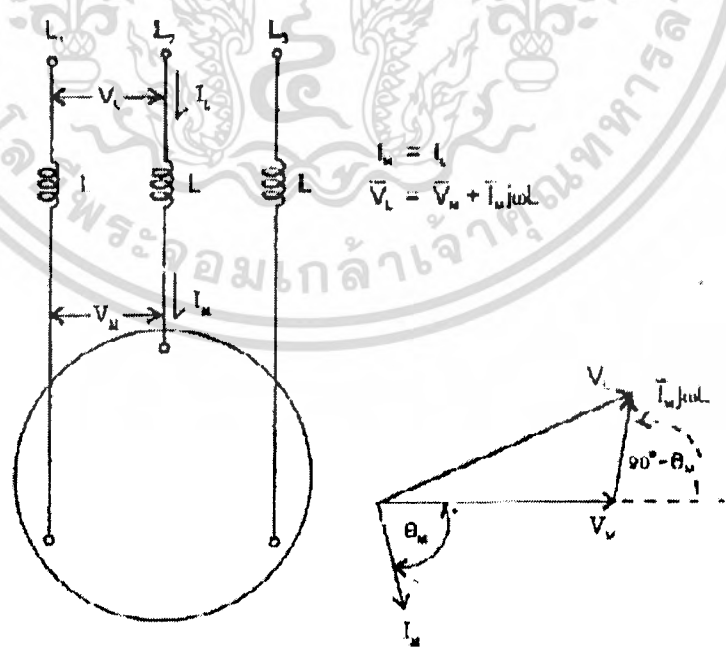
การสตาร์ทโดยใช้ตัวต้านทานนี้ จะใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับมอเตอร์ เมื่อเริ่มสตาร์ทจะมีกระแสเริ่มเดินเครื่องผ่านตัวต้านทานทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมบนตัวต้านทาน ส่งผลให้แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าแรงดันที่ป้อนเข้ามาที่แหล่งจ่ายไฟ ค่าความต้านทานของตัวต้านทานจะต้องเลือกให้เหมาะสมเพื่อให้แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์มีค่าเป็นไปตามความต้องการ เช่นเป็น 80%, 65% หรือ 50% กระแสเริ่มเดินเครื่องที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟและกระแสเริ่มเดินเครื่องที่ไหลเข้ามอเตอร์ จะมีค่าเท่ากัน และแปรโดยตรงกับขนาดแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ ส่วนทอร์กเริ่มเดินเครื่องจะแปรโดยตรงกับแรงดันที่ขั้วยกกำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ทอร์ก และความเร็ว

2.2.6 การสตาร์ทโดยใช้ตัวรีแอกเตอร์



รูปที่ 2-26 การสตาร์ทแบบใช้รีแอกเตอร์

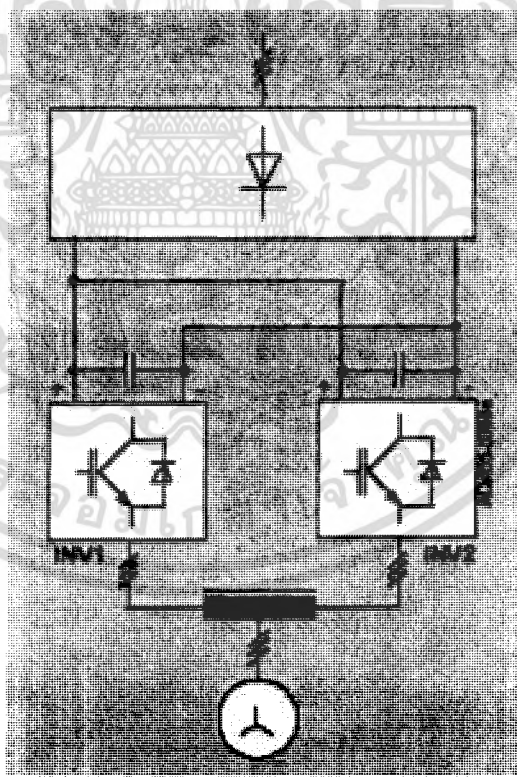
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสตาร์ทโดยใช้ตัวรีแอกเตอร์นั้นนิยมใช้กับมอเตอร์ขนาดใหญ่ หรือมอเตอร์แรงดันสูงโดยการ  
ใช้ตัวรีแอกเตอร์ต่ออนุกรมกับมอเตอร์ เมื่อสตาร์ทจะมีกระแสเริ่มเดินเครื่องไหลผ่านรีแอกเตอร์ทำให้  
เกิดแรงดันตกคร่อมบนตัวรีแอกเตอร์ ส่งผลให้แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ต่ำกว่าแรงดันที่ป้อนจาก  
แหล่งจ่ายไฟ ผลลัพธ์จะคล้ายกับการสตาร์ทโดยใช้ตัวต้านทาน แต่มีข้อคือ มารสูญเสียต่ำกว่า

## 2.2.7 การสตาร์ทโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

### อินเวอร์เตอร์ ( INVERTER )

การสตาร์ทด้วย Inverter ค่ากระแสสูงสุดจะมีค่าเท่ากับกระแสสูงสุดของมอเตอร์เท่านั้น และเป็น  
ค่าที่ต่ำสุดด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบอื่นๆ ดังนั้น ในโรงงาน อุตสาหกรรมที่มีการใช้มอเตอร์  
ขนาดดังกล่าวข้างต้น เช่น Blower , Compressor เราสามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ ด้วยการติดตั้ง  
Inverter เข้ามาใช้ในการสตาร์ทและถ้าในงานบางลักษณะที่สามารถลดรอบการทำงานลงได้ก็จะทำให้  
สามารถลดกระแสได้ แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึง ประสิทธิภาพของโหลดด้วย เนื่องจากการติดตั้ง Inverter มี  
ราคาที่สูง

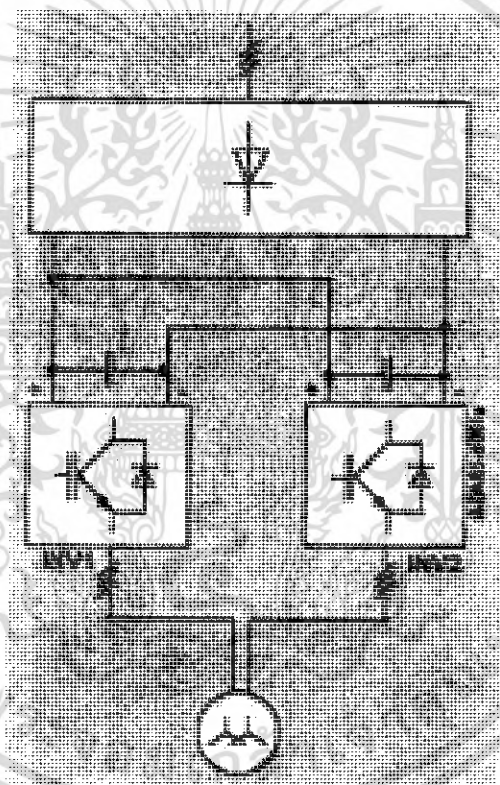


รูปที่ 2-27 การขนาน Inverter โดยผ่านหม้อแปลงอินเตอร์เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2-27 เป็นการนำ Inverter 2 ตัว ด้าน Output มาต่อขนานกันเพื่อช่วยกันแบ่งภาระกระแส เนื่องจากรูปคลื่นที่ออกจาก Inverter เป็นแบบ PWM ไม่ได้เป็นคลื่น Sine Wave โดยแท้จริงดังนั้นจึงไม่สามารถขนานได้โดยตรงด้วยระบบไฟฟ้าปกติ จึงจำเป็นต้องเพิ่ม Inter phase Transformer ซึ่งจะทำหน้าที่ Synchronization หรือประสานคลื่นแรงดันที่ออกจาก Inverter ทั้งสองตัวให้เป็นหนึ่งเดียวกัน ก่อนที่จะจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ และเป็นการลดความเครียดอันเนื่องจาก Harmonics

ในการใช้งานจะสามารถควบคุมได้เพียงในโหมด V/F เท่านั้นกล่าวคือ ภาค IGBT ที่ Inverter ไม่สามารถทราบตำแหน่งที่แท้จริง ของสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ได้ เพราะมี Inter phase Transformer มาขึ้นกลาง จึงไม่สามารถควบคุมแบบ Vector Control ได้ หากนำวิธีนี้ไปใช้ จะใช้ได้เฉพาะการนำไปประยุกต์ใช้งานที่เป็น โหลดแบบ ( $M \propto n^2$ ) เช่น พัดลม หรือ ปั้มน้ำเท่านั้น



รูปที่ 2-28 การขนาน Inverter โดยใช้มอเตอร์แบบขดลวดขนาน

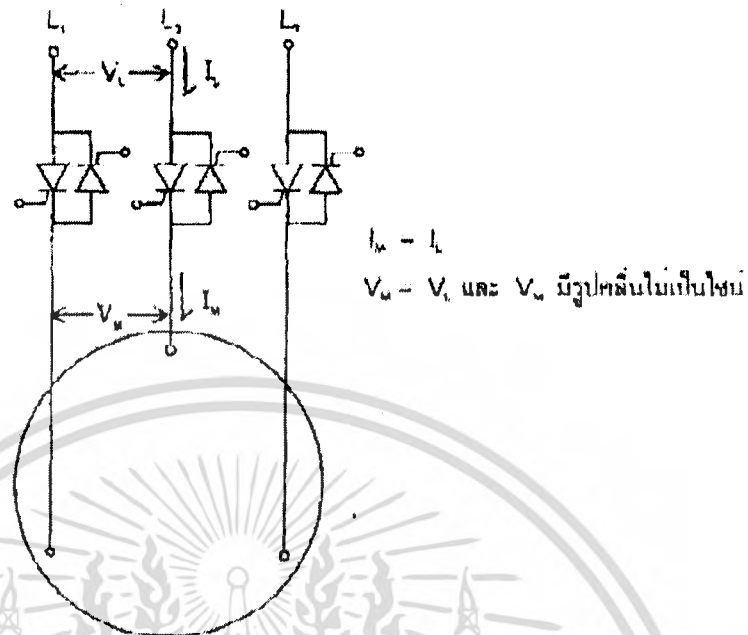
ในลักษณะบางงาน โหลดเป็นแบบชนิด แรงบิดคงที่ตลอดย่านการทำงาน (Constant Torque) เช่น สายพานลำเลียง เครื่องโม่ เครื่องอัด หรือ คอมเพรสเซอร์ กล่าวคือ เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบต่ำๆ และยังคงต้องการแรงบิดสูง หรือกระแสยังคงสูงความเร็วรอบต่ำและต้องการความแม่นยำของแรงบิดต่อความเร็วรอบของมอเตอร์สูง ไม่สามารถที่จะใช้วิธีการ แบ่งกระแสโดยผ่าน Inter Phase Transformer ได้แต่สามารถหันไปใช้วิธีแบ่งแรงบิดของมอเตอร์ โดยการแยกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดออกเป็น 2 ชุดภายในมอเตอร์ตัวเดียวกัน เป็นการแบ่งแบบแรงบิดช่วยกันขับ มีข้อดีในแง่การตอบสนองต่อแรงบิดได้ดีกว่า และรวดเร็วกว่า แบบผ่าน Inter Phases

#### ผลดีจากการใช้ INVERTER

1. ประหยัดพลังงานได้ (ที่ความเร็วรอบต่ำกว่า 50Hz) มอเตอร์จะกินกำลังไฟฟ้าน้อยลง นั่นคือสามารถประหยัดค่ากำลังไฟฟ้าลดลงได้
2. ลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า (Demand) ลงได้ Inverter จะค่อย ๆ ช่าง กำลังให้กับมอเตอร์ ค่า Peak จึงลดลง ซึ่งต่างกับระบบสตาร์ทเดด้าเดิม
3. ลดการใช้ Magnetic และ Overload โดยต่อ Supply ตรง เข้า Inverter แล้ว
4. สามารถเพิ่ม – ลด ความเร็วรอบได้สะดวก เพื่อให้เหมาะกับงานแต่ละชนิดหรือเพิ่มรอบเกิน 50Hz เพื่อเพิ่มกำลังการผลิต
5. ลดการสึกหรอของเครื่องจักรและอะไหล่ เนื่องจากการออกตัวอย่างนุ่มนวล ไม่เกิดการกระชาก
6. สามารถ Break หยุดได้ตามต้องการ โดย Set เวลาหยุดได้เป็นวินาที

### ซอฟต์แวร์สตาร์ทเตอร์ ( Three phase control )



รูปที่ 2-29 การต่อ SCR สำหรับการสตาร์ทโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ซอฟต์แวร์สตาร์ทเตอร์ตามที่ยกตัวอย่างในรูป จะใช้ SCR จำนวนหกตัว (เฟสละสองตัว) โดยต่อแบบกลับหัวกลับหาง โดยทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิดให้กระแสไหลผ่านเข้ามอเตอร์โดยการหน่วงมุมจุดฉนวนของ SCR แต่ละตัว จะสามารถควบคุมการนำกระแสของ SCR แต่ละตัวที่จ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ได้ จึงสามารถควบคุมแรงดันเฉลี่ยที่ขั้วมอเตอร์ได้ และจากการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการทำงานจึงมีความยืดหยุ่นสูงในการปรับแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์อย่างไม่มีขีดจำกัดคือ ปรับตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่าพิกัดได้อย่างต่อเนื่อง

Soft Starter สามารถทำการควบคุมแรงดันและพลังงานที่จ่ายไปยังมอเตอร์ได้ โดยแรงดันที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามการตั้งเวลา Ramp up ทำให้การออกตัวเป็นไปอย่างนุ่มนวล ความเร็วที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น จะช่วยลดแรงฉุดหรือแรงกระชากในขณะออกตัว ลดเสียงและการสั่นสะเทือน ลดปฏิกิริยาตอบโต้ที่อาจเกิดขึ้นจากการเริ่มหมุนอย่างกะทันหันของสายพาน ซึ่งจะช่วยลดการสึกหรอของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น โซ่สายพาน เกียร์ หรือเฟืองทด และอื่นๆ ได้ ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของมอเตอร์และเครื่องจักร โดยเฉพาะกับมอเตอร์ที่ต้องเริ่มและหยุดการทำงานบ่อย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.7.1 ผลทางไฟฟ้า

#### (ก) ประโยชน์ในการลดกระแสสตาร์ทของมอเตอร์

Soft Starter ได้นำเอาหลักการควบคุมแรงดันโดยกำหนดมุมจุดชนวนไทรสเตอร์มาใช้ จะต่างกันตรงที่ว่า มุมจุด ชนวน ของ Soft Starter จะไม่คงที่ ณ มุมใดมุมหนึ่ง แต่จะเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ โดยจะเริ่มจากมุม  $180^\circ$  แล้วลดลงมาเรื่อย ๆ จนถึง  $0^\circ$  (หรือ  $150^\circ$  ลงมา  $0^\circ$  ในกรณีไฟ 3 เฟส) ส่งผลให้ระดับแรงดันค่อย ๆ เปลี่ยนจาก 0 เป็น 100 % จากคุณสมบัติในการลดกระแสสตาร์ท และทำให้กระแสสตาร์ทไม่กระชากดังเช่นในกรณีของ Direct on Line และ Star-Delta ในขณะที่ต้นทุนก็ไม่สูงเหมือนดังเช่นกรณีของ Auto-transformer

นอกจากนั้นโดยทั่วไปยังมีฟังก์ชันการจำกัดกระแส (Current Limiting) ทำให้สามารถควบคุมกระแสขณะสตาร์ทไม่ให้เกินค่าสูงสุดตามที่ปรับตั้งไว้ได้ (2.5 – 5 ของกระแสพิกัด) ซึ่งเหมาะสำหรับมอเตอร์ที่ใช้ขั้วโหลดที่มีทอร์คเพิ่มขึ้นตามความเร็ว เช่น บิ๊ม หรือ พัดลม (ต้องการทอร์คในการออกตัวไม่สูง) ซึ่งต้องการการลดกระแสขณะสตาร์ท หรือกรณีที่โหลดหนักที่ต้องการแรงบิด 1 หรือ 2 เท่า ของทอร์คพิกัด กระแสสตาร์ทจะมีค่าเท่ากับการสตาร์ทด้วยวิธี DOL แต่จะไม่เกิดการกระชากอย่างรุนแรง

### 2.2.7.2 ผลทางกล

การใช้ Soft Starter จะทำให้แรงบิดเริ่มสตาร์ทลดลง ซึ่งการลดลงของแรงบิดเริ่มสตาร์ทนี้จะมีทั้งผลดีและผลเสียดังนี้

(ก) ลดการกระชากทางกล Soft Starter สามารถทำการควบคุมแรงดันและพลังงานที่จ่ายไปยังมอเตอร์ได้ โดยแรงดันที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นตามการตั้งเวลา Ramp up ทำให้การออกตัวเป็นไปอย่างนุ่มนวล ความเร็วที่ค่อยๆเพิ่มขึ้น จะช่วยลดแรงฉุดหรือแรงกระชากในขณะออกตัว ลดเสียงและการสั่นสะเทือน ลดการสูญเสียเนื่องจากความร้อนลดปฏิกิริยาตอบโต้ที่อาจเกิดขึ้นจากการเริ่มหมุนอย่างกะทันหันของสายพาน ซึ่งจะช่วยลดการสึกหรอของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น โซ่ สายพาน เกียร์ หรือเฟืองทด และอื่นๆได้ ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของมอเตอร์และเครื่องจักรโดยเฉพาะกับมอเตอร์ที่ต้องเริ่มและหยุดการทำงานบ่อย ๆ

(ข) โหลดการผลิตไม่กระตุกขณะสตาร์ท ทำให้กระบวนการผลิตมีความนุ่มนวลมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) ทำให้ออกตัวช้าลง หรือบางกรณีอาจถึงกับออกตัวไม่ไหว การใช้ Soft Starter จะทำให้ระยะเวลาในการสตาร์ทนานขึ้น เพราะเมื่อ  $T_m$  ลดลง แรงบิดลัพท์ที่จะ ไปขับ ให้มอเตอร์ออกตัวก็จะน้อยลง ทำให้ระยะเวลาในการออกตัวนานขึ้น และ จะเป็นปัญหามากขึ้น ในกรณีที่โหลด มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (J) สูง ๆ เช่น โหลดที่เป็น Blower, Centrifuge หรือพวก Mill ในกรณีของโหลด Blower ที่มีค่า J สูงมาก ในกรณีนั้นเป็น Blower ด้าน Suction ที่ใช้ดูดลมออกจาก Boiler เป็น Blower ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.8 เมตรถ้าตั้งค่าแรงดันเริ่มสตาร์ทน้อยไป มอเตอร์จะไม่ ออกตัวเลย ต้องตั้งมากถึงระดับหนึ่งจึงจะออกตัวได้ แต่ความเร็วจะเพิ่มขึ้นได้อย่างช้า ๆ เพราะโหลดมีความเฉื่อยมาก ในกรณีของ Blower ตัวนี้ต้องใช้เวลากถึงเกือบ 4 นาที ความเร็วลมจึงจะเข้าสู่ความเร็วปกติของมอเตอร์สำหรับโหลดบางประเภท เช่น เครื่องไม่หิน สายพานลำเลียงหิน คอมเพรสเซอร์ โหลดพวกนี้ โมเมนต์ความเฉื่อย ไม่สูง แต่ต้องการแรงบิดเริ่มสตาร์ทสูง การใช้ Soft Starter อาจมีผลทำให้ขับโหลดไม่ไหว ถ้าแรงดันเริ่มสตาร์ท มีค่าต่ำจนมอเตอร์ไม่สามารถสร้างแรงบิด  $T_m$  มาชนะ TL ได้ มอเตอร์ก็จะไม่สามารถเริ่มหมุนได้ การสตาร์ทโหลด ประเภทนี้จึงต้องตั้งแรงดันให้สูงพอสมควร จนบางครั้งอาจต้องตั้งถึง 70-80 % จึงจะสตาร์ทไหว แต่ถ้ามาคิดดูว่า ถ้าหากต้องตั้งแรงดันเริ่มสตาร์ทสูงขนาดนั้น ความเป็น Soft Start ก็คงไม่เหลือแล้ว สู้ไม่ใช้เสียเลยจะดีกว่า

(ง) ตั้งกระแสสูงกว่าพิคตยาวนานกว่าที่ควร ถ้าโหลดมี J มาก ข้อเสียนี้ต่อเนื่องมาจากข้อเสียข้างต้น เพราะในกรณีที่โหลดมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยมาก ๆ การลดแรงบิดเริ่มสตาร์ท จะทำให้การตั้งกระแสที่สูงกว่าพิคตยาวนานกว่าที่ควร ถึงแม้กระแสนั้นจะมีค่าต่ำกว่ากรณีสตาร์ทแบบ Direct on Line และ Star-Delta ก็ตาม แต่การตั้งกระแสสูงกว่าพิคตยาวนานผิดปกติ จะทำให้เกิดปัญหาที่สำคัญคือ ปัญหาความร้อน สะสมทั้งที่ตัวมอเตอร์และที่ Soft Starter ตามมา ดังกรณีตัวอย่างดังต่อไปนี้ มอเตอร์ 4 Pole, 400 kW, 1488 RPM กระแสพิคต 690 A Starting Control กรณี Direct on Line 6.5 เท่า ของกระแส พิคตโหลดคือ Blower ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.8 เมตร ของเดิมใช้การสตาร์ทแบบสตาร์ท-เดลต้า โดยมีระยะเวลาสตาร์ทประมาณ 3-4 นาที ปัญหาที่ผ่านมาก็คือ Magnetic Contractor พังบ่อยมาก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการซ่อม สูงมาก เพราะเป็นตัวยักษ์ ทำให้ราคาสูงมาก จึงคิดเปลี่ยนมาใช้ Soft Starter แต่เนื่องจากผู้ใช้ไม่ได้คำนึงถึงค่า J จึงทำเรื่องขอซื้อ Soft Starter ขนาด 400 kW พบว่าไม่สามารถสตาร์ทมอเตอร์ตัวนี้ให้เข้าสู่ ความเร็วพิคตได้ แต่จะ Trip ไม่ว่าจะตั้งค่า Current Limit ไว้ที่เท่าใดก็ตาม เมื่อพิจารณาดู ก็พบว่าลักษณะของโหลดทำให้การเพิ่มของความเร็วเป็นไปอย่างช้า ๆ ส่งผลให้มอเตอร์ต้องตั้งกระแสสูงต่อเนื่อง ยาวนาน เพราะแม้สตาร์ทแบบสตาร์ท-เดลต้า จึงจะตั้งกระแสประมาณ 3-4 เท่า ยังต้องใช้เวลายาวนานถึง 3-4 นาที เมื่อเราเปลี่ยนมาใช้ Soft Starter แล้วตั้ง Limit ไว้ที่ 300 % Soft Starter ก็จะต้องรับกระแส 300 % ได้เป็นระยะเวลา อย่างน้อย 4 นาที เช่นเดียวกัน แต่เมื่อไปตรวจสอบ Spec ระยะเวลาการรับกระแส Over Load ของ Soft Starter พบว่า Soft Starter จะสามารถรับกระแสขนาด 300 % ของกระแสพิคตของตัวเอง ได้เป็นเวลา เพียง 60 วินาที กรณีสตาร์ทจากสภาพอุณหภูมิปกติไม่มีความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ขาดเห็น เองกับระเบียบข้อบังคับที่ตนสังกัด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Over Load ของ Soft Starterพบว่า Soft Starter จะสามารถรับกระแสขนาด 300 % ของกระแสฟัดของตัวเอง ได้เป็นเวลา เพียง 60 วินาที กรณีสตาร์ทจากสภาพอุณหภูมิปกติไม่มีความร้อนสะสม (Cold Start) เมื่อเป็นเช่นนี้ก็เป็นที่แน่นอนว่า ถ้าตั้ง Limit ไว้ที่ 300 % จะไม่มีทางสตาร์ทผ่านแน่ ๆ เพราะโหลดต้องการระยะเวลาสตาร์ทถึงเกือบ 4 นาที แต่ถ้าทดลองลด I Limit ลงเหลือ 200 %ก็จะพบว่าเกิด Tripเช่นเดิมเพราะว่าที่กระแส 200 % แรงบิดย่อมลดลง ดังนั้นแทนที่จะใช้เวลาสตาร์ท 4 นาที อาจต้องใช้ถึง 10 นาที แต่ไทรสเตอร์ของ Soft Starter รับกระแส 200 % ได้เพียง 200 วินาที กรณี Cold Start และ 100 วินาที Hot Start เป็นอันว่า Soft Starter ขนาด 400 kW ไม่สามารถstart มอเตอร์ขนาด 400 kW ได้

### สรุปประเด็นที่ต้องพิจารณาเมื่อเลือกซื้อ Soft Starter

1. แรงบิดเริ่มต้นที่โหลดต้องการ
  2. โมเมนต์ความเฉื่อยของโหลด
  3. ขนาดของกระแสและระยะเวลาในการสตาร์ท
- ข้อดี**
1. ยืดอายุของมอเตอร์
  2. ไม่ลดงานที่เคยทำอยู่ โดยมอเตอร์ยังคงทำงานที่ความเร็วรอบคงที่
  3. เป็นอุปกรณ์เสริมโดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนมอเตอร์ หรือขั้นตอนการผลิต
  4. ลดการสูญเสียที่เป็นภาระค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็น
  5. มีระบบ soft start ทำให้ค่าบำรุงรักษามอเตอร์และระบบส่งกำลังลดลง
  6. กระแสที่ลดลงจาก soft start ทำให้ค่า MAX Demand Charge ต่ำลง
  7. ระบบ Soft start สามารถใช้แทน star Delta Starter ได้ทันที
  8. ลดความค้อน การสั่นสะเทือน และเสียงที่เกิดจากการทำงานของมอเตอร์
  9. ติดตั้งง่ายไม่ต้องใช้พื้นที่มาก และไม่ต้องคิดแปลงวงจรเดิมที่มีอยู่แล้ว

### จุดคุ้มทุน

จากการทดลองกับเครื่องคอมเพรสเซอร์ เครื่องฉีดพลาสติก โรงเลื่อย และ โรงน้ำแข็ง สามารถทำให้เกิดประหยัดได้ 10 % - 40 % ขึ้นอยู่กับชั่วโมงการทำงาน ประสิทธิภาพและลักษณะของ Load แต่อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถทำให้จุดคุ้มทุนอยู่ภายในเวลา 1-3 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเปรียบเทียบ Soft Starter กับ Inverter

โดยทั่วไปแล้ว อินเวอร์เตอร์ จะมีฟังก์ชันและขีดความสามารถที่เหนือกว่า Soft Starters จนกระทั่งมีค่ากล่าวขานในกลุ่มตัวแทนจำหน่ายอินเวอร์เตอร์ว่า “ ฟังก์ชันอะไรก็ตามที่ Soft Starter ใช้งานได้ อินเวอร์เตอร์ ทำได้หมด “ ถึงแม้ว่าคำกล่าวนี้จะเป็นจริงก็ตาม แต่ถ้าพิจารณาจากประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานแล้ว เช่นถ้าเครื่องจักรของคุณไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมความเร็ว ใช้งานที่ความเร็วรอบคงที่ (fixed speed) ต้องการการควบคุม ramp time ต้องการความนุ่มนวล ไม่มีการกระตุก (jerk) หรือการกระชากในขณะออกตัวหรือช่วงหยุด การใช้ Soft Starter จะเป็นคำตอบสุดท้ายที่ถูกต้องกว่า เนื่องจากจะประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าการใช้อินเวอร์เตอร์

การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกนั้นมีหลายวิธี การสตาร์ทด้วยวิธีที่เหมาะสมจะช่วยให้มอเตอร์และระบบทางกลตลอดจนระบบไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และปลอดภัย ตลอดจนเสียค่าใช้จ่ายต่างๆ ต่ำสุด เช่น ค่าบำรุงรักษา การที่จะเลือกว่าสตาร์ทวิธีไหน เราต้องคำนึงถึงทั้งเรื่องของทอร์กที่มอเตอร์ในระหว่างเร่งความเร็วรอบและกระแสเริ่มเดินเครื่องที่มอเตอร์ดึงมาจากระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการสตาร์ทมอเตอร์แบบต่างๆ

คุณลักษณะ	ลักษณะการสตาร์ท					
	DOL	Part winding	Star - Delta	Auto Transformer	Resistor	Solid State
กระแสเริ่มเดินเครื่อง	100% (4 – 8 In)	65% (2.6 – 5.2 In)	33% (1.3 – 2.6 In)	64%,42%,25% (1 – 5.1 In)	70% (2.8 – 5.6 In)	0 – 100 % (0 – 8 In)
ทอร์กเริ่มเดินเครื่อง	100% (0.6-1.5 Tn)	50% (0.3-0.75 Tn)	33% (0.2-0.5 Tn)	64%,42%,25% (0.15-0.96 Tn)	49% (0.3-0.75 Tn)	ปรับได้ 5 -50% (0.03-0.75Tn)
จำนวนสายไฟ (เส้น)	3	6	6	3	3	3 หรือ 6
ขนาดทางกายภาพ	เล็กสุด	เล็กกว่า	ปานกลาง	ใหญ่	ปานกลาง	เล็ก
การเกิดกระแสเซอร์จ	มากที่สุด	มี	มี	มี	มี	มีน้อยมาก
การเปลี่ยนจังหวะ	ไม่มี	แบบปิด	แบบเปิดหรือปิด	7 ถึง 12	แบบปิด	ไม่มี
ช่วงเวลาสตาร์ท(Sec)	2 ถึง 3		3 ถึง 7	7 ถึง 12	7 ถึง 12	ปรับแต่งได้
การควบคุม	เปิด/ปิด	เปิด/ปิด	เปิด/ปิด	ได้สูงสุด 3 แท	เปิด/ปิด	ปรับแต่งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-2 (ต่อ)การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการสตาร์ทมอเตอร์แบบต่างๆ

คุณลักษณะ	ลักษณะการสตาร์ท					
	DOL	Part winding	Star - Delta	Auto Transformer	Resistor	Solid State
ข้อดี	1.ราคาถูก 2.ให้ทอร์คเริ่มต้นเครื่องสูง		1.ค่อนข้างจะถูก	1.อัตราส่วน T สูง 2.สามารถเลือกค่าได้ 3.ไม่ขาดจังหวะ	1.สามารถเลือกค่าได้ 2.ต้องใช้ตัวต้านทาน	1.ปรับแต่งค่าต่างๆได้อย่างละเอียด
ข้อเสีย	1.กระแสเริ่มต้นเครื่องสูง	1.กระแสอาจไม่สมดุล 2.อาจเริ่มรอบได้ช้าหรือเร่งรอบไม่ขึ้น	1.ทอร์คเริ่มต้นเครื่องต่ำ 2.ปรับค่าได้ 3.ต้องใช้มอเตอร์มีขั้วต่อสาย 6 ขั้ว	1.ต้องใช้หม้อแปลงอโต้ซึ่งราคาแพง	1.ลดกระแสเริ่มต้นเครื่องต่ำ 2. ต้องใช้ตัวต้านทาน	1.ราคาแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การควบคุมแรงดันที่สเตรเตอร์

### 2.3.1. การควบคุมแรงดันแบบ 3 เฟส

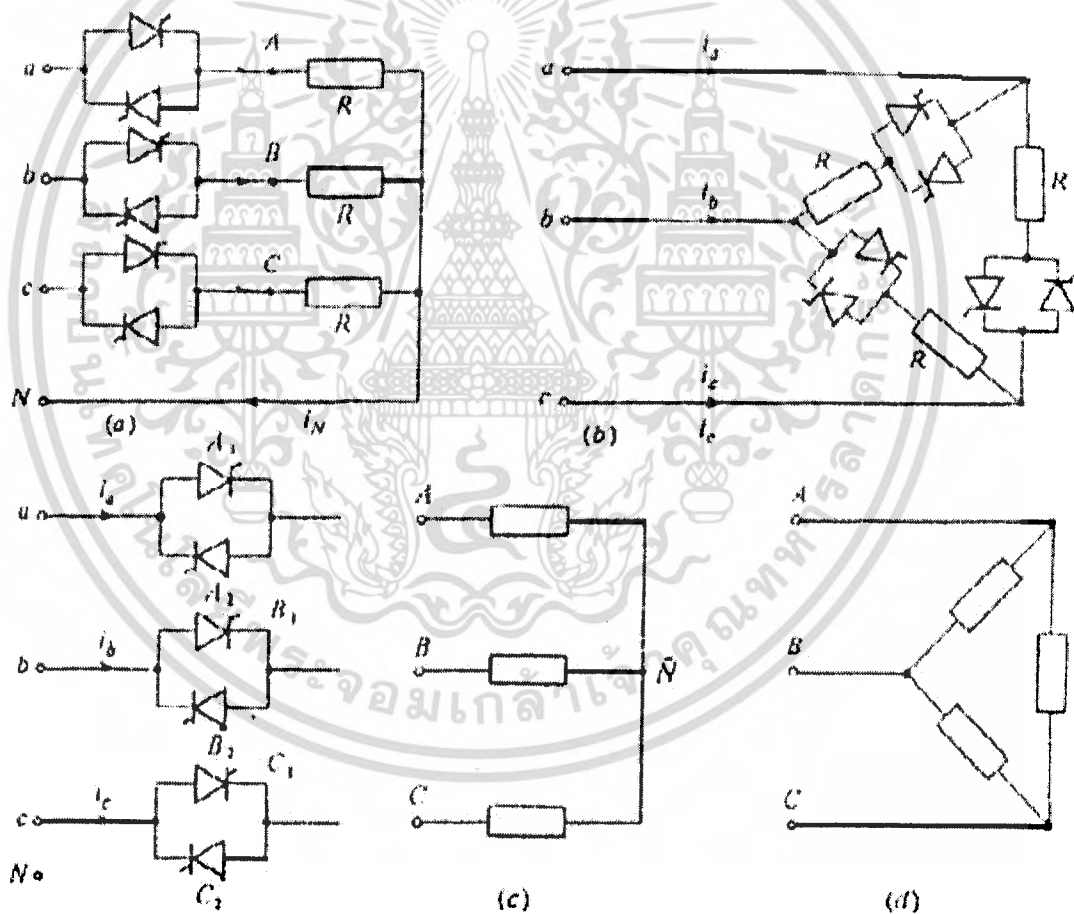
การควบคุมแรงดัน 3 เฟส แบ่งได้ 2 แบบ

1. การควบคุมแบบไลน์ (Line Controller)
2. การควบคุมแบบบรานช์ (Branch Controller)

ซึ่งการควบคุมทั้ง 2 แบบ สามารถต่อเป็นการควบคุมภาระทางไฟฟ้าแบบสตาร์

(Star) และ

เดลต้า (Delta) โดยรูปแบบของวงจรดังรูปที่ 2-38



รูปที่ 2-30 แสดงลักษณะการต่อการควบคุมโหลด 3 เฟส แบบต่างๆ

(a) การต่อ SCR แบบบรานช์เข้ากับโหลดสตาร์ (b) การต่อ SCR แบบบรานช์เข้ากับโหลดเดลต้า

(c) การต่อ SCR แบบไลน์เข้ากับโหลดสตาร์ (d) การต่อ SCR แบบไลน์เข้ากับโหลดเดลต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียการควบคุมแต่ละแบบ

### 4.2.1 การควบคุมแบบบรานซ์

- ข้อดี
1. มีช่วงการควบคุมกว้างคือตั้งแต่มุมโหลดถึง 180 องศา ซึ่งเหมือนกับการควบคุมแบบเฟสเดียว
  2. สำหรับการต่อแบบเคลตาสามารถลดพิคคของเอสซีอาร์ลงได้ เพราะกระแสที่ไหลผ่าน เอสซีอาร์มีค่าน้อยกว่าแบบไลน์และการต่อแบบนี้ยังให้ดิสทอร์ชันแฟคเตอร์ (Distortion Factor) สูงสุดเมื่อเทียบกับการต่อแบบอื่นด้วย

- ข้อเสีย
1. สำหรับการต่อแบบเคลตา การต่อจะไม่สะดวกเพราะต้องใช้สายออกจากมอเตอร์ถึง 6 เส้น เมื่อนำมาต่อกับ เอสซีอาร์และขั้วถ้าในกรณีที่มอเตอร์อยู่ห่างจากแผงควบคุมมากจะทำให้สิ้นเปลืองสาย และการเดินสายทำได้ลำบาก
  2. สำหรับการต่อแบบสตาร์ จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกกระแสสูงสุด และกระแสที่ไหลในนิวตรอนสูงสุดด้วย

### 4.2.2 การควบคุมแบบไลน์

- ข้อดี
1. การต่อใช้งานสะดวก เพราะใช้สายที่ต่อออกจากตัวมอเตอร์เพียง 3 เส้นเพื่อมาต่อกับ เอสซีอาร์ซึ่งถ้ามีมอเตอร์ที่มีการต่อสายออกมา 3 เส้นอยู่แล้ว สามารถใช้การควบคุมแบบนี้ได้เลย

- ข้อเสีย
1. มีช่วงการควบคุมแคบกว่าแบบบรานซ์ คือตั้งแต่มุมโหลดถึง 150 องศา
  2. มีรูปคลื่นแรงดันที่ได้ไม่ผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์ มากกว่าการควบคุมแบบบรานซ์ที่ต่อแบบเคลตา จะได้ดิสทอร์ชันแฟคเตอร์ต่ำกว่า แต่จะสูงกว่าการควบคุมแบบบรานซ์ที่ต่อแบบสตาร์

