

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอดแรนต์

2 - QUADRANT DC MOTOR CONTROL



โดย
นายจรัส ตระกูลมิตรพิชัย
นายปกรณ์ ปรียะวาที
นายนเรลลิตธี ศรีภูมิ
นายพิเชต ศรีमुख

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 37021
วัน, เดือน, ปี 30 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2542

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 กวอดแดรนต์
2 - QUADRANT DC MOTOR CONTROL



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. พิชิต ด้ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปี การศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอดแรนต์

ผู้จัดทำ

1. นายจรัส ตระกูลมีทรัพย์
2. นายปรกรณ์ ประิษาที
3. นายนเรสิทธิ์ ศรีภูมิ
4. นายพิเชต ศรีमुख



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. พิเชิต ถ้ายอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอดแรนต์

นายจรัล ตระกูลมีทรัพย์

นายปกรณ์ ปรีะวาที

นายนเรศสิทธิ์ ศรีภูมิ

นายพิเชต ศรีमुख

ผศ. พิชิต ถ้ำของ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอดแรนต์ โดยการควบคุมความเร็วรอบในทิศทางเดียวโดยวิธีเฟสคอนโทรล ซึ่งจะใช้วงจรควบคุมสร้างสัญญาณทริก เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรกำลัง สำหรับวงจรกำลังจะประกอบด้วยเอสซีอาร์ที่ต่อกันแบบ 3 เฟสฟลูวฟคอนเวอร์เตอร์ ในส่วนของวงจรควบคุมจะมีการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS- 51 เป็นตัวควบคุมการทำงานของทั้งระบบโดยมีการตรวจจับความเร็วรอบ และกระแสเพื่อนำค่ากลับมาใช้ในการประมวลผลการควบคุมความเร็วรอบ และทำการเบรคมอเตอร์โดยใช้การเบรคแบบรีเจนเนอเรทีฟ

2- QUADRANT DC MOTOR CONTROL

Jarun Trakoonmesap

Pakron Priyavatee

Naresith Srepume

Pichet Srimuk

Assist. Prof. Phichit Lumyong Advisor

1999

ABSTRACT

The thesis concerns speed control in only one direction of DC Motor by phase control method. Power circuit is 3-phases full wave converter which is controlled by firing circuit using the closed loop system. The controlling uses MCS-51 microcontroller to control the system by detect the value of speed , current and process these values to control speed and braking by regenerative braking.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การควบคุมความเร็วรอบและการเบรคมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	5
2.1 วิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์	7
2.1.1 ปรับกระแสสนามแม่เหล็กหรือปรับเส้นแรงแม่เหล็ก	7
2.1.2 ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอาร์เมเจอร์	7
2.1.3 การใช้คอนเวอร์เตอร์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์แบบวงจรมืด	8
2.1.4 การใช้คอนเวอร์เตอร์ควบคุมแรงดันแบบวงรอบปิด	9
2.2 วิธีการเบรคมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	11
2.2.1 Mechanical Breaking	11
2.2.2 Dynamic Breaking	12
2.2.3 Regenerative Breaking	12
บทที่ 3 เอสซีอาร์	13
3.1 ลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์	13
3.2 แบบจำลองของเอสซีอาร์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว	15
3.3 การนำกระแสของเอสซีอาร์	18
3.4 การป้องกัน di/dt	19
3.5 การป้องกัน dv/dt	20
บทที่ 4 วงจร 3 เฟสฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมเฟสได้	22
4.1 หลักการทำงานพื้นฐานของวงจร	22
4.2 การทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์	25
บทที่ 5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	27
5.1 คุณสมบัติทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2	โครงสร้างภายนอกของ MCS-51	28
5.3	โครงสร้างภายในของ MCS-51	31
5.4	การจัดหน่วยความจำ	31
5.4.1	หน่วยความจำโปรแกรม	33
5.4.2	หน่วยความจำข้อมูล	33
5.4.3	รีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษ (SFR)	33
5.4.4	รีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไป	34
บทที่ 6	วงจรสร้างสัญญาณทริกเพื่อควบคุมเอสซีอาร์	35
6.1	วงจรสร้างสัญญาณทริกเอสซีอาร์ ที่ใช้ TCA#785	36
6.2	การเพิ่มความถี่ของสัญญาณ โดยใช้ IC#555	38
6.3	การออกแบบหม้อแปลงพัลส์	39
บทที่ 7	การตรวจจับสัญญาณความเร็วรอบและกระแส	46
7.1	ชุดตรวจจับความเร็วรอบ	46
7.2	ชุดตรวจจับกระแสอาร์เมเจอร์	47
บทที่ 8	การแปลงค่าสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล และสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก	49
8.1	การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D)	49
8.2	การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก (D/A)	51
บทที่ 9	การอ่านค่าคีย์บอร์ดและหน่วยแสดงผลแบบ LCD	54
9.1	การต่อคีย์บอร์ดกับไมโครคอนโทรลเลอร์	54
9.2	หน่วยแสดงผลแบบ LCD	57
9.2.1	โครงสร้างโดยทั่วไปของ LCD โมดูล	57
9.2.2	การใช้งาน LCD โมดูล	59
บทที่ 10	โปรแกรมควบคุมความเร็วรอบและการเบรคมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	62
10.1	การเริ่มทำงานของโปรแกรม	62
10.2	การทำงานของโปรแกรมควบคุมความเร็วรอบ	62
10.3	โปรแกรมการเบรคมอเตอร์	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.4 การปรับค่ามุมทริกโดยใช้ตาราง โคไซน์	64
บทที่ 11 การทดลองและผลการทดลอง	65
11.1 การทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะต่างๆ	70
11.2 การทดลองการเบรคมอเตอร์ด้วยวิธีรีเจนเนอเรทีฟ	76
บทที่ 12 สรุปผลและวิจารณ์	77
12.1 วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง	77
12.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข	77
12.3 สรุป	78
ภาคผนวก	
กิตติประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก	4
รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก	5
รูปที่ 2.2 วงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยปรับกระแสรั้งสนามแม่เหล็ก	7
รูปที่ 2.3 วงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอาร์เมเจอร์	8
รูปที่ 2.4 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้คอนเวอร์เตอร์ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอาร์เมเจอร์	9
รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิดเบื้องต้น	10
รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิดโดยมีวงรอบกระแสภายใน	11
รูปที่ 3.1 แสดงสัญลักษณ์และรอยต่อ พี-เอ็น ทั้งสามของเอสซีอาร์	13
รูปที่ 3.2 แสดงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์	14
รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองของเอสซีอาร์ โดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว	15
รูปที่ 3.4 รูปแบบของเอสซีอาร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวในสภาวะชั่วขณะ	17
รูปที่ 3.5 ผลของกระแสเกต ต่อแรงดันบล็อกกิงค่านไบแอสตรง	17
รูปที่ 3.6 แสดงคุณลักษณะของเวลาในการนำกระแสของเอสซีอาร์	19
รูปที่ 3.7 วงจรสับไฟฟ้าที่มีตัวเหนี่ยวนำจำกัดค่า di/dt	20
รูปที่ 3.8 วงจรป้องกัน dv/dt ด้วยสแน็บเบอร์	21
รูปที่ 4.1 วงจร 3 เฟสฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมเฟสได้	22
รูปที่ 4.2 ลักษณะรูปคลื่นโวลต์เดจและกระแสของวงจร 3 เฟสฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์	23
รูปที่ 4.3 วงจรพื้นฐานและลักษณะรูปคลื่นสัญญาณการทำงานโหมคอินเวอร์เตอร์ซึ่งใช้วิธีของการควบคุมเฟส	25
รูปที่ 5.1 แสดงการจัดตำแหน่งขาต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	29
รูปที่ 5.2 แสดงโครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	31
รูปที่ 5.3 แสดงการจัดโครงสร้างของหน่วยความจำทั้งในส่วน of หน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูล	32
รูปที่ 5.4 แสดงการจัดหน่วยความจำและตำแหน่งของรีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษต่าง ๆ	34

