



เครื่องสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

Soft Start Induction Motor By Microcontroller

โดย

นายจิระพล วิเศษ

นายปกรณ์ รักษ์สุวรรณ

นายปราโมทย์ อิมโกชน์

นายมงคล รัตนาบุญกุล

วัน เดือน ปี.....	-5.ค.ค.2541
เลขทะเบียน.....	038591
เลขเรียกหนังสือ.....	T 40023-0514

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

038591

ปีการศึกษา 2540

เครื่องสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

Soft Start Induction Motor By Microcontroller

โดย

นายจิระพล      วิเศษ

นายปกรณ์    รักษ์สุวรรณ

นายปราโมทย์   อิมโกชน์

นายมงคล      รัตนานุกูล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ประภาพร   ไพโรสุวรรณ

อ.อนุวัฒน์    จางวนิชเลิศ

รศ.ดร. วิริยะ   พิเชษฐจำเริญ

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2540


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

ผู้จัดทำ

1. นายจิระพล      วิเศษ
2. นายปกรณ์      รักษสุวรรณ
3. นายปราโมทย์   อิมโกชน์
4. นายมงคล      รัตนานุกูล

 อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ. ประภาส ไพรสสุวรรณ)

 อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อ. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)

\_\_\_\_\_ อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ)

## เครื่องสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

นายจิระพล วิเศษ

นายปกรณ์ รัชส์สุวรรณ

นายปราโมทย์ อิ่มโกชน

นายมงคล รัตนานุกูล

ผศ.ประภาพร ไพรสสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วิริยะ พิเชษฐจำเริญ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2540

### บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการสร้างเครื่องสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส โดยใช้อุปกรณ์โซลิตสเทท อุปกรณ์โซลิตสเททที่ใช้นี้เป็นไทรสเตอร์ โดยจะใช้ทั้งหมด 6 ตัว แบ่งเป็นเฟสละ 2 ตัว สัญญาณเกทที่ใช้ในการทริกไทรสเตอร์จะถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 สำหรับหลักการที่ใช้ในการทำเครื่องสตาร์ทมอเตอร์ที่สามารถลดกระแสขณะสตาร์ทได้นี้คือจะเริ่มต้นด้วยการป้อนศักดาไฟฟ้าค่า ๆ หนึ่งเข้าสู่ตัวมอเตอร์ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าพิกัด จากนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มค่าศักดาไฟฟ้าขึ้นเรื่อย ๆ โดยการลดมุมทริกไทรสเตอร์ลง จนถึงค่าที่พิกัดในที่สุด ในการสตาร์ทจะต้องเลือกเวลาในการสตาร์ทและมุมเริ่มต้นในการสตาร์ทให้เหมาะสมกับขนาดพิกัดของมอเตอร์และขนาดพิกัดของภาระ และจากหลักการนี้จะทำให้ลดกระแสขณะสตาร์ทลงได้

SOFT START INDUCTION MOTOR BY MICROCONTROLLER

Jirapol Vises

Pakorn Ragsuwan

Pramoth Impoat

Mongkol Rattananukul

Assist.Prof. Prapas Praisuwanna Advisor

Anuwat Jangwanitlert Advisor

Assc.Prof. Viriya Pichetjamroen Advisor

1997

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to make the soft starter of 3 phase induction motor by using of solid state switch. The solid state switch uses 6 thyristors, 2 thyristors for each phases. The gate signal of thyristors is controlled by microcontroller MCS-51. The principle used in this thesis is to apply under rating voltage for the induction motor at the first time. When the motor is speed up, increasing the terminal voltage of induction motor, until terminal voltage reaches it rating. The suitable time and angle of trigger depend on the rating of motor and load. This method makes the motor reducing the starting current.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ	4
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	4
2.2 หลักการทำงาน	7
2.3 สลิป	8
2.4 แรงบิดเริ่มต้น	8
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดขณะสตาร์ทและแรงบิดสูงสุด	9
2.6 การวิเคราะห์วงจรมุมลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	9
บทที่ 3 การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำ	12
3.1 วิธีการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบพันขดลวด	12
3.2 วิธีการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก	13
3.2.1 การสตาร์ทมอเตอร์โดยค่อแหล่งจ่ายเข้าสู่ตัวมอเตอร์โดยตรง	13
3.2.2 การสตาร์ทมอเตอร์โดยวิธีใช้ตัวต้านทานต่อทางค่านปฐมภูมิ	14
3.2.3 การสตาร์ทมอเตอร์โดยใช้ข้อโคทรานส์ฟอร์มเมอร์	15
3.2.4 การสตาร์ทมอเตอร์แบบสตาร์ท-เคตคา	17
3.2.5 การสตาร์ทมอเตอร์ด้วยวิธีโซลิตสเตด	19
บทที่ 4 ไทริสเตอร์	21
4.1 ลักษณะทั่วไปของไทริสเตอร์	21
4.2 การทำงานและคุณสมบัติของ ไทริสเตอร์	22
4.3 คุณสมบัติทางไดนามิก	25
4.4 คุณสมบัติในการทริก	27
4.5 พิกัดการใช้งานของไทริสเตอร์	28
4.6 การป้องกันไทริสเตอร์	31

บทที่ 5 การควบคุมแรงดันกระแสสลับ	33
5.1 การควบคุมมุมทริกของ โหลดความต้านทาน	33
5.2 การควบคุมมุมทริกของ โหลดรีแอกทีฟ	34
5.3 การควบคุมแรงดัน 1 เฟส	35
5.4 การควบคุมแรงดัน 3 เฟส	38
5.5 การควบคุม 3 เฟส โดยการลดมุมทริก	42
บทที่ 6 วงจรสร้างสัญญาณควบคุม เอสซีอาร์	44
6.1 ส่วนกำเนิดสัญญาณกระตุ้น	44
6.2 ส่วนสร้างสัญญาณกระตุ้นแบบต่อเนื่อง	46
6.3 ส่วนขยายสัญญาณ	48
6.4 ส่วนแยกกราวด์ของสัญญาณกระตุ้น	48
บทที่ 7	56
7.1 ประโยชน์และความเป็นมาของ ไมโครคอนโทรลเลอร์	56
7.2 สถาปัตยกรรมของ MCS-51	56
7.3 หน่วยความจำของ MCS-51	60
7.4 รีจิสเตอร์ของ MCS-51	63
7.5 พอร์ตของ MCS-51	63
7.6 การอินเตอร์รัพ	64
7.7 การใช้งาน ไทม์เมอร์และเคาน์เตอร์	65
7.8 การโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี	67
7.9 โปรแกรมแอสเซมบลี	67
7.10 การเขียนโปรแกรมควบคุม	68
บทที่ 8 การคำนวณเวลาและมุมในการสตาร์ท	75
8.1 รัศมีใจโร	75
8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสตาร์ทและรัศมีใจโร	75
8.3 การคำนวณมุม	76
บทที่ 9 การทดลองและผลการทดลอง	78
9.1 วัตถุประสงค์	78
9.2 การทดลอง	78
9.3 ภาพถ่ายแสดงแรงดันและกระแสที่วินาทีต่าง ๆ	87

บทที่ 10 สรุปผลและวิจารณ์	95
10.1 สรุปผลและวิจารณ์การทดลอง	95
10.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น	96
10.3 แนวทางการพัฒนา	96
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของเครื่องสตัดร์ทมอเคอร์	3
รูปที่ 2.1 แสดงส่วนต่างๆ ของโรเตอร์แบบกรงกระรอก	5
รูปที่ 2.2 ลักษณะของร่องสลีตในโรเตอร์ชนิดต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงกระรอก	5
รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้โรเตอร์แบบกรงกระรอก	6
รูปที่ 2.4 แสดงภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดพันขลวด	6
รูปที่ 2.5 (ก) แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ ตามกฎมือขวาของเฟลมมิง	8
(ข) แสดงการเกิดกระแสเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ ตามกฎของเลนซ์ และเกิดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุน	
(ค) แสดงการเกิดแรงบิดของโรเตอร์ แล้วโรเตอร์หมุนทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน	
รูปที่ 2.6 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	9
รูปที่ 3.1 แสดงการสตัดร์ทมอเคอร์โดยต่อตัวต้านทานทางโรเตอร์	13
รูปที่ 3.2 แสดงการสตัดร์ทมอเคอร์แบบใช้ตัวต้านทานต่อด้านปฐมภูมิ	14
รูปที่ 3.3 แสดงการต่อวงจรในการสตัดร์ทมอเคอร์แบบใช้ออโตทรานส์ฟอร์มเมอร์	16
รูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบวงจรการสตัดร์ทมอเคอร์แบบค่อตรงกับแบบใช้ออโตทรานส์ฟอร์มเมอร์	16
รูปที่ 3.5 แสดงการสตัดร์ทมอเคอร์แบบสตัดร์-เคลตา	18
รูปที่ 4.1 รายละเอียดโครงสร้างทั่วไปของไทรสเตอร์	21
รูปที่ 4.2 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไทรสเตอร์	21
รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางวงจรแบบไทรสเตอร์ 2 ตัว	22
รูปที่ 4.4 กราฟคุณสมบัติแรงดันและกระแส	22
รูปที่ 4.5 คุณสมบัติระหว่างกรณำกระแส	25
รูปที่ 4.6 รูปคลื่นในระหว่างกรณำกระแส	26
รูปที่ 4.7 คุณสมบัติการทรริก	27
รูปที่ 4.8 การเลือกแรงดันและกระแสทรริก	28
รูปที่ 4.9 แสดงพลังงานเฉลี่ย ณ อุณหภูมิต่างๆ	29
รูปที่ 4.10 แสดงอุณหภูมิสูงสุดกับกระแส	29

รูปที่ 5.1 แสดงวงจรการควบคุมโหลดความต้านทานที่มุม $\alpha$	33
รูปที่ 5.2 a วงจรควบคุมมุมทริกของโพลครีแอกทีฟ	34
รูปที่ 5.2 b แสดงวงจรของการควบคุมการทริกของโพลครีแอกทีฟ	35
รูปที่ 5.3 แสดงการควบคุมแรงดัน 1 เฟส	36
รูปที่ 5.4 ผลการทริกที่มุมไฟร์ริง ต่างกัน	38
รูปที่ 5.5 วงจรการควบคุม 3 เฟส	39
รูปที่ 5.6 แสดงลำดับการทริกไทรสเตอร์	39
รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ทริกช่วงต่างๆ	40
รูปที่ 5.8 รูปคลื่นการควบคุม 3 เฟส	41
รูปที่ 5.9 คลื่นการควบคุม 3 เฟส แบบลดมุมทริก	42
รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมของ TCA785	44
รูปที่ 6.2 พัลส์ไดอะแกรมของ TCA785	45
รูปที่ 6.3 วงจรกำเนิดสัญญาณของ TCA 785	46
รูปที่ 6.4 แสดงการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่	47
รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์กว้าง	48
รูปที่ 6.6 วงจรขยายสัญญาณ	48
รูปที่ 6.7 แสดงการต่อใช้งานของออปโตไอโซเลเตอร์	49
รูปที่ 6.8 แสดงสัญญาณพินเดี่ยวที่ขา 10 ของ TCA785	50
รูปที่ 6.9 แสดงสัญญาณที่ขา 15 ของ TCA785 เทียบกับแรงดันไลน์	50
รูปที่ 6.10 แสดงสัญญาณที่ขา 14 ของ TCA785 เทียบกับแรงดันไลน์	51
รูปที่ 6.11 แสดงสัญญาณเอาต์พุทของ 555	51
รูปที่ 6.12 แสดงสัญญาณเอาต์พุทของแอนด์เกต เทียบกับแรงดันไลน์ในเฟสเดียวกัน	52
รูปที่ 6.13 แสดงสัญญาณเอาต์พุทของแอนด์เกต เทียบกับแรงดันไลน์ที่ป้อนกลับเฟสกัน	52
รูปที่ 6.14 แสดงสัญญาณเอาต์พุทของทรานซิสเตอร์ เทียบกับแรงดันไลน์ในเฟสเดียวกัน	53
รูปที่ 6.15 แสดงสัญญาณเอาต์พุทของทรานซิสเตอร์ เทียบกับแรงดันไลน์ที่ป้อนกลับเฟส	53
รูปที่ 6.16 แสดงสัญญาณเอาต์พุทจากออปโตไอโซเลเตอร์ใน 1 เฟส	54
รูปที่ 6.17 แสดงชิ้นงานสำเร็จรูป	54
รูปที่ 6.18 แสดงวงจรที่ใช้ขับเอส ซี อาร์ โดยสมบูรณ	55
รูปที่ 7.1 แสดงไดอะแกรมโครงสร้างของ MCS - 51	57
รูปที่ 7.2 หน้าที่ขาสัญญาณของ MCS - 51	59

รูปที่ 7.3	การจัดพื้นที่หน่วยความจำโปรแกรมของ MCS - 51	60
รูปที่ 7.4	แสดงโครงสร้างหน่วยความจำข้อมูลของ MCS - 51	61
รูปที่ 7.5	แสดงหน่วยความจำข้อมูลภายในชิปทั้ง 2 ส่วน	62
รูปที่ 7.6	แสดงการจัดสรรพื้นที่หน่วยความจำข้อมูลภายในเพื่อใช้เป็นรีจิสเตอร์	62
รูปที่ 7.7	แสดงหน้าที่ในแต่ละบิตของรีจิสเตอร์ TMOD และ TCON	66
รูปที่ 7.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักคาไฟฟ้ากระแสตรงที่จะส่งออกพอร์ท 1 กับค่า มุมทริกไทรซิสเตอร์ (OC)	70
รูปที่ 7.9	แสดงการเปลี่ยนค่าศักคาไฟฟ้ากระแสตรงเริ่มต้นจากดิจิตอลเป็นแอนาลอก	71
รูปที่ 7.10	แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทั้งหมด	72
รูปที่ 7.11	แสดงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	73
รูปที่ 8.1	รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทริก เอสซีอาร์	76
รูปที่ 9.1	แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 5 เมื่อสตาร์ทขณะไร้ภาระ เวลาในการสตาร์ท 60 วินาที มุมเริ่มต้น 120 องศา	87
รูปที่ 9.2	แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 10 เมื่อสตาร์ทขณะไร้ภาระ เวลาในการสตาร์ท 60 วินาที มุมเริ่มต้น 120 องศา	88
รูปที่ 9.3	แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 15 เมื่อสตาร์ทขณะไร้ภาระ เวลาในการสตาร์ท 60 วินาที มุมเริ่มต้น 120 องศา	88
รูปที่ 9.4	แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 60 เมื่อสตาร์ทขณะไร้ภาระ เวลาในการสตาร์ท 60 วินาที มุมเริ่มต้น 120 องศา	89
รูปที่ 9.5	แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะสตาร์ท เมื่อมีการใส่โหลด 4 กิโลกรัม เวลาในการสตาร์ท 19 วินาที มุมเริ่มต้น 115 องศา	89
รูปที่ 9.6	แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 10 เมื่อมีการใส่โหลด 4 กิโลกรัม เวลาในการสตาร์ท 19 วินาที มุมเริ่มต้น 115 องศา	90
รูปที่ 9.7	แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะสตาร์ท เมื่อมีการใส่โหลด 6 กิโลกรัม เวลาในการสตาร์ท 23 วินาที มุมเริ่มต้น 110 องศา	90
รูปที่ 9.8	แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 10 เมื่อมีการใส่โหลด 6 กิโลกรัม เวลาในการสตาร์ท 23 วินาที มุมเริ่มต้น 110 องศา	91
รูปที่ 9.9	แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 23 เมื่อมีการใส่โหลด 6 กิโลกรัม เวลาในการสตาร์ท 23 วินาที มุมเริ่มต้น 110 องศา	91
รูปที่ 9.10	แสดงรูปคลื่นกระแสขณะทำการสตาร์ทโดยจ่ายแรงดันโดยตรง	92

รูปที่ 9.11 แสดงลูกคลื่นกระแสเมื่อสสารที่ด้วยเครื่องซอฟต์แวร์ มุมเริ่มต้น 170 วินาที เวลาสสารที่ 10 วินาที	92
รูปที่ 9.12 แสดงลูกคลื่นกระแสเมื่อสสารที่ด้วยเครื่องซอฟต์แวร์ มุมเริ่มต้น 140 วินาที เวลาสสารที่ 10 วินาที	93
รูปที่ 9.13 แสดงลูกคลื่นกระแสเมื่อสสารที่ด้วยเครื่องซอฟต์แวร์ มุมเริ่มต้น 90 วินาที เวลาสสารที่ 10 วินาที	93
รูปที่ 9.14 แสดงลูกคลื่นกระแสขณะสสารที่เมื่อมีการใส่ภาระ	94
รูปที่ 9.15 แสดงลูกคลื่นกระแสขณะสิ้นสุดการสสารที่ เมื่อมีการใส่ภาระ	94

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 3.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการสสารัทมอเตอรืแบบตํางๆ	20
ตาราง 7.1 แสดงคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ตํางๆในตระกูล MCS-51	57
ตาราง 7.2 แสดงตําหน้งอินเตอรืรืฟเวกเตอรืของสัญญาณอินเตอรืรืฟตํางๆ	64
ตาราง 7.3 แสดงสัญญาณอินเตอรืรืฟใน MCS-51	65
ตาราง 9.1 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุดเมื่อกําหนดเวลาในการสสารัท ที่ 10 วินาที ที่มืมรืเริ่มต้นตํางๆ	79
ตาราง 9.2 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุดเมื่อกําหนดเวลาในการสสารัท ที่ 20 วินาที ที่มืมรืเริ่มต้นตํางๆ	79
ตาราง 9.3 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุดเมื่อกําหนดเวลาในการสสารัท ที่ 30 วินาที ที่มืมรืเริ่มต้นตํางๆ	79
ตาราง 9.4 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุดเมื่อกําหนดเวลาในการสสารัท ที่ 40 วินาที ที่มืมรืเริ่มต้นตํางๆ	80
ตาราง 9.5 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุดเมื่อกําหนดเวลาในการสสารัท ที่ 50 วินาที ที่มืมรืเริ่มต้นตํางๆ	80
ตาราง 9.6 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุดเมื่อกําหนดมืมรืเริ่มต้นที่ 120 องศา ที่เวลาในการสสารัทตํางๆ	81
ตาราง 9.7 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุดเมื่อกําหนดมืมรืเริ่มต้นที่ 130 องศา ที่เวลาในการสสารัทตํางๆ	81
ตาราง 9.8 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุด เมื่อบัษภาระ 1 กิโลกรัม ที่มืมรืเริ่มต้นคําทํางๆ	82
ตาราง 9.9 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุด เมื่อบัษภาระ 2 กิโลกรัม ที่มืมรืเริ่มต้นคําทํางๆ	82
ตาราง 9.10 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุด เมื่อบัษภาระ 3 กิโลกรัม ที่มืมรืเริ่มต้นคําทํางๆ	83
ตาราง 9.11 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุด เมื่อบัษภาระ 4 กิโลกรัม ที่มืมรืเริ่มต้นคําทํางๆ	83
ตาราง 9.12 แสดงคํากระแสรืเริ่มต้นและกระแสรืสูงสุด เมื่อบัษภาระ 5 กิโลกรัม ที่มืมรืเริ่มต้นคําทํางๆ	84

ตาราง 9.13 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 6 กิโลกรัม ที่มุมเริ่มต้นค่าต่างๆ	84
ตาราง 9.14 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 1 กิโลกรัม ที่มุมเริ่มต้นค่าต่างๆ	85
ตาราง 9.15 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 2 กิโลกรัม ที่มุมเริ่มต้นค่าต่างๆ	85
ตาราง 9.16 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 3 กิโลกรัม ที่มุมเริ่มต้นค่าต่างๆ	86
ตาราง 9.17 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 4 กิโลกรัม ที่มุมเริ่มต้นค่าต่างๆ	86
ตาราง 9.18 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 5 กิโลกรัม ที่มุมเริ่มต้นค่าต่างๆ	86
ตาราง 9.19 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 6 กิโลกรัม ที่มุมเริ่มต้นค่าต่างๆ	87

## บทที่ 1

### บทนำ

การสตาร์ทมอเตอร์โดยวิธีการป้อนศักดาไฟฟ้าเต็มพิกัดเข้าสู่มอเตอร์โดยตรง เป็นวิธีที่ดีที่เป็นที่ต้องการมากที่สุด เพราะระบบสตาร์ทไม่ยุ่งยาก ความผิดพลาดในการเดินเครื่องน้อย การติดตั้งประหยัด และมีประสิทธิภาพการทำงานสูง แต่การสตาร์ทวิธีดังกล่าวจะมีค่ากระแสสตาร์ทที่สูงมาก บางครั้งอาจสูงถึง 700% ของกระแสขณะมีโหลดเต็มที่ไหลอยู่ ซึ่งทำให้เกิดผลเสียคือ

1. ค่าศักดาไฟฟ้าของระบบจะตกลงอย่างทันทีทันใด เป็นผลให้โหลดอื่นๆ ที่อยู่ในช่วงจ่ายไฟเดียวกันเกิดการเสียหายได้

2. ค่ากระแสสตาร์ทสูงเป็นผลให้แรงบิดขณะสตาร์ทสูง เกิดการกระชากขณะเริ่มหมุน ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรโหลดและมอเตอร์เองได้

#### สาเหตุที่ทำให้กระแสขณะสตาร์ทสูง

1. เพราะไม่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำด้านกลับ (back emf.) เกิดขึ้น ในเวลาที่เริ่มสตาร์ท กล่าวคือในขณะที่เริ่มสตาร์ท มอเตอร์เหนี่ยวนำตัวนั้นยังไม่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำด้านกลับมาด้าน ทำให้ศักดาไฟฟ้าทั้งหมดจากแหล่งจ่ายตกคร่อมตัวต้านทานของขดลวดซึ่งมีค่าน้อย ทำให้กระแสที่ไหลสูง ( $I = V / r_w$ ) เมื่อเวลาผ่านไปจึงเริ่มมีฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้น และเปลี่ยนแปลง (เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านเป็นกระแสลับ) จึงเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำด้านกลับเกิดขึ้นมาด้าน ทำให้ขณะเวลาที่เริ่มสตาร์ท มอเตอร์เหนี่ยวนำตัวนั้นยังไม่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำด้านกลับมาด้าน ทำกระแสไหลน้อยลง ดังนั้นวิธีแก้ไขก็คือ ต้องลดศักดาไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ในขณะที่เริ่มสตาร์ท เพื่อที่จะให้กระแสที่เกิดขึ้นในช่วงเวลานี้มีค่าน้อย

2. เพราะโรเตอร์ (rotor) หยุดหนึ่งทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนกับโรเตอร์มีค่าสูง จึงเกิดกระแสสูง เหตุการณ์นี้เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นต่อจากเหตุการณ์ในข้อแรก กล่าวคือ เมื่อมอเตอร์ได้รับศักดาไฟฟ้าเต็มพิกัด สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนี้ก็จะมึขนาดมาก (เท่ากับพิกัด) เมื่อสนามแม่เหล็กหมุนนี้ตัดผ่านขดลวดในโรเตอร์แบบพันขดลวด หรือแท่งลวดตัวนำในโรเตอร์แบบกรงกระรอก จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และเพราะโรเตอร์นั้นมีการลัดวงจรอยู่จึงทำให้เกิดกระแสไหล โดยกระแสที่ไหลขึ้นกับว่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่ามากหรือน้อย ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำนี้จะมึขนาดขึ้นกับขนาดของสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนกับโรเตอร์ ในขณะที่สตาร์ทนั้น โรเตอร์อยู่หนึ่งทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนกับโรเตอร์มีค่ามาก ส่งผลให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำมีค่ามากตาม ทำให้กระแสที่ไหลในโรเตอร์มีค่าสูงตาม และเมื่อเวลาผ่านไป โรเตอร์มึความ

เร็วเพิ่มมากขึ้นทำให้ความเร็วสัมพัทธ์มีค่าลดลง (สนามแม่เหล็กหมุนยังมีขนาดคงที่) จึงทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำลดลง ส่งผลให้กระแสมีค่าลดลงสูงค่าปกติ

จะเห็นได้ว่า สาเหตุที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีกระแสในขณะสาร์ทสูงก็เนื่องจาก แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนตัวโรเตอร์มีค่ามากในขณะเวลาสาร์ทนั่นเอง ดังนั้นถ้าต้องการที่จะลดค่ากระแสขณะสาร์ทจำเป็นต้องหาทางลดแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้ให้ได้ ในการที่จะลดแรงเคลื่อนนั้นสามารถทำได้ โดยการลดความเร็วสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนกับโรเตอร์ หรือลดขนาดของสนามแม่เหล็กหมุน สำหรับความเร็วสัมพันธ์นั้นไม่สามารถลดได้ เนื่องจากความถี่ของแหล่งจ่ายไฟคงที่ทำให้ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนั้นมีค่าคงที่ โดยขนาดของสนามแม่เหล็กหมุนนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ ตามสมการ

$$E = \sqrt{2\pi f N} \phi_p K_w \quad \dots(1.1)$$

$E$  : แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นค่าอาร์เอ็มเอส

$\phi_p$  : ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดต่อขั้ว

$f$  : ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า

$N$  : จำนวนรอบของขดลวดต่อเฟส

$K_w$  : ตัวประกอบการพันขดลวดอาร์เมเจอร์

จากสมการ (1.1) จะเห็นว่า

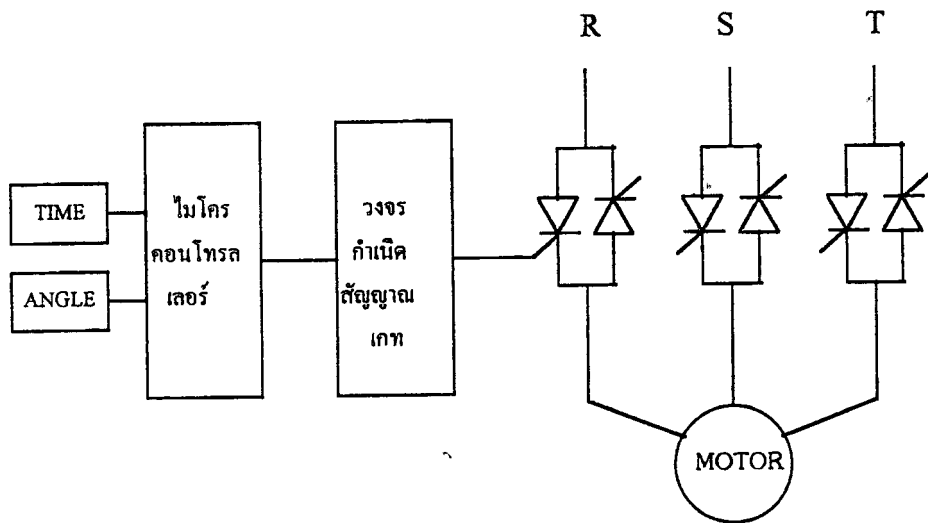
$$E \propto \phi_p \quad \dots(1.2)$$

ดังนั้นถ้าเราต้องการที่จะลดขนาดของสนามแม่เหล็กหมุน เราก็ต้องลดศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์แทน

เมื่อเวลาผ่านไป โรเตอร์ก็มีความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนกับโรเตอร์มีค่าน้อยลงและแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำน้อยลง ทำให้สามารถที่จะเพิ่มขนาดของสนามแม่เหล็กหมุนได้ (โดยการเพิ่มศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ตัวมอเตอร์) จนกระทั่งถึงค่าที่พิกัด

จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถ สรุปหลักการสาร์ทมอเตอร์ได้ว่า “เริ่มต้นด้วยการป้อนศักดาไฟฟ้าค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าพิกัดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากนั้นก็ค่อย ๆ เพิ่มศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ตัวมอเตอร์ตามความเร็วของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อความเร็วโรเตอร์ถึงค่าพิกัด ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ก็เท่ากับพิกัดพอดี”

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นการสร้างเครื่องสาร์ทมอเตอร์โดยอาศัยหลักการดังกล่าว



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของเครื่องสตาร์ทมอเตอร์  
 จากรูป เราจะใช้ไทรสเตอร์ทั้งหมด 6 ตัว โดยแบ่งเป็นเฟสละ 2 ตัวต่อกลับทางกัน และใช้  
 สัญญาณเกทที่มีความต่างเฟส 180 องศา โดยสัญญาณเกทจะสร้างจากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุม  
 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ และมีการรับช่วงเวลาและมุมเกทในการสตาร์ทจากผู้ใช้

## บทที่ 2

### มอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้อาจเป็นแบบเฟสเดียว หรือหลายเฟสก็ได้ โดยปกติแล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดหลายเฟส (Poly phase induction motor) มักจะหมายความถึงแบบที่เป็น 3 เฟส ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. แบบโรเตอร์แบบกรงกระรอก (squirrel cage rotor) ซึ่งเป็นแบบที่ไม่ต้องการใช้วงแหวน (slip ring) ติดอยู่ที่ตัวโรเตอร์ หรือเรียกว่า “non-slip ring machines”
2. แบบที่โรเตอร์มีขดลวดพันอยู่รอบ (wound rotor) การพันที่โรเตอร์นี้ อาจเป็น 2 เฟส หรือ 3 เฟส ก็ได้โดยที่จำนวนขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ต้องมีจำนวนเท่าที่สเตเตอร์ แบบนี้จะใช้วงแหวนติดอยู่ที่โรเตอร์ เพื่อนำปลายของขดลวดที่พันอยู่ที่โรเตอร์มาต่อขั้ววงจรรภายนอก หรือเรียกอีกชื่อว่า “slip ring machines”

#### 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

1. สเตเตอร์ (Stator) สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเหมือนกับขั้วโครนีสเตอร์มีช่องสลิตสำหรับรองรับขดลวด ลักษณะการวางขดลวดขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก ถ้าจำนวนขั้วแม่เหล็กมากความเร็วรอบก็จะต่ำ ในทางกลับกันถ้าจำนวนขั้วแม่เหล็กน้อยความเร็วรอบก็จะสูง เมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส ให้กับขดลวด 3 ชุดที่วางห่างกัน 120 องศา จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น และสนามแม่เหล็กนี้จะหมุนด้วยความเร็วขั้วโครนีสตามสมการ

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad \dots(2.1)$$

$N_s$  : ความเร็วขั้วโครนีส

$f$  : ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ

$P$  : จำนวนขั้วแม่เหล็ก

2. โรเตอร์ (Rotor) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดดังนี้

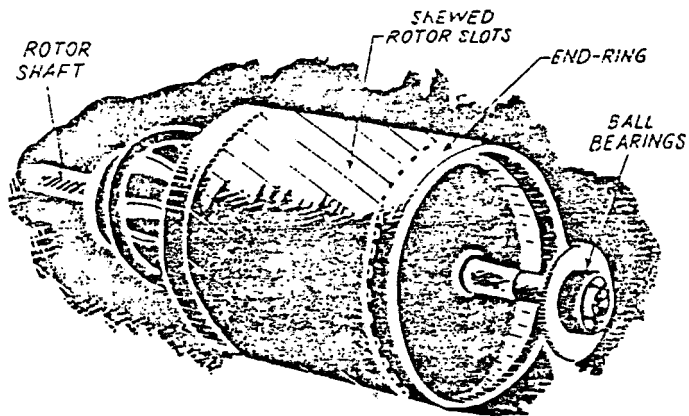
2.1 โรเตอร์ชนิดกรงกระรอก (Squirrel-cage Rotor) ส่วนประกอบของโรเตอร์ชนิดนี้ ซึ่งมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและแข็งแรงทนทาน ประกอบด้วยแกนของโรเตอร์ที่มีร่องสลิตที่อยู่ในแนวขนานกัน เพื่อใส่แท่งตัวนำ โดยที่ปลายทั้งสองข้างของแกนจะมีวงแหวนที่สำหรับลัดวงจร

โรเตอร์แบบกรงกระรอก สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

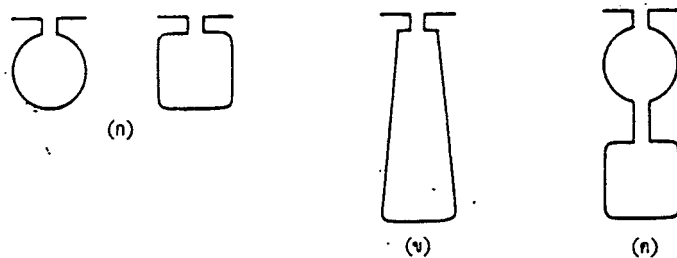
1. โรเตอร์กรงกระรอกธรรมดา แสดงผังรูปที่ 2.2 (ก) และรูปที่ 2.3 กราฟ A
2. โรเตอร์กรงกระรอกแบบพิเศษ (สลิตลึก) แสดงผังรูปที่ 2.2 (ข) และรูปที่ 2.3 กราฟ B

3. โรเตอร์กรงกระรอกแบบพิเศษ (กรงกระรอกสองชั้น-แท่งตัวนำอย่างธรรมดา) แสดงดังรูปที่ 2.2 (ค) และรูปที่ 2.3 กราฟ C

โรเตอร์กรงกระรอกชนิดพิเศษ (กรงกระรอกสองชั้น-แท่งตัวนำความต้านทานสูง) แสดงดังรูปที่ 2.2 (ค) และรูปที่ 2.3 กราฟ D



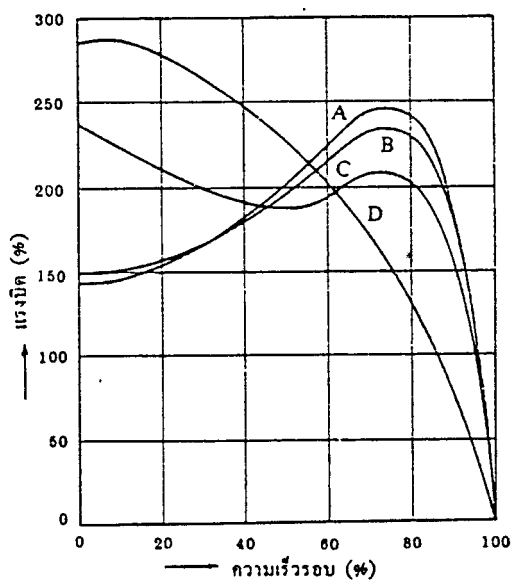
รูปที่ 2.1 แสดงส่วนต่างๆ ของโรเตอร์แบบกรงกระรอก



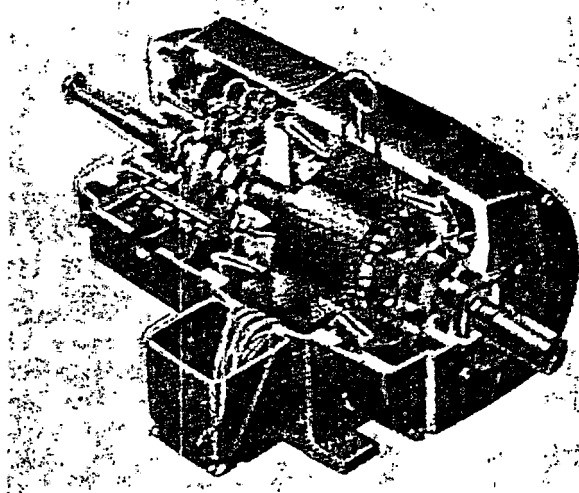
รูปที่ 2.2 ลักษณะของร่องสลิตในโรเตอร์ชนิดต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงกระรอก

2.2 โรเตอร์ชนิดพันขดลวด (Phase-wound Rotor) ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์กรงกระรอก วงจรโรเตอร์ถูกจัดวงจรด้วยวงแหวนคอนเพลกซ์ และค่าความต้านทานของโรเตอร์ตายตัวปรับค่าไม่ได้ แต่กรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดพันขดลวด การพันวงจรโรเตอร์ (หรือวงจรทุติยภูมิ) เป็นการพันขดลวดแบบ 3 เฟส และมีการต่อวงจรเข้าสู่วงแหวนลื่นแล้ว

ผ่านแปรปรวนเข้าสู่ความต้านทานภายนอก ดังนั้นค่าความต้านทานของวงจรโรเตอร์ จึงสามารถปรับคืนได้โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานภายนอก



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วยรอบและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้โรเตอร์แบบกรงกระรอก



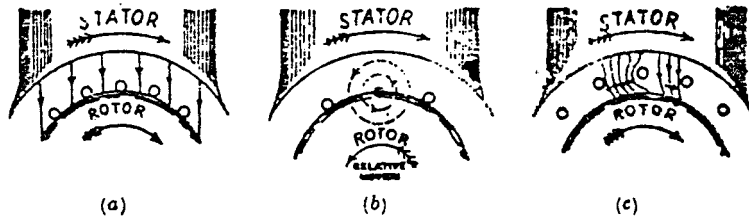
รูปที่ 2.4 แสดงภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดฟันขดลวด

ดังนั้นในกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดโรเตอร์พันขลวด ค่าความต้านทานของวงจรรโรเตอร์สามารถปรับค่าได้ สำหรับปรับความเร็วรอบโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ต่ออยู่ภายนอก ในขณะที่เดียวกับการเพิ่มค่าความต้านทานของวงจรรโรเตอร์ จะเพิ่มค่าแรงบิดขณะสตาร์ท และอัตราเร่งเป็นไปอย่างรวดเร็ว เพิ่มคุณสมบัติการสตาร์ทของมอเตอร์ อย่างไรก็ตามมอเตอร์ชนิดนี้จะมีน้ำหนักราว 120-150% มีราคาสูงและค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ และประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับโรเตอร์กรงกระรอกขนาดเดียวกัน

ในทางปฏิบัติ โรเตอร์ไม่สามารถมีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสได้ เพราะจะไม่มีความเร็วสัมพัทธ์เหลืออยู่ก็จะไม่เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก็จะไม่สามารถรักษาสภาพแรงบิดของโรเตอร์ให้หมุนอยู่ได้ ซึ่งความเร็วของโรเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับภาระทางกลของมอเตอร์ด้วย

## 2.2 หลักการทำงาน

มอเตอร์เหนี่ยวนำนี้ ไม่มีวงจรรไฟฟ้าต่อเชื่อมกันระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ กระแสที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ที่ไหลอยู่ในแท่งตัวนำที่ฝังอยู่รอบๆ โรเตอร์นั้น เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโรเตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กหมุนที่มาจากสเตเตอร์ ซึ่งได้รับไฟฟ้ากระแสสลับจากภายนอก ขนาดของแรงเคลื่อนขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนตัวนำของโรเตอร์ ปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นนี้ มีลักษณะคล้ายคลึงกับหม้อแปลงที่มีส่วนที่สองที่สามารถเคลื่อนที่ได้ แต่สำหรับมอเตอร์แบบเฟสเดียว ซึ่งมีการพันอยู่ที่สเตเตอร์นั้น ไม่อาจทำให้ส่วนของโรเตอร์เคลื่อนที่ได้ ทั้งนี้เพราะแรงบิดที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์นั้นมีทิศตรงกันข้ามในแต่ละครั้งรอบ (cycle) ของแต่ละครั้งของไฟที่ไต่เข้าไปในหนึ่งรอบ แต่หากมีการพันขลวดบนสเตเตอร์ตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไปแล้ว จะทำให้มอเตอร์หมุนได้ สนามแม่เหล็กกลัพธ์ที่เกิดบนตัวนำที่สเตเตอร์นี้ จะหมุนคล้ายกับการหมุนของแม่เหล็กถาวรด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ซึ่งทำให้การตัดของสนามแม่เหล็กหรือมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ ซึ่งมีหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลงนั่นเอง เมื่อมีสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านตัวนำบนโรเตอร์ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ตัวนำในโรเตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ จะทำให้เกิดกระแสไหลในตัวนำขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางที่หมุนไปทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุน ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้านั้นหาได้โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิง ส่วนทิศทางการเคลื่อนที่นั้นหาได้จากกฎมือซ้ายของเฟลมมิงเช่นเดียวกัน



- รูปที่ 2.5 (ก) แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ ตามกฎมือขวาของเฟลมมิง  
 (ข) แสดงการเกิดกระแสเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ ตามกฎของเลนซ์ และเกิดความ  
 เร็วสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุน  
 (ค) แสดงการเกิดแรงบิดของโรเตอร์ แล้วโรเตอร์หมุนทิศทางเดียวกับสนาม  
 แม่เหล็กหมุน

### 2.3 สลิป (Slip)

คืออัตราส่วนของความเร็วที่เกิดจากความแตกต่างของความเร็วที่โรเตอร์กับความเร็วที่  
 ซิงโครนัส ต่อความเร็วที่ซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กหมุน ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกลไฟฟ้านั้น ๆ  
 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

$$(\% \text{Slip}) S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad \dots(2.2)$$

$N_s$  : ความเร็วซิงโครนัส

$N_r$  : ความเร็วโรเตอร์

### 2.4 แรงบิดเริ่มต้น (Starting Torque)

เป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นทันทีทันใดขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุน

$$T_{st} = \frac{k_2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} = k_2 \frac{R_2}{Z_2} \quad \text{โดยที่ } k_2 \text{ เป็นค่าคงที่} \quad \dots(2.3)$$

$T_{st}$  : แรงบิดเริ่มต้น

$R_2$  : ค่าความต้านทานของโรเตอร์ต่อ 1 เฟส

$X_2$  : ค่ารีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ต่อ 1 เฟส

$Z_2$  : ค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ต่อ 1 เฟส

แรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์แบบโรเตอร์กรงกระรอก ค่าความต้านทานไม่สามารถ  
 ปรับค่าได้ มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับรีแอกแตนซ์ โดยเฉพาะเมื่อเห็นชัดเมื่อเริ่มสตาร์ท เพราะฉะนั้น

ขณะสตาร์ท แรงบิดขณะสตาร์ทจะมีค่าน้อยประมาณ 1/5 เท่าของแรงบิดที่ภาระเต็มพิกัด กระแสมีค่าสูงประมาณ 5-7 เท่าของกระแสที่พิกัด และมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำ หลังจากนั้นกระแสจะลดลง ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์จะดีขึ้น

แรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์ที่มีโรเตอร์พันขดลวด ค่าความต้านทานสามารถปรับค่าได้โดยใช้รีโอสแตท (Rheostat) เฉพาะขณะสตาร์ทจะเพิ่มความต้านทานก่อนแล้วค่อยๆ ลดความต้านทานลง เพราะฉะนั้นขณะเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ แรงบิดจะมีค่ามาก กระแสจะมีค่าน้อย ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์สูง หลังจากสตาร์ทจะสามารถนำความต้านทานออกจากวงจรได้ แต่หากไม่นำความต้านทานออกก็สามารถแก้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้ดีขึ้นได้ แต่ประสิทธิภาพจะลดลง