เนื่องจากการควบคุมแบบไลน์ มีการต่อใช้งานที่สะดวก ถึงแม้ว่าดิสทอร์ชันแฟคเตอร์จะไม่สูงเท่ากับการควบคุมแบบบรานซ์ที่มีการต่อแบบเคลตา แต่ก็มีฮาร์โมนิกกระแสน้อยกว่าการควบคุมแบบบรานซ์ที่มีการต่อแบบสตาร์ และยังเป็นที่ยอมรับใช้ในอุตสาหกรรมอยู่ทั่วไปด้วย เหตุผลเหล่านี้ทำให้ในโครงการนี้เลือกใช้การควบคุมแบบไลน์มาใช้ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 การควบคุมแบบไลน

การควบคุมแบบไลนมีวงจรต่อคังรูปสตาร์และเดลต้า ซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกันจึงขอกล่าวการต่อแบบสตาร์จากวงจรการต่อ จะไม่มีการต่อสายนิวตรอนจากแหล่งจ่ายไฟเข้ากับโหลด ดังนั้นจะต้องมีเอสซีอาร์ทำงานพร้อมกันอย่างน้อยที่สุด 2 ตัว จึงไม่มีกระแสไหลผ่านได้ เพราะฉะนั้นสัญญาณทริกาเกิดจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขนี้ ดังนั้นสัญญาณพัลส์ทริกซ์ จะต้องมีความกว้างอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ  $\pi / 3$  rad และซีควเอนซ์ (Sequence) ของสัญญาณพัลส์ทริกซ์ที่จะไปทริกซ์เอสซีอาร์แต่ละเฟส จะต้องมืซีควเอนซ์ตรงกับแหล่งจ่าย ในที่นี้เราจะกล่าวถึงการต่อแบบสตาร์

### 2.3.4 การต่อโหลดแบบสตาร์ (Star Connection)

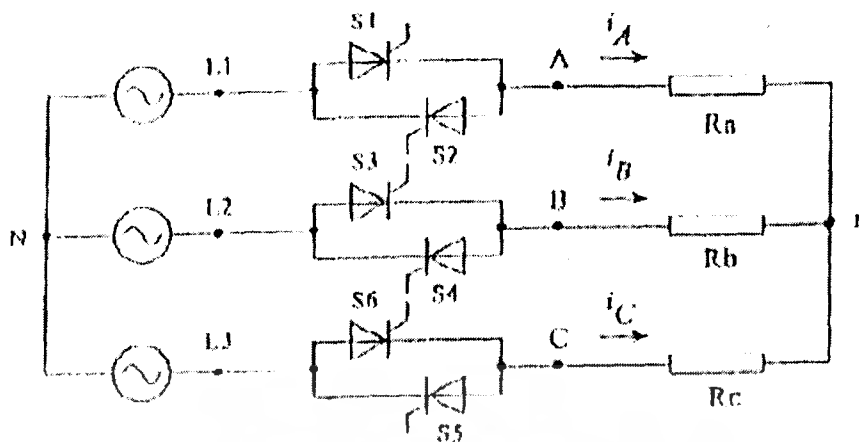
การต่อโหลดแบบสตาร์ดังรูปที่ 2-41 กระแสจะไหลผ่านโหลดได้เมื่อเอสซีอาร์ถูกจุดจนวนเกิดหรือนำกระแสอย่างน้อยสองตัว และกระแสไหลผ่านระหว่างเฟสหรือไหลในสองสาย (Line) ลำดับของมุมจุดจนวนเกิดมีมุมเริ่ม  $\alpha = 0^\circ$  เกิดขึ้นที่  $\omega t = 30^\circ$  เอสซีอาร์ลำดับต่อไปจะต้องมีมุมจุดจนวนเกิดคล้อยจอกับแหล่งจ่ายแรงดันดังตารางที่ 2-3 แสดงช่วงที่เอสซีอาร์นำกระแสเมื่อ  $\alpha = 30^\circ$  และ  $\alpha = 90^\circ$

ตารางที่ 2-3 แสดงมุมที่ SCR แต่ละตัวทำงาน

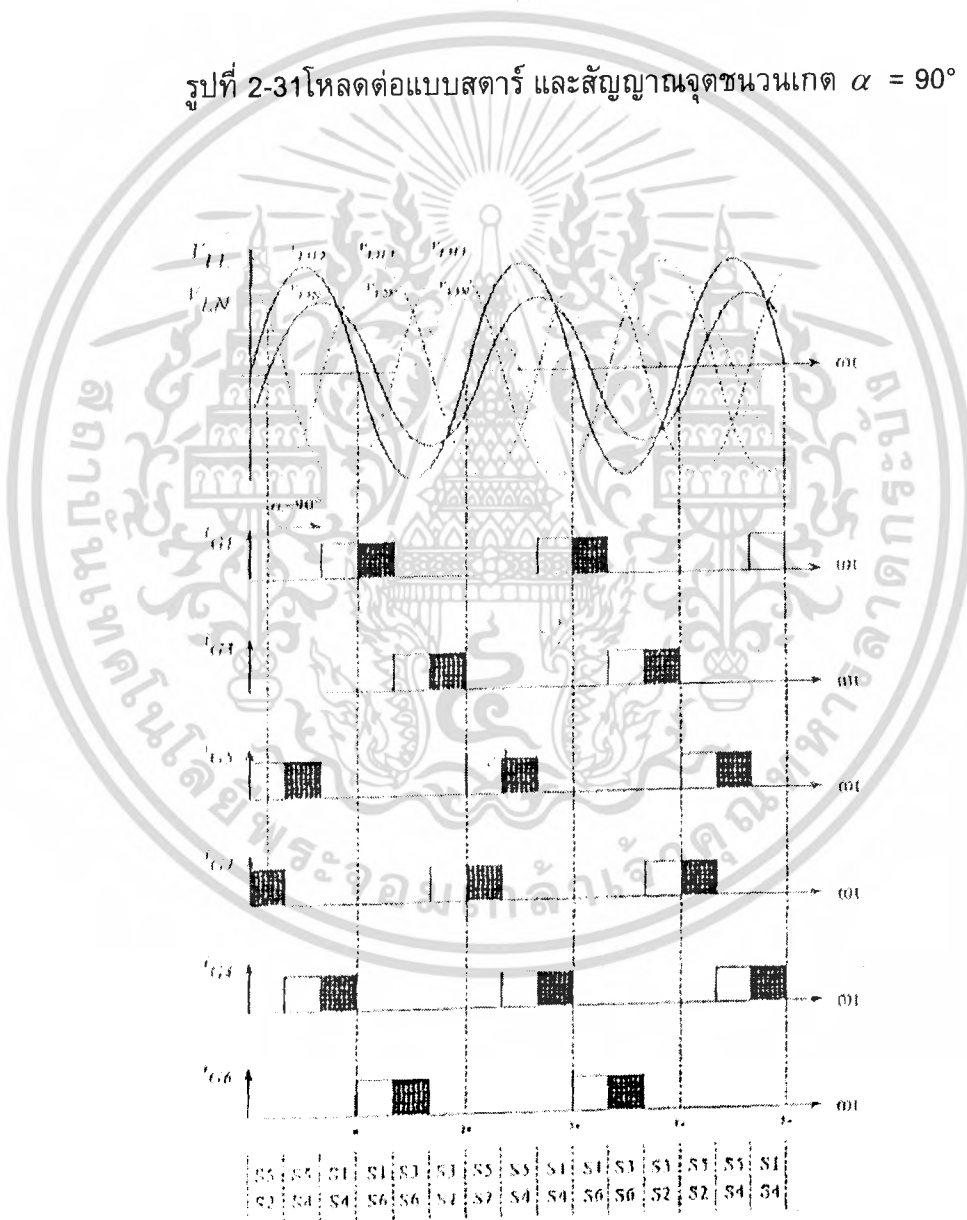
เอสซีอาร์	ช่วงนำกระแส $\alpha = 30^\circ$	ช่วงนำกระแส $\alpha = 90^\circ$
S1	$60^\circ - 180^\circ$	$120^\circ - 240^\circ$
S3	$120^\circ - 300^\circ$	$180^\circ - 300^\circ$
S5	$180^\circ - 420^\circ$	$240^\circ - 360^\circ$
S2	$240^\circ - 360^\circ$	$300^\circ - 420^\circ$
S4	$300^\circ - 420^\circ$	$0^\circ - 120^\circ$
S6	$0^\circ - 120^\circ$	$60^\circ - 180^\circ$

o

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-31 โหลดต่อแบบสตาร์ และสัญญาณจุดชนวนเกต  $\alpha = 90^\circ$



รูปที่ 2-32 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนในการนำกระแส

ขั้นตอนในการนำกระแสของวงจรรูปที่ 2-39 คือ เอสซีอาร์ T1 จะถูกจุดชนวนโดย P1 ที่มุมจุดชนวน  $90^\circ$  และนำกระแสพร้อมกับเอสซีอาร์ T4 ที่ถูกจุดชนวนโดย P4 กระแสจะไหลจากเฟส A ไปยังเฟส B จนถึงมุมที่  $150^\circ$  เอสซีอาร์ T4 จะหยุดนำกระแส ขณะเดียวกันเอสซีอาร์ T6 จะถูกจุดชนวนโดย P6 ให้นำกระแส ทำให้กระแสไหลจากเฟส A ไปยังเฟส C ที่มุม  $210^\circ$  และคือ เอสซีอาร์ T3 จะถูกจุดชนวนโดย P3 ให้นำกระแส กระแสจะไหลจากเฟส B จะไหลไปยังเฟส C จนถึงที่มุม  $270^\circ$  เอสซีอาร์ T6 จะหยุดนำกระแส ขณะเดียวกันเอสซีอาร์ T2 จะถูกจุดชนวนโดย P2 ให้นำกระแสพอดี กระแสจะไหลจากเฟส C ไปยังเฟส A จนถึงมุมที่  $330^\circ$  เอสซีอาร์ T3 จะหยุดนำกระแส ขณะเดียวกันเอสซีอาร์ T5 จะถูกจุดชนวนโดย P5 ให้นำกระแส กระแสจะไหลจากเฟส C ไปยังเฟส A จนถึงมุมที่  $390^\circ$  เอสซีอาร์ T2 จะหยุดนำกระแส ขณะเดียวกันเอสซีอาร์ T4 จะถูกจุดชนวนโดย P4 ให้นำกระแสพอดี กระแสจะไหลจากเฟส C จะไหลไปยังเฟส B จนถึงมุมที่  $450^\circ$  เอสซีอาร์ T1 จะถูกจุดชนวนอีกและจะเป็นลำดับอย่างนี้ต่อไปเรื่อยๆ

ที่มุมจุดชนวน  $> 90^\circ$  เอสซีอาร์จะถูกจุดชนวนเพียงตัวเดียวทำให้ไม่มีกระแสไหลในวงจรและที่มุมจุดชนวน เป็น  $30^\circ$  จะมีบางช่วงที่เอสซีอาร์จะนำกระแสพร้อมกันทั้ง 3 ตัว

แรงดันเอาต์พุตกับโหลดตัวต้านทาน คำนวณได้จากสมการ

$$[0 < \alpha < 60^\circ]$$

$$V_{oa} = \left( \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2v_s} \sin^2 \omega t d\omega \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \sqrt{6}v_s \left[ \frac{2}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{3}} \frac{1}{3} \sin^2 \omega t d\omega + \int_{\frac{\pi}{4}}^{\alpha+\frac{\pi}{2}} \frac{1}{4} \sin^2 \omega t d\omega + \int_{\alpha+\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \frac{1}{3} \sin^2 \omega t d\omega + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\alpha+\frac{\pi}{2}} \frac{1}{4} \sin^2 \omega t d\omega + \int_{\alpha+\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \frac{1}{3} \sin^2 \omega t d\omega \right] \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \sqrt{6}v_s \left[ \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right] \right]^{\frac{1}{2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[  $60 < \alpha < 90^\circ$  ]

$$V_{0\alpha} = \sqrt{6v_s} \left( \frac{2}{2\pi} \left[ \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} - \frac{\pi}{3} + \alpha} \frac{1}{4} \sin^2 \omega t d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} - \frac{\pi}{3} + \alpha} \frac{1}{4} \sin^2 \omega t d\omega t \right] \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \sqrt{6v_s} \left( \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\pi}{12} - \frac{3 \sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right] \right)^{\frac{1}{2}}$$

[  $90 < \alpha < 150^\circ$  ]

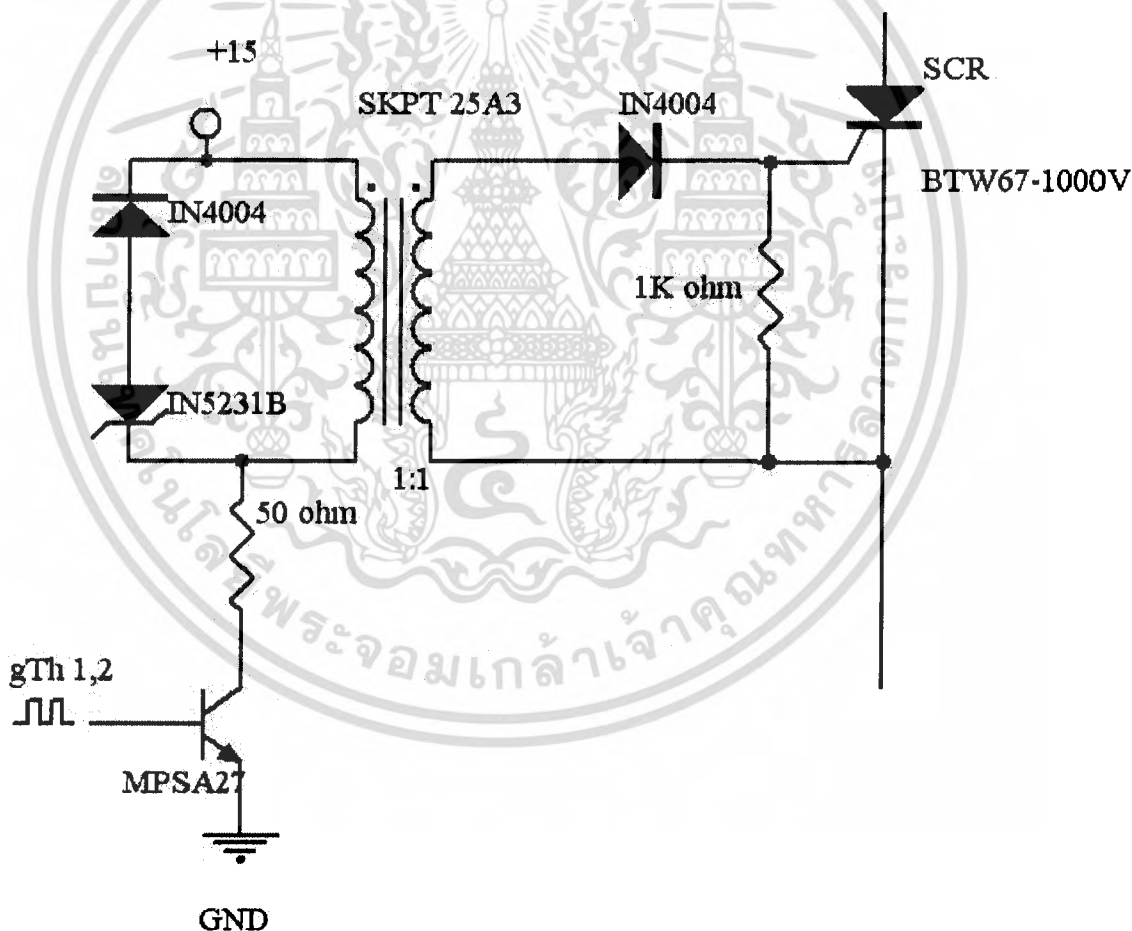
$$V_{0\alpha} = \sqrt{6v_s} \left( \frac{2}{2\pi} \left[ \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3} + \alpha}^{\pi} \frac{1}{4} \sin^2 \omega t d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3} + \alpha}^{\pi} \frac{1}{4} \sin^2 \omega t d\omega t \right] \right)^{\frac{1}{2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 2.4.2 วงจรจุดชนวนไธริสเตอร์ด้วยหม้อแปลงแบบแยกกราวนด์

ในการใช้งานจริงของวงจรจุดชนวน หรือวงจรควบคุม และวงจรกำลังนั้นจำเป็นต้องมีการแยกระหว่างสองวงจรนี้ออกจากกัน เพื่อเป็นการป้องกันภาวะผิดปกติของวงจรกำลังส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดความเสียหายกับวงจรควบคุมได้ โดยใช้ optocoupler และ pulse transformer แต่ในการทดลองจะใช้แบบ pulse transformer ดังรูปที่ 2-41 เนื่องจาก optocoupler จะต้องใช้แหล่งจ่ายและแอมพลิไฟเออร์ทางด้าน SCR แต่ pulse transformer จะมีข้อเสียเรื่องการอิมิตตัวของแกนเหล็กจึงต้องมีการใส่ไดโอดและซีเนอร์ไดโอด คร่อมขดปฐมภูมิเพื่อช่วยให้เกิดทางเดินฟรีวิลลิ่ง (free wheeling) ของกระแสปฐมภูมิขณะเทิร์นออฟ (Turn - Off) และป้องกันการอิมิตตัวของแกนเหล็กเหล็กหม้อแปลง ไดโอดในส่วนวงจรเกตทำหน้าที่เรียงกระแสทุติยภูมิ



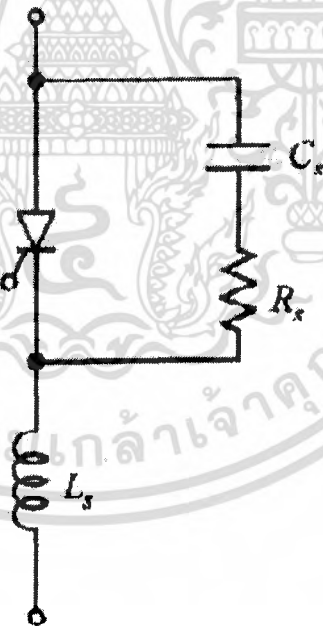
รูปที่ 2-34 แสดงการใช้ Pulse Transformer ในการแยกวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2. 4.3 วงจรสับเบอ์สำหรับสวิตช์ตระกูลไทรสเตอร์

จุดประสงค์หลักของวงจรสับเบอ์สำหรับไทรสเตอร์ จะใช้สำหรับป้องกันไทรสเตอร์จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน  $dv/dt$  แอนโอด - แคโทด และกระแสแอนโอด ถ้า  $dv/dt$  ไทรสเตอร์มีค่าสูงมากเกินไป จะทำให้ไทรสเตอร์นำกระแสถึงแม้ว่าจะไม่มีสัญญาณขั้วเกตก็ตาม และถ้าอัตราเปลี่ยนแปลงของกระแสมากเกินไป ( $di/dt$ ) ขณะไทรสเตอร์เริ่มนำกระแสมีค่าสูงมากเกินไป ก็จะทำให้เกิดความร้อนเฉพาะจุด (localized heating) ที่รอยต่อขาเกต ทำให้ไทรสเตอร์เกิดความเสียหายได้ วงจรสับเบอ์สำหรับไทรสเตอร์ สามารถต่อในลักษณะเดียวกับวงจรสับเบอ์ในกรณีทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นดังรูปที่ 2-42 โดยตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมจะทำหน้าที่ในการกำจัด  $di/dt$  ในขณะที่ตัวต้านทาน - ตัวเก็บประจุ ที่ต่อขนานกับไทรสเตอร์จะทำหน้าที่ในการกำจัด  $dv/dt$  (ในการทดลองใช้สับเบอ์ R และ C เท่านั้นเนื่องจากผลของ  $di/dt$  มีค่าน้อยมาก)

โดยที่ค่า C และ R สามารถคำนวณได้จาก  $C = \frac{I_t t_f}{2V_s}$  และ  $R < \frac{t_{on}}{5C}$

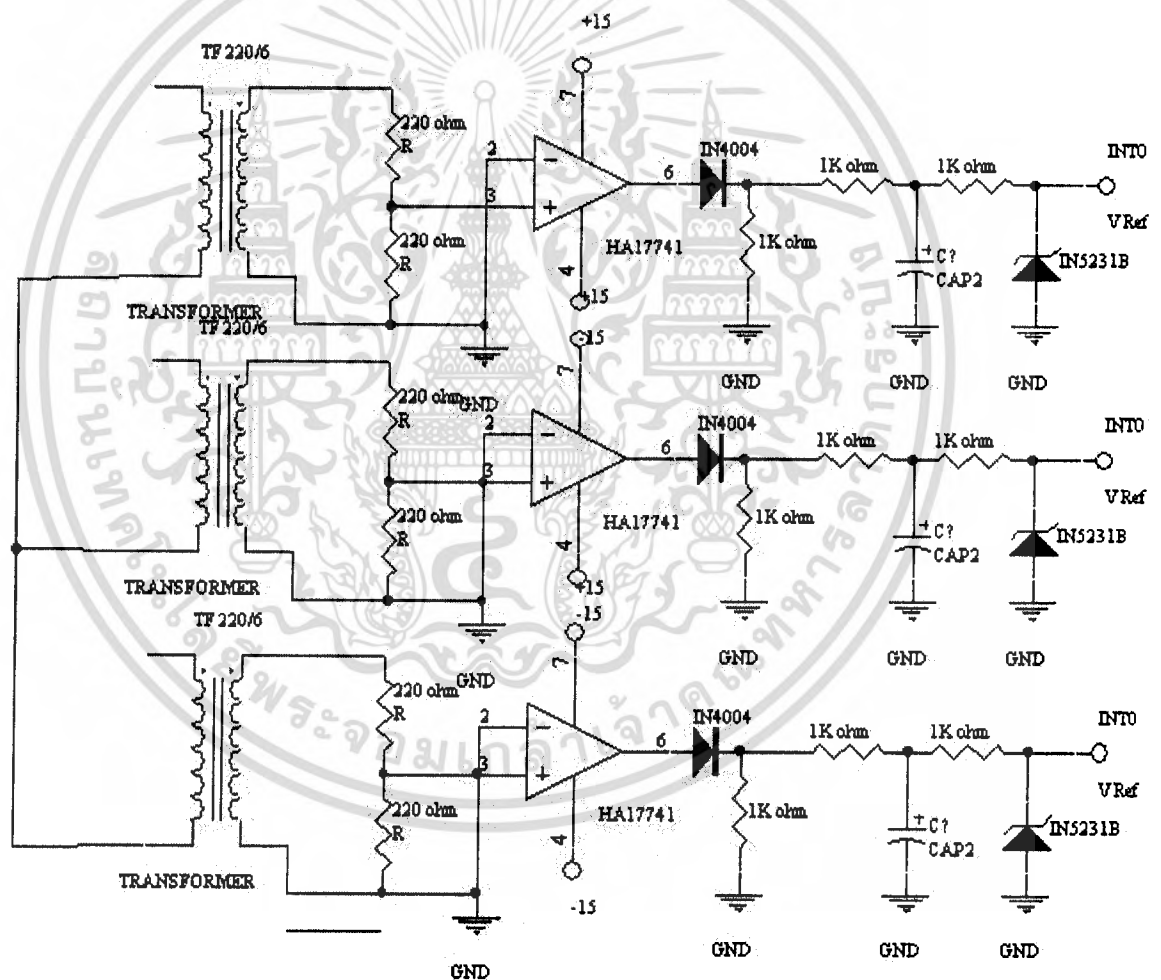


รูปที่ 2-35 วงจรสับเบอ์สำหรับไทรสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.4 Zero Crossing Voltage

เป็นส่วนของวงจรที่ตรวจจับสัญญาณแรงดันศูนย์ โดยในการทดลองจะต้องจูนมุมจุดชนวนมอเตอร์สามเฟส ด้วยมุมจุดชนวนค่าต่างๆ ดังนั้นเราจึงต้องทำการตรวจสอบเฟสของแรงดัน โดยการเช็คจุดศูนย์และถ้าสัญญาณจากจุดศูนย์มีค่าเพิ่มขึ้นจะได้สัญญาณที่มีค่าเป็น 1 แต่ถ้าสัญญาณจากจุดศูนย์ มีค่าลดลงจะได้สัญญาณมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้เราได้สัญญาณพัลส์ดังรูปที่ 2-44 ซึ่งเราจะนำสัญญาณแรงดันที่ได้จาก Zero Crossing Voltage มาเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์และทำการคำนวณค่ามุมจุดชนวน ให้จุดมุมจุดชนวนได้ถูกต้อง

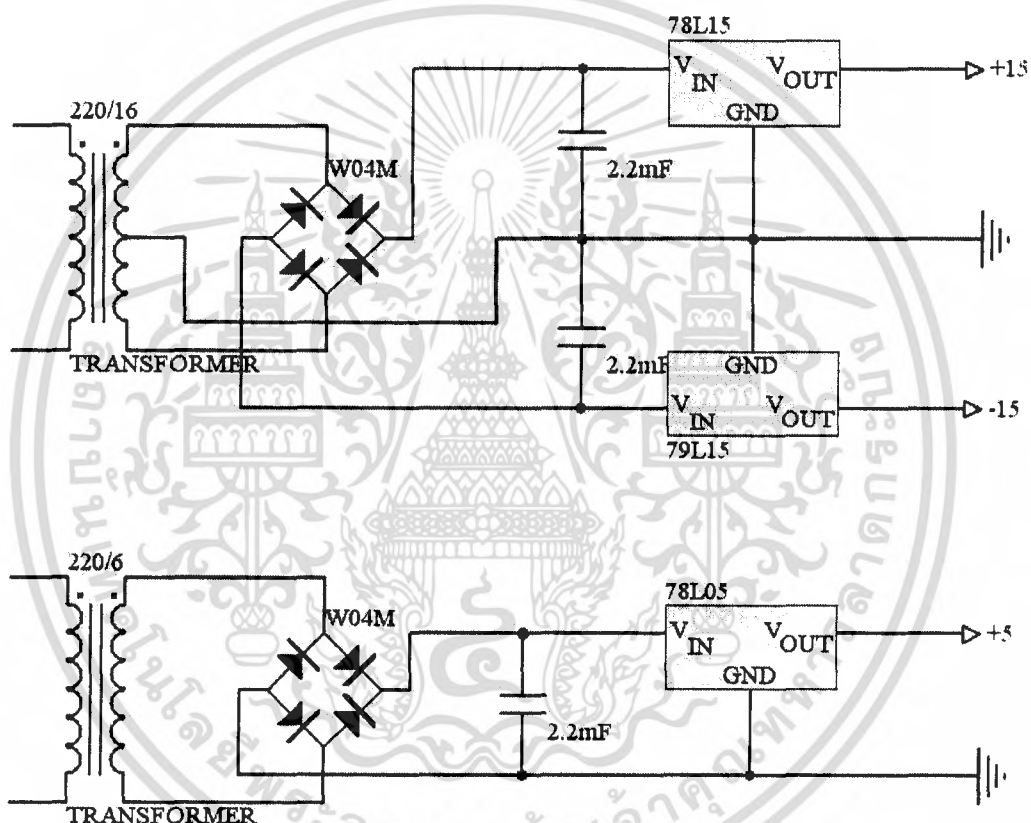


รูปที่ 2-36 วงจร Zero Crossing Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.5 วงจรสร้างแรงดัน

ในการทำงานของวงจรต่างๆ จะต้องใช้ไฟเลี้ยงแทบทั้งสิ้น การสร้างไฟเลี้ยงให้มีค่าถูกต้อง เป็นไปตามที่วงจรต้องการ จึงเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากถ้าแรงดันไฟเลี้ยงต่ำเกินไปวงจรก็ไม่สามารถทำงานได้ แต่ถ้าสูงเกินไปอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่วงจรได้

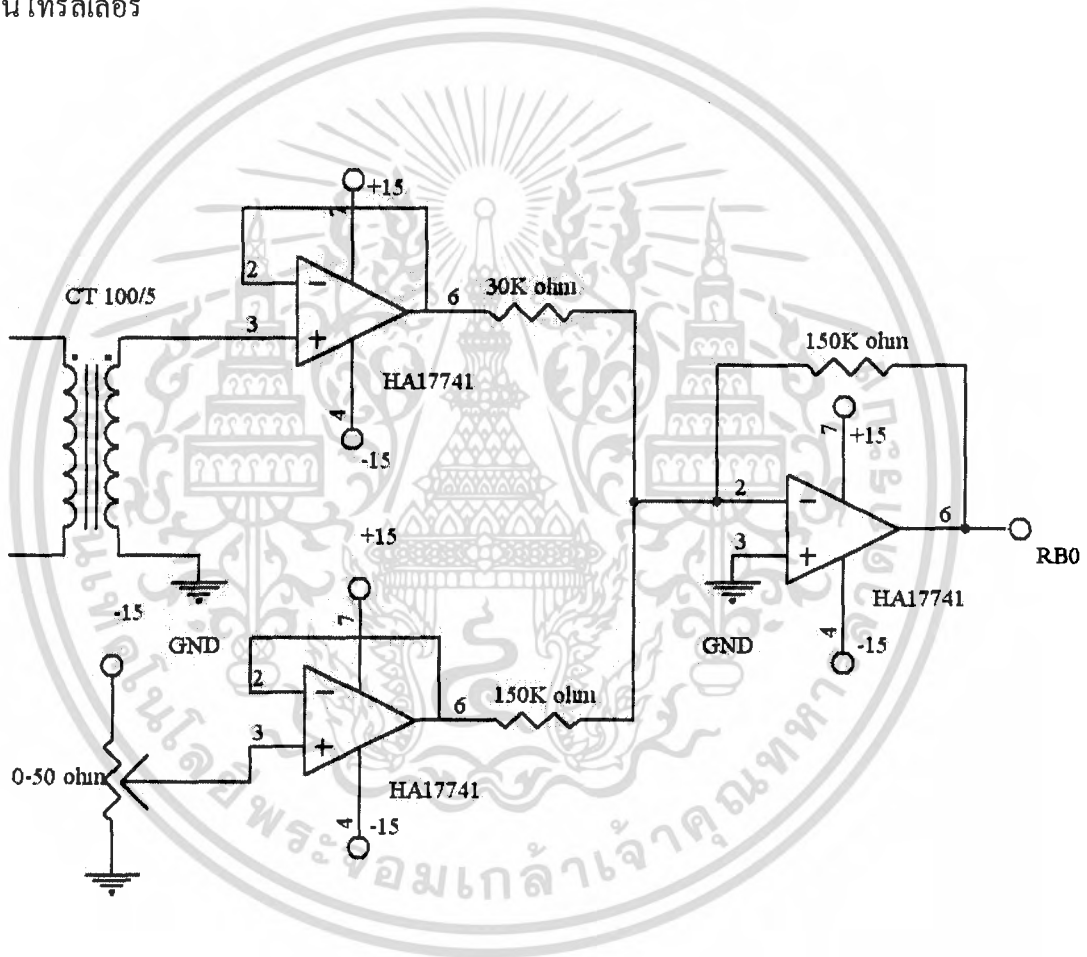


รูปที่ 2-37 วงจรสร้างแรงดัน +15 และ -15 โวลต์และ วงจรสร้างแรงดัน 5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.6 วงจร Feed Back กระแส

ในการที่จะให้วงจรทำงานได้อย่างถูกต้องไม่เกิดความผิดพลาดจะต้องมีการ Feed Back สัญญาณ ซึ่งในการทดลองจะทำการ Feed Back กระแส เพื่อกลับมาควบคุมสัญญาณทรานซิสเตอร์จุดชนวน ซึ่งกระแสที่ได้จากมอเตอร์ในช่วงสตาร์ทมีค่าค่อนข้างสูง จึงได้ใช้ CT เพื่อลดทอนกระแสลงจากนั้นนำไปผ่าน  $R = 0.1 \Omega$  เพื่อทำให้เกิดแรงดัน 5 โวลต์ จากนั้นผ่าน Offset เพื่อทำการยกระดับแรงดัน แล้วจึงผ่านออปแอมป์เฟออร์เพื่อให้สัญญาณคงที่ แล้วจึงนำไปเข้าคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 2-38 วงจร Feed Back กระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 หลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

### 2.5.1 dsPIC กับการตอบสนองสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอก

#### 2.6.1.1 คุณสมบัติโดยสรุปของอินเทอร์รัปต์ใน dsPIC

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ได้รับการเพิ่มเติมความสามารถด้านการจัดการและตอบสนองอินเทอร์รัปต์อย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์และอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ทำให้ข้อจำกัดด้านอินเทอร์รัปต์ที่เคยมีในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC หดหายไป อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์ (Interrupt controller module) สามารถทำให้การจัดการเกี่ยวกับการเลือกใช้และตอบสนองอินเทอร์รัปต์สามารถทำได้อย่างเป็นระบบและไม่ซับซ้อนเกินไป

คุณสมบัติเด่นโดยสรุปของโมดูลของโมดูลควบคุมอินเทอร์รัปต์ใน dsPIC30F2010 มีดังนี้

- กำหนดระดับความสำคัญในการอินเทอร์รัปต์ได้ 8 ระดับ
- มีแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์ 44 แหล่ง (สูงสุด 54 แหล่งใน dsPIC เบอร์ใหญ่สุด)
- รองรับการขัดจังหวะจากโปรเซสเซอร์หรือโปรเซสเซอร์แทร็ป (processor trap) หรืออาจเรียกง่าย ๆ ว่า การอินเทอร์รัปต์จากซีพียู ได้อีก 4 แบบ (สูงสุด 8 แบบใน dsPIC เบอร์ใหญ่สุด)
- มีอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ 44 ตำแหน่ง (สูงสุด 54 ตำแหน่ง ใน dsPIC เบอร์ใหญ่ที่สุด) รวมกับอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์อื่นเนื่องมาจากการทำงานของซีพียูแทร็ปเวกเตอร์อีก 4 ตำแหน่ง (สูงสุด 8 ตำแหน่ง ใน dsPIC เบอร์ใหญ่ที่สุด) เป็น 48 ตำแหน่ง (สูงสุด 62 ตำแหน่ง ใน dsPIC เบอร์ใหญ่ที่สุด) โดยได้รับการจัดสรรในรูปแบบของตาราง เรียกว่า ตารางอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ (Interrupt Vector Table : IVT)
- มีตารางอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์เสริม (Alternate Interrupt Vector Table : AIVT) เพื่อรองรับการตีบั๊ก

ในตารางที่ 4-1 แสดงข้อมูลของอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ทั้งหมดที่ dsPIC รองรับ แต่จะมีบางตัวที่ dsPIC30F4011 ไม่รองรับการทำงาน ส่วนในรูปที่ 2-47 แสดงรายละเอียดของตารางอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ที่มีใน dsPIC30F4011

เวกเตอร์ RESET ของคำสั่ง GOTO	000000
เวกเตอร์ RESET	000002
สำรองไว้	000004
เวกเตอร์การตรวจสอบสัญญาณนาฬิกา ล้มเหลว	
เวกเตอร์การตรวจสอบแอดเดรสผิดพลาด	
เวกเตอร์การตรวจสอบสเต็กผิดพลาด	
เวกเตอร์แจ้งเตือนเกี่ยวกับการคำนวณ	
สำรองไว้	
สำรองไว้	
สำรองไว้	
อินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ 0	000014
อินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ 1	000015
•	
•	
อินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ 52	00007E
อินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ 53	000080
พื้นที่เก็บตารางค่าเวกเตอร์อื่นๆ	0000FE

พื้นที่ของตารางเวกเตอร์

รูปที่ 2-39 แสดงรายละเอียดของการอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์หลักของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC

### 2.5.1.2 รีจิสเตอร์ควบคุมและแสดงสถานะการอินเทอร์รัปต์

ในการตอบสนองอินเทอร์รัปต์ของ dsPIC30F2010 มีรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งสิ้น 22 ตัวคือ

- **INTCON1** และ **INTCON2** เป็นรีจิสเตอร์ควบคุมหลัก โดยรีจิสเตอร์ **INTCON1** ใช้ในการเอ็นเอเบิลแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายในไมโครคอนโทรลเลอร์และใช้แสดงสถานะของการอินเทอร์รัปต์ ในขณะที่รีจิสเตอร์ **INTCON2** ใช้ควบคุมแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอกและจัดการเกี่ยวกับตารางอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **IFSx** เป็นรีจิสเตอร์แสดงสถานะแฟลคของการอินเตอร์รัปต์ โดยตัวอักษร x หมายถึงหมายเลขของรีจิสเตอร์ เนื่องจาก dsPIC มีรีจิสเตอร์ IFS ทั้งหมด 3 ตัวคือ IFS0 , IFC1 และ IFC2 เหตุที่ต้องมีมากก็เนื่องมาจาก dsPIC มีแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์มากมายนั่นเอง
- **IECx** เป็นรีจิสเตอร์สำหรับเอ็นเอเบิลการตอบสนองอินเตอร์รัปต์ โดยตัวอักษร x หมายถึงหมายเลขของรีจิสเตอร์ เนื่องจาก dsPIC มีรีจิสเตอร์ IEC ทั้งหมด 3 ตัวคือ IEC0 , IEC1 และ IEC2
- **IPCx** เป็นรีจิสเตอร์กำหนดระดับความสำคัญของแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์โดยตัวอักษร x หมายถึงหมายเลขของรีจิสเตอร์ เนื่องจาก dsPIC มีรีจิสเตอร์ IPC ทั้งหมด 12 ตัวคือ IPC0 ถึง IPC11 เพื่อรองรับแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์ทั้ง 44 แหล่ง โดยแต่ละแหล่งสามารถกำหนดระดับความสำคัญได้ 8 ระดับ
- **SR** เป็นรีจิสเตอร์แสดงสถานะของซีพียู โดยในบางบิตของรีจิสเตอร์ STATUS ( บิต 5 ถึง 7 ซึ่งก็คือบิต IPI0 ถึง IPI2 ) ถูกใช้ในการกำหนดระดับความสำคัญของอินเตอร์รัปต์
- **CORCON** เป็นรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของหน่วยประมวลผลกลาง โดยในบิต 3 ของรีจิสเตอร์ CORCON ซึ่งก็คือบิต 3 ถูกใช้ในการแสดงระดับความสำคัญของอินเตอร์รัปต์