รูปที่ 6.1 แสดงสัญญาณทริกที่ใช้กับวงจร 3 เฟสฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์	35
รูปที่ 6.2 แสดง โครงสร้างภายในของวงจรรวมเบอร์ TCA#785	36
รูปที่ 6.3 แสดงรูปคลื่นสัญญาณด้านเข้าและด้านออกของวงจรรวมเบอร์ TCA#785	37
รูปที่ 6.4 แสดงการต่อไอซีเบอร์ 555NE เป็นวงจรอะอสเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์	38
รูปที่ 6.5 วงจรสร้างสัญญาณทริกเอสซีอาร์ของวงจร 3 เฟสฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์	43
รูปที่ 6.6 แสดงรูปคลื่นสัญญาณที่จุดต่างๆ ของวงจรสร้างสัญญาณทริก	44
รูปที่ 7.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ของเทคโนโลยีมอเตอร์	47
รูปที่ 7.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการตรวจจับสัญญาณ	48
รูปที่ 8.1 แสดงการต่อวงจร A/D ที่ใช้ไอซีเบอร์ ADC 0804	49
รูปที่ 8.2 ไดอะแกรมเวลาในการทำงานของวงจร A/D	50
รูปที่ 8.3 วงจร R-2R Ladder	51
รูปที่ 8.4 แสดงการต่อวงจร D/A ที่ใช้ไอซีเบอร์ MC 1408	52
รูปที่ 9.1 แสดงวงจรของสวิทช์และการเกิดการบาวนซ์ขณะกดสวิทช์	54
รูปที่ 9.2 โพล์ซาร์ทแสดงการแก้สัญญาณบาวนซ์	55
รูปที่ 9.3 วงจรแสดงการต่อคีย์บอร์ดแบบเมตริกซ์ขนาด 4*4 กับ ไอซีเบอร์ 8255	55
รูปที่ 9.4 โพล์ซาร์ทแสดงการสแกนคีย์บอร์ด	56
รูปที่ 9.5 โครงสร้างทั่วไปของ LCD โมดูล	57
รูปที่ 10.1 โพล์ซาร์ทแสดงการทำงานเริ่มต้นของ โปรแกรมควบคุมมอเตอร์	66
รูปที่ 10.2 โพล์ซาร์ทแสดงการรับค่าความเร็วรอบที่ต้องการและการควบคุมความเร็วรอบ	67
รูปที่ 10.3 โพล์ซาร์ทแสดงการเบรคมอเตอร์	69
รูปที่ 11.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบที่สั่งกับความเร็วรอบที่วัดได้ ขณะไม่จ่ายโหลด	73
รูปที่ 11.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบที่สั่งกับความเร็วรอบที่วัดได้ ขณะจ่ายโหลด 1430 วัตต์	73
รูปที่ 11.3 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบที่สั่งกับความเร็วรอบที่วัดได้ ขณะจ่ายโหลด 2350 วัตต์	74
รูปที่ 11.4 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบที่สั่งกับความเร็วรอบที่วัดได้ ขณะจ่ายโหลด 3300 วัตต์	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 11.5 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบที่ตั้งกับความเร็วนที่วัดได้ ขณะจ่ายโหลด 4250 วัตต์	75
รูปที่ 11.6 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแส ขณะสภาวะ โหลดต่างๆ	75
รูปที่ 11.7 กราฟเปรียบเทียบเวลาในการหยุดหมุนของมอเตอร์	76



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละเบอร์ในตระกูล MCS-51	27
ตารางที่ 5.2 แสดงหน้าที่พิเศษของแต่ละขาของพอร์ต P ₃	30
ตารางที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ของความกว้างของสัญญาณพัลส์ด้านออกกับค่า C ₁₂	38
ตารางที่ 7.1 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของ เทค โคนเนอเรเตอร์	46
ตารางที่ 7.2 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแส	48
ตารางที่ 8.1 ผลการทดลองวงจร A/D	51
ตารางที่ 8.2 ผลการทดลองวงจร D/A	53
ตารางที่ 9.1 แอคเครสต่างๆ จะใช้ต่อกับ LCD โมดูล	59
ตารางที่ 9.2 รูปแบบของคำสั่งควบคุมการเขียนข้อมูล รวมทั้งสถานะของขาต่างๆที่จำเป็น	60
ตารางที่ 9.3 แอคเครสของ LCD โมดูลรุ่น DMC-162	60
ตารางที่ 11.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N _r , V _r และ I _r ขณะไม่จ่ายโหลด	70
ตารางที่ 11.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N _r , V _r และ I _r ขณะจ่ายโหลดขนาด 1430 วัตต์	71
ตารางที่ 11.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N _r , V _r และ I _r ขณะจ่ายโหลดขนาด 2350 วัตต์	71
ตารางที่ 11.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N _r , V _r และ I _r ขณะจ่ายโหลดขนาด 3300 วัตต์	72
ตารางที่ 11.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N _r , V _r และ I _r ขณะจ่ายโหลดขนาด 4250 วัตต์	72
ตารางที่ 11.6 แสดงเวลาในการหยุดหมุนที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยวิธีตัดไฟที่จ่ายเข้าสู่ชุดควบคุมและวิธีรีเจนเนอเรทีฟเบรก	76

บทที่ 1

บทนำ

การควบคุมมอเตอร์ไมโครโวลต์ของใหม่ แต่เริ่มต้นมาพร้อมกับการเริ่มมีมอเตอร์โดยได้มีการพัฒนาให้ดีขึ้นเรื่อยๆ ในยุคแรกการควบคุมจะเป็นเชิงกลจนกระทั่งเมื่อได้มีการค้นพบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่เรียกว่า เอสซีอาร์ (SCR; Silicon Controlled Rectifier) ขึ้น การควบคุมมอเตอร์จึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังและในปัจจุบันก็ได้มีการนำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมด้วยเพื่อสั่งการภาควงจรกำลัง

ระบบการควบคุมมอเตอร์สามารถแยกประเภทตามชนิดของมอเตอร์ที่ใช้เป็นต้นกำลังได้ คือ ระบบที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและระบบที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในระบบแรกแม้ว่าราคาและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของมอเตอร์จะต่ำกว่าระบบหลังมาก แต่อุปกรณ์และการควบคุมของมอเตอร์ชนิดนี้ให้ทำงานได้อย่างแม่นยำนั้นจะมีเทคนิคที่ยุ่ยยากและราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อมีความต้องการระบบการขับเคลื่อนแบบควบคุมความเร็วรอบได้ที่ต้องการการทำงานที่แม่นยำ ระบบที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลังจะได้รับความนิยมสูงมากกว่า โดยเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (Separately Excited Field DC Motor) ทั้งนี้เพราะการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ และการควบคุมเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดฟิลด์ ภายในมอเตอร์สามารถแยกการควบคุมเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งทำให้มอเตอร์ชนิดนี้ง่ายต่อการควบคุม

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีหลักการ การออกแบบ และการสร้าง รวมทั้งการทดลองระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก โดยควบคุมการทำงานได้ 2 ควอดแรนต์

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอดแรนต์ จะใช้วงจร 3 เฟสฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์แบบนี้สามารถทำงานได้ 2 โหมด คือ โหมดเรกติไฟเออร์ (Rectifier Mode) ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้เพียงทิศทางเดียว และโหมดอินเวอร์เตอร์ (Inverter Mode) ซึ่งสามารถใช้ในการเบรคมอเตอร์โดยวิธีรีเจนเนอเรทีฟเบรกได้

การทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยมีหลักการและขั้นตอนการทำงานแต่ละส่วนดังนี้

- **Command I/P**

เป็นส่วนที่รับคำสั่งจากผู้ใช้ซึ่งใช้คีย์บอร์ดแบบเมตริกซ์ขนาด 4×4 โดยคำสั่งจะประกอบด้วย

: Speed Command

: Start/Stop Command

- **Display**

เป็นหน่วยที่แสดงผลที่ใช้ LCD โมดูล แสดงค่าคำสั่งและความเร็วรอบที่ต้องการ

- **CPU**

ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 โดยส่วนนี้จะเป็นส่วนที่รับคำสั่ง (อินพุต) ผ่านทางคีย์บอร์ดแล้วนำคำสั่งที่ได้มาประมวลผล และส่งสัญญาณดิจิทัลเพื่อควบคุมมอเตอร์ของเอสซีอาร์ให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำให้ได้ความเร็วรอบตามที่ต้องการ และเพื่อความแม่นยำในการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ จะมีการรับค่าความเร็วรอบในการหมุนที่แท้จริงและค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์เข้ามาเพื่อใช้ในการควบคุมด้วย โดยค่าความเร็วรอบในการหมุนที่แท้จริงจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเร็วรอบที่ต้องการ

- **A/D และ D/A**

ส่วนนี้ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกในการต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรรภายนอก

- **Triggering Circuit**

เป็นวงจรสร้างสัญญาณทรiggerของเอสซีอาร์ เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดเรกติไฟเลอร์ (แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นบวก) และโหมดอินเวอร์เตอร์ (แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นลบ)

- **Full Wave Converter**

เป็นวงจรฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์ แบบ 3 เฟส โดยวงจรประกอบด้วยเอสซีอาร์ 6 ตัว ต่อกันในลักษณะบริดจ์

- **Current Sensor**

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่วัดค่ากระแสอาร์เมเจอร์แล้วแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยจะนำค่าที่ได้ส่งไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป

- **D.C Motor**

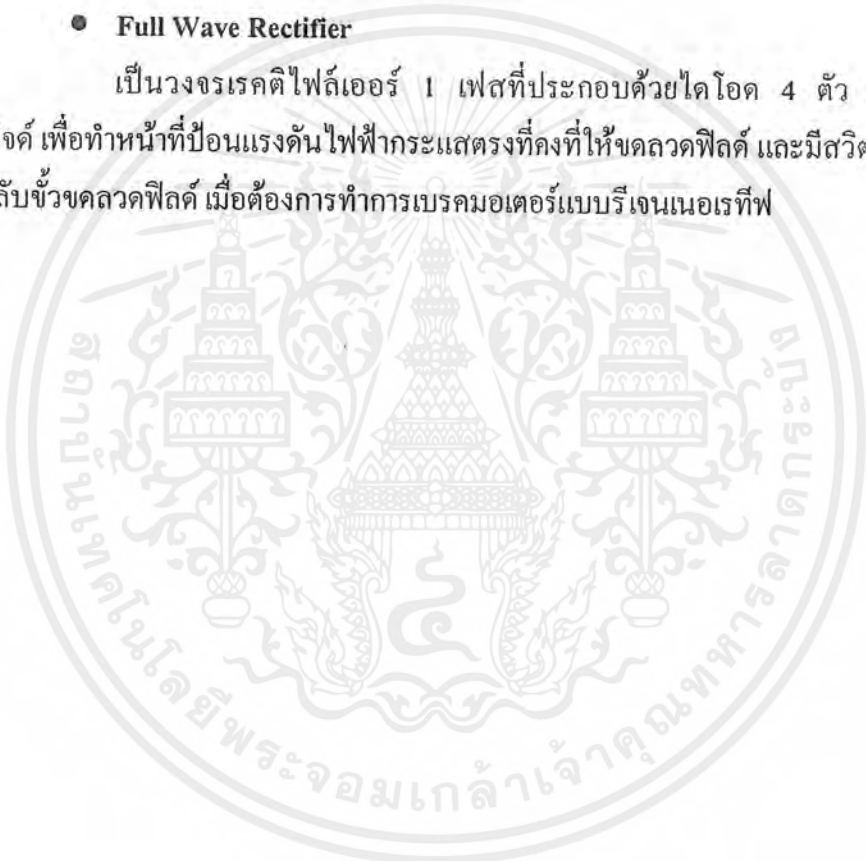
เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก โดยการควบคุมความเร็วรอบจะใช้การควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์ (Armature Voltage Control) ขณะที่ขดลวดฟิลด์ป้อนแรงดันไฟฟ้าคงที่

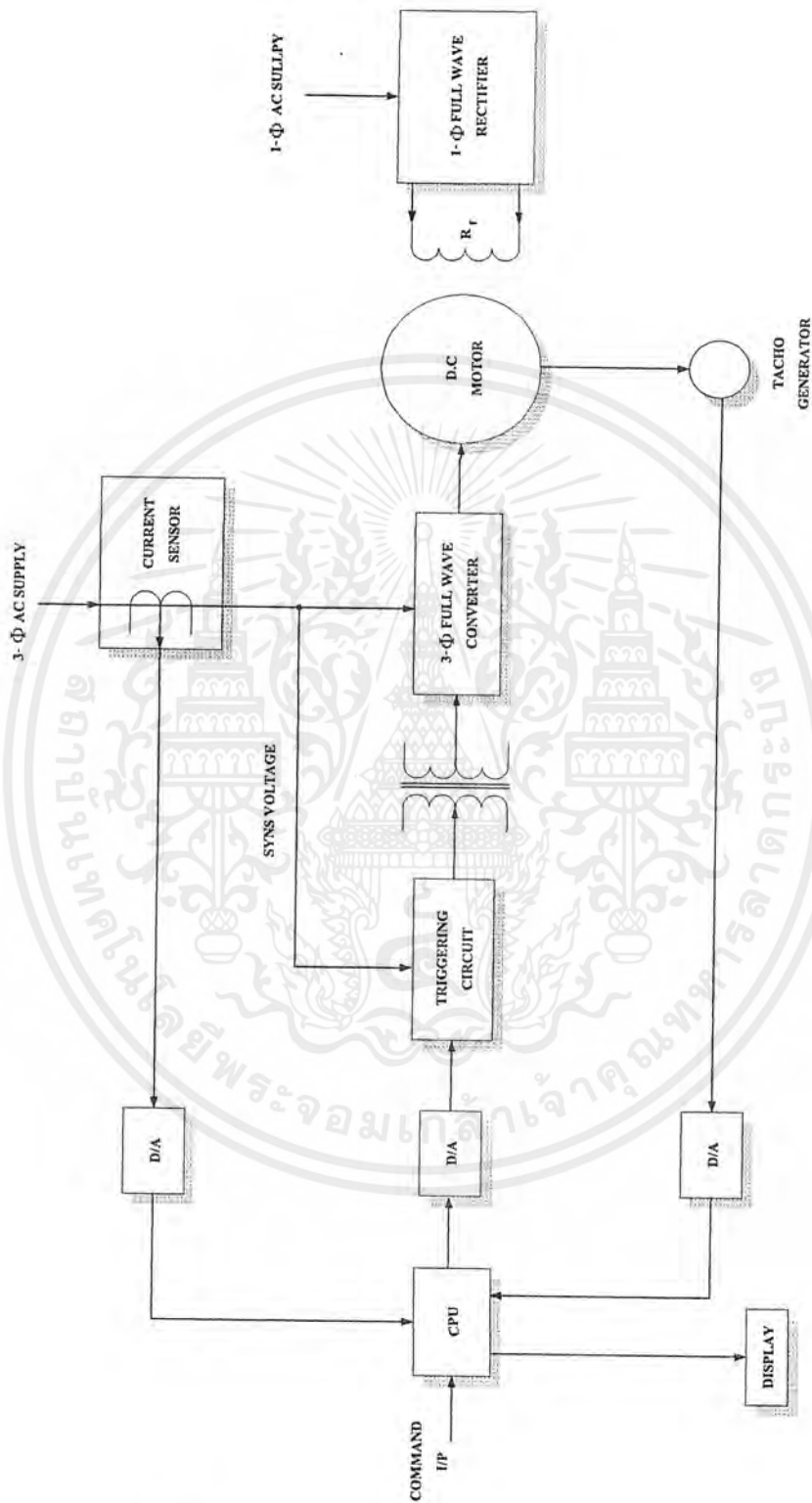
- **Tacho Generator**

เป็นดีซีเจนเนอเรเตอร์ที่ต่อพ่วงกับเพลลาของมอเตอร์ เพื่อสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สัมพันธ์กับความเร็วรอบของมอเตอร์

- **Full Wave Rectifier**

เป็นวงจรเรกติไฟเลอร์ 1 เฟสที่ประกอบด้วยไดโอด 4 ตัว ต่อกันในลักษณะบริดจ์ เพื่อทำหน้าที่ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คงที่ให้ขดลวดฟิลด์ และมีสวิตช์รีเลย์ต่อทำหน้าที่กลับขั้วขดลวดฟิลด์ เมื่อต้องการทำการเบรคมอเตอร์แบบรีเจนเนอเรทีฟ





รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของชุดควบคุมความเร็วรอบของ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

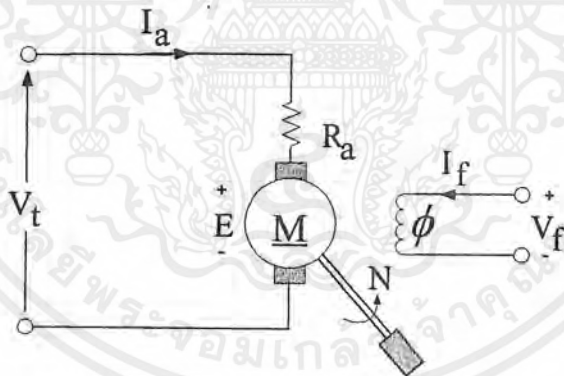
การควบคุมความเร็วรอบและการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยวิธีปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ (V_t) ซึ่งมีกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_f) คงที่ หรือกล่าวได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) มีค่าคงที่ ดังนั้นความเร็วรอบของมอเตอร์ (N) จึงแปรผันโดยตรงกับแรงดันอาร์เมเจอร์ ที่จ่ายออกจากคอนเวอร์เตอร์ตามสมการที่ (2.1)

$$N = \frac{V_t}{(k \cdot \phi)} \quad \dots(2.1)$$

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีวิธีดังนี้

- ปรับกระแสสร้างสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นการปรับเส้นแรงแม่เหล็กนั่นเอง
- ปรับแรงดันอาร์เมเจอร์
- ปรับทั้งกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก และแรงดันอาร์เมเจอร์ร่วมกันก็ได้



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

จากหลักการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้ง 3 แบบ ดังกล่าว เราสามารถพิจารณาได้จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกการกระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีสมการแรงดันอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ

$$V_t = E + I_a \cdot R_a \quad \dots(2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E : แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (EMF) ในอาร์เมเจอร์
 I_a : กระแสอาร์เมเจอร์
 R_a : ความต้านทานของอาร์เมเจอร์

และ
$$E = \frac{\phi \cdot P \cdot Z \cdot N}{60a} \quad \dots(2.3)$$

เมื่อ ϕ : เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก

P : จำนวนขั้วแม่เหล็ก

Z : จำนวนตัวนำทั้งหมดในอาร์เมเจอร์

N : ความเร็วรอบของมอเตอร์

a : จำนวนทางขนานระหว่างแปรงถ่านบวกและลบ

สำหรับมอเตอร์ตัวหนึ่ง ๆ มีค่า Z, a และ P คงที่ ดังนั้นจึงเขียนสมการใหม่ได้คือ

$$E = k \cdot N \cdot \phi \quad \dots(2.4)$$

และ
$$k = \frac{P \cdot Z}{60a} \quad \dots(2.5)$$

แทนสมการที่ 2.4 ลงในสมการที่ 2.2

$$V_t = k \cdot \phi \cdot N + I_a \cdot R_a$$

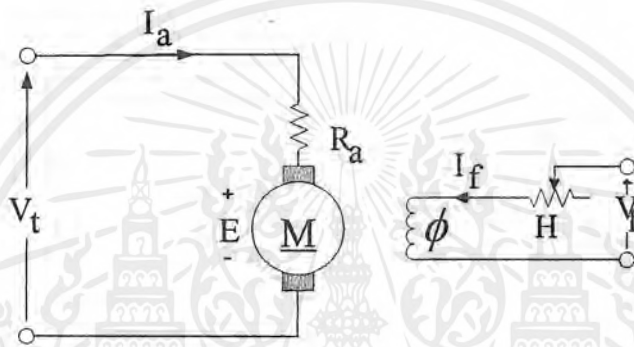
$$N = \frac{V_t - I_a \cdot R_a}{k \cdot \phi} \quad \dots(2.6)$$