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดขณะสตาร์ทและแรงบิดสูงสุด

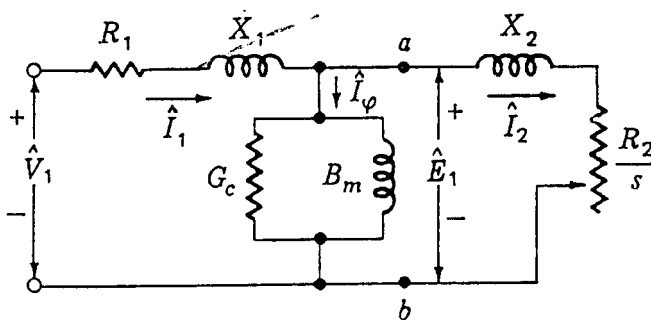
$$T_{st} \propto \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad \dots(2.4)$$

$$T_{max} \propto \frac{1}{2X_2} \quad \dots(2.5)$$

$$\therefore \frac{T_{st}}{T_{max}} = \frac{2R_2 X_2}{R_2^2 + X_2^2} = \frac{2R_2 / X_2}{2 + (R_2 / X_2)^2} \quad \dots(2.6)$$

$T_{MAX}$  : แรงบิดสูงสุด

2.6 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Equivalent Circuit)



รูปที่ 2.6 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการเขียนวงจรสมมูล เราเขียนเป็นแบบ 1 เฟส ดังนั้นเมื่อคำนวณจะต้องทำเป็น 3 เฟส กำหนดให้  $P_g$  คือ กำลังงานที่ส่งผ่านช่องอากาศ

$P_{w2}$  คือ กำลังงานสูญเสียความร้อนบนขดลวดทองแดงด้านโรเตอร์

$$\text{ดังนั้น} \quad P_g = 3|I_2|^2 \frac{R_2}{s} \quad \dots(2.7)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad T_e = \frac{P}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad \dots(2.8)$$

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{P} \quad \dots(2.9)$$

เมื่อ  $\omega_s$  : ความเร็วเชิงมุมที่ความเร็วซิงโครนัส

$f$  : ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ

$P$  : จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$\omega_r$  : ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

$$T_{sh} = \frac{P_{o/p}}{\omega_r} \quad \dots(2.10)$$

เมื่อ  $P_m$  : พลังงานกล (ยังไม่หักกำลังสูญเสียทางกล)

$P_{o/p}$  : พลังงานที่เพลา

$T_o$  : แรงบิดที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

$T_{sh}$  : แรงบิดที่เพลา

ในการคำนวณบางครั้งเพื่อความสะดวก จะไม่คิดค่า  $R_c$  อันเนื่องมาจากกำลังสูญเสียของแกนเหล็ก (core loss) โดยจะนำค่ากำลังสูญเสียของแกนเหล็กไปรวมกับกำลังสูญเสียจากการหมุน (rotation loss) เรียกรวมเป็น ความสูญเสียที่คงที่ (fix loss)

มอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 1 เฟส และหลายเฟส นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเพราะมีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

#### ข้อดี

1. มีโครงสร้างที่ง่าย แข็งแรง ทนทาน
2. มีราคาไม่แพง
3. ประสิทธิภาพเพียงพอกับการใช้งาน
4. บำรุงรักษาง่าย
5. ไม่มีแปรงถ่านจึงเป็นผลให้แรงเสียดทานน้อยกว่ามอเตอร์ชนิดอื่น
6. เพาเวอร์แฟคเตอร์ดีพอใช้
7. สามารถสตาร์ทเองได้ ไม่เหมือนมอเตอร์แบบซิงโครนัส

**ข้อเสีย**

1. กิณกระแสนะสตาร์ทสูง อาจจะต้องมีอุปกรณ์ที่ช่วยในการสตาร์ท
2. แรงบี คขณะสตาร์ทค่อนข้างต่ำ เมื่อมีการปรับความเร็วมอเตอร์จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง

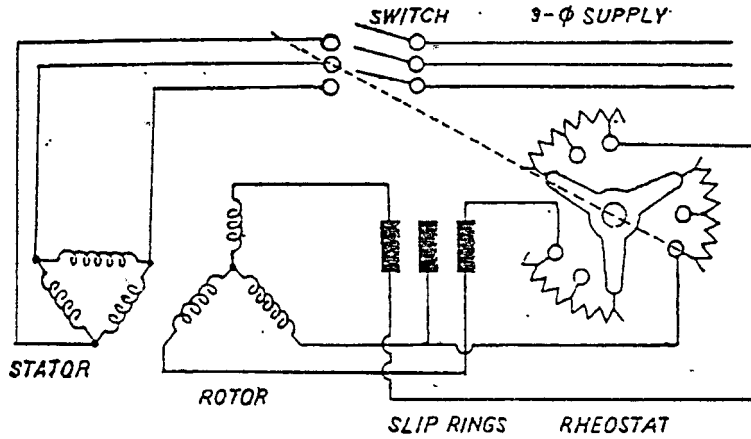
### บทที่ 3

#### การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วิธีการสตาร์ทมอเตอร์ วิธีที่ง่ายที่สุดนั่นก็คือวิธีการสตาร์ทแบบต่อตรง (DOL = Direct On Line) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้การป้อนศักดาไฟฟ้าเต็มพิกัดเข้าสู่มอเตอร์โดยตรง วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ง่ายที่สุด มีความน่าเชื่อถือสูงที่สุด เพราะไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อช่วยในการสตาร์ทแต่อย่างใด แต่วิธีนี้ไม่เหมาะที่ใช้ในการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขนาดพิกัดกำลังสูง ๆ เพราะวิธีการสตาร์ทแบบนี้ กระแสในขณะสตาร์ทจะสูงกว่าปกติถึง 5-7 เท่าของพิกัดกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดกำลังสูง ๆ คึงกระแสจากแหล่งจ่ายไฟมากในช่วงเวลานี้ ทำให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นที่ต่อจากแหล่งจ่ายไฟเดียวกัน ดังนั้นในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขนาดพิกัดกำลังสูง ๆ จึงจำเป็นที่จะต้องหาเทคนิควิธีการสตาร์ทใหม่ โดยเป็นเทคนิคที่จะลดค่ากระแสในขณะสตาร์ทให้ต่ำลง สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดพันขลวดนั้น ไม่จำเป็นที่จะต้องลดศักดาไฟฟ้าที่เข้าสู่ตัวมอเตอร์ เพราะสามารถที่จะต่อตัวด้านทานเพิ่มทางขลวดของโรเตอร์ได้ ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น กระแสที่ไหลในโรเตอร์มีค่าลดลง ส่งผลให้กระแสในขณะสตาร์ททางขลวดสเตเตอร์มีค่าลดลง ส่วนกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกนั้น ไม่สามารถต่อตัวด้านทานเพิ่มทางโรเตอร์ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องลดค่าศักดาไฟฟ้าที่เข้าสู่ตัวมอเตอร์แทน ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการลดค่าศักดาไฟฟ้านั้นก็มีหลายวิธี จึงทำให้วิธีการที่ใช้ในการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นมีหลายวิธีที่แตกต่างกัน

#### 3.1 วิธีการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบพันขลวด

มีอยู่วิธีเดียวคือ ใช้วิธีการต่อตัวด้านทานทางโรเตอร์ (Rotor rheostat) เป็นวิธีที่ใช้สตาร์ทมอเตอร์ชนิดพันขลวด เป็นการสตาร์ทโดยการต่อตัวด้านทานแบบปรับค่าได้เข้าไปยังขลวดที่โรเตอร์ โดยเมื่อมอเตอร์มีความเร็วเพิ่มขึ้นก็ค่อย ๆ ลดความต้านทานลง จนกระทั่งขลวดที่โรเตอร์ลัดวงจร (ความต้านทานภายนอกเท่ากับศูนย์) เมื่อความเร็วถึงพิกัด การสตาร์ทวิธีนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องลดค่าศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ตัวมอเตอร์ ในขณะที่สตาร์ทสามารถใส่ศักดาไฟฟ้าเต็มพิกัดตั้งแต่เริ่มสตาร์ทได้เลย สาเหตุที่กระแสลดลงนั้นก็เนื่องมาจากอิมพีแดนซ์ที่ตัวโรเตอร์เพิ่มขึ้น (เนื่องจากเพิ่มค่าความต้านทาน  $R$  เข้าไป) ทำให้ค่ากระแสที่โรเตอร์ลดลง ส่งผลให้ค่ากระแสที่สเตเตอร์ก็ลดลงด้วย การต่อตัวด้านทานภายนอกเข้าที่โรเตอร์นั้น จะทำให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่โรเตอร์ดีขึ้น ทำให้แรงบิดเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะที่มีโหลดได้ หรือสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับโหลดที่ต้องการค่าแรงบิดเริ่มต้นสูงได้



รูปที่ 3.1 การสตาร์ทมอเตอร์โดยต่อตัวต้านทานทางโรเตอร์

3.2 วิธีการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้ไม่สามารถต่อตัวต้านทานภายนอกเข้ากับโรเตอร์ได้ ทำให้ต้องใช้เทคนิคการลดค่าศักดาไฟฟ้าที่เข้าสู่ตัวมอเตอร์แทน ซึ่งวิธีการลดค่าศักดาไฟฟ้าก็มีหลายวิธี ทำให้เกิดวิธีการสตาร์ทหลายวิธี ดังนี้

3.2.1. การสตาร์ทมอเตอร์โดยต่อแหล่งจ่ายเข้าสู่ตัวมอเตอร์โดยตรง (Direct On Line, DOL)

เป็นวิธีการสตาร์ทมอเตอร์ที่ง่ายที่สุด เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด และมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด เพราะไม่ต้องมีอุปกรณ์อะไรเพิ่มเติม เป็นการสตาร์ทที่ใช้การต่อศักดาไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเข้าสู่ตัวมอเตอร์โดยตรง เป็นวิธีที่เหมาะสมในการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดกำลัง น้อยๆ ไม่เหมาะในการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดกำลังขนาดสูง ๆ เพราะกระแสในขณะสตาร์ทจะสูงเกินไปจนส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟชุดเดียวกัน

$$\begin{aligned} \text{ในขณะสตาร์ท } s = 1 \quad T &= T_{st} \quad I_1 = I_{st} \\ T_{st} &= K I_{st}^2 \end{aligned} \quad \dots(3.1)$$

$$\begin{aligned} \text{ในขณะจ่ายกระแสเต็มพิกัด } T &= T_f \quad s = s_f \quad I = I_f \\ T_f &= K \frac{I_f^2}{s_f} \end{aligned} \quad \dots(3.2)$$

จากสมการ 3.1 และ 3.2

$$\frac{T_{st}}{T_f} = \left(\frac{I_{st}}{I_f}\right)^2 \cdot s_f \quad \dots(3.3)$$

$T_f$  : แรงบิดที่พิกัด

$I_f$  : กระแสที่พิกัด

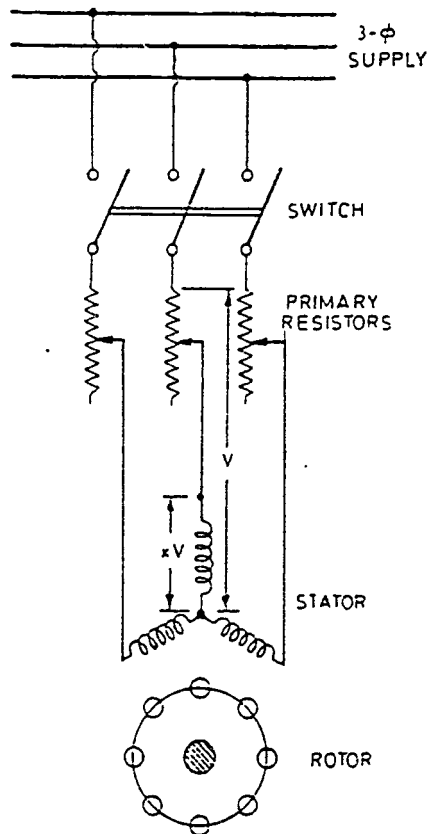
$I_{sc}$  : กระแสขณะสตาร์ท

สมมติว่าในกรณี  $I_{sc} = 7I_f, s_f = 4\% \therefore T_{sc} / T_f = 7^2 \times 0.04 = 1.96$  จะเห็นได้

ว่า

กระแสในขณะสตาร์ทเพิ่มขึ้นเป็น 7 เท่า ในขณะที่แรงบิดในขณะเริ่มสตาร์ทเพิ่มขึ้นเป็น 1.96 เท่า

### 3.2.2. การสตาร์ทมอเตอร์โดยวิธีใช้ตัวต้านทานต่อทางต้านปฐมภูมิ (Primary resistor)



รูปที่ 3.2 แสดงการสตาร์ทมอเตอร์แบบใช้ตัวต้านทานต่อทางปฐมภูมิ

วิธีนี้เป็นกรนำเอาตัวต้านทานที่ปรับค่าได้มาต่ออนุกรม กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้มีศักดาไฟฟ้าส่วนหนึ่งตกคร่อมตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ ส่งผลให้ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอเตอร์มีค่าลดลง กระแสในขณะเริ่มสตาร์ทก็มีค่าลดลง

สมมติว่า เมื่อใช้ตัวต้านทานแล้ว อัตราส่วนระหว่างศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอเตอร์ เมื่อใช้ตัวต้านทานเมื่อเทียบกับแบบสตาร์ทโดยตรงเป็น  $x (x < 1)$

เปรียบเทียบค่ากระแสในแบบสตาร์ท โดยใช้ตัวต้านทานกับสตาร์ทโดยตรง

$$V_{st,R} = xV_{st,DOL}$$

และ

$$I = \frac{V}{Z}$$

$$I_{st,R} = xI_{st,DOL}$$

จะพบว่ากระแสในขณะสตาร์ทก็ลดลงเหลือ  $x$  เท่า ( $x < 1$ )

เปรียบเทียบแรงบิดเริ่มต้นในแบบใช้ตัวต้านทานกับแบบต่อตรง

$$T_{st,R} = KI_{st,R}^2$$

$$T_{st,DOL} = KI_{st,DOL}^2$$

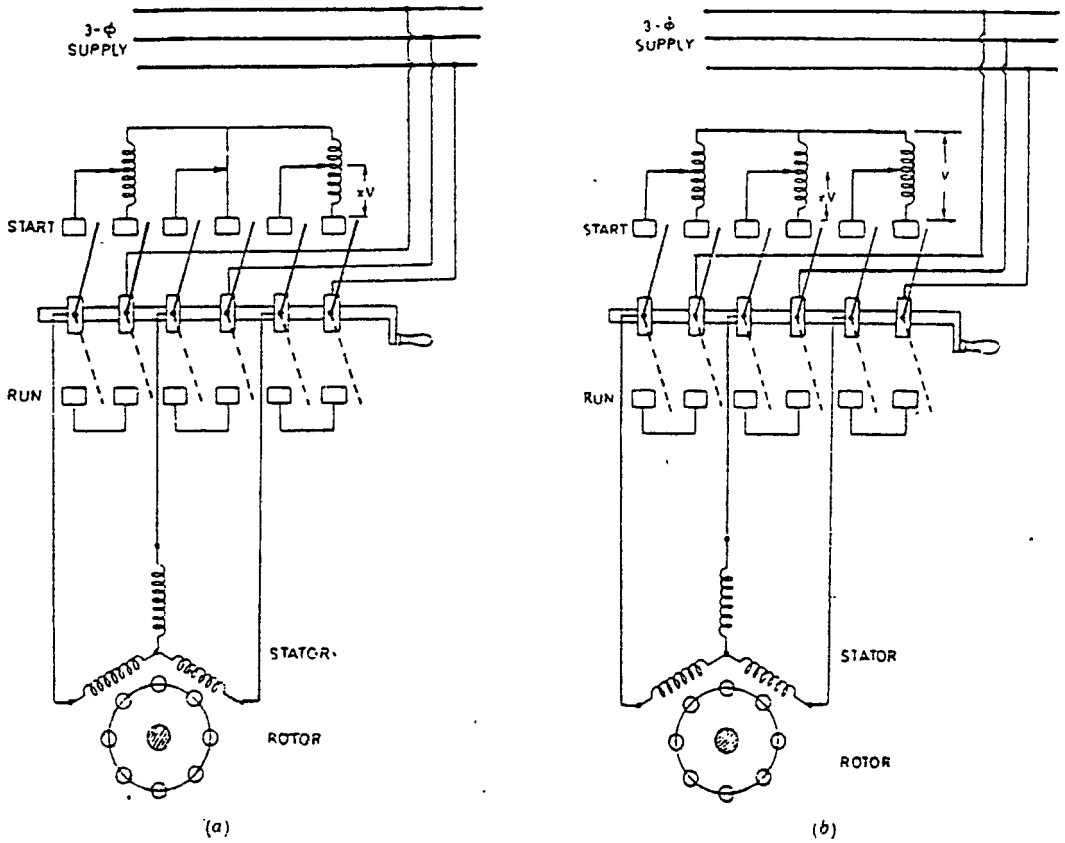
$$\frac{T_{st,R}}{T_{st,DOL}} = \left(\frac{I_{st,R}}{I_{st,DOL}}\right)^2 = x^2$$

จะพบว่า แรงบิดเริ่มในขณะสตาร์ทจะลดลงเหลือ  $x^2$  เท่า (ยิ่งน้อยลง)

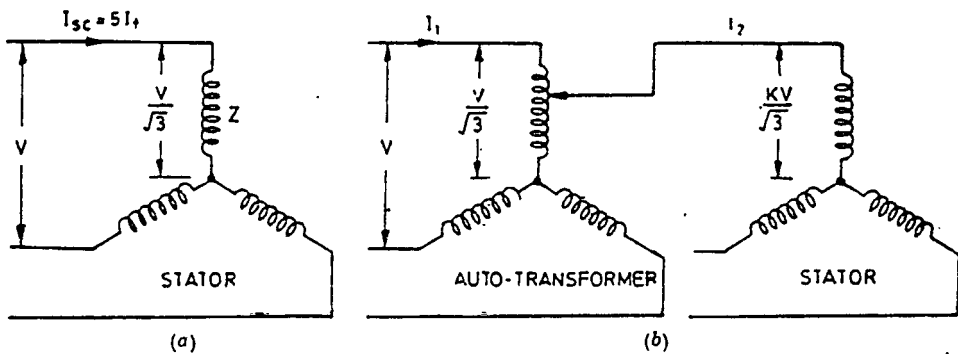
### 3.2.3 การสตาร์ทมอเตอร์โดยใช้้อโตทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Auto-transformer)

วิธีการสตาร์ทแบบนี้จะใช้้อโตทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่มีแท็ป (tap) ทางขดลวดทุติยภูมิหลายๆ แท็ป ในการลดศักดาไฟฟ้าขณะสตาร์ท อ้อโตทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ใช้นั้นอาจจะใช้ 2 ตัว โดยต่อแบบโอเพน-เดลตา (open-delta) หรือใช้ 3 ตัว ต่อแบบสตาร์ทหรือเดลตาก็ได้ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ก็สามารถทำได้เช่น รูปที่ 3.3 แสดงการต่อวงจรของตัวสตาร์ทแบบอ้อโตทรานส์ฟอร์มเมอร์เริ่มแรก ศักดาไฟฟ้าที่ต่ำกว่าพิกัดจะถูกจ่ายให้กับมอเตอร์ จนกระทั่งเมื่อความเร็วที่เพลาของมอเตอร์ถึง 80% สวิตช์ก็จะถูกสับไปสู่อีกรวงจรถ่วงขดลวดโรเตอร์ โดยตัดวงจรของอ้อโตทรานส์ฟอร์มเมอร์จะมีแท็ปอยู่ 3 แท็ป โดยแต่ละแท็ปจะลดศักดาไฟฟ้าเหลือ 80% , 65% และ 50% ของศักดาไฟฟ้าของแหล่งจ่าย การต่ออ้อโตทรานส์ฟอร์มเมอร์ส่วนใหญ่จะนิยมต่อแบบโอเพนเดลตา ซึ่งมีข้อดี คือ ราคาถูก แม้ว่ากระแสในช่วงสตาร์ทนั้นจะไม่สมดุล แต่ความไม่สมดุลนั้นมีค่าเพียง 15% เท่านั้นและเมื่อหลังจากช่วงเวลาสตาร์ทผ่านไป ความสมดุลก็จะกลับคืนมา อ้อโตทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ใช้นั้นไม่จำเป็นที่จะต้องมีพิกัดเท่ากับตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะกระแสจะผ่านตัวอ้อโตทรานส์ฟอร์มเมอร์ในช่วงสตาร์ทเท่านั้น หลังจาก

มอเตอร์เดินตามปกติแล้วจะไม่มีกระแสไหลผ่านตัวออโตทรานส์ฟอร์มเมอร์เลย กล่าวได้ว่ากระแสจะไหลผ่านออโตทรานส์ฟอร์มเมอร์ในช่วงสั้น ๆ จึงทำให้สามารถที่จะใช้งานเกินพิกัดได้



รูปที่ 3.3 แสดงการต่อวงจรในการสตาร์ทมอเตอร์แบบใช้ออโตทรานส์ฟอร์มเมอร์



รูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบวงจรการสตาร์ทมอเตอร์แบบต่อดirect กับแบบใช้ออโตทรานส์ฟอร์มเมอร์

รูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ กระแสไลน์ และแรงบิดเริ่มต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยต่อมอเตอร์แบบสตาร์

โดยในรูป 3.4 (ก) เป็นการแสดงในกรณีที่มอเตอร์ถูกสตาร์ทแบบต่อตรง ส่วนในรูป 3.4 (ข) นั้น เป็นการสตาร์ทแบบใช้โอโตทรานส์ฟอร์มเมอร์  
เปรียบเทียบกระแสเริ่มต้น ทั้งสองกรณี

$$I_{st,DOL} = \frac{V}{\sqrt{3}Z}$$

กรณีการสตาร์ทโดยใช้โอโตทรานส์ฟอร์มเมอร์

กระแสที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์

$$I_{st,MOTOR} = \frac{xV}{\sqrt{3}Z}$$

กระแสที่ไหลทางขดปฐมภูมิของโอโตทรานส์ฟอร์มเมอร์

$$I_{st,Line} = \frac{x^2V}{\sqrt{3}V}$$

$$\frac{I_{st,Line}}{I_{st,DOL}} = x^2$$

จากสมการสรุปได้ว่ากระแสที่ไหลเข้าสู่ตัวมอเตอร์จะลดลงเหลือ  $x$  เท่า ในขณะที่กระแสจากแหล่งจ่ายลดลงเหลือ  $x^2$  เท่า

เปรียบเทียบแรงบิดเริ่มต้นทั้งสองกรณี

กรณีการสตาร์ทแบบต่อตรง

$$T_{st,DOL} = KI_{st,DOL}^2$$

กรณีการสตาร์ทโดยใช้โอโตทรานส์ฟอร์มเมอร์

$$T_{st,auto} = KI_{st,motor}^2$$

$$\frac{T_{st,Auto}}{T_{st,DOL}} = x^2$$

ดังนั้นแรงบิดเริ่มลดลงเหลือ  $x^2$  เท่า

### 3.2.4 การสตาร์ทมอเตอร์แบบสตาร์-เดลตา

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้สตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีเวลาเดินเครื่องปกติมีการต่อแบบเดลตาที่ขดลวดสเตเตอร์ การสตาร์ทแบบสตาร์-เดลตานี้จะเริ่มต้นโดย สับสวิทช์ให้ขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบสตาร์ ทำให้ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดลดลง  $\sqrt{3}$  เท่า เมื่อความเร็วมอเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่งก็จะสับสวิทช์เปลี่ยนการต่อขดลวดสเตเตอร์เป็นแบบเดลตา

คุณลักษณะ	วิธีการสตาร์ท				
	DOL	Y- $\Delta$	Auto-Transformer	Primary Resistor	Soiid State
กระแสเริ่มเดินเครื่อง	100%	33%	64%,42%,25%	70%	0-100%
ทอร์กเริ่มเดินเครื่อง	100%	33%	64%,42%,25%	49%	ปรับได้ 5-50%
ขนาดทางกายภาพ	เล็กสุด	ปานกลาง	ใหญ่	ปานกลาง	เล็ก
การเกิดกระแสเสิร์จ	มากที่สุด	มี	มี	มี	มีน้อยมาก
ความสามารถในการควบคุม	เปิด/ปิด	เปิด/ปิด	ได้สูงสุด 3 แท็ป	เปิด/ปิด	ปรับแต่งให้เหมาะสมได้
ช่วงเวลาในการสตาร์ท	2-3 วินาที	3-7 วินาที	7-12 วินาที	7-12 วินาที	ปรับแต่งได้
ข้อดี	ราคาถูก ให้ทอร์กเริ่มเดินเครื่องสูง	ค่อนข้างราคาถูก	สามารถเลือกค่าได้	สามารถเลือกค่าได้	ปรับแต่งค่าต่างได้ละเอียด
ข้อเสีย	กระแสเริ่มเดินเครื่องสูง	ทอร์กเริ่มค้ำต่ำปรับค่าไม่ได้	หม้อแปลงที่มีราคาแพง	ต้องใช้ตัวต้านทาน	ราคาแพง

**ตารางที่ 3.1** เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการสตาร์ทมอเตอร์แบบต่างๆ

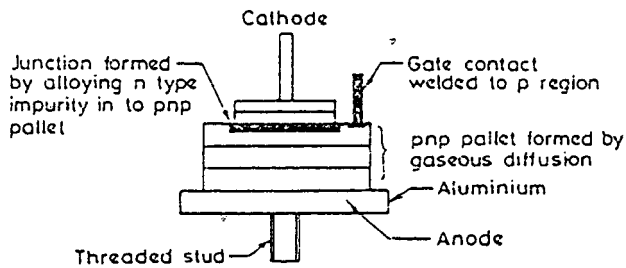
**บทที่ 4**

**ไทรสเตอร์**

ไทรสเตอร์ เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ตัดต่อวงจรกำลังโดยสามารถควบคุมแรงดันและกระแสด้วยเงื่อนไขการทรริกที่ลำดับมุมต่าง ๆ โดยที่ไม่อาศัยส่วนเคลื่อนที่ใด ๆ ในการทำงานหรือตัดต่อวงจร ไทรสเตอร์เป็นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วย ซิลิคอนคอนโทรลเรกติไฟร์ (Silicon Control Rectifier) ไครแอค (Triac) แต่ปัจจุบันนี้นิยมเรียก เอสซีอาร์ ว่า ไทรสเตอร์กันมากกว่า

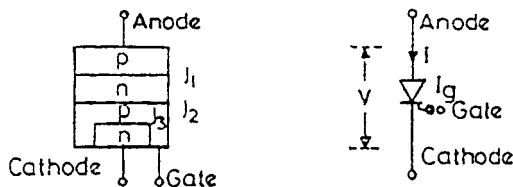
สำหรับการควบคุมการตัดต่อวงจรกำลังที่ใช้ไทรสเตอร์กับมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพงและเพื่อการใช้งานที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติ การทำงาน คุณสมบัติการเปิดปิด พิกัดการใช้งาน และการป้องกัน เพื่อการใช้งานร่วมกับโหลดและการสร้างส่วนควบคุมที่แม่นยำ

**4.1 ลักษณะทั่วไปของไทรสเตอร์**

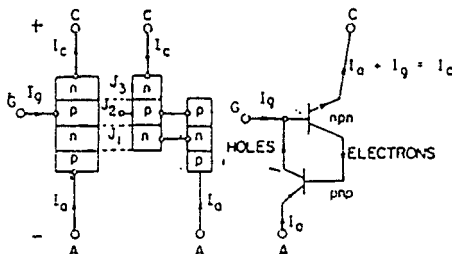


รูปที่ 4.1 แสดงรายละเอียดโครงสร้างทั่วไปของไทรสเตอร์

จากการศึกษาพิจารณาโครงสร้างของไทรสเตอร์มีลักษณะดังรูปที่ 4.1 จะเป็นสารกึ่งตัวนำ pnpn ที่เกิดจากทรานซิสเตอร์ชนิด pnp และ npn ต่อกันดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของไทรสเตอร์

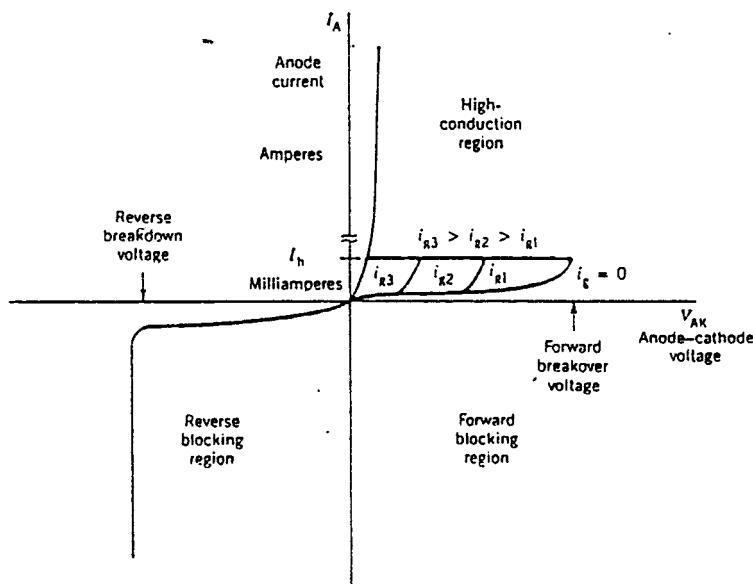


รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างทางวงจรแบบไทรสเตอร์ 2 ตัว

จะเรียกสารกึ่งตัวนำชั้น p หรืออิมิตเตอร์ (Emitter) ของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  (ชนิด npn) ว่า แอนโนด (Anode) และเรียกสารกึ่งตัวนำชั้น n หรืออิมิตเตอร์ ของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  (ชนิด pnp) ว่า คาโทด (Cathode) ส่วนสารกึ่งตัวนำตรงกลางหรือคอลเลคเตอร์ (Collector) ของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ว่า เกต (Gate)

4.2 การทำงานและคุณสมบัติของไทรสเตอร์

ไทรสเตอร์มีลักษณะการทำงานในสถานะต่าง ๆ 3 สถานะคือ สถานะรีเวิร์สบล็อกกิง (reverse blocking) สถานะฟอร์เวิร์ดบล็อกกิง (forward blocking) และสถานะฟอร์เวิร์ดคอนดักชัน (forward conduction) โดยมีกราฟคุณสมบัติดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟคุณสมบัติแรงดันและกระแส

#### 4.2.1 สภาวะรีเวิร์สบล็อกกิง

ไทรสเตอร์จะเรียกว่าอยู่ในสภาวะรีเวิร์สบล็อกกิงเมื่อคาโรดมีแรงดันคร่อมเป็นบวกเมื่อเทียบกับแอโนด ทำให้รอยต่อ J1 และ J3 มีลักษณะเป็นรีเวิร์สไบแอส (reverse bias) โดยที่ J2 มีลักษณะเป็นฟอร์เวิร์ดไบแอส (forward bias)

จึงมีลักษณะคล้าย ๆ กับไดโอด (Diode) 2 ตัวอนุกรมกัน โดยมีแรงดันรีเวิร์ส (reverse voltage) คร่อมอยู่และจะมีกระแสรีเวิร์สรั่วไหล (reverse leakage current) น้อย ๆ ไหล (หน่วยมิลลิแอมป์) เรียกสภาวะนี้ว่ารีเวิร์สบล็อกกิงหรือหยุดทำงานของไทรสเตอร์

กระแสรีเวิร์สที่มีค่าน้อย ๆ นี้เกิดจากแรงดันรีเวิร์ส ที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันอวาลานซ์ (avalanche voltage) และทำให้มีกระแสรีเวิร์สเพิ่มอย่างรวดเร็ว ณ จุดนี้ที่เรียกว่าแรงดันรีเวิร์สเบรคดาวน์ (reverse breakdown)

กระแสที่สูงขึ้นเนื่องจากแรงดันสูงเพิ่มขึ้นจนเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและสามารถทำลายตัวไทรสเตอร์ได้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปดังนั้นในการใช้งานใด ๆ ควรจะแน่ใจว่าแรงดันรีเวิร์สสูงสุดที่ตกคร่อมจะต้องไม่เกินแรงดันเบรคดาวน์

ไทรสเตอร์ได้ถูกออกแบบให้มีแรงดันรีเวิร์สคร่อมที่รอยต่อ J1 ถ้ามีแรงดันที่ขาเกตเทียบ กับคาโรดเป็นบวก รอยต่อ J3 จะมีลักษณะฟอร์เวิร์ดไบแอส ทำให้มีฟอร์เวิร์ดไบแอส ที่รอยต่อ J1, J2 ด้วยทำให้เกิดการเพิ่มของกระแสรีเวิร์สรั่วไหล ทั้งนี้การเพิ่มของกระแสรั่วไหลอาจจะมาจากความร้อนด้วยก็ได้

#### 4.2.2 สภาวะฟอร์เวิร์ดบล็อกกิง

เมื่อมีแรงดันฟอร์เวิร์ดคร่อมตัวไทรสเตอร์ หรือ มีแรงดันคร่อมแอโนด - คาโรดเป็นบวก จะทำให้เกิดสภาวะนำกระแสขึ้นได้ โดยมีวิธีการทำให้เกิดการนำกระแสได้ 4 วิธีคือ

1. มีแรงดันตกคร่อม ที่มีค่ามากกว่าแรงดันฟอร์เวิร์ดเบรคโอเวอร์ (forward breakover voltage)
2. มีการทริกที่ขาเกต หรือมีสัญญาณจ่ายที่ขาเกต
3. มีอัตราการเพิ่มแรงดัน  $\frac{dv}{dt}$  ที่สามารถเกิดการนำกระแสได้
4. เกิดการแผ่ของรังสีหรือลำแสงตรงรอยต่อ เกต- คาโรด

##### 4.2.2.1 แรงดันที่มีค่ามากกว่าแรงดันฟอร์เวิร์ดเบรคโอเวอร์

การเพิ่มของแรงดันแอโนดเทียบกับคาโรดโดยที่ไม่มีการจ่ายแรงดันเข้าขาเกต จะทำให้เกิดแรงดันอวาลานซ์เบรคดาวน์ ที่รอยต่อ J2 ที่แรงดันที่เรียกว่า แรงดันฟอร์เวิร์ดเบรคโอเวอร์ ณ แรงดันนี้ไทรสเตอร์จะเปลี่ยนคุณสมบัติและพิกัดโดยมีกระแสฟอร์เวิร์ดรั่วไหลมากขึ้น แต่

อาจจำกัดค่าด้วยอิมพีแดนซ์ของโหลด ในสภาวะนำกระแสแบบนี้จะมีแรงดันตกคร่อม 1 - 1.5 โวลต์ และมีค่ากระแสที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น โดยปกติแล้วค่า แรงดันฟอร์เวิร์ดเบรคโอเวอร์ จะมีค่ามากกว่าแรงดันรีเวิร์สเบรคโอเวอร์

ถ้ากระแสที่ขาแอนโอดลดลงเพราะว่ามีรีเวิร์สไบแอสที่ J2 ไทริสเตอร์ก็ควรจะนำกระแสต่อไป เว้นเสียแต่ว่าหากกระแสฟอร์เวิร์ดลดลงต่ำกว่าค่ากำหนดก็จะเกิดสภาวะหยุดนำกระแสหรือ บล็อกกิง จะเรียกกระแสค่าน้อย ๆ ที่จะทำให้เกิดการหยุดนำกระแสว่า กระแสโฮลดิ้ง (holding current)

#### 4.2.2.2 การทริกขาเกต

การทริกขาเกตเป็นวิธีการที่สำคัญที่ทำให้ไทริสเตอร์ทำงานหรือนำกระแส แรงดันที่ใช้งานปกติจะมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันเบรคโอเวอร์ทำให้ไทริสเตอร์ยังคงอยู่ในสภาวะฟอร์เวิร์ดบล็อกกิง เพราะไม่มีแรงดันจ่ายที่ขาเกต เมื่อต้องการจะให้เกิดการนำกระแส หรือต่อวงจร ก็ต้องมีแรงดันคร่อม เกต - คาโทดที่เป็นบวก เรียกว่าการทริกขาเกต

แรงดันและกระแสที่ขาเกตจะทำให้ไทริสเตอร์ทำงานได้นั้นมีค่าตั้งแต่ มิลลิแอมป์ จนถึงค่าหลาย ๆ แอมป์

เมื่อไทริสเตอร์นำกระแสไปแล้ว กระแสเกตก็ไม่ต้องการอีกต่อไป ไทริสเตอร์ยังคงนำกระแสต่อไป ดังนั้นสัญญาณแคพัลส์ (Pulse) สั้น ๆ ก็เพียงพอสำหรับการนำกระแสได้ อย่างไรก็ตาม ถ้ากระแสเกตลดลงจนมีค่าศูนย์ ก่อนที่กระแสแอนโอดจะมีค่าถึงกระแสที่เรียกว่า กระแสแล็ทซิง (latching current) ไทริสเตอร์ก็จะไม่ทำงานหรือนำกระแสเลย ความกว้างของพัลส์ของขาเกตจะต้องเพียงพอที่จะทำให้กระแสแอนโอดมีค่าถึงกระแสแล็ทซิงด้วย

เมื่อกระแสแอนโอดถึงค่ากระแสแล็ทซิง แล้ว ไทริสเตอร์จะนำกระแสต่อไปโดยไม่หยุดทำงาน จะไม่คืนสู่สภาวะฟอร์เวิร์ดบล็อกกิง เว้นแต่ว่าไม่มีแรงดันพัลส์ที่ขาเกต และ ค่ากระแสแอนโอดตกลงต่ำกว่ากระแสโฮลดิ้ง

ปกติกระแสแล็ทซิงจะสูงกว่ากระแสโฮลดิ้ง หรือมีค่าเป็นสามเท่าของกระแสโฮลดิ้ง (กรณีที่ไม่มีการระบายจากผู้ผลิต)

#### 4.2.2.3 อัตรา $\frac{dv}{dt}$

ไทริสเตอร์สามารถทำงานหรือนำกระแสได้ด้วยหากมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องมีการทริกขาเกต เรียกวิธีนี้ว่าวิธี  $\frac{dv}{dt}$  การเพิ่มแรงดันอย่างรวดเร็วทำ

ให้มีกระแสทรานเซียนท์ (transient current) ที่เพียงพอให้เกิดการทริกได้ ซึ่งมีค่าระหว่าง 10 - 200 โวลต์ / ไมโครวินาที

#### 4.2.2.4 การแผ่รังสีหรือลำแสงตรงขาเกต - คาโรด

ไทรสเตอร์สามารถที่จะนำกระแสได้ด้วยอีกวิธี คือการมีลำแสง ส่องตรงรอยต่อเกต - คาโรดทำให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะผ่านรอยต่อ และเกิดเป็นการกระแสได้

#### 4.2.3 สภาวะฟอร์เวิร์ดคอนดักชัน

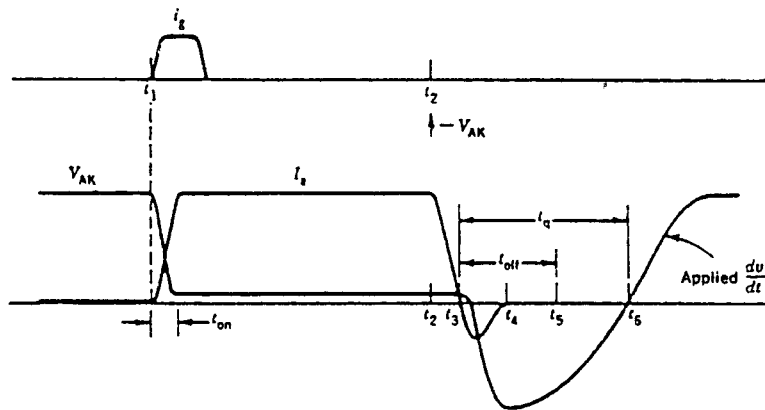
เราจะเรียกสภาวะการใช้งานของไทรสเตอร์ขณะทำงานว่าฟอร์เวิร์ดคอนดักชัน หรือกำลังนำกระแสซึ่งนำไปใช้งานควบคุมและสามารถตัดต่อวงจรกำลังได้ ซึ่งการเกิดฟอร์เวิร์ดคอนดักชัน อาจจะเกิดจากวิธีใดวิธีหนึ่งดังกล่าวนมาแล้วก็ได้

### 4.3 คุณสมบัติทางไดนามิก

#### 4.3.1 คุณสมบัติในระหว่างเริ่มนำกระแส

ช่วงเริ่มนำกระแส นั้นเมื่อพิจารณาบนพื้นที่เล็ก ๆ ก่อนที่จะเกิดการนำกระแสระหว่างแอโนด - คาโรด ถ้ากระแสที่ไหลผ่านแอโนดเพิ่มอย่างรวดเร็วจนมีกระแสไหลมากมาบนพื้นที่นั้น อาจจะทำลายตัวไทรสเตอร์ได้ นั่นคือ ค่า  $\frac{di}{dt}$  สูงสุดที่ยอมรับได้ที่ไม่ทำลายไทรสเตอร์ โดยปกติจะประมาณ 20 - 300 แอมแปร์ / ไมโครวินาที

การเพิ่มของกระแสอย่างรวดเร็วทำให้  $\frac{di}{dt}$  เพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มของกระแสจำกัดด้วยการใช้ตัวเหนี่ยวนำอนุกรมในวงจรตัวเหนี่ยวนำจะลดการสูญเสียจากการเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแสได้ และสามารถลดอัตราการไหลของกระแสหลังจากนำกระแสด้วย ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงคุณสมบัติระหว่างการเริ่มนำกระแส

เวลาในการเริ่มนำกระแส เป็นช่วงระหว่างเริ่มการทริก ในสภาวะ ฟอร์เวิร์คบล็อกกิง และช่วงสุดท้ายของการเกิดแรงดันตกคร่อมที่ไทรสเตอร์หลังจากนำกระแส เวลาในการเริ่มนำกระแส มี 3 ค่าคือ ช่วงเวลาดีเลย์ ( Delay time :  $t_d$  ) ช่วงเวลาไรส์ ( Rise time :  $T_r$  ) ช่วงเวลาสปรีด ( Spread time :  $t_p$  )