### 2.5.1.3 กระบวนการอินเตอร์รัปต์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC

#### 2.5.1.3.1 การเตรียมการ

หากมีความต้องการใช้งานอินเตอร์รัปต์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC จะต้องเตรียมการกำหนดค่าในรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เซตบิต NSTDIS ซึ่งเป็นบิต 15 ของรีจิสเตอร์ INTCON1 ถ้าหากไม่ต้องการให้เกิดการอินเตอร์รัปต์ซ้อน
2. เลือกระดับความสำคัญของแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์ โดยกำหนดค่าลงในรีจิสเตอร์ IPCx ตัวที่เกี่ยวข้องกับแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์นั้นๆ
3. เคลียร์บิตแฟลคที่แจ้งสถานการณ์เกิดอินเตอร์รัปต์ในรีจิสเตอร์ IFSx ตัวที่เกี่ยวข้องกับแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์นั้นๆ
4. เอ็นเอเบิลแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์ที่ต้องการในรีจิสเตอร์ IECx ตัวที่เกี่ยวข้องกับแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์นั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1.3.2 โปรแกรมย่อยบริการอินเทอร์รัปต์ หรือ ISR (Interrupt Service Routine)

เมื่อเกิดอินเทอร์รัปต์ขึ้น ซีพียูจะกระโดดไปยังแอดเดรสอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ของแหล่งกำเนิดอินเทอร์รัปต์นั้นๆ และที่แอดเดรสอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ก็จะบรรจุคำสั่งเพื่อกำหนดให้ซีพียูดำเนินโดยปกติจะเป็นคำสั่งสั้นๆ เพื่อกำหนดให้กระโดดต่อไปยังโปรแกรมย่อยบริการอินเทอร์รัปต์ (ISR)

ที่บรรทัดแรกของ ISR จะต้องบรรจุคำสั่งเคลียร์บิตแฟล็กของอินเทอร์รัปต์ที่กำลังตอบสนองของขณะนั้นในรีจิสเตอร์ IFSx จากนั้นจึงกำหนดให้ซีพียูทำงานตามที่ต้องการ ซีพียูจะสามารถออกจาก ISR ได้ก็ต่อเมื่อพบคำสั่งภาษาแอสเซมบลี RETFIE จากนั้นก็จะกลับไปทำงานที่โปรแกรมหลักตามปกติ

### 2.5.1.3.3 โปรแกรมย่อยบริการอินเทอร์รัปต์จากซีพียู หรือ TSR (Trap Service Routine)

การเขียนโปรแกรมย่อยบริการอินเทอร์รัปต์สำหรับ TSR คล้ายกับ ISR ทารแต่การเคลียร์แฟล็กจะต้องไปกระทำยังบิตที่เกี่ยวข้องในรีจิสเตอร์ INTCON1 เสียก่อน จากนั้นจึงเข้าสู่การทำงานในโปรแกรมย่อยต่อไป และการออกจากโปรแกรมย่อยจะใช้คำสั่ง RETFIE เช่นกัน

### 2.5.1.3.4 การดิสแอสเบิลอินเทอร์รัปต์

มีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

1. เก็บค่าสถานะในปัจจุบันของรีจิสเตอร์ SR ลงในสแต็ก โดยใช้คำสั่ง PUSH
2. กำหนดระดับความสำคัญไว้ที่ระดับ 7 โดยการออร์ค่าใน 8 บิตล่างของรีจิสเตอร์ SR ซึ่งก็คือ SRL ด้วยค่า 0xE0

เพียงเท่านี้ก็จะสามารถดิสแอสเบิลการอินเทอร์รัปต์ได้แล้ว และหากต้องการให้สามารถใช้งานอินเทอร์รัปต์ก็สามารถทำได้โดยการคืนค่ารีจิสเตอร์ SR ด้วยการใช้คำสั่งภาษาแอสเซมบลี POP จากนั้น ก็จะกลับเข้าสู่กระบวนการเขียนโปรแกรมตามปกติ

การอธิบายกระบวนการอินเทอร์รัปต์ที่ผ่านมานั้นจะอ้างอิงคำสั่งภาษาแอสเซมบลีให้เห็นภาพในเชิงลึก แต่ถ้าพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C ขั้นตอนในรายละเอียดเหล่านี้จะถูกจัดการโดยกระบวนการคอมไพล์ ทำให้ช่วยลดขั้นตอนและความซับซ้อนของโปรแกรมลงอย่างมาก

## 2.5.2 Timer

ไทเมอร์/เคาเตอร์หลักใน dsPIC มี 5 ตัวคือ ไทเมอร์ 1 ถึงไทเมอร์ 5 โดยแต่ละตัวมีขนาด 16 บิต สำหรับไทเมอร์ 2 และ 3 กับ ไทเมอร์ 4 และ 5 สามารถทำงานร่วมกันเป็นไทเมอร์ขนาด 32 บิต เมื่อไทเมอร์แต่ละตัวทำงานแยกกันสามารถกำหนดการทำงานได้อีก 3 แบบ ตามลักษณะของฐานเวลา คือ ฐานเวลาแบบ A , B และ C ซึ่งจะได้อีกกล่าวในลำดับถัดไป

### 2.5.2.1 คุณสมบัติไทเมอร์

ใน dsPIC30F4011 มีไทเมอร์/เคาเตอร์ขนาด 16 บิตให้ใช้งานรวม 4 ตัว คือ ไทเมอร์ 1(T1) ไทเมอร์ 2(T2) , ไทเมอร์ 3(T3) และ ไทเมอร์ 4(T4)

#### คุณสมบัติไทเมอร์ 1

- รีจิสเตอร์ตัวนับรายละเอียด 16 บิต
- ทำงานได้ทั้งแบบซิงโครนัสและอะซิงโครนัสเคาเตอร์
- ทำงานร่วมกับขาอินพุทประจำตัวของไทเมอร์ได้
- มีปริสเกลเลอร์สำหรับหารความถี่การนับ
- สามารถกำหนดการอินเทอร์รัปต์จากการนับหรือจากการตรวจพบสัญญาณขอบขาลงที่ขาอินพุทของไทเมอร์
- สามารถกำเนิดสัญญาณกระตุ้นการทำงานไปยัง โมดูล ADC ได้

### 2.5.2.2 รีจิสเตอร์ในโมดูลไทเมอร์ของ dsPIC30F

ในโมดูลไทเมอร์ของ dsPIC30F4011 มีรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิตที่สำคัญอยู่ 3 กลุ่มคือ **กลุ่มที่ 1 TMRx** (16 – bit timer count register) เป็นกลุ่มของรีจิสเตอร์เก็บค่าไทเมอร์ กลุ่มนี้มี 5 ตัวคือ TMR1 , TMR2 , TMR3 , TMR4 และ TMR5 แต่สำหรับ dsPIC30F4011 มี 4 ตัวคือ TR1 – TR4

**กลุ่มที่ 2 PRx** (16 – bit Period associated with the timer) เป็นกลุ่มของรีจิสเตอร์คาบเวลาที่สัมพันธ์กับไทเมอร์ มี 5 ตัวเช่นกัน PR1 – PR5 แยกกันตามไทเมอร์หลักทั้ง 5 ตัว (ไทเมอร์ 1- 5) แต่สำหรับ dsPIC30F4011 มี 4 ตัวคือ PR1 – PR4

**กลุ่มที่ 3 TxCON** (16 – bit control register associated with timer) เป็นกลุ่มของรีจิสเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของไทเมอร์ มี 5 ตัวเช่นกัน T1CON – T5CON แยกกันไปตามไทเมอร์ หลักทั้ง 5 ตัวสำหรับกลุ่มนี้จะมีความสามารถพิเศษที่ยังสามารถแยกย่อยไปได้ 3 แบบภายใต้รีจิสเตอร์เดียวกัน เนื่องจากไทเมอร์สามารถทำงานได้อีก 3 แบบ ตามลักษณะของฐานเวลา จึงทำให้รีจิสเตอร์ TxCON

ดังนั้นไทเมอร์ 1 จึงเหมาะอย่างยิ่งในการนำมาใช้สร้างฐานเวลาพิกจิง (RTC) ในรูปเอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เปิดให้ทำงาน ค่าของรีจิสเตอร์ TMRx จะเพิ่มค่าขึ้น 1 ในทุกๆ ไซเคิลการำทำงานในกรณีที่เลือก อัตราปรีสเกลเลอร์เป็น 1:1 การเลือกโหมดนี้ทำได้โดยการเคลียร์ TCS (บิต 1 ของรีจิสเตอร์ TxCON ตัวอักษร x เป็นเลขของรีจิสเตอร์มีค่า 1 ถึง 15)

#### 2.5.2.3.2 เคน์เตอร์แบบซิงโครนัส ใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก

ไทเมอร์จะเข้าสู่โหมดนี้เมื่อบิต TCS ถูกเซต จึงสามารถใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก ผ่านทางขาอินพุต TxCK โดยค่าของเคน์เตอร์จะเพิ่มขึ้นทุกขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกา หากเลือกใช้ฐานเวลาแบบ A จะต้องกำหนดให้สัมพันธ์กับจังหวะการทำงานภายในหรือการซิงโครไนซ์ด้วยการเซตบิต TSYNC (บิตที่ 2 ของรีจิสเตอร์ TxCON) ในขณะที่ฐานเวลาแบบ B C จะได้รับซิงโครไนซ์กับสัญญาณนาฬิกาการทำงาน (TCY) โดยอัตโนมัติ

เมื่อไทเมอร์ ถูกกำหนดให้ทำงานเป็นเคน์เตอร์ แบบซิงโครนัส ค่าเวลาลอจิกสูง (HighTime) ลอจิกต่ำ (Low Time) ของสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกจะต้องมีค่าตามที่กำหนด ในคาตาชีตของ dsPIC เนื่องจากจะต้องกำหนดให้สัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกาของการทำงาน ใน dsPIC หากไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าสู่โหมดสลีป การทำงานของไทเมอร์ตัวนี้จะหยุดลงทันทีในการทำงานบางครั้งมีความต้องการให้ไทเมอร์นับค่าความสัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณภายนอกความถี่สูง จึงทำให้ต้องใช้ไทเมอร์ทำงานร่วมกัน นั่นคือใช้ไทเมอร์ ตัวหนึ่งทำงานด้วยฐานเวลาแบบ A และอีกตัวหนึ่งทำงานด้วยฐานเวลาแบบ B โดยต้องใช้ปรีสเกลเลอร์ช่วยในการลดทอนสัญญาณนาฬิกาจากแหล่งกำเนิดความถี่สูงเพื่อให้สามารถทำงานได้ทันและสัมพันธ์กัน

#### 2.5.2.3.3 ไทเมอร์แบบควบคุมการทำงานจากสัญญาณจากภายนอกหรือเกตไทเมอร์

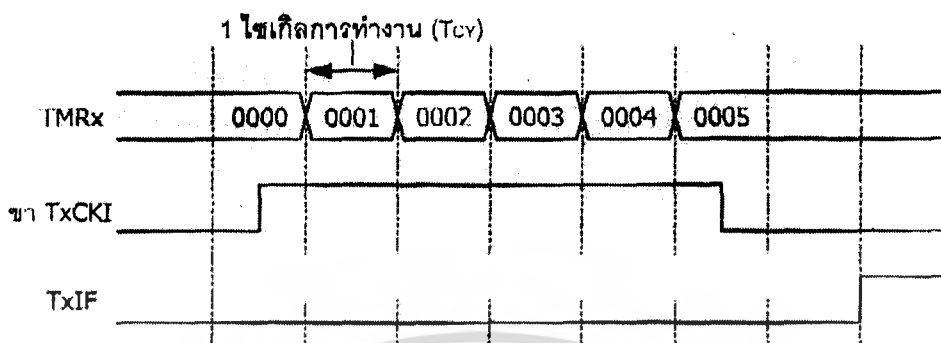
ในโหมดนี้ค่าของรีจิสเตอร์ไทเมอร์ TMRx จะเพิ่มค่าขึ้นเมื่อเกิดสัญญาณลอจิกสูงที่พอร์ตอินพุต TxCK นั่นหมายความว่า ไทเมอร์จะสามารถทำการนับค่าขึ้นได้เมื่อขา TxCK เป็นลอจิก "1" และไทเมอร์ยังคงนับค่าขึ้นอย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่ขา TxCK ยังเป็นลอจิก "1" เมื่อค่าของรีจิสเตอร์ไทเมอร์เท่ากับค่าของรีจิสเตอร์คาบเวลาหรือ P Rx ไทเมอร์ก็จะรีเซตแล้วเริ่มต้นการนับค่าใหม่ โดยไม่มีการอินเตอร์รัปต์เกิดขึ้น แต่ถ้าหากขา TxCK เปลี่ยนสถานะจากลอจิกสูงเป็นลอจิกต่ำ ไทเมอร์ก็จะหยุดทำงาน บิตเฟล็ก TxIF ก็จะเซต และเกิดการอินเตอร์รัปต์ขึ้น หากได้รับการเอ็นเอเบิลไว้ ในรูปที่ 2-51 เป็นไดอะแกรมเวลาแสดงการทำงานของไทเมอร์ในโหมดนี้

การกำหนดโหมดทำงานนี้ทำได้โดยการ

- (1) เซตบิต TGATE (บิต 6 ของรีจิสเตอร์ TxCON) เพื่อเอ็นเอเบิลการทำงานในโหมดนี้
- (2) เซตบิต TON (บิต 15 ของรีจิสเตอร์ TxCON) เพื่อเปิดการทำงานของไทเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (3) เคลียร์บิต TCS (บิต 1 ของรีจิสเตอร์ TxCON) เพื่อเลือกแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกา จากสัญญาณนาฬิกาในการทำงานหรือ  $T_{CY}$



รูปที่ 2-41 ไคอะแกรมเวลาแสดงการทำงานของไทมเมอร์ในโหมดเกตไทมเมอร์

การทำงานของโหมดนี้จะเริ่มต้นขึ้นเมื่อเกิดขอบขาขึ้นของสัญญาณเกต (ลอจิกสูง) ที่ขาพอร์ต TxCK ไทมเมอร์จะเริ่มทำการนับค่า เมื่อที่ขาพอร์ต TxCK เกิดขอบขาลงของสัญญาณเกต (ลอจิกต่ำ) ของไทมเมอร์ เนื่องจากไทมเมอร์ต้องเริ่มต้นด้วยค่าศูนย์เมื่อเริ่มทำงานทุกครั้ง แต่ถ้าหากการนับค่าของไทมเมอร์เพิ่มไปจนถึงค่าที่กำหนดไว้ในรีจิสเตอร์คาบเวลา PRx ไทมเมอร์ก็สามารถรีเซ็ตค่าได้เอง แล้วเริ่มต้นการนับค่าใหม่

ความละเอียดของการนับของไทมเมอร์จะขึ้นอยู่กับคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาของไทมเมอร์ซึ่งสามารถกำหนดได้จากอัตราปรีสเกลเลอร์ หากเลือกอัตราปรีสเกลเลอร์เป็น 1:1 คาบเวลาสัญญาณนาฬิกาของไทมเมอร์จะเท่ากับ 1 ไซเคิลการทำงาน ถ้าหากเลือกอัตราปรีสเกลเลอร์เป็น 1:2561 คาบเวลาสัญญาณนาฬิกาของไทมเมอร์จะเท่ากับ 256 เท่าของไซเคิลการทำงาน ความละเอียดของสัญญาณนาฬิกาของไทมเมอร์สามารถนำมากำหนดค่าความกว้างของสัญญาณเกตได้

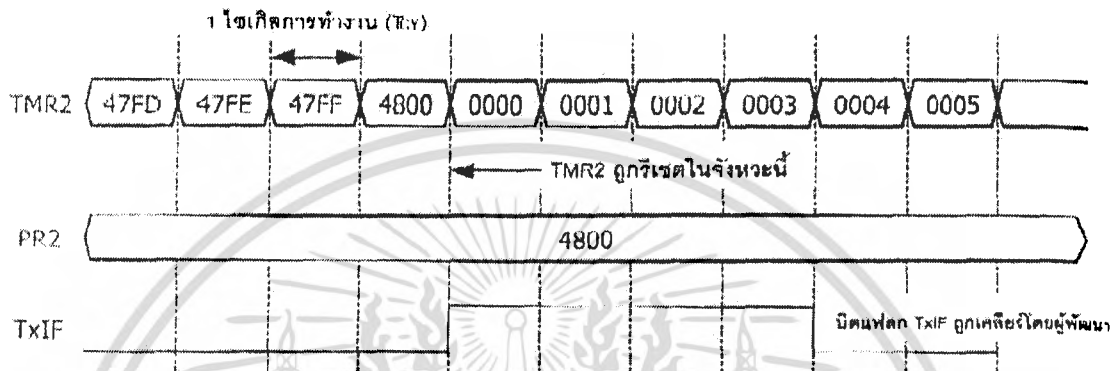
#### 2.5.2.3.4 เคาน์เตอร์แบบอะซิงโครนัสฐานเวลาแบบ A โดยใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก

ในโหมดนี้ใช้ไทมเมอร์ฐานเวลาแบบ A นั่นคือ ใช้ไทมเมอร์ 1 ทำงานเป็นเคาน์เตอร์แบบอะซิงโครนัส โดยสัญญาณนาฬิกาที่มาจากภายนอกจะส่งเข้ามาทางขา TxCK การเลือกโหมดนี้ทำได้โดยการเคลียร์บิต TSYNC (บิต 2 ของรีจิสเตอร์ TxCN) ในโหมดนี้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอกจะไม่สัมพันธ์หรือซิงโครไนซ์กับสัญญาณนาฬิกาหลักของระบบฐานเวลาของไทมเมอร์ในโหมดนี้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง แม้ว่าคอนโทรลเลอร์จะเข้าสู่โหมดสลีป และสามารถกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์เมื่อค่าของรีจิสเตอร์ TMRx เท่ากับ PRx ซึ่งจะเป็นการกระตุ้นให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เกิดการเวค-อัพออกจากโหมดสลีป

### 2.5.2.4 การอินเทอร์รัปต์ในไทมเมอร์

การอินเทอร์รัปต์เนื่องจากการทำงานของไทมเมอร์มีบิตที่เกี่ยวข้องโดยตรง 5 บิต คือ

- (1) TxIE บิตเอ็นเอเบิลการอินเทอร์รัปต์เนื่องจากการทำงานของไทมเมอร์
- (2) TxIP2 ถึง TxIP0 บิตเลือกระดับความสำคัญของการอินเทอร์รัปต์
- (3) TxIF บิตแฟล็กแสดงสถานการณ์เกิดอินเทอร์รัปต์



รูปที่ 2-43 ไตอะแกรมแสดงเวลาการเกิดอินเทอร์รัปต์เมื่อค่าของรีจิสเตอร์ TMRx เท่ากับรีจิสเตอร์คาบเวลา PRx โดยสังเกตได้จากการเซตบิตแฟล็ก TxIF

ในไทมเมอร์ 16 บิตสามารถกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์เมื่อ

- (1) ค่าของรีจิสเตอร์ TMRx เท่ากับรีจิสเตอร์คาบเวลา PRx
- (2) มีการเปลี่ยนลอจิกจากสูงไปต่ำหรือเกิดขอบขาลงของสัญญาณเกิดในโหมดเกตไทมเมอร์

บิต TxIF จะถูกเซต เมื่อเงื่อนไขดังต่อไปนี้เป็นจริง

- (1) ค่าของรีจิสเตอร์ TMRx เท่ากับรีจิสเตอร์คาบเวลา PRx และไทมเมอร์ต้องไม่ทำงานในโหมดเกตไทมเมอร์
- (2) มีการเปลี่ยนลอจิกจากสูงไปต่ำหรือเกิดขอบขาลงของสัญญาณเกิดในโหมดเกตไทมเมอร์

การเคลียร์บิต TxIF ต้องกระทำด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์เท่านั้น ในรูปที่ 2-51 เป็นไตอะแกรมเวลาแสดงการเกิดอินเทอร์รัปต์เมื่อค่าของรีจิสเตอร์ TMRx เท่ากับรีจิสเตอร์คาบเวลา PRx

### 2.5.2.5 การอ่านและเขียนข้อมูลกับรีจิสเตอร์ของไทเมอร์

การเขียนข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ที่ใช้งานในไทเมอร์สามารถเขียนได้ทั้งในแบบ 8 และ 16 บิต ในขณะที่การอ่านค่าจะอ่านได้ในแบบ 16 บิตเท่านั้น

ผู้พัฒนาสามารถเขียนข้อมูลไปยังรีจิสเตอร์เก็บค่าของไทเมอร์ TMRx และรีจิสเตอร์คาบเวลา PRx ในขณะที่ไทเมอร์ได้รับการเอนเอเบิลให้ทำงาน แต่มีข้อระวังที่ควรทราบในกรณี que เขียนข้อมูลแบบไปต์ไปยังรีจิสเตอร์ดังนี้

- (1) ถ้าไทเมอร์กำลังเพิ่มค่าขึ้น แล้วมีการเขียนข้อมูลไปยังไปต์ล่าง ข้อมูลในไปต์ล่างของรีจิสเตอร์จะไม่ได้รับผลกระทบ เช่น ถ้าหากมีการเขียนข้อมูล 0xFF ไปยังไปต์ล่างของรีจิสเตอร์ เก็บค่าไทเมอร์ ในการนับค่าครั้งต่อไป ค่าของไทเมอร์ที่ไปต์ล่างจะเปลี่ยนเป็น 0x00 และเกิดการทดค่าไปยังไปต์สูงของรีจิสเตอร์ไทเมอร์ต่อไป
- (2) ถ้าไทเมอร์กำลังเพิ่มค่าขึ้น แล้วมีการเขียนข้อมูลไปยังไปต์บน ข้อมูลในไปต์ล่างของรีจิสเตอร์จะไม่ได้รับผลกระทบ เช่น ถ้าข้อมูลไปต์ล่างเป็น 0xFF ในขณะที่เกิดการเขียนข้อมูลไปยังไปต์บน ในการนับค่าครั้งต่อไป ค่าของไทเมอร์ที่ไปต์ล่างจะเปลี่ยนเป็น 0x00 และเกิดการทดค่าไปยังไปต์สูงของรีจิสเตอร์ไทเมอร์ ทำให้เกิดการเพิ่มค่าข้อมูลไปต์บนจากค่าที่เขียนไปก่อนหน้านี้

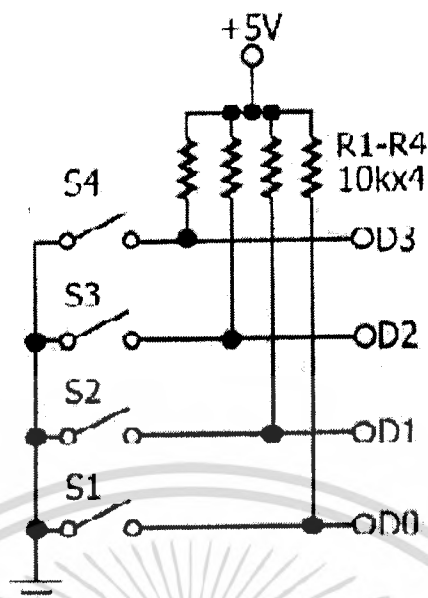
### 2.5.2.6 อินพุตสัญญาณนาฬิกาความถี่ 32 kHz จากคริสตอลออสซิลเลเตอร์กำลังงานต่ำ

ไทเมอร์จะสามารถทำงานร่วมกับอินพุตนี้เมื่อกำหนดให้ทำงานด้วยฐานเวลาแบบ A และเลือกใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาของไทเมอร์จากภายนอก ส่วนโหมดของสัญญาณนาฬิกา นั้นต้องเลือกเป็น โหมด LP หรือคริสตอลกำลังงานต่ำด้วยการเซตบิต LPOSCEN ในรีจิสเตอร์ OSCCON และต้องต่อคริสตอลความถี่ 32 kHz เข้าที่ขา SOSC1 และ SOSC2

## 2.5.3 การเชื่อมต่อกับคีย์แพดหรือสวิตช์เมตริก 4 x 4

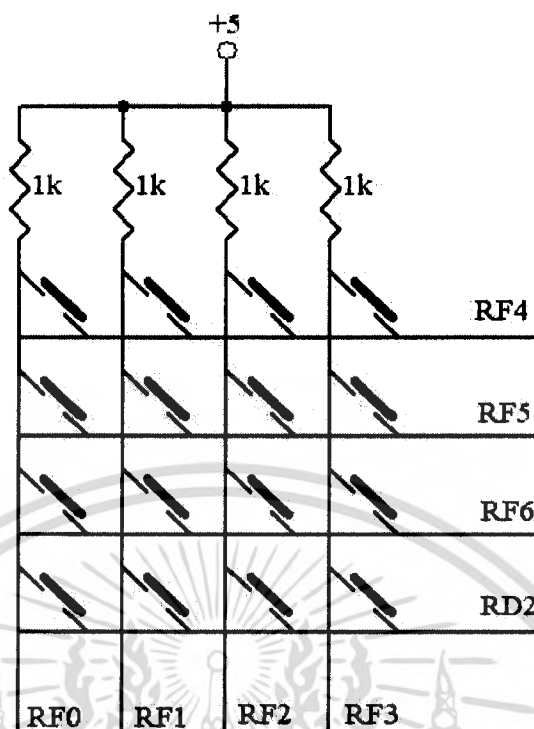
การอ่านค่าหรือรับค่าการกดสวิตช์เป็นงานอีกอย่างหนึ่งที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ต้องสามารถรองรับและเชื่อมต่อใช้งานร่วมด้วยได้ วงจรของสวิตช์มีด้วยกัน 2 ลักษณะใหญ่คือ ต่อเข้ากับไฟเลี้ยงหรือกราวนด์ได้โดยตรงเมื่อสวิตช์ตัวใดต่อวงจรสามารถอ่านค่าได้โดยตรง วงจรในลักษณะนี้ไม่มีความซับซ้อน สามารถอ่านค่าของสวิตช์ได้ง่ายและรวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือ ถ้าหากจำนวนของสวิตช์มีมากๆ จำนวนสายของข้อมูลก็จะมีมากตาม ทำให้ระบบหรือวงจรโดยรวมมีขนาดใหญ่และสิ้นเปลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-44 วงจรของสวิตช์แบบต่อเข้ากับไฟเลี้ยงและกราวด์

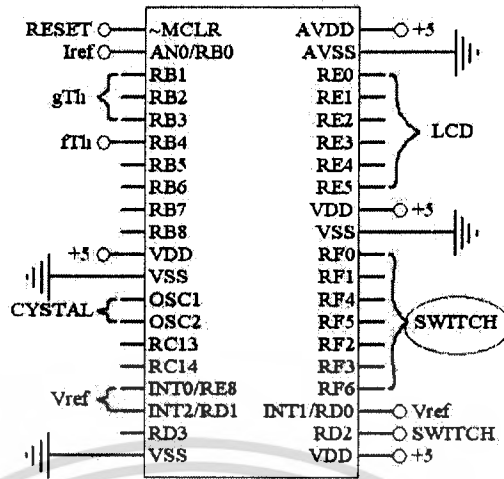
วงจรสวิตช์อีกลักษณะหนึ่งคือ การต่อวงจรแบบเมตริกซ์ (switch matrix) ดังรูปที่ 2-53 สวิตช์จะถูกต่อกันในแนวแกนตั้งและแนวนอน จะเรียกแนวตั้งว่า หลักหรือคอลัมน์ (Column) ในขณะที่แนวนอนจะเรียกว่า แถวหรือโรว์ (row) ดังนั้นค่าของสวิตช์จะต้องประกอบด้วยแนวแถวและหลัก กระบวนการที่จะทำให้ได้มาซึ่งสวิตช์มีขั้นตอนซับซ้อนพอสมควร แต่วงจรของสวิตช์แบบนี้มีข้อดีคือสามารถรองรับการเพิ่มของสวิตช์ได้สะดวก เพียงเพิ่มเติมจำนวนสวิตช์และแก้ไขซอฟต์แวร์อีกเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้วงจรสวิตช์แบบเมตริกซ์เป็นที่นิยมใช้มากในระบบควบคุมอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติที่มีจำนวนสวิตช์มากกว่า 8 ตัว ในการใช้งานทั่วไปจะเรียกสวิตช์แบบเมตริกซ์นี้ว่า คีย์แพด



รูปที่ 2-45 วงจรสวิตช์แบบเมตริกซ์หรือคีย์แพด

### 2.5.3.1 การเชื่อมต่อคีย์แพดเข้ากับ dsPIC30F4011

ในส่วนคีย์แพด จากรูปที่ 2-54 จะทำการเซตคอลลัมน์ RF0, RF1, RF2, RF3 เป็น Output ทั้งหมด โดยการเซต TRIS = 0 ทุกตัว แถว RF4, RF5, RF6, RF7 เป็น Input ทั้งหมด โดยการเซต TRIS เป็น 1 ทั้งหมด (ถ้าเป็น 1หมดทั้งแถวและหลักวงจรจะ short circuit) ในการกดสวิตช์ในตอนเริ่มต้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเช็คคอลลัมน์ทุกคอลลัมน์ว่ามีการกดสวิตช์หรือไม่ ถ้ามีการกดสวิตช์จะส่งลอจิก 0 ออกมา จากนั้นจะมาทำการเช็คแถวแต่ละแถวว่ามีการกดสวิตช์หรือไม่ ถ้ามีการกดสัญญาณที่ออกมาเป็นลอจิก 0 เช่นกัน เช่นเมื่อกอนโทรลเลอร์สามารถเช็คสัญญาณลอจิกได้คอลลัมน์ RF0 เป็น 0 แถว RF1, RF2, RF3 มีค่าเป็น 1 จากนั้นจึงเช็คแถว RF4, RF5, RF6, RF7 ซึ่งในที่นี้ RF4 มีค่าลอจิกเป็น 0 ส่วน RF5, RF6, RF7 มีค่าลอจิกเป็น 1 ทำให้เราสามารถเช็คได้ว่ามีการกดสวิตช์หมายเลข 1 ที่คีย์แพด แต่ถ้า RF6 มีค่าลอจิกเป็น 0 ส่วน RF4, RF5, RF7 มีค่าลอจิกเป็น 1 แสดงว่ามีการกดสวิตช์หมายเลข 3 ที่คีย์แพด



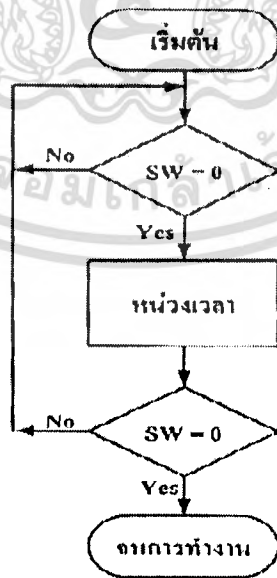
รูปที่ 2-46 แสดงพอร์ทที่เชื่อมต่อกับคีย์แพด

2.5.3.2 การแก้ปัญหาสัญญาณ Bounce

มีวิธีการอยู่ 2 วิธี

1. ใช้วงจรรายนอกช่วย (Hardware)
2. ใช้โปรแกรมแก้ (Software)

ซึ่งในการทดลองจะทำการเขียนซอฟต์แวร์ ซึ่งจะทำการอ่านค่าจากสวิตช์แล้วตรวจสอบดูว่ามีการกดสวิตช์หรือไม่ หากมีการกดจะมีการหน่วงเวลา แล้วกลับไปอ่านค่าสวิตช์ใหม่อีกครั้ง เพื่อดูว่าสวิตช์ยังมีการกดอยู่อีกหรือไม่ หากยังกดอยู่จะนำค่าไปใช้ แต่ถ้าไม่กดก็จะกลับไปเริ่มใหม่



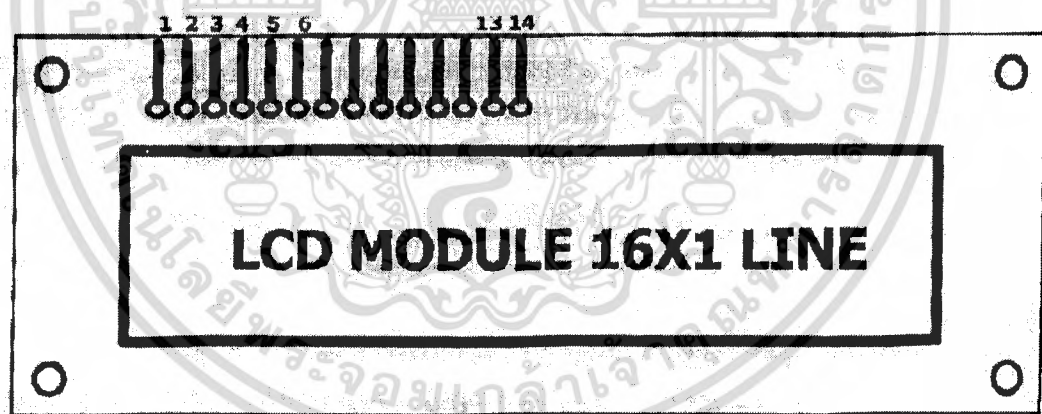
รูปที่ 2-47 โฟร์ชาจการแก้ปัญหาสัญญาณ Bounce ด้วย Software

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.4 การขับโมดูลแบบผลึกเหลว (LCD Module)

2.5.4.1. โครงสร้าง LCD Module ใน LCD Module จะมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน

1. ตัวแสดงผล (Display) ภายในผลึกเหลวที่สามารถแสดงผลให้เห็นโดยอาศัยแสงจากภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีมุมมองข้อมูลที่แสดงผลบนจอ
2. ตัวควบคุม (Controller) เป็นตัวรับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกมาควบคุมการทำงานของ LCD Module เช่น ลบจอภาพ แสดงเป็นตัวอักษร หรือเลื่อนเคอร์เซอร์ เป็นต้น ตัวควบคุมนี้ใช้ชิปควบคุมโดยเฉพาะ ชิปที่นิยมใช้คือ เบอร์ HD44780 และ HD61830 โดย HD44780 จะใช้ควบคุม LCD แบบอักขระ ส่วน HD61830 ใช้ควบคุม LCD แบบกราฟิก
3. ตัวขับ (Driver) เป็นตัวรับสัญญาณจากตัวควบคุมเข้ามาตัวขับให้ตัวแสดงผลแสดงข้อมูลตามที่กำหนด ชิปที่ใช้ทำหน้าที่นี้ได้แก่เบอร์ HD44100H และ MSM5259 เป็นต้น LCD Module มีอยู่หลายรุ่น และคุณสมบัติแตกต่างกันไป ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบ DOT Matrix และ Graphic โดยแบบ DOT Matrix จะแสดงผลเป็น 5x8 DOT หรือ 5x10 DOT มีตั้งแต่ 1 Line, 2 Line และ 4 Line ซึ่งการใช้งานแต่ละแบบใกล้เคียงกัน ลักษณะขาสัญญาณของ LCD Module แบบ 1 Line ดังรูปที่ 2-56



รูปที่ 2-48 แสดงลักษณะตัว LCD Module

ตัว LCD Module จะมีขาใช้งานทั้งหมด 14 ขาด้วยกัน หน้าที่แต่ละขามีดังนี้คือ

ขา 1 (Gnd)	เป็น Ground ใช้ต่อกับระบบ Ground ของไมโครคอนโทรเลอร์
ขา 2 (VCC)	เป็นไฟเลี้ยงวงจร LCD มีขนาด +5 VDC
ขา 3 (Vee)	เป็นขาปรับความเข้มของจอ LCD โดยที่เมื่อต่อกับ VCC จะมีความเข้มต่ำสุด และเมื่อต่อกับ Ground จะมีความเข้มมากที่สุด โดยปกติจะต่ออยู่กับ Ground เสมอ เพื่อความสะดวก
ขา 4 (RS)	Register Select ใช้สำหรับบอก LCD ทราบว่าข้อมูลที่ส่งให้มันเป็น Instruction หรือ Data โดยเมื่อกำหนดเป็น "0" หมายถึง Instruction เป็น "1" หมายถึง Data
ขา 5 ( $R/\bar{W}$ )	ใช้สำหรับกำหนดว่าเป็นการอ่านหรือเขียนข้อมูลให้กับ LCD โดยเมื่อกำหนดเป็น "0" หมายถึง เป็นการเขียนข้อมูล เป็น "1" หมายถึง เป็นการอ่านข้อมูล
ขา 6 (E)	เป็นขา Enable ขานี้ เป็น "1" ใช้สำหรับบอก LCD ว่าอุปกรณ์ภายนอก ต้องการติดต่อกับ เป็น "0" ตัว LCD จะไม่สนใจสัญญาณ RS $R/\bar{W}$ และ $DB_7 - DB_0$
ขา 7-14 ( $DB_7 - DB_0$ )	เป็นขา Data Bus สำหรับอ่านหรือเขียนข้อมูลให้กับตัว LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.4.2. ชุดคำสั่งของ LCD Module

ตารางที่ 2-4 แสดงชุดคำสั่งและเวลาที่ LCD Module ใช้ในการทำงานแต่ละคำสั่ง

INSTRUCTION	RS	$R/\overline{W}$	Data Bit								Execute Time(ns)	
			7	6	5	4	3	2	1	0		
CLEAR DISPLAY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1640
CURSOR AT HOME	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	*	1640
ENTRY MODULE SET	0	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S	40
DISPLAY ON/OFF	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B		40
DISPLAY SHIFT	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	*	*		40
FUNCTION SET	0	0	0	0	1	DL	N	F	*	*		40
Set CGRAM ADDR	0	0	0	1	CGRAM ADDRESS						40	
Set DDRAM ADDR	0	0	1	DDRAM ADDRESS						40		
BUSY , ADDR , READ	0	1	BF	ADDRESS						0		
CGRAM, DDRAM WR	1	0	WRITE DATA						40			
CGRAM, DDRAM RD	1	1	READ DATA						40			