ปกติค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในอาร์เมเจอร์มีค่าน้อยกว่า 5 % ของแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (V_t) ถ้าไม่คิด $I_a \cdot R_a$ ในอาร์เมเจอร์จะได้ดังสมการที่ 2.1

พิจารณาสมการที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าความเร็วรอบของมอเตอร์เป็นสัดส่วนโดยประมาณกับแรงดันอาร์เมเจอร์ และเป็นสัดส่วนกับเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นวิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์จึงใช้อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือทั้งสองอย่างร่วมกันดังได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น

2.1 วิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

2.1.1 ปรับกระแสสนามแม่เหล็กหรือปรับเส้นแรงแม่เหล็ก ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ ต่ออนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถใช้ได้กับมอเตอร์แบบแยกการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก มอเตอร์แบบขนาน และมอเตอร์แบบผสมเท่านั้น รูปที่ 2.2 แสดง H เป็นตัวปรับสนามแม่เหล็ก (Field Regulator) ต่ออนุกรมกับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบแยกการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

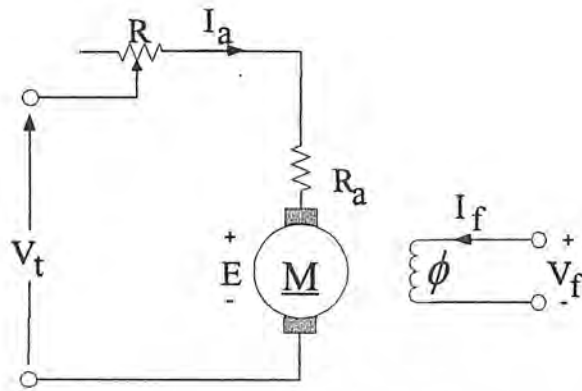


รูปที่ 2.2 วงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยปรับกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

เมื่อปรับค่าความต้านทานของตัวปรับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอาร์เมเจอร์ก็จะลดลง ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านอาร์เมเจอร์ก็ยิ่งมากขึ้น เพื่อสร้างทอร์ก (Torque) แรงความเร็วรอบเพิ่มขึ้น จนกระทั่งทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอาร์เมเจอร์มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (V_t)

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยวิธีนี้สามารถเพิ่มความเร็วรอบได้ เป็น 3 – 4 เท่าของความเร็วรอบที่พิกัดของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Rate Field Current) แต่ไม่สามารถลดความเร็วรอบให้ต่ำกว่าที่พิกัดของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กได้

2.1.2 ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอาร์เมเจอร์ ใช้ความต้านทานปรับค่าได้ หรือตัวควบคุมต่ออนุกรมอาร์เมเจอร์ ดังวงจรในรูปที่ 2.3 การต่อควบคุมในวงจรไฟฟ้าก็เหมือนกับการต่อตัวเริ่มเดิน (Starter) ต่างกันที่ค่าความต้านทานของตัวควบคุมมีขนาดใหญ่กว่า เพื่อทนกระแสอาร์เมเจอร์ได้ตลอดเวลาในขณะที่ใช้งาน ส่วนความต้านทานของตัวเริ่มเดินจะต้องสามารถทนต่อกระแสสูง ๆ ได้ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ในขณะที่เริ่มเดิน โดยไม่เกิดความร้อนมากเกินไป



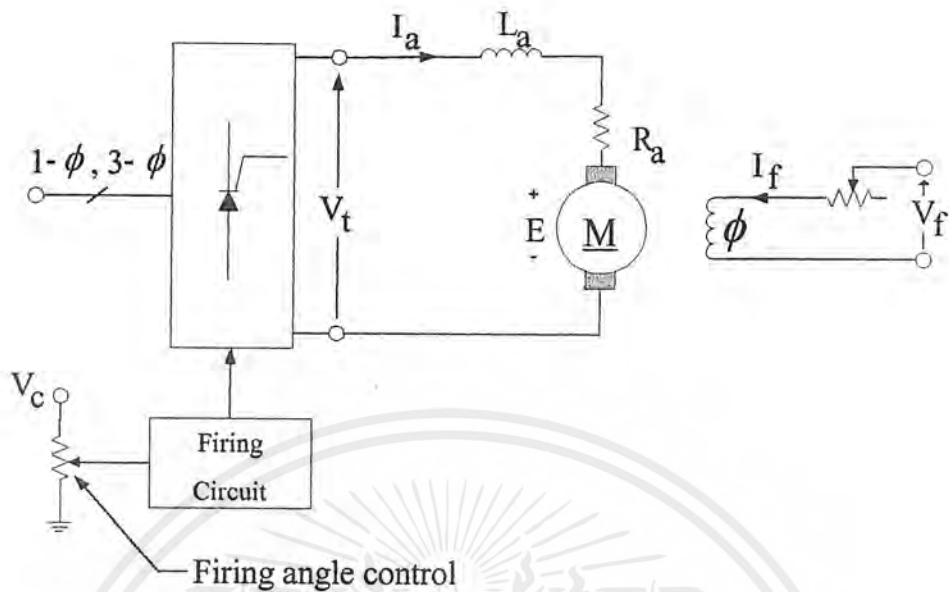
รูปที่ 2.3 วงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอาร์เมเจอร์

การควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ความต้านทานปรับค่าได้ควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์มีข้อเสียหลายอย่างคือ

- ตัวควบคุมมีราคาสูง
- กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์สูญเสียในตัวควบคุมมาก เพราะฉะนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง
- ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงได้ยากมาก เมื่อโหลดของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันตกคร่อมตัวควบคุมเปลี่ยนแปลงตามโหลดของมอเตอร์ จึงมีผลทำให้แรงดันอาร์เมเจอร์เปลี่ยนแปลงด้วย

2.1.3 การใช้คอนเวอร์เตอร์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์แบบวงจรเปิด

เพื่อแก้ปัญหาข้อเสียของวิธีดังกล่าวมาแล้วในข้อ 2.1.2 เราสามารถนำวงจรคอนเวอร์เตอร์มาใช้ควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์แทนตัวต้านทานปรับค่าได้ของตัวควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.4

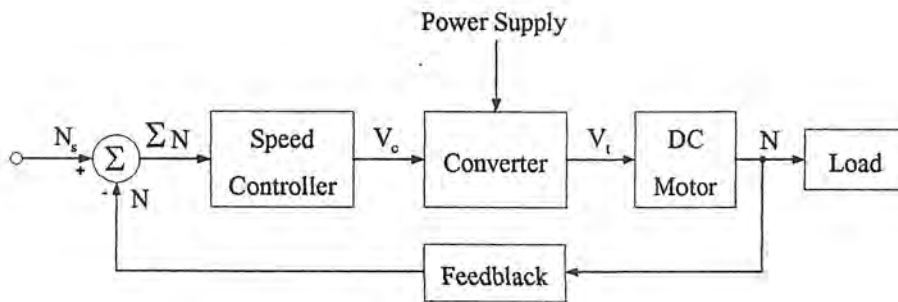


รูปที่ 2.4 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้คอนเวอร์เตอร์ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอาร์เมเจอร์

จากคุณสมบัติของทอร์คและความเร็วรอบของมอเตอร์แบบแยกการกระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็กจะได้ว่า เมื่อโหลดของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์คงที่ก็ตาม ซึ่งยังเป็นข้อเสียของระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด จึงไม่นิยมนำมาใช้ขับมอเตอร์ในงานอุตสาหกรรม

2.1.4 การใช้คอนเวอร์เตอร์ควบคุมแรงดันแบบวงรอบปิด

ในกรณีควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบวงรอบเปิด (Open Loop) มีข้อเสียคือเมื่อโหลดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง ความเร็วรอบของมอเตอร์ก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย ถึงแม้ว่าแรงดันที่อาร์เมเจอร์จะคงที่ก็ตามดังนั้นเมื่อโหลดของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงและต้องการรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ตามที่ได้ปรับค่าไว้ จำเป็นต้องใช้ระบบวงจรถัด (Close Loop) เข้ามาช่วยควบคุม ซึ่งมีหลักการ คือระบบป้อนกลับวงรอบปิดจะควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์ให้เหมาะสมกับทอร์คของโหลดที่เปลี่ยนแปลงไปโดยอัตโนมัติ ทั้งนี้เพื่อรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ตามต้องการ ซึ่งบดบังโคอะแกรมพื้นฐานของระบบควบคุมแบบวงรอบเปิดได้แสดงในรูปที่ 2.5