- ช่วงเวลาดีเลย์  $t_d$

เป็นเวลาระหว่างช่วงก่อนที่ขาเกตจะได้รับสัญญาณพัลส์และช่วงการเพิ่มของกระแสแอโนด

- ช่วงเวลาไรส์  $t_r$

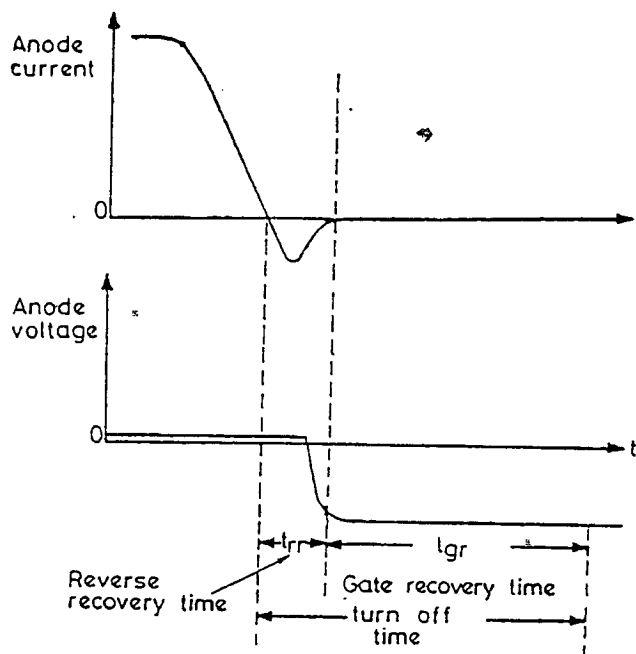
ไทรสเตอร์จะเกิดการแพร่สูงสุดจากแรงดันและกระแสที่สูง ที่ตรงรอยต่อนั้น หรือเป็นช่วงการเพิ่มกระแสสูงสุด

- ช่วงเวลาสปรีด  $t_p$

เป็นเวลาที่ใช้ในช่วงการนำกระแสสู่สภาวะคงที่เวลาที่ใช้ในการเริ่มนำกระแสจะมีค่าประมาณ 1-3 ไมโครวินาที สามารถที่จะเพิ่มลดได้ด้วยการใช้กระแสทริกสูง ๆ

#### 4.3.2 คุณสมบัติระหว่างการเริ่มหยุดนำกระแส

การเริ่มหยุดนำกระแส หมายความว่าไทรสเตอร์ได้กลับสู่ฟอร์เวิร์คบล็อกกิง หลังจากการเกิดฟอร์เวิร์ค กระบวนการเริ่มหยุดนำกระแส มักจะเรียกว่า คอมมิวเทชัน ( Commutation ) ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการลดกระแสแอโนดให้มีค่าศูนย์และรักษาแรงดันรีเวิร์สไบแอสไว้ดังรูปที่ 4.6

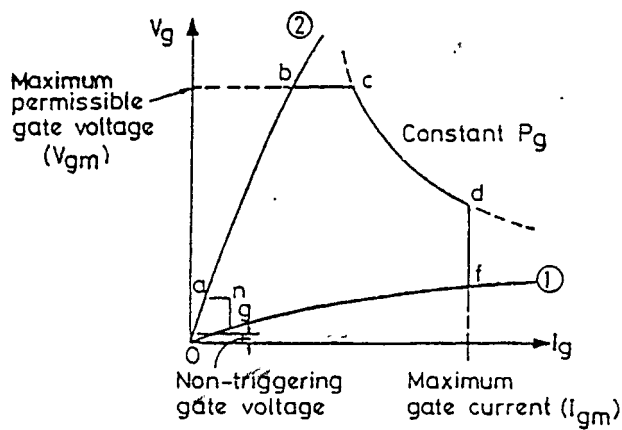


รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นในระหว่างเริ่มหยุดนำกระแส

ช่วงเวลาหยุดนำกระแสคือเวลาที่ใช้ในการกลับสู่สภาวะฟอร์เวิร์คบล็อกกิง หลังจากที่เกิดกระแสแอโนดให้มีค่าศูนย์ โดยมี 2 ช่วงคือ เวลารีเวิร์ตริบเวอร์รี่ ( reverse recovery time :  $t_{rr}$  ) และ เวลาเกตรีคัปเวอร์รี่ ( gate recovery time :  $t_{gr}$  )

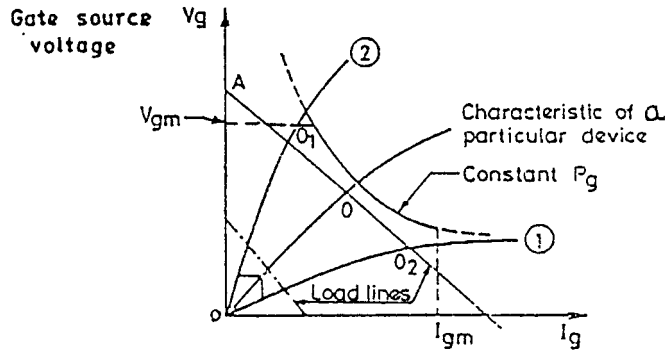
4.4 คุณสมบัติในการทริก

การใช้แรงดันกระแสตรงทริกคังแสดงรูปที่ 4.7 แสดงถึงแรงดันและกระแสเกต โดยที่มีช่วงที่ขั้วขาเกตคือช่วง a b c d f g n a แรงดัน  $V_g$  และกระแส  $I_g$  จะเปลี่ยนแปลงตามแต่ละชนิดของทรินสเตอร์ กราฟเส้นที่ 1 และ 2 เป็นกราฟช่วงที่มีการแก้ไขสามารถใช้ได้ สำหรับค่าค่าสุดของการทริกทั้งกระแสและแรงดัน กราฟที่ใกล้จุดกำเนิดจะมีความต้องการพลังงานสูง ณ ที่อุณหภูมิค่า ๆ ที่ระบุโดยค่าสูงสุดของแรงดัน  $V_{gm}$  กระแส  $I_{gm}$  และ พลังงานที่เกิด  $P_g$  ค่าที่สูงเกินกว่าค่าเหล่านี้จะเป็นอันตรายต่อตัวทรินสเตอร์และบ่อยครั้งที่มีการกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดด้วย และในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณทริกจะต้องเป็นค่าไม่เกินค่าสูงสุด



รูปที่ 4.7 แสดงคุณสมบัติการทริก

เส้นกราฟของการทริกจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเอียงจากซ้ายลงมาทางขวา ดังกราฟรูปที่



รูปที่ 4.8 แสดงการเลือกแรงดันและกระแสทรัก

จากกราฟบนเส้น  $AO_1O_2$  จะมีจุดทำงานที่จุดใดก็ได้ในช่วงระหว่าง  $O_1O_2$  ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของอุปกรณ์แต่ละตัว จะเป็นจุดทำงานที่ดี ถ้าจุดนั้นมีพลังงาน  $P_g$  น้อยกว่าพลังงานสูงสุด

และค่าที่ต้องใช้ในการทรักคือแรงดันและกระแส ที่เป็นสัญญาณพัลส์ต่อเนื่องมีความกว้างที่ต่ำกว่า 100 ไมโครวินาที ถ้าสัญญาณพัลส์ยิ่งแคบ แรงดันและกระแสก็ยิ่งเพิ่ม

#### 4.5 พิกัดการใช้งานของไทรสเตอร์

เพื่อการใช้งานที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ ควรจะใช้งานที่พิกัดเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ ที่ต้องมีการจำกัดค่าต่าง ๆ ทั้งในสภาวะ เริ่มนำกระแส และ เริ่มหยุดนำกระแส พิกัดเหล่านี้ก็คือ พิกัดกระแส พิกัดแรงดัน

##### 4.5.1 พิกัดกระแส

เมื่อมีกระแสไหลเข้าที่มีค่ามากกว่าปกติ ผลทำให้เกิดการเพิ่มของอุณหภูมิอันเนื่องมาจากความร้อนจากกรณีต่าง ๆ คือ

1. ฟอร์เวิร์ดคอนดักชัน
2. เทิร์นออนคอนดักชัน ( Turn on conduction )
3. เทิร์นออฟคอนดักชัน ( Turn off conduction )
4. ฟอร์เวิร์ดบล็อกกิง

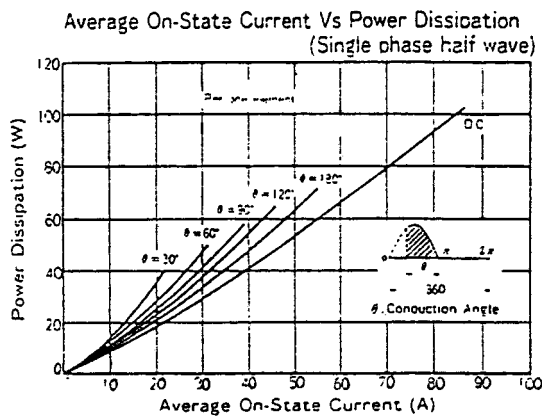
5. รีเวิร์สบล็อกกิง

6. การทรักษาเกต

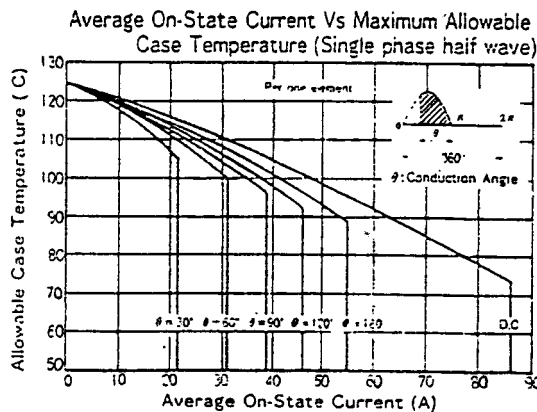
ดังเช่นในการใช้งานในอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง จะทำให้ทริสเตอร์ทำงานและหยุดบ่อยครั้ง ทำให้เกิดความร้อนสูง แต่ถึงกระนั้น การติดตั้งที่แตกต่างกันก็ทำให้มีอุณหภูมิต่างกันด้วย ดังนั้นในการใช้งานต้องมีพิกัดกระแสต่าง ๆ คือ

- กระแสเฉลี่ย  $I_T$

การสูญเสียพลังงานในทริสเตอร์ขึ้นกับค่ากระแสเฉลี่ยในทริสเตอร์ที่ไหลเข้า ดังรูปที่ 4.9 จะแสดงพลังงานที่สูญเสียที่กระแสเฉลี่ยค่าต่าง ๆ กัน ( ตามมุมการนำการนำกระแส ) และใช้ ในย่านความถี่ 50 - 400 Hz สำหรับกระแสต่อเนื่องที่ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงสุด และยังแสดงค่ากระแสเฉลี่ยที่เกิด กับมุมการทรักด้วย



รูปที่ 4.9 แสดงพลังงานเฉลี่ย ณ อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.10 แสดงอุณหภูมิสูงสุดกับกระแส

จากรูปที่ 4.9 จะพบว่ามุมการนำกระแสที่ต่างกันทำให้เกิดกระแสที่ต่างกัน จนถึงค่ากระแส rms สูงสุด โดยที่เรานิยามความร้อนจากกำลังสองของกระแส

- กระแสอาร์เอ็มเอส  $I_{RMS}$

เพื่อป้องกันความร้อนที่มากเกินไปที่อาจจะทำลายส่วนใดส่วนหนึ่งของทรินสเตอร์ เช่น รอยต่อ ขั้ว ผู้ผลิตจะระบุค่ากระแส rms มาให้

กระแส rms สำหรับการนำกระแสที่ต่างกันจะเหมือนกัน ที่มุมการนำกระแส 180 องศา อัตราส่วนกระแส rms กับกระแสเฉลี่ยของครึ่งคลื่น คือ  $\pi/2$  กระแสเฉลี่ยมีค่าเป็น  $I_{dc} \times \frac{2}{\pi}$  ฉะนั้นมุมอื่นๆก็ทำนองเดียวกัน การสูญเสียที่สำคัญคือ การสูญเสียในสภาวะฟอร์เวิร์ดคอนดักชัน

- กระแสเซอร์จ ( surge current :  $I_{TSM}$  )

พิกัดกระแสเซอร์จ คือพิกัดที่บอกค่าที่มีความผิดปกติ (Fault) และการลัดวงจร (short circuit) ผลจากกระแสที่มีค่าสูงๆ จะทำให้การเกิดการผิดปกติได้ไม่เกินจำนวนที่ระบุ การผิดปกติครั้งที่ 2 และครั้งต่อไปนั้น พิกัดต่างๆจะลดลงจากค่าเดิมด้วย

กระแสเซอร์จ จะมีลักษณะเป็นไซน์มีความถี่ 50-60 Hz กระแสเซอร์จ 1 คาบ เป็นกระแสสูงสุด (peak) ที่อนุญาตให้เกิดได้ใน 10 มิลลิวินาที

- การสูญเสียพลังงานในรูปของ  $I^2t$

ค่าของ  $I^2t$  คือ ความร้อนที่เกิดจากการมีกระแสไหล ใช้เป็นค่าป้องกันการเกิดโอเวอร์โหลด หรือ ความผิดปกติของกระแส และระบุถึงค่ากระแสผิดปกติ (Fault current) ใน คาบของความถี่ 50-60 Hz นั้น

อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส  $\frac{di}{dt}$

ถ้ากระแสแอนโอด เพิ่มขึ้นรวดเร็วเทียบกับเวลาเกิดการแพร่ของพาหะตรงรอยต่อจากชั้นสารตัวนำหนึ่งไปอีกชั้นหนึ่งในช่วงการเริ่มนำกระแส จะทำให้เกิดพลังงานความร้อนเนื่องจากความหนาแน่นกระแสสูง การเพิ่มค่ากระแส ( $\frac{di}{dt}$ ) ต้องไม่เกินขีดจำกัดที่เป็นอันตรายต่อทรินสเตอร์ ได้ ซึ่งปกติจะมีค่า 50-500 แอมแปร์/ไมโครวินาที

#### 4.5.2 พิกัดแรงดัน

จากโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ ทั้งในสภาวะ แรงดันฟอร์เวิร์ดและรีเวิร์ส ที่ตรงชั้นกลาง และปลายสารชนิด p-n ต้องเป็นค่าที่ไม่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ หรือ ทรานซิสเตอร์ พังทลาย ค่านี้เป็นค่าสูงสุดทางแรงดันที่ขอมให้ใช้ได้ พิกัดเหล่านี้ได้แก่

-แรงดันฟอร์เวิร์ดสูงสุด (peak repetitive forward voltage :  $V_{drm}$ )

เป็นค่าแรงดันสูงสุดที่ทรานซิสเตอร์สามารถมีสภาวะฟอร์เวิร์ดบล็อกกิง ได้ โดยไม่พังทลาย รวมทั้งค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดได้ระหว่างเกตและ คาโธด

-แรงดันรีเวิร์สสูงสุด (peak repetitive reverse voltage :  $V_{rrm}$ )

เป็นค่าแรงดันสูงสุดที่ทรานซิสเตอร์สามารถมีแรงดันรีเวิร์สตกคร่อมหรือมีสภาวะรีเวิร์สบล็อกกิงแล้วไม่พังทลาย

-ค่าแรงดันทรานเซียนท์สูงสุด ( $V_{rsm}$ )

เป็นค่าแรงดันทรานเซียนท์สูงสุดที่จะเกิดการบล็อกกิงได้ อย่างปลอดภัย ค่าพิกัด  $V_{rsm}$  จะเพิ่มขึ้นถ้าอนุกรมไดโอด (diode) เข้าไป

-อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน  $\frac{dv}{dt}$

ถ้าอัตราการเพิ่มของแรงดันมีค่ามากกว่าค่าที่ระบุนี้ จะทำให้ทรานซิสเตอร์สามารถเปลี่ยนสถานะจากหยุดทำงานเป็นนำกระแสได้ เพื่อหลีกเลี่ยงการนำกระแสแบบไม่ต้องการ จึงควรคำนึงค่า  $\frac{dv}{dt}$  ด้วยไม่ให้เกินค่าพิกัดนี้

#### 4.6 การป้องกันทรานซิสเตอร์

จากการที่ได้พิจารณาเรื่องพิกัดต่างๆมาแล้ว ถ้ามีการเกินพิกัดอาจจะจาก โอโวลโหลด (over load) หรือเหตุการณ์ที่ผิดปกติ ทรานซิสเตอร์ จะถูกทำลายทันที

เพื่อความเชื่อถือได้ของระบบ นอกเหนือจากการควบคุมแล้ว ต้องมีอุปกรณ์ที่เสริมความเชื่อถือ เพื่อรับเหตุการณ์ต่างๆได้

ซึ่งสามารถทำได้โดยการเลือกอุปกรณ์ที่มีพิกัดสูงกว่าการใช้งาน ซึ่งอาจจะไม่ถูกต้องตามหลักเศรษฐศาสตร์ แต่เพื่อป้องกันตัวอุปกรณ์เนื่องจากอุปกรณ์แต่ละตัวมีราคาแพง การป้องกันต้องคำนึงถึงค่าต่าง ๆ คือ

#### 4.6.1 การป้องกันแรงดันทรานเซียนท์เกิน

แรงดันเกิน เป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญ ที่ทำให้เกิดการผิดปกติใน ไทริสเตอร์ได้ เนื่องจากในระบบไฟฟ้าหลายระบบ จะมี แรงดันทรานเซียนท์ ที่เกินกว่าแรงดันปกติสูงสุดมาก ถ้าไม่มีการป้องกันและกำจัด อาจจะมีค่า 5-10 เท่าของกระแสสูงสุดขณะปกติ

การป้องกันแรงดันทรานเซียนท์เกินมี 2 ชนิด คือ

- การป้องกันแรงดันเกินภายใน

หลังจากนำกระแสแล้ว และมีแรงดันรีเวิร์ส ทำให้กระแสลดลงจนเป็นศูนย์ ที่จุดสุดท้าย มีรีเวิร์สรีคัมเบอร์รี่ ในไทริสเตอร์ มีกระแสเพิ่มอย่างรวดเร็วจนอาจจะสูงกว่าพิกัดหลายเท่า

- การป้องกันแรงดันเกินภายนอก

การมีการปิดเปิด (switch) หรือการทำงานของไทริสเตอร์บ่อยครั้ง จะทำให้มีกระแสทรานเซียนท์เกิดขึ้น ต้องมีการป้องกันส่วนการเกิดทรานเซียนท์ นี้

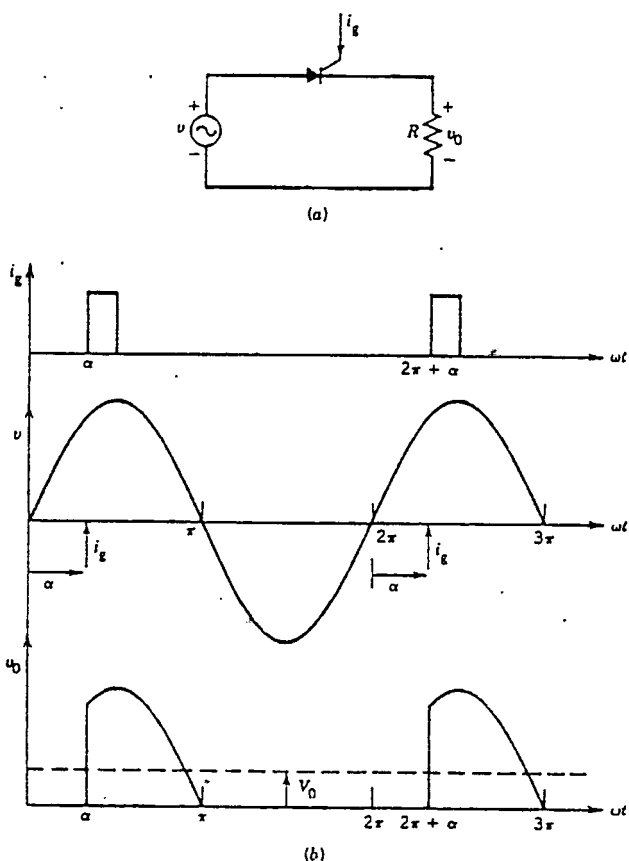
## บทที่ 5

### การควบคุมแรงดันกระแสสลับ

การควบคุมแรงดันกระแสสลับที่จ่ายให้มอเตอร์ โดยใช้ไทรสเตอร์ ทำได้โดยการควบคุมการทริก (phase control) แรงดัน ซึ่งจะกล่าวถึงการควบคุมการจ่ายแรงดันแก่ มอเตอร์ 3 เฟส จากหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เป็นเครื่องจักรที่มี โหลดเป็นแบบ ความต้านทานและอินดักแทนซ์หรือตัวเหนี่ยวนำ แต่เพื่อความเข้าใจการทำงานที่ต่อเนื่องและสัมพันธ์กันจะนำเสนอการควบคุมที่เกี่ยวข้องกันดังนี้

#### 5.1 การควบคุมมุมทริกของโหลดความต้านทาน

โหลดที่พิจารณาคือ โหลดความต้านทานเนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความต้านทานอยู่ด้วย ถ้ามีการทริกให้ไทรสเตอร์ทำงานที่มุม  $\alpha$  หรือ  $\omega t = \alpha$  จะได้คลื่นของกระแส  $I_0$  ดังรูปที่ 5.1 b



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรการควบคุมโหลดความต้านทานที่มุม  $\alpha$

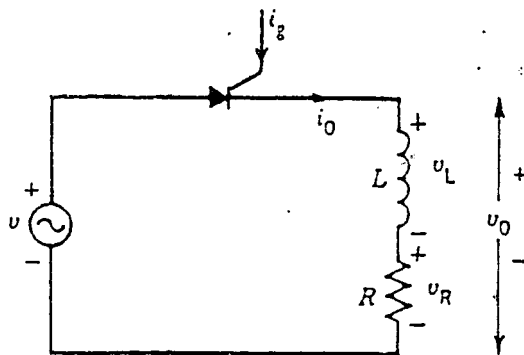
โหลดความต้านทานวงจรคอนเวอร์เตอร์จะประกอบด้วย ไทริสเตอร์ 1 ตัว และโหลดความต้านทานดัง 5.1 a ไทริสเตอร์จะมีลักษณะเป็นฟอร์เวิร์คไบแอส (Forward bias) ในช่วง  $0 < \omega t < \pi$  และ  $2\pi < \omega t < 3\pi$  มีสัญญาณพัลส์ (pulse) ที่มุม วัตจากจุดซีโรครอสซิง (zero crossing) ของแรงดัน ดัง 5.1 b มุมนี้จะเรียกว่า มุมไฟร์ริง (firing angle) ของ ไทริสเตอร์ กระแสจะมีค่าเป็นศูนย์ที่  $\omega t = \pi, 3\pi$  และไทริสเตอร์จะนำกระแสในช่วง  $\alpha$  ถึง  $\pi, 2\pi$  ถึง  $3\pi$  เรียกว่า ช่วงนำกระแส แรงดันที่โหลดจะมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย  $V_o = V$  ค่าเฉลี่ยแรงดันคือมุม ไฟร์ริง  $\alpha$  สามารถเปลี่ยนค่าได้จากศูนย์จนถึง  $\pi$  ซึ่งจะทำให้แรงดันเอาต์พุท (Output Voltage) เปลี่ยนด้วย ที่มุม  $\alpha = 0$  ทำให้ มีลักษณะคล้ายการทำงานของไดโอด

## 5.2 การควบคุมมุมทริกของโหลดรีแอคทีฟ

โหลดที่ใช้งานจริงส่วนใหญ่ จะมีทั้งความต้านทาน (R) และความเหนี่ยวนำ (L) วงจรของไทริสเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมจะเป็นดังรูปที่ 5.2 a

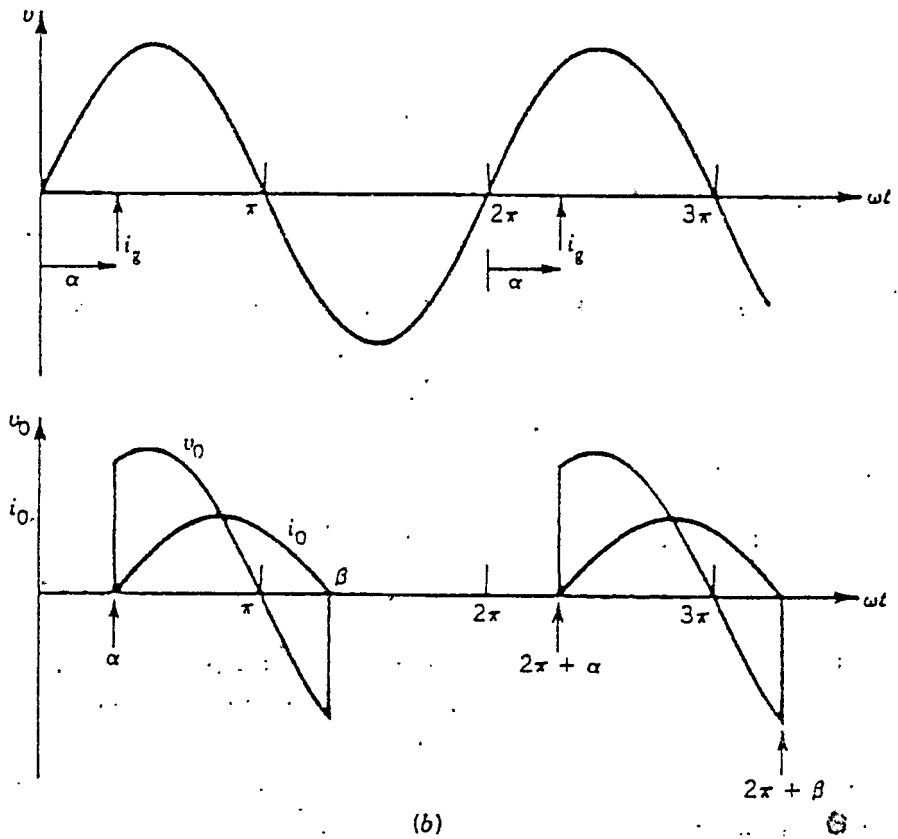
ไทริสเตอร์ถูกทริกที่มุมไฟร์ริง  $\alpha$  หมายความว่า ที่  $\omega t = \alpha$  โหลดนี้จะมีไฟเข้าหรือนำกระแส ตัวเหนี่ยวนำจะทำให้กระแสมีเฟสล่าหลังแรงดัน และนั่นคือกระแสจะมีค่าศูนย์ที่มุม  $\omega t = \beta$  แทนที่จะเป็น  $\pi$  รูปกระแสจะแสดงดังกราฟรูป 5.4 ในช่วงการนำคือ  $\alpha$  ถึง  $\beta$

$$V_o = V$$



(a)

รูปที่ 5.2 a แสดงวงจรควบคุมมุมทริกของโหลดรีแอคทีฟ

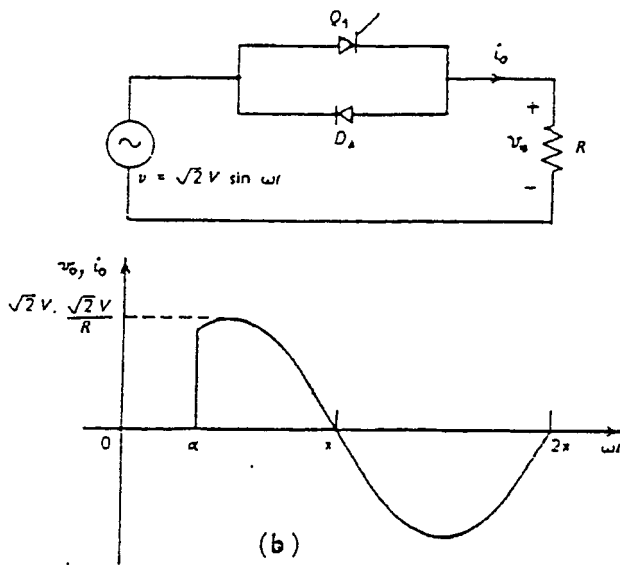
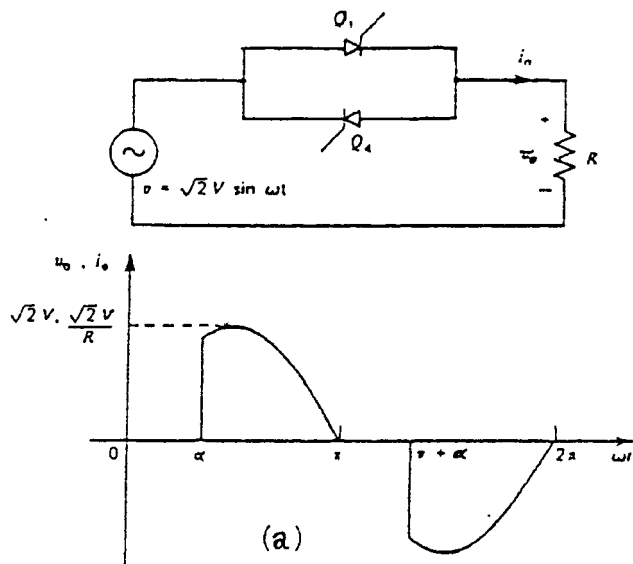


รูปที่ 5.2 b แสดงวงจรของการควบคุมการทริกของโวลต์แอกทีฟ

### 5.3 การควบคุมแรงดันของเฟสเดียว

ในการที่จะควบคุมแรงดันของโวลต์แอกทีฟ 3 เฟส นั้นควรจะได้ทำความเข้าใจเกี่ยวกับการควบคุมแรงดันของ 1 เฟสก่อน

วงจรของการควบคุม 1 เฟส ที่จ่ายให้โวลต์แอกทีฟนั้นดังรูป 5.3 a ไทริสเตอร์  $S_1$  จะถูกทริกที่มุม  $\alpha$  ซึ่งเป็นครึ่งซีกบวก เพราะฉะนั้น ครึ่งซีกลบจะถูกทริกที่  $\alpha$  เช่นกัน แต่มีมุม  $\pi + \alpha$  เมื่อไทริสเตอร์  $S_1$  นำกระแสที่มุม  $\alpha$  แหล่งจ่ายจะทำให้โวลต์มีแรงดัน  $V_o = V$  ด้วยกระแส  $I_o$  จะถูกเหนี่ยวนำขึ้นที่มุม  $\alpha$  และมีค่าศูนย์ที่มุม  $\beta$  ดังรูปที่ 5.3 b



รูปที่ 5.3 แสดงการควบคุมแรงดัน เฟส

ขณะที่ไทรสเตอร์  $S_2$  นำกระแสที่มุม  $\pi + \alpha$  ก็จะทำให้มีกระแสไหลในทิศทางตรงกันข้าม ( กระแสลบ ) รูปคลื่นของกระแสแรงดันจะแสดงดัง รูป 5.3 b สำหรับมุม ไฟร์ริง  $\alpha$  ในระหว่างการนำกระแส นั่นคือช่วง  $\alpha < \omega t < \beta$  ค่าแรงดันเอาท์พุท

$$V_o = v = Ri_o + L \frac{di_o}{dt} \quad \dots(5.1)$$

เมื่อ  $V_o = \sqrt{2}V_p \sin \omega t$

$$\sqrt{2}V_p \sin \omega t = Ri_0 + L \frac{di_0}{dt} \quad \dots(5.2)$$

กระแสโวลต์จะมีค่า

$$i_0 = i_{\text{steadystate}} + i_{\text{transient}}$$

$$i_0 = \frac{\sqrt{2}V_p \sin(\omega t - \phi)}{Z} + Ae^{-\frac{t}{T}} \quad \dots(5.3)$$

$$\text{โดยที่ } Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

$$T = \frac{L}{R}$$

ที่  $\omega t = \alpha, i_0 = 0$  จากสมการที่ 3 จะได้

$$0 = \frac{\sqrt{2}V_p \sin(\alpha - \phi)}{Z} + Ae^{-\frac{R\alpha}{\omega L}} \quad \dots(5.4)$$

จากสมการที่ 4 จะได้

$$A = \frac{-\sqrt{2}V_p \sin(\omega - \phi)e^{-\frac{R}{\omega L}\alpha}}{Z}$$

...(5.5)

จากสมการที่ 3 และ 5 จะได้

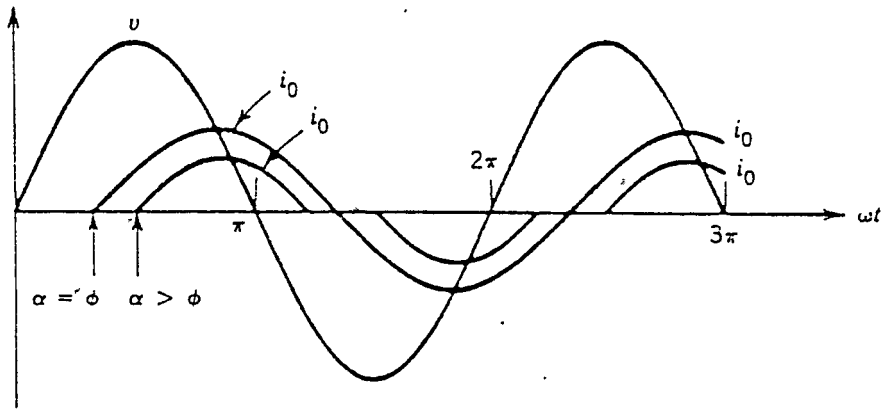
$$i_0 = \frac{\sqrt{2}V_p}{Z} [\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi)e^{-\frac{R}{\omega L}(\alpha - \omega t)}] \quad \dots(5.6)$$

ให้  $\alpha = \phi$  จากสมการที่ 6 จะได้

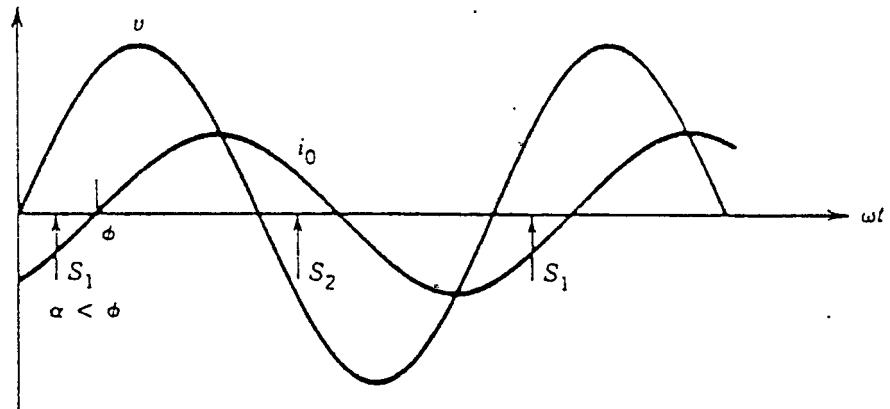
$$i_0 = \frac{\sqrt{2}V_p}{Z} \sin(\omega t - \phi) \quad \dots(5.7)$$

จากสมการที่ 7 จะพบว่ากระแสเอาต์พุต  $I_0$  มีลักษณะรูปไซน์ ที่เมื่อมุมไฟร์ริง  $\alpha$  มีค่าเดียวกันกับ มุมอิมพีแดนซ์ ( impedance angle ) ณ  $\alpha = \phi$  กระแสโวลต์จึงจะมีรูปไซน์เท่านั้น

ทริสเตอร์แต่ละตัวนำกระแสได้ถึง  $180^\circ$  จากรูป 5.4 พบว่าถ้ามุมไฟร์ริง ที่ต่างกันจะให้กระแสที่ต่างกัน ถ้ามุมไฟร์ริง มาก ค่ากระแสก็ยิ่งน้อย โดยหลักการนี้ จึงอาศัยการทริกที่มุมที่เหมาะสม แล้วค่อยลดมุมลงมาจากมีค่าศูนย์ ก็มีผลต่อกระแสโดยตรงโดยกระแสจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจากค่าน้อยสู่ค่าที่มากขึ้น



(a)

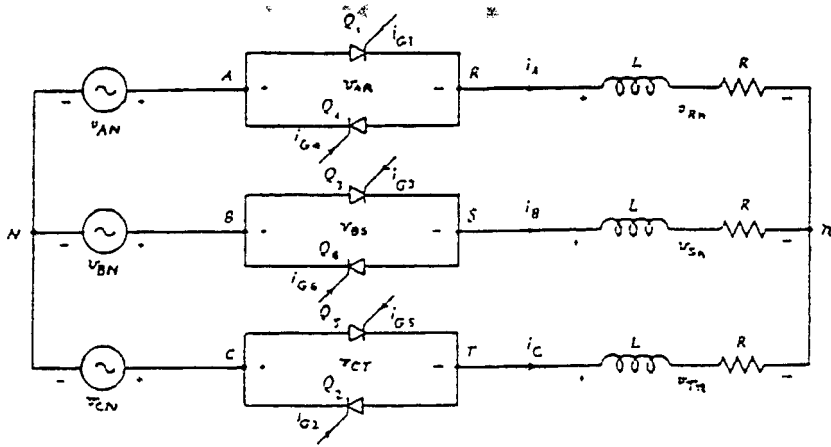


(b)

รูปที่ 5.4 แสดง ผลการทรักที่มุมไฟร์ริง ต่างกัน

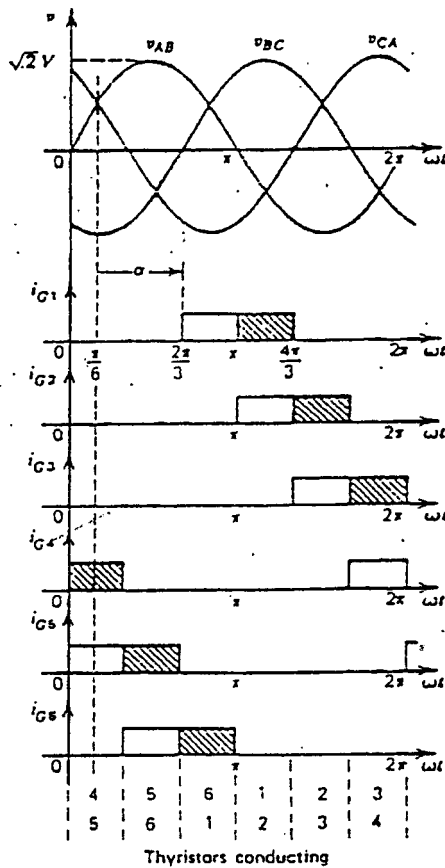
#### 5.4 การควบคุมแรงดัน 3 เฟส

การควบคุมที่จะนำไปใช้งานคือการควบคุมแรงดันกระแส ณ วงจร 3 เฟส โดยการใช้ วงจรตามรูปที่ 5.5



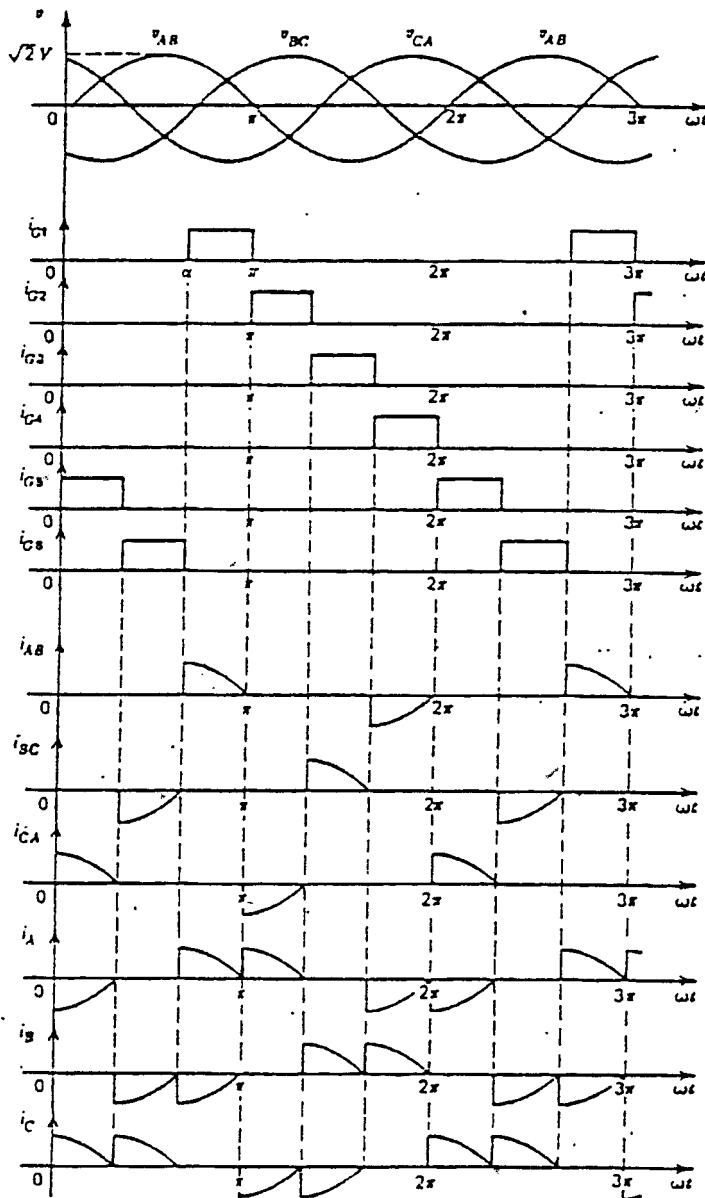
รูปที่ 5.5 แสดงวงจรการควบคุม 3 เฟส

ในการควบคุมโหลดที่มีพลังงานไฟฟ้าสูงจะใช้การควบคุมแบบ 3 เฟสในวงจรหนึ่งนั้น จากรูป 5.5 ไทริสเตอร์จะต่อที่ไลน์ (line) และโหลดอาจจะต่อแบบสตาร์ (star) หรือเดลต้า (delta) เพื่อให้เกิดการสร้างแรงดันต่อเนื่องของกระแสและแรงดันจึงต้องมีลำดับการทริกที่เหมาะสม ดังรูป 5.6

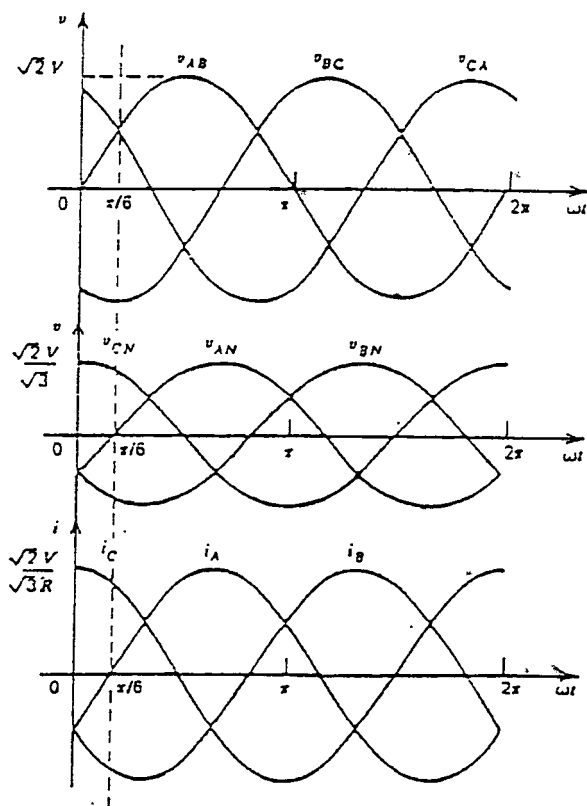


รูปที่ 5.6 แสดงลำดับการทริกไทริสเตอร์

เนื่องจากเป็นแรงดันกระแสสลับการทริกไทรสเตอร์จะมีลำดับคือ  $T_0, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  และในการพิจารณาค่าแรงดันก็สามารถพิจารณาลำดับกับเฟสเดียว นั่นคือ แต่ละเฟสก็ทำงานและให้กระแส  $I_0$  ที่เป็นไปในทำนองเดียวกันจะต่างกันตรงที่ มุมที่เฟสที่เลื่อนไปตามซีควนท์ ABC



รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณพัลส์ทริกช่วงต่างๆ



รูปที่ 5.8 แสดงรูปคลื่นการควบคุม 3 เฟส

จากการพิจารณาจากการควบคุม 3 เฟส จะพบว่าเราสามารถที่จะกำหนดกระแสเอาท์พุท  $I_o$  ได้จากมุมไฟร์ริง ถ้ามุมไฟร์ริง ยิ่งสูง กระแสก็ยิ่งน้อย มุมไฟร์ริง น้อย กระแสก็มาก ซึ่งวัตถุประสงค์เราก็คือ การสตาร์ทที่ช่วยลดกระแสได้ ดังนั้นการควบคุมจะต้องควบคุมตามเวลา นั่นคือเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น มุมไฟร์ริงก็จะลดลง มีผลให้แรงดันค่อยๆเข้าสู่พิกัด และลดกระแสสตาร์ทได้ ค่ะ

จะพบว่าในการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำแรงดันที่ใช้ในการสตาร์ท เพื่อลดกระแสก็คือ การลดแรงดันหรือ ค่อยๆเพิ่มแรงดัน โดยการกำหนดมูมทริกที่มุมสูงแล้วค่อยๆ ลดมูมทริกลงจนมีค่าศูนย์ทำให้สามารถใช้ในการควบคุมแบบ 3 เฟสดังกล่าวได้

บทที่ 6

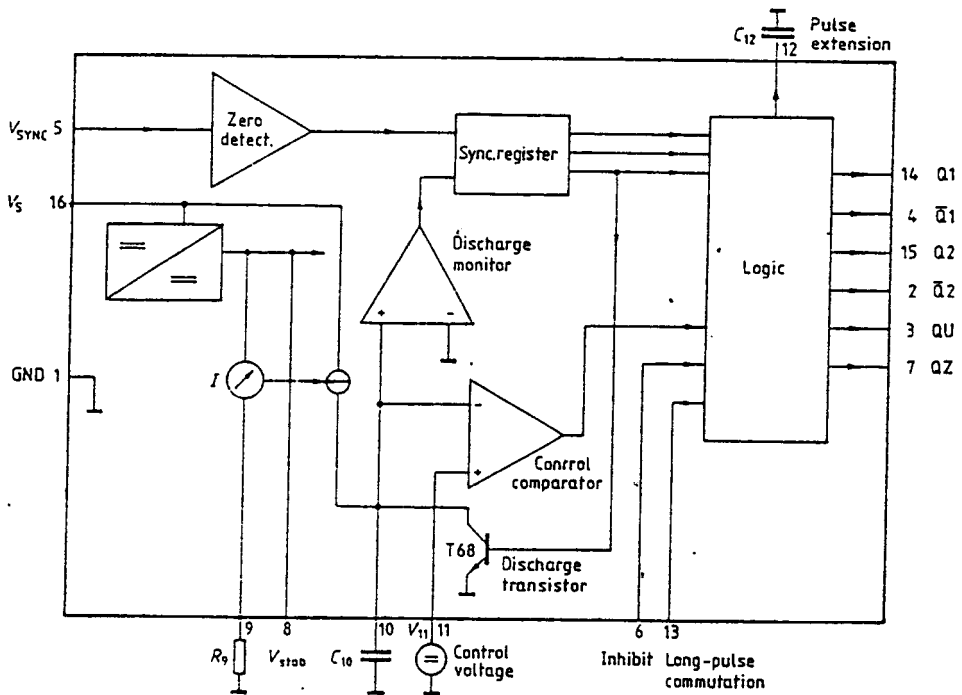
วงจรสร้างสัญญาณควบคุม เอสซีอาร์

วงจรสร้างสัญญาณควบคุม เอสซีอาร์ ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

6.1 ส่วนกำเนิดสัญญาณกระตุ้น

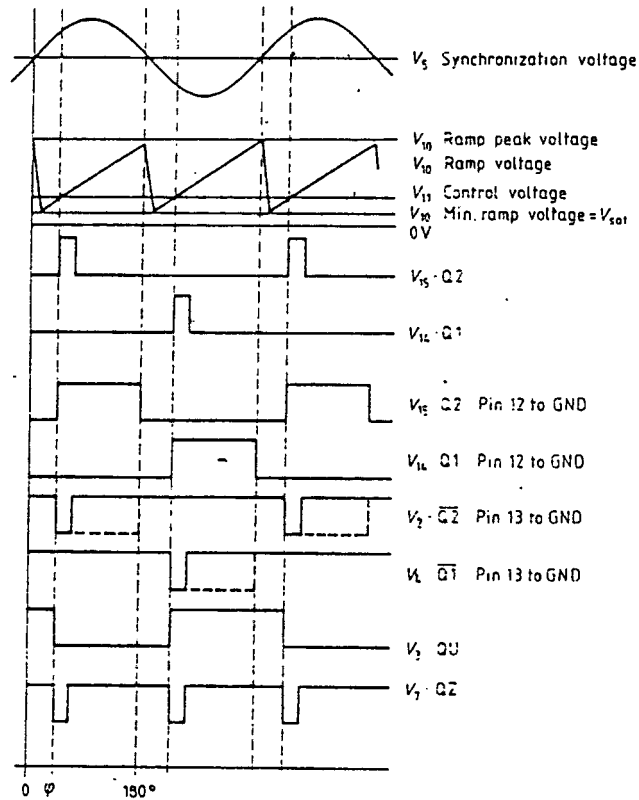
ในการสร้างสัญญาณกระตุ้น ใช้ไอซีควบคุมเฟสเบอร์ TCA 785 ของบริษัท SIEMENS โดยมีการทำงานตามบล็อกไดอะแกรมและพัลส์ไดอะแกรมดังรูป

Block diagram



รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมของ TCA785

## Pulse diagram



รูปที่ 6.2 พัลส์ไคอะแกรมของ TCA785

เริ่มด้วยการตรวจจับ แรงดันศูนย์ ของแรงดันไลน์แล้วส่งค่าไปยัง ซิงโครไนเซชันรีจิสเตอร์ เพื่อควบคุมให้สัญญาณรูปฟันเลื่อยมีความถี่และมุมเฟสสอดคล้องกับแรงดันไลน์ โดยสัญญาณรูปฟันเลื่อยสร้างจากแหล่งจ่ายกระแสแบบคงที่ซึ่งถูกเก็บประจุด้วยตัวเก็บประจุภายนอกต่ออยู่ที่ขา 10 ความชันของสัญญาณรูปฟันเลื่อย ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายนอก R9

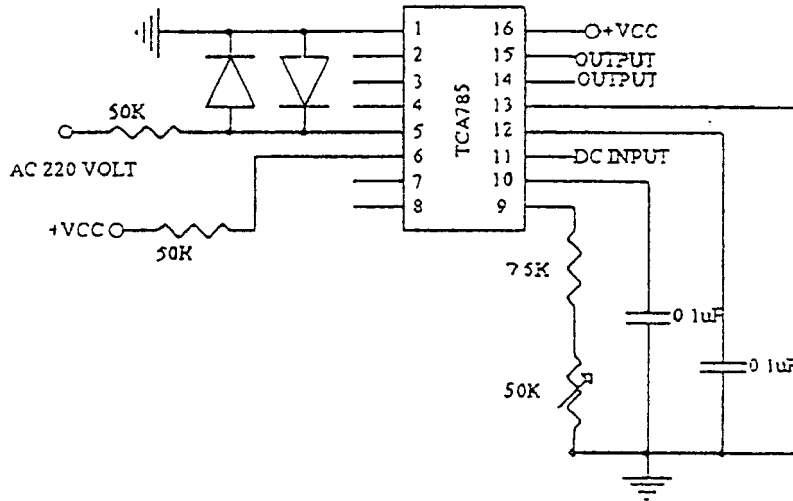
แรงดันควบคุมกระแสตรงจากไมโครคอนโทรลเลอร์ จะต่อเข้าที่ขา 11 การควบคุมมุมกระตุ้นทำได้โดยการเปรียบเทียบแรงดันควบคุมกระแสตรงกับแรงดันรูปฟันเลื่อย ถ้าแรงดันรูปฟันเลื่อยมีค่ามากกว่าแรงดันควบคุม ก็จะกำเนิดพัลส์ที่เอาท์พุท Q1 (ขา14) และ Q2 (ขา15) สลับกันคนละครึ่งคลื่น โดย Q1 กำเนิดพัลส์ในครึ่งคลื่นบวกของแรงดันไลน์ ส่วน Q2 กำเนิดพัลส์ในครึ่งคลื่นลบ โดยพัลส์ที่ได้มีมุมเริ่มต้นขึ้นอยู่กับระดับแรงดันควบคุมเริ่มต้น และในขณะที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ลดระดับแรงดันควบคุมลงเรื่อยๆ ก็จะปรากฏพัลส์ที่มุมลดลงจนเป็นศูนย์

แรงดันควบคุมที่ใช้มีพิสัยจาก 0 ถึง 10 โวลต์ และพิสัยของมุมกระตุ้นจาก 0 ถึง 180

องศา

จากเอาต์พุตของ TCA 785 จะต่อเข้ากับวงจรบัฟเฟอร์ ซึ่งสามารถให้กระแสได้สูงถึง

250 mA



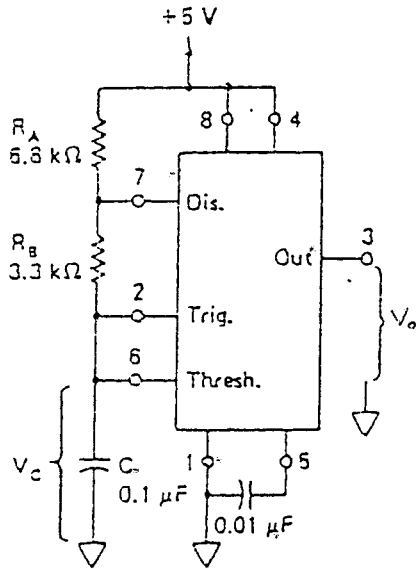
รูปที่ 6.3 วงจรกำเนิดสัญญาณของ TCA 785

## 6.2 ส่วนสร้างสัญญาณกระตุ้นแบบต่อเนื่อง

ในกรณีที่โหลดคอนดักทีฟ สัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์ธรรมดา ไม่สามารถกระตุ้นให้เอสซีอาร์ นำกระแสได้ เนื่องจากสัญญาณกระตุ้นในครั้งคลื่นลบหมดลงก่อนที่ เอสซีอาร์ ที่ทำงานในครั้งคลื่นบวกจะหยุดนำกระแส ดังนั้น เอสซีอาร์ ที่ทำงานในครั้งคลื่นลบจึงไม่นำกระแส จึงต้องใช้สัญญาณกระตุ้นแบบต่อเนื่อง

การสร้างสัญญาณพัลส์ต่อเนื่อง ทำได้โดยขยายความกว้างของพัลส์ให้ครอบคลุมมุมกระตุ้น แล้วนำมาแอนด์กับสัญญาณพัลส์ความถี่สูง

ในการสร้างสัญญาณความถี่สูง ใช้ไอซีเบอร์ 555 ต่อวงจรตามรูป



รูปที่ 6.4 แสดงวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่

ที่เวลา A ทั้งขา 2 และขา 6 จะมีค่าต่ำกว่าค่า  $V_{cc} / 3$  ซึ่งทำให้แรงดันเอาต์พุตที่ขา 3 มีค่าสูง ในขณะที่ขา 7 จะเสมือนกับถูกเปิดวงจรออก ดังนั้นตัวเก็บประจุ C จะเก็บประจุ โดยผ่าน  $R_A + R_B$  และเอาต์พุตจะมีค่าต่ำระหว่างช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุ C คายประจุจาก  $2/3 V_{cc}$  ถึง  $1/3 V_{cc}$  ดังสมการ

$$T_{Low} = 0.695 R_B C \quad \dots(6.1)$$

ช่วงเวลาทั้งหมดหรือคาบเวลา T จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} T &= T_{HIGH} + T_{HIGH} \\ &= 0.695(R_A + 2R_B)C \end{aligned} \quad \dots(6.2)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} f &= 1/T \\ &= 1.44/(R_A + R_B)C \end{aligned} \quad \dots(6.3)$$

$T_{Low}$  : ช่วงเวลาแรงคันท่ำ

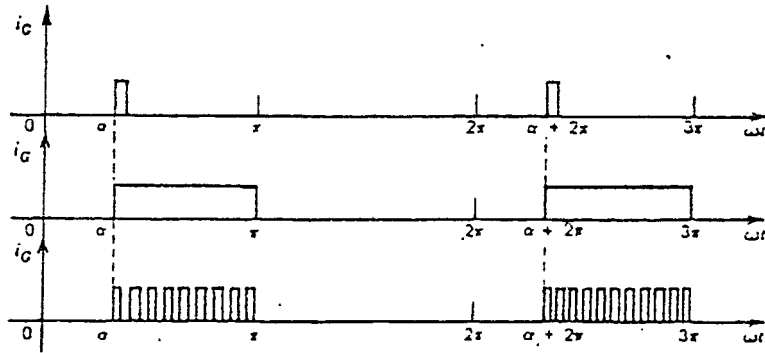
$T_{HIGH}$  : ช่วงเวลาแรงคินสูง

T : คาบเวลา

C : ค่าตัวเก็บประจุ

$R_A, R_B$  : ค่าความต้านทาน

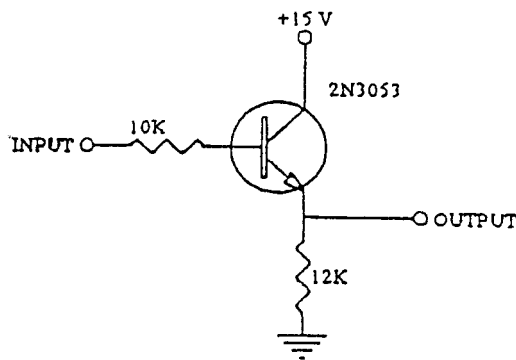
สัญญาณเอาต์พุตที่ขา 3 จะนำมาแอนคัลกับสัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์กว้าง โดยใช้ไอซีเบอร์ 74HC08 ได้เอาต์พุตดังรูป



รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์กว้าง

### 6.3 ส่วนขยายสัญญาณ

เนื่องจากสัญญาณที่ได้ไม่เพียงพอที่จะกระตุ้น เอสซีอาร์ ให้นำกระแสได้ จึงต้องขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3053 ดังวงจรตามรูป

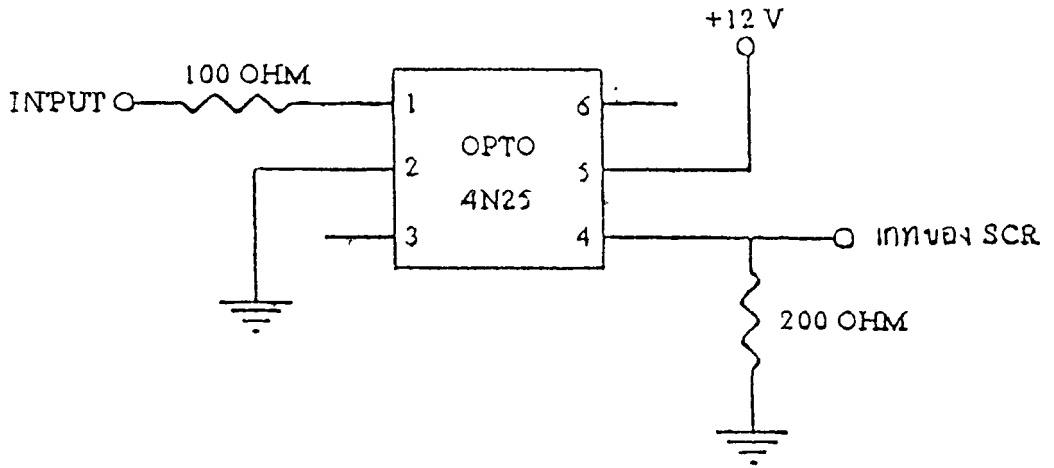


รูปที่ 6.6 วงจรขยายสัญญาณ

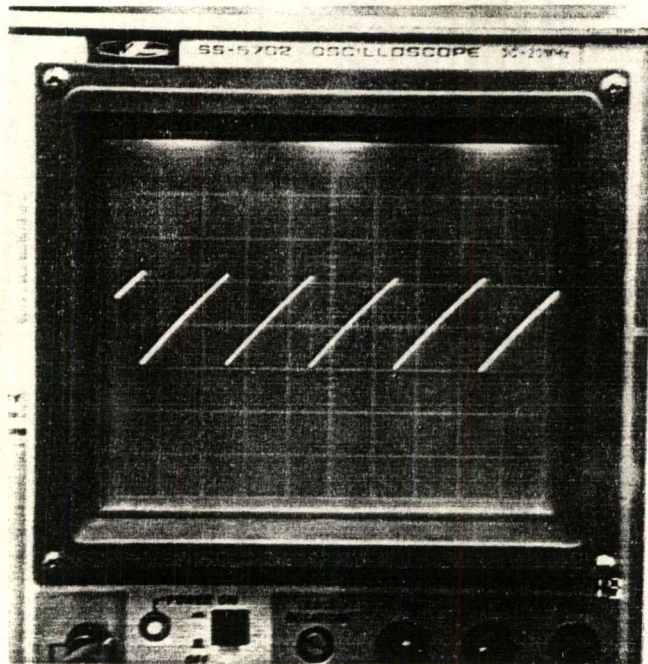
### 6.4 ส่วนแยกแวลด์ของสัญญาณกระตุ้น

เนื่องจากเอาต์พุตของวงจรควบคุม ไม่ควรที่จะต่อโดยตรงกับวงจรกำลัง เพราะถ้าวงจรกำลังทำงานผิดพลาด อาจทำให้วงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นเสียหายได้ จึงใช้ออปโต -

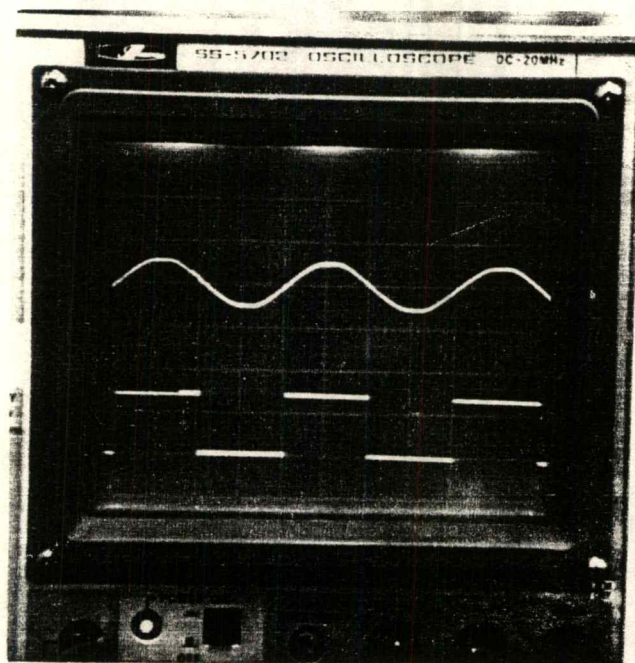
ไอโซเลเตอร์เบอร์ 4N25 ซึ่งใช้หลักการของไดโอดเรืองแสง ทำหน้าที่แยกกราวด์ของวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นและวงจรกำลัง



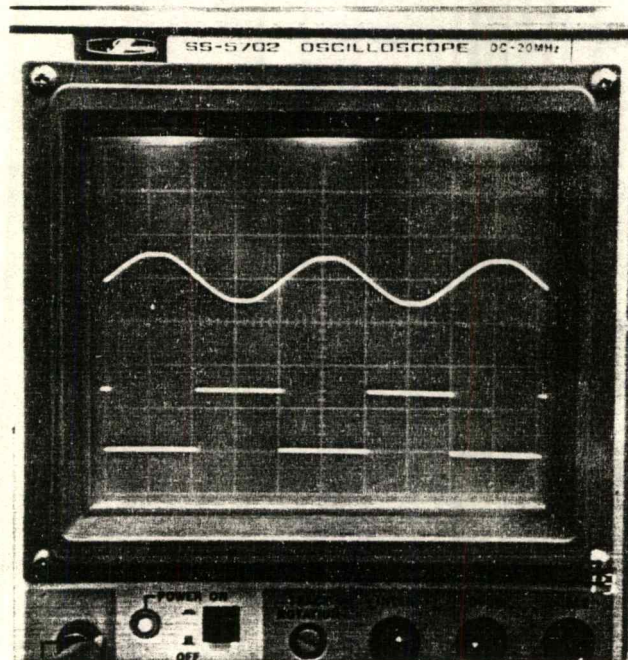
รูปที่ 6.7 แสดงการต่อใช้งานของออปโตไอโซเลเตอร์



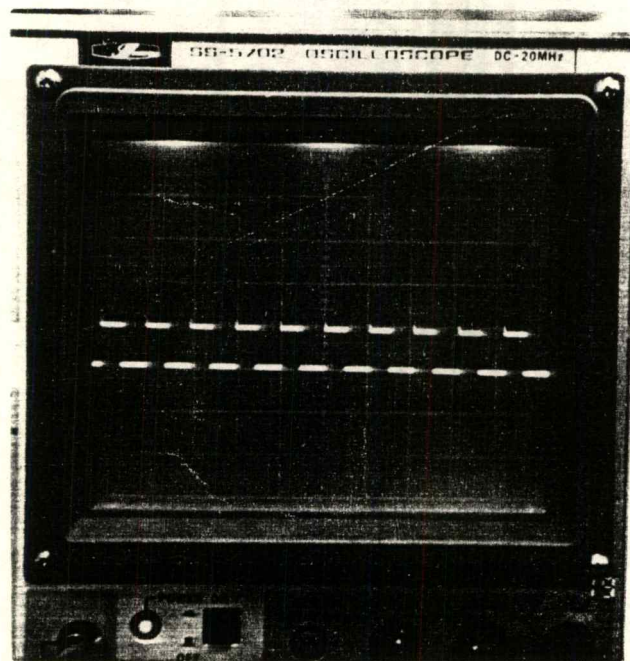
รูปที่ 6.8 แสดงสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 10 ของ TCA 785  
 มาตรฐานส่วน 5 V/div 5 ms/div



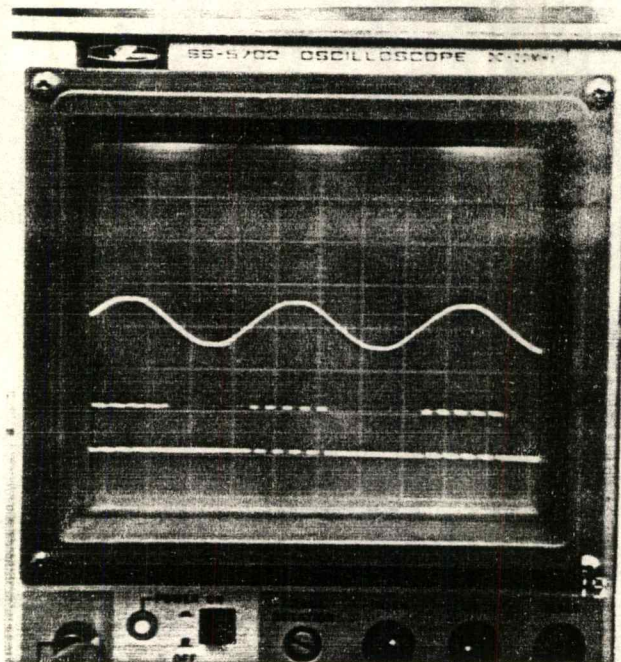
รูปที่ 6.9 แสดงสัญญาณที่ขา 15 ของ TCA 785 เทียบกับแรงดันไลน์  
 มาตรฐานส่วน 5 V/div 5 ms/div



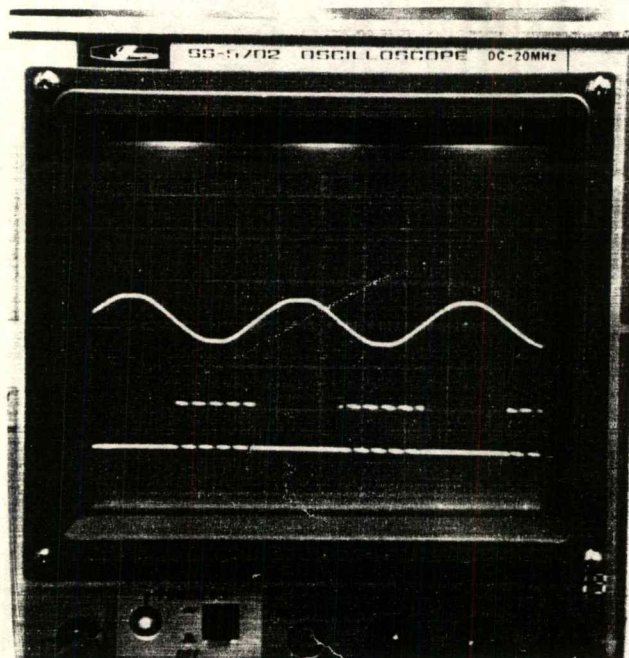
รูปที่ 6.10 แสดงสัญญาณที่ขา 14 ของ TCA 785 เทียบกับแรงดันไลน์  
มาตราส่วน 5 V/div 5 ms/div



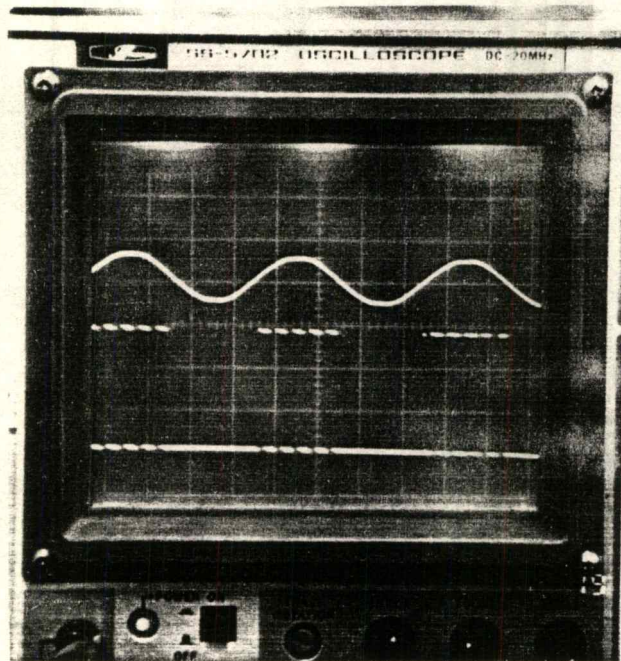
รูปที่ 6.11 แสดงสัญญาณเอาต์พุทของ 555  
มาตราส่วน 5 V/div 5 ms/div



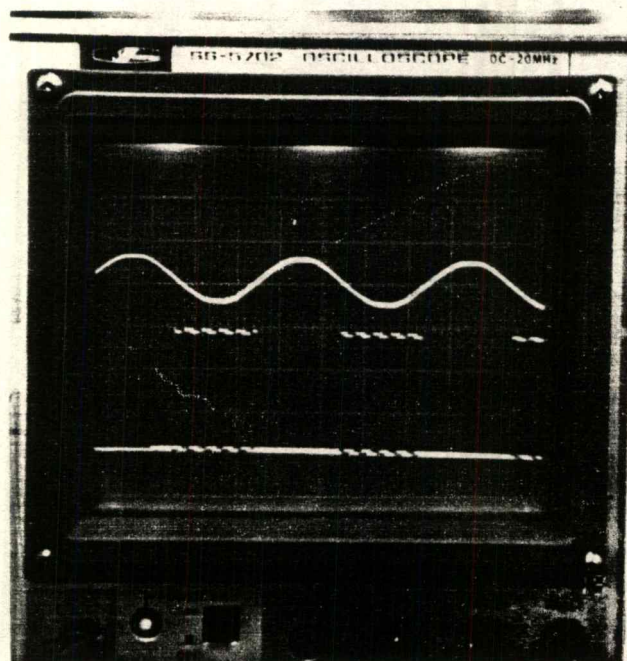
รูปที่ 6.12 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของแอมป์เกท เทียบกับแรงดันไลน์ในเฟสเดียวกัน  
มาตราส่วน 5 V/div 5 ms/div



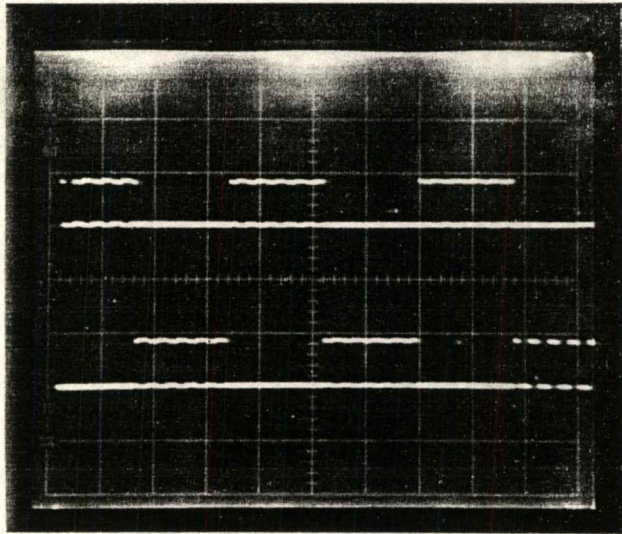
รูปที่ 6.13 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของแอมป์เกท เทียบกับแรงดันไลน์ที่ป้อนกลับเฟสกัน  
มาตราส่วน 5 V/div 5 ms/div



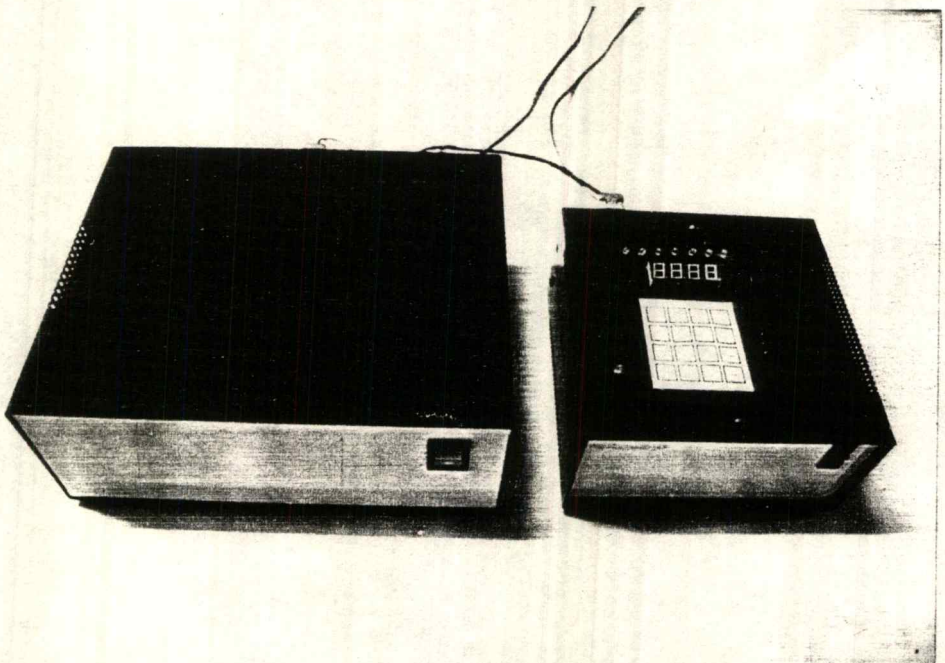
รูปที่ 6.14 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ เทียบกับแรงดันไลน์ในเฟสเดียวกัน  
 มาตรฐานส่วน 5 V/div 5 ms/div



รูปที่ 6.15 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ เทียบกับแรงดันไลน์ที่ป้อนกลับเฟส  
 มาตรฐานส่วน 5 V/div 5 ms/div



รูปที่ 6.16 แสดงสัญญาณเอาต์พุตจากออปโตไอโซเลเตอร์ใน 1 เฟส  
 มาตรฐาน 5 V/div 5 ms/div



รูปที่ 6.17 แสดงชิ้นงานทั้งหมด



## บทที่ 7

### ไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 7.1 ประโยชน์และความเป็นมาของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ประเภทหนึ่ง ที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบควบคุมที่มีขนาดเล็ก ซึ่งกำลังเป็นที่นิยมกันมาก เพราะราคาไม่แพง ภายในไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์หนึ่งตัวจะประกอบด้วย หน่วยการทำงานหลักของระบบคอมพิวเตอร์อย่างครบถ้วน เช่น หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) หน่วยความจำ พอร์ตในการติดต่อหรือควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งหากว่าเป็นการใช้งานไมโครโปรเซสเซอร์ทั่วไป ก็จะต้องใช้ไอซีภายนอกมาประกอบเพื่อทำหน้าที่เหล่านี้ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นระบบคอมพิวเตอร์ เพื่องานควบคุมที่สมบูรณ์ โดยบรรจุอยู่ในไอซีเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น ในบางครั้งจึงอาจพบว่าการเรียกไมโครคอนโทรลเลอร์ว่าเป็น ระบบไมโครคอมพิวเตอร์ก็ว่าได้

ในบรรดาไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการผลิตจากบริษัทต่าง ๆ ไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัทอินเทล ตระกูล MCS - 51 ได้มีการนำไปใช้งานกันแพร่หลายมาก นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา และในระยะเวลาที่ผ่านมาก็ได้มีบริษัทอื่น ๆ ผลิตกันอย่างกว้างขวาง เช่น บริษัทฟิลิปส์ หรือ ซิเมนส์ เป็นต้น พร้อมกับการเพิ่มประสิทธิภาพและหน่วยการทำงานต่าง ๆ มากขึ้น ทำให้มีไมโครคอนโทรลเลอร์จากผู้ผลิตต่าง ๆ ที่มีพื้นฐานมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS - 51 ของบริษัทอินเทลเป็นจำนวนมาก

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS - 51 ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์หลายรุ่น ซึ่งมีสถาปัตยกรรมพื้นฐานที่เหมือนกัน เพียงแต่มีขนาดหรือจำนวนของหน่วยทำงานภายในที่ต่างกันออกไป เพื่อความเหมาะสมในงานประยุกต์ต่าง ๆ ตามความต้องการ โดยมีทั้งลักษณะที่ใช้เทคโนโลยีการผลิต ไอซีวงจรรวมความจุสูงมาก (LSI) แบบ HMOS หรือ CHMOS ซึ่งมีคุณลักษณะที่สูงมากขึ้น และสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าน้อยกว่ามาก

#### 7.2 สถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS - 51

##### 7.2.1 คุณสมบัติของหน่วยทำงานพื้นฐานใน MCS - 51

1. หน่วยประมวลผลกลางขนาด 8 บิต
2. หน่วยประมวลผลสำหรับข้อมูลแบบบิต (Boolean Processor)
3. ความสามารถในการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำโปรแกรม 64 กิโลไบต์
4. ความสามารถในการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำข้อมูล 64 กิโลไบต์

5. หน่วยความจำโปรแกรมภายในขนาด 4 กิโลไบต์ (เบอร์ 8031 , 8051 ไม่มีหน่วยความจำส่วนนี้ ส่วนเบอร์ 8052 มี 8 กิโลไบต์)
6. หน่วยความจำแบบ RAM ภายใน 128 ไบต์ (เบอร์ 8031 , 8051) หรือ 256 กิโลไบต์ (เบอร์ 8032 , 8052)
7. พอร์ตอินพุต / เอาท์พุตแบบขนานจำนวน 32 เส้น ซึ่งสามารถแยกทำงานได้อย่างอิสระ
8. จัดลำดับความสำคัญของสัญญาณอินเทอร์รัพท์ (INTERRUPT) ได้ 2 ระดับ
9. มีรีจิสเตอร์ที่ใช้สำหรับเป็นไทมเมอร์ (Timer) หรือ เคาน์เตอร์ (Counter) ขนาด 16 บิตจำนวน 2 ตัว (เบอร์ 8032 , 8052) มีจำนวน 3 ตัว
10. มีค่าตั้งคูณและหารเลขขนาด 8 บิตในตัวเอง
11. มีแหล่งกำเนิดสัญญาณขอขัดจังหวะการทำงานของโปรแกรม (Input Request Signal) 6 แหล่ง ซึ่งสามารถกระโดดไปทำงานตอบสนองขัดจังหวะการทำงานของโปรแกรม (Interrupt Service Routine) ได้ต่าง ๆ กัน 5 ตำแหน่ง
12. มีวงจรออสซิลเลเตอร์ภายใน

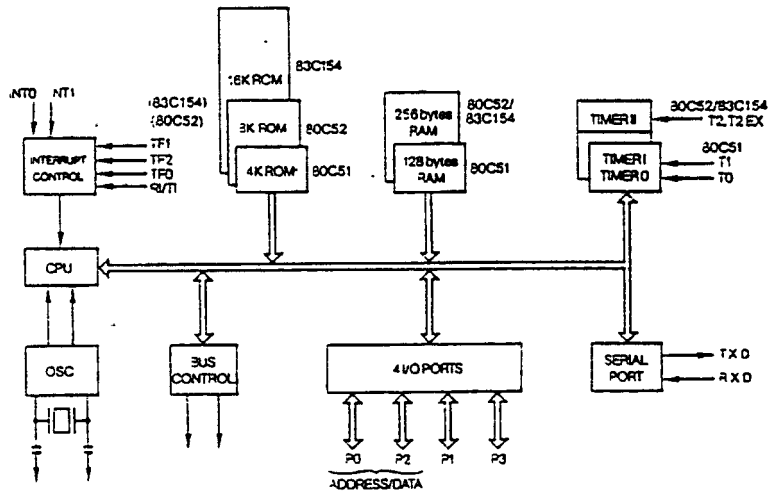
Table 1. The MCS<sup>®</sup>-51 Family of Microcontrollers

Device	ROMless Version	EPROM Version	ROM Bytes	RAM Bytes	8-Bit I/O Ports	16-Bit Timer/Counters	Programmable Counter Array (PCA)	UART	Serial Expansion Port (SEP)	Global Serial Channel (GSC)	DMA Channels	A/D Channels	Interrupt Sources/Vectors	Power Down and Idle Modes
8051	8031	—	4K	128	4	2		✓					6/5	
8051AH	8031AH	8751H 8751BH	4K	128	4	2		✓					6/5	
8052AH	8032AH	8752BH	8K	256	4	3		✓					8/6	
80C51BH	80C31BH	87C51	4K	128	4	2		✓					6/5	✓
83C51FA	80C51FA	87C51FA	8K	256	4	3	✓	✓					14/7	✓
83C51FB	80C51FA	87C51FB	16K	256	4	3	✓	✓					14/7	✓
83C51GA	80C51GA	87C51GA	4K	128	4	2		✓	✓			8	8/7	✓
83C152JA	80C152JA	—	8K	256	5	2		✓		✓	2		19/11	✓
—	80C152JB	—	—	256	7	2		✓		✓	2		19/11	✓
83C152JC	80C152JC	—	8K	256	5	2		✓		✓	2		19/11	✓
—	80C152JD	—	—	256	7	2		✓		✓	2		19/11	✓
83C451	80C451	—	4K	128	7	2		✓					6/5	✓
83C452	80C452	87C452P	8K	256	5	2		✓					9/8	✓

ตารางที่ 7.1 แสดงคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ต่าง ๆ ในตระกูล MCS - 51

## 7.2.2 โครงสร้างของ MCS - 51

ภายใน MCS - 51 จะประกอบขึ้นด้วย Gate ต่าง ๆ เช่น AND , OR , NOT ซึ่ง Gate เหล่านี้จะถูกนำมาออกแบบให้มีหน้าที่การทำงานต่าง ๆ เช่น วงจรถอดรหัสคำสั่ง (Instruction Decoder) วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา (Clock Signal Generator) โครงสร้างการทำงานภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS - 51 จะประกอบด้วยส่วนย่อยดังไคอะแกรมในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แสดงไคอะแกรมโครงสร้างของ MCS - 51

จากไคอะแกรมจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ

ส่วนที่ 1 คือ CPU (Central Processing Unit) หรือตัวประมวลผล ส่วนนี้จะมีวงจรที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมในการติดต่อกับส่วนอื่น ๆ เรียกว่าวงจรควบคุม (Control Unit) สัญญาณที่สร้างจากวงจรควบคุมได้แก่ สัญญาณสำหรับการติดต่อกับหน่วยความจำ อุปกรณ์รับข้อมูลเข้าหรือส่งข้อมูลออก ซึ่งส่วนควบคุมการขัดจังหวะ (Interrupt Control) และส่วนควบคุมบัส (Bus Control) ก็เป็นส่วนหนึ่งของวงจรควบคุมด้วย การสร้างสัญญาณควบคุมจากส่วน CPU นี้จะทำการสร้างสัญญาณโดยการถอดรหัสจากคำสั่ง (Instruction) ตามที่มีการกำหนดไว้ และสัญญาณที่สร้างขึ้นมาจะอ้างอิงกับสัญญาณนาฬิกาที่สร้างจากวงจรถอดรหัสสัญญาณนาฬิกาเพื่อให้ทุก ๆ ส่วนจากวงจรทำงานประสานกัน (Synchronize) อย่างถูกต้อง

ใน CPU นี้ยังประกอบด้วยส่วนย่อยอีกส่วนที่เรียกว่าส่วนประมวลผล (Arithmetic Logic Unit) ส่วนนี้จะทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลเช่น การบวก , ลบ , คูณ หรือหาร ข้อมูลแล้วนำผลลัพธ์ไปเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ หรือ หน่วยความจำที่ต้องการ

ส่วนที่ 2 คือ หน่วยความจำ (Memory) มีไว้สำหรับจดจำข้อมูล การที่จะเอาข้อมูลไปเก็บยังหน่วยความจำ (Write) หรือ การเอาข้อมูลออกจากหน่วยความจำ (Read) จำเป็นต้อง