#### 2.5.4.2.1 คำสั่งเคลียร์ตัวแสดงผล (CLEAR DISPLAY)

RS	$R/\overline{W}$	DB 7	DB 6	DB 5	DB 4	DB 3	DB 2	DB 1	DB 0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

คำสั่ง CLEAR DISPLAY เป็นคำสั่งใช้เขียนข้อมูลหรือตัวอักษรว่าง (SPACE) ลง DDRAM ทั้งหมด และทำการกำหนดค่า DDRAM ADDRESS เป็น 0 และเคอร์เซอร์จะกลับไปอยู่ตำแหน่งบนซ้ายสุดของจอแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.4.2.2 คำสั่ง CURSUR AT HOME

RS	$R/\overline{W}$	DB 7	DB 6	DB 5	DB 4	DB 3	DB 2	DB 1	DB 0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	*

คำสั่ง CURSUR AT HOME หรือ RETURN HOME เป็นคำสั่งที่ใช้ในการเลื่อนตำแหน่งของเคอร์เซอร์ไปอยู่ที่ตำแหน่งซ้ายสุดของจอแสดงผล โดยข้อมูลที่อยู่ใน DDRAM หรือที่หน้าจอแสดงจะไม่เปลี่ยนแปลง

## 2.5.4.2.3 คำสั่งโหมดในการป้อนข้อมูล (ENTRY MODE SET)

RS	$R/\overline{W}$	DB 7	DB 6	DB 5	DB 4	DB 3	DB 2	DB 1	DB 0
0	0	0	0	0	0	0	0	I/D	S

คำสั่งโหมดในการป้อนข้อมูล (ENTRY MODE SET) ใช้สำหรับกำหนดการเลื่อนของเคอร์เซอร์และตำแหน่ง ADDRESS ของ DDRAM ดังนี้

- I/D เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดการเลื่อนเคอร์เซอร์และตำแหน่งแอดเดรสของ DDRAM ว่าจะให้เพิ่มหรือลดเมื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลแล้ว

บิต I/D = 0 แอดเดรสของ DDRAM จะลดลง

บิต I/D = 1 แอดเดรสของ DDRAM จะเพิ่มขึ้นส่วนเคอร์เซอร์จะเลื่อนตามตำแหน่งแอดเดรสของ DDRAM

- S เป็นบิตที่ใช้กำหนดลักษณะของการแสดงผลเมื่อมีการเขียนข้อมูลแล้ว

บิต S = 1 เมื่อเขียนข้อมูลใหม่ลงไปแล้วตัวเคอร์เซอร์จะอยู่กับที่แต่ตัวอักษรข้อมูลเดิมจะถูกผลักไปทางซ้าย

บิต S = 0 เมื่อเขียนข้อมูลใหม่ลงไปแล้วตัวเคอร์เซอร์จะเลื่อนไปทางขวามือ

## 2.5.4.2.4 คำสั่งควบคุมการแสดงผล (DISPLAY OFF)

RS	$R/\overline{W}$	DB 7	DB 6	DB 5	DB 4	DB 3	DB 2	DB 1	DB 0
0	0	0	0	0	0	1	D	C	B

คำสั่งควบคุมการแสดงผลเป็นคำสั่งที่ใช้ในการเปิดปิดจอแสดงผลและเคอร์เซอร์มีลักษณะดังนี้

D = 0 กำหนดให้ปิดจอแสดงผล (DISPLAY OFF)

D = 1 กำหนดให้เปิดจอแสดงผล (DISPLAY ON)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C = 0 กำหนดให้ปิดเคอร์เซอร์ (CURSOR OFF)

C = 1 กำหนดให้เปิดเคอร์เซอร์ (CURSOR ON)

B = 0 กำหนดไม่ให้มีการกระพริบที่เคอร์เซอร์

B = 1 กำหนดให้มีการกระพริบที่เคอร์เซอร์ (กระพริบเป็นรูปสี่เหลี่ยมทึบ)

#### 2.5.4.2.5 คำสั่งควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และตัวอักษร (DISPLAY SHIFT)

RS	$R/\overline{W}$	DB 7	DB 6	DB 5	DB 4	DB 3	DB 2	DB 1	DB 0
0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	*	*

คำสั่งควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และตัวอักษร เป็นการควบคุมการเลื่อนของเคอร์เซอร์และตัวอักษรบนตัวแสดงผล โดยขึ้นอยู่กับกำหนัดบิต S/C และ R/L โดยมีลักษณะดังนี้

S/C	R/L	ลักษณะของการเลื่อน
0	0	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางซ้าย
0	1	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางขวา
1	0	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางซ้าย
1	1	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางขวา

#### 2.5.4.2.6 คำสั่งการกำหนดฟังก์ชันการทำงาน (FUNCTION SET)

RS	$R/\overline{W}$	DB 7	DB 6	DB 5	DB 4	DB 3	DB 2	DB 1	DB 0
0	0	0	0	1	DL	N	F	*	*

DL = 0 กำหนดให้ติดต่อกับ LCD Module เป็นแบบ 4 บิต

DL = 1 กำหนดให้ติดต่อกับ LCD Module เป็นแบบ 8 บิต

N = 0 กำหนดการแสดงผล 1 บรรทัด

N = 1 กำหนดการแสดงผล 2 บรรทัดขึ้นไป

F = 0 กำหนดความละเอียดของการแสดงผลเป็น 5x8 DOT

F = 1 กำหนดความละเอียดของการแสดงผลเป็น 5x10 DOT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ

1. LCD Module แบบ 16 ตัวอักษร 1 บรรทัดแม้จะมีการแสดงผลเพียงหนึ่งบรรทัด แต่จะต้องกำหนด  $N = 1$  เนื่องจากแอดเดรสของ DDRAM จะแบ่งออกเป็นออกเป็น 2 ช่วงคือ 8 ตัวอักษรแรกเริ่มที่ 00H และอีก 8 ตัวอักษรถัดไปจะเริ่มที่ 40H
2. การกำหนดบิต F สำหรับ LCD Module แบบ 5x7 DOT
3. เนื่องจากการกำหนดค่า DL สามารถกระทำได้ที่บิต (DB4 – DB7) ถ้ามีการกำหนดให้เป็นแบบ 4 บิตตั้งแต่ครั้งแรก หลังจากจ่ายไฟเลี้ยงให้กับตัว LCD Module แล้วก็จะทำให้เป็นการติดต่อกับ LCD Module เป็นแบบ 4 บิตทันที

#### 2.5.4.2.7 คำสั่งเลือกแอดเดรสของ CGRAM (SET CGRAM ADDRESS)

RS	$R/\bar{W}$	DB 7	DB 6	DB 5	DB 4	DB 3	DB 2	DB 1	DB 0
0	0	0	1	CGRAM ADDRESS					

คำสั่งนี้ใช้สำหรับกำหนดตำแหน่ง ADDRESS ของ CHARACTER GENERATOR หรือ CGRAM โดยจะต้องกำหนดค่านี้ทุกครั้งที่ในการเขียนหรืออ่านข้อมูลกับ CGRAM ซึ่งกำหนดที่ (DB0 – DB5) ส่วน DB6 ต้องเป็น “1” และ DB7 ต้องเป็น “0” (01XX XXXX B) ซึ่งก็คือ (40H-7FH)

#### 2.5.4.2.8 คำสั่งเลือกแอดเดรสของ DDRAM (SET DDRAM ADDRESS)

RS	$R/\bar{W}$	DB 7	DB 6	DB 5	DB 4	DB 3	DB 2	DB 1	DB 0
0	0	1	DDRAM ADDRESS						

แอดเดรสของ LCD 16 อักษร 4 บรรทัด

บรรทัดที่ 1	1000 XXXXB = (80 – 8F)H
บรรทัดที่ 2	1001 XXXXB = (90 – 9F)H
บรรทัดที่ 3	1010 XXXXB = (C0 – CF)H
บรรทัดที่ 4	1100 XXXXB = (D0 – DF)H

คำสั่งนี้ใช้สำหรับกำหนดตำแหน่ง Address ของ Display Data Ram หรือ DDRAM หรือตำแหน่งของเคอร์เซอร์สำหรับการแสดงผลหน้าจอ LCD ซึ่งเมื่อมีการอ่านหรือเขียนค่าตัวอักษรให้กับ LCD ในแต่ละครั้งนั้น ค่าตำแหน่งของ DDRAM Address จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 ตำแหน่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอัตโนมัติเสมอ ซึ่งจะเพิ่มหรือลดนั้นกำหนดได้จากบิต I/D ใน ENTRY MODE SET แต่เราก็สามารถที่จะกำหนดตำแหน่งแอดเดรสของ DDRAM ณ ตำแหน่งใดๆก็ได้ บนจอ LCD ที่เราต้องการให้แสดงผล ณ จุดนั้นๆ ได้เองโดยกำหนดแอดเดรสก่อนที่จะทำการอ่านหรือเขียนตัวอักษรให้กับ DDRAM เสมอ สำหรับแอดเดรสของ DDRAM ของ LCD แต่ละแบบนั้น แสดงดังตารางข้างล่างซึ่งการกำหนดจะกำหนดให้บิต DB7 เท่ากับ "1" เสมอ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

### 1. แบบ 16 ตัวอักษร 1 บรรทัด

80	81	82	83	84	85	86	87	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

### 2. แบบ 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด

80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	8A	8B	8C	8D	8E	8F
C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	CA	CB	CC	CD	CE	CF

### 3. แบบ 16 ตัวอักษร 4 บรรทัด

80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	8A	8B	8C	8D	8E	8F
C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	CA	CB	CC	CD	CE	CF
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	9A	9B	9C	9D	9E	9F
D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	DA	DB	DC	DD	DE	DF

### 3. แบบ 20 ตัวอักษร 2 บรรทัด

80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	8A	8B	8C	8D	8E	8F	90	91	92	93
C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	CA	CB	CC	CD	CE	CF	D0	D1	D2	D3

#### 2.5.4.2.9 คำสั่งอ่านแฟล็กBUSYและADDRESS (READ BUSY FLAG AND ADDRESS)

RS	$R/\bar{W}$	DB 7	DB 6	DB 5	DB 4	DB 3	DB 2	DB 1	DB 0
0	0	BF	CGRAM/DDRAM ADDRESS						

คำสั่งนี้ใช้กับการอ่านค่าของ BUSY FLAG (BF) ซึ่งบอกถึงความพร้อมของ LCD ในการรับข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า BF = 0 หมายถึง LCD พร้อมที่จะรับข้อมูลต่อไป

ถ้า BF = 1 หมายถึง ว่ายังไม่พร้อมที่จะรับข้อมูล

นอกจากนี้แล้วทุกครั้งที่อ่านค่าเฟล็ก BF เข้ามาแล้วก็จะได้ตำแหน่งของ CGRAM หรือ  
DDRAM ADDRESS ณ ในตำแหน่ง



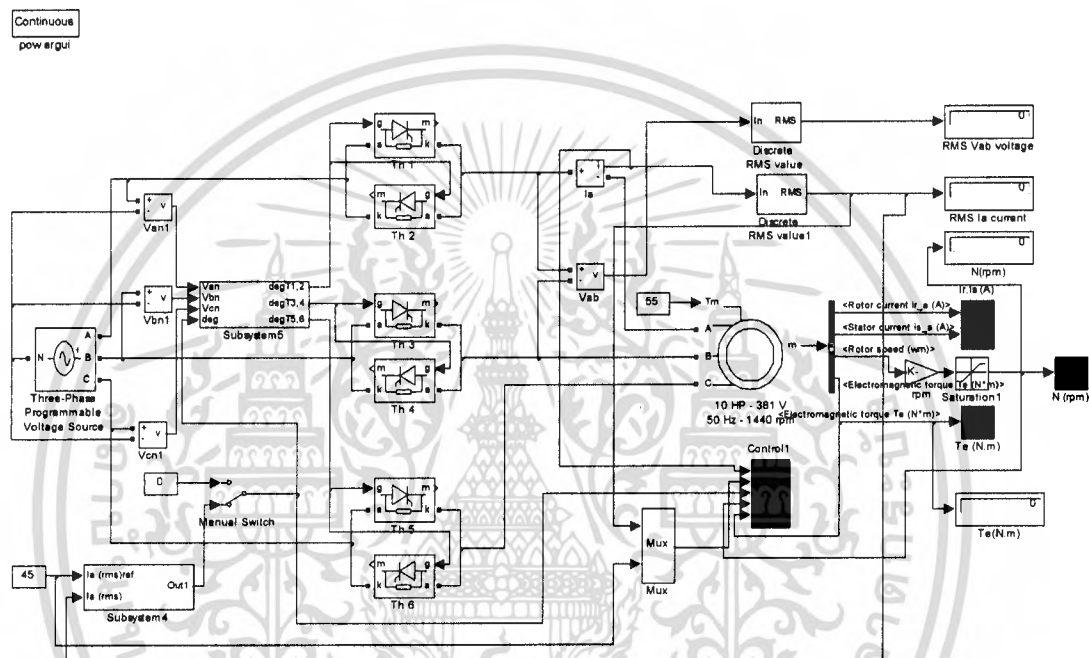
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### แบบจำลองการทำงานของวงจร

#### อธิบายการทำงานของวงจรโดยใช้ Simulink

##### 3.1 หลักการทำงานวงจรหลัก



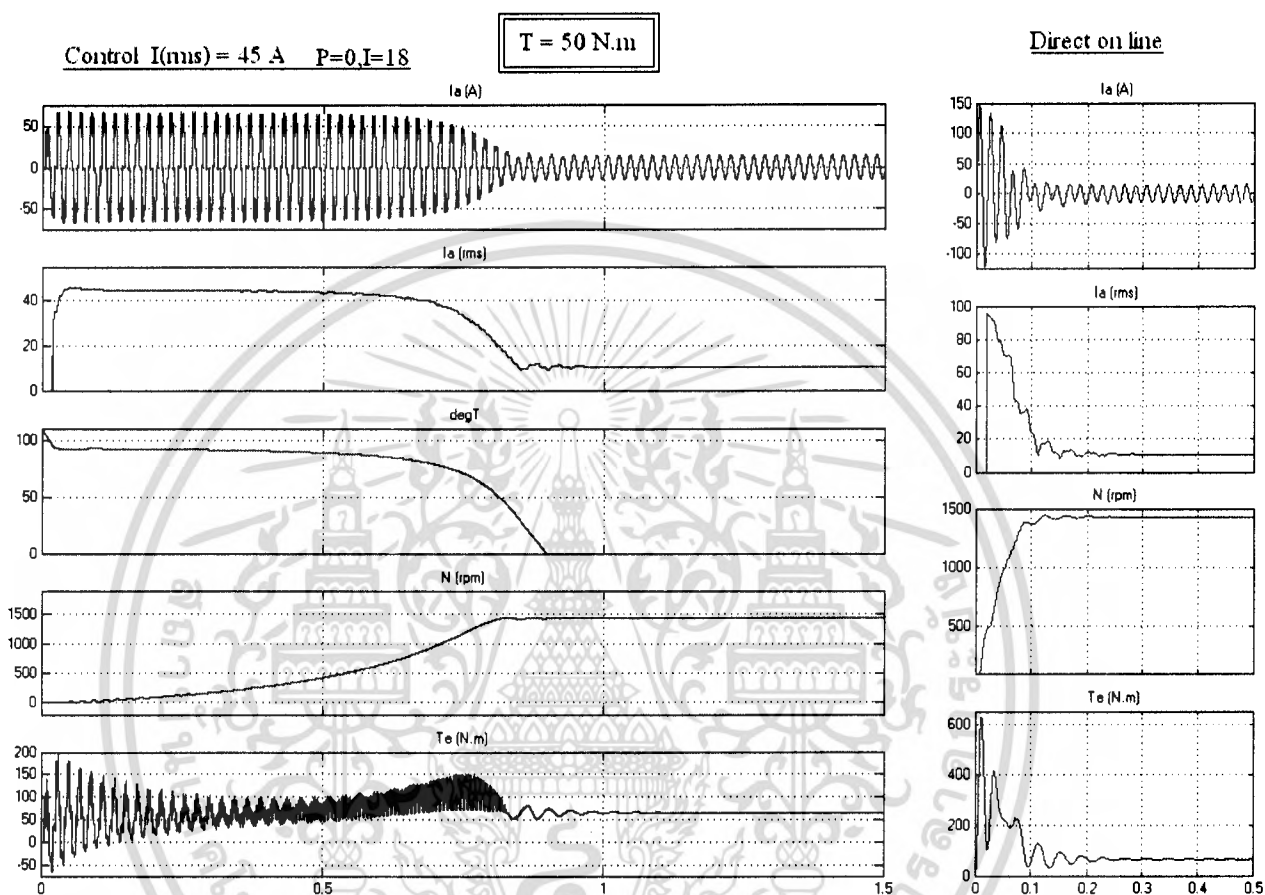
รูปที่ 3-1 วงจรการทำงานวงจรหลัก

ทำการป้อนแรงดัน 3 เฟส เข้าเอสซีอาร์ 2 ตัวที่ต่อกลับชั่วคราว และทำการป้อนสัญญาณพัลส์ (Subsystem 5) เข้าเอสซีอาร์ โดยมุมจุดชนวนที่ได้จะอยู่ในช่วง  $0^\circ < \alpha < 120^\circ$  (ที่  $\alpha > 120^\circ$  แรงดันที่ได้จะมีน้อยทำให้ไม่สามารถควบคุมให้มอเตอร์เริ่มหมุนได้) โดยการทำงานของเอสซีอาร์จะควบคุมให้มีเอสซีอาร์สองตัวนำกระแสในแต่ละช่วง ดังที่ได้กล่าวในขั้นตอนการนำกระแส ซึ่งจะนำแรงดันที่ได้จากทั้ง 3 เฟสมาทำการควบคุมการสตาร์ทมอเตอร์ จากนั้นทำการนำกระแส rms ของเฟส A มาทำการ Feedback โดยผ่านวงจร Subsystem 4 โดยสัญญาณที่ได้จะนำมาทำการควบคุมสัญญาณพัลส์ให้มีการปรับมุมจุดชนวน

เมื่อเริ่มสตาร์ทกระแสสตาร์ทจะสูงมากจึงเลือกใช้มุมจุดชนวนสูง (จากการ Simulate พบว่าที่  $120^\circ$  เป็นมุมจุดชนวนที่เหมาะสมที่สุด) เมื่อเวลาผ่านไปกระแสจะค่อยๆ ลดลง สัญญาณ Feedback

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

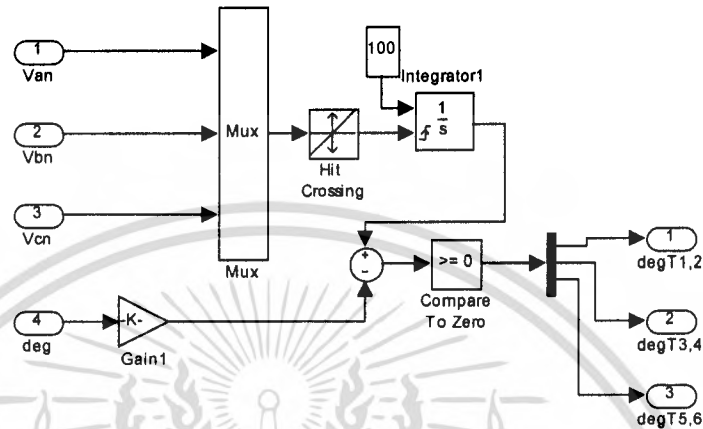
จะทำการปรับมุมจุดชนวนให้ลดลงดังกราฟ จนกระทั่งในช่วง Stead-State มุมจุดชนวนจะถูกปรับจนเป็นศูนย์ ทำให้เราสามารถทำการควบคุมกระแสในช่วงสตาร์ทได้ตามต้องการ



รูปที่ 3-2 รูปกราฟของกระแส ทอร์ก และความเร็วรอบ เมื่อใช้ Soft Start เมื่อทอร์กโหลดเป็น (ขวา)และกราฟของกระแส ทอร์ก และความเร็วรอบ เมื่อต่อ Direc Online เมื่อทอร์กโหลดเป็น 50 N (ซ้าย)

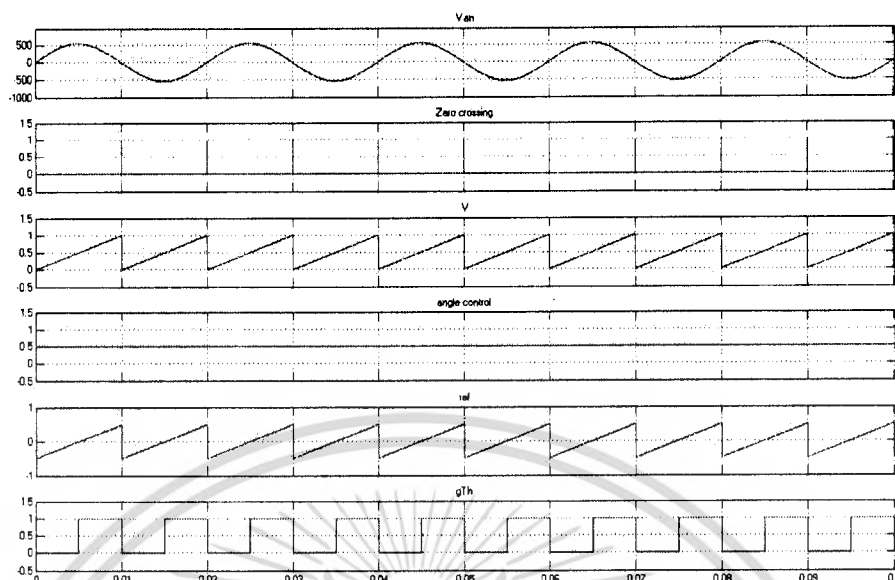
จากกราฟทั้งสอง จะพบว่าเมื่อทำการใช้ซอร์ฟสตาร์ท ค่ากระแสสูงสุดในช่วงสตาร์ทจะลดลงจาก 100 I rms เหลือประมาณ 50 I rms และคงที่ แม้การใช้ซอร์ฟสตาร์ทจะมีปัญหาเรื่อง ทอร์กในตอนเริ่มสตาร์ทที่มีค่าต่ำ แต่ในการซิมูเลชันจะพบว่าทอร์กมีค่ามากพอที่จะขับโหลด ตั้งแต่เริ่มต้น ซึ่งจะลดผลค่าความสูญเสียในช่วงสตาร์ท

### 3.2 หลักการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์



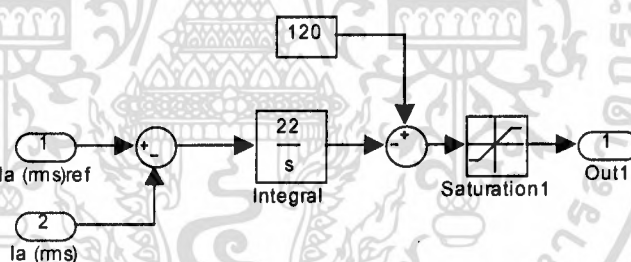
รูปที่ 3-3 การทำงานของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ (Subsystem 5)

นำสัญญาณไซน์ของแต่ละเฟส มาทำการ MUX จากนั้นจึงผ่าน Hit Crossing ซึ่งจะทำได้กราฟสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 2 เท่าความถี่ไฟบ้าน (100 Hz) และเทียบกับสัญญาณ 100 เพื่อให้กราฟที่มีค่าตั้งแต่ 0- 1 จากนั้นมาผ่านตัวอินทิเกรตเพื่อเป็นตัวปรับสัญญาณ นำสัญญาณมุมจุดชนวนที่ได้มาผ่านเกณฑ์ขยายเพื่อกลับสัญญาณและให้สัญญาณมีค่าคงที่ ซึ่งค่ามุมจุดชนวนที่ได้นี้จะทำการหาร 180 เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีค่า 0 - 1 เพื่อเป็นตัว Reference นำสัญญาณที่ผ่านที่ได้มาเปรียบเทียบกับแล้วผ่าน Compare to Zero ซึ่งถ้าสัญญาณที่ได้มีค่ามากกว่า 0 จะให้เป็น 1 ถ้าต่ำกว่าหรือเท่ากับ 0 จะให้เป็น 0 ซึ่งจะทำให้เราได้สัญญาณพัลส์ซึ่งจะนำมาใช้ในการจุดชนวน SCR



รูปที่ 3-4 แสดงสัญญาณการทริกที่การจุดชนวนที่มุม 90 องศา

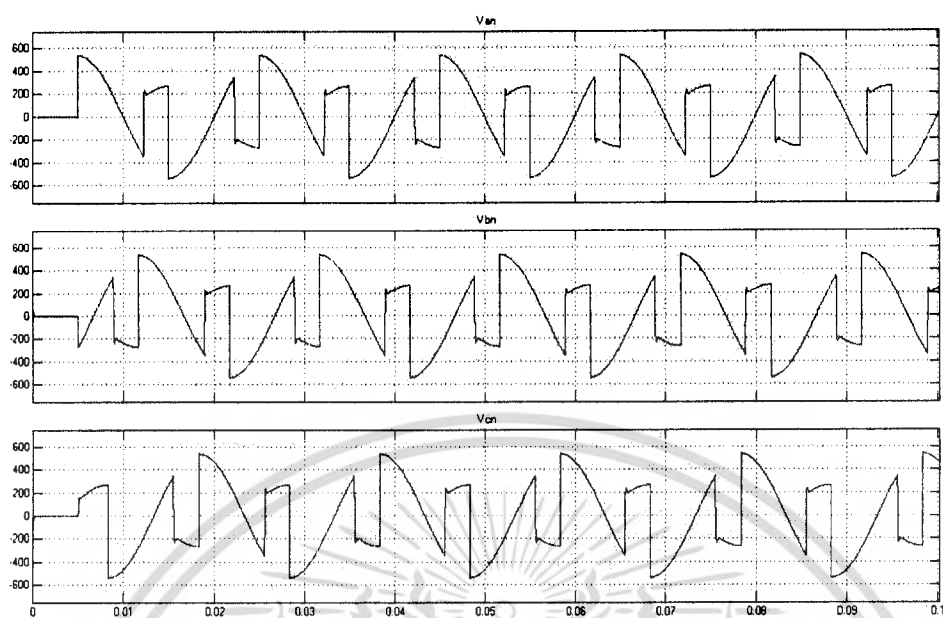
### 3.3 หลักการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณ Feedback



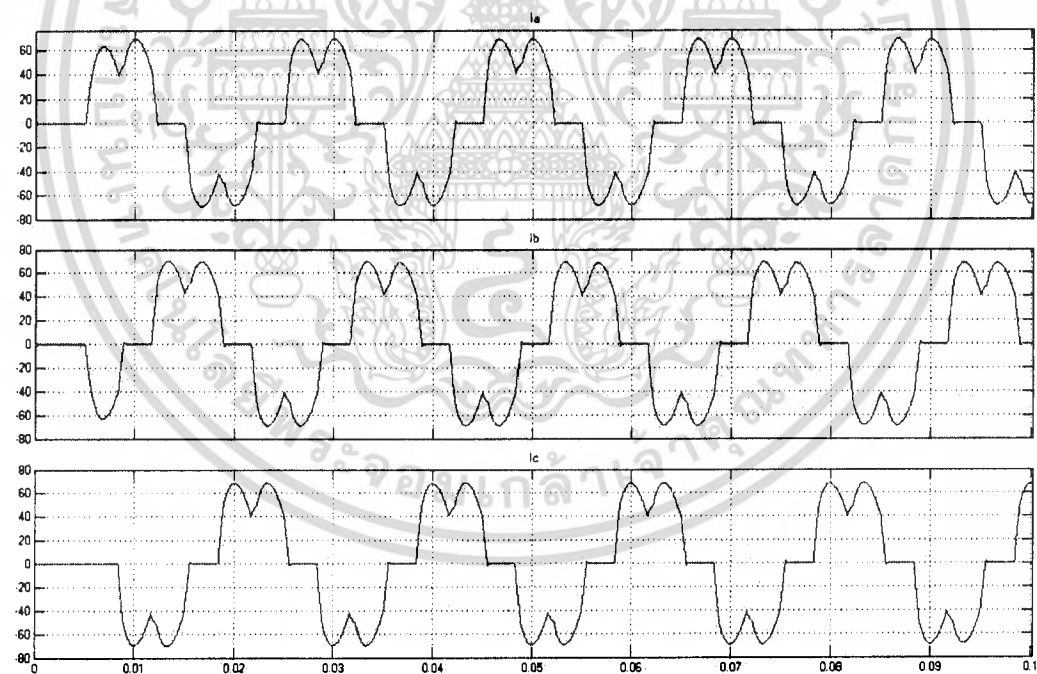
รูปที่ 3-5 หลักการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณ Feedback(Subsystem 4)

นำสัญญาณกระแส rms ที่ได้จากเฟส A มาทำการเทียบกับกระแส rms Reference (ขนาดกระแสที่ต้องการควบคุม) จากนั้นนำสัญญาณ Error ที่ได้มาทำการอินทิเกรตโดยส่วนอินทิเกรต จะคูณด้วย 22 ซึ่งจากการ Simulation ถ้าค่าที่ได้มีค่ามากกว่า 22 จะทำให้กราฟมี Rise Time มีค่าสูงมาก และกราฟเกิดการแกว่ง แต่ถ้าค่าที่ได้น้อยกว่า 22 ความชันกราฟจะขึ้นไม่ถึงค่าสูงสุด ซึ่งค่าที่ผ่าน  $22 / S$  จะเพิ่มจาก 0 – 120 แต่เราต้องการลดค่าจาก 120 – 0 จึงนำมาบวกค่า 120 จากนั้นนำมาผ่าน Saturation เพื่อที่จะให้ค่าสูงสุดที่ได้เป็น 120 และค่าต่ำสุดที่ได้เป็น 0 ซึ่งกลายเป็นมุมในการจุดชนวนนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-6 รูปกราฟแสดงการจุดชนวนที่มุม 90 องศา



รูปที่ 3-6 (ต่อ) รูปกราฟแสดงการจุดชนวนที่มุม 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### วิธีการทดลองและผลการทดลอง

การทดลองตอนที่ 1 : การนำวงจร soft starter ขั้วโหลด R , L (โหลดไฟ , บัลลาสต์)

วิธีการทดลอง

1. นำวงจร soft starter มาต่อโหลดหลอดไฟ 3 เฟสแบบสตาร์ท บันทึกกราฟของกระแส และแรงดันทั้งแรงดันไลน์และแรงดันเฟส
2. นำวงจร soft starter มาต่อโหลดหลอดไฟและบัลลาสต์ 3 เฟสแบบสตาร์ท บันทึกกราฟของกระแส และแรงดันทั้งแรงดันไลน์และแรงดันเฟส
3. นำวงจร soft starter มาต่อโหลดหลอดไฟ 3 เฟสแบบเดลต้า บันทึกกราฟของกระแส และแรงดันทั้งแรงดันไลน์และแรงดันเฟส
4. นำวงจร soft starter มาต่อโหลดหลอดไฟและบัลลาสต์ 3 เฟสแบบเดลต้า บันทึกกราฟของกระแส และแรงดันทั้งแรงดันไลน์และแรงดันเฟส

การทดลองตอนที่ 2 : การสตาร์ทมอเตอร์ แบบ Direct online

วิธีการทดลอง

1. ทำการต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1000 W ต่อแบบสตาร์ท
2. ทำการสตาร์ทมอเตอร์แบบ Direct online โดยต่อดูม่านน้ำหนักตามค่าต่างๆดังนี้ No-Load , 2 kg ( $21\%T_{rated}$ ) , 4 kg ( $41\%T_{rated}$ ) , 6 kg ( $58\%T_{rated}$ ) , 8 kg ( $67\%T_{rated}$ ) , 10 kg ( $85\%T_{rated}$ )
3. บันทึกกราฟกระแสและแรงดัน

การทดลองตอนที่ 3 : การนำวงจร Soft Starter มาควบคุมการ Start มอเตอร์เหนี่ยวนำ

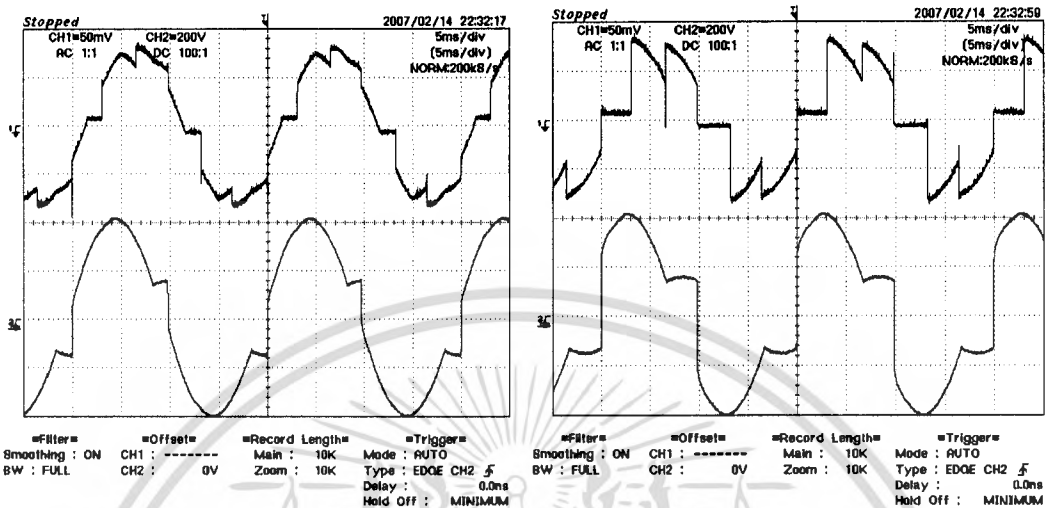
วิธีการทดลอง

1. นำวงจร Soft Starter มาทำการต่อกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1000 W แบบสตาร์ท
2. ทำการสตาร์ทมอเตอร์โดยทำการกำหนดค่ากระแสควบคุมในช่วงสตาร์ท แล้วจึงทำการชัตทอร์คโหลดค่าต่างๆดังนี้ No-Load , No-Load , 2 kg , 4 kg , 6 kg , 8 kg , 10 kg
3. เปลี่ยนค่ากระแสควบคุมในช่วงการสตาร์ท แล้วทำการชัตทอร์คโหลดเหมือนข้อที่ 3
4. บันทึกค่ากระแสและแรงดัน

ผลการทดลอง

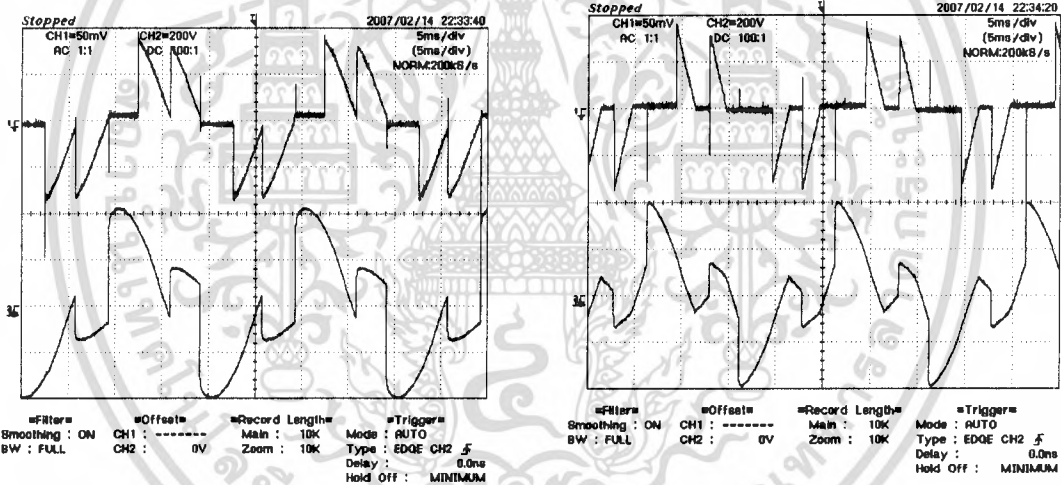
ผลการทดลองตอนที่ 1 : การใช้ Soft Starter ขั้วโหลด R, L ณ มุมจุดชนวนต่าง

รูปกราฟแรงดันและกระแสไลน์ในกรณีโหลดหลอดไฟ (R)