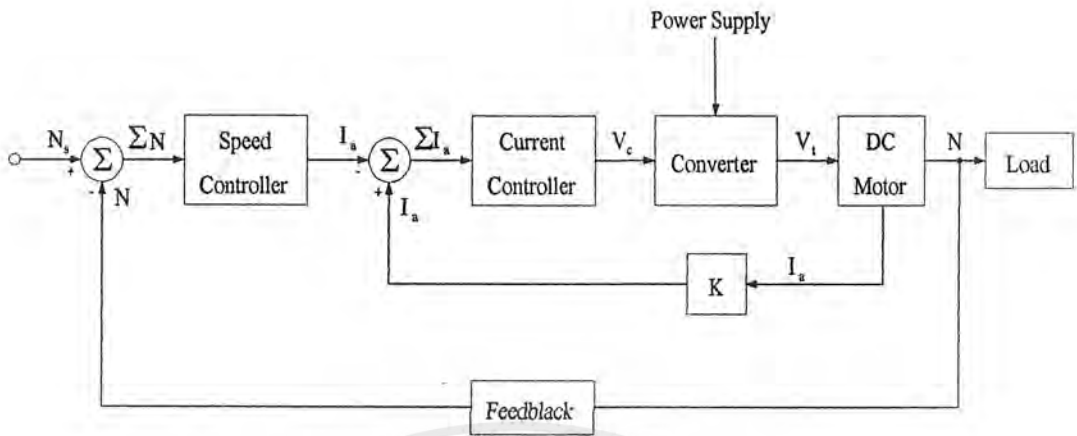


รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิดเบื้องต้น

แผนภาพของระบบควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิดเบื้องต้นในรูปที่ 2.5 สมมติให้โหลดของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงชั่วขณะทำให้ Speed Error (ΣN) เพิ่มขึ้นและสัญญาณควบคุม V_c ลดลง การลดลงของ V_c มีผลทำให้แรงดันอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้น กรณีระบบควบคุมแบบนี้เมื่อ V_c ลดลงจะทำให้มุมทริกของ เอสซีอาร์ลดลงและมีผลทำให้แรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของแรงดันอาร์เมเจอร์ทำให้มอเตอร์สร้างทอร์กมากขึ้น เพื่อดึงความเร็วรอบกลับคืนมาให้เท่าเดิม และเหตุการณ์นี้จะอยู่ในสภาวะชั่วขณะ จนกระทั่งทอร์กที่มอเตอร์สร้างขึ้นนี้ เหมาะสมกับทอร์กของโหลดใหม่ที่เพิ่มขึ้น

การควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิดมีข้อดีหลายประการ เช่น ความแม่นยำ (Accuracy) การตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดดี และการทำงานมีเสถียรภาพสูง (Stability) คุณสมบัติของระบบวงรอบปิดที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์สามารถควบคุมมอเตอร์ทำงานที่ทอร์กคงที่หรือแรงม้าคงที่ได้ นอกจากนี้ระบบวงรอบปิดยังมีการป้องกันกระแสเกินได้ด้วย ส่วนมากแล้วระบบป้อนกลับวงรอบปิดจะใช้ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในงานอุตสาหกรรมกันมาก

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (R_a) และความเหนี่ยวนำ (L_a) ต่ำ ดังนั้นค่า Time Constant ($\tau = L_a / R_a$) ของวงจรมอเตอร์มีค่าต่ำด้วย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอาร์เมเจอร์เพียงเล็กน้อยจึงมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจมีผลทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์เสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มวงรอบกระแสเพื่อจำกัดกระแสมอเตอร์ไม่ให้เกินพิกัดดังแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิด โดยมีวงรอบกระแสภายใน

เอาต์พุตของตัวควบคุมความเร็วรอบ (Speed Controller) แทนค่าทอร์กที่ต้องการเนื่องจากทอร์กเป็นสัดส่วนกับกระแสอาร์เมเจอร์ ดังนั้นเอาต์พุตของตัวควบคุมความเร็วรอบจึงแทนค่ากระแสที่ต้องการ (I_a : Current Demand) เพื่อเปรียบเทียบกับกระแสที่ใช้จริงแล้ว การจำกัดเอาต์พุตของตัวควบคุมความเร็วรอบจึงจำกัดกระแสมอเตอร์ (I_a) ด้วย

2.2 วิธีการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในการที่จะให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหยุดหมุน สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับเป้าหมายของการหยุดว่าต้องการให้เร็วที่สุด หรือถ้าระบบมีการหยุดบ่อยเพื่อลดการสูญเสียพลังงานก็มีวิธีการให้เลือกใช้ตามความเหมาะสมของการเบรกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำได้โดยใช้วิธีการดังนี้

2.2.1 Mechanical Breaking เป็นการใช้ความฝืนทางกลที่เหมือนกับผ้าเบรกของรถยนต์เป็นตัวช่วยทำให้มอเตอร์หยุดได้เร็วขึ้น ซึ่งก่อนทำการเบรกต้องตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ก่อน แล้วจึงทำการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่เบรก ซึ่งในการใช้งานในอุตสาหกรรมใช้ไฟฟ้าป้อนเข้าขดลวด Solenoid เพื่อดึงผ้าเบรกให้กดเข้างานเบรก

วิธีการเบรกแบบนี้ให้ข้อดี คือสามารถออกแบบให้เวลาที่ยังไม่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าตัวมอเตอร์จะเลือกให้เพลาหมุนอิสระได้หรือว่าจะให้เพลาถูก Lock ไม่ให้หมุน แต่ก็มีข้อเสียคือมีความร้อนเกิดขึ้นที่ผ้าเบรกเป็นการสูญเสียที่แปลงรูปจาก Kinetic Energy ของการหมุนมาเป็นการสูญเสียทางกล ถ้าระบบมีค่า Kinetic Energy สูงหรือมีค่า Moment of Inertia สูงมากจะทำให้ผ้าเบรกสึกกร่อนเร็วมาก

2.2.2 Dynamic Breaking เป็นการหยุดมอเตอร์โดยการทำให้เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนการทำงานจากมอเตอร์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจ่ายพลังงานให้ตัวความต้านทานภายนอกที่ต่อคร่อมขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งตัวต้านทานตัวนี้จะทำหน้าที่รับพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องจักรที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วแปลงพลังงานเป็นพลังงานความร้อนสูญเสียออกภายนอก การที่ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำได้เนื่องจากตัวหมุนของเครื่องจักรหมุนอยู่แล้วเพียงแต่ยังคงป้อนกระแสเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ก็จะเกิดแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับของขดลวดอาร์เมเจอร์ (E) ซึ่งเมื่อต่อความต้านทานก็จะมีกระแสไหล โดยลักษณะทิศทางของแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (T_e) จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุน ดังนั้นทั้งมอเตอร์และภาระจะลดความเร็วรอบลง

ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมโดยทั่วไปคือยอมสูญเสียพลังงานทางด้าน Kinetic Energy ที่เปลี่ยนรูปมาเป็นความร้อนที่ตัวความต้านทาน ซึ่งสามารถระบายความร้อนได้ง่ายและรวดเร็ว ยังรวมไปถึงสามารถปรับอัตราการลดความเร็วรอบ ระบบนี้มีข้อเสียคือ เมื่อความเร็วรอบต่ำลงแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กก็จะต่ำลงด้วย

2.2.3 Regenerative Breaking เป็นการเบรกที่อาศัยหลักการทำให้เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนการทำงานจากมอเตอร์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหมือนกับในกรณี Dynamic Breaking แต่ในหลักการนี้พลังงานจลน์จากการหมุนจะแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วคืนกลับสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ดังนั้นระบบนี้จำเป็นต้องมีระบบจ่ายพลังงานที่ทิ้งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ และในทางด้านหลักการแรงดันไฟฟ้าทางด้านเครื่องจักรไฟฟ้าจะต้องสูงกว่าทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ซึ่งสามารถใช้วงจรภายนอกทางด้าน Power Electronic มาช่วยในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า แต่วิธีการนี้มีข้อจำกัดมาก ถ้าพลังงานจลน์มีค่าน้อยก็จะไม่คุ้มค่าในการลงทุน

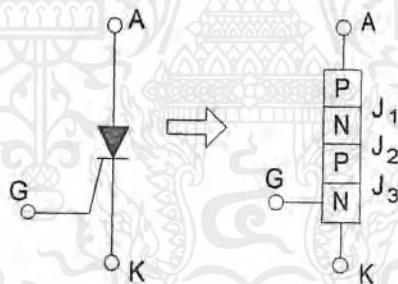
บทที่ 3

เอสซีอาร์

เอสซีอาร์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่งในกลุ่มของทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีใช้กันอย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เอสซีอาร์มีหลักการทำงานเหมือนกับสวิตช์ 2 สถานะ คือ นำกระแสกับไม่นำกระแส จึงสามารถสมมติได้ว่าเป็นสวิตช์ในอุดมคติสำหรับงานทั่วไป แต่ในทางปฏิบัติเอสซีอาร์ยังมีคุณสมบัติบางอย่างที่ตายตัวและมีข้อจำกัด