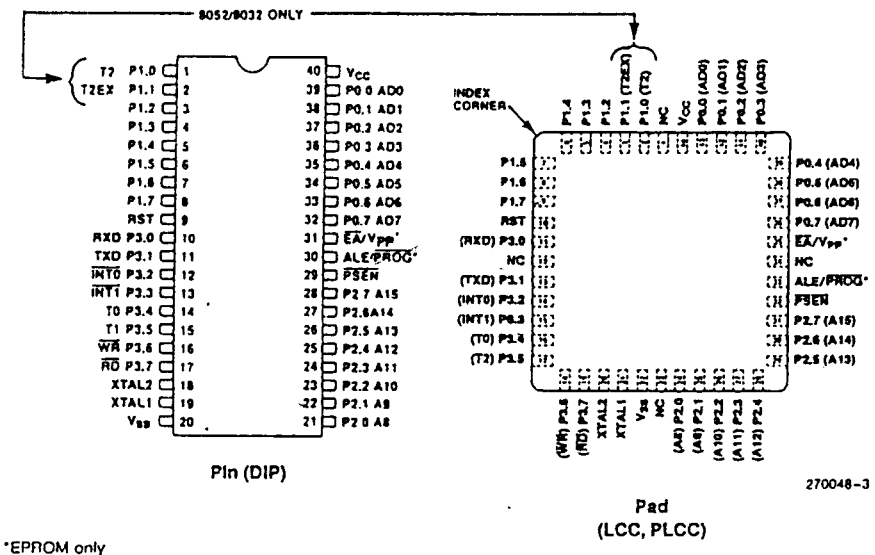
รู้ตำแหน่งของหน่วยความจำ (Address) ซึ่งใน MCS - 51 แต่ละตำแหน่งของหน่วยความจำจะเก็บข้อมูลได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น และข้อมูลในแต่ละตำแหน่งของหน่วยความจำจะมีค่าได้เพียง 8 หลักของเลขฐาน 2 ดังนั้น ในแต่ละตำแหน่งของหน่วยความจำจะเก็บข้อมูลมีค่าได้ระหว่าง 0 - 255 (00000000 - 11111111 ในเลขฐาน 2)

ส่วนที่ 3 อุปกรณ์ อินพุตและเอาต์พุต (Input / Output Device) เป็นส่วนที่จะใช้ส่งข้อมูลเข้าหรือออกจาก MCS - 51 ทำให้เกิดการติดต่อกันภายนอกได้ อุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต ได้แก่ 4 I/O Port, Timer 0, Timer 1, Serial Port การทำงานของแต่ละส่วนมีดังนี้

1. I/O Port เป็นที่ใช้สำหรับรับ-ส่งข้อมูล ซึ่งเป็นสัญญาณดิจิทัลเข้าหรือออกจาก MCS - 51 โดยพอร์ทแต่ละพอร์ทจะรับส่งข้อมูลได้ 8 บิต พอร์ทแต่ละอันได้แก่ P0, P1, P2, P3

2. Time 0 และ Time 1 เป็นวงจรนับที่สามารถกำหนดให้ทำการนับจำนวนไซเคิล ของสัญญาณที่ต่อจากภายนอกของ MCS - 51 หรือจำนวนไซเคิลของสัญญาณนาฬิกาภายใน MCS - 51 ก็ได้ ค่าจากการนับจะถูกอ่านค่าหรือตั้งค่าเริ่มต้นของการนับได้โดย CPU

3. Serial Port - CPU จะอ่านและเขียนข้อมูลกับ Serial Port เป็นแบบ 8 บิต แต่ข้อมูลจะถูกส่งออกจาก MCS - 51 เรียงไปทีละบิตออกจากขา TXD และในการรับข้อมูลก็จะรับเข้ามาทีละบิตทางขา RXD และจัดเรียงเป็น 8 บิต เพื่อให้ CPU อ่านไปใช้งาน



รูปที่ 7.2 หน้าทีขาสัญญาณของ MCS - 51

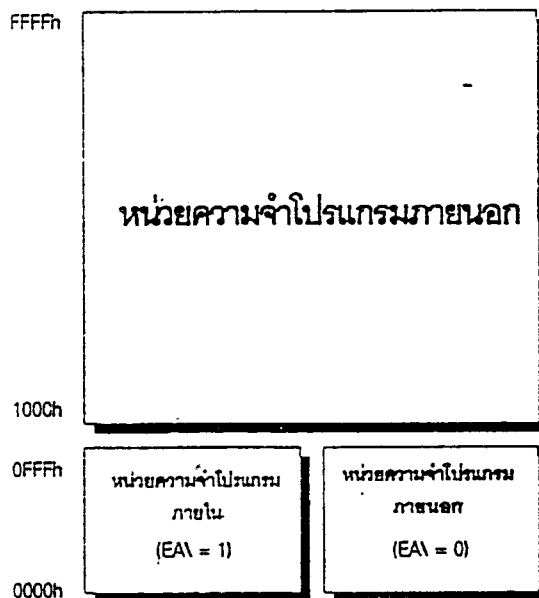
### 7.3 หน่วยความจำของ MCS - 51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS - 51 แยกจากการหน่วยความจำออกเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำโปรแกรม (Program Memory) และหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) หน่วยความจำทั้งสองนี้มีหน้าที่แตกต่างกันออกไป และใช้วิธีการอ้างอิงแอดเดรส สัญญาณการติดต่อ แยกออกจากกัน

#### 7.3.1 หน่วยความจำโปรแกรม (Program Memory)

หน่วยความจำโปรแกรมของ MCS - 51 เป็นบริเวณหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูล และคำสั่งใช้งานต่าง ๆ ซึ่งแม้จะไม่มีคำสั่งไปให้กับระบบข้อมูลเหล่านี้ก็ยังคงไม่สูญหาย โครงสร้างของหน่วยความจำโปรแกรม มีลักษณะเช่นเดียวกับหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ในไอซี หน่วยความจำประเภทต่าง ๆ เช่น หน่วยความจำแบบ ROM , EPROM เป็นต้น

MCS - 51 สามารถอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมได้สูงสุดไม่เกิน 64 กิโลไบต์ และแยกประเภทของหน่วยความจำโปรแกรมเป็น 2 ลักษณะ คือ ส่วนที่อยู่ภายนอกชิป และ ส่วนที่อยู่ภายในชิปมีได้ตั้งแต่ 4, 8, 20 กิโลไบต์ ขึ้นอยู่กับเบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น ๆ การที่จะเลือกหน่วยความจำที่อยู่ภายในหรือภายนอกชิป ขึ้นอยู่กับการควบคุมขา EA โดยถ้าขา EA = 1 จะเลือกใช้หน่วยความจำที่อยู่ภายในชิป แต่ถ้าขา EA = 0 จะเป็นการเลือกใช้หน่วยความจำที่อยู่ภายนอกชิป

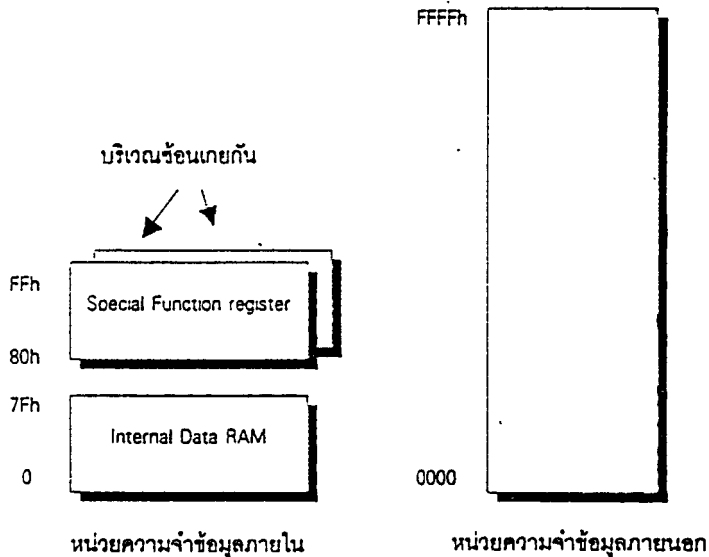


รูปที่ 7.3 การจัดพื้นที่หน่วยความจำโปรแกรมของ MCS - 51

7.3.2 หน่วยความจำข้อมูล (Data Memory)

หน่วยความจำข้อมูล จะมีลักษณะเป็นหน่วยความจำแบบ RAM สามารถที่จะเขียนหรืออ่านข้อมูลได้ ใช้สำหรับเก็บข้อมูลหรือตัวแปรที่เกิดขึ้น ในขณะที่กำลังประมวลผลโปรแกรมไว้เป็นการชั่วคราว เนื่องจากหน่วยความจำข้อมูลจัดเป็นหน่วยความจำ RAM แบบสแตติก ดังนั้นเมื่อไม่มีการจ่ายไฟให้กับระบบ จะทำให้ข้อมูลในหน่วยความจำสูญหายไป

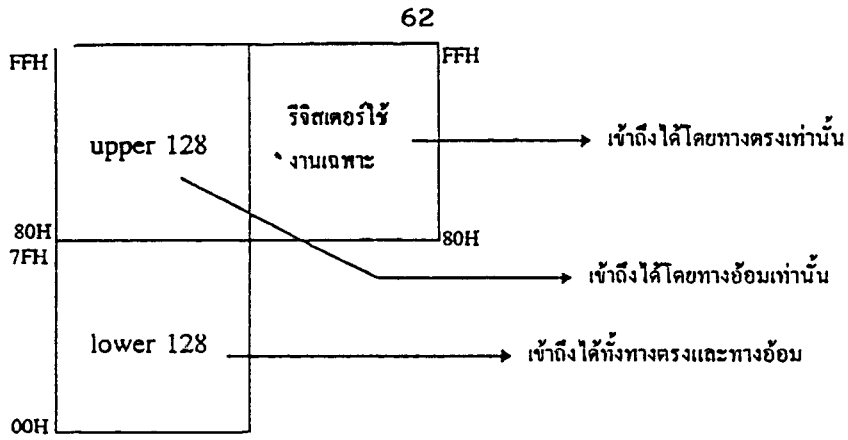
โครงสร้างของหน่วยความจำข้อมูลนี้ได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำภายในชิปและภายนอกชิป สำหรับหน่วยความจำภายนอกชิปสามารถมีได้สูงสุด 64 กิโลไบต์ ส่วนหน่วยความจำภายในชิปยังแบ่งเป็นอีก 2 ส่วนดังนี้



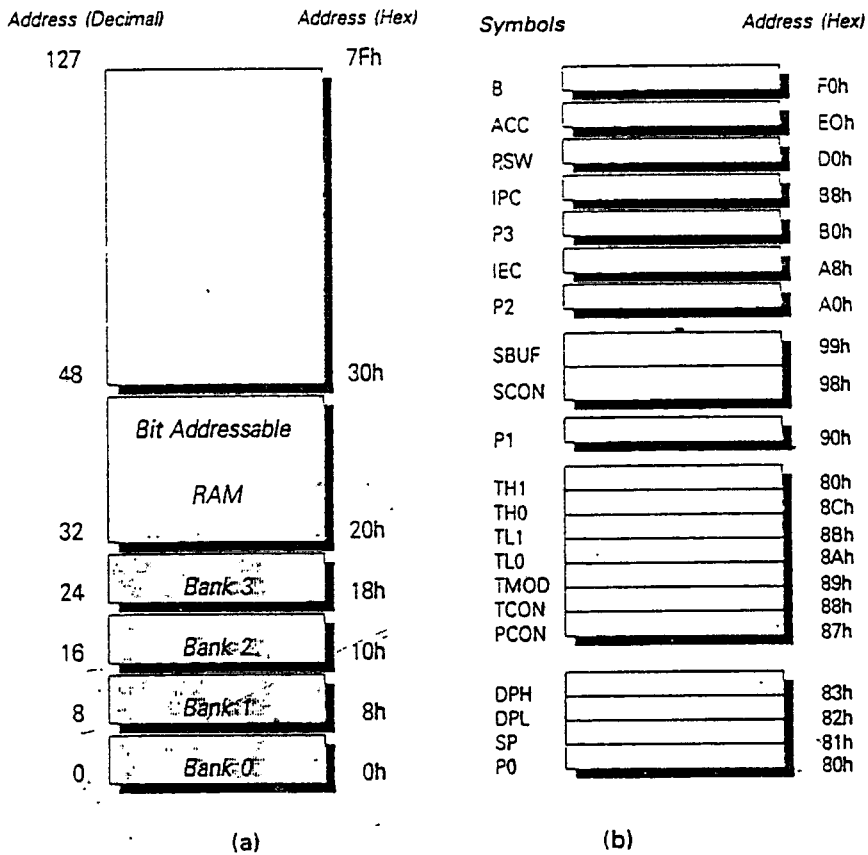
รูปที่ 7.4 แสดงโครงสร้างหน่วยความจำข้อมูลของ MCS - 51

1. ส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลทั่วไป (Internal Ram) มีขนาด 128 ไบต์ หรือ 256 ไบต์ ขึ้นอยู่กับเบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น หน่วยความจำ 128 ไบต์ล่าง สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ส่วนหน่วยความจำ 128 ไบต์บน สามารถเข้าถึงข้อมูลได้โดยทางอ้อมเท่านั้น

2. ส่วนที่เป็นรีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ (Specific Register) เนื่องจาก MCS - 51 ถูกออกแบบไว้สำหรับงานควบคุมโดยเฉพาะ จึงทำให้มีความสามารถเฉพาะตัวหลายอย่าง ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยวงจรภายในชิปที่เพิ่มขึ้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์ทั่วไป การควบคุมการทำงานของวงจรภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ จะกระทำผ่านทางรีจิสเตอร์ที่ถูกกำหนดหน้าที่ไว้แล้ว



รูปที่ 7.5 แสดงหน่วยความจำข้อมูลภายในชิปทั้ง 2 ส่วน การใช้งานรีจิสเตอร์เหล่านี้ ก็สามารถทำได้ทั้งการระบุถึงชื่อของรีจิสเตอร์ หรือระบุตำแหน่งแอดเดรสของรีจิสเตอร์ก็ได้



รูปที่ 7.6 แสดงการจัดสรรพื้นที่หน่วยความจำข้อมูลภายในเพื่อใช้เป็นรีจิสเตอร์

- a) ช่วงแอดเดรส 00 - 19H เป็นรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไป
- b) ช่วงแอดเดรส 80 - FFH เป็นรีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ

## 7.4 รีจิสเตอร์ของ MCS - 51

รีจิสเตอร์ของ MCS - 51 ประกอบด้วย

### 1. รีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไป (General - Purpose Registers)

รีจิสเตอร์กลุ่มนี้ใช้ในการสนับสนุนการประมวลผลการทำงาน จากหน่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์ และลอจิก (ALU) เพื่อให้สามารถจัดการข้อมูลได้เร็วที่สุด แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม แต่ละกลุ่มประกอบด้วยรีจิสเตอร์ 8 ตัว แต่ละตัวมีขนาด 8 บิต มีชื่อเรียกว่า รีจิสเตอร์ R0 - R7 การเลือกกลุ่มสามารถควบคุมทางบิต RS0 และ RS1 ในรีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ PSW ตำแหน่งของรีจิสเตอร์แต่ละตัวแสดงในรูปที่ 7.6

### 2. รีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ (Special Junction Register)

รีจิสเตอร์กลุ่มนี้ ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์หรือพอร์ทของ MCS - 51 ทั้งหมด มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง ในรีจิสเตอร์บางตัวสามารถอ้างอิงระดับบิตได้ สามารถเรียกใช้งานได้ทั้งการระบุชื่อของรีจิสเตอร์ และการระบุตำแหน่งของรีจิสเตอร์นั้น ชื่อของรีจิสเตอร์และตำแหน่งในหน่วยความจำแสดงไว้ในรูปที่ 7.6

## 7.5 พอร์ทของ MCS - 51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS - 51 ประกอบไปด้วย 4 พอร์ท ดังนี้

1. พอร์ท 0 เป็นพอร์ทขนาด 8 บิต เริ่มจากบิต 0 ถึง บิต 7 ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ที่ขา 39 - 32 แต่ละขาจะมีชื่อเรียกว่า P0.0 , P0.1 , P0.2 , ... , P0.7 พอร์ท 0 มีการใช้งานหลายอย่างดังนี้

- ใช้สำหรับส่งค่าตำแหน่งหน่วยความจำภายนอกที่ต้องการติดต่อด้วย ตำแหน่งหน่วยความจำสูงสุดที่ติดต่อได้คือ 64 กิโลไบต์ จึงมีตำแหน่งหน่วยความจำ 16 บิต ของเลขฐาน 2 ค่าตำแหน่งหน่วยความจำ 8 บิตล่างจะถูกส่งออกไปทางพอร์ท 0 ส่วน 8 บิตบนจะถูกส่งออกไปทางพอร์ท 2

- ใ้รับ-ส่งข้อมูลกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอก หรือรับข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก

- ใ้รับ-ส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ทโดยตรง ในกรณีที่ไม่มีการใช้หน่วยความจำโปรแกรมหรือหน่วยความจำข้อมูลภายนอก

2. พอร์ท 1 เป็นพอร์ทขนาด 8 บิต เริ่มจากบิตที่ 0 ถึงบิตที่ 7 แต่ละขามีชื่อเรียก P1.0 , P1.1 , P1.2 , ... , P1.7 พอร์ท 1 นี้จะใช้ทำหน้าที่เป็นตัวรับ-ส่งข้อมูลเท่านั้น ข้อมูลที่

ส่งออกมาทางพอร์ท 1 จะถูก Latch ไว้ แล้วส่งออกไปทางแต่ละขา ก่อนที่จะอ่านข้อมูลเข้าไปทางพอร์ท 1 จะต้องเขียน 1 ไปยังทุกบิตของพอร์ท 1 เสียก่อน

3. พอร์ท 2 เป็นพอร์ทขนาด 8 บิต เริ่มจากบิตที่ 0 ถึงบิตที่ 7 แต่ละขามีชื่อเรียก P2.1 , P2.1 , P2.3 , ... , P2.7 พอร์ท 2 มีการใช้งาน 2 ลักษณะคือ

- ใช้ส่งค่า 8 บิตบนของตำแหน่งหน่วยความจำภายนอก
- ใช้เป็นพอร์ทรับและส่งข้อมูลกับภายนอก

4. พอร์ท 3 เป็นพอร์ทขนาด 8 บิต เริ่มจากบิตที่ 0 ถึง 7 แต่ละขามีชื่อเรียก P3.1 , P3.2 , P3.3 , ... , P3.7 หน้าที่ของแต่ละขาเกี่ยวกับการรับ-ส่งข้อมูลแบบอนุกรม เกี่ยวกับการขัดจังหวะ และการส่งสัญญาณควบคุมการอ่าน-เขียนข้อมูลกับหน่วยความจำภายนอก

## 7.6 การอินเตอร์รัพท์

ในการให้บริการหรือควบคุมอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตต่าง ๆ ของระบบ มักใช้การวนรอบเพื่อตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์นั้น ๆ ซึ่งจะเสียเวลาไปโดยเปล่าประโยชน์สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการติดต่อ จึงได้มีการนำเทคนิคการอินเตอร์รัพท์เข้ามาใช้ ซึ่งจะทำการร้องขอ (Request) การติดต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ เกิดขึ้นได้ตลอดเวลา เมื่อโปรแกรมถูกอินเตอร์รัพท์ ก็จะดำเนินการคำสั่งที่กำลังทำอยู่ให้เสร็จก่อน แล้วจึงกระโดดไปทำงานยังโปรแกรมย่อยบริการอินเตอร์รัพท์ ซึ่งจะเริ่มต้นที่ตำแหน่งใดขึ้นอยู่กับ แหล่งกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัพท์นั้นๆ ดังตารางที่ 7.2

แหล่งกำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัพท์	ตำแหน่งแอดเดรส. (ฐานสิบหก)
อินเตอร์รัพท์ภายนอก 0	0003
วงจรมับ/จับเวลา 0	000B
อินเตอร์รัพท์ภายนอก 1	0013
วงจรมับ/จับเวลา 1	001B
วงจรมับ/ส่งข้อมูลอนุกรม	0023

ตารางที่ 7.2 แสดงตำแหน่งอินเตอร์รัพท์แอดเดรสของสัญญาณอินเตอร์รัพท์ต่าง ๆ สัญญาณที่ทำให้เกิดการอินเตอร์รัพท์กับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS - 51 แบ่งออกเป็น

1. สัญญาณอินเทอร์รัพท์ภายนอก ได้แก่ วงจรและอุปกรณ์ภายนอก
2. สัญญาณอินเทอร์รัพท์ภายใน ได้แก่ วงจรจับ / จับเวลา วงจรเชื่อมต่อ

### สัญญาณอนุกรม

การกำหนดให้ยินยอมหรือห้ามการอินเทอร์รัพท์ แต่ละชนิดดังตารางที่ 7.3 ทำได้โดยการเซตหรือรีเซตบิตของรีจิสเตอร์ IE (Interrupt Enable Register) ส่วนการกำหนดระดับความสำคัญว่าเป็นระดับความสำคัญสูงหรือต่ำ จะกำหนดที่รีจิสเตอร์ IP (Interrupt Priority Register) ซึ่งสัญญาณอินเทอร์รัพท์ที่มีระดับความสำคัญสูง จะได้รับการประมวลผลก่อนสัญญาณอินเทอร์รัพท์ที่มีระดับความสำคัญต่ำ

สัญญาณ	ความหมาย
INT0	สัญญาณอินเทอร์รัพท์ภายนอก เข้ามาหาสัญญาณ P3.2
INT1	สัญญาณอินเทอร์รัพท์ภายนอก เข้ามาหาสัญญาณ P3.3
Timer0	สัญญาณอินเทอร์รัพท์ภายใน ที่เกิดจากวงจรนับ/จับเวลา Timer0
Timer1	สัญญาณอินเทอร์รัพท์ภายใน ที่เกิดจากวงจรนับ/จับเวลา Timer1
พอร์ตอนุกรม	สัญญาณอินเทอร์รัพท์ภายในและภายนอก ที่เกี่ยวข้องกับการส่งข้อมูลอนุกรมจากวงจรภายใน และรับข้อมูลอนุกรมจากภายนอกตามลำดับ

ตารางที่ 7.3 แสดงสัญญาณอินเทอร์รัพท์ใน MCS - 51

### 7.7 การใช้งานไทม์เมอร์และเคาน์เตอร์

MCS - 51 มีไทม์เมอร์อยู่ 2 ชุด คือ ไทม์เมอร์ 0 และไทม์เมอร์ 1 (8032 จะมีไทม์เมอร์ 2 ด้วย) ไทม์เมอร์แต่ละชุดประกอบด้วยรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิตอยู่ 2 ตัว เพื่อเก็บค่าการนับไทม์เมอร์ได้สูงสุด 16<sup>2</sup> บิต ในไทม์เมอร์ 0 รีจิสเตอร์นี้คือ TH0, TL0 ส่วนในไทม์เมอร์ 1 คือ รีจิสเตอร์ TH1, TL1 ผู้ใช้สามารถกำหนดการทำงานในโหมดไทม์เมอร์หรือโหมดเคาน์เตอร์ได้โดยการกำหนดใน TMOD การทำงานไทม์เมอร์ 0 หรือ 1 ทำการนับจำนวนไซเคิล (Cycle) ของสัญญาณของวงจรหาร 12 เมื่อมีการนับถึงค่าสูงสุดและยังนับต่อไป จะเกิดการโอเวอร์โฟลว์ (Overflow) ทำให้เกิดการเซตบิตบางบิตใน TCON เพื่อบอกสถานะโอเวอร์โฟลว์นี้ การใช้งานไทม์เมอร์ทำงานเป็นเคาน์เตอร์ก็คือการใช้รีจิสเตอร์ TH<sub>x</sub> และ TL<sub>x</sub> (x คือ 0 หรือ 1) ทำการนับจำนวนไซเคิลของสัญญาณที่เข้ามาทาง T0 หรือ T1 ของ MCS - 51

### รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน ไทม์เมอร์และเคาน์เตอร์

1. รีจิสเตอร์ TMOD เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต มีหน้าที่กำหนดการทำงานของ ไทม์เมอร์ 0 และ ไทม์เมอร์ 1 ว่าเป็น ไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์ และกำหนดโหมดในการทำงาน
2. รีจิสเตอร์ TCON เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต ใช้บอกสถานะการทำงานของ ไทม์เมอร์ 0 และ ไทม์เมอร์ 1

GATE	C/T	M1	M0	GATE	C/T	M1	M0
------	-----	----	----	------	-----	----	----

รีจิสเตอร์ TMOD

TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

รีจิสเตอร์ TCON

รูปที่ 7.7 แสดงหน้าที่ในแต่ละบิตของรีจิสเตอร์ TMOD และ TCON  
การสตาร์ทไทม์เมอร์

1. ถ้าบิต GATE ในรีจิสเตอร์ TMOD เป็น 0 ไทม์เมอร์จะเริ่มนับ เมื่อบิต  $TR_x$  ในรีจิสเตอร์ TCON ถูกเซต และจะหยุดนับเมื่อเคลียร์บิต  $TR_x$
2. ถ้าบิต GATE ในรีจิสเตอร์ TMOD เป็น 1 ไทม์เมอร์จะเริ่มนับเมื่อมีการเซตบิต  $TR_x$  ในขณะที่หา  $INT_x$  มีสถานะเป็น 1 และจะหยุดนับเมื่อหา  $INT_x$  มีสถานะเป็น 0 หรือมีการเคลียร์บิต  $TR_x$

### โหมดในการทำงานไทม์เมอร์และเคาน์เตอร์

เราสามารถเลือกโหมดการทำงานของไทม์เมอร์และเคาน์เตอร์ โดยควบคุมบิต M1 และ M0 ในรีจิสเตอร์ TMOD ซึ่งมีทั้งหมด 4 โหมดดังนี้

1. โหมด 0 รีจิสเตอร์  $TH_x$  และ  $TL_x$  ทำตัวเป็นตัวนับ 13 บิต ค่าการนับ 8 บิต บน มาจาก 8 บิตของ  $TH_x$  และอีก 5 บิตล่าง มาจากค่า 5 บิตล่างของรีจิสเตอร์  $TL_x$  โดยที่ 3 บิตบนของ  $TL_x$  จะไม่ต้องสนใจเลย
2. โหมด 1 รีจิสเตอร์  $TH_x$  และ  $TL_x$  ทำตัวเป็นตัวนับ 16 บิต จากการนับ 8 บิตบนอยู่ในรีจิสเตอร์  $TH_x$  และค่าจากการนับ 8 บิตล่างอยู่ในรีจิสเตอร์  $TL_x$
3. โหมด 2 ในการนับของรีจิสเตอร์  $TL_x$  ขนาด 8 บิต เมื่อนับถึงค่าสูงสุด คือ FF 14 เมื่อทำการนับค่าเริ่มต้นในการนับครั้งต่อไป

4. โหมด 3 ในโหมดนี้ไทม์เมอร์ 1 จะไม่ทำงาน TH0 และ TLO จะทำงานแยกกัน เมื่อไทม์เมอร์เกิดโอเวอร์โฟลว์จะไปเซตบิต TFO (TF1 ในไทม์เมอร์) แล้วจะกระโดดไปสู่โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพท์ที่ตำแหน่ง 000BH (ตำแหน่ง 001BH สำหรับไทม์เมอร์ 1) การเลือกจะใช้งานเป็นไทม์เมอร์ หรือเคาน์เตอร์นั้นขึ้นอยู่กับการควบคุมบิต C/T ใน TMOD โดยถ้าบิตนี้เซตจะใช้งานเป็นเคาน์เตอร์ ถ้าบิตนี้เคลียร์จะใช้งานเป็นไทม์เมอร์

## 7.8 การโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี

ไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีชุดคำสั่ง ให้ผู้ใช้ได้สั่งให้มีการดำเนินงานบางอย่างตามที่กำหนดไว้ คำสั่งเหล่านี้จะอยู่ในรูปตัวเลขฐานสอง (Binary Bit Pattern) จากความหมายของคำว่าโปรแกรม คือการนำคำสั่งมาเขียนเรียงต่อกัน เพื่อให้เกิดการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้น การนำคำสั่งที่อยู่ในรูปเลขฐานสอง หลาย ๆ ชุดมาเรียงต่อกัน จะเรียกว่าโปรแกรมภาษาเครื่อง (Machine Language Program) ซึ่งเสมือนว่าเป็นสิ่งที่เราใช้ในการติดต่อสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์นั่นเอง

อย่างไรก็ตามการสร้างโปรแกรมด้วยภาษาเครื่องมีความไม่สะดวกหลายประการคือ

1. ความลำบากต่อการทำความเข้าใจโปรแกรมในภายหลัง
2. ไม่สามารถสื่อความหมายเหมือนกับตัวหนังสือที่ใช้ในชีวิตประจำวัน
3. ยากต่อการค้นหาตำแหน่งที่ผิดพลาด เพราะโปรแกรมจะมีเพียงเลข 1 และ 0 วางสลับกันไปมา

ดังนั้น ในเวลาต่อมา จึงได้มีการนำตัวเลขฐานสิบหก (Hexadecimal numbers) เข้ามาใช้แทนตัวเลขฐานสองซึ่งทำให้เกิดความกระชับ และทำให้ลดความผิดพลาดลง แต่ถ้าถึงกระนั้น ตัวเลขฐานสิบหก ก็ยังคงยากต่อการทำความเข้าใจ และแก้ไขโปรแกรมในภายหลังอยู่ดี จึงได้มีการสร้างชื่อของคำสั่งขึ้นมาที่เรียกว่า นิโมนิก (Mnemonics) ซึ่งมีโมนิกของแต่ละคำสั่งจะเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษที่มีความหมาย ใกล้เคียงกับการทำงานของคำสั่งนั้น ๆ มาก ในไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละตระกูล จะมีการกำหนดชื่อรหัสนิโมนิกที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งผู้ใช้จะต้องค้นหาจากเอกสารหรือคู่มือใช้งานเอง และเมื่อมีการนำคำสั่งในรูปของนิโมนิกมาเรียงต่อกัน เพื่อทำงานอย่างใดอย่างหนึ่ง จะเรียกว่า “โปรแกรมภาษาแอสเซมบลี” (Assembly Language Program)

## 7.9 โปรแกรมแอสเซมเบลอร์

ภาษาแอสเซมบลีเป็นภาษาที่มนุษย์สร้างขึ้นมา เพื่อให้เกิดความสะดวกในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถเข้าใจในภาษาแอสเซมบลีได้ ดังนั้น จึงต้องมีการแปลรหัสนิโมนิกให้อยู่ในรูปตัวเลขฐานสิบหกเสียก่อน ซึ่งวิธีหนึ่งที่ย่างที่สุดก็คือ เปิดตารางของชุดคำสั่ง และแทนที่ด้วยตัวเลขฐานสิบหกของคำสั่งนั้น ๆ แต่การทำอย่างนี้อาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย เมื่อใช้กับโปรแกรมขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาโปรแกรมบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยการทำงานในลักษณะเช่นนี้แทน ซึ่งเรียกว่า โปรแกรมแอสเซมเบลอร์ (Assembler Program)

การทำงานของโปรแกรมแอสเซมเบลอร์ จะทำการแปลโปรแกรมภาษาแอสเซมบลีไปเป็นภาษาเครื่อง แล้วนำไปเก็บไว้ยังโปรแกรมที่เรียกว่า “โปรแกรมออบเจกต์ (Object Program) โปรแกรมออบเจกต์นี้ สามารถนำไปใช้งานต่อได้หลายลักษณะ เช่น นำไปสร้างเป็นโปรแกรมรหัสเลขฐานสิบหก

## 7.10 การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

### 7.10.1 การออกแบบโปรแกรม

เนื่องจากเราใช้ไอซี TCA - 785 เป็นตัวสร้างสัญญาณเพื่อเทิร์นออน เอสซี-อาร์ ซึ่งมุมเกทเริ่มต้นจะมีค่าเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับ ระดับแรงดัน คีซีที่ป้อนเข้าขา 11 ของตัวไอซี และในการสตาร์ทมอเตอร์จะต้องมีการลคมุมทริกจากค่าเริ่มต้นค่าหนึ่ง ให้เหลือ 0 ภายในเวลาที่ต้องการ จากเหตุผลข้างต้น เราจึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานดังกล่าว โดยใช้ระดับแรงดันคีซีตั้งแต่ 0 - 10 โวลต์ ควบคุมมุมทริกจาก 0 - 180 องศา ดังนั้นโปรแกรมควบคุมจะต้องเริ่มต้นด้วยการส่งระดับแรงดันคีซีค่าหนึ่ง ที่สัมพันธ์กับมุมทริกเริ่มต้นให้กับ TCA - 785 จากนั้นจะค่อย ๆ ลดระดับแรงดันคีซีลงเรื่อย ๆ จนถึง 0 ภายในเวลาที่เหมาะสม (ขึ้นอยู่กับขนาดมอเตอร์ , ขนาดโหลด) แต่เนื่องจากเอาท์พุทของพอร์ทในไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นเป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital) แต่ระดับแรงดันคีซีที่ป้อนเข้าที่ขา 11 ของ TCA - 785 นั้นต้องเป็นสัญญาณแอนะล็อก (Analog) จึงต้องใช้ไอซีดีพูเอ. (D/A) เปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกก่อนป้อนเข้า TCA - 785

### 7.10.2 การทำงานของโปรแกรม

เริ่มต้นจะต้องมีการเลือกโหมดในการทำงานก่อน โดยถ้ากดปุ่ม  Auto หรือ  1 จะเป็นการทำงานในโหมดอัตโนมัติ แต่ถ้ากดปุ่ม  Manual หรือ  2 จะเป็นการทำงานในโหมดปกติ

1. การทำงานในโหมดอัตโนมัติ จะต้องทำการป้อนขนาดของโหลดก่อน โดยการกดปุ่ม **load** ไฟ load ก็จะติด หลังจากนั้นจึงป้อนขนาดโหลดโดยการกดปุ่มเลข 0-9 ตามต้องการ หลังจากนั้นให้กดปุ่ม **ENTER** ก็จะเสร็จสิ้น การป้อนค่าโหลด ในระหว่างการป้อนค่าโหลด ถ้ามีการกดตัวเลขผิดสามารถกดปุ่ม **CLEAR** แล้วใส่ค่าใหม่ได้

ถ้าค่าโหลดที่ป้อนอยู่ในช่วงที่มอเตอร์รับได้ไฟ ready ก็จะติด แต่ถ้าป้อนค่าโหลดแล้ว กด **ENTER** ไฟ ready ไม่ติด แสดงว่าขนาดโหลดผิดพลาด จะต้องป้อนค่าใหม่

การที่ไฟ ready ติดแสดงว่า โปรแกรมได้หาค่าเวลาและมุมในการสตาร์ทเสร็จแล้ว รอเพียงการกดปุ่ม **START** เพื่อเริ่มการทำงาน ในขณะที่ยังไม่กดปุ่มสตาร์ทเราสามารถปุ่ม **LOAD** เพื่อนำค่าเก่ามาแก้ไข ได้ โดยเครื่องจะแสดงค่าเก่าออกมาให้ดู เราเพียงแต่กดปุ่ม **CLEAR** , ป้อนค่าโหลดใหม่ แล้วกดปุ่ม **ENTER** ก็จะเสร็จสิ้นการแก้ไข

2. การทำงานในโหมดปกติ ผู้ใช้จะต้องรู้ค่าเวลาและมุม โดยผู้ใช้สามารถเลือกได้ว่าจะป้อนค่าใดก่อน ถ้าจะป้อนค่าเวลาก่อน ให้กดปุ่ม **TIME** แต่ถ้าจะป้อนค่ามุมก่อน ก็ให้กดปุ่ม **ANGLE**

เมื่อเข้าสู่โหมดการป้อนเวลา ไฟ time จะติดเพื่อรอการป้อนค่า โดยค่าเวลาที่ป้อนอยู่ในหน่วยวินาที หลังจากนั้นให้กดปุ่ม **ENTER** ก็จะเสร็จสิ้นการป้อนเวลา แต่ถ้าเราป้อนค่าเวลาผิด เราสามารถกดปุ่ม **CLEAR** แล้วป้อนค่าใหม่ได้ การกดปุ่มอื่นนอกเหนือจากนี้ เครื่องจะไม่ยอมรับ ค่าของเวลาที่ป้อนมีค่าตั้งแต่ 1-9999 วินาที ถ้าป้อนค่า 0 เครื่องจะฟ้องว่าผิดพลาด โดยไฟ error จะติด แต่ถ้าป้อนค่าที่มากกว่า 9999 วินาที (ค่าตั้งแต่ 5 หลักขึ้นไป) เครื่องจะรับแค่ 4 หลักเท่านั้น เช่น 20576 เครื่องจะถือว่าป้อน 0576 เลข 2 จะถูกตัดทิ้งไป

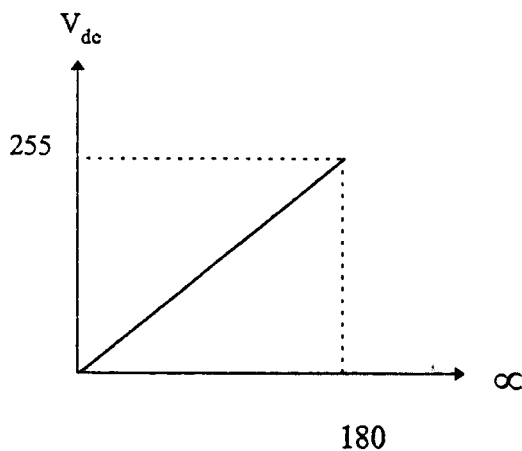
ในโหมดการป้อนมุมนั้นหลักการเหมือนกับการป้อนเวลา กล่าวคือ เมื่อเข้าสู่โหมดนี้ ไฟ angle ก็จะติด หลังจากนั้นก็ป้อนค่ามุมเริ่มต้นเข้าไป แล้วจึงกดปุ่ม **ENTER** ถ้ามีการป้อนค่าผิด ก็สามารถกดปุ่ม **CLEAR** แล้วป้อนค่าใหม่ได้เช่นกัน การกดปุ่มอื่นนอกจากนี้เครื่องจะไม่ยอมรับ ค่ามุมที่ป้อนมีค่าเป็นองศา โดยสามารถป้อนได้ตั้งแต่ 0-180 องศา แต่ในทางปฏิบัติไม่ควรป้อนเกิน 170 องศา เพราะควรเหลือมุมไว้อีก 10 องศา เพื่อให้ไทรสเตอร์หยุดทำงาน เช่นเดียวกัน ถ้าป้อนค่าที่นอกเหนือจากนี้ เครื่องจะฟ้องความผิดพลาด โดยมีไฟ error แสดง

เมื่อไฟ error ติดแสดงว่ามีการผิดพลาดเกิดขึ้น โดยอาจเกิดจากการป้อนค่าเวลาเป็นศูนย์ หรือป้อนค่ามุมเริ่มต้นไม่อยู่ในช่วง 0-180 องศา เมื่อเกิด error ขึ้นแล้ว ให้กดปุ่ม **ERROR** เพื่อที่เครื่องจะได้เริ่มทำงานใหม่ (จะต้องป้อนใหม่ทั้งค่ามุมและเวลา)

เครื่องนี้จะมีโปรแกรมคอยตรวจสอบว่า ป้อนข้อมูลครบทั้งสองค่าหรือยัง โดยถ้าป้อนค่าข้อมูลครบทั้งสองค่าแล้ว ไฟ ready จะติด

เมื่อไฟ ready ดิจ แสดงว่าเครื่องพร้อมที่จะทำงานแล้ว เพียงแค่กดปุ่ม **START** เครื่องก็เริ่มทำงานทันที ในกรณีที่ยังไม่กดปุ่ม **START** ยังสามารถแก้ไขค่าเวลาและมุมที่ป้อนไปได้แล้ว โดยถ้าต้องการแก้ไขค่าของเวลา เราก็กดปุ่ม **TIME** อีกครั้งหนึ่ง เครื่องก็แสดงค่าเก่าที่ได้ป้อนไปแล้วให้ดู จากนั้นก็ให้กดปุ่ม **CLEAR** แล้วป้อนค่าใหม่เข้าไปแล้วกด **ENTER** ส่วนการแก้ไขค่ามุมเริ่มต้น ก็เช่นเดียวกัน เราเพียงแต่กดปุ่ม **ANGLE** อีกครั้งหนึ่ง จากนั้นกดปุ่ม **CLEAR** ป้อนค่ามุมเริ่มต้นใหม่แล้วกด **ENTER** เป็นอันเสร็จการแก้ไข

หลังจากกดปุ่ม **START** เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน ไฟ operate จะติด เครื่องจะนำค่าที่ป้อนมาแปลงเป็นเลขฐานสิบหก จากนั้นนำค่าเวลาที่ได้ซึ่งอยู่ในหน่วยวินาทีมาแปลงให้เป็นมิลลิวินาที (ms) โดยนำไปคูณกับ 1000 ( $3E8_{16}$ ) ส่วนค่าของมุมเริ่มต้นที่ป้อนมานั้นจะนำไปเปิดตาราง เพื่อหาค่าศักดาไฟฟ้ากระแสตรงเริ่มต้นที่จะส่งออกพอร์ทที่ 1 โดยค่าในตารางนั้น จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าของมุมกับค่าศักดาไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นไปตามกราฟ รูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้ากระแสตรงที่จะส่งออกพอร์ท 1 กับค่ามุมทริกไทรสเตอร์ ( $\alpha$ )

จากกราฟ จะเป็นไปตามสมการ

$$V_{dc} = 225 \alpha / 180 \quad \dots(7.1)$$

$V_{dc}$  คือ ศักดาไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขา 11 ของ TCA785

$\alpha$  คือ มุมทริก

จากนั้น ก็นำค่าเวลาในหน่วยมิลลิวินาทีมาหารด้วยค่าศักดาไฟฟ้ากระแสตรงเริ่มต้น เป็นไปตามสมการ

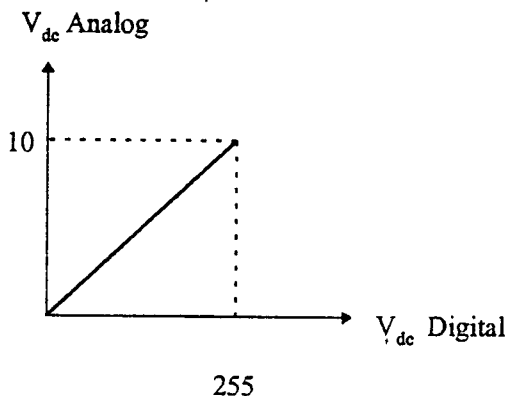
$$\text{QUOTIENT} = (\text{เวลา} \times 1000) / V_{dc0} \quad \dots(7.2)$$