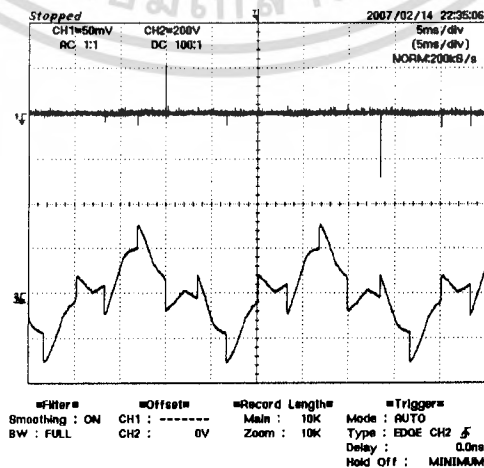
รูปที่ 4-1 มุมจุดชนวนเป็น 30 องศา

รูปที่ 4-2 มุมจุดชนวนเป็น 60 องศา



รูปที่ 4-3 มุมจุดชนวนเป็น 90 องศา

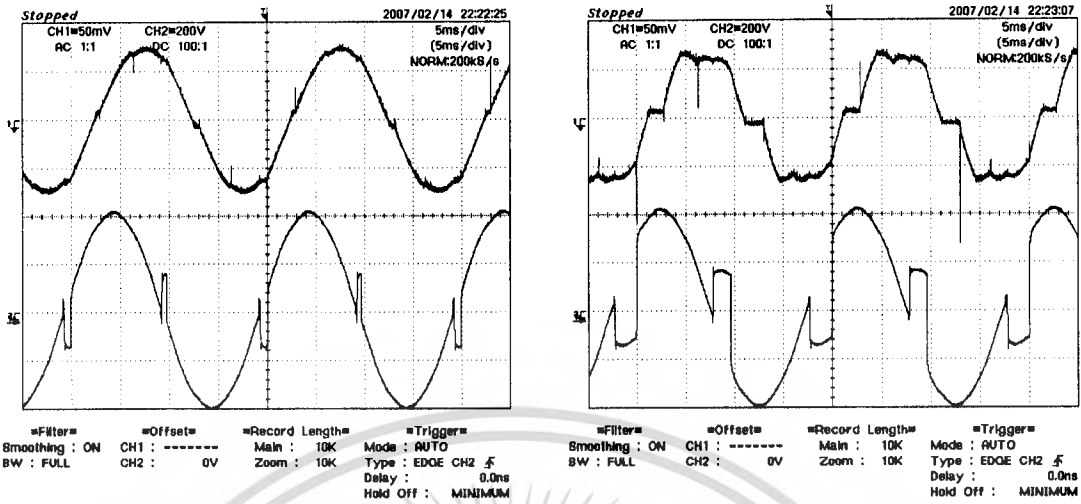
รูปที่ 4-4 มุมจุดชนวนเป็น 120 องศา



รูปที่ 4-5 มุมจุดชนวนเป็น 150 องศา

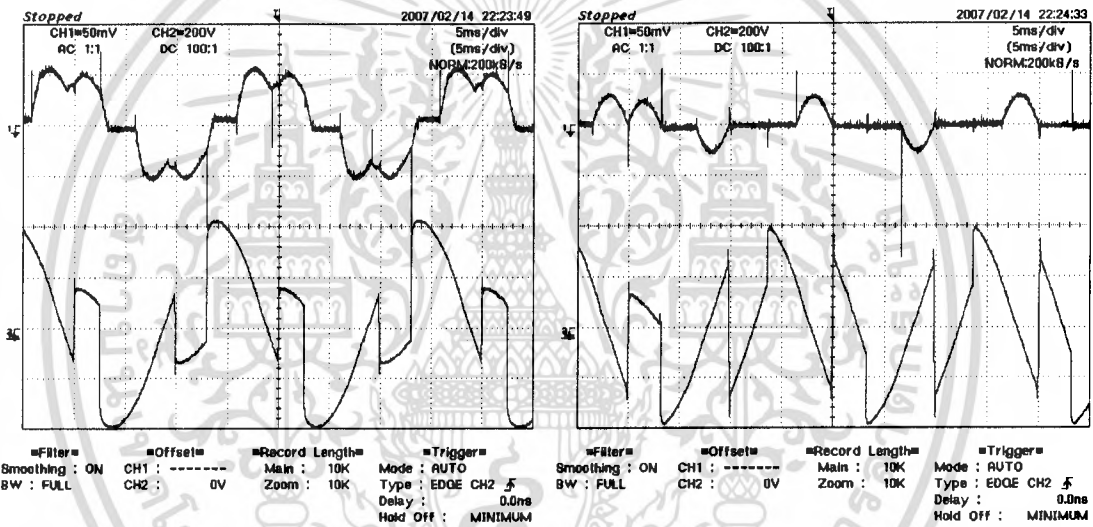
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปกราฟแรงดันและกระแสไลน์กรณีโหลดบัลลาสต์และหลอดไฟ (R, L)



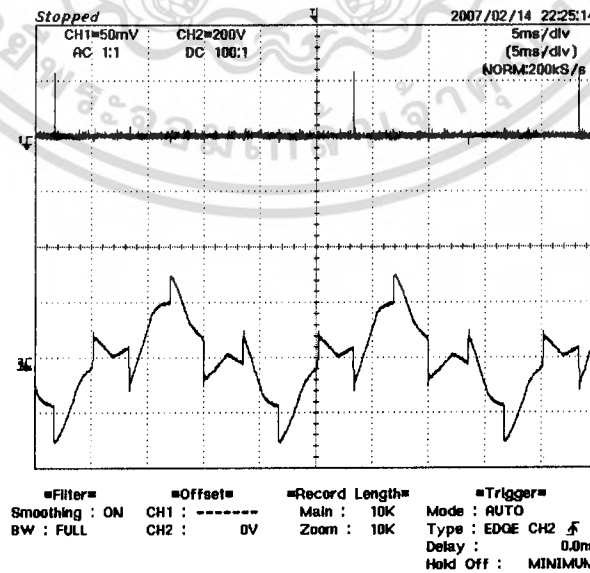
รูปที่ 4-6 มุมจุดขนวนเป็น 30 องศา

รูปที่ 4-7 จุดขนวนเป็น 60 องศา



รูปที่ 4-8 มุมจุดขนวนเป็น 90 องศา

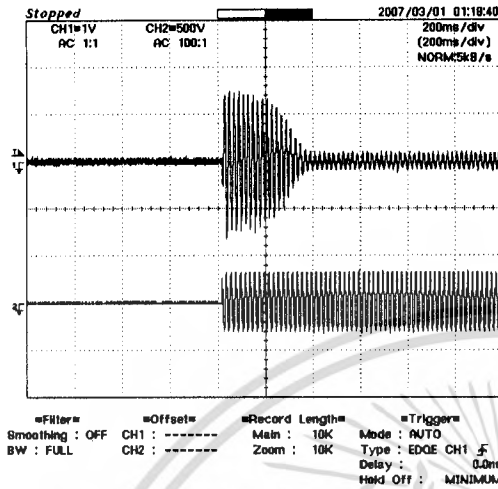
รูปที่ 4-9 มุมจุดขนวนเป็น 120 องศา



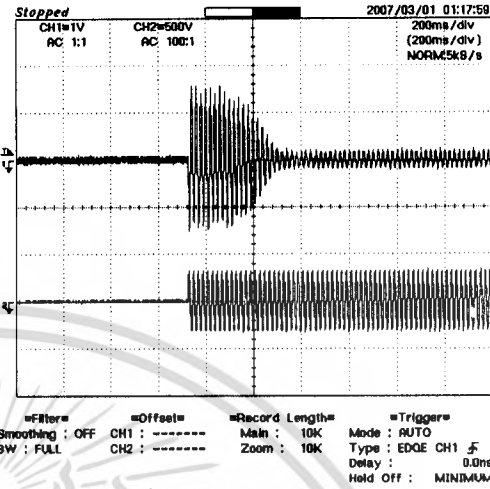
รูปที่ 4-10 มุมจุดขนวนเป็น 150 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

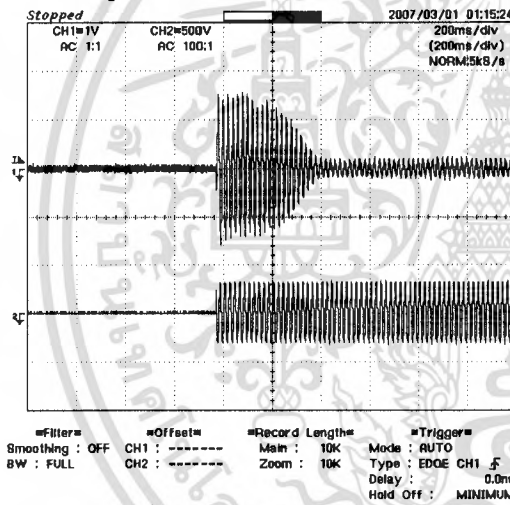
ผลการทดลองตอนที่ 2 : การสตาร์ทแบบ Direct Online ที่ขนาดน้ำหนักโหลดค่าต่างๆ



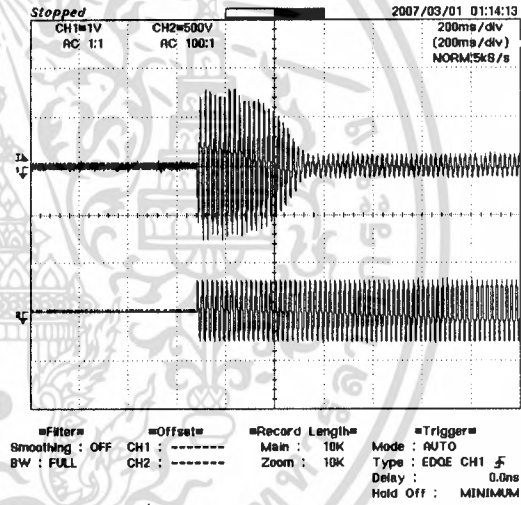
รูปที่ 4-11 No - Load



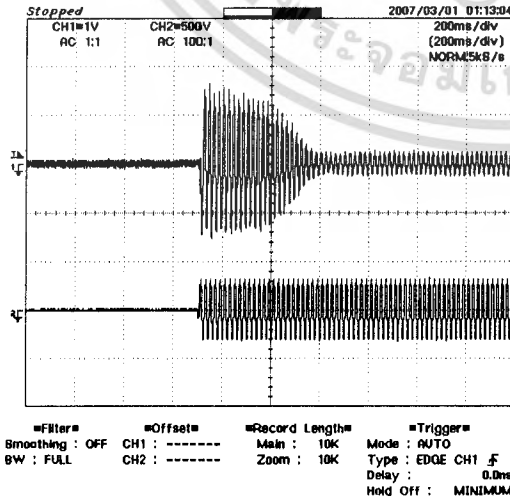
รูปที่ 4-12 Load 21% $T_{rated}$



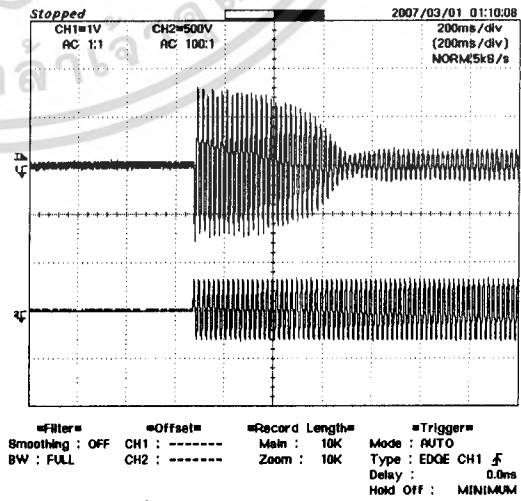
รูปที่ 4-13 Load 41% $T_{rated}$



รูปที่ 4-14 Load 58% $T_{rated}$



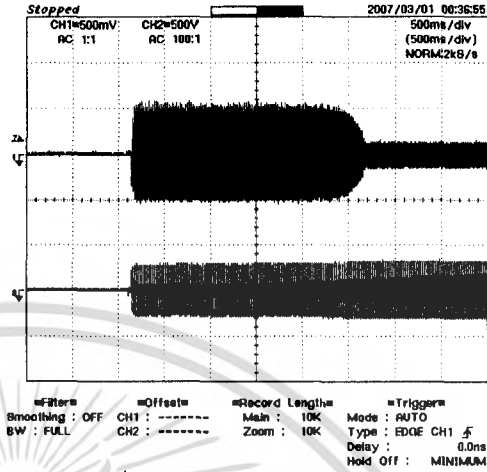
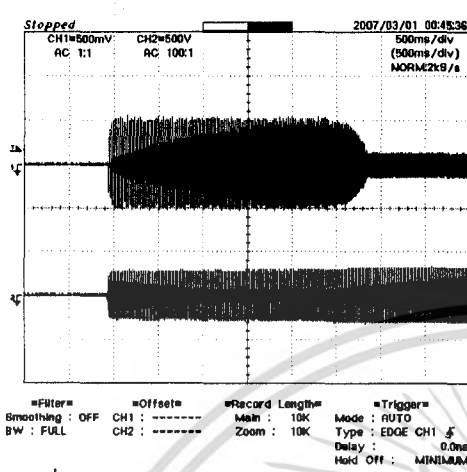
รูปที่ 4-15 Load 67% $T_{rated}$



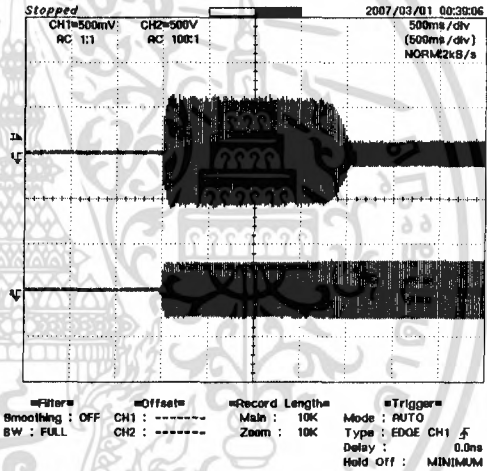
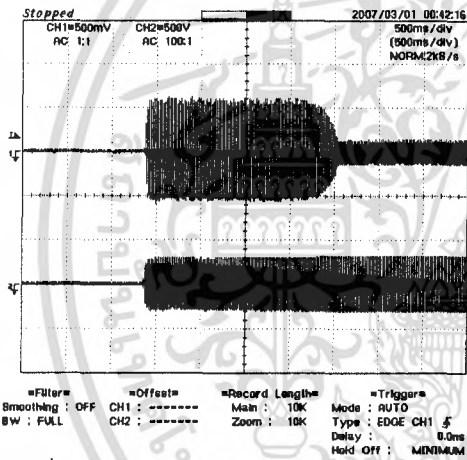
รูปที่ 4-16 Load 85% $T_{rated}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

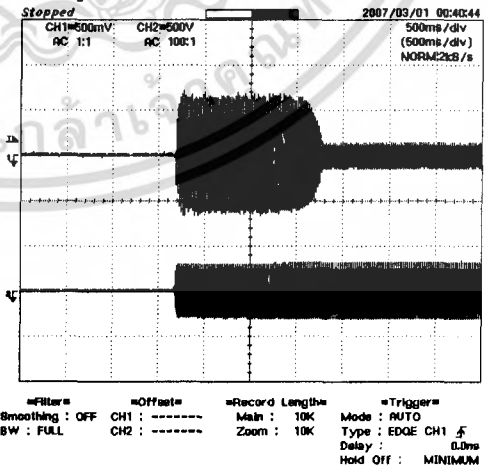
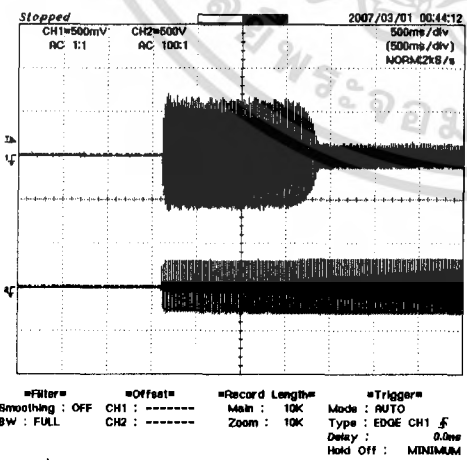
ผลการทดลองตอนที่ 3 : การใช้ Soft Starter ขั้วมอเตอร์ขนาด 1000 W ต่อแบบสตาร์  
 ทำการป้อนกระแสควบคุมขั้วโหลดขนาดต่างๆและทำการเพิ่มกระแสควบคุมเมื่อมอเตอร์  
 ไม่สามารถขั้วโหลดได้ เมื่อ  $KI = 6$



รูปที่ 4-17 No – Load กระแสควบคุม 1.76 A รูปที่ 4-18No – Load กระแสควบคุม 1.90 A

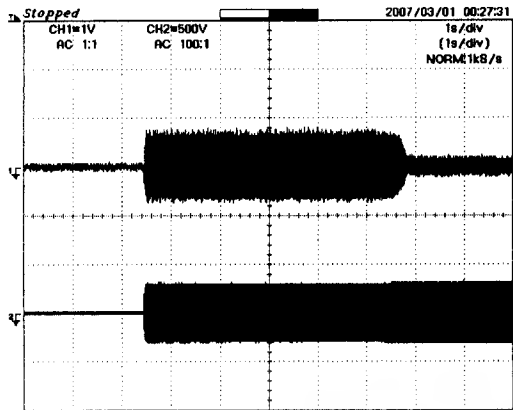


รูปที่ 4-19 No – Load กระแสควบคุม 2.05 A รูปที่ 4-20 No – Load กระแสควบคุม 2.19A

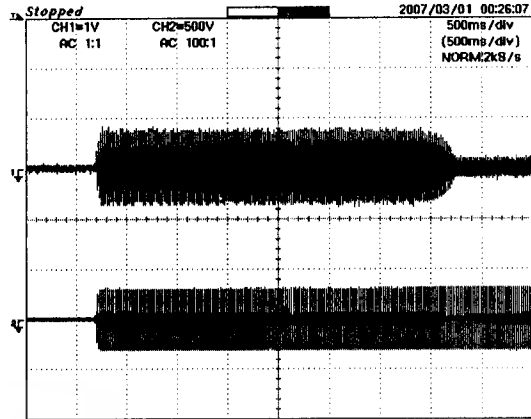


รูปที่ 4-21 No – Load กระแสควบคุม 2.34 A รูปที่ 4-22 No – Load กระแสควบคุม 2.49 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

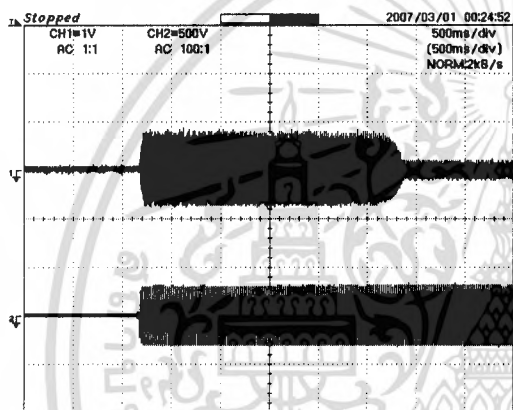


Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

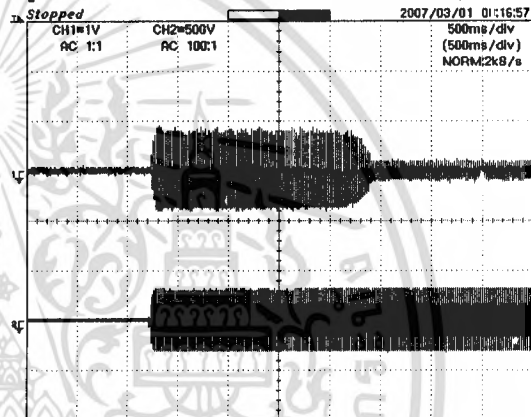


Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-23 Load 21%  $T_{rated}$  กระแสควมคุม 2.64 A รูปที่ 4-24 Load 21%  $T_{rated}$  กระแสควมคุม 2.78 A

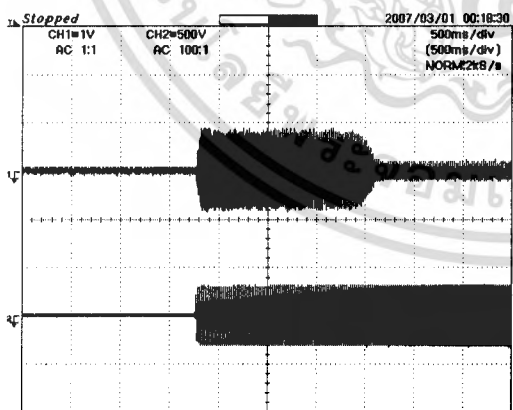


Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

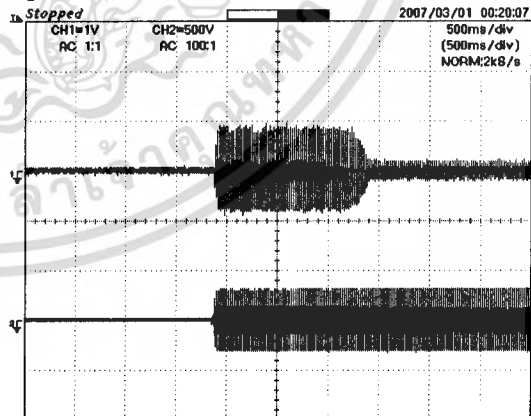


Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-25 Load 21%  $T_{rated}$  กระแสควมคุม 2.93 A รูปที่ 4-26 Load 21%  $T_{rated}$  กระแสควมคุม 3.08 A



Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

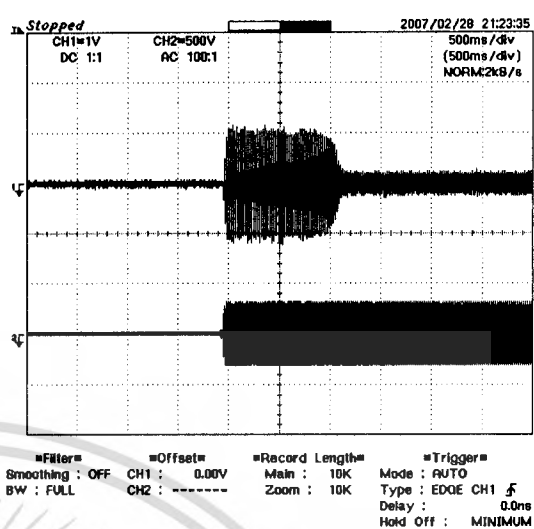
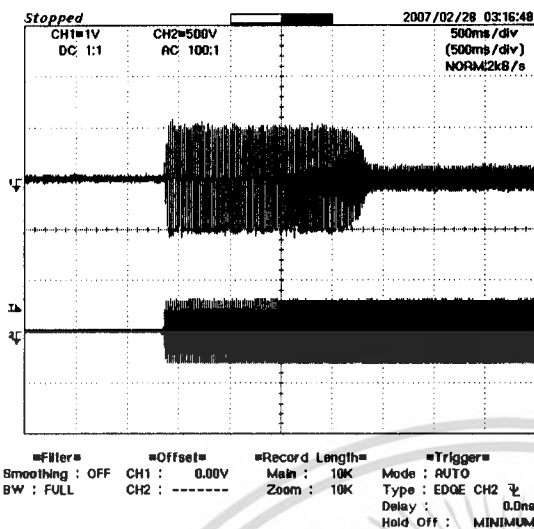


Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

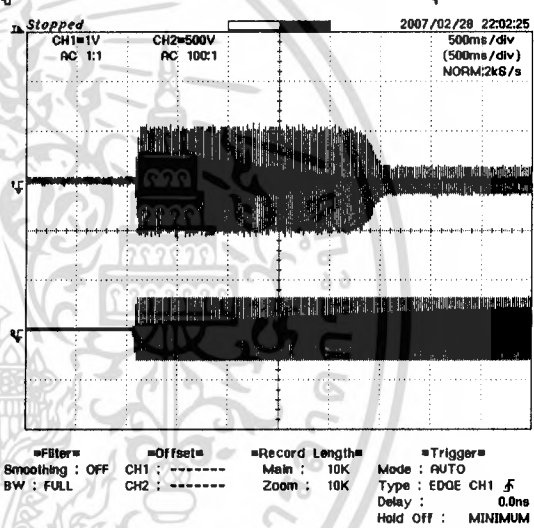
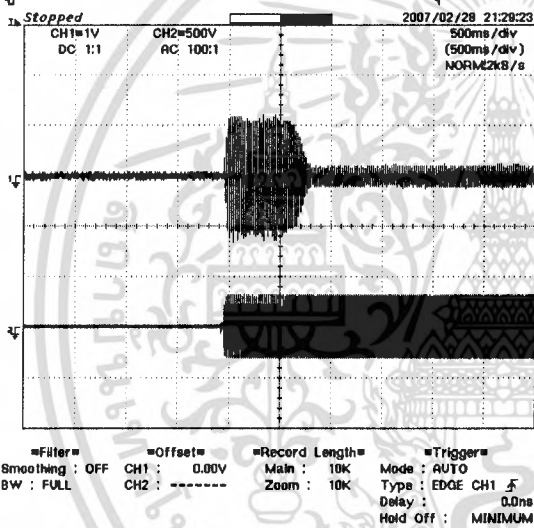
รูปที่ 4-27 Load 21%  $T_{rated}$  กระแสควมคุม 3.22 A รูปที่ 4-28 Load 21%  $T_{rated}$  กระแสควมคุม 3.37 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

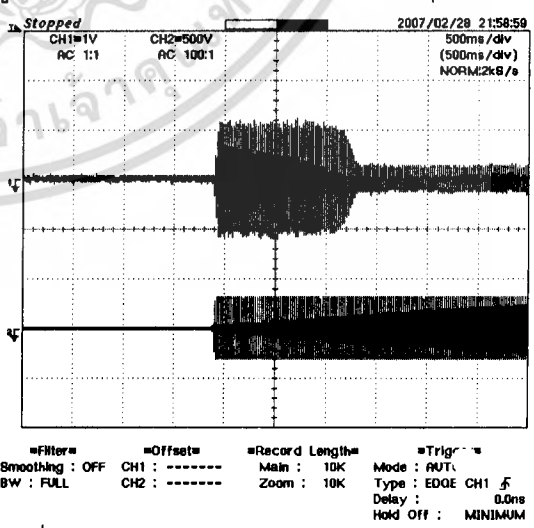
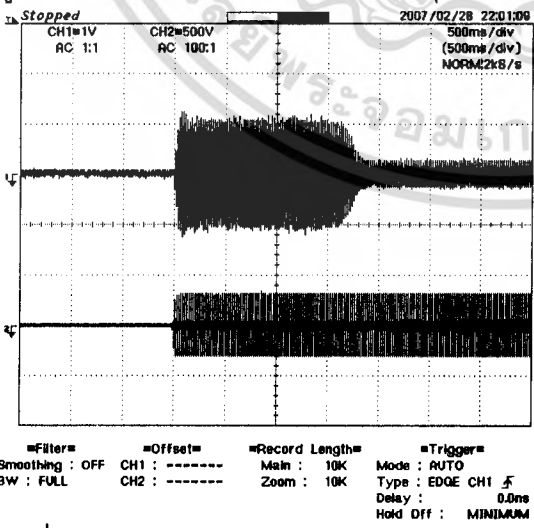




รูปที่4-35 Load 58%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 4.69 A รูปที่4-36 Load 58%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 4.83 A

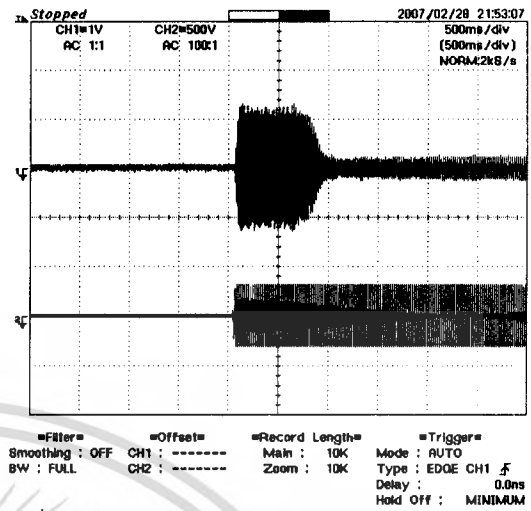
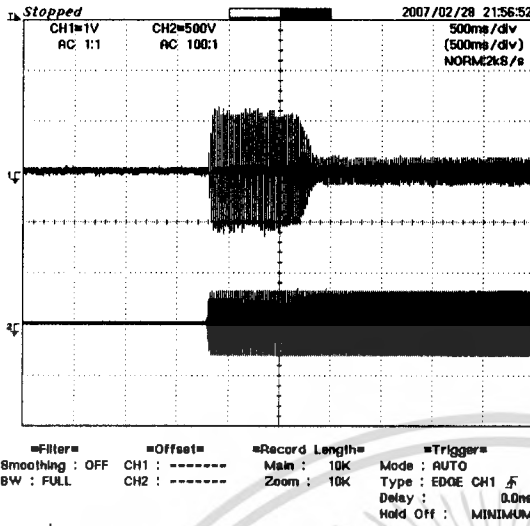


รูปที่4-37 Load 58%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 5.13 A รูปที่4-38 Load 58%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 4.69 A

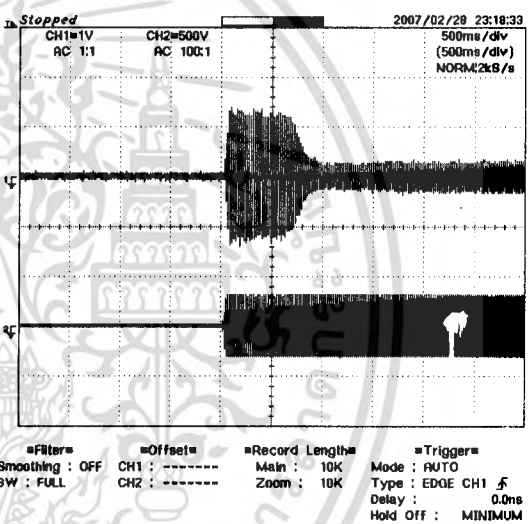
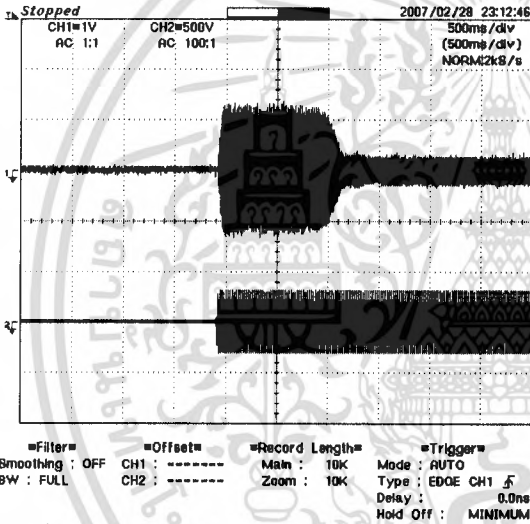


รูปที่4-39 Load 67%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 4.83 A รูปที่4-40 Load 67%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 4.98 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



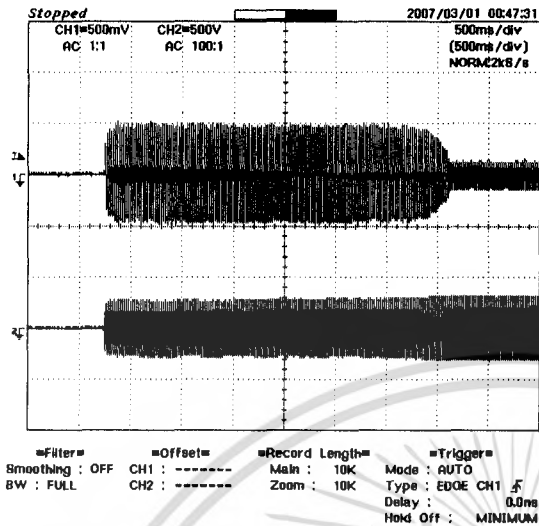
รูปที่4-41 Load 67%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 5.13 A รูปที่4-42 Load 67%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 5.27 A



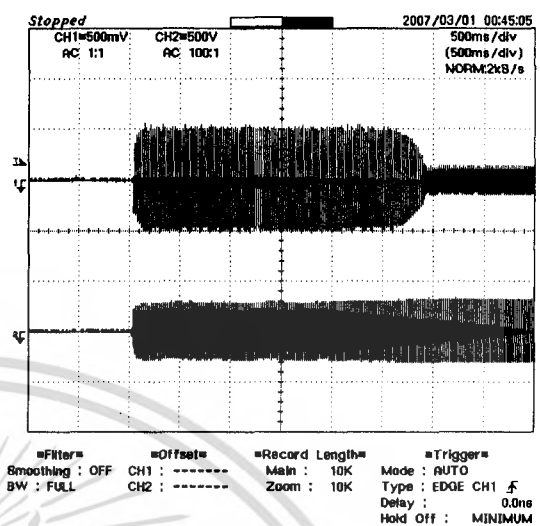
รูปที่4-43 Load 85%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 5.42 A รูปที่4-44 Load 85%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 5.57 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

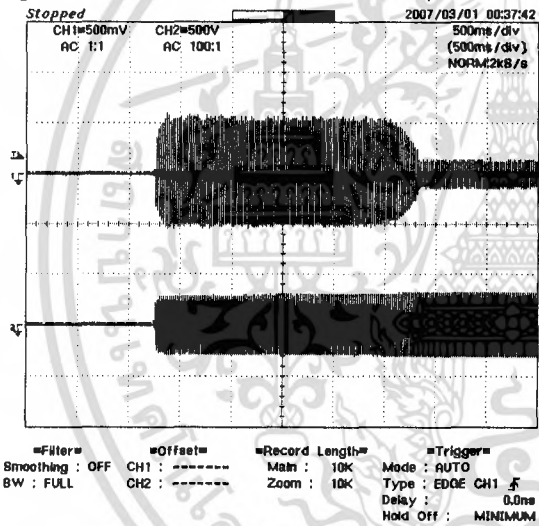
การป้อนกระแสควบคุมขับโหลดขนาดต่างๆและทำการเพิ่มกระแสควบคุมเมื่อมอเตอร์ไม่สามารถขับโหลดได้ เมื่อ  $KI = 5$



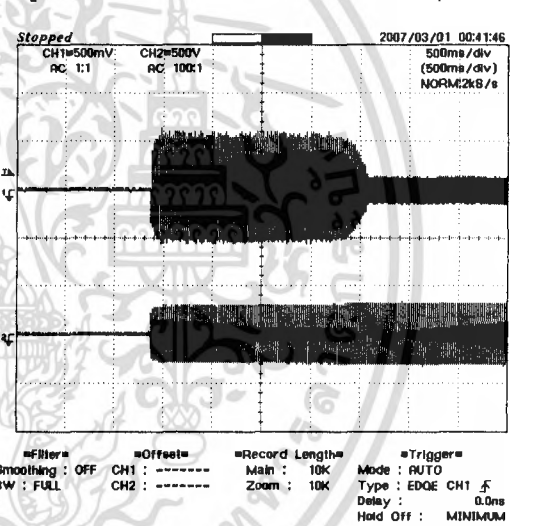
รูปที่ 4-45 No - Load กระแสควบคุม 1.76 A



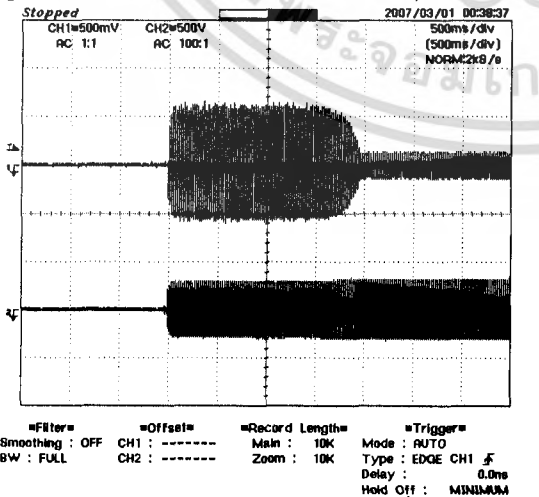
รูปที่ 4-46 No - Load กระแสควบคุม 1.90 A



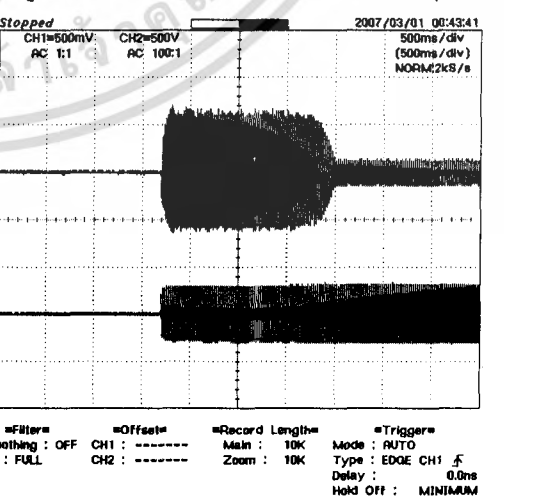
รูปที่ 4-47 No - Load กระแสควบคุม 2.05 A



รูปที่ 4-48 No - Load กระแสควบคุม 2.19 A

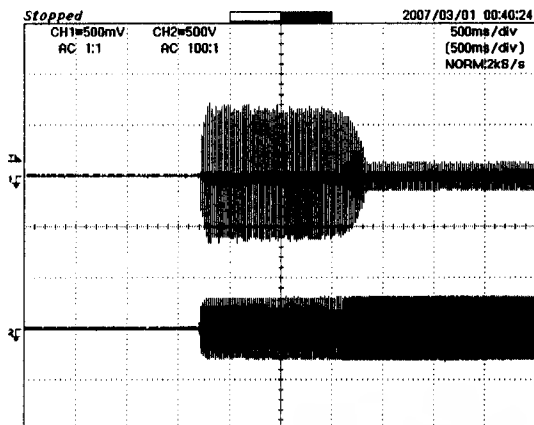


รูปที่ 4-49 No - Load กระแสควบคุม 2.34 A

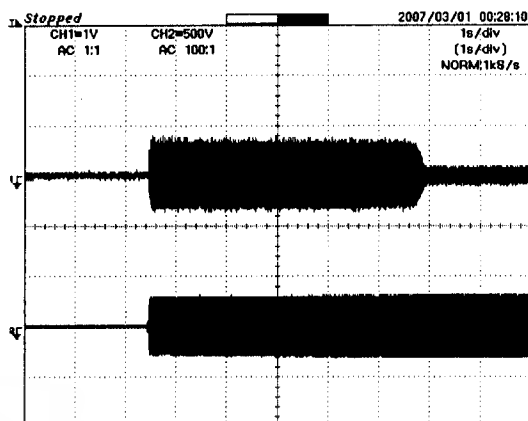


รูปที่ 4-50 No - Load กระแสควบคุม 2.49 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