3.1 ลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

เอสซีอาร์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ 4 ชั้น คือ P-N-P-N จึงมีรอยต่อพี-เอ็นอยู่ 3 รอยต่อ เอสซีอาร์มีขาใช้งาน 3 ขา คือ แอโนด (Anode) แคโทด (Cathode) และเกต (Gate) ดังรูป 3.1 แสดงสัญลักษณ์ และภาพตัดแสดงรอยต่อพี-เอ็นทั้งสามรอยต่อ เอสซีอาร์สร้างมาจากกระบวนการดิฟฟิวส์ชัน (Diffusion)

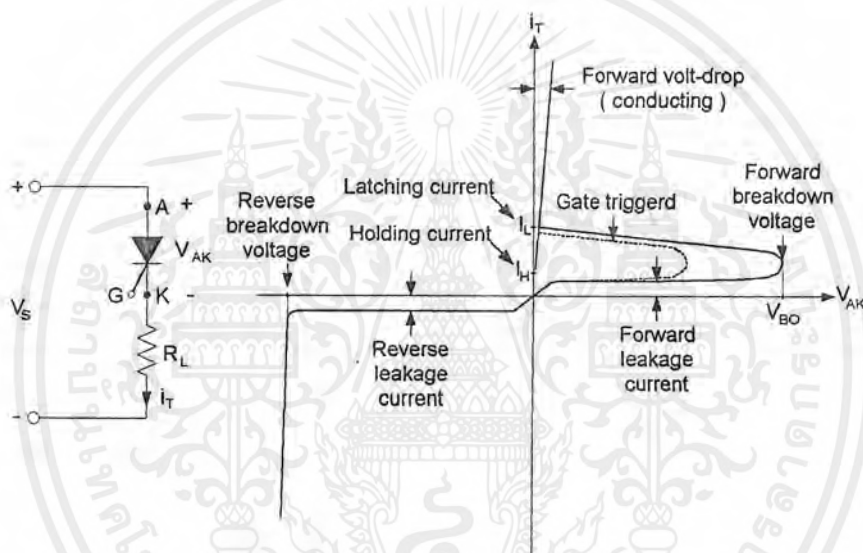


รูปที่ 3.1 แสดงสัญลักษณ์และรอยต่อพี-เอ็นทั้งสามของเอสซีอาร์

เมื่อแรงดันที่ขาแอโนดเป็นบวกเมื่อเทียบกับแคโทดรอยต่อ J_1 และ J_3 จะถูกไบแอสตรง และ J_2 จะเป็นไบแอสกลับ โดยมีกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากแอโนดไปแคโทดเอสซีอาร์ที่มีสถานะนี้เรียกว่า สถานะบล็อกกิง (Forward Blocking หรือ Off-State) ขณะไบแอสตรงหรือสถานะออฟ และเรียกระแสรั่วไหลว่า กระแสออฟสเตต (Off-State Current, I_D) ถ้าแรงดันที่แอโนดเทียบกับแคโทด (V_{AK}) มีค่าสูงขึ้นถึงจุดจุดหนึ่ง จนทำให้รอยต่อ J_2 พัง เราเรียกว่า การพังแบบอะวาแลนซ์ และเรียกแรงดันขณะนั้นว่า แรงดันพังทะลายขณะไบแอสตรง (V_{BO}) เนื่องจากรอยต่อ J_1 และ J_3 มีการไบแอสตรงอยู่แล้วจึงมีประจุอิสระเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อทั้งสาม ส่งผลให้มีกระแสแอโนดไหลเป็นจำนวนมาก เอสซีอาร์จะอยู่ในสถานะนำกระแสหรือ ON แรงดันตกคร่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความต้านทานในชั้นทั้ง 4 ชั้นที่มีค่าน้อยประมาณ 1 โวลต์ สถานะนำกระแสกระแสแอโนดจะถูกจำกัด โดยความต้านทานภายนอก R_L ดังรูป 3.2 กระแสแอโนดต้องมีค่ามากกว่าค่าหนึ่งคือกระแสแลตซิ่งหรือกระแสค้ำ (Latching Current, I_L) เพื่อที่จะรักษาปริมาณประจุที่ไหลผ่านรอยต่อให้เพียงพอ นอกจากนี้เอสซีอาร์จะกลับไปสถานะบล็อกกิง เมื่อแรงดันระหว่างแอโนดและแคโทดมีค่าลดลง กระแสแลตซิ่ง (I_L) คือกระแสแอโนดต่ำสุดที่ยังทำให้เอสซีอาร์อยู่ในสถานะนำกระแสทันทีภายหลังที่เอสซีอาร์นำกระแสเมื่อได้รับสัญญาณทรiggerที่ขาเกตลักษณะทั่วไปทางกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์แสดงในรูป 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์

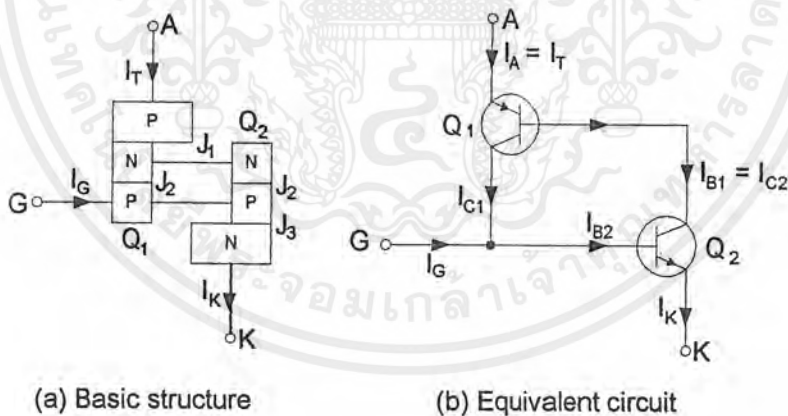
ครั้งแรกที่เอสซีอาร์นำกระแส มันจะมีลักษณะเหมือนการนำกระแสของไดโอดและไม่สามารถควบคุมได้ จะยังคงนำกระแสต่อไป เพราะไม่มีชั้นของดีพลีชันบนรอยต่อ J_2 เนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุอิสระ อย่างไรก็ตาม ถ้ากระแสแอโนดเมื่อได้รับไบแอสตรงลดลงจนต่ำกว่าระดับหนึ่งซึ่งเรียกว่า กระแสโฮลดิ้งหรือกระแสยึด (Holding Current, I_H) จะเกิดช่วงดีพลีชันรอบรอยต่อ J_2 เนื่องจากการลดจำนวนลงของประจุ และเอสซีอาร์จะอยู่ในสถานะบล็อกกิง กระแสโฮลดิ้งอยู่ในหน่วยมิลลิแอมแปร์ และน้อยกว่ากระแสแลตซิ่ง (I_L) นั่นคือ $I_L > I_H$ กระแสโฮลดิ้ง (I_H) คือกระแสแอโนดที่น้อยที่สุด ที่ยังทำให้เอสซีอาร์อยู่ในสถานะนำกระแสปกติค่ากระแสโฮลดิ้งน้อยกว่ากระแสแลตซิ่ง

เมื่อแรงดันแคโทดเป็นบวก เมื่อเทียบกับแอโนดรอยต่อ J_2 เป็นไบแอสตรง แต่ J_1 , J_2 เป็นไบแอสกลับ เหมือนกับไดโอด 2 ตัวต่ออนุกรมกัน มีแรงดันกลับตกคร่อมอยู่ ทำให้เอสซีอาร์อยู่ในสถานะบล็อกกิง และกระแสรั่วไหลย้อนกลับเรียกว่า กระแสย้อนกลับ (I_r) ไหลผ่านเอสซีอาร์

เอสซีอาร์สามารถจะนำกระแสโดยการเพิ่มแรงดันไบแอสตรง (V_{AK}) ให้มากกว่า V_{BO} แต่สถานะนี้อาจทำให้เอสซีอาร์ถูกทำลายได้โดยในทางปฏิบัติ ดังนั้นแรงดันไบแอสตรงจะต้องต่ำกว่า V_{BO} เอสซีอาร์นำกระแสได้โดยการป้อนแรงดันบวกที่เกิดเมื่อเทียบกับแคโทด ดังแสดงในรูป 3.2 โดยเส้นประ ครั้งแรกที่เอสซีอาร์นำกระแส โดยมีสัญญาณทริกที่ขาเกตและกระแสแอโนดมากกว่ากระแสไฮลด์คิง เอสซีอาร์ยังคงนำกระแสเนื่องจากการป้อนกลับแบบบวก แม้ว่าจะนำสัญญาณเกตออกไปแล้วก็ตาม

3.2 แบบจำลองของเอสซีอาร์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว

ปรากฏการณ์รีเจนเนอเรทีฟหรือแลตซิง เนื่องจากการป้อนกลับแบบบวก สามารถอธิบายได้โดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวมาเป็นแบบจำลอง เอสซีอาร์สามารถพิจารณาได้ว่ามีคอมพลีเมนทารีทรานซิสเตอร์ 2 ตัว คือ Q_1 เป็นแบบ PNP และ Q_2 เป็นแบบ NPN แสดงในรูป 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองของเอสซีอาร์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว

กระแสคอลเลกเตอร์ (I_C) ของเอสซีอาร์สัมพันธ์กับกระแสอิมิตเตอร์ (I_E) และกระแสรั่วไหลระหว่างรอยต่อคอลเลกเตอร์กับเบส (I_{CBO}) คือ