QUOTIENT คือ ตัวแปรที่เก็บค่าผลหาร

เวลา คือ เวลาที่ใช้ในการสแตร์ทมอเตอร์

$V_{dc0}$  คือ ค่าศักดาไฟฟ้ากระแสตรงเริ่มต้น

ค่า QUOTIENT ที่ได้จะเป็นตัวเลขแสดงถึงค่าเวลาในหน่วยมิลลิวินาที ที่ใช้ในการลดระดับไฟฟ้ากระแสตรงลงมา 1 หน่วย จากนั้นก็จะส่งค่าศักดาไฟฟ้ากระแสตรงเริ่มต้น ( $V_{dc0}$ ) ออกไปที่พอร์ต 1 แต่เนื่องจากสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณดิจิทัล จึงต้องนำไปเข้าสู่ไอซีดีทิวเอ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณ แอนาลอก ดังรูปที่ 7.9

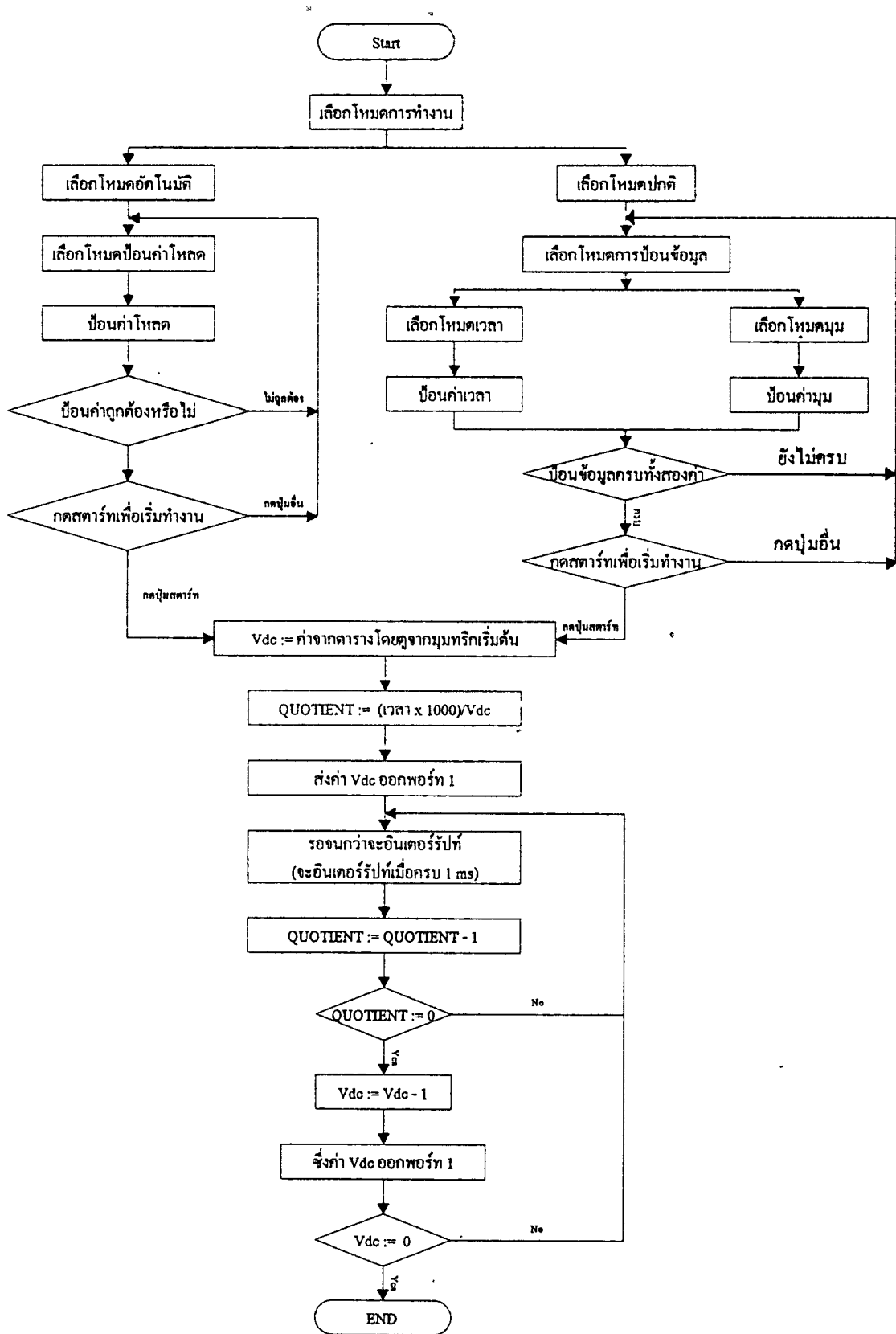


รูปที่ 7.9 แสดงการเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้ากระแสตรงเริ่มต้นจากดิจิทัลเป็นแอนาลอก จากนั้นก็เข้าสู่ในส่วนของโปรแกรมหน่วงเวลา ซึ่งจะมีการอินเตอร์รัพท์ทุกๆ 1 มิลลิวินาที โดยทุกครั้งที่มีการอินเตอร์รัพท์ ก็จะไปลดค่า QUOTIENT ลง 1 เมื่อ QUOTIENT ลดลงถึง 0 แล้ว ก็จะไปลดค่าศักดาไฟฟ้ากระแสตรงลง 1 หน่วย พร้อมกับส่งค่านั้นออกไปทางพอร์ต 1 ด้วย

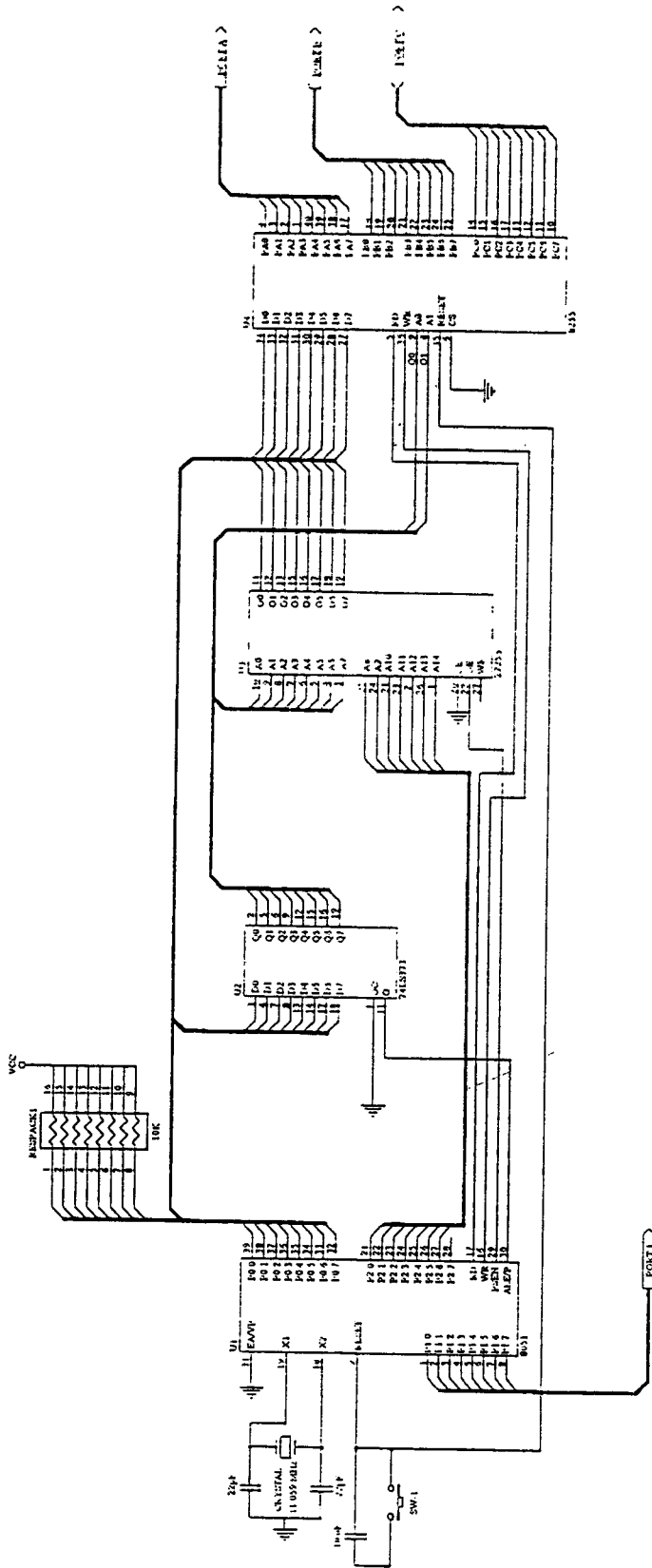
โปรแกรมจะทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าศักดาไฟฟ้ากระแสตรงจะลดลงจนเหลือศูนย์ โวลต์ โปรแกรมจึงสิ้นสุดการทำงาน

ในขณะที่เครื่องทำงานจะมีการแสดงค่าเวลาผ่านทางหน้าปัดด้วย โดยจะเป็นการแสดงค่าของเวลาที่เหลือในหน่วยวินาที โดยจะมีการลดลงทุก ๆ 1 วินาที จนถึง 0

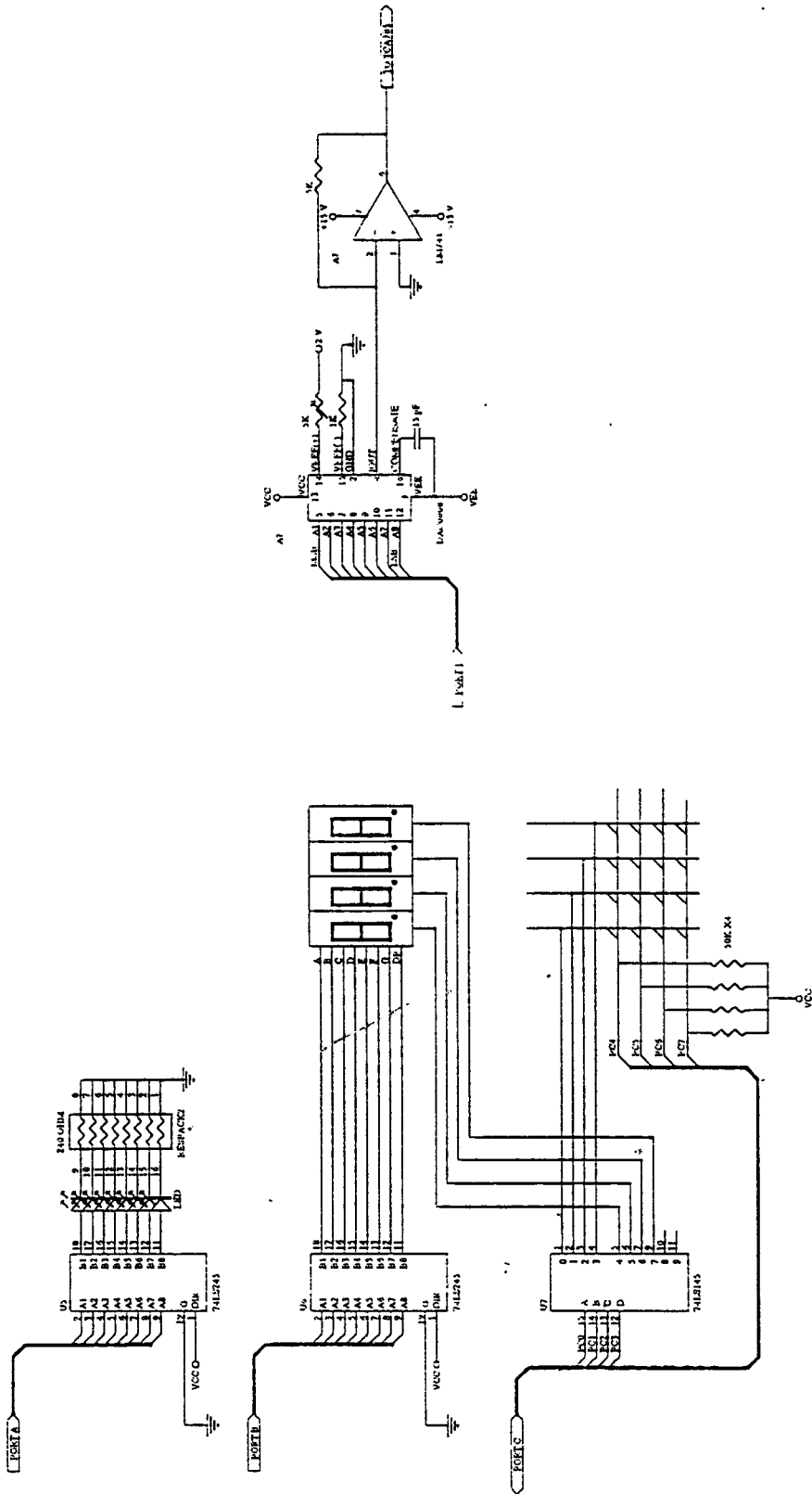
ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทั้งหมด แสดงในรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทั้งหมด



รูปที่ 7.11 (ก) แสดงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 7.11 (ข) แสดงวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์

## บทที่ 8

### การคำนวณเวลาและมุมในการสตาร์ท

#### 8.1 รัศมีไจโร ( $GD^2$ )

ในการเร่งมวลให้มีความเร็วรอบสูงขึ้นจะต้องใช้แรงภายนอกมากระทำ ค่าของแรงดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักและรัศมีไจโรของมวลนั้น ถ้าป้อนแรงบิดให้แก่วัสดุซึ่งหมุนอยู่เป็นเวลานานพอสมควร จะทำให้ความเร็วรอบของวัสดุเปลี่ยนแปลงได้ และค่าความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงไป จะมีความสัมพันธ์กับแรงบิดที่มากกระทำและรัศมีไจโรของวัสดุนั้น  $GD^2$  มีหน่วยเป็น กก.เมตร<sup>2</sup>

$$GD^2 = 4J \quad \dots(8.1)$$

ค่า  $GD^2$  ของวัสดุรูปทรงโรเตอร์แบบต่างๆหาได้จากสมการทรงกระบอกตัน

$$GD^2 = \frac{D^2}{2}W \quad \dots(8.2)$$

เมื่อ D : เส้นผ่าศูนย์กลางทรงกระบอก (m)

W : น้ำหนักทรงกระบอก (kg)

ทรงกระบอกกลวง

$$GD^2 = \frac{D^2 + d^2}{2}W \quad \dots(8.3)$$

เมื่อ D : เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (m)

d : เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (m)

W : น้ำหนักทรงกระบอก (kg)

#### 8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการสตาร์ทและ $GD^2$

ในกรณีที่  $GD^2$  ของระบบมีค่ามาก หรือมีการสตาร์ทบ่อยครั้ง ช่วงเวลาในการสตาร์ทจะต้องต่ำพอที่จะไม่ทำให้อายุการใช้งานของขดลวดมอเตอร์สั้นลง สามารถคำนวณเวลาในการสตาร์ทได้จากสมการ

$$t = \frac{100}{T_m - T_l} \times \frac{GD^2 \left( \frac{N_s}{1000} \right)^2}{K_w} \times 2.74 \quad \text{วินาที} \quad \dots(8.4)$$

เมื่อ  $T_m$  : ค่าแรงบิดเฉลี่ยของมอเตอร์ขณะเกิดการเร่ง (%)

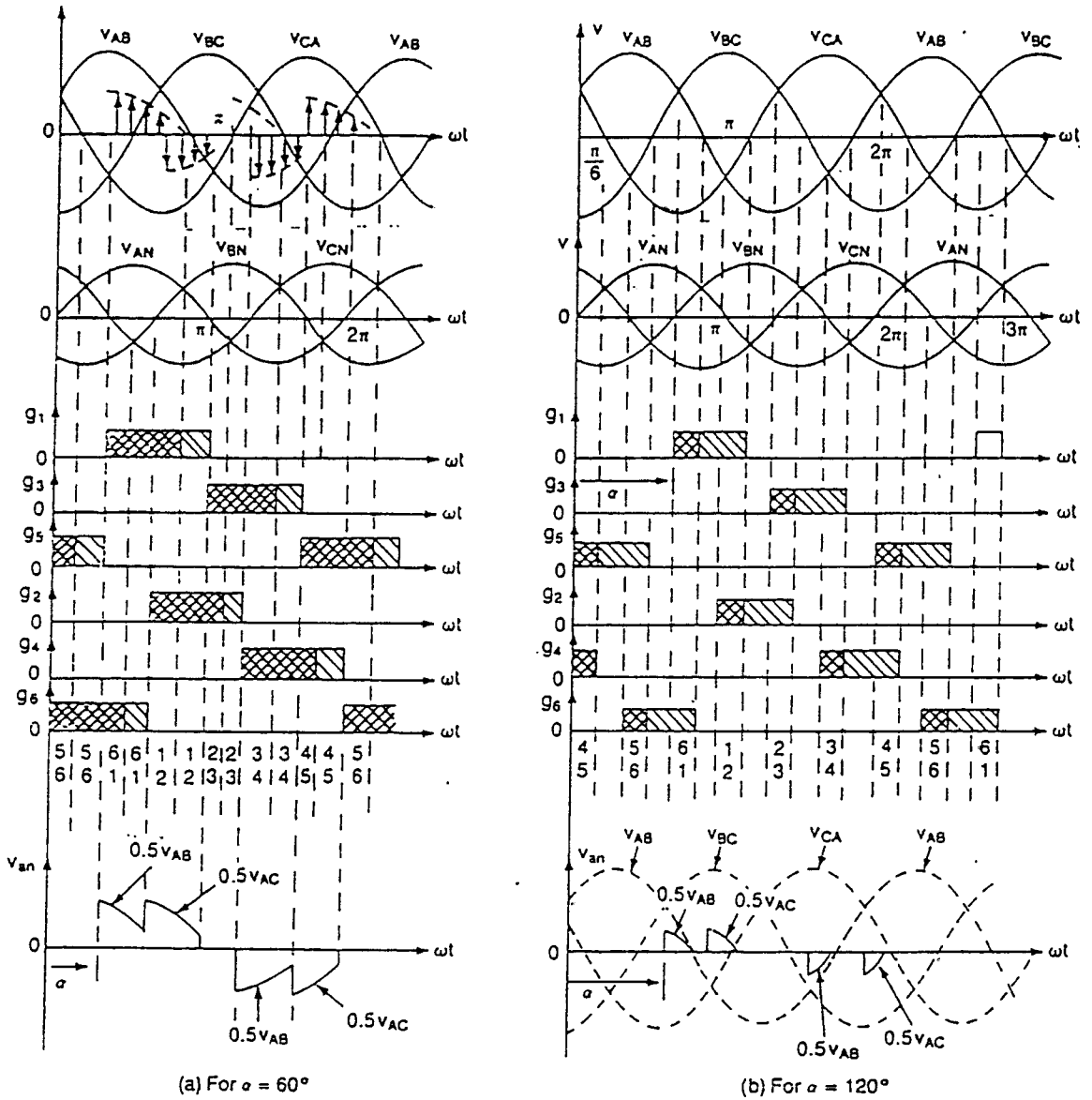
$T_l$  : ค่าแรงบิดเฉลี่ยของโหลดขณะเกิดการเร่ง (%)

$GD^2$  : เป็นค่ารวมของทั้งระบบ ( $\text{kg.m}^2$ )

$N_s$  : ความเร็วรอบซิงโครนัสของมอเตอร์ (rpm)

$K_w$  : กำลังงานของมอเตอร์ (kw)

8.3 การคำนวณแรงดัน



รูปที่ 8.1 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทริกเซสซอร์

จากรูปแสดงคลื่นแรงดันเฟสเอาท์พุทที่  $\alpha = 60^\circ$  และ  $120^\circ$  สามารถจะแบ่งพิจารณาออกเป็นช่วงต่างๆ ดังนี้

$0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$  ก่อนที่  $T_1$  จะถูกกระตุ้นจะมีไทรสเตอร์ทำงานอยู่ก่อน 2 ตัว

เมื่อ  $T_1$  ถูกกระตุ้นและเริ่มทำงานจะมีช่วงเวลาระยะสั้นๆ ที่มีไทรสเตอร์ทำงาน 3 ตัวจากนั้นไทรสเตอร์ 2 ตัวก่อนจะหยุดทำงาน

$60^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$  มีไทรสเตอร์ทำงาน 2 ตัว

$\alpha \geq 150^\circ$  ไม่มีไทรสเตอร์ 2 ตัวใดๆ ทำงาน ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้มีค่าเป็น 0 สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตอาร์เอ็มเอส โดยแบ่งออกเป็นช่วงมุมต่างๆ ดังนี้

$0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$

$$\begin{aligned} V_o &= \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_{an}^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \sqrt{6}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots(8.5) \end{aligned}$$

$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

$$\begin{aligned} V_o &= \sqrt{6}V_s \left[ \frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\pi/2-\pi/3+\alpha}^{5\pi/6-\pi/3+\alpha} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) + \int_{\pi/2-\pi/3+\alpha}^{5\pi/6-\pi/3+\alpha} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \sqrt{6}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{12} - \frac{3 \sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots(8.6) \end{aligned}$$

$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$

$$\begin{aligned} V_o &= \sqrt{6} \left[ \frac{2}{2\pi} \left\{ \int_{\pi/2-\pi/3+\alpha}^{\pi} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) + \int_{\pi/2-\pi/3-\alpha}^{\pi} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \sqrt{6}V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{5\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots(8.7) \end{aligned}$$

## บทที่ 9

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 9.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบขนาดกระแสระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยตรงกับการสตาร์ทโดยการใช้วงจรซอฟต์แวร์ประกอบ
2. เพื่อทำการหาค่ามุมเริ่มต้นในการสตาร์ทที่โหลดค่าต่าง ๆ

#### 9.2 การทดลอง

##### 9.2.1 การทดลองที่ 1

1. ทำการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3.2 kw ขณะไม่มีภาระ โดยการจ่ายแรงดันโดยตรงที่พิกัดแรงดัน 380 โวลต์

2. บันทึกค่ากระแสขณะสตาร์ทโดยใช้แคลมป์มิเตอร์

##### ผลการทดลองที่ 1

วัดค่ากระแสขณะสตาร์ทได้เท่ากับ 22.9 A

##### 9.2.2 การทดลองที่ 2

เป็นการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3.2 kw ขณะไม่มีภาระโดยการใช้เครื่องซอฟต์แวร์

##### การทดลองที่ 2.1

1. ทำการสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้เครื่องซอฟต์แวร์ โดยคงค่าช่วงเวลาในการสตาร์ทที่ 10 วินาที และปรับค่ามุมเริ่มต้นที่ต่างกัน
2. บันทึกค่ากระแสเริ่มต้น และค่ากระแสสูงสุดโดยใช้แคลมป์มิเตอร์
3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 และ 2 โดยการเปลี่ยนค่าช่วงเวลาในการสตาร์ทเป็นที่ 20,30,40 และ 50 วินาทีตามลำดับ

ผลการทดลองที่ 2.1

มุมเริ่มต้น (องศา)	ช่วงเวลาในการสาร์ท (วินาที)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)	กระแสเริ่มต้น (แอมแปร์)
160	10	5.4	0.8
140	10	5.4	1.3
120	10	5.4	5.3
100	10	11.2	11.2
80	10	12.9	12.9

ตารางที่ 9.1 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อกำหนดเวลาในการสาร์ทที่ 10 วินาที  
ที่มุมเริ่มต้นต่าง ๆ

มุมเริ่มต้น (องศา)	ช่วงเวลาในการสาร์ท (วินาที)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)	กระแสเริ่มต้น (แอมแปร์)
160	20	5.6	0.8
140	20	5.7	0.8
120	20	5.6	4.8
100	20	9.5	9.5
80	20	12.2	2.2

ตารางที่ 9.2 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อกำหนดเวลาในการสาร์ทที่ 20 วินาที  
ที่มุมเริ่มต้นต่างๆ

มุมเริ่มต้น (องศา)	ช่วงเวลาในการสาร์ท (วินาที)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)	กระแสเริ่มต้น (แอมแปร์)
160	30	5.3	0.8
140	30	5.5	0.9
120	30	5.5	4.0
100	30	8.3	8.3
80	30	9.6	9.6

ตารางที่ 9.3 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อกำหนดเวลาในการสาร์ทที่ 30 วินาที  
ที่มุมเริ่มต้นต่างๆ

มุมเริ่มต้น (องศา)	ช่วงเวลาในการสาร์ท (วินาที)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)	กระแสเริ่มต้น (แอมแปร์)
160	40	5.6	0.8
140	40	5.6	1.0
120	40	5.7	4.4
100	40	11.4	11.4
80	40	17.0	17.0

ตารางที่ 9.4 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อกำหนดเวลาในการสาร์ทที่ 40 วินาที ที่มุมเริ่มต้นต่างๆ

มุมเริ่มต้น (องศา)	ช่วงเวลาในการสาร์ท (วินาที)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)	กระแสเริ่มต้น (แอมแปร์)
160	50	5.5	0.7
140	50	5.6	0.8
120	50	5.6	4.7
100	50	7.2	7.2
80	50	13.4	13.4

ตารางที่ 9.5 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อกำหนดเวลาในการสาร์ทที่ 50 วินาที ที่มุมเริ่มต้นต่างๆ

### การทดลองที่ 2.2

1. ทำการสาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้เครื่องชอฟท์สาร์ท โดยคงค่ามุมเริ่มต้นที่ 120 องศา และปรับค่าเวลาในการสาร์ทที่ต่างกัน
2. บันทึกค่ากระแสเริ่มต้น และค่ากระแสสูงสุดโดยใช้แคลมป์มิเตอร์
3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 และ 2 โดยการเปลี่ยนค่ามุมเริ่มต้นเป็นที่ 130 องศา

### ผลการทดลองที่ 2.2

มุมเริ่มต้น (องศา)	ช่วงเวลาในการสตาร์ท (วินาที)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)	กระแสเริ่มต้น (แอมแปร์)
120	5	9.2	7.6
120	15	5.4	5.9
120	25	5.5	4.6
120	35	5.6	4.5
120	45	5.5	4.7

ตารางที่ 9.6 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อกำหนดมุมเริ่มต้นที่ 120 องศา ที่เวลาในการสตาร์ทต่างๆ

มุมเริ่มต้น (องศา)	ช่วงเวลาในการสตาร์ท (วินาที)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)	กระแสเริ่มต้น (แอมแปร์)
130	5	8.3	5.6
130	15	6.1	3.9
130	25	5.6	3.1
130	35	5.6	3.5
130	45	5.6	2.1

ตารางที่ 9.7 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อกำหนดมุมเริ่มต้นที่ 130 องศา ที่เวลาในการสตาร์ทต่างๆ

#### 9.2.3 การทดลองที่ 3

เป็นการทดสอบสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อขับภาระที่ค่าต่าง ๆ

##### การทดลองที่ 3.1

1. ทำการทดลองกับมอเตอร์ขนาด 3.2 kw โดยภาระที่มอเตอร์ขับ เกิดจากเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กด้านการหมุนของมอเตอร์ โดยจ่ายไฟกระแสตรงเข้าเครื่องดังกล่าวเพื่อให้เกิดภาระขนาด 1-6 กิโลกรัม เมื่ออ่านจากตาชั่งที่เครื่องนั้น

2. บันทึกค่ากระแสเริ่มต้น และค่ากระแสสูงสุดโดยใช้แคลมป์มิเตอร์ ที่ภาระและมุมเริ่มต้นค่าต่างๆ

## ผลการทดลองที่ 3.1

ขนาดภาระ (kg)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มูมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	แรงดันเริ่มต้น (V)	ลักษณะการหมุน ตอนเริ่มสตาร์ท
1	16	150	1.8	25	ไม่หมุน
		140	0.8	47	ไม่หมุน
		130	1.9	47	ไม่หมุน
		120	4.6	49	เกือบออกตัวได้
		110	10.6	99	เริ่มหมุนพอดี
		100	14.6	134	หมุนได้
		90	21.2	149	หมุนได้แต่ กระชากเล็กน้อย

ตารางที่ 9.8 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 1 กิโลกรัม ที่มูมเริ่มต้นค่าต่างๆ

ขนาดภาระ (kg)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มูมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	แรงดันเริ่มต้น (V)	ลักษณะการหมุน ตอนเริ่มสตาร์ท
2	17	150	2.4	33	ไม่หมุน
		140	0.8	41	ไม่หมุน
		130	1.8	47	ไม่หมุน
		120	4.8	50	เกือบออกตัวได้
		110	10.2	104	เริ่มหมุนได้
		100	14.7	124	หมุนได้

ตารางที่ 9.9 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 2 กิโลกรัม ที่มูมเริ่มต้นค่าต่างๆ

ขนาดภาระ (kg)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มูมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	แรงดันเริ่มต้น (V)	ลักษณะการหมุน ตอนเริ่มสตาร์ท
3	18	150	2.3	34	ไม่หมุน
		140	1.2	36	ไม่หมุน
		130	0.8	36	ไม่หมุน
		120	5.3	59	เกือบออกตัวได้
		115	5.5	70	หมุนได้พอดี
		110	8.1	101	หมุนได้
		100	14.7	125	หมุนได้

ตารางที่ 9.10 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 3 กิโลกรัม ที่มูมเริ่มต้นค่าต่างๆ

ขนาดภาระ (kg)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มูมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	แรงดันเริ่มต้น (V)	ลักษณะการหมุน ตอนเริ่มสตาร์ท
4	19	150	2.0	29	ไม่หมุน
		140	1.9	43	ไม่หมุน
		130	1.8	67	ไม่หมุน
		120	4.8	73	เกือบออกตัวได้
		115	5.4	84	เริ่มหมุนพอดี
		110	9.7	100	หมุนได้
		100	15.3	121	หมุนได้แต่ กระชากเล็กน้อย

ตารางที่ 9.11 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 4 กิโลกรัม ที่มูมเริ่มต้นค่าต่างๆ

ขนาดภาระ (kg)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มุมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	แรงดันเริ่มต้น (V)	ลักษณะการหมุน ตอนเริ่มสตาร์ท
5	21	150	1.5	24	ไม่หมุน
		140	1.1	40	ไม่หมุน
		130	1.3	59	ไม่หมุน
		120	3.6	64	เกือบออกตัวได้
		115	5.4	86	เริ่มหมุนพอดี
		110	9.4	96	หมุนได้
		100	14.8	128	หมุนได้

ตารางที่ 9.12 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 5 กิโลกรัม ที่มุมเริ่มต้นค่าต่างๆ

ขนาดภาระ (kg)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มุมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	แรงดันเริ่มต้น (V)	ลักษณะการหมุน ตอนเริ่มสตาร์ท
6	23	150	0.8	38	ไม่หมุน
		140	2.1	46	ไม่หมุน
		130	1.9	56	ไม่หมุน
		120	3.4	63	เกือบออกตัวได้
		115	5.5	81	เริ่มหมุนพอดี
		110	9.3	97	เริ่มหมุนพอดี
		105	12.1	105	หมุนได้
100	15.3	120	หมุนได้แต่ กระชากเล็กน้อย		

ตารางที่ 9.13 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 6 กิโลกรัม ที่มุมเริ่มต้นค่าต่างๆ

### การทดลองที่ 3.2

1. ทำการทดลองกับมอเตอร์ขนาด 0.75 kw โดยการใส่ภาระเป็นค้อนน้ำหนักจาก 1-6 กิโลกรัม

2. บันทึกค่ากระแสเริ่มต้น และค่ากระแสสูงสุดโดยใช้แอมป์มิเตอร์ ที่ภาระและมุมเริ่มต้นค่าต่างๆ

#### ผลการทดลองที่ 3.2

ขนาดภาระ (N.m)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มุมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	ลักษณะการหมุน ตอนเริ่มสตาร์ท
0.784	6	120	1.64	ไม่หมุน
		110	2.12	เริ่มหมุนได้พอดี
		100	3.53	หมุนได้
		90	4.54	กระชากเล็กน้อย

ตารางที่ 9.14 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 1 กิโลกรัม ที่มุมเริ่มต้นค่าต่างๆ

ขนาดภาระ (N.m)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มุมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	ลักษณะการหมุน ตอนเริ่มสตาร์ท
1.568	7	120	1.57	ไม่หมุน
		110	2.05	เกือบออกตัวได้
		100	3.83	เริ่มหมุนได้
		90	4.54	หมุนได้
		80	5.30	กระชากเล็กน้อย

ตารางที่ 9.15 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 2 กิโลกรัม ที่มุมเริ่มต้นค่าต่างๆ

ขนาดภาระ (N.m)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มูมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	ลักษณะการหมุน ตอนเริ่มสตาร์ท
2.352	7	120	1.27	ไม่หมุน
		110	2.73	ไม่หมุน
		100	3.57	เกือบออกตัวได้
		90	5.04	เริ่มหมุนพอดี
		80	5.35	หมุนได้

ตารางที่ 9.16 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 3 กิโลกรัม ที่มูมเริ่มต้นค่าต่างๆ

ขนาดภาระ (N.m)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มูมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	ลักษณะการหมุน ตอนเริ่มสตาร์ท
3.136	8	120	1.07	ไม่หมุน
		110	2.68	ไม่หมุน
		100	3.58	ไม่หมุน
		90	4.46	เริ่มหมุนได้
		80	5.03	หมุนได้
		70	5.38	หมุนและ กระชาก

ตารางที่ 9.17 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 4 กิโลกรัม ที่มูมเริ่มต้นค่าต่างๆ

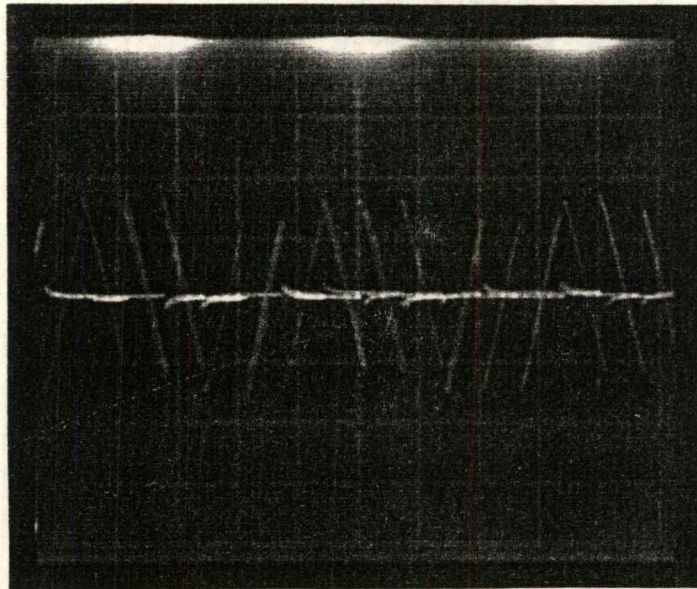
ขนาดภาระ (N.m)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มูมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	ลักษณะการหมุน ตอนเริ่มสตาร์ท
3.92	8	120	0.85	ไม่หมุน
		110	2.52	ไม่หมุน
		100	3.52	ไม่หมุน
		90	4.51	เริ่มออกตัวได้
		80	5.55	หมุนได้
		70	5.99	หมุนแต่กระชาก

ตารางที่ 9.18 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 5 กิโลกรัม ที่มูมเริ่มต้นค่าต่างๆ

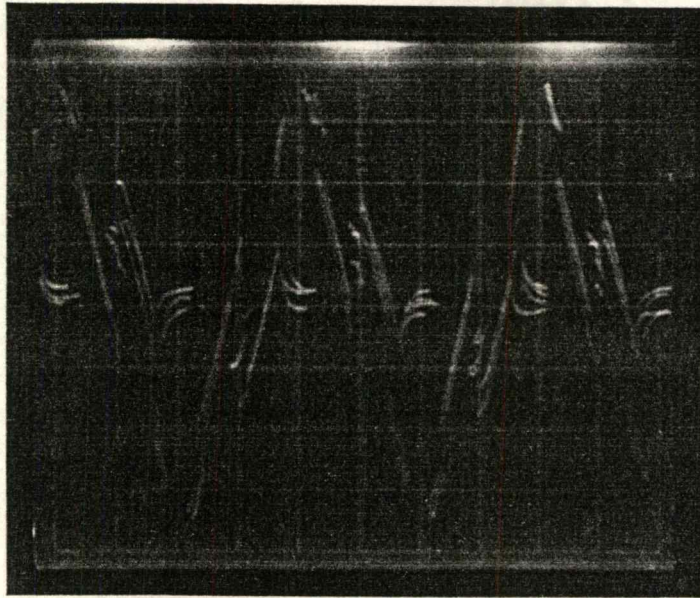
ขนาดภาระ (N.m)	เวลาในการสตาร์ท (s)	มูมเริ่มต้น (องศา)	กระแสเริ่มต้น (A)	ลักษณะการหมุน คอนเริ่มสตาร์ท
4.704	9	120	1.12	ไม่หมุน
		110	2.33	ไม่หมุน
		100	3.69	ไม่หมุน
		90	4.43	เริ่มออกตัวได้
		80	5.41	หมุนได้
		70	5.85	หมุนแต่กระชาก

ตารางที่ 9.19 แสดงค่ากระแสเริ่มต้นและกระแสสูงสุด เมื่อขับภาระ 6 กิโลกรัม ที่มูมเริ่มต้นค่าต่างๆ

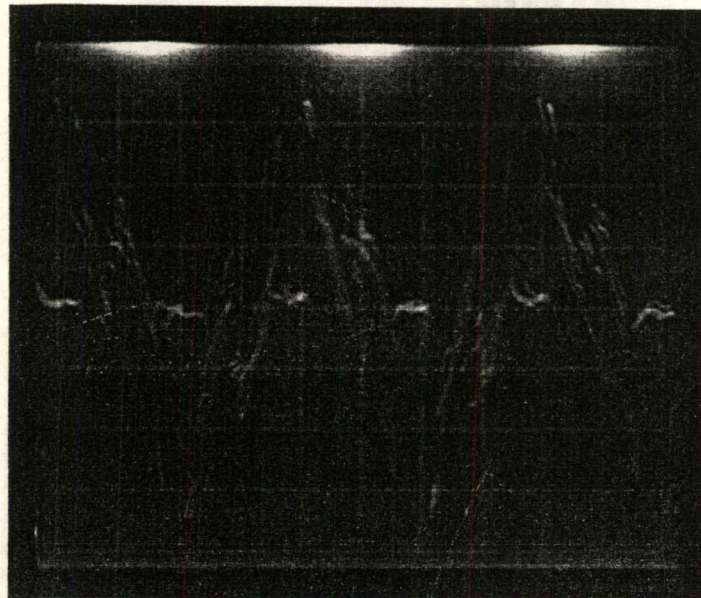
### 9.3 ภาพถ่ายแสดงแรงดันและกระแสที่วินาทีต่างๆ



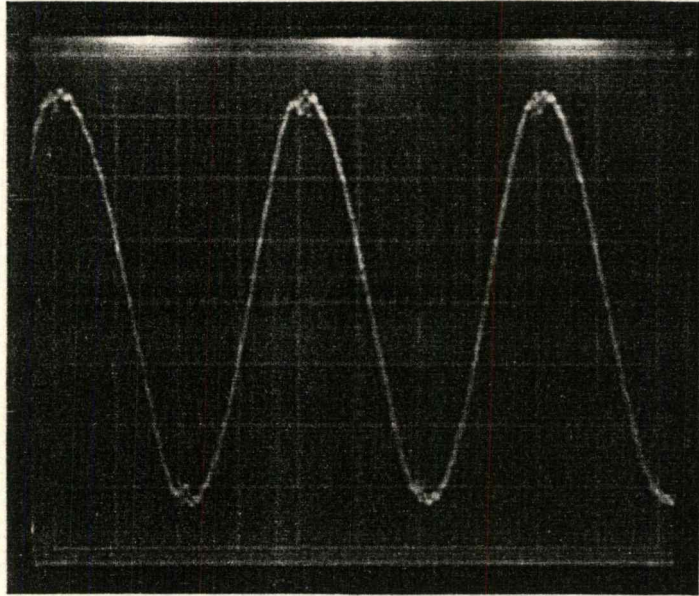
รูปที่ 9.1 แสดงลูกคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 5 เมื่อสตาร์ทขณะไร้ภาระ เวลาในการสตาร์ท 60 วินาที  
มูมเริ่มต้น 120 องศา มาตรฐาน 100 V/div 5 ms/div



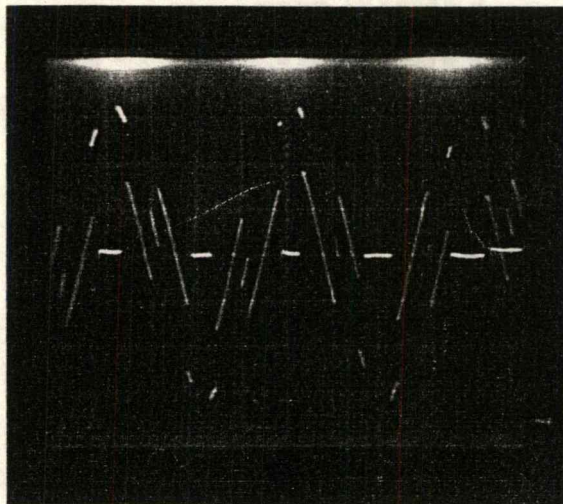
รูปที่ 9.2 แสดงถูกคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 10 เมื่อสตาร์ทขณะไร้ภาระ เวลาในการสตาร์ท 60 วินาที  
มุมเริ่มต้น 120 องศา มาตรฐาน 100 V/div 5 ms/div



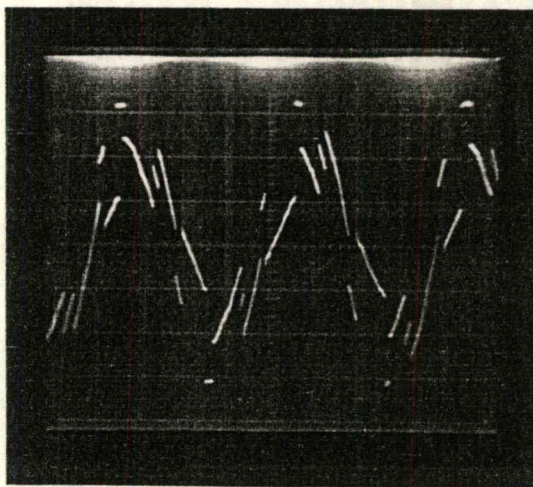
รูปที่ 9.3 แสดงถูกคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 15 เมื่อสตาร์ทขณะไร้ภาระ เวลาในการสตาร์ท 60 วินาที  
มุมเริ่มต้น 120 องศา มาตรฐาน 100 V/div 5 ms/div