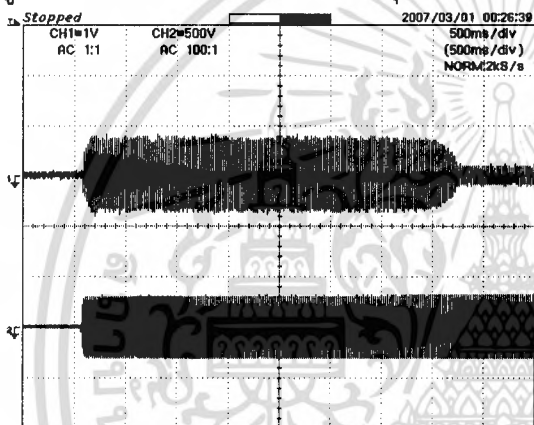
Filter: Off Offset: CH1: CH2: Record Length: Main: 10K Zoom: 10K Trigger: Mode: AUTO Type: EDGE CH1 Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM



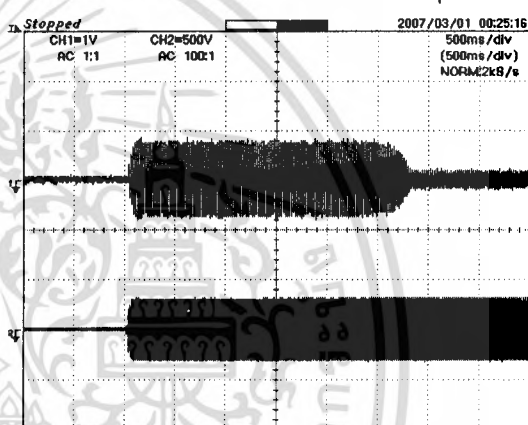
Filter: Off Offset: CH1: CH2: Record Length: Main: 10K Zoom: 10K Trigger: Mode: AUTO Type: EDGE CH1 Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-51 No - Load กระแสควบคุม 2.64 A

รูปที่ 4-52 Load 21% T<sub>rated</sub> กระแสควบคุม 2.78 A



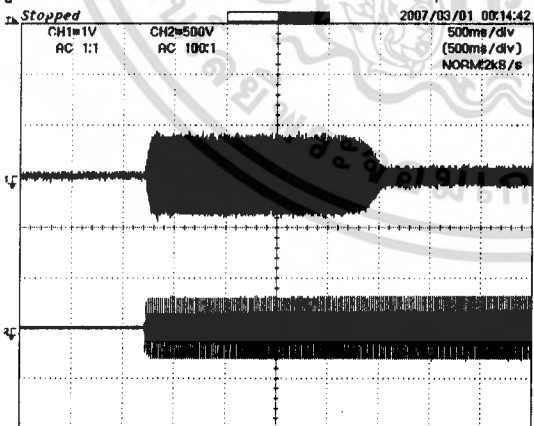
Filter: Off Offset: CH1: CH2: Record Length: Main: 10K Zoom: 10K Trigger: Mode: AUTO Type: EDGE CH1 Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM



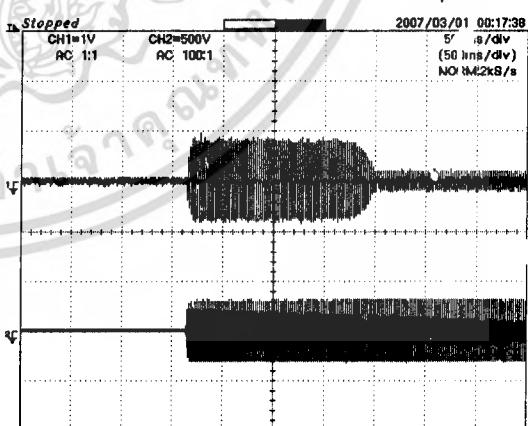
Filter: Off Offset: CH1: CH2: Record Length: Main: 10K Zoom: 10K Trigger: Mode: AUTO Type: EDGE CH1 Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-53 Load 21% T<sub>rated</sub> กระแสควบคุม 2.93 A

รูปที่ 4-54 Load 21% T<sub>rated</sub> กระแสควบคุม 3.08 A



Filter: Off Offset: CH1: CH2: Record Length: Main: 10K Zoom: 10K Trigger: Mode: AUTO Type: EDGE CH1 Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM

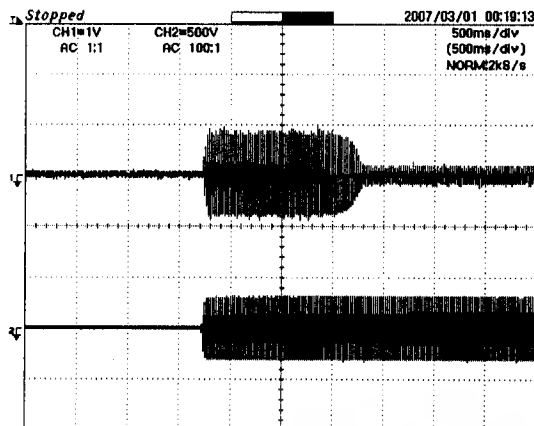


Filter: Off Offset: CH1: CH2: Record Length: Main: 10K Zoom: 10K Trigger: Mode: AUTO Type: EDGE CH1 Delay: 0.0ns Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-55 Load 21% T<sub>rated</sub> กระแสควบคุม 3.22 A

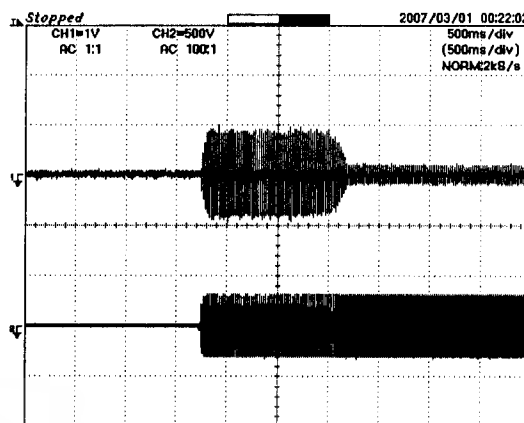
รูปที่ 4-56 Load 21% T<sub>rated</sub> กระแสควบคุม 3.37 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



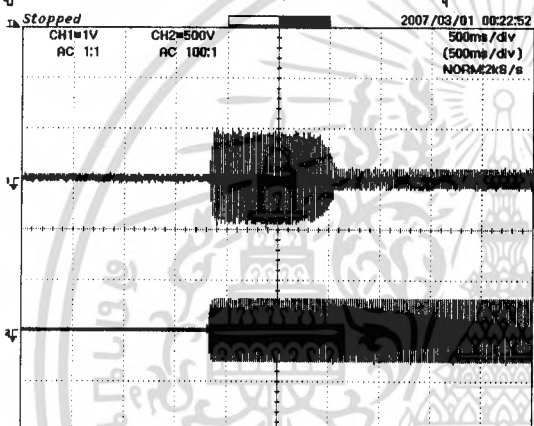
Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-57 Load 21%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 3.52 A



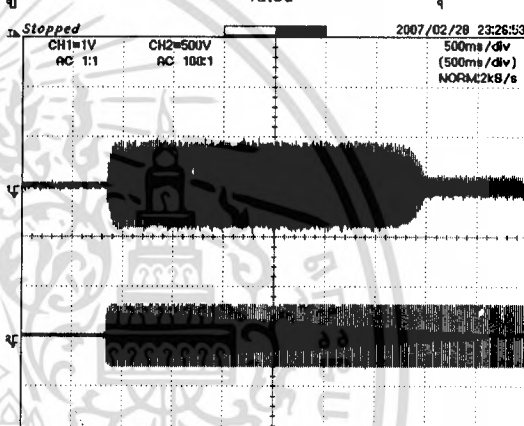
Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-58 Load 21%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 3.66 A



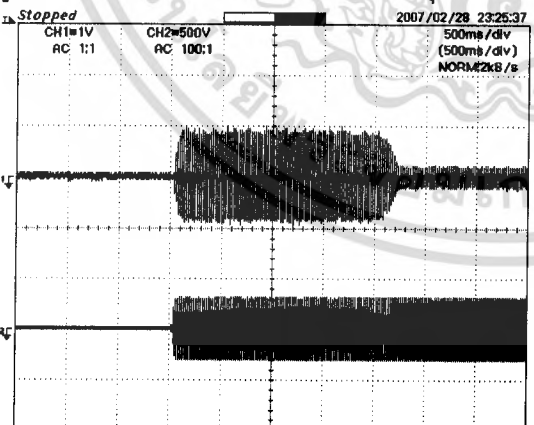
Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-59 Load 21%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 3.81 A



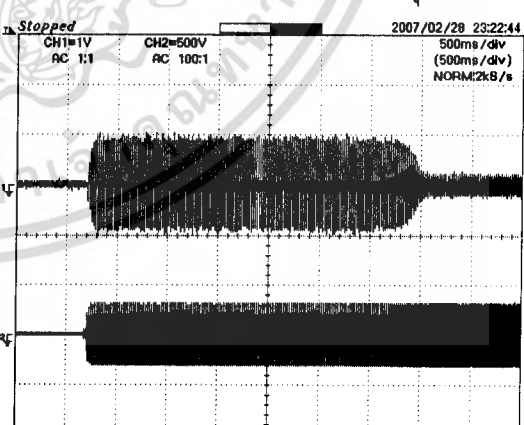
Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-60 Load 41%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 3.66 A



Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

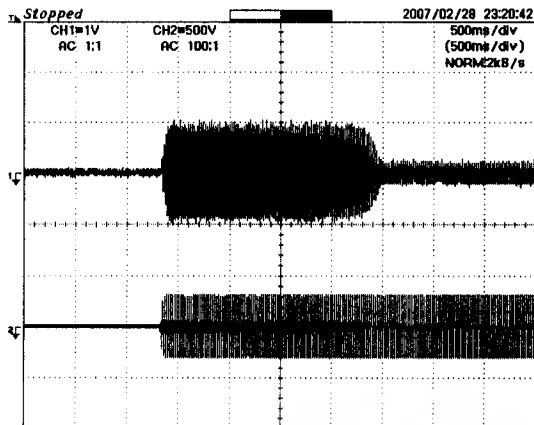
รูปที่ 4-61 Load 41%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 3.81 A



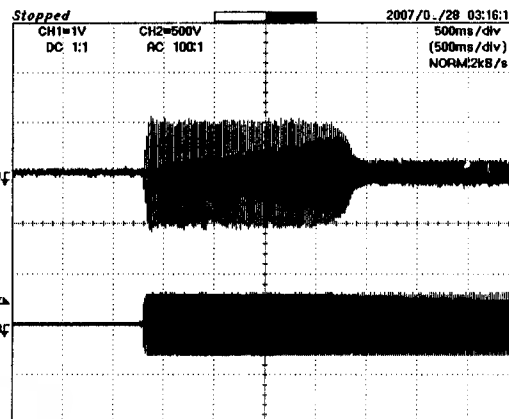
Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-62 Load 41%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 3.96 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

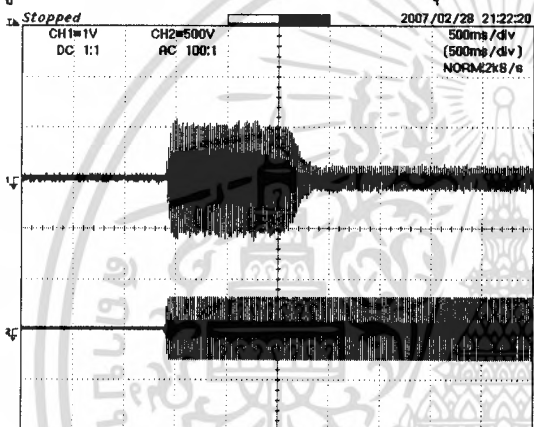


Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

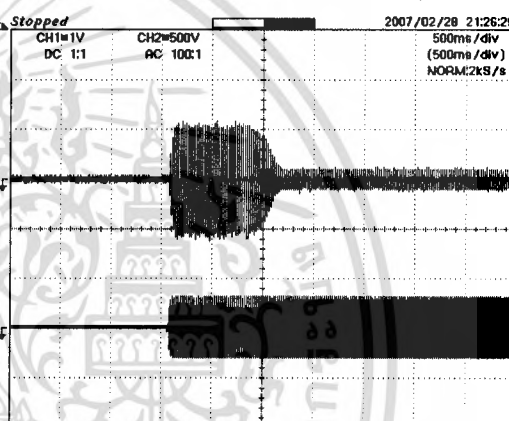


Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: 0.00V, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH2, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-63 Load 41%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 4.10 A รูปที่ 4-64 Load 58%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 4.69 A

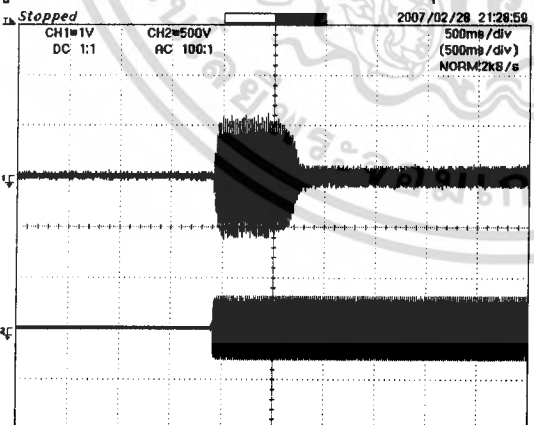


Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: 0.00V, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

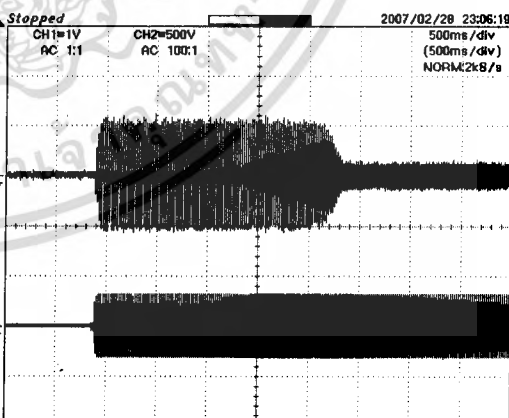


Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: 0.00V, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-65 Load 58%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 4.83 A รูปที่ 4-66 Load 58%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 4.98 A



Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: 0.00V, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM



Filter: Smoothing: OFF, BW: FULL  
 Offset: CH1: -----, CH2: -----  
 Record Length: Main: 10K, Zoom: 10K  
 Trigger: Mode: AUTO, Type: EDGE CH1, Delay: 0.0ns, Hold Off: MINIMUM

รูปที่ 4-67 Load 58%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 5.13 A รูปที่ 4-68 Load 65%  $T_{rated}$  กระแสควบคุม 4.69 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากกราฟของการทดลองนำข้อมูลมาเปรียบเทียบได้ดังตาราง  
 ตารางผลการทดลอง เปรียบเทียบขนาดโหนดเทียบกับกระแสน้ำขนาดต่างๆเมื่อถูกความถี่ตัวเลขdigitalเฉลี่ย

น้ำหนักแขวน		0 kg	2 kg	4 kg	6 kg	8 kg	10 kg
Torque <sub>load</sub> (N.m)		0	1.49	2.92	4.08	4.7	6.04
$I_{av}$ (digit)	$I_{ma}$						
	$I_{base}$						
		$I_{max}/I_{base}$	$I_{max}/I_{base}$	$I_{max}/I_{base}$	$I_{max}/I_{base}$	$I_{max}/I_{base}$	$I_{max}/I_{base}$
		15	15	15	15	15	15
		1	1	1	1	1	1
60		5.00					
65		5.25					
70		5.50					
75		5.75					
80		6.00					
85		6.50					
90		6.50					
95		6.75					
100		7.00	6.50	0.43			
105		7.25	7.50	0.50			
110		7.75	7.50	0.50			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักแขวน Torque <sub>load</sub> (N.m)	0 kg		2 kg		4 kg		6 kg		8 kg		10 kg	
	I <sub>ma</sub>	I <sub>max</sub> / I <sub>base</sub>	I <sub>ma</sub>	I <sub>max</sub> / I <sub>base</sub>	I <sub>max</sub>	I <sub>max</sub> / I <sub>base</sub>	I <sub>max</sub>	I <sub>max</sub> / I <sub>base</sub>	I <sub>max</sub>	I <sub>max</sub> / I <sub>base</sub>	I <sub>max</sub>	I <sub>max</sub> / I <sub>base</sub>
		0		1.49		2.92		4.08		4.7		6.04
115	3.37	8.00	8.00	0.53								
120	3.52	8.50	8.25	0.55								
125	3.66		8.50	0.57								
130	3.81		9.00	0.60								
135	3.96											
140	4.10				9.50	0.63						
145	4.25				10.00	0.67						
150	4.39				11.00	0.73						
155	4.54				11.00	0.73						
160	4.69				11.00	0.73	10.00	0.67				
165	4.83				11.00	0.73	11.00	0.73	11.00	0.73		
170	4.98						11.00	0.73	11.00	0.73		
175	5.13						11.50	0.77	11.50	0.77		
180	5.27						12.00	0.80	12.00	0.80		
185	5.42						12.00	0.80	12.00	0.80		
190	5.57						12.50	0.83	12.50	0.83	12.00	0.80
195	5.71										13.00	0.87
200	5.86										13.00	0.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



น้ำหนักแขวน Torque <sub>load</sub> (N.m)	0 kg		2 kg		4 kg		6 kg		8 kg		10 kg	
	$I_{ma}$	$I_{max}/I_{base}$	$I_{ma}$	$I_{max}/I_{base}$	$I_{max}$	$I_{max}/I_{base}$	$I_{max}$	$I_{max}/I_{base}$	$I_{max}$	$I_{max}/I_{base}$	$I_{max}$	$I_{max}/I_{base}$
130	3.81		1.50	3.57	2.30	5.11						
135	3.96				1.60	3.56						
140	4.10				1.40	3.11						
145	4.25				1.15	2.56						
150	4.39				1.10	2.44						
155	4.54											
160	4.69						1.90	3.80				
165	4.83						1.80	3.60	4.05	7.50		
170	4.98						1.75	3.50	3.05	5.65		
175	5.13						1.40	2.80	1.60	2.96		
180	5.27						1.15	2.30	1.25	2.31		
185	5.42						0.90	1.80	0.90	1.67		
190	5.57						0.80	1.60	0.80	1.43	1.55	2.42
195	5.71										1.05	1.64
200	5.86										0.80	1.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณหาขนาด Torque load จากตุ้มน้ำหนักที่แขวน

น้ำหนักแขวน	0 kg	2 kg	4 kg	6 kg	8 kg	10 kg
แรงดึงเชือก ก่อนstart(kg)	-	2.5	4.5	6.4	8.2	9.9
แรงดึงเชือก ขณะstart(kg)	-	0.6	0.8	1.2	2.2	2.2
แรงดึงที่motor ช่วยพยุง	0	2.5 - 0.6 = 1.9	4.5 - 0.8 = 3.7	6.4 - 1.2 = 5.2	8.2 - 2.2 = 6	9.9 - 2.2 = 7.7
Torque (N.m);r=0.08m	0	1.49	2.92	4.08	4.7	6.04
Torque = r * F						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### ตอนที่ 1: การใช้ Soft Starter ขับโหลด R , L ณ มุมจลจนวนต่าง

เมื่อปรับมุมจลจนวนเป็น 0 องศาขนาดของแรงดันจะมีค่ามากที่สุดและเมื่อปรับให้ขนาดของมุมจลจนวนมีค่ามากขึ้นขนาดของแรงดันและกระแสจะมีค่าลดลง จนกระทั่งมุมจลจนวนมีขนาด 150 องศา ไม่มีแรงดันเพียงพอที่จะขับโหลดเสมือนเปิดวงจรการทำงาน ซึ่งในกรณีโหลดหลอดไฟ มุมเฟสของแรงดันกระแสจะตรงกัน ส่วนกรณีของโหลดบัลลาสต์และหลอดไฟ เนื่องจากบัลลาสต์เป็นตัวเหนี่ยวนำซึ่งกระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำจะไม่สามารถหยุดไหลได้อย่างทันทีทันใด จึงเป็นเหตุให้มุมเฟสของกระแสจะแตกต่างกับมุมเฟสของแรงดัน จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเราสามารถควบคุมขนาดของแรงดันได้โดยการ ปรับมุมจลจนวน ในกรณีของโหลดหลอดไฟ

#### ตอนที่ 2 : การสตาร์ทแบบ Direct Online ที่ขนาดน้ำหนักโหลดค่าต่างๆ

เมื่อทำการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1000 W ขนาดพิกัดกระแส 2.5 A ต่อแบบสตาร์ทแบบ Direct Online จะพบว่าขนาดของกระแส Peak สูงสุดคือประมาณ 14 A ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับกระแสพิกัด ( $2.5 \sqrt{2} V_{peak}$ ) เมื่อทำการสตาร์ทขณะ No - Load เวลาในการสตาร์ทเป็น 340 ms เมื่อทำการเพิ่มโหลด 2 , 4 , 6 , 8 , 10 kg ขนาดของกระแส Peak สูงสุดยังคงเท่าเดิมคือ 14 A แต่ช่วงเวลาในการสตาร์ทจะนานขึ้นเป็น 380 ms , 440 ms , 480 ms , 520 ms และ 600 ms ตามลำดับ

#### ตอนที่ 3 การใช้ Soft Starter ขับมอเตอร์ขนาด 1000 W ต่อแบบสตาร์ท

- เมื่อป้อนกระแสควบคุมขนาด 1.76 A ในขณะมอเตอร์ No - Load ขนาดของกระแสสูงสุดในช่วงการสตาร์ทจะลดลงเหลือ 5 A ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการสตาร์ทแบบ Direct Online แต่ระยะเวลาในการสตาร์ทจะเพิ่มเป็น 2.82 s และเมื่อเพิ่มค่าของกระแสควบคุมให้มีค่ามากขึ้นระยะเวลาในการสตาร์ทจะยิ่งเร็วขึ้นโดยที่กระแส Peak ในช่วงสตาร์ทจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มกระแสควบคุมให้มีค่ามากๆเป็น 3.52 A ปรากฏว่าเวลาในการสตาร์ทมอเตอร์จะเร็วมากและขนาดของกระแสช่วงสตาร์ทจะมีค่าเพิ่มเป็น 8.5 A ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการกระชากทางกล และการสตาร์ทจะเป็นไปอย่างไม่น่าเชื่อถือไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในบางประเภทซึ่งระยะเวลาการสตาร์ทที่ขึ้นอยู่กับประเภทของงาน

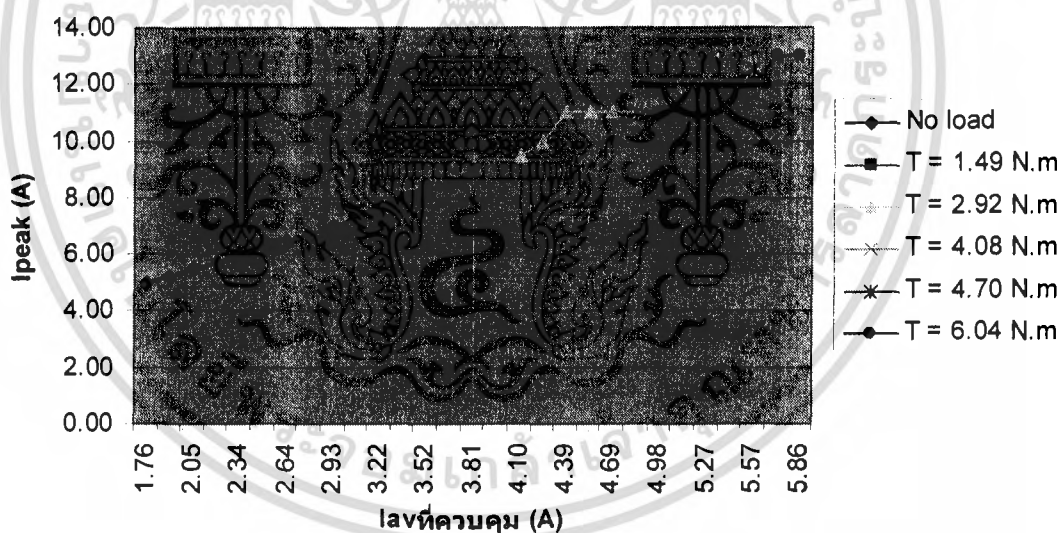
ที่นำมาใช้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีที่เพิ่มขนาดโหลดน้ำหนักในที่นี้จะยกกรณีโหลดน้ำหนัก 4 kg จะพบว่าถ้าป้อนกระแสควบคุมต่ำกว่า 4.10 A มอเตอร์จะไม่มีแรงเพียงพอที่จะขับโหลดให้หมุนได้ และเมื่อเพิ่มกระแสควบคุมให้มีขนาดมากขึ้นดังกรณี No - Load เวลาในการสตาร์ทก็จะเร็วขึ้นจนกระทั่งกระแสควบคุมถึงค่าค่าหนึ่ง จากการทดลองคือ 4.83 A เวลาการสตาร์ทมอเตอร์จะเป็นไปอย่างรวดเร็วมาก กระแสในช่วงสตาร์ทสูงถึง 11 A และการสตาร์ทไม่німนวนลเช่นเดียวกับตัวอย่าง No - Load Test ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

- กรณีที่นำ Soft Start มาทำการขับแบบ Full Load เวลาในการสตาร์ทของมอเตอร์จะนานมาก และกระแสควบคุมที่ป้อนก็มีค่าสูง หรือในบางครั้งมอเตอร์ไม่อาจที่จะขับโหลดได้ ซึ่งประเภทงานที่ใช้มอเตอร์ทำงานแบบ Full Load จึงไม่ควรที่จะใช้ Soft Starter

จากการทดลองจึงสรุปแนวโน้มได้ดังกราฟ

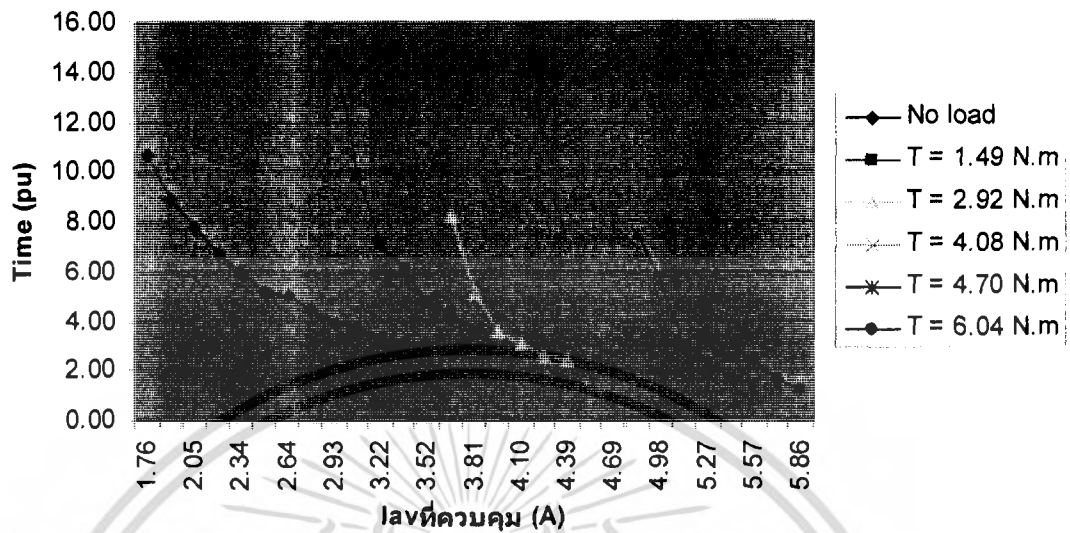
lav ที่ควบคุม กับ Ipeak ที่ load ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 5-1 รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสควบคุมและกระแสสูงสุดช่วงสตาร์ท

จากกราฟเมื่อทำการปรับขนาดกระแสควบคุมให้มีค่าสูงขึ้น แนวโน้มของกระแสสูงสุดในช่วงการสตาร์ทจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม

### lav ที่ควบคุม กับ Time ที่ใช้ start motor ที่ load ค่าต่างๆ



รูปที่ 5-2 รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสควบคุมและเวลาในการสตาร์ท

จากกราฟเมื่อทำการปรับกระแสควบคุมให้มีค่าสูงขึ้นแล้ว แนวโน้มของเวลาในการสตาร์ทจะมีค่าลดลง

- หมายเหตุ
1. กระแสควบคุมที่ใช้ในการทดลองทำการป้อนเป็นค่า Digital
  2. แรงดันที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าแรงดันเฉลี่ย เพื่อง่ายต่อการคำนวณ และมีขีดเพียงพอที่จะเก็บค่าข้อมูลของการคำนวณ

### ส่วนการคำนวณ

เนื่องจากตัวเลขใน A / D เป็นค่า Digital ตั้งแต่ 0 – 1024 แต่ได้ทำการกำหนดตำแหน่ง Ground เป็น 512 ดังนั้นค่าตัวเลขที่ใช้จริงคือ 0 – 512 ซึ่งก็คือแรงดัน 2.5 – 5.0 โวลต์ เมื่อทำการยกแรงดัน Offset ขึ้นมา จึงทำให้ค่าแรงดันเป็น 0 ถึง 2.5 โวลต์ และ 0 ถึง -2.5 โวลต์ และนี่คือค่าแรงดัน Max ที่สามารถรับค่าได้

ส่วน C.T. ที่ใช้เป็นแบบ 30 / 5 ทำการพัน 2 รอบ ดังนั้นจึงได้เป็น 15 / 5 ทำการต่ออนุกรมที่ขั้ว C.T. ด้วย  $R = 0.1 \text{ ohm}$  จะได้แรงดันดังสมการ

$$V = IR = 5 \times 0.1$$

$$V = 0.5 \text{ V}$$

จากนั้นทำการใช้ Op – Amp 2 ชุด โดยชุดที่ 1 ทำการยกแรงดัน Offset 2.5 โวลต์ อีกชุดเป็นตัวขยายแรงดันที่ออกจาก C.T. ขึ้น 5 เท่า

จาก 
$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{150k}{30k} = -5$$

โดยที่แรงดันจะกลับเฟส 180 องศา แต่ไม่มีผลต่อการคำนวณเพราะ Microcontroller จะทำการยกแรงดันให้มีค่าเป็นบวกทั้งหมด ทำให้แรงดันที่ออกมามีค่าระหว่าง 0 – 2.5 โวลต์

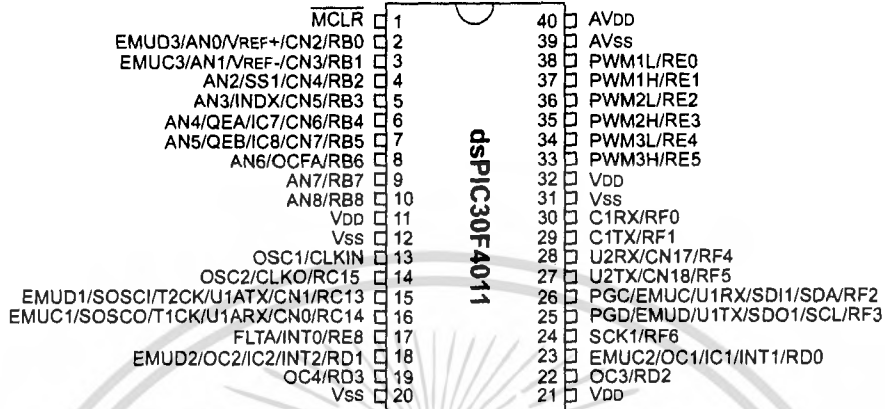


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

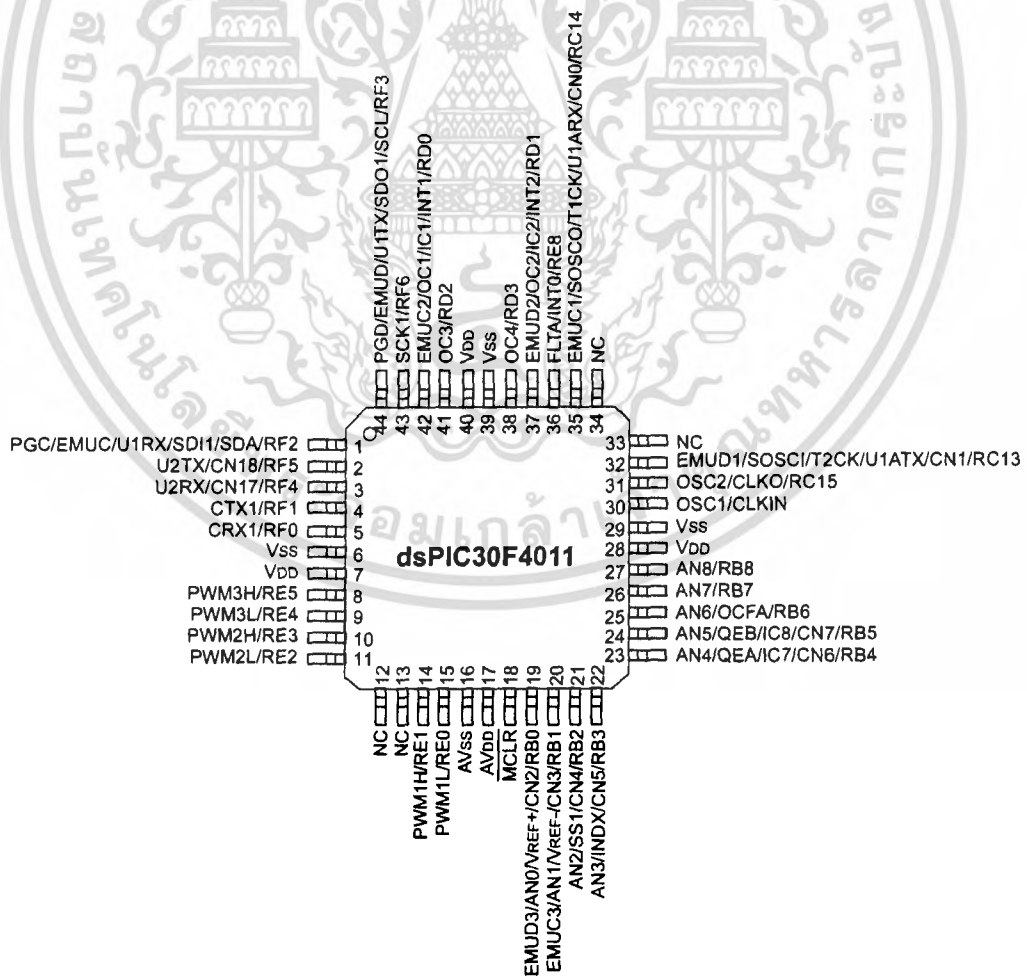
# dsPIC30F4011/4012

## Pin Diagrams

### 40-Pin PDIP

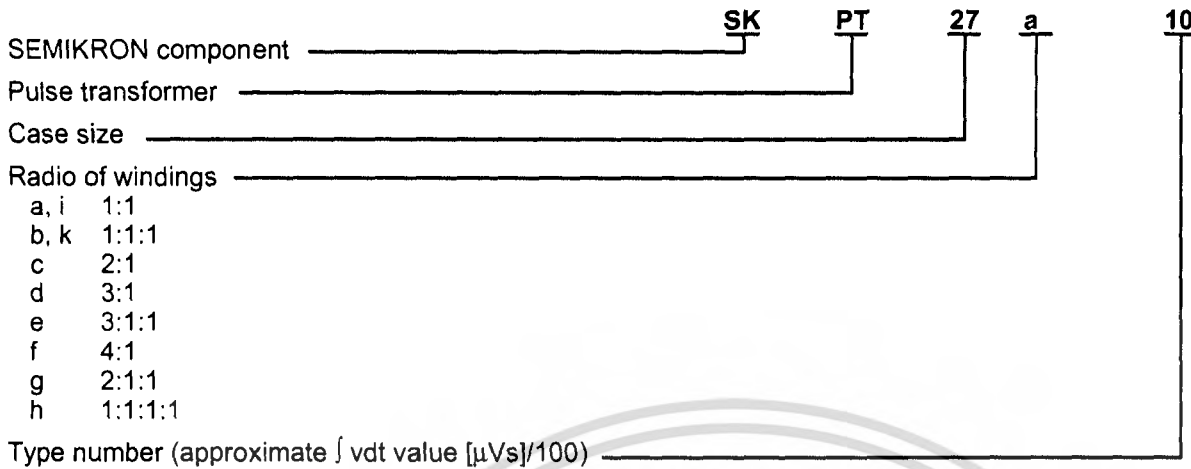


### 44-Pin TQFP



## 14.2 SEMIKRON Pulse Transformers

### Code Designation System



### 1. Introduction

SEMIKRON impulse transformers are intended to be used with the whole family of SEMIKRON thyristors and also with non-SEMIKRON products.

In many electronic power applications pulse transformers are generally used for firing thyristors and triacs, and for the control of power transistors and darlington. In most cases, the controlling pulse comes from a trigger circuit at low voltage level (10 to 30 V), whilst the transformer secondary winding normally is connected to higher voltages (220 to 600 Vrms).

The galvanic isolation through the pulse transformer improves the system and protects the controlling circuit against spikes and transients from the power circuit.

The use of SEMIKRON pulse transformers offers the following advantages:

1. High isolation between the control circuit and the power side (2.5 - 4.0 kVrms).
2. Low coupling capacity, achieved thanks a special winding technique, avoids transient effects from the power line to the control circuit.
3. High value of pulse amplitude and duration, due to special magnetic materials with high magnetic permeability, and also low values of magnetising current.
4. Well coupled magnetic coils assure low stray inductance levels and low rise times (high di/dt values).
5. Very compact sizes and very low core losses due to special magnetic material (Ferrite able to work up to 150 kHz).