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad \dots (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอัตราขยายกระแส นิยามว่า $\alpha \cong I_C / I_E$ สำหรับทรานซิสเตอร์ Q_1 กระแสอิมิตเตอร์ คือกระแสแอสโนด (I_A) และกระแสคอลเลกเตอร์ (I_{C1}) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} \quad \dots (3.2)$$

เมื่อ α_1 คืออัตราขยายกระแส และ I_{CBO1} คือกระแสรั่วไหลของ Q_1 และในทำนองเดียวกันกับ Q_2 ค่า I_{C2} หาได้จากสมการที่ 3.3

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \quad \dots (3.3)$$

เมื่อ α_2 คืออัตราขยายกระแส และ I_{CBO2} คือกระแสรั่วไหลของ Q_2 โดยการรวม I_{C1} กับ I_{C2} จะได้

$$\begin{aligned} I_A &= I_{C1} + I_{C2} \\ &= \alpha_1 I_A + I_{CBO1} + \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \end{aligned} \quad \dots (3.4)$$

แต่สำหรับกระแสเกต $I_G, I_K = I_A + I_G$ และแก้สมการที่ 3.4 จะได้ I_A เท่ากับ

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad \dots (3.5)$$

อัตราขยายกระแส α_1 แปรผันตามกระแสอิมิตเตอร์ $I_A = I_E$ และ α_2 แปรผันกับ $I_K = I_A + I_G$ โดยทั่วไปการแปรผันของอัตราขยายกระแส α กับกระแสอิมิตเตอร์ (I_E) คือถ้ากระแสเกต (I_G) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะทำให้กระแสแอสโนด (I_A) เพิ่มขึ้นทันทีทันใด ซึ่งจะทำให้ α_1 และ α_2 เพิ่มขึ้นด้วย α_2 ขึ้นกับ I_A, I_G การเพิ่มขึ้นของ α_1 และ α_2 จะทำให้ I_A เพิ่มขึ้นมาก ดังนั้นนี่คือผลกระทบของรีเจนเนอเรทีฟ หรือป้อนกลับแบบบวก ถ้า $\alpha_1 + \alpha_2$ มีค่าเท่ากับหนึ่ง ตัวหารของสมการที่ 3.5 จะมีค่าเข้าใกล้ 0 ทำให้ I_A เพิ่มขึ้นมากมายและเอสซีอาร์จะนำกระแสด้วยกระแสเกตเพียงเล็กน้อย

ภายใต้สภาวะชั่วคราว ค่าความจุของรอยต่อพี-เอ็น แสดงในรูป 3.4 มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเอสซีอาร์ ถ้าเอสซีอาร์อยู่ในสถานะบล็อกกิงแล้วให้แรงดันคร่อมเอสซีอาร์เพิ่มขึ้นอย่าง

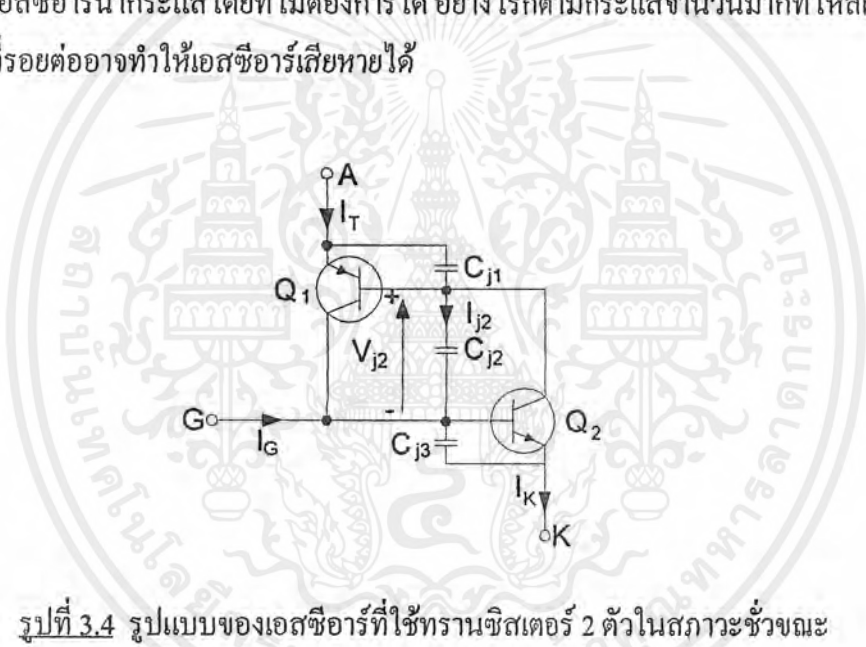
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทฤษฎีของหลอดกึ่งตัวนำ พะจอบเกลาหลอดกระบัง

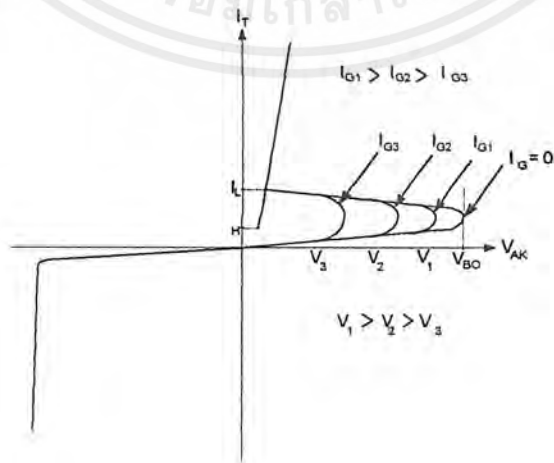
รวดเร็ว จะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านตัวเก็บประจุที่รอยต่อ ซึ่งกระแสผ่าน C_{j2} สามารถแสดงได้ว่า

$$i_{j2} = \frac{d(q_{j2})}{dt} = \frac{d(C_{j2}V_{j2})}{dt} \quad \dots (3.6)$$

เมื่อ C_{j2} และ V_{j2} เป็นค่าความจุและแรงดันของรอยต่อ J_2 ตามลำดับ q_{j2} คือประจุของรอยต่อ ถ้าอัตราการเพิ่มของแรงดัน dv/dt มีค่ามากแล้ว I_{j2} จะมีค่ามากขึ้น และจะทำให้กระแสรั่วไหล I_{CBO1} และ I_{CBO2} มีค่าสูงขึ้น ถ้าค่าของ I_{CBO1} และ I_{CBO2} มีค่าสูงพออาจทำให้ค่า $(\alpha_1 + \alpha_2)$ มีค่าใกล้ 1 และทำให้เอสซีอาร์นำกระแสโดยที่ไม่ต้องการได้ อย่างไรก็ตามกระแสจำนวนมากที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่รอยต่ออาจทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้



รูปที่ 3.4 รูปแบบของเอสซีอาร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวในสถานะชั่วขณะ



รูปที่ 3.5 ผลของกระแสเกต ต่อแรงดันบัสล็อกกิ่งด้านไบแอสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การนำกระแสของเอสซีอาร์

เอสซีอาร์อาจจะนำกระแสโดยการเพิ่มกระแสแอโนด ซึ่งจะสำเร็จได้โดยวิธีใดวิธีหนึ่ง ดังนี้

อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิของเอสซีอาร์สูงขึ้นจะทำให้จำนวนอิเล็กตรอน-โฮล สูงขึ้นจะทำให้กระแสรั่วไหลมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ α_1 และ α_2 เพิ่มขึ้นและเนื่องจากปรากฏการณ์รีเจนเนอเรทีฟ ($\alpha_1 + \alpha_2$) มีแนวโน้มเท่ากับ 1 และเอสซีอาร์นำกระแสเนื่องจากอุณหภูมินี้ ทำให้เกิดความร้อนสูง ควรหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิด

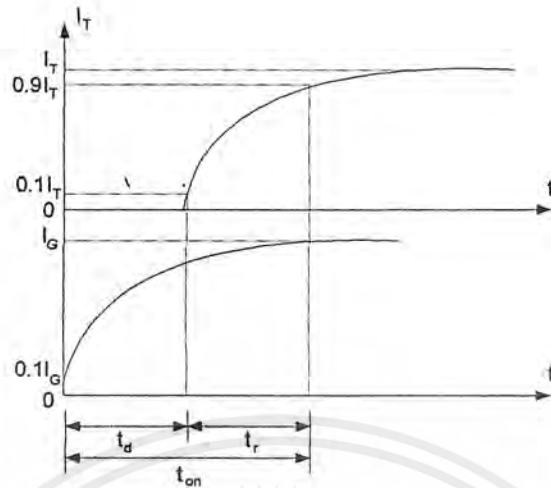
แสง ถ้ามีแสงตกบนรอยต่อของเอสซีอาร์ ทำให้คู่อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น เอสซีอาร์อาจนำกระแสได้ ซึ่งเกิดจากแสงตกกระทบชั้นชิลิคอนของเอสซีอาร์