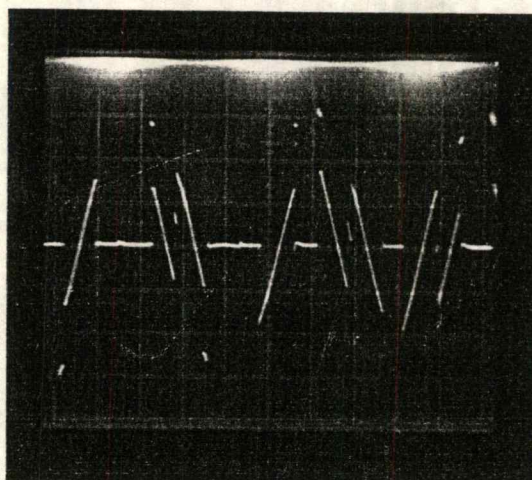
รูปที่ 9.4 แสดงลูกคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 60 เมื่อสตาร์ทขณะไร้ภาระ เวลาในการสตาร์ท 60 วินาที  
มุมเริ่มต้น 120 องศา มาตรฐาน 100 V/div 5 ms/div



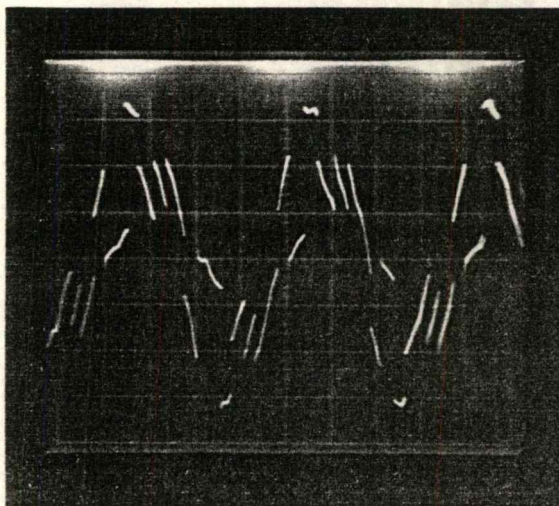
รูปที่ 9.5 แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะสตาร์ท เมื่อมีการใส่โหลด 4 กิโลกรัม เวลาในการสตาร์ท 19 วินาที  
มุมเริ่มต้น 115 องศา มาตรฐาน 100 V/div 5 ms/div



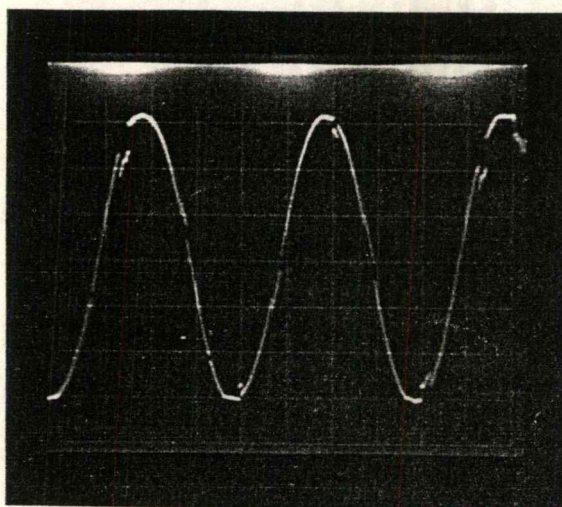
รูปที่ 9.6 แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 10 เมื่อมีการใส่โหลด 4 กิโลกรัม เวลาในการสตาร์ท 19 วินาที  
 มุมเริ่มต้น 115 องศา มาตรฐานส่วน 100 V/div 5 ms/div



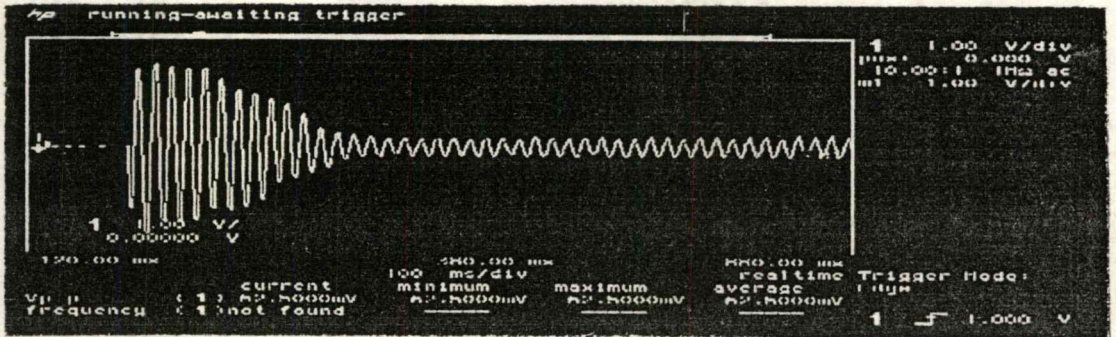
รูปที่ 9.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะสตาร์ท เมื่อมีการใส่โหลด 6 กิโลกรัม เวลาในการสตาร์ท 23 วินาที  
 มุมเริ่มต้น 110 องศา มาตรฐานส่วน 100 V/div 5 ms/div



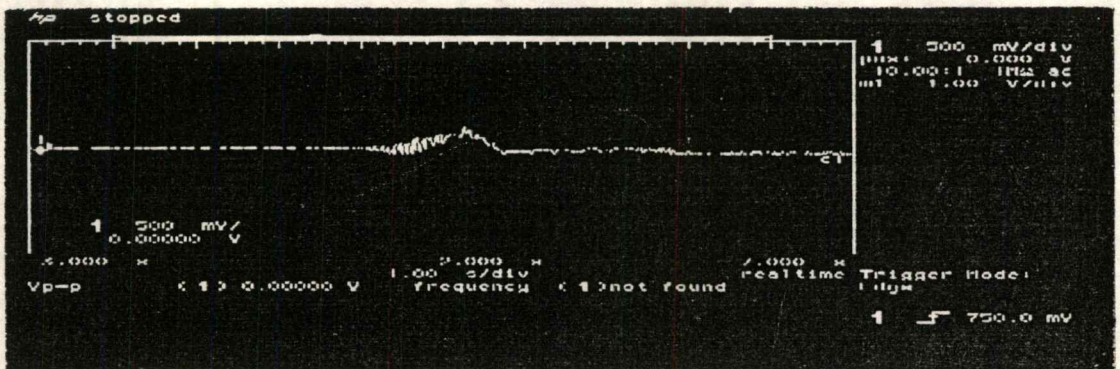
รูปที่ 9.8 แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 10 เมื่อมีการใส่โหลด 6 กิโลกรัม เวลาในการสตาร์ท 23 วินาที  
 มุมเริ่มต้น 110 องศา มาตรฐานส่วน 100 V/div 5 ms/div



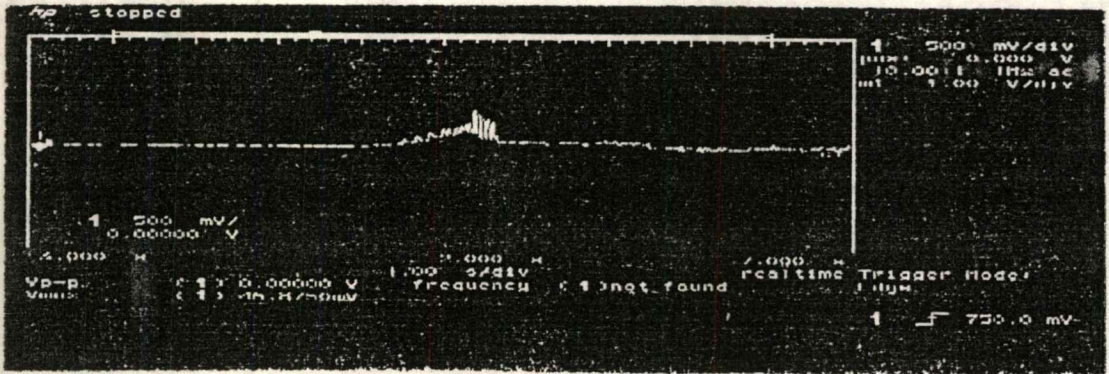
รูปที่ 9.9 แสดงรูปคลื่นแรงดันขณะวินาทีที่ 23 เมื่อมีการใส่โหลด 6 กิโลกรัม เวลาในการสตาร์ท 23 วินาที  
 มุมเริ่มต้น 110 องศา มาตรฐานส่วน 100 V/div 5 ms/div



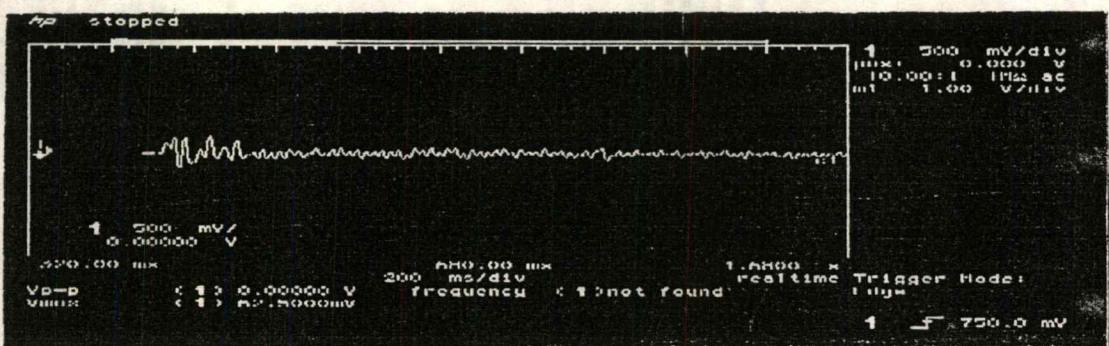
รูปที่ 9.10 แสดงลูกคลื่นกระแสขณะทำการสตาร์ทโดยจ่ายแรงดันโดยตรง



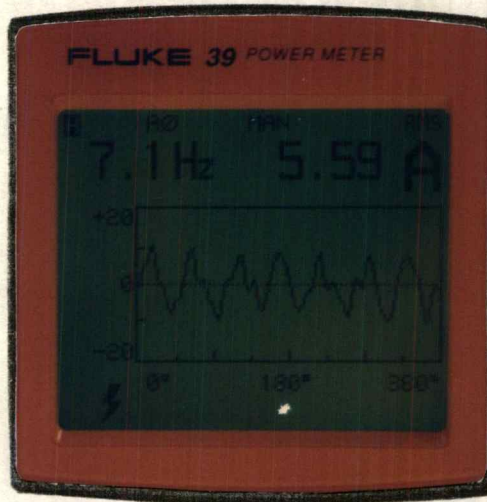
รูปที่ 9.11 แสดงลูกคลื่นกระแสเมื่อสตาร์ทด้วยเครื่องชอฟท์สตาร์ท มุมเริ่มต้น 170 วินาที เวลาสตาร์ท 10 วินาที



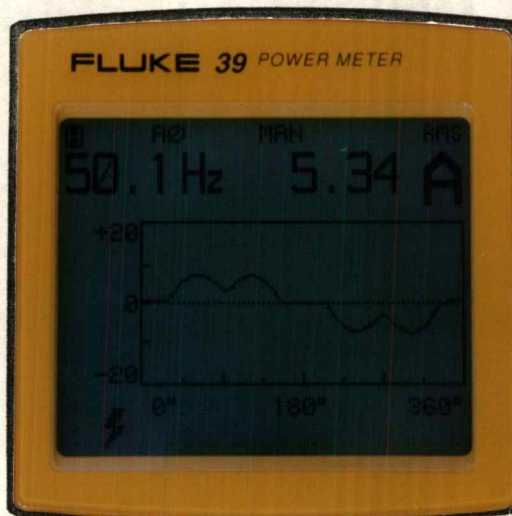
รูปที่ 9.12 แสดงลูกคลื่นกระแสเมื่อสตาร์ทด้วยเครื่องซอฟต์แวร์ มุมเริ่มต้น 140 วินาที เวลาสตาร์ท 10 วินาที



รูปที่ 9.13 แสดงลูกคลื่นกระแสเมื่อสตาร์ทด้วยเครื่องซอฟต์แวร์ มุมเริ่มต้น 90 วินาที เวลาสตาร์ท 10 วินาที



รูปที่ 9.14 แสดงลูกคลื่นกระแสขณะสตาร์ทเมื่อมีการใส่ภาระ



รูปที่ 9.15 แสดงลูกคลื่นกระแสขณะสิ้นสุดการสตาร์ท เมื่อมีการใส่ภาระ

## บทที่ 10

### สรุปผลและวิจารณ์

#### 10.1 สรุปผลและวิจารณ์การทดลอง

จากการที่ได้ศึกษาและทดลองนำเครื่องซอฟต์แวร์มอเตอร์ไปทำการสตาร์ทจริง ได้ผลสรุปดังนี้

##### 1. การสตาร์ทขณะไร้ภาระ

1.1 เมื่อกำหนดค่าเวลาและมุมเริ่มต้นในการสตาร์ทไว้ที่ค่าหนึ่ง จะทำให้เกิดกระแสขณะสตาร์ทที่ค่า ๆ หนึ่ง จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป ค่ากระแสจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่า ๆ หนึ่งจากนั้นก็ลดลงเรื่อย ๆ จนในที่สุดก็จะมีค่าคงที่ ๆ ค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นค่ากระแสปกติ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในช่วงเริ่มต้น แรงดันที่เข้าสู่ตัวมอเตอร์มีค่าต่ำ ทำให้กระแสและแรงบิดที่เกิดขึ้นในตอนแรกมีค่าต่ำไปด้วย ความเร็วของมอเตอร์จึงเพิ่มช้ากว่าการเพิ่มของแรงดันไฟฟ้า ทำให้กระแสที่ได้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุด ๆ หนึ่ง หลังจากจุดนี้เป็นจุดที่แรงบิดของมอเตอร์มีค่ามากแล้ว ทำให้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นมีค่ามากกว่าอัตราการเพิ่มของแรงดันไฟฟ้า กระแสจึงลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งเข้าสู่จุดทำงานของมัน ซึ่งเป็นจุดที่ความเร็วและกระแสของมอเตอร์มีค่าคงที่

1.2 เมื่อเรากำหนดเวลาในการสตาร์ทให้คงที่ และเปลี่ยนค่าของมุมเริ่มต้นไปเรื่อย ๆ จะเห็นได้ว่า ที่มุมเริ่มต้นมีค่ามาก กระแสเริ่มต้นจะมีค่าน้อย และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อมุมเริ่มต้นมีค่าลดลง

1.3 เมื่อเรากำหนดมุมในการสตาร์ทให้คงที่ และเปลี่ยนค่าเวลาในการสตาร์ท จะได้ผลสรุปคือ เมื่อเวลาในการสตาร์ทมีค่ามากขึ้น กระแสเริ่มต้นที่ได้จะมีค่าลดลง

##### 2. การสตาร์ทเมื่อมีการใส่ภาระ

2.1 เมื่อมีการคงที่เวลาในการสตาร์ทไว้ที่ค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งได้จากการคำนวณ แล้วเปลี่ยนค่ามุมเริ่มต้นในการสตาร์ทจากค่ามากลงสู่ค่าที่น้อยกว่า จะเห็นได้ว่า ที่ค่ามุมเริ่มต้นในช่วง 105 - 120 องศา จะเป็นช่วงที่เหมาะสมที่ใช้ในการสตาร์ทมอเตอร์ เนื่องจากค่ากระแสขณะสตาร์ทจะอยู่ในช่วง 60 - 70 เปอร์เซ็นต์ของกระแสพิค และมอเตอร์จะเริ่มออกตัวได้พอดี

2.2 ค่ามุมเริ่มต้นในช่วงดังกล่าวอาจแตกต่างกันเล็กน้อยสำหรับภาระค่าต่าง ๆ กัน โดยถ้าภาระมีค่ามากขึ้น มุมเริ่มต้นที่เหมาะสมในการสตาร์ทจะลดลง

2.3 ถ้าใช้ค่ามุมเริ่มต้นในการสตาร์ทที่มากเกินไป กระแสขณะสตาร์ทจะมีค่าต่ำ แต่มอเตอร์จะไม่เริ่มหมุนในทันที ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการสตาร์ท

2.4 ถ้าใช้ค่ามุมเริ่มต้นในการสแตร์ทน้อยเกินไป มอเตอร์จะเริ่มหมุนได้ในทันที แต่จะเกิดการกระชากคอนออกตัว และค่ากระแสขณะสแตร์ทจะมีค่าสูง ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการสแตร์ทเช่นกัน

### 10.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำโครงการงาน

1. สัญญาณที่ใช้ในการทริกเอสซีอาร์ มีการเลื่อนเฟสเล็กน้อย ทำให้การควบคุมแรงดันป้อนเข้ามอเตอร์เกิดการผิดพลาด คือแรงดันจะเข้าสู่มอเตอร์เต็มพิคก่อนทั้ง ๆ ที่เวลาในการสแตร์ทยังลดลงไม่ถึงศูนย์
2. การใช้เอสซีอาร์ เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้า จะมีการใช้งานที่ค่อนข้างจำกัดเกี่ยวกับระดับกระแสที่ใช้ในการทริก จึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ

### 10.3 แนวทางการพัฒนา

1. ถ้ามีการนำเอาชุดซอฟต์แวร์สแตร์ทนี้ไปใช้ขับ เอส ซี อาร์ ที่มีขนาดพิคกระแสมากขึ้น จะต้องนำสัญญาณจากออปโตไดโอดไฮเลเตอร์ ไปผ่านวงจรขยายก่อนนำไปใช้ขับ เอส ซี อาร์
2. เนื่องจากเครื่องซอฟต์แวร์สแตร์ทนี้ไม่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ อัตราการลดลงของมุมทริกจะลดลงเรื่อยๆ อย่างเป็นเชิงเส้น ทำให้กระแสที่ได้ในตอนแรกมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งแล้วมีค่าลดลง ดังนั้นในการพัฒนาขั้นถัดไปควรมีตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับความเร็ว เพราะเมื่อเพิ่มศักดาไฟฟ้าที่เข้าสู่ตัวมอเตอร์ จะทำให้กระแสเพิ่มขึ้น แต่ความเร็วของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสลดลง ดังนั้นจึงควรควบคุมให้การเพิ่มขึ้นของศักดาไฟฟ้าที่เข้าสู่ตัวมอเตอร์ กับความเร็วของมอเตอร์ที่เพิ่มขึ้นให้มีความสัมพันธ์กัน
3. เนื่องจากต้องมีการแยกกราวด์ระหว่างวงจรควบคุมและวงจรถูกกำลัง เพื่อป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวงจรควบคุม โดยใช้ออปโตไดโอดไฮเลเตอร์ ซึ่งจะต้องใช้หม้อแปลงจำนวน 6 ตัว เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ดังกล่าว จึงเกิดความสิ้นเปลือง ดังนั้นถ้าหากเปลี่ยนมาใช้สวิทชิง เพาเวอร์ซัพพลาย จะทำให้เครื่องซอฟต์แวร์สแตร์ทเดือร์มีราคาถูกลง และมีขนาดกะทัดรัดขึ้น
4. ตัวกำเนิดสัญญาณความถี่ (Crystal) ที่ใช้มีขนาด 11.0592 MHz จึงทำให้การเขียนโปรแกรมสร้างฐานเวลามีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ซึ่งถ้าเปลี่ยนตัวกำเนิดสัญญาณความถี่เป็นขนาด 12 MHz จะทำให้ฐานเวลามีความเที่ยงตรง
5. การใช้ TCA 785 เป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม ซึ่งมีราคาค่อนข้างแพงและต้องใช้ถึง 3 ตัว ดังนั้นถ้าหากลดการใช้ลงมาเหลือเพียง 1 ตัว และเพิ่มวงจรถิฟท์เฟสเข้ามาแทน จะทำให้เครื่องซอฟต์แวร์สแตร์ทเดือร์มีราคาถูกลง

ภาคผนวก ก

โปรแกรมควบคุม

;\*\*SOFT START MOTOR PROGRAM\*\*;

CPU "8051.TBL"

HOF "INT8"

ORG 0000H

PORTA: EQU 0000H

PORTB: EQU 0001H

PORTC: EQU 0002H

CTRL: EQU 0003H

USER\_STACK: EQU 60H

TORQUE: EQU 0AH

TIME: EQU 0AH

ANGLE: EQU 0BH

ENTER: EQU 0CH

STARTKEY: EQU 0FH

DECBUF: EQU 97H

RESULT: EQU 94H

ND: EQU 92H

ST: EQU 90H

VALUE: EQU 8FH

TORQUEADD: EQU 8BH

ANGLEHEX: EQU 89H

TIMEHEX: EQU 87H

ANGLEADD: EQU 85H

TIMEADD: EQU 83H

DISPBUF: EQU 81H

KEYCODE: EQU 80H

B: EQU 0F0H

ACC: EQU 0E0H

PSW: EQU 0D0H

RS1: EQU 0D4H

RS0: EQU 0D3H  
IE: EQU 0A8H  
P1: EQU 90H  
TH0: EQU 8CH  
TL0: EQU 8AH  
TCON: EQU 88H  
TR0: EQU 8CH  
TMOD: EQU 89H  
SP: EQU 81H

LIGHT: EQU 2FH  
PONL: EQU 7FH  
LOAD: EQU 7EH  
ENDL: EQU 7DH  
ERROR: EQU 7CH  
OL: EQU 7BH  
RL: EQU 7AH  
AL: EQU 79H  
TL: EQU 78H  
STATUS: EQU 2EH  
SAVECARRY: EQU 77H  
LAST: EQU 75H  
SHOWENABLE: EQU 74H  
RS: EQU 73H  
AS: EQU 72H  
TS: EQU 71H  
ZERO: EQU 70H

DEVSTATUS: EQU 2DH  
CARRYSUBT: EQU 6AH  
CANSUBT: EQU 69H  
CARRYDEV3: EQU 68H  
DEVIDEBUF: EQU 2CH  
CARRYDEV2: EQU 60H  
DEVIDEND2: EQU 2BH  
CARRYDEV1: EQU 58H

DEVIDEND1: EQU 2AH  
CARRYDEV0: EQU 50H  
DEVIDEND0: EQU 29H  
CARRYQUOT2: EQU 40H  
QUOTIENT2: EQU 28H  
CARRYQUOT1: EQU 38H  
QUOTIENT1: EQU 27H  
CARRYQUOT0: EQU 30H  
QUOTIENT0: EQU 26H

LJMP 2000H

ORG 2000H

RES: MOV R2,#80H

RES1: MOV R3,#0

DJNZ R3,\$

DJNZ R2,RES1

MOV DPTR,#CTRL

MOV A,#88H

MOVX @DPTR,A

SETINI0: MOV P1,#OFFH

MOV SP,#USER\_STACK

MOV R0,#STATUS

MOV @R0,#00H

MOV R0,#LIGHT

MOV @R0,#00H

MOV R0,#TIMEADD

MOV @R0,#00H

MOV R0,#TIMEADD+1

MOV @R0,#00H

MOV R0,#ANGLEADD

MOV @R0,#00H

MOV R0,#ANGLEADD+1

```
MOV @R0,#00H
MOV R0,#DISPBUF
MOV @R0,#00H
MOV R0,#DISPBUF+1
MOV @R0,#00H
```

```
SETB PONL
LCALL ONOFF
```

```
START0: LCALL SCANKEY
```

```
MOV R0,#KEYCODE
MOV A,@R0
```

```
CHECKAUTO: CJNE A,#01H,CHECKMANUAL
```

```
SETB SHOWENABLE
MOV R0,#DISPBUF
MOV @R0,A
```

```
LOOP2: LCALL SCANKEY
```

```
MOV R0,#KEYCODE
MOV A,@R0
```

```
CJNE A,#0DH,CHECKENTER
CLR SHOWENABLE
SJMP START0
```

```
CHECKENTER: CJNE A,#0CH,LOOP2
```

```
CLR SHOWENABLE
LJMP 2500H
```

```
CHECKMANUAL: CJNE A,#02H,START0
```

```
SETB SHOWENABLE
MOV R0,#DISPBUF
MOV @R0,A
```

```
LOOP3: LCALL SCANKEY
```

```
MOV R0,#KEYCODE
```

MOV A,@R0

CJNE A,#0DH,CHECKENTER1

CLR SHOWENABLE

SJMP START0

CHECKENTER1: CJNE A,#0CH,LOOP3

CLR SHOWENABLE

LJMP 0033H

\*\*\*\*\*

ORG 2500H

SETINI1: MOV P1,#0FFH

MOV SP,#USER\_STACK

MOV R0,#STATUS

MOV @R0,#00H

MOV R0,#TIMEADD

MOV @R0,#00H

MOV R0,#TIMEADD+1

MOV @R0,#00H

MOV R0,#ANGLEADD

MOV @R0,#00H

MOV R0,#ANGLEADD+1

MOV @R0,#00H

MOV R0,#DISPBUF

MOV @R0,#00H

MOV R0,#DISPBUF+1

MOV @R0,#00H

MOV R0,#KEYCODE

MOV @R0,#00H

MOV R0,#TORQUEADD

MOV @R0,#00H

MOV R0,#TORQUEADD+1

MOV @R0,#00H

START1: LCALL SCANKEY

MOV R0,#KEYCODE

MOV A,@R0

CHECKTORQUE: CJNE A,#TORQUE,START1

LCALL INPUTTORQUE

CLR SHOWENABLE

CLR LOAD

LCALL ONOFF

MOV R0,#TORQUEADD

MOV A,@R0

CHECK1: CJNE A,#01H,CHECK2

MOV R0,#TIMEADD

MOV @R0,#16H

MOV R1,#TIMEADD+1

MOV @R1,#00H

MOV R0,#ANGLEADD

MOV @R0,#20H

MOV R1,#ANGLEADD+1

MOV @R1,#01H

SETB TS

SETB AS

LJMP READY

CHECK2: CJNE A,#02H,CHECK3

MOV R0,#TIMEADD

MOV @R0,#17H

MOV R1,#TIMEADD+1

MOV @R1,#00H

MOV R0,#ANGLEADD  
MOV @R0,#20H  
MOV R1,#ANGLEADD+1  
MOV @R1,#01H

SETB TS  
SETB AS  
LJMP READY

CHECK3: CJNE A,#03H,CHECK4

MOV R0,#TIMEADD  
MOV @R0,#18H  
MOV R1,#TIMEADD+1  
MOV @R1,#00H

MOV R0,#ANGLEADD  
MOV @R0,#15H  
MOV R1,#ANGLEADD+1  
MOV @R1,#01H

SETB TS  
SETB AS  
LJMP READY

CHECK4: CJNE A,#04H,CHECK5

MOV R0,#TIMEADD  
MOV @R0,#19H  
MOV R1,#TIMEADD+1  
MOV @R1,#00H

MOV R0,#ANGLEADD  
MOV @R0,#15H  
MOV R1,#ANGLEADD+1  
MOV @R1,#01H

```
SETB TS
SETB AS
LJMP READY
CHECK5: CJNE A,#05H,CHECK6
```

```
MOV R0,#TIMEADD
MOV @R0,#21H
MOV R1,#TIMEADD+1
MOV @R1,#00H
```

```
MOV R0,#ANGLEADD
MOV @R0,#10H
MOV R1,#ANGLEADD+1
MOV @R1,#01H
```

```
SETB TS
SETB AS
LJMP READY
CHECK6: CJNE A,#06H,RETURN
```

```
MOV R0,#TIMEADD
MOV @R0,#23H
MOV R1,#TIMEADD+1
MOV @R1,#00H
```

```
MOV R0,#ANGLEADD
MOV @R0,#10H
MOV R1,#ANGLEADD+1
MOV @R1,#01H
```

```
SETB TS
SETB AS
LJMP READY
```

```
RETURN: LJMP SETINI1
```

INPUTTORQUE: SETB SHOWENABLE

SETB LOAD

LCALL ONOFF

MOV R0,#TORQUEADD

MOV R1,#DISPBUF

LCALL CHANGE

LCALL SCANKEY

MOV R0,#KEYCODE

MOV A,@R0

CJNE A,#0DH,CHECKERR

MOV R0,#TORQUEADD

MOV @R0,#00H

INC R0

MOV @R0,#00H

SJMP INPUTTORQUE

CHECKERR: CJNE A,#0EH,CHECKSTA

SJMP INPUTTORQUE

CHECKSTA: CJNE A,#0FH,CHECKTIM

SJMP INPUTTORQUE

CHECKTIM: CJNE A,#TIME,CHECKANGL

SJMP INPUTTORQUE

CHECKANGL: CJNE A,#ANGLE,CHECKENT

SJMP INPUTTORQUE

CHECKENT: CJNE A,#ENTER,SAVETORQUE

SJMP FINISHTORQUE

SAVETORQUE: MOV R0,#TORQUEADD

MOV R1,#TORQUEADD+1

LCALL SHIFDIGIT

SJMP INPUTTORQUE

FINISHTORQUE: RET

\*\*\*\*\*

ORG 0033H

SETINI: MOV P1,#0FFH  
MOV SP,#USER\_STACK  
MOV R0,#STATUS  
MOV @R0,#00H  
MOV R0,#TIMEADD  
MOV @R0,#00H  
MOV R0,#TIMEADD+1  
MOV @R0,#00H  
MOV R0,#ANGLEADD  
MOV @R0,#00H  
MOV R0,#ANGLEADD+1  
MOV @R0,#00H  
MOV R0,#DISPBUF  
MOV @R0,#00H  
MOV R0,#DISPBUF+1  
MOV @R0,#00H  
MOV R0,#KEYCODE  
MOV @R0,#00H

START: LCALL SCANKEY

MOV R0,#KEYCODE  
MOV A,@R0

CHECKTIME: CJNE A,#TIME,CHECKANGLE

LCALL INPUTTIME  
CLR SHOWENABLE  
CLR TL  
LCALL ONOFF  
SETB TS

TIMEZERO: MOV R0,#TIMEADD+1  
MOV A,@R0  
CJNE A,#00H,READY

```

DEC R0
MOV A,@R0
CJNE A,#00H,READY
SJMP MISTAKE

CHECKANGLE: CJNE A,#ANGLE,START
            LCALL INPUTANGLE
            CLR SHOWENABLE
            CLR AL
            LCALL ONOFF
            SETB AS

ANGLEBOUND: MOV R0,#ANGLEADD
            MOV A,@R0
            CLR C
            SUBB A,#81H
            INC R0
            MOV A,@R0
            SUBB A,#01H
            JC ANGLEZERO
            SJMP MISTAKE

ANGLEZERO:  MOV R0,#ANGLEADD+1
            MOV A,@R0
            CJNE A,#00H,READY
            DEC R0
            MOV A,@R0
            CJNE A,#00H,READY
            SETB RL
            LCALL ONOFF

YYY:       LCALL SCANKEY
            MOV R0,#KEYCODE
            MOV A,@R0
            CJNE A,#0FH,YYY
            CLR RL
            LCALL ONOFF
            MOV P1,#00H
            LJMP GOAL

MISTAKE:   SETB ERROR

```

```

        LCALL ONOFF
ZZZ:    LCALL SCANKEY
        MOV  R0,#KEYCODE
        MOV  A,@R0
        CJNE A,#0EH,ZZZ
        CLR  ERROR
        LCALL ONOFF
        LJMPL SETINI

READY:  MOV  SAVECARRY,C
        MOV  C,TS
        ANL  C,AS
        MOV  RS,C
        MOV  C,SAVECARRY
        JNB  RS,TEMP
        SJMP CHECKSTART

TEMP:   LJMPL START

CHECKSTART: SETB RL
        LCALL ONOFF
        LCALL SCANKEY
        MOV  R0,#KEYCODE
        MOV  A,@R0

CHECKST: CJNE A,#STARTKEY,CHECKT
        CLR  RL
        SETB OL
        LCALL ONOFF
        SJMP TIMEDECTOHEX

CHECKT:  CJNE A,#TIME,CHECKANG
        CLR  RL
        LCALL ONOFF
        CLR  TS
        LJMPL CHECKTIME

CHECKANG: CJNE A,#ANGLE,CHECKSTART
        CLR  RL

```

LCALL ONOFF  
CLR AS  
LMP CHECKANGLE

TIMEDECTOHEX: MOV R0,#TIMEADD

MOV R1,#DECBUF  
LCALL CHANGE  
LCALL DECTOHEX  
MOV R0,#ST  
MOV R1,#TIMEHEX  
LCALL CHANGE

MOV R0,#ANGLEADD  
MOV R1,#DECBUF  
LCALL CHANGE  
LCALL DECTOHEX  
MOV R0,#ST  
MOV R1,#ANGLEHEX  
MOV A,@R0  
MOV @R1,A

MOV R0,#TIMEHEX  
MOV R1,#ST  
LCALL CHANGE  
MOV R0,#ND+1  
MOV A,#03H  
MOV @R0,A  
DEC R0  
MOV A,#0E8H  
MOV @R0,A  
LCALL MULTIPLY

MOV DPTR,#TABLE4  
MOV R0,#ANGLEHEX  
MOV A,@R0  
MOVC A,@A+DPTR

MOV R0,#VALUE  
MOV @R0,A  
  
MOV R0,#RESULT  
MOV R1,#DEVIDENDO  
LCALL CHANGE  
INC R0  
INC R1  
MOV A,@R0  
MOV @R1,A  
MOV R0,#VALUE  
MOV B,@R0  
LCALL DEVIDE

SETMOVINGTIME: CLR RS1

CLR RS0  
MOV R3,#03H  
MOV R2,#0E8H  
MOV R0,#TIMEADD  
MOV A,@R0  
ANL A,#0FH  
MOV R4,A  
MOV A,@R0  
SWAP A  
ANL A,#0FH  
MOV R5,A  
INC R0  
MOV A,@R0  
ANL A,#0FH  
MOV R6,A  
MOV A,@R0  
SWAP A  
ANL A,#0FH  
MOV R7,A

MOVINI: SETB RS1

CLR RS0

MOV R7,QUOTIENT2

MOV R6,QUOTIENT1

MOV R5,QUOTIENT0

MOV R0,#VALUE

MOV A,@R0

MOV R4,A

MOV P1,R4

MOV R2,#09H

SETTIMER: MOV A,IE

ORL A,#10000010B

MOV IE,A

MOV A,TMOD

ANL A,#0F0H

ORL A,#01H

MOV TMOD,A

MOV A,TCON

ANL A,#11001010B

MOV TCON,A

STARTTIMER: MOV TH0,#0FCH

MOV TL0,#67H

SETB TR0

MAIN: CLR RS1 ;(SELECT BANK #0)

CLR RS0

MOV R0,#DISPBUF

MOV A,R5

SWAP A

ADD A,R4

MOV @R0,A

INC R0

MOV A,R7

SWAP A  
ADD A,R6  
MOV @R0,A

LOOP: SETB RS1  
CLR RS0  
CJNE R4,#00H,LOOP1  
CLR TR0  
SJMP GOAL

LOOP1: LCALL STATDISP

SJMP MAIN

GOAL: CLR OL  
SETB ENDL  
LCALL ONOFF  
MOV R0,#DISPBUF  
MOV @R0,#00H  
INC R0  
MOV @R0,#00H  
LCALL STATDISP  
SJMP GOAL

INPUTTIME: SETB SHOWENABLE

SETB TL  
LCALL ONOFF

MOV R0,#TIMEADD  
MOV R1,#DISPBUF  
LCALL CHANGE

LCALL SCANKEY

MOV R0,#KEYCODE  
MOV A,@R0

```
CJNE A,#0DH,CHECKE
MOV R0,#TIMEADD
MOV @R0,#00H
INC R0
MOV @R0,#00H
SJMP INPUTTIME
```

```
CHECKE: CJNE A,#0EH,CHECKF
        SJMP INPUTTIME
```

```
CHECKF: CJNE A,#0FH,CHECKA
        SJMP INPUTTIME
```

```
CHECKA: CJNE A,#TIME,CHECKB
        SJMP INPUTTIME
```

```
CHECKB: CJNE A,#ANGLE,CHECKC
        SJMP INPUTTIME
```

```
CHECKC: CJNE A,#ENTER,SAVETIME
        SJMP FINISHTIME
```

```
SAVETIME: MOV R0,#TIMEADD
          MOV R1,#TIMEADD+1
          LCALL SHIFTDIGIT
          SJMP INPUTTIME
```

```
FINISHTIME: RET
```

```
INPUTANGLE: SETB SHOWENABLE
            SETB AL
            LCALL ONOFF
```

```
MOV R0,#ANGLEADD
MOV R1,#DISPBUF
LCALL CHANGE
```

```
LCALL SCANKEY
```

```
MOV R0,#KEYCODE
MOV A,@R0
```

```

CJNE A,#0DH,CHECKEE
MOV R0,#ANGLEADD
MOV @R0,#00H
INC R0
MOV @R0,#00H
SJMP INPUTANGLE
CHECKEE: CJNE A,#0EH,CHECKFF
        SJMP INPUTANGLE
CHECKFF: CJNE A,#0FH,CHECKBB
        SJMP INPUTANGLE
CHECKBB: CJNE A,#ANGLE,CHECKAA
        SJMP INPUTANGLE
CHECKAA: CJNE A,#TIME,CHECKCC
        SJMP INPUTANGLE
CHECKCC: CJNE A,#ENTER,SAVEANGLE
        SJMP FINISHTIME
SAVEANGLE: MOV R0,#ANGLEADD
          MOV R1,#ANGLEADD+1
          LCALL SHIFTDIGIT
          SJMP INPUTANGLE
FINISHANGLE: RET

SCANKEY: LCALL SHOWWHAT
          MOV R7,#04H
          MOV R6,#00H
          MOV DPTR,#PORTC

SCAN0:   LCALL SCAN1
          JNZ CHECK
          INC R6
          DJNZ R7,SCAN0
          SJMP SCANKEY

          LCALL SHOWWHAT

CHECK:   MOV R5,A ;SAVE KEY

```

LCALL SCAN1  
XRL A,R5  
JZ DECODE,SAVE  
INC R6  
DJNZ R7,SCAN0  
SJMP SCANKEY

DECODE: MOV R4,#0FFH

MOV A,R5

DECODE1: INC R4

RRC A

JNC DECODE1

MOV A,R4

RL A

RL A

ADD A,R6

MOV DPTR,#TABLE1

MOVC A,@A+DPTR

MOV R0,#KEYCODE

MOV @R0,A

UNPRESS: LCALL SHOWWHAT

LCALL SCAN1

JNZ UNPRESS

RET

SCAN1: MOV A,R6

ORL A,#0F0H

MOVX @DPTR,A

MOVX A,@DPTR

SWAP A

ORL A,#0F0H

CPL A

RET

SHIFIDIGIT: MOV A,@R1

SWAP A

```
MOV @R1,A
MOV A,@R0
SWAP A
MOV @R0,A
XCHD A,@R1
MOV R1,#KEYCODE
XCHD A,@R1
MOV @R0,A
ANL A,#0FH
MOV @R1,A
RET
```

```
STATDISP: CLR RS1
```

```
SETB RS0
```

```
MOV R0,#DISPBUF+1
```

```
MOV R7,#02H
```

```
MOV R6,#04H
```

```
CLR ZERO
```

```
CLR LAST
```

```
DISPLAY: MOV A,@R0
```

```
SWAP A
```

```
ANL A,#0FH
```

```
LCALL SHOW
```

```
INC R6
```

```
MOV A,@R0
```

```
ANL A,#0FH
```

```
LCALL SHOW
```

```
INC R6
```

```
DEC R0
```

```
DJNZ R7,DISPLAY
```

```
SHOW: CJNE R6,#7H,CHECKZERO
```

```
SETB LAST
```

```
SJMP SHOW1
```

```
CHECKZERO: JNZ SHOW1
```

```
JNB ZERO,FINISH
```

```
SHOW1: SETB ZERO
```

```

MOV DPTR,#TABLE2
MOVC A,@A+DPTR
JNB LAST,ABC
ORL A,#00000001B
ABC:   MOV DPTR,#PORTB
      MOVX @DPTR,A
      MOV DPTR,#PORTC
      MOV A,R6
      MOVX @DPTR,A
      LCALL DELAY

      MOV DPTR,#PORTC
      MOV A,#08H
      MOVX @DPTR,A
FINISH:  RET

SHOWWHAT:  SETB 0D3H
          JNB SHOWENABLE,TOA
          LCALL STATDISP
          SJMP TOB
TOA:     LCALL DELAY
TOB:     CLR 0D3H
          RET

DELAY:   MOV R3,#7FH
DELAY1:  DJNZ R3,DELAY1
          RET

ONOFF:   PUSH 0E0H
          MOV DPTR,#PORTA
          MOV A,LIGHT
          MOVX @DPTR,A
          POP 0E0H
          RET

CHANGE:  MOV A,@R0

```

MOV @R1,A

INC R0

INC R1

MOV A,@R0

MOV @R1,A

RET

DECTOHEX: MOV R0,#ST

MOV @R0,#00H

INC R0

MOV @R0,#00H

MOV R0,#ND

MOV @R0,#0AH

INC R0

MOV @R0,#00H

MOV R0,#DECBUF+1

MOV A,@R0

SWAP A

LCALL FOURTIME

MOV R0,#DECBUF+1

MOV A,@R0

LCALL FOURTIME

MOV R0,#DECBUF

MOV A,@R0

SWAP A

LCALL FOURTIME

MOV R0,#DECBUF

MOV A,@R0

ANL A,#0FH

MOV R1,#ST

ADD A,@R1

MOV @R1,A

INC R1

CLR A

ADDC A,@R1

MOV @R1,A

RET

FOURTIME: ANL A,#0FH

MOV R1,#ST

ADD A,@R1

MOV @R1,A

INC R1

CLR A

ADDC A,@R1

MOV @R1,A

LCALL MULTIPLY

MOV R0,#RESULT

MOV R1,#ST

MOV A,@R0

MOV @R1,A

INC R0

INC R1

MOV A,@R0

MOV @R1,A

RET

MULTIPLY: MOV A,#00H

MOV R0,#RESULT

MOV @R0,A

INC R0

MOV @R0,A

INC R0

MOV @R0,A

MOV R0,#ST

MOV R1,#ND

MOV A,@R0

MOV B,@R1

MUL AB

MOV R0,#RESULT

MOV @R0,A

INC R0  
MOV @R0,B

MOV R0,#ST+1  
MOV A,@R0  
MOV B,@R1  
MUL AB  
MOV R0,#RESULT+1  
ADD A,@R0  
MOV @R0,A  
INC R0  
MOV A,B  
ADDC A,@R0  
MOV @R0,A

INC R1

MOV R0,#ST  
MOV A,@R0  
MOV B,@R1  
MUL AB  
MOV R0,#RESULT+1  
ADD A,@R0  
MOV @R0,A  
INC R0  
MOV A,B  
ADDC A,@R0  
MOV @R0,A