According to the application the specified technical data may differ from case to case, as follows:

- output voltage with no load	5 - 15 V
- trigger current	100 mA - 1 A
- rise time	0,5 - 5 $\mu s$
- pulse width	10 $\mu s$ - 1 ms
- operation frequency	5 - 10 kHz

The simplified model of a pulse transformer and its parameters is shown below:

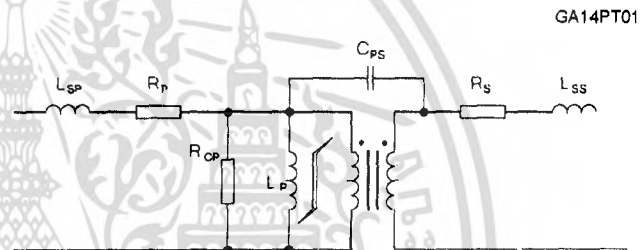


Fig. 1 Model of an impulse transformer

- $L_{sp}$  = primary stray inductance
- $C_{ps}$  = coupling capacity between primary and secondary
- $R_s$  = secondary wiring resistance
- $L_{ss}$  = secondary stray inductance
- $R_p$  = primary wiring resistance
- $L_p$  = magnetising inductance
- $R_{cp}$  = core power losses

### 2. Explanations of Technical data

- **Transformation ratio:** shows the number of coils and their relation, e.g. 3:1:1.
- **Voltage-time integral  $\int vdt$ , pulse width  $t_p$**

The voltage which is induced in the secondary winding of a transformer is given by the product of the inductance  $L_p$  and the rate of change of current in the primary winding. A constant current flowing in the primary will produce no secondary voltage. When a rectangular shaped current pulse is applied to the primary winding a voltage is induced in the secondary during the rise time of the pulse. This voltage does not immediately decay when the primary current reaches its constant value but remains for a time

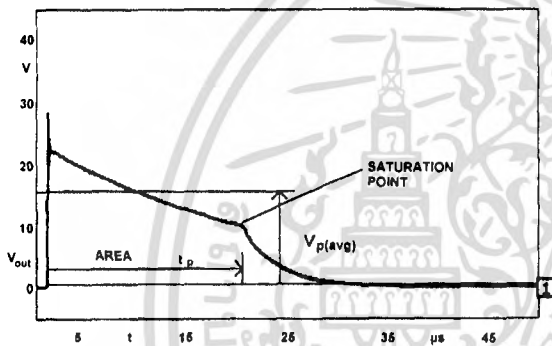
$t_p$  which is inversely proportional to the voltage  $V$ . More exactly expressed: the voltage-time integral for a given transformer is a constant  $K$ :

$$\int v dt = K$$

The area under the curve which plots the waveform of voltage against time gives the value of the above integral. With a rectangular pulse this integral is given simply by the product  $V \cdot t_p$  where  $V$  is the amplitude of the pulse and  $t_p$  is its width.

Since with thyristor firing circuits the amplitude of the pulse is determined by the gate characteristic and by the series resistances in the circuit, then for a given transformer, the above voltage-time integral effectively defines the resulting pulse width.

- **Transfer area:** or voltage-time integral is the minimum value for the voltage-time area measured on a secondary winding in a no-load condition for an unipolar pulse until it reaches the saturation.



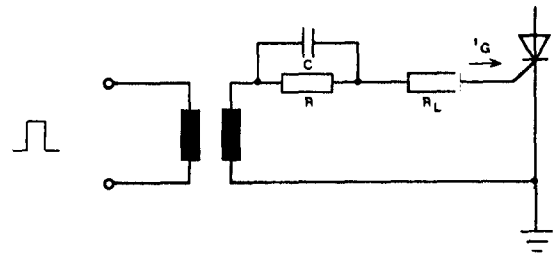
**Fig. 2**  $\int v \cdot dt = V_{out} \cdot t_d = 331 \mu Vs$  (the whole area under the curve)

- The example shows a **SKPT 25a3** transferring a pulse of 24 V amplitude from a pulse generator with  $R_g = 50 \Omega$  and the point where it starts to go into saturation; the value of the integral represents the maximum pulse width  $t_p$  and the average pulse amplitude that can be transferred before reaching saturation. In the example,  $t_p = 20.7 \mu s$  and  $V_p = 16 V$  ( $V_p \cdot t_p = 331 \mu s$ ) can be used, without going into saturation.

- **di/dt, rise time  $t_r$ , and peak current  $I_M$ :** For the reliable firing of a thyristor the firing pulse, as well as having an adequate amplitude, must also possess a sharp leading edge. To achieve this, pulse transformers require low stray inductance (will be explained later) and tight coupling between primary and the secondary winding. The rise time  $t_r$  is proportional to the time constant formed by the stray inductance  $L_s$  and the load resistance  $R_L$ .

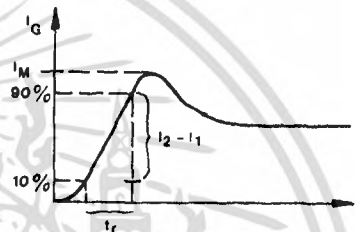
$$t_r = \frac{L_s}{R_L} \quad (1)$$

The load resistance is the sum of all d.c. resistances in the gate circuit. To find the rise time and  $di/dt$  a conventional circuit incorporating a speed-up RC network, which produces a peak  $I_M$  at the start of the pulse is used as shown:

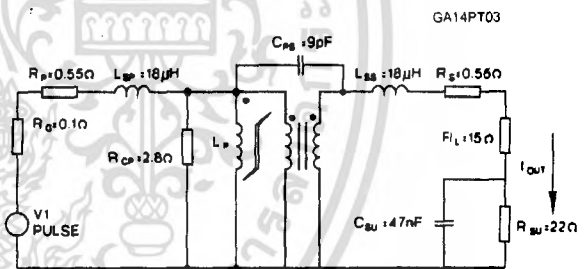


**Fig. 3** Circuit for determining  $t_r$  and  $I_M$   
The rise time of the current is given by

$$\frac{dI_G}{dt} = \frac{I_2 - I_1}{t_r} \quad (2)$$

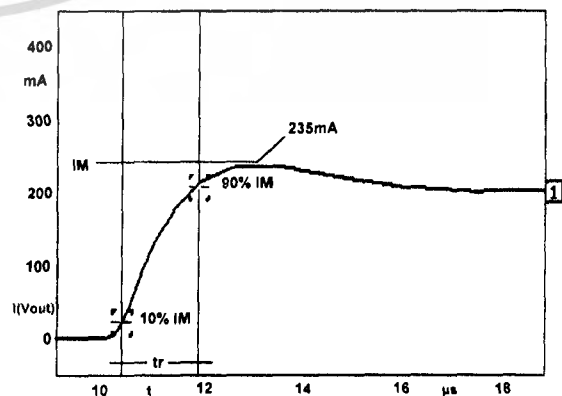


**Fig. 4** Current waveform



**Fig. 5** model of a SKPT 25a3

The same circuit is used to determine the highest obtainable peak current  $I_M$  at the load (gate circuit) resistance  $R_L$



**Fig. 6** SKPT 25a3 measurement of rise time

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The diagram Fig.6 shows the **SKPT 25a3** and the corresponding rise time. The  $di/dt$  may be evaluated from (2):

$$\frac{\Delta I}{t_r} \text{ e.g. } \frac{188 \text{ mA}}{1,56 \mu\text{s}} = 120 \cdot \frac{\text{mA}}{\mu\text{s}}$$

- **Stray inductance  $L_s$ :** The value of this parameter depends mainly on the mechanical layout of the transformer and shows the coupling between core and/or coils. Good coupling means low stray inductance. Therefore, coils with a high number of turns tend to have higher values of  $L_s$ . It can easily be measured by putting the secondary side in short-circuit and connecting an LC-meter at the primary side. If  $L_s$  has a high value,  $di/dt$  will be limited and then  $t_r$  becomes bigger.

The following formula gives the relation between their two parameters

$$L_S = L_{\text{Total}} = L_{sp} + L_{ss} \quad (3)$$

then

$$t_r = \frac{L_{\text{Total}}}{0,83 \cdot (R_L + R_S + \{N_s/N_p\}^2 \cdot R_p)} \quad (4)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{in}}{L_{\text{Total}}} \quad (5)$$

- **Coupling capacitance  $C_{ps}$ :** the coupling capacitance between primary and secondary does not have an influence on the electrical results of the transformer, but in circuits in which sudden high jumps in potential occur, such as in four quadrant converters or in many self-commutated circuits, this value must be minimised. Otherwise the charging current of this capacitance may cause undesired firing of the thyristor. For this reason, transformers with high numbers of turns, have a screen inserted between the primary and the secondary windings.
- **Magnetising inductance or primary inductance ( $L_p$ ):** this parameter depends on the maximum permeability of the core material. The final value must be found with a tolerance - 30 % + 50 % and depends directly on the core temperature. With high permeability materials, we need less turns to achieve the desired  $L_p$ ; low values of  $L_p$  make the transformer more suitable to saturation.
- **Nominal voltage ( $V_{rms}$ ):** this is the voltage in the secondary circuit of the transformer. Creepage distances, isolation tests and isolation distances will be found with this value, and it determines the maximum working voltage between two single windings.
- **Corona voltage ( $V_k$ ):** this voltage is the maximum working voltage before "Corona effect" starts. For all SEMIKRON types, this value is 1,5 ... 1,75 x  $U_{rms}$ .
- **Isolation test voltage ( $V_{isol}$ ):** test voltage winding to winding. The high voltage test checks the galvanic separation of the transformer windings, in particular the dielectric strength and freedom from partial discharge. The test is acc. to VDE 0550, part 1.

The specifications on isolation voltage for equipment are included in IEC Publication IEC 146-1-1: 1991, respectively with EN 60146-1-1: 1993 clause 4.2.1. (= VDE 0558 T1-1: 1993-04) or EN 50 178: 11.1997 = DIN EN 50 178 (VDE 0160) 4.1998

- **Low losses:** thyristors firing transformers operate with pulse currents and high voltage. In windings losses can be reduced by achieving low ohmic values; in cores, losses are smaller by choosing suitable materials for high frequency operations.

**3. Ratings, Characteristics and mechanical outline** see pages B 14 – 103 etc, " $L_{ss}$ " = " $L_s$ "

#### 4. Application examples

The link between the control and the thyristors is the trigger unit. Its function is to produce the required gate trigger current pulses whose frequency, phase, sequence, etc., are determined by signals supplied through the control or regulation electronics.

- **Shape of the trigger pulses:** under critical rate of rise of on-state current, with a steeply increasing main current it is necessary to supply a trigger pulse of high amplitude ( $\approx 5 \cdot I_{GT}$ ) with a steep leading edge ( $\geq 1 \text{ A}/\mu\text{s}$ ). However, even when the current in the commutation circuit only increases relatively slowly, with a parallel connected transient voltage suppression RC snubber network, the steeply increasing discharge current of the capacitor flows through the thyristor when it fires. It is therefore recommended to use high amplitude, steep trigger pulses in all circumstances.

This is particularly important with parallel or series connected thyristors since high amplitude, steeply increasing trigger pulses will ensure simultaneous firing.

In order to determine whether a trigger unit with known values of short circuit current  $I_k$  and open circuit voltage  $V_o$  is adequate, its output characteristic as defined by these values is plotted on a diagram showing also the gate characteristic of the thyristor in question. For this purpose the gate trigger curve, which has normally a logarithmic scale, is re-drawn in a linear scale in Fig.7 such that the output characteristic of the trigger unit is more easily displayed as a straight line connecting  $I_k$  and  $V_o$ , see Fig. 7 next page.

The actual gate characteristic of one particular thyristor of the type in question will lie somewhere between the limiting curves on the diagram. Hence, the possible crossing points of the gate characteristic with the trigger unit output characteristic will lie between the points A and B on the load line.

The width of the trigger pulse should not be less than 10  $\mu\text{s}$ . The value of latching current as specified in SEMIKRON data sheets is valid for trigger pulses of this duration. The thyristor needs about 100  $\mu\text{s}$  to be fully switched-on. See page A - 39:  $di/dt$  and A - 40:  $I_L$ . As the gate pulse width increases, the minimum gate trigger current and the latching current are reduced.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

When a rectifier has a load with back e.m.f., then the thyristors can only trigger when the instantaneous value of the alternating input voltage is higher than the back e.m.f. In order to be sure that the commutation will be achieved, it is necessary in this case to use comparatively wide trigger pulses. The extreme case is the a.c. controller with an inductive load. As a result of the phase shift between current and voltage here it is necessary to have a pulse duration of  $(180-\alpha)^\circ \text{el.}$ , i.e., at 50 Hz up to 10 ms.

Low  $L_p \rightarrow$  fast decreasing of  $I_g$

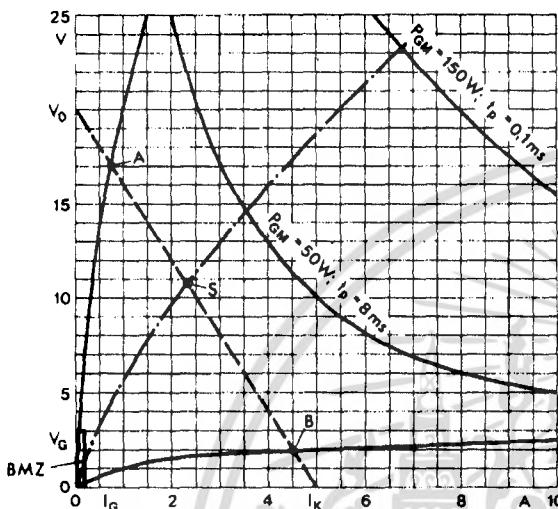


Fig. 7 Gate trigger characteristics (see also B 3 – 16, Fig. 9)

The width of the trigger pulses should not be made unnecessarily long, since long pulses result in a significant gate power dissipation, account of which must be taken when calculating the overall power loss of the thyristor. Necessarily, the limiting power values  $P_{GM}$  as shown in Fig. 7 should in no circumstances be exceeded, otherwise the thyristor could be destroyed. Even when the power loss is well below these maximum values, however, account must be taken of it when the rating of the thyristor is calculated.

In addition to the above, the trigger unit also becomes more expensive with increased output power. Wide pulses mean for the pulse transformer a large voltage-time integral, and that means a larger transformer. For this reason, instead of a single long pulse, a series of short pulses (with a frequency from 5 ... 10 kHz) are often used, **the pulse train solution**. If the gaps between the pulses cause problems, then a second chain of pulses can be superimposed such that a continuous long pulse is still achieved. In this case the pulse transformer needs only be dimensioned for the short duration pulses (e.g. with 7 kHz,  $t_p = 70 \mu\text{s}$ ).

• **Circuits examples:** we are showing in the following examples two typical applications for impulse transformers.

1. **The first example:** simple trigger circuit with current limiting resistor in the primary side is shown in Fig. 8

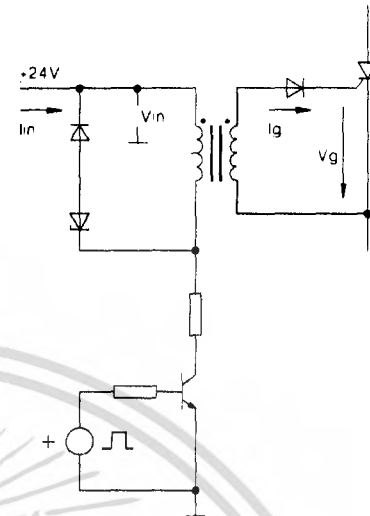


Fig. 8 Trigger circuit with SKPT25a3

$$V_g = V_{in} \cdot \left\{ \frac{N_s}{N_p} \right\}^2 - V_d \quad (7)$$

$$I_g = \frac{I_{in} - I_{mag}}{\frac{N_s}{N_p}} \quad (8)$$

The voltage-time area is found in Fig. 9 during the time  $t$ , (e.g.  $\approx 56 \text{ ms}$ ) and must be smaller than the maximum value  $\int U \cdot dt$  given in the data sheet (e.g.  $350 \mu\text{Vs}$  for SKPT 25a3).

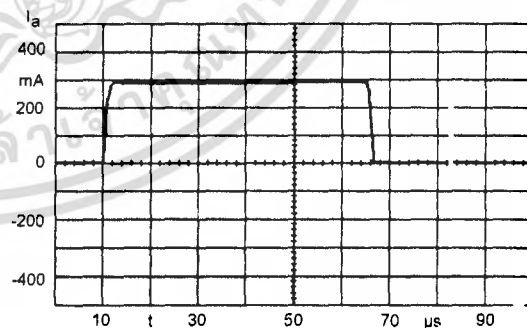


Fig. 9a Input current  $I_{in}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Superposition of two pulse trains 1 and 2 of 5 to 7 kHz using 2 SKPT 25a3.

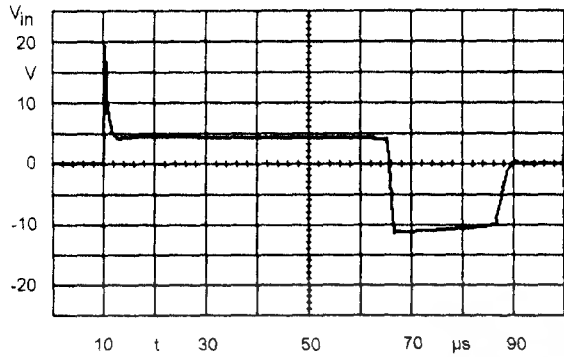


Fig. 9b Input voltage  $V_{in}$

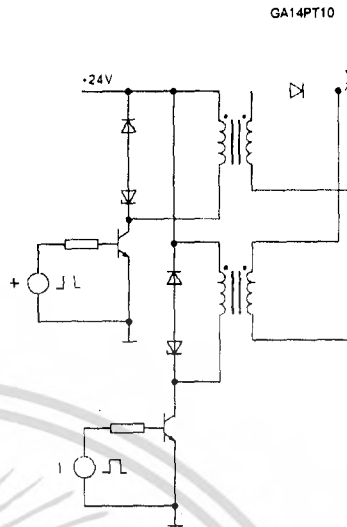


Fig. 10 Circuit of the superposition of two pulse trains of short pulses of two SKPT 25a3

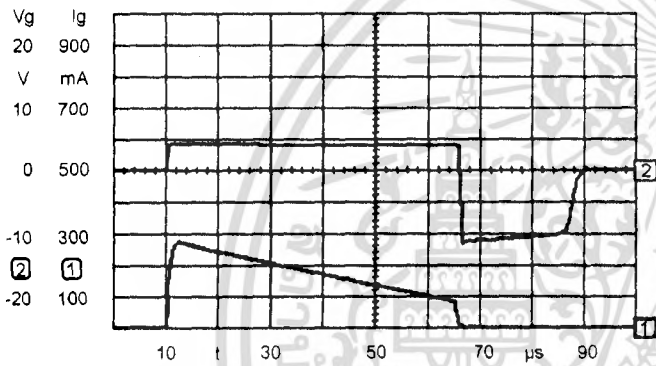


Fig. 9c Output voltage  $v_g$  (curve 2) and output current  $i_g$  (curve 1) of SKPT 25a3 (see Fig. 8)

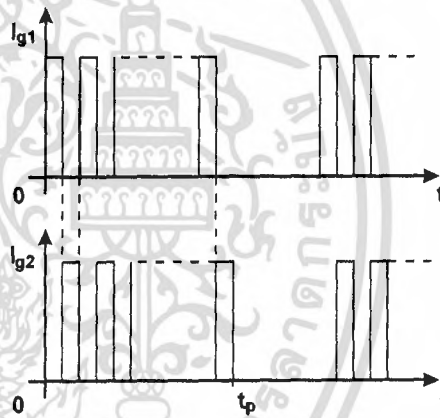
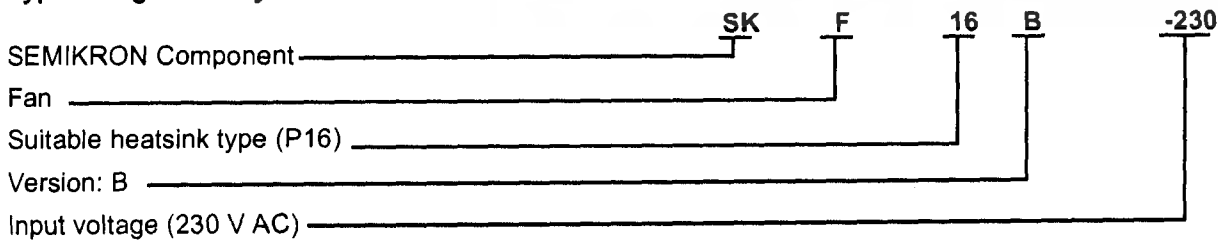


Fig. 11 The two pulse trains of gate current overlapping over  $t_p = 180^\circ - \alpha$  for inductive loads

**2. The second example:** The pulse transformer is intended to deliver long pulses without using big pulse transformers ( $t_p \geq 1$  ms) as needed for inductive loads up to  $t_p = 180^\circ - \alpha$ ). The solution is as follows

### 14.3 Fans

#### Type Designation System



#### Captions of the Figures

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 14.4 Semiconductor Fuses (page B 14 – 113)

Such rapid fuses are needed to protect the convertor from an unlimited current flow from supply line.

To choose a suitable fast tripping (<10 ms) semiconductor fuse first determine the  $I^2t$  of the device and the supply line voltage and the suitable mechanical size according to the datasheet. Then select - for the given line voltage -the  $I^2t$  of the fuse type <  $I^2t$  of device (hot). This would protect

against damage to the equipment by surge current and short circuit current as a failure mode, may be up to 100 times. To protect against overload the max.  $I_{RMS}$  value of the application circuit must be taken into account to select the fuse with  $I_{RMS} < I_{RMS}$  permissible of equipment regarding  $Z_{thjn}$ ,  $t_p$  and  $T_{vjm}$ .

## 14.5 Mounting Clamps (MC..., BC...) for Capsule Devices (page B 14 – 117)

When mounting capsule devices regard the special mounting instructions of the semiconductor device given for instance on pages A – 41 or A – 83 and in the data sheet.

When mounting boxclamps regard the correct sequence and direction of the Belleville washers. First tighten screw by hand equally and crosswise then use a spanner, until the gap between boxclamp and heatsink is disappeared.

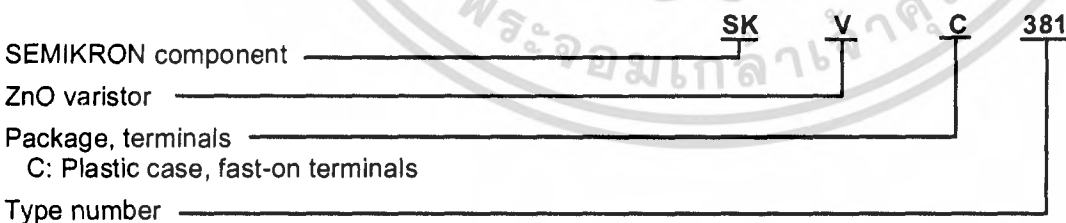
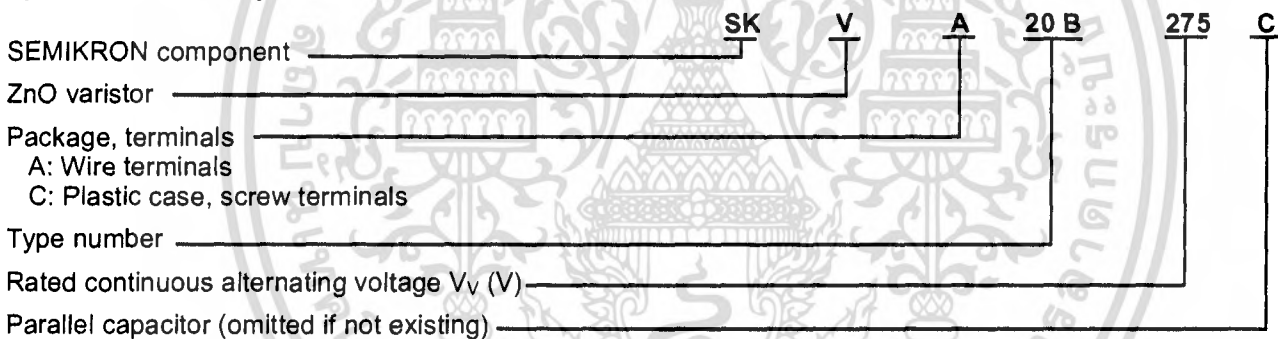
The plastic part meets UL 94V-0

## 14.6 Metal Oxide (ZnO) Varistors (page B 14 – 121)

A varistor is a variable resistor which varies depending on applied voltage, i.e. gets very low at high voltage spikes conducting substantial current up to  $I_p$  and dissipating

energy [Ws] over  $\mu s$  to a limited extent (see datasheet clipping voltage spikes to an undangerous level).

### Type Designation Systems



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DAC1218/DAC1219 12-Bit Binary Multiplying D/A Converter

## General Description

The DAC1218 and the DAC1219 are 12-bit binary, 4-quadrant multiplying D to A converters. The linearity, differential non-linearity and monotonicity specifications for these converters are all guaranteed over temperature. In addition, these parameters are specified with standard zero and full-scale adjustment procedures as opposed to the impractical best fit straight line guarantee.

This level of precision is achieved through the use of an advanced silicon-chromium (SiCr) R-2R resistor ladder network. This type of thin-film resistor eliminates the parasitic diode problems associated with diffused resistors and allows the applied reference voltage to range from -25V to 25V, independent of the logic supply voltage.

CMOS current switches and drive circuitry are used to achieve low power consumption (20 mW typical) and minimize output leakage current errors (10 nA maximum). Unique digital input circuitry maintains TTL compatible input threshold voltages over the full operating supply voltage range.

The DAC1218 and DAC1219 are direct replacements for the AD7541 series, AD7521 series, and AD7531 series with a significant improvement in the linearity specification. In applications where direct interface of the D to A converter to

a microprocessor bus is desirable, the DAC1208 and DAC1230 series eliminate the need for additional interface logic.

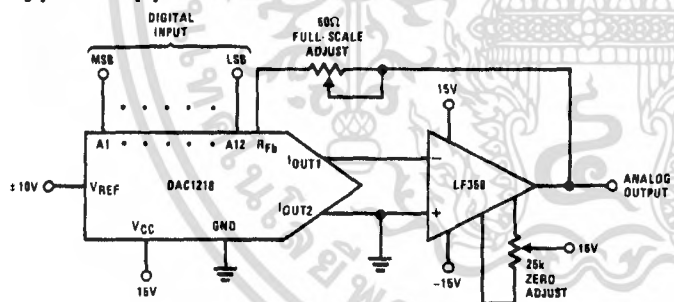
## Features

- Linearity specified with zero and full-scale adjust only
- Logic inputs which meet TTL voltage level specs (1.4V logic threshold)
- Works with ±10V reference—full 4-quadrant multiplication
- All parts guaranteed 12-bit monotonic

## Key Specifications

- Current Settling Time 1 μs
- Resolution 12 Bits
- Linearity (Guaranteed over temperature) 12 Bits (DAC1218)  
11 Bits (DAC1219)
- Gain Tempco 1.5 ppm/°C
- Low Power Dissipation 20 mW
- Single Power Supply 5 V<sub>DC</sub> to 15 V<sub>DC</sub>

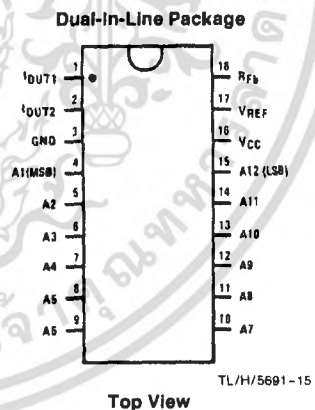
## Typical Application



$$V_{OUT} = -V_{REF} \left( \frac{A1}{2} + \frac{A2}{4} + \frac{A3}{8} + \dots + \frac{A12}{4096} \right)$$

where: AN = 1 if digital input is high  
AN = 0 if digital input is low

## Connection Diagram



## Ordering Information

Temperature Range		0°C to +70°C	-40°C to +85°C	Package Outline
Non Linearity	0.012%	DAC1218LCJ-1	DAC1218LCJ	J18A Cerdip
	0.024%		DAC1219LCJ	J18A Cerdip

BiFET™ is a trademark of National Semiconductor Corp.

DAC1218/DAC1219 12-Bit Binary Multiplying D/A Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Absolute Maximum Ratings (Notes 1 and 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage ( $V_{CC}$ )	17 $V_{DC}$
Voltage at Any Digital Input	$V_{CC}$ to GND
Voltage at $V_{REF}$ Input	$\pm 25V$
Storage Temperature Range	$-65^{\circ}C$ to $+150^{\circ}C$
Package Dissipation at $T_A = 25^{\circ}C$ (Note 3)	500 mW
DC Voltage Applied to $I_{OUT1}$ or $I_{OUT2}$ (Note 4)	$-100$ mV to $V_{CC}$
Lead Temp. (Soldering, 10 seconds)	$300^{\circ}C$
ESD Susceptibility (Note 11)	800V

### Operating Conditions

Temperature Range	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$
DAC1218LCJ, DAC1219LCJ	$-40^{\circ}C \leq T_A \leq +85^{\circ}C$
DAC1218LCJ-1	$0^{\circ}C \leq T_A \leq 70^{\circ}C$
Range of $V_{CC}$	5 $V_{DC}$ to 16 $V_{DC}$
Voltage at Any Digital Input	$V_{CC}$ to GND

### Electrical Characteristics

$V_{REF} = 10.000 V_{DC}$ ,  $V_{CC} = 11.4 V_{DC}$  to  $15.75 V_{DC}$  unless otherwise noted. **Boldface limits apply from  $T_{MIN}$  to  $T_{MAX}$  (see Note 9); all other limits  $T_A = T_J = 25^{\circ}C$ .**

Parameter	Conditions	Notes	Typ (Note 10)	Tested Limit (Note 11)	Design Limit (Note 12)	Units
Resolution			12	<b>12</b>	<b>12</b>	Bits
Linearity Error (End Point Linearity)	Zero and Full-Scale Adjusted DAC1218 DAC1219	4, 5, 9		$\pm 0.018$ $\pm 0.024$	$\pm 0.018$ $\pm 0.024$	% of FSR % of FSR
Differential Non-Linearity	Zero and Full-Scale Adjusted DAC1218 DAC1219	4, 5, 9		$\pm 0.018$ $\pm 0.024$	$\pm 0.018$ $\pm 0.024$	% of FSR % of FSR
Monotonicity		4	12	12	<b>12</b>	Bits
Gain Error (Min)	Using Internal $R_{FB}$ , $V_{REF} = \pm 10V, \pm 1V$	5	-0.1	0.0		% of FSR
Gain Error (Max)		5	-0.1	-0.2		% of FSR
Gain Error Tempco		5	$\pm 1.3$		$\pm 6.0$	ppm of FS/ $^{\circ}C$
Power Supply Rejection	All Digital Inputs High	5	$\pm 3.0$	$\pm 30$		ppm of FSR/V
Reference Input Resistance	(Min)	9	15	<b>10</b>	<b>10</b>	k $\Omega$
	(Max)	9	15	<b>20</b>	<b>20</b>	k $\Omega$
Output Feedthrough Error	$V_{REF} = 120$ Vp-p, $f = 100$ kHz All Data Inputs Low	6	3.0			mVp-p
Output Capacitance	All Data Inputs High				200	pF
	$I_{OUT1}$				70	pF
	All Data Inputs Low				70	pF
	$I_{OUT2}$				200	pF
Supply Current Drain		9		2.0	<b>2.5</b>	mA
Output Leakage Current	$I_{OUT1}$	7, 9				nA
	$I_{OUT2}$					nA
Digital Input Threshold	Low Threshold	9		<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	$V_{DC}$
	High Threshold			<b>2.2</b>	<b>2.2</b>	$V_{DC}$
Digital Input Currents	Digital Inputs $< 0.8V$	9		<b>-200</b>	<b>-200</b>	$\mu A_{DC}$
	Digital Inputs $> 2.2V$			<b>10</b>	<b>10</b>	$\mu A_{DC}$
$t_s$ Current Settling Time	$R_L = 100\Omega$ , Output Settled to 0.01%, All Digital Inputs Switched Simultaneously		1			$\mu s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# Bolymin, Inc.

EL Inverter Specification

P/N: IVEL-01

Customer		Date	99/12/03	Rev	A
Part No	IVEL-01	Item	DC/AC INVERTER	Dwg. No	

## ● Specification

Input(V/Dc)	Output(V/Ac)	Frequency(Hz)	Input(mA/Dc)	El range(c m <sup>2</sup> )	Test Dummy Load=El(cr)
5V/DC±10%	80V±15%	600Hz±20%	60mA TYP.	30~80 c m <sup>2</sup>	22nF//66.6K Ω

● Test Condition: @25°C, Dc 5V & Standard Dummy Load.

● Test equipment :

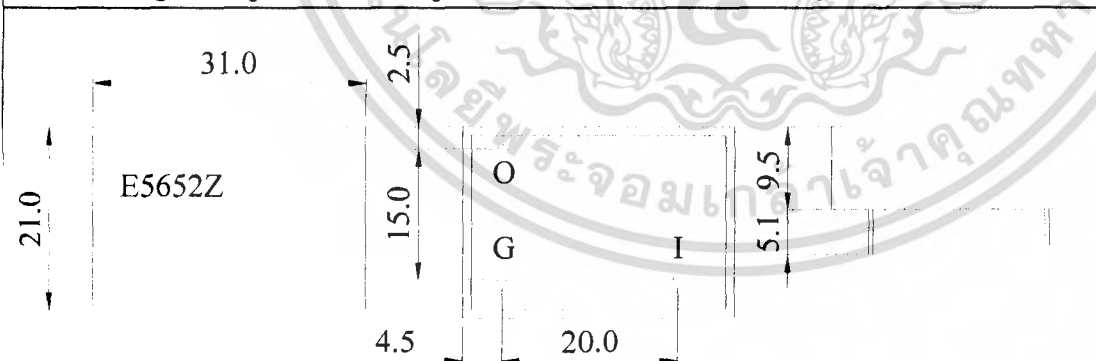
1. Millimeter : FLUKE 87S Millimeter.
2. Oscilloscope : Tektronic TDS210 Digital Oscilloscope.
3. Power supply : Gw GPC-3030D Dc Power Supply.
4. Load : EPI – LOAD – 01 Multi Range Load.

● Operation Temperature : -10°C ~ +70°C

● Storage Temperature : -30°C ~ +80°C

Note :

1. Warning : output do not open or short . Inverter may be burnout.

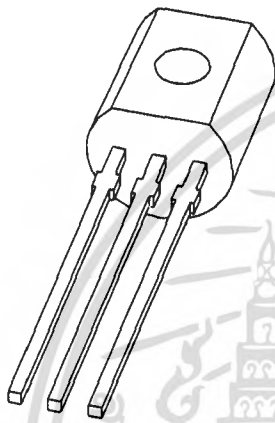


PIN	Description
I	Input DC Voltage.
G	DC/AC ground.
O	Output AC Voltage.

Tolerance: +0.5mm

Prepare: <small>เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า</small> ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น	Checked: <small>ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้า</small>	Approval: <small>ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้</small>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------

# DATA SHEET



## MPSA26; MPSA27 NPN Darlington transistors

Product specification  
Supersedes data of 1997 Apr 17

1999 Apr 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Philips  
Semiconductors



PHILIPS

# NPN Darlington transistors

# MPSA26; MPSA27

### FEATURES

- High current (max. 500 mA)
- Low voltage (max. 60 V)
- High DC current gain (min. 10000).

### APPLICATIONS

- High gain amplification.

### DESCRIPTION

NPN Darlington transistor in a TO-92; SOT54 plastic package.

### PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	collector
2	base
3	emitter

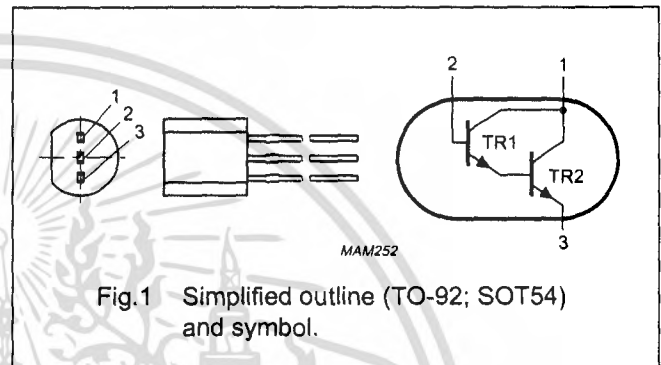


Fig.1 Simplified outline (TO-92; SOT54) and symbol.

### LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V <sub>CBO</sub>	collector-base voltage	open emitter			
	MPSA26		-	50	V
	MPSA27		-	60	V
V <sub>CES</sub>	collector-emitter voltage	V <sub>BE</sub> = 0			
	MPSA26		-	50	V
	MPSA27		-	60	V
V <sub>EBO</sub>	emitter-base voltage	open collector	-	10	V
I <sub>C</sub>	collector current (DC)		-	500	mA
I <sub>CM</sub>	peak collector current		-	1	A
I <sub>B</sub>	base current (DC)		-	100	mA
P <sub>tot</sub>	total power dissipation	T <sub>amb</sub> ≤ 25 °C; note 1	-	500	mW
T <sub>stg</sub>	storage temperature		-65	+150	°C
T <sub>j</sub>	junction temperature		-	150	°C
T <sub>amb</sub>	operating ambient temperature		-65	+150	°C

### Note

1. Transistor mounted on an FR4 printed-circuit board.

## NPN Darlington transistors

## MPSA26; MPSA27

## THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th\ j-a}$	thermal resistance from junction to ambient	note 1	250	K/W

## Note

1. Transistor mounted on an FR4 printed-circuit board.

## CHARACTERISTICS

$T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$  unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$I_{CBO}$	collector cut-off current MPSA26	$I_E = 0; V_{CB} = 40\text{ V}$	-	-	100	nA
$I_{CBO}$	collector cut-off current MPSA27	$I_E = 0; V_{CB} = 50\text{ V}$	-	-	100	nA
$I_{EBO}$	emitter cut-off current	$I_C = 0; V_{EB} = 10\text{ V}$	-	-	100	nA
$h_{FE}$	DC current gain	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}; \text{ see Fig.2}$	10000	-	-	
		$I_C = 100\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}; \text{ see Fig.2}$	10000	-	-	
$V_{CEsat}$	collector-emitter saturation voltage	$I_C = 100\text{ mA}; I_B = 0.1\text{ mA}$	-	-	1.5	V
$V_{BEsat}$	base-emitter saturation voltage	$I_C = 100\text{ mA}; I_B = 0.1\text{ mA}$	-	-	1.5	V
$V_{BEon}$	base-emitter on-state voltage	$I_C = 100\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}$	-	-	2	V
$f_T$	transition frequency	$I_C = 30\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}; f = 100\text{ MHz}$	125	220	-	MHz

# MUR120 Series

Preferred Devices

## SWITCHMODE™ Power Rectifiers

MUR105, MUR110, MUR115, MUR120,  
MUR130, MUR140, MUR160

The MUR120 series of SWITCHMODE power rectifiers are designed for use in switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes.