MOV R0,#ST+1  
MOV A,@R0  
MOV B,@R1  
MUL AB  
MOV R0,#RESULT+2  
ADD A,@R0  
MOV @R0,A

RET

DEVIDE: MOV R7,#18H

MOV DEVSTATUS,#00H

MOV DEVIDEBUF,#00H

MOV QUOTIENT2,#00H

MOV QUOTIENT1,#00H

MOV QUOTIENT0,#00H

MOV A,B

CJNE A,#00H,ROTATE1

SJMP ERROR1

ROTATE1: MOV A,DEVIDEBUF

RLC A

MOV CARRYDEV3,C

MOV DEVIDEBUF,A

MOV A,DEVIDEND2

RLC A

MOV CARRYDEV2,C

MOV DEVIDEND2,A

MOV A,DEVIDEND1

RLC A

MOV CARRYDEV1,C

MOV DEVIDEND1,A

MOV A,DEVIDEND0

CLR C

RLC A

MOV CARRYDEV0,C

MOV DEVIDEND0,A

SUBTRACT: MOV A,DEVIDEBUF

CLR C

SUBB A,B

JNC SETUP

CHECKCARRY: JB CARRYDEV3,SETUP

SJMP ROTATE2

SETUP: MOV DEVIDEBUF,A

SETB CANSUBT

ROTATE2: MOV A,QUOTIENT2

RLC A

MOV QUOTIENT2,A

MOV A,QUOTIENT1

RLC A

MOV CARRYQUOT2,C

MOV QUOTIENT1,A

MOV A,QUOTIENT0

RLC A

MOV CARRYQUOT1,C

MOV QUOTIENT0,A

MOV C,CANSUBT

MOV CARRYQUOT0,C

CLR CANSUBT

DJNZ R7,ROTATE1

ERROR1: RET

TABLE1: DFB 07H,08H,09H,0AH

DFB 04H,05H,06H,0BH

DFB 01H,02H,03H,0CH

DFB 00H,0FH,0EH,0DH

TABLE2: DFB 0FCH,060H,0DAH,0F2H ;TABLE OF 7 SEGMENT

DFB 066H,0B6H,0BEH,0E0H

DFB 0FEH,0F6H,0EEH,03EH

DFB 09CH,07AH,09EH,08EH

TABLE3: DFB 3FH,06H,5BH,4FH ;TABLE OF 7 SEGMENT

DFB 66H,6DH,7DH,07H

DFB 7FH,6FH,77H,7CH

DFB 39H,5EH,79H,71H

TABLE4: DFB 00H,02H,03H,04H,06H,07H,09H,0AH,0BH,0DH

DFB 0EH,10H,11H,12H,14H,15H,17H,18H,1AH,1BH

DFB 1CH,1EH,1FH,21H,22H,23H,25H,26H,28H,29H

DFB 2BH,2CH,2DH,2FH,30H,32H,33H,34H,36H,37H

DFB 39H,3AH,3CH,3DH,3FH,40H,41H,43H,44H,46H

DFB 47H,49H,4AH,4BH,4DH,4EH,4FH,51H,52H,54H

DFB 55H,56H,58H,5AH,5BH,5CH,5EH,5FH,60H,62H

DFB 63H,65H,66H,67H,69H,6AH,6CH,6DH,6FH,70H

DFB 71H,73H,74H,76H,77H,78H,7AH,7BH,7DH,7EH  
DFB 80H,81H,82H,84H,85H,87H,88H,89H,8BH,8CH  
DFB 8EH,8FH,91H,92H,93H,95H,96H,98H,99H,9AH  
DFB 9CH,9DH,9FH,0A0H,0A2H,0A3H,0A4H,0A6H,0A7H,0A9H  
DFB 0AAH,0ABH,0ACH,0ADH,0B0H,0B1H,0B3H,0B4H,0B5H,0B7H  
DFB 0B8H,0BAH,0BBH,0BCH,0BEH,0BFH,0C1H,0C2H,0C4H,0C5H  
DFB 0C6H,0C8H,0C9H,0CBH,0CCH,0CDH,0CFH,0D0H,0D2H,0D3H  
DFB 0D5H,0D6H,0D7H,0D9H,0DAH,0DCH,0DDH,0DEH,0E0H,0E1H  
DFB 0E3H,0E4H,0E6H,0E7H,0E8H,0EAH,0EBH,0EDH,0EEH,0EFH  
DFB 0F1H,0F3H,0F4H,0F5H,0F7H,0F8H,0F9H,0FBH,0FCH,0FEH,0FFH

ORG 000BH

LJMP 1000H

ORG 1000H

TSTART: LCALL RELOAD

PUSH PSW

PUSH ACC

SETB RS1

CLR RS0

LOOPIN: CJNE R7,#00H,DECREMENT1

CJNE R6,#00H,DECREMENT1

CJNE R5,#01H,DECREMENT1

DEC R4

MOV P1,R4

LCALL AAAA

MOV R7,QUOTIENT2

MOV R6,QUOTIENT1

MOV R5,QUOTIENT0

SJMP DECREMENT1

DECREMENT1: CLR C

MOV A,R5

SUBB A,#01H

MOV R5,A

MOV A,R6

SUBB A,#00H

MOV R6,A

```
MOV A,R7
SUBB A,#00H
MOV R7,A
CLR RS0
CLR RS1
DEC1:  CJNE R3,#00H,DEC2
        CJNE R2,#01H,DEC2
        MOV R3,#03H
        MOV R2,#0E8H
DECBCD: CJNE R4,#00H,ONE
        MOV R4,#09H
        CJNE R5,#00H,TEN
        MOV R5,#09H
        CJNE R6,#00H,HUNDRED
        MOV R6,#09H
        CJNE R7,#00H,THOUSAND
        LJMP GOAL
ONE:    DEC R4
        SJMP DEC2
TEN:    DEC R5
        SJMP DEC2
HUNDRED: DEC R6
        SJMP DEC2
THOUSAND: DEC R7
        SJMP DEC2
DEC2:   CLR C
        MOV A,R2
        SUBB A,#01H
        MOV R2,A
        MOV A,R3
        SUBB A,#00H
        MOV R3,A
        POP ACC
        POP PSW
```

RETI

ORG 1500H

AAAA: CJNE R2,#00H,BBBB

MOV R2,#09H

SJMP CCCC

BBBB: DEC R2

CCCC: RET

RELOAD: NOP

NOP

CLR TR0

MOV TH0,#0FCH

MOV TL0,#070H

SETB TR0

RET

END

# ภาคผนวก ข

DATA SHEET

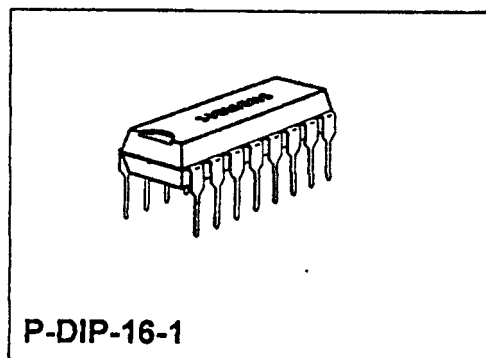
## Phase Control IC

TCA 785

Bipolar IC

### Features

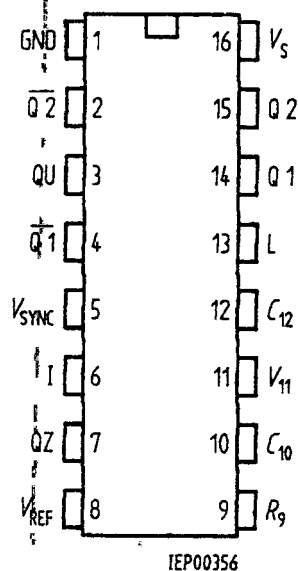
- Reliable recognition of zero passage
- Large application scope
- May be used as zero point switch
- LSL compatible
- Three-phase operation possible (3 ICs)
- Output current 250 mA
- Large ramp current range
- Wide temperature range



Type	Ordering Code	Package
TCA 785	Q67000-A2321	P-DIP-16-1

This phase control IC is intended to control thyristors, triacs, and transistors. The trigger pulses can be shifted within a phase angle between 0 and 180°. Typical applications include converter circuits, AC controllers and three-phase current controllers.

This IC replaces the previous types TCA 780 and TCA 780 D.



### Pin Definitions and Functions

Pin	Symbol	Function
1	GND	Ground
2	$\overline{Q2}$	Output 2 inverted
3	$\overline{QU}$	Output U
4	$\overline{Q2}$	Output 1 inverted
5	$V_{SYNC}$	Synchronous voltage
6	I	Inhibit
7	$\overline{QZ}$	Output Z
8	$V_{REF}$	Stabilized voltage
9	$R_9$	Ramp resistance
10	$C_{10}$	Ramp capacitance
11	$V_{11}$	Control voltage
12	$C_{12}$	Pulse extension
13	L	Long pulse
14	Q 1	Output 1
15	Q 2	Output 2
16	$V_s$	Supply voltage

### Pin Configuration (top view)

**Functional Description**

The synchronization signal is obtained via a high-ohmic resistance from the line voltage (voltage  $V_s$ ). A zero voltage detector evaluates the zero passages and transfers them to the synchronization register.

This synchronization register controls a ramp generator, the capacitor  $C_{10}$  of which is charged by a constant current (determined by  $R_9$ ). If the ramp voltage  $V_{10}$  exceeds the control voltage  $V_{11}$  (triggering angle  $\phi$ ), a signal is processed to the logic. Dependent on the magnitude of the control voltage  $V_{11}$ , the triggering angle  $\phi$  can be shifted within a phase angle of  $0^\circ$  to  $180^\circ$ .

For every half wave, a positive pulse of approx.  $30 \mu s$  duration appears at the outputs Q 1 and Q 2. The pulse duration can be prolonged up to  $180^\circ$  via a capacitor  $C_{12}$ . If pin 12 is connected to ground, pulses with a duration between  $\phi$  and  $180^\circ$  will result.

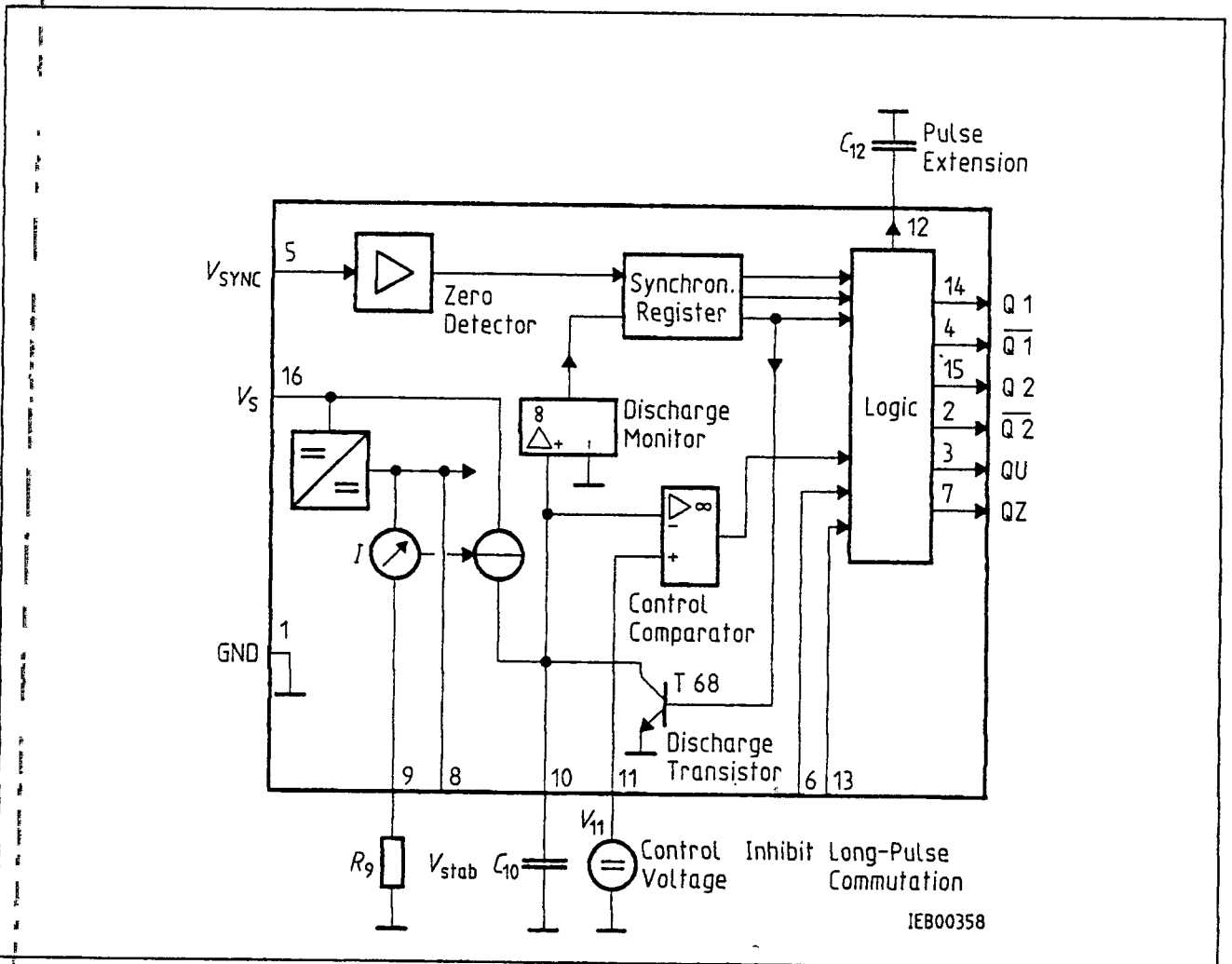
Outputs  $\overline{Q1}$  and  $\overline{Q2}$  supply the inverse signals of Q 1 and Q 2.

A signal of  $\phi + 180^\circ$  which can be used for controlling an external logic, is available at pin 3.

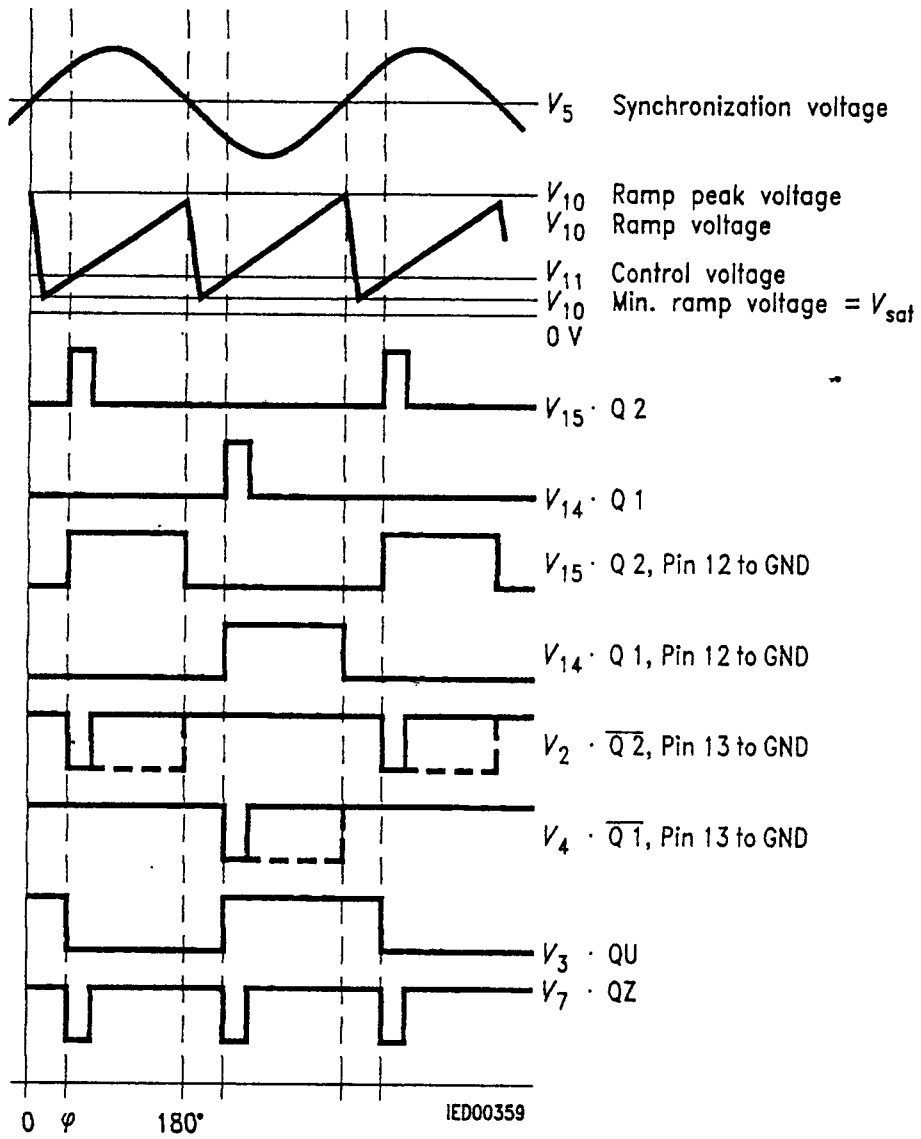
A signal which corresponds to the NOR link of Q 1 and Q 2 is available at output Q Z (pin 7).

The inhibit input can be used to disable outputs Q1, Q2 and  $\overline{Q1}$ ,  $\overline{Q2}$ .

Pin 13 can be used to extend the outputs  $\overline{Q1}$  and  $\overline{Q2}$  to full pulse length ( $180^\circ - \phi$ ).



**Block Diagram**



Pulse Diagram

## Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Limit Values		Unit
		min.	max.	
Supply voltage	$V_s$	-0.5	18	V
Output current at pin 14, 15	$I_Q$	-10	400	mA
Inhibit voltage	$V_8$	-0.5	$V_s$	V
Control voltage	$V_{11}$	-0.5	$V_s$	V
Voltage short-pulse circuit	$V_{13}$	-0.5	$V_s$	V
Synchronization input current	$V_5$	-200	$\pm 200$	$\mu A$
Output voltage at pin 14, 15	$V_Q$		$V_s$	V
Output current at pin 2, 3, 4, 7	$I_Q$		10	mA
Output voltage at pin 2, 3, 4, 7	$V_Q$		$V_s$	V
Junction temperature	$T_j$		150	C
Storage temperature	$T_{stg}$	-55	125	C
Thermal resistance system - air	$R_{th SA}$		80	K/W

## Operating Range

Supply voltage	$V_s$	8	18	V
Operating frequency	$f$	10	500	Hz
Ambient temperature	$T_A$	-25	85	C

## Characteristics

$8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ C} \leq T_A \leq 85 \text{ C}; f = 50 \text{ Hz}$

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Supply current consumption S1 ... S6 open $V_{11} = 0 \text{ V}$ $C_{10} = 47 \text{ nF}; R_9 = 100 \text{ k}\Omega$	$I_s$	4.5	6.5	10	mA	1
Synchronization pin 5 Input current $R_2$ varied	$I_{5 rms}$	30		200	$\mu A$	1
Offset voltage	$\Delta V_5$		30	75	mV	4
Control input pin 11 Control voltage range	$V_{11}$	0.2		$V_{10 peak}$	V	1
Input resistance	$R_{11}$		15		$k\Omega$	5

## Characteristics (cont'd)

 $8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}; f = 50 \text{ Hz}$ 

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Ramp generator						
Charge current	$I_{10}$	10		1000	$\mu\text{A}$	
Max. ramp voltage	$V_{10}$			$V_2 - 2$	V	1
Saturation voltage at capacitor	$V_{10}$	100	225	350	mV	1.6
Ramp resistance	$R_9$	3		300	$\text{k}\Omega$	1
Sawtooth return time	$t_f$		80		$\mu\text{s}$	1
Inhibit pin 6						
switch-over of pin 7						
Outputs disabled	$V_{6L}$		3.3	2.5	V	1
Outputs enabled	$V_{6H}$	4	3.3		V	1
Signal transition time	$t_r$	1		5	$\mu\text{s}$	1
Input current	$I_{6H}$		500	800	$\mu\text{A}$	1
$V_6 = 8 \text{ V}$						
Input current	$-I_{6L}$	80	150	200	$\mu\text{A}$	1
$V_6 = 1.7 \text{ V}$						
Deviation of $I_{10}$	$I_{10}$	-5		5	%	1
$R_9 = \text{const.}$						
$V_s = 12 \text{ V}; C_{10} = 47 \text{ nF}$						
Deviation of $I_{10}$	$I_{10}$	-20		20	%	1
$R_9 = \text{const.}$						
$V_s = 8 \text{ V to } 18 \text{ V}$						
Deviation of the ramp voltage						
between 2 following						
half-waves, $V_s = \text{const.}$	$\Delta V_{10 \text{ max}}$		$\pm 1$		%	
Long pulse switch-over						
pin 13						
switch-over of S8						
Short pulse at output	$V_{13H}$	3.5	2.5		V	1
Long pulse at output	$V_{13L}$		2.5	2	V	1
Input current	$I_{13H}$			10	$\mu\text{A}$	1
$V_{13} = 8 \text{ V}$						
Input current	$-I_{13L}$	45	65	100	$\mu\text{A}$	1
$V_{13} = 1.7 \text{ V}$						
Outputs pin 2, 3, 4, 7						
Reverse current	$I_{CEO}$			10	$\mu\text{A}$	2.6
$V_O = V_s$						
Saturation voltage	$V_{\text{sat}}$	0.1	0.4	2	V	2.6
$I_O = 2 \text{ mA}$						

## Characteristics (cont'd)

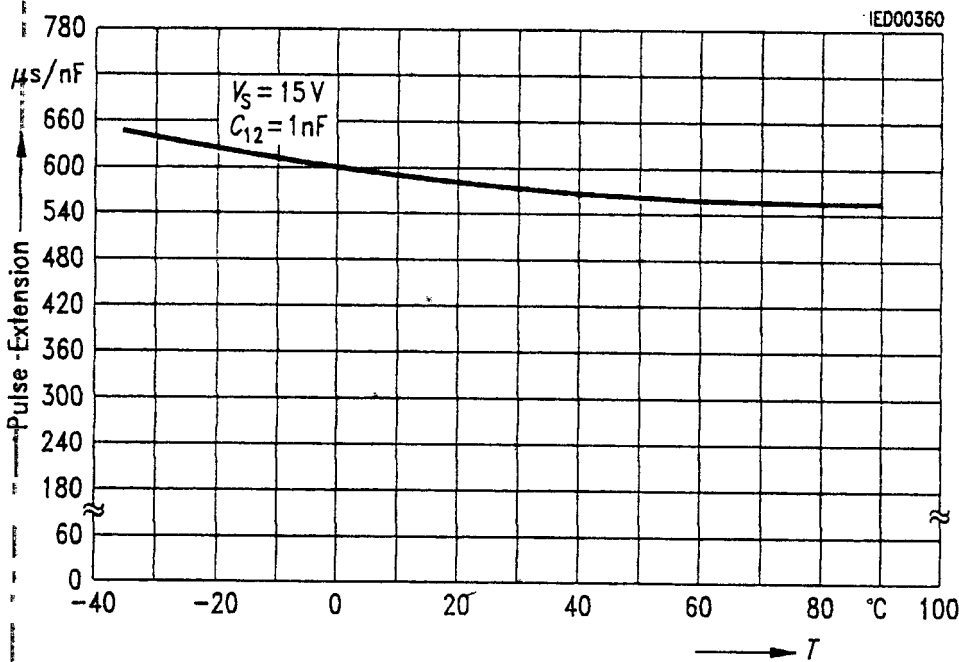
$8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}$ ;  $-25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $f = 50 \text{ Hz}$

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Outputs pin 14, 15 H-output voltage $-I_o = 250 \text{ mA}$	$V_{14/15H}$	$V_s - 3$	$V_s - 2.5$	$V_s - 1.0$	V	3.6
L-output voltage $I_o = 2 \text{ mA}$	$V_{14/15L}$	0.3	0.8	2	V	2.6
Pulse width (short pulse) S9 open	$t_p$	20	30	40	$\mu\text{s}$	1
Pulse width (short pulse) with $C_{12}$	$t_p$	530	620	760	$\mu\text{s}/\text{nF}$	1
Internal voltage control Reference voltage Parallel connection of 10 ICs possible	$V_{REF}$	2.8	3.1	3.4	V	1
TC of reference voltage	$\alpha_{REF}$		$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	1/K	1

Application Hints for External Components

		min		max	
Ramp capacitance	$C_{10}$	500 pF		$1 \mu\text{F}^{1)}$	The minimum and maximum values of $I_{10}$ are to be observed
Triggering point	$t_{tr} = \frac{V_{11} \times R_9 \times C_{10}}{V_{REF} \times K}$		2)		
Charge current	$I_{10} = \frac{V_{REF} \times K}{R_9}$		2)		Ramp voltage $V_{10 \max} = V_S - 2 \text{ V}$ $V_{10} = \frac{V_{REF} \times K \times t}{R_9 \times C_{10}}$ 2)

Pulse Extension versus Temperature



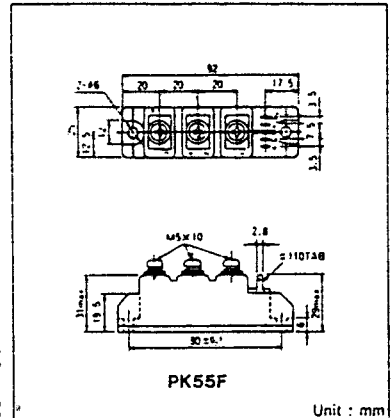
1) Attention to flyback times  
 2)  $K = 1.10 \pm 20 \%$

# THYRISTOR MODULE

## PK(PD,PE,KK)55F

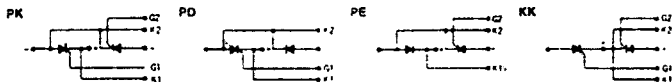
Power Thyristor/Diode Module PK55F series are designed for various rectifier circuits and power controls. For your circuit application, following internal connections and wide voltage ratings up to 1,600 V are available. High precision 25 mm (1inch) width package and electrically isolated mounting base make your mechanical design easy.

UL:E76102(M)



- $I_{T(AV)}$  55A,  $I_{T(RMS)}$  86A,  $I_{TSM}$  1750A
- $di/dt$  150 A/ $\mu$ s
- $dv/dt$  500 V/ $\mu$ s

(Applications)  
 Various rectifiers  
 AC/DC motor drives  
 Heater controls  
 Light dimmers  
 Static switches



### Maximum Ratings

Symbol	Item	PK55F-40 PD55F-40 PE55F-40 KK55F-40	PK55F-80. PD55F-80 PE55F-80 KK55F-80	PK55F-120 PD55F-120 PE55F-120 KK55F-120	PK55F-160 PD55F-160 PE55F-160 KK55F-160	Unit
$V_{RRM}$	* Repetitive Peak Reverse Voltage	400	800	1200	1600	V
$V_{RSM}$	* Non-Repetitive Peak Reverse Voltage	480	960	1300	1700	V
$V_{ORM}$	Repetitive Peak Off-State Voltage	400	800	1200	1600	V

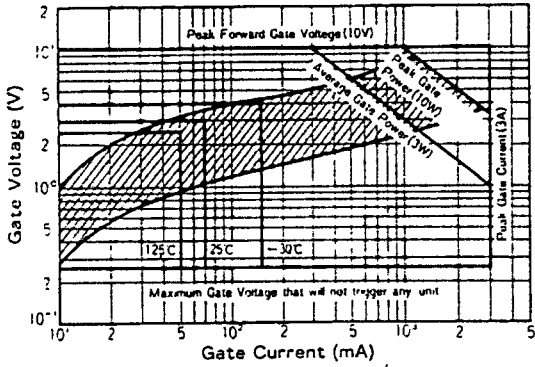
Symbol	Item	Conditions	Ratings	Unit
$I_{T(AV)}$	* Average On-State Current	Single phase, half wave, 180° conduction, $T_c = 89^\circ\text{C}$	55	A
$I_{T(RMS)}$	* R.M.S On-State Current	Single phase, half wave, 180° conduction, $T_c = 89^\circ\text{C}$	86	A
$I_{TSM}$	* Surge On-State Current	1/2 cycle, 50/60Hz, peak value, non-repetitive	1600/1750	A
$i^2t$	* $i^2t$	Value for one cycle of surge current	12800	A <sup>2</sup> S
$P_{GM}$	Peak Gate Power Dissipation		10	W
$P_{G(AV)}$	Average Gate Power Dissipation		3	W
$I_{FGM}$	Peak Gate Current		3	A
$V_{FGM}$	Peak Gate Voltage(Forward)		10	V
$V_{RGM}$	Peak Gate Voltage(Reverse)		5	V
$di/dt$	Critical Rate of Rise of On-State Current	$I_G = 100\text{mA}$ , $T_j = 25^\circ\text{C}$ , $V_0 = 1/2 V_{ORM}$ , $dI_G/dt = 0.1\text{A}/\mu\text{s}$	150	A/ $\mu$ s
$V_{ISO}$	* Isolation Breakdown Voltage(R.M.S)	A.C. 1minute	2500	V
$T_j$	* Operating Junction Temperature		-40~+125	$^\circ\text{C}$
$T_{stg}$	* Storage Temperature		-40~+125	$^\circ\text{C}$
	Mounting Torque	(M5)	Recommended Value 25kgf·cm	kgf·cm
		Terminal (M5)	Recommended Value 25kgf·cm	
	Mass		170	g

### Electrical Characteristics

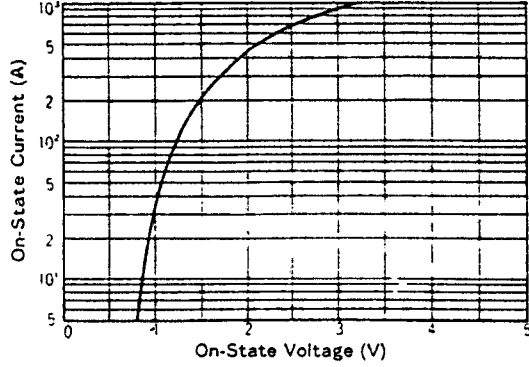
Symbol	Item	Conditions	Ratings	Unit
$I_{ORM}$	Repetitive Peak Off-State Current, max.	at $V_{ORM}$ , single phase, half wave, $T_j = 125^\circ\text{C}$	15	mA
$I_{RRM}$	* Repetitive Peak Reverse Current, max.	at $V_{ORM}$ , single phase, half wave, $T_j = 125^\circ\text{C}$	15	mA
$V_{TM}$	* Peak On-State Voltage, max.	On-State Current 170A, $T_j = 25^\circ\text{C}$ Inst. measurement	1.40	V
$I_{GT}/V_{GT}$	Gate Trigger Current/Voltage, max.	$T_j = 25^\circ\text{C}$ , $I_T = 1\text{A}$ , $V_0 = 6\text{V}$	70/3	mA/V
$V_{GD}$	Non-Trigger Gate, Voltage, min.	$T_j = 125^\circ\text{C}$ , $V_0 = 1/2 V_{ORM}$	0.25	V
$t_{gt}$	Turn On Time, max	$I_T = 55\text{A}$ , $I_G = 100\text{mA}$ , $T_j = 25^\circ\text{C}$ , $V_0 = 1/2 V_{ORM}$ , $dI_G/dt = 0.1\text{A}/\mu\text{s}$	10	$\mu\text{s}$
$dv/dt$	Critical Rate of Rise of On-State Voltage, min.	$T_j = 125^\circ\text{C}$ , $V_0 = 2/3 V_{ORM}$ , Exponential wave.	500	V/ $\mu$ s
$I_H$	Holding Current, typ.	$T_j = 25^\circ\text{C}$	50	mA
$I_L$	Latching Current, typ.	$T_j = 25^\circ\text{C}$	100	mA
$R_{th(j-c)}$	* Thermal Impedance, max.	Junction to case	0.5	$^\circ\text{C}/\text{W}$

\* mark : Thyristor and Diode part. No mark : Thyristor part

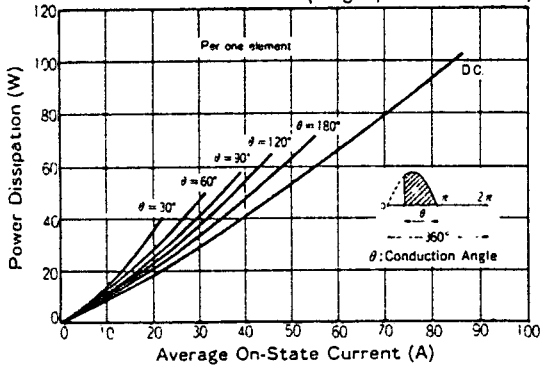
**Gate Characteristics**



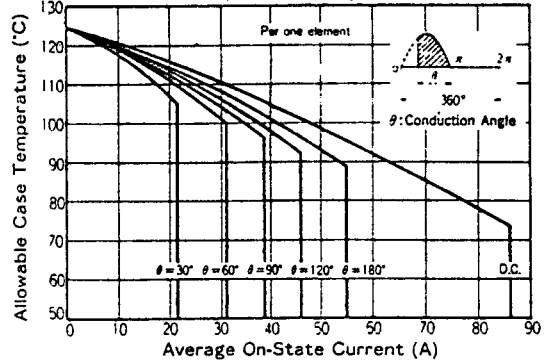
**On-State Voltage max**



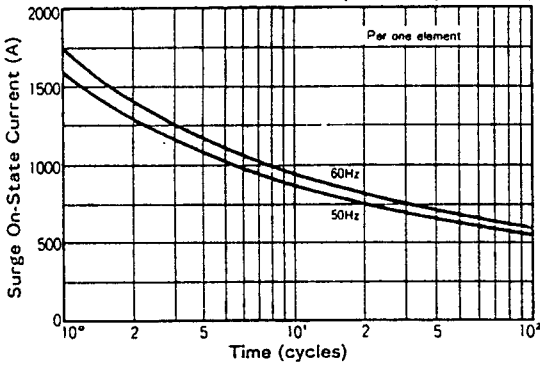
**Average On-State Current Vs Power Dissipation (Single phase half wave)**



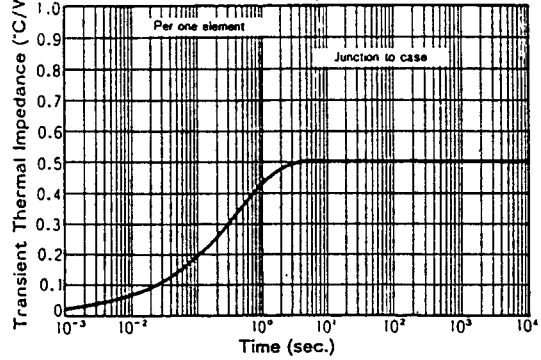
**Average On-State Current Vs Maximum Allowable Case Temperature (Single phase half wave)**



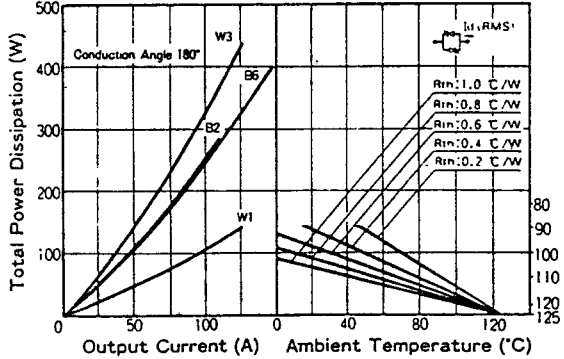
**Surge On-State Current Rating (Non-Repetitive)**



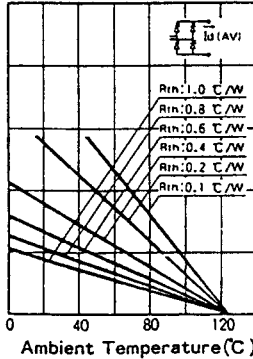
**Transient Thermal Impedance**



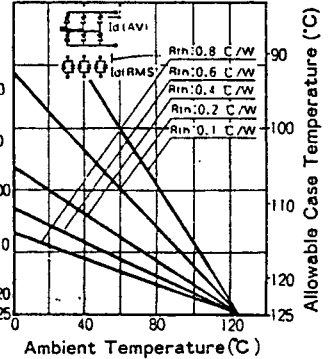
**Output Current W1: Bidirectional connection**



**B2 Two pulse bridge connection**



**B6: Six pulse bridge connection W3: Three phase bidirectional connection**



# A.6 ค่าสมบัติต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ตาราง 8.1-(1) ค่าสมบัติต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โรเตอร์กรงกระรอกชนิดคิพรูป 230 v, 50 Hz

ขนาด (kW) / แรงม้า	ขนาด HP/PS	ความเร็วรอบขณะ โหลดเต็ม (rpm)	แรงบิด				กระแส		ประสิทธิภาพ			เพาเวอร์แฟกเตอร์			GD <sup>2</sup> ของมอเตอร์ (kg-m <sup>2</sup> )
			แรงบิดที่ก่อกำ (kg-m)	แรงบิดขณะสตาร์ท (%)	แรงบิดสูงสุด (%)	แรงบิดเบี่ยง (%)	พีคกระแส (A)	กระแสขณะสตาร์ท (A)	50% โหลด (%)	75% โหลด (%)	100% โหลด (%)	50% โหลด (%)	75% โหลด (%)	100% โหลด (%)	
0.75	2	2,890	0.253	295	310	210	1.8	10	75	73	79	63	45	33	0.0041
	4	1,420	0.515	325	290	275	2.0	9	73	77	73	54	37	26	0.0085
	6	910	0.782	235	254	220	2.0	10	70	75	75	53	36	25	0.0216
	8	700	1.04	200	240	200	2.2	8	74	77	77	49	38	27	0.0391
1.5	2	2,910	0.50	280	335	245	3.2	22	82	84	85	71	52	37	0.0105
	4	1,430	1.02	315	290	275	3.5	18	79	82	82	61	44	30	0.0175
	6	940	1.55	250	220	210	3.8	14	82	84	83	53	38	25	0.0391
	8	700	2.09	220	230	200	4.3	14	79	82	82	44	37	25	0.0685
2.2	2	2,870	0.747	350	330	270	4.3	26	84	85	86	65	44	32	0.0190
	4	1,430	1.50	290	320	275	5.0	26	79	82	82	53	37	25	0.0330
	6	945	2.27	255	255	230	5.3	24	81	84	84	57	40	28	0.0685
	8	710	3.02	230	240	210	6.0	22	80	83	83	45	37	26	0.121
3.7	2	2,900	1.25	300	345	280	7.5	41	86	86	85	66	42	30	0.0259
	4	1,440	2.51	300	290	265	7.5	42	85	86	85	58	39	28	0.0540
	6	945	3.81	250	250	225	8.2	37	86	87	87	60	42	32	0.121
	8	710	5.07	195	185	170	10.0	40	81	86	86	44	38	27	0.161
5.5	2	2,900	1.85	250	300	220	10.3	63	89	90	90	61	38	29	0.0576
	4	1,440	3.72	265	300	255	12.1	68	87	89	89	62	45	32	0.0910
	6	955	5.6	250	230	225	11.6	53	89	90	89	63	45	30	0.161
	8	710	7.50	190	270	210	12.1	58	87	88	88	62	44	30	0.415
7.5	2	2,900	2.52	240	300	215	13.7	85	91	92	91	62	41	32	0.0706
	4	1,440	5.03	275	270	245	15.3	84	89	90	90	68	43	33	0.113
	6	960	7.53	235	265	225	15.8	79	90	91	90	64	45	31	0.415
	8	710	10.2	180	240	190	16.3	75	88	89	89	61	42	28	0.516
11	2	2,910	3.68	230	250	190	20.5	104	92	93	92	65	40	31	0.146
	4	1,440	7.45	260	280	240	22.1	132	88	89	89	72	42	35	0.283
	6	990	11.0	250	280	240	23.7	129	89	91	90	60	42	28	0.516
	8	710	15.0	180	200	165	27.4	116	87	89	88	55	38	22	1.04
15	2	2,910	5.02	180	220	160	28.4	152	90	91	90	64	38	29	0.24
	4	1,440	10.1	220	260	215	28.4	155	90	91	90	61	37	28	0.42
	6	965	15.1	200	230	195	31.6	147	88	89	89	66	40	31	0.96
	8	720	20.3	160	200	160	35.5	137	87	88	88	56	37	23	1.2
18.5	2	2,910	6.19	200	230	170	34.3	183	91	91	91	64	38	30	0.28
	4	1,450	12.4	230	260	220	34.3	183	91	91	90	64	39	31	0.45
	6	965	18.7	200	230	195	38.9	179	88	89	88	68	40	32	1.2
	8	720	25.0	180	220	180	42.2	179	89	90	90	55	37	24	1.7

- หมายเหตุ: 1. ค่าต่าง ๆ เป็นค่าโดยประมาณเพื่ออ้างอิงเท่านั้น  
 2. ค่ากระแสขณะสตาร์ทจะขึ้นอยู่กับประเภทของมอเตอร์  
 ซึ่งแบ่งออกตามสัญลักษณ์

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จล่วงไปได้ด้วยดี ส่วนหนึ่งก็เพราะได้รับความช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อจาก อาจารย์และเพื่อน ๆ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ประภาส ไทรสุวรรณ ,อ.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ และดร.วิริยะ พิเชษฐจำริญ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ให้ยืมเครื่องมือต่างๆ ตลอดจนจัดหา อุปกรณ์ที่จำเป็นในการทำโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ คุณลุงโกวิท ที่กรุณาทำการ coupling มอเตอร์ให้ ,ที่อีกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการ และพี่ใหญ่ที่ให้ยืมอุปกรณ์ต่าง ๆ

คณะผู้จัดทำ



- [1] A.E.Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr. And Stephen D. Umans, "Electric Machinery," McGraw-Hill, 1983
- [2] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics," Fust Wayne, Indiana :Prentice\_Hall Inc, 1993
- [3] B.L. Theraja and AK. Theraja, "A text Book of Electrical Technology," Nirja Construction & Development, New Delhi, 1994
- [4] อุดมศักดิ์ ชัยยีน, "Power Electronics I," 2528
- [5] มงคล เชนครินทร์ และชาติ ศรีไพพรรณ, "อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน," 2532
- [6] ประเมษฐ์ ประนายนันทน์ และ ปิยพงศ์ เผ่าวณิช, "คู่มือและการประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51" ซีเอ็ดดูเคชั่น
- [7] สุเจตน์ จันทรัมย์, "ไมโครคอนโทรลเลอร์ชิพเดี่ยว 8051"
- [8] มานพ ชัมรุ่งฤกษ์, สุพล เปรมปรีชากุล, สุพัตรา ไกรชา และสุวิษา วงศ์ทองเสริม, "ปริญญา นีพนธ์ปีการศึกษา 2539" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.