### Features

- Ultrafast 25, 50 and 75 Nanosecond Recovery Times
- 175°C Operating Junction Temperature
- Low Forward Voltage
- Low Leakage Current
- High Temperature Glass Passivated Junction
- Reverse Voltage to 600 V
- Shipped in Plastic Bags; 1,000 per Bag
- Available Tape and Reel; 5,000 per Reel, by adding a "RL" Suffix to the Part Number
- These are Pb-Free Devices\*

### Mechanical Characteristics:

- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 0.4 Gram (Approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds
- Polarity: Cathode Indicated by Polarity Band



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

ULTRAFAST RECTIFIERS  
1.0 AMPERE, 50 – 600 VOLTS



AXIAL LEAD  
CASE 59  
STYLE 1

### MARKING DIAGRAM



A = Assembly Location  
MUR1xx = Specific Device Code  
Y = Year  
WW = Work Week  
▪ = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

### 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.

## MUR120 Series

### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	MUR							Unit
		105	110	115	120	130	140	160	
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	$V_{RRM}$ $V_{RWM}$ $V_R$	50	100	150	200	300	400	600	V
Average Rectified Forward Current (Square Wave Mounting Method #3 Per Note 2)	$I_{F(AV)}$	1.0 @ $T_A = 130^\circ\text{C}$				1.0 @ $T_A = 120^\circ\text{C}$			A
Nonrepetitive Peak Surge Current (Surge applied at rated load conditions, halfwave, single phase, 60 Hz)	$I_{FSM}$	35							A
Operating Junction Temperature and Storage Temperature	$T_J, T_{stg}$	-65 to +175							$^\circ\text{C}$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Maximum Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	Note 2	$^\circ\text{C}/\text{W}$

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Maximum Instantaneous Forward Voltage (Note 1) ( $I_F = 1.0 \text{ Amp}$ , $T_J = 150^\circ\text{C}$ ) ( $I_F = 1.0 \text{ Amp}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	$V_F$	0.710 0.875	1.05 1.25	V
Maximum Instantaneous Reverse Current (Note 1) (Rated DC Voltage, $T_J = 150^\circ\text{C}$ ) (Rated DC Voltage, $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	$I_R$	50 2.0	150 5.0	$\mu\text{A}$
Maximum Reverse Recovery Time ( $I_F = 1.0 \text{ A}$ , $di/dt = 50 \text{ A}/\mu\text{s}$ ) ( $I_F = 0.5 \text{ A}$ , $I_R = 1.0 \text{ A}$ , $I_{REC} = 0.25 \text{ A}$ )	$t_{rr}$	35 25	75 50	ns
Maximum Forward Recovery Time ( $I_F = 1.0 \text{ A}$ , $di/dt = 100 \text{ A}/\mu\text{s}$ , $I_{REC}$ to 1.0 V)	$t_{fr}$	25	50	ns

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



**SEMICONDUCTOR**  
TECHNICAL SPECIFICATION



**SINGLE-PHASE GLASS PASSIVATED  
SILICON BRIDGE RECTIFIER**

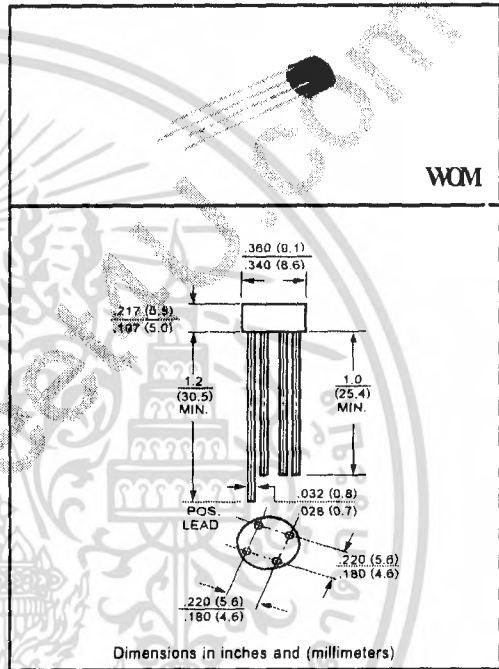
VOLTAGE RANGE 50 to 1000 Volts CURRENT 1.5 Amperes

**FEATURES**

- High reverse voltage to 1000V
- Surge over load ratings to 50 amperes peak
- Good for printed circuit board assembly
- Mounting position: Any
- Weight: 1.20 grams

**MECHANICAL DATA**

- UL listed the recognized component directory, file #E94233
- Epoxy: Device has UL flammability classification 94V-0



**MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

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

**MAXIMUM RATINGS** (At TA = 25°C unless otherwise noted)

RATINGS	SYMBOL	W005M	W01M	W02M	W04M	W06M	W08M	W10M	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	VRRM	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
Maximum RMS Bridge Input Voltage	VRMS	35	70	140	280	420	560	700	Volts
Maximum DC Blocking Voltage	Vbc	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
Maximum Average Forward Rectified Output Current at TA = 25°C	Io	1.5							Amps
Peak Forward Surge Current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method)	I <sub>FSM</sub>	50							Amps
Operating Temperature Range	T <sub>J</sub>	-55 to + 150							°C
Storage Temperature Range	T <sub>STG</sub>	-55 to + 150							°C

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** (At TA = 25°C unless otherwise noted)

CHARACTERISTICS	SYMBOL	W005M	W01M	W02M	W04M	W06M	W08M	W10M	UNITS	
Maximum Forward Voltage Drop per element at 1.0A DC	V <sub>F</sub>	1.0								Volts
Maximum Reverse Current at Rated	I <sub>R</sub>	5.0							uAmps	
DC Blocking Voltage per element		1							mAmps	

2002-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## RATING AND CHARACTERISTIC CURVES ( W005M THRU W10M )

FIG. 1 - MAXIMUM NON-REPETITIVE FORWARD SURGE CURRENT

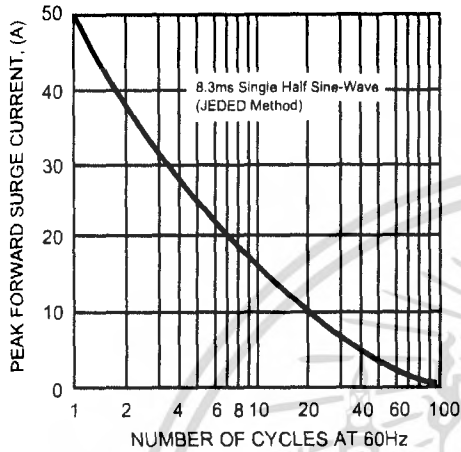


FIG. 2 - TYPICAL FORWARD CURRENT DERATING CURVE

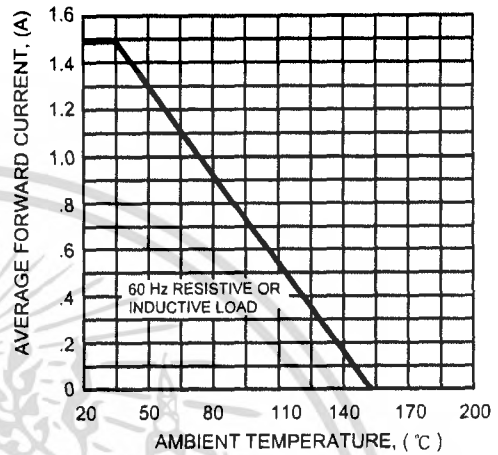


FIG. 3 - TYPICAL INSTANTANEOUS FORWARD CHARACTERISTICS

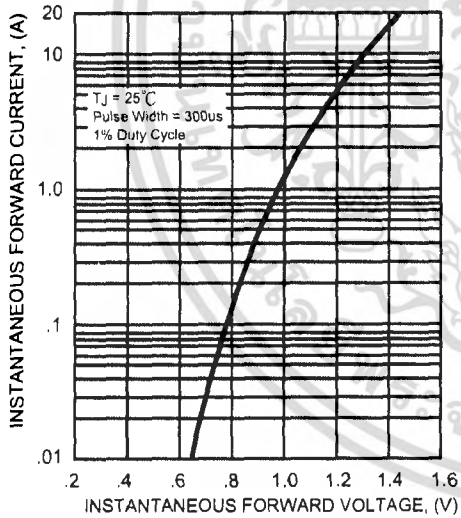
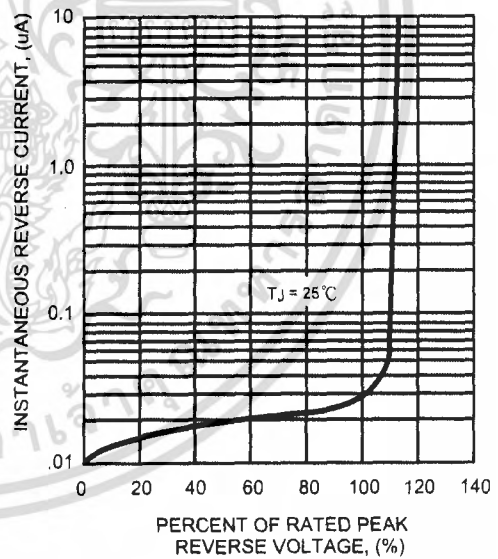


FIG. 4 - TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS



 **RECTRON**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# HA17741/PS

General-Purpose Operational Amplifier  
(Frequency Compensated)

# HITACHI

## Description

The HA17741/PS is an internal phase compensation high-performance operational amplifier, that is appropriate for use in a wide range of applications in the test and control fields.

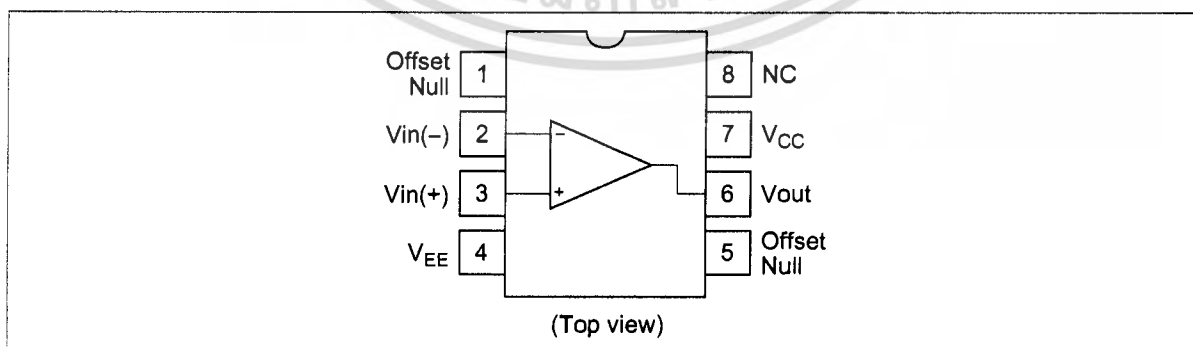
## Features

- High voltage gain : 106 dB (Typ)
- Wide output amplitude :  $\pm 13$  V (Typ) (at  $R_L \geq 2$  k $\Omega$ )
- Shorted output protection
- Adjustable offset voltage
- Internal phase compensation

## Ordering Information

Application	Type No.	Package
Industrial use	HA17741PS	DP-8
Commercial use	HA17741	

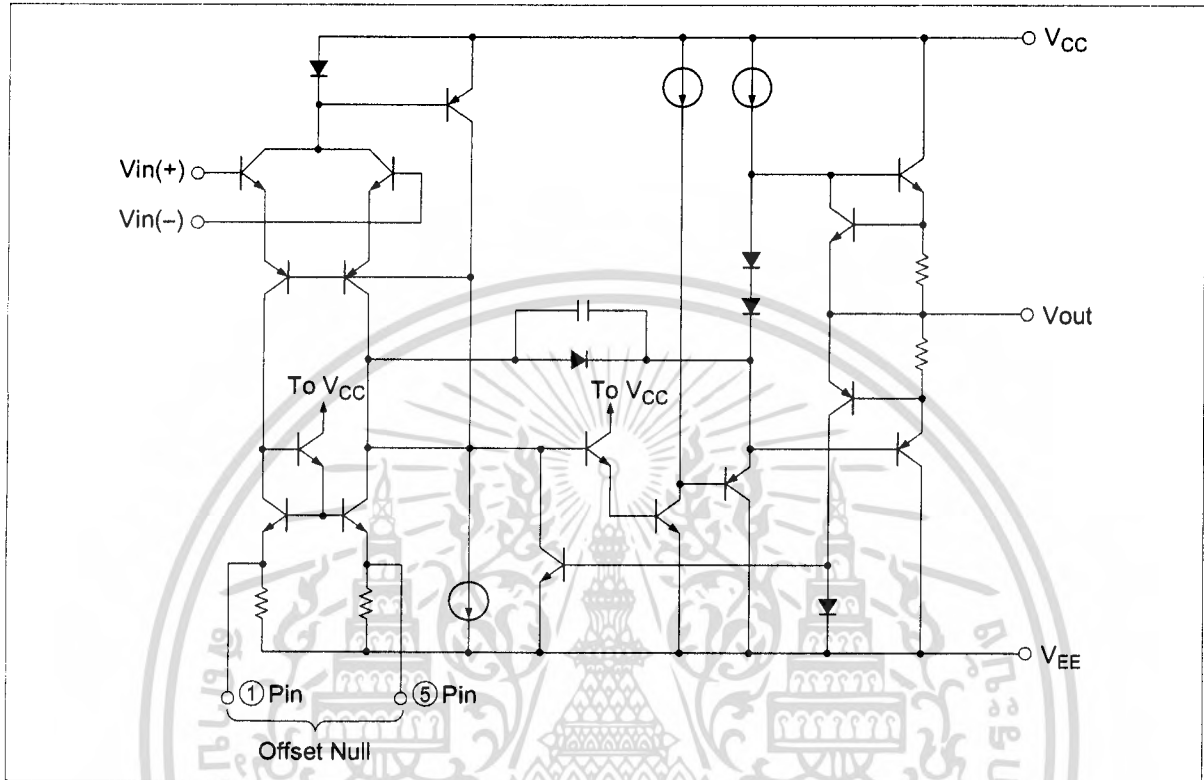
## Pin Arrangement



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# HA17741/PS

## Circuit Structure



### Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Item	Symbol	Ratings		Unit
		HA17741PS	HA17741	
Power-supply voltage	V <sub>CC</sub>	+18	+18	V
	V <sub>EE</sub>	-18	-18	V
Input voltage	V <sub>in</sub>	±15	±15	V
Differential input voltage	V <sub>in(diff)</sub>	±30	±30	V
Allowable power dissipation	P <sub>T</sub>	670 *	670 *	mW
Operating temperature	T <sub>opr</sub>	-20 to +75	-20 to +75	°C
Storage temperature	T <sub>stg</sub>	-55 to +125	-55 to +125	°C

Note: These are the allowable values up to Ta = 45°C. Derate by 8.3 mW/°C above that temperature.

**HITACHI**

**Electrical Characteristics**

**Electrical Characteristics-1** ( $V_{CC} = -V_{EE} = 15\text{ V}$ ,  $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

Item	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Test Condition
Input offset voltage	$V_{IO}$	—	1.0	6.0	mV	$R_s \leq 10\text{ k}\Omega$
Input offset current	$I_{IO}$	—	18	200	nA	
Input bias current	$I_{IB}$	—	75	500	nA	
Power-supply rejection ratio	$\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$	—	30	150	$\mu\text{V/V}$	$R_s \leq 10\text{ k}\Omega$
	$\Delta V_{IO}/\Delta V_{EE}$	—	30	150	$\mu\text{V/V}$	$R_s \leq 10\text{ k}\Omega$
Voltage gain	$A_{VD}$	86	106	—	dB	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_{out} = \pm 10\text{ V}$
Common-mode rejection ratio	CMR	70	90	—	dB	$R_s \leq 10\text{ k}\Omega$
Common-mode input voltage range	$V_{CM}$	$\pm 12$	$\pm 13$	—	V	$R_s \leq 10\text{ k}\Omega$
Maximum output voltage amplitude	$V_{OP-P}$	$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$	—	V	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$
Power dissipation	$P_d$	—	65	100	mW	No load
Slew rate	SR	—	1.0	—	V/ $\mu\text{s}$	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$
Rise time	$t_r$	—	0.3	—	$\mu\text{s}$	$V_{in} = 20\text{ mV}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$ ,
Overshoot	$V_{over}$	—	5.0	—	%	$C_L = 100\text{ pF}$
Input resistance	$R_{in}$	0.3	1.0	—	M $\Omega$	

**Electrical Characteristics-2** ( $V_{CC} = -V_{EE} = 15\text{ V}$ ,  $T_a = -20\text{ to }+75^\circ\text{C}$ )

Item	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Test Condition
Input offset voltage	$V_{IO}$	—	—	9.0	mV	$R_s \leq 10\text{ k}\Omega$
Input offset current	$I_{IO}$	—	—	400	nA	
Input bias current	$I_{IB}$	—	—	1,100	nA	
Voltage gain	$A_{VD}$	80	—	—	dB	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_{out} = \pm 10\text{ V}$
Maximum output voltage amplitude	$V_{OP-P}$	$\pm 10$	—	—	V	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$

HITACHI

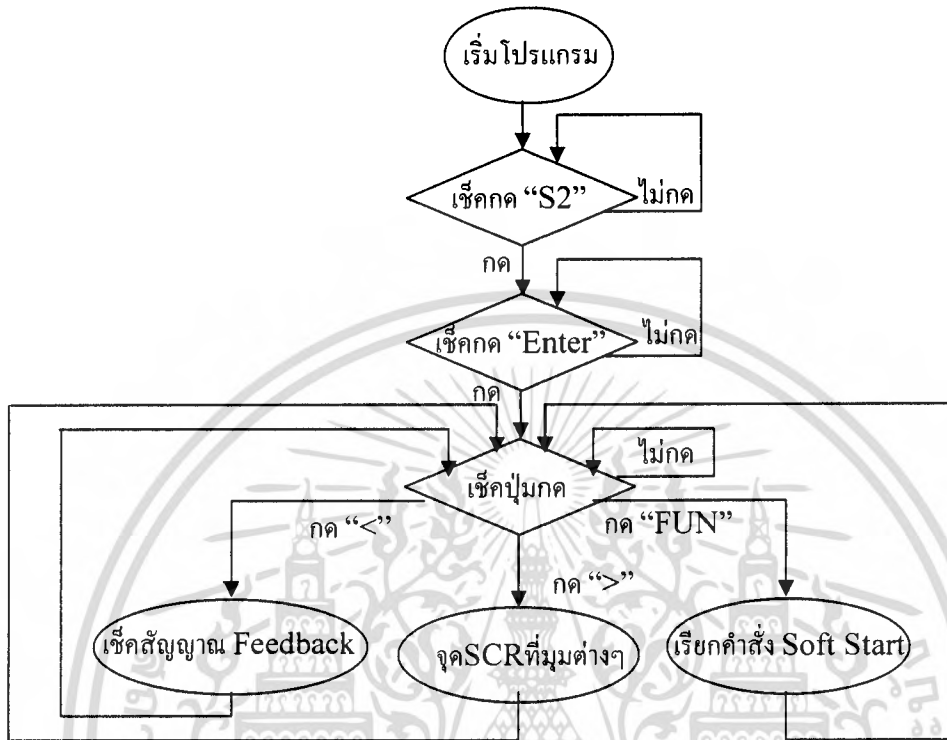
## บรรณานุกรม

- [1] นายอดิเรก โพธิบุตร และคณะ , ชุดสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส  
ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2545
- [2] วีระเชษฐ์ ชั้นเงิน และ วุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์ , อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- [3] นคร ภัคดีชาติ และคณะ , dsPIC Microcontroller กับ MPLAB C30
- [4] วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล และ ชัยวัฒน์ ลัมพรจิตวิไล , เรียนรู้และปฏิบัติ  
การไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51
- [5] ปัญญา ยอดโอวาท , เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ
- [6] สมยศ จุณณะปิยะ , การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์
- [7] เอกสารเผยแพร่ความรู้เทคโนโลยีประหยัดพลังงานการไฟฟ้าฝ่ายผลิต  
แห่งประเทศไทย
- [8] <http://www.9engineer.com/> เรียบเรียงโดย สุชิน เสือช้อย
- [9] <http://www.xeceldrives.co.th>
- [10] การเลือกใช้ไดร์ฟแรงต่ำสำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่  
โดยพิรพงศ์ ลัมประสิทธิ์วงศ์

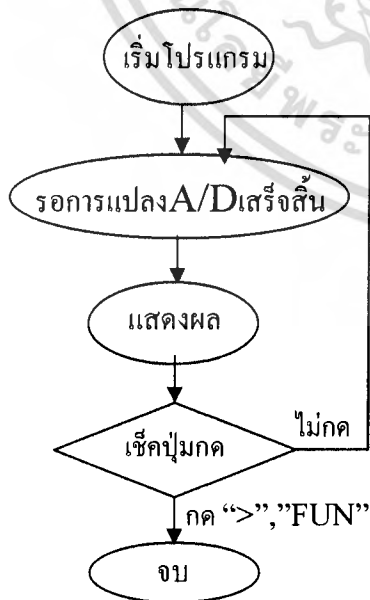


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

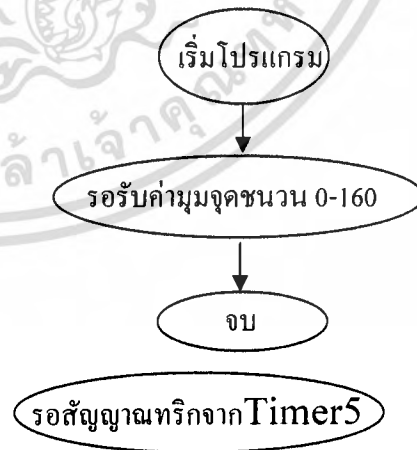
# MAIN PROGRAM



## เช็คสัญญาณ Feedback

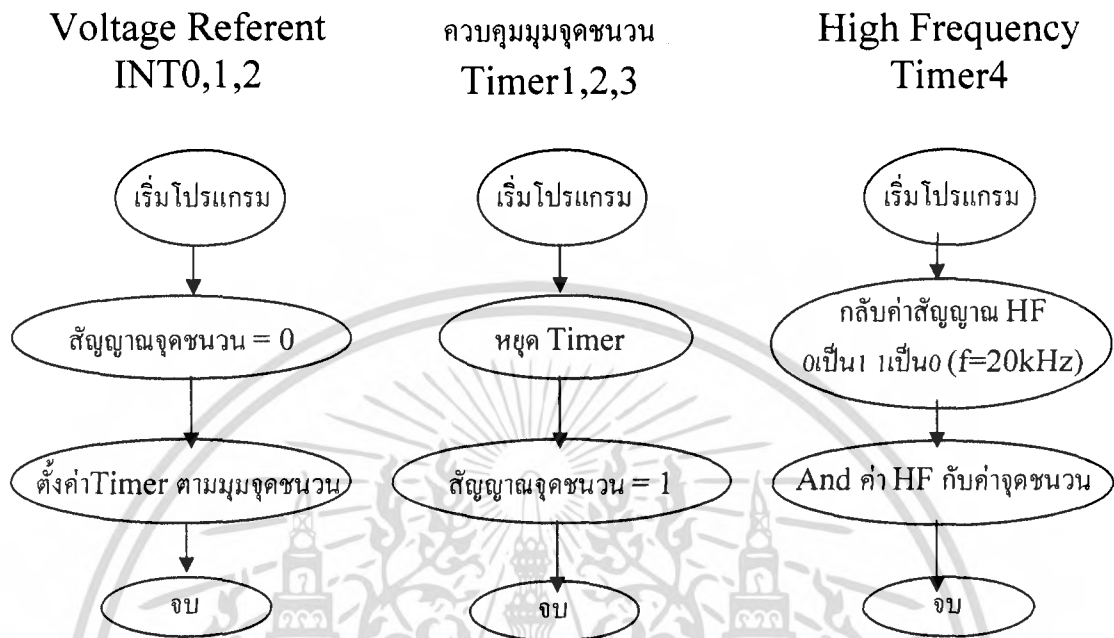


## จุดSCRที่มุมต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรมควบคุมการจุด SCR

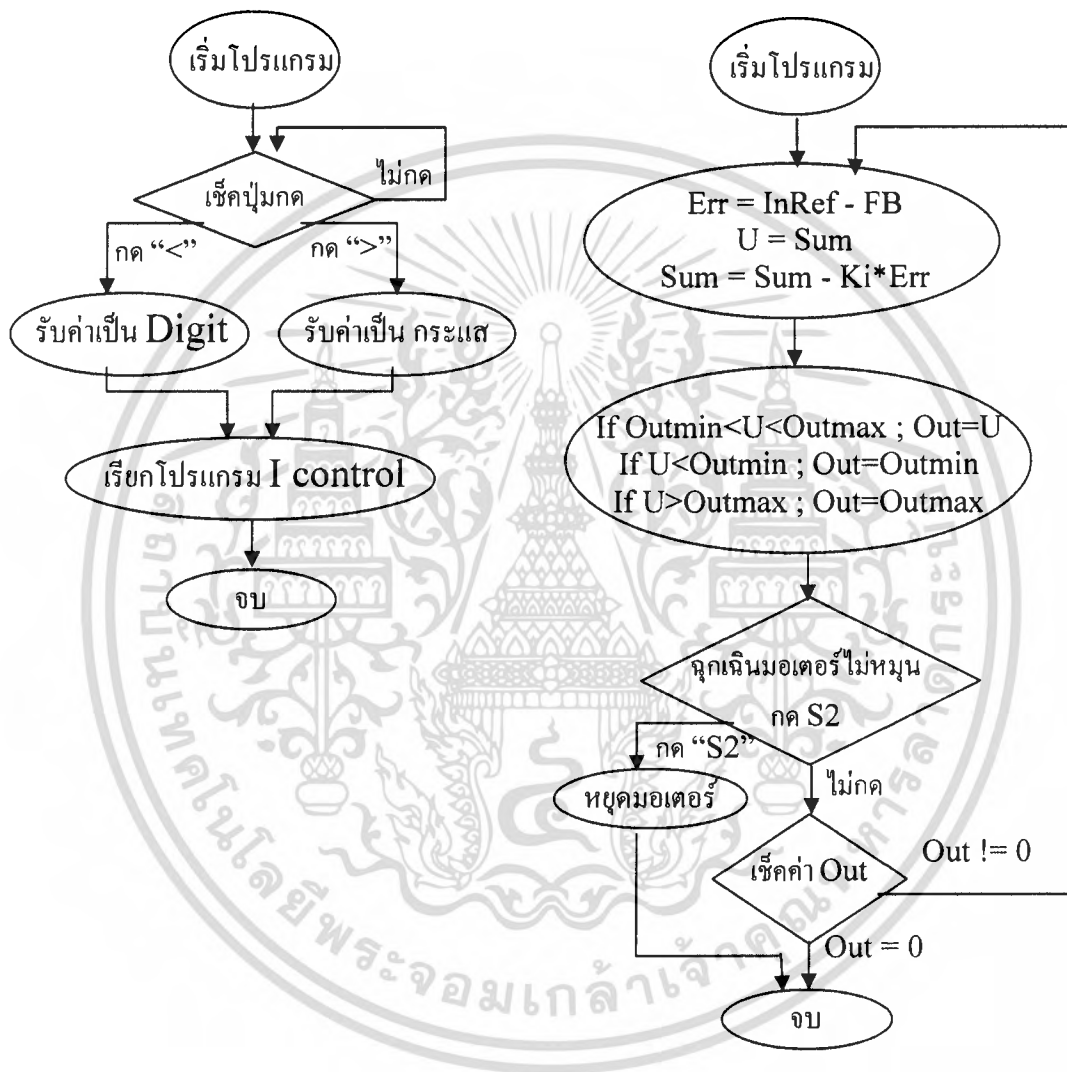


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# คำสั่ง **Soft Start**

MAIN

โปรแกรม I control



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรมการทำงาน

```
#include<p30f4011.h>
#include<ports.h>
#include<timer.h>
#define RS LATEbits.LATE5
#define E LATEbits.LATE4
#define CountN 1000
#define KI 0.1
#define smax 5000
#define smin -5000
#define Omax 832
#define Omin 0
#define Tout 0
//-----
unsigned int dx,dy,dh,lvk,X,la,num1,num2,num3;
unsigned int match_value4,match_value5,ipadc;
unsigned int LT1,TS02,TS03,TS4,TS5,TS6;
unsigned int lref,lref2,Err,FB,Out,FB01,Kii,abc;
unsigned int LT2,Y,c,dc,aaa,dz;
unsigned int da[8]={0,0,0,0,0,0,0,0};
signed int X1,Ua,sum;
//-----
void lcd_delay(unsigned int ms)
{
    unsigned int x,a;
    for(x=0;x<ms;x++)
    {
        for(a=0;a<500;a++);
    }
}
//-----
void delay_ms(unsigned int ms)
{
    unsigned int x,a;
    for(x=0;x<ms;x++)
    {
        for(a=0;a<5000;a++);
    }
}
//-----
void lcd_command(unsigned char com)
{
    unsigned char buff;
    buff = (com & 0xF0)>>4;
    RS = 0;
    E = 1;
    LATE = (LATE & 0xF0)|buff;
    lcd_delay(8);
    E = 0;
    lcd_delay(8);
    buff = (com & 0x0F);
    RS = 0;
    E = 1;
    LATE = (LATE & 0xF0)|buff ;
    lcd_delay(8);
    E = 0;
    lcd_delay(8);
}
//-----
void lcd_text(char text)
{
    unsigned char buff;
    buff = (text & 0xF0)>>4;
    RS = 1;
    E = 1;
    LATE = (LATE & 0xF0)|buff;
    lcd_delay(1);
    E = 0;
    cd_delay(1);
    buff = (text & 0x0F);
    RS = 1;
    E = 1;
    LATE = (LATE & 0xF0)|buff;
    lcd_delay(1);
    E = 0;
    lcd_delay(1);
}
//-----
void lcd_1_int(int intt)
{
    char text = '0' + intt;
    lcd_text(text);
}
//-----
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void lcd_init()
{
    TRISE = 0x0100;
    delay_ms(500);
    lcd_command(0x33);
    lcd_command(0x32);
    lcd_command(0x28);
    lcd_command(0x0C);
    lcd_command(0x01);
}
//-----
void lcd_puts_step(unsigned char line,char
*p,unsigned int msec)
{
    lcd_command(0x02);
    lcd_command(line);
    while(*p)
    {
        lcd_text(*p);
        p++;
        lcd_delay(msec);
    }
}
//-----
void inttolcd(unsigned char posi, unsigned int value)
{
    char buff[6],buff1,buff2;
    lcd_command(posi);
    buff[5] = '0' + (value % 10);
    value /= 10;
    buff[4] = '0' + (value % 10);
    value /= 10;
    buff[3] = '.';
    buff[2] = '0' + (value % 10);
    value /= 10;
    buff1 = value % 10;
    value /= 10;
    buff2 = value % 10;
    if ( buff2 == 0 )
    {
        buff[0] = ' ';
        if ( buff1 == 0 ) buff[1] = ' ';
        else buff[1] = '0' + buff1;
    }
    else
    {
        buff[0] = '0' + buff2;
        buff[1] = '0' + buff1;
    }
}
//-----
void testinttolcd(unsigned char posi, unsigned int
value, unsigned int N)
{
    char bufch[6]='. ' ;
    unsigned int bufin[6],ki=0;
    unsigned int x=N,a=0;
    do
    {
        x--;
        bufin[x] = value % 10;
        value /= 10;
    } while ( x != 0 );
    while (( bufin[a] == 0 ) && ( a < (N-1) ))
        a++;
    lcd_command(posi);
    for (x=0;x<a;x++) lcd_text(' ');
    for(x=a;x<N;x++) bufch[x] = '0' + bufin[x];
    for(x=a;x<N;x++) lcd_text(bufch[x]);
}
//-----
void check_key(void)
{
    if (c==1)dc=1;
    else if (c==2)dc=2;
    else if (c==3)dc=3;
    else if (c==5)dc=4;
    else if (c==6)dc=5;
    else if (c==7)dc=6;
    else if (c==9)dc=7;
    else if (c==10)dc=8;
    else if (c==11)dc=9;
    else if (c==14)dc=0;
    else if (c==13)dc=10;
    else if (c==15)dc=11;
    else if (c==4)dc=12;
    else if (c==8)dc=13;
    else if (c==12)dc=14;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





```

        abc=posi+N+1-posi2;
        if (abc>2)abc=2;
        input_value2();
        lcd_command(0x0C);
    }
//-----
void _ISR_T1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T1IF = 0;
    T1CONbits.TON = 0;
    LATBbits.LATB4 = 1;
}
//-----
void _ISR_T2Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T2IF = 0;
    T2CONbits.TON = 0;
    LATBbits.LATB5 = 1;
}
//-----
void _ISR_T3Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T3IF = 0;
    T3CONbits.TON = 0;
    LATBbits.LATB6 = 1;
}
//-----
void _ISR_T4Interrupt(void)
{
    IFS1bits.T4IF = 0;
    WriteTimer4(0);
    LATCbits.LATC13=!LATCbits.LATC13;
    LATBbits.LATB1=LATBbits.LATB4&LATCbi
ts.LATC13;
    LATBbits.LATB2=LATBbits.LATB5&LATCbi
ts.LATC13;
    LATBbits.LATB3=LATBbits.LATB6&LATCbi
ts.LATC13;
}
//-----
void _ISR_T5Interrupt(void)
{
    IFS1bits.T5IF = 0;
    WriteTimer5(0);
    LATCbits.LATC14=!LATCbits.LATC14;
}
//-----
void _ISR_INT0Interrupt(void)
{
    IFS0bits.INT0IF = 0;
    LATBbits.LATB4 = 0;
    INTCON2bits.INT0EP =
IINTCON2bits.INT0EP;
    num1=1+X;
    WriteTimer1(0);
    OpenTimer1(T1_ON &
T1_GATE_OFF &
T1_IDLE_STOP &
T1_PS_1_256 &
T1_SYNC_EXT_OFF &
T1_SOURCE_INT,
num1);
    LATDbits.LATD3=!LATDbits.LATD3;
}
//-----
void _ISR_INT2Interrupt(void)
{
    IFS1bits.INT2IF = 0;
    LATBbits.LATB5 = 0;
    INTCON2bits.INT2EP =
IINTCON2bits.INT2EP;
    num2=1+X;
    WriteTimer2(0);
    OpenTimer2(T2_ON &
T2_GATE_OFF &
T2_IDLE_STOP &
T2_PS_1_256 &
T2_SOURCE_INT,
num2);
}
//-----
void _ISR_INT1Interrupt(void)
{
    IFS1bits.INT1IF = 0;
    LATBbits.LATB6 = 0;
    INTCON2bits.INT1EP =
IINTCON2bits.INT1EP;
    num3=1+X;
    WriteTimer3(0);
    OpenTimer3(T3_ON &
T3_GATE_OFF &
T3_IDLE_STOP &

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

WriteTimer5(0);
match_value5 = CountN;
OpenTimer5(T5_ON &
            T5_GATE_OFF &
            T5_IDLE_STOP &
            T5_PS_1_1&
            T5_SOURCE_INT,
match_value5);

ADCON1 = 0x00EE;
ADCON2 = 0x0400;
ADCON3 = 0x0707;
ADCHS = 0x0000;
ADPCFG = 0x01FE;
ADCSSL = 0x0001;
ADCON1bits.ADON = 1;

lcd_init();
lcd_command(1);
lcd_puts_step(0x82,":Soft Start:",1);
lcd_puts_step(0xC1,"Click S2 to On",1);
LATBbits.LATB8=0;
while (PORTBbits.RB7=1);
LATBbits.LATB8=1;
lcd_command(1);
lcd_puts_step(0x84,"PROJECT",1);
lcd_puts_step(0xC2,":Soft Start: >",1);
while (Eu==0)
{
    delay_ms(100);
    key_pad();
    if ((dz==1)&&(dc==15))Eu=1;
    else
    {
        delay_ms(100);
        key_pad();
        if ((dz==1)&&(dc==15))Eu=1;
    }
}

ADCON1 = 0x00EE;
ADCON2 = 0x0400;
ADCON3 = 0x0707;
ADCHS = 0x0000;
ADPCFG = 0x01FE;
ADCSSL = 0x0001;
ADCON1bits.ADON = 1;

lcd_init();
lcd_command(1);
lcd_puts_step(0x80,"<TestFB >/PgTh",1);
lcd_puts_step(0xC0,"CikFUN SoftStart",1);
while
(!((dz==1)&&((dc==12)||((dc==13)||((dc==14))))))key_pad(
);
if (dc==12)ipadc=1;
if (dc==13)ipadc=2;
if (dc==14)ipadc=3;
while (1)
{
    lcd_command(1);
    while (ipadc==1)
    {
        lcd_puts_step(0x80,"Feedback =",1);
        lcd_puts_step(0xC0,">IPgTh, FUN Soft",1);
        while (ipadc==1)
        {
            while(LATDbits.LATD3);
            while(!LATDbits.LATD3);
            LT1=0;TS5=0;
            while(LATDbits.LATD3)
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