แรงดันสูง ถ้าแรงดันไบแอสตรงที่จ่ายให้กับแอโนด-แคโทด มีค่าสูงกว่าแรงดันพังทลาย (V_{BO}) ค่ากระแสรั่วไหลจะกระตุ้นให้เกิดนำกระแสแบบรีเจนเนอเรทีฟ การนำกระแสแบบนี้ อาจทำให้เอสซีอาร์เสียหาย ควรหลีกเลี่ยง

dv/dt จากสมการที่ 3.6 จะได้ว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์ (V_{AK}) มีค่าสูงกระแสขาร์จของตัวเก็บประจุที่รอยต่ออาจมีค่าสูงจนทำให้เอสซีอาร์นำกระแสได้ และอาจทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้ ผู้ผลิตควรระบุค่า dv/dt ของเอสซีอาร์สูงสุดที่ยอมรับได้

กระแสเกต ถ้าเอสซีอาร์มีการไบแอสตรง และมีกระแสเกตไหลโดยการป้อนแรงดันบวกที่เกิดเมื่อเทียบกับแอโนด จะเป็นการทำให้เอสซีอาร์นำกระแสขณะที่กระแสเกตเพิ่มขึ้นกระแสบลิ๊ตอกกิ่งไบแอสตรงจะลดลง ดังรูป 3.5

ส่วนรูปที่ 3.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสแอโนดเมื่อป้อนกระแสเกต จะมีช่วงเวลาหนึ่งเรียกว่า ช่วงเวลานำกระแส (t_{on}) ระยะเวลาการป้อนสัญญาณเกต และการนำกระแสของเอสซีอาร์ t_{on} นิยามว่า เป็นช่วงเวลาระหว่าง 10 % ของกระแสเกตที่สถานะคงตัว ($0.1I_G$) กับ 90 % ของกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ที่สถานะคงตัว ($0.9I_G$) t_{on} คือผลบวกของเวลาประวิง (t_d) และช่วงเวลายื่น (t_r) โดย t_d คือช่วงเวลาระหว่าง 10 % ของกระแสเกต ($0.1I_G$) และ 10% ของกระแสที่สถานะออกของเอสซีอาร์ ($0.1I_L$) t_r คือเวลาที่ใช้สำหรับกระแสแอโนดในการเพิ่มจาก 10 % ของกระแสสถานะออก ($0.1I_L$) ไปถึง 90 % ของกระแสสถานะออก ($0.9I_L$) ซึ่งเวลาทั้งหมดได้แสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงคุณลักษณะของเวลาในการนำกระแสของเอสซีอาร์

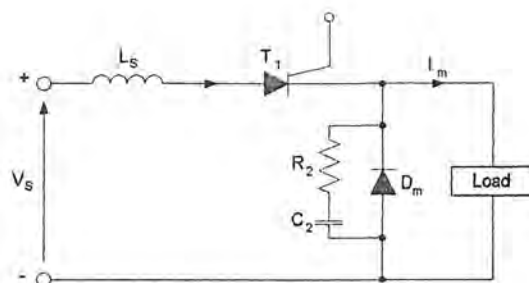
3.4 การป้องกัน di/dt

เอสซีอาร์ใช้เวลาน้อยที่สุดในการแพร่กระแสไฟฟ้าให้ทั่วทั้งรอยต่อ ถ้าอัตราการเพิ่มของกระแสแอมแปร์เร็วมาก เมื่อเทียบกับความเร็วในการแพร่ในกระบวนการนำกระแส จะเกิดจุดของความร้อน (Hot-Spot) ความร้อนจะเกิดขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นกระแสมีมากเอสซีอาร์อาจเสียหายได้เนื่องจากอุณหภูมิสูงเกินไป เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลามากเกินไป

ในทางปฏิบัติต้องป้องกันค่า di/dt ที่สูงเกินไป พิจารณาวงจรรูป 3.7 ภายใต้สถานะคงตัว D_m นำกระแสเมื่อเอสซีอาร์ T_1 ไม่นำกระแส ถ้า T_1 ใหม้ เมื่อ D_m ยังคงนำกระแส di/dt จะมีค่าสูง และสามารถจำกัดได้โดยเพิ่มค่าอินดักแตนซ์ของวงจร ในทางปฏิบัติ di/dt จะลดลงโดยการต่ออนุกรมตัวเหนี่ยวนำ L_s ดังรูป 3.7

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_s}{L_s} \quad \dots (3.7)$$

ขณะที่ L_s คือตัวเหนี่ยวนำรวม



รูปที่ 3.7 วงจรสับไฟฟ้าที่มีตัวเหนี่ยวนำจำกัดค่า di/dt

3.5 การป้องกัน dv/dt

dv/dt หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์ต่อเวลา ถ้าสวิทช์ S_1 ดังรูป 3.8(a) ปิดที่เวลา $t = 0$ จะมีแรงดันสแตปปีออนคร่อมเอสซีอาร์ T_1 และ dv/dt อาจมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้นำกระแสได้ dv/dt จะถูกจำกัดโดยการต่อ C_s ดังรูป 3.8(a) เมื่อเอสซีอาร์ T_1 นำกระแส การดิสชาร์จของ C_s จะถูกจำกัดโดย R_s ดังรูป 3.8(b) การต่อ R_s และ C_s เข้าไปขนานกับเอสซีอาร์นี้ เรียกว่า วงจรสับเบอร์ (Snubber circuit)

เมื่อนำวงจร RC ที่รู้จักในชื่อวงจรสับเบอร์เพิ่มเข้าไปป้องกันเอสซีอาร์ แรงดันตกคร่อมเอสซีอาร์จะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังรูป 3.8(c) และวงจร dv/dt หาได้จาก

$$\frac{dV}{dt} = \frac{0.632V_s}{\tau} = \frac{0.632V_s}{R_s C_s} \quad \dots (3.8)$$

ค่าคงที่เวลาของสับเบอร์ $\tau = R_s C_s$ หาได้จากสมการ 3.8 สำหรับ dv/dt ค่า R_s จะหาจากกระแสดิสชาร์จ (I_{TD})

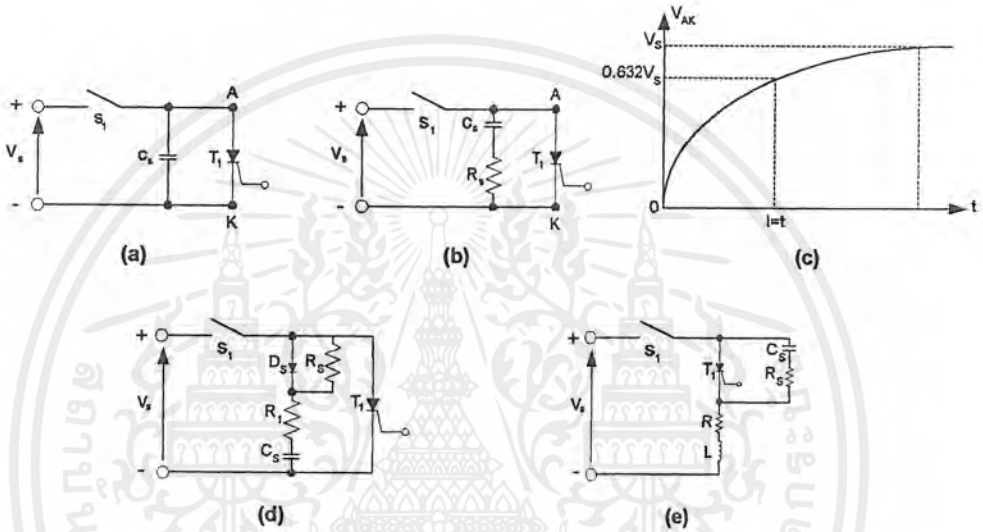
$$R_s = \frac{V_s}{I_{TD}} \quad \dots (3.9)$$

เป็นไปได้ที่จะต้องใช้ความต้านทานมากกว่า 1 ตัว สำหรับ dv/dt และดิสชาร์จ ดังรูป 3.8(d) ค่า dv/dt จำกัดโดยค่า R_1 และ $C_s (R_1 + R_2)$ จำกัดกระแสดิสชาร์จ เพื่อให้โหลดสามารถต่ออนุกรมกับวงจรสับเบอร์ ดังรูป 3.8(e) ค่า I_{TD} หาได้จากสมการที่ 3.10 และอัตราการหน่วง (δ) ของสมการอันดับสอง คือ สมการที่ 3.11 เมื่อ L_s คือตัวเหนี่ยวนำรวม และ L คือตัวเหนี่ยวนำโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{TD} = \frac{V_s}{R_1 + R_2} \quad \dots (3.10)$$

$$\delta = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R_s + R}{2} = \sqrt{\frac{C_s}{L_s + L}} \quad \dots (3.11)$$



รูปที่ 3.8 วงจรป้องกัน dv/dt ด้วยสแน็บเบอร์

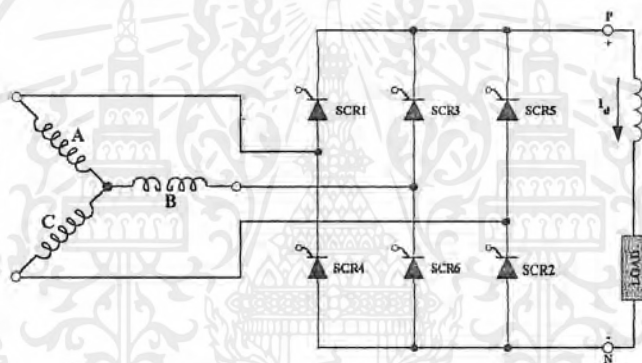
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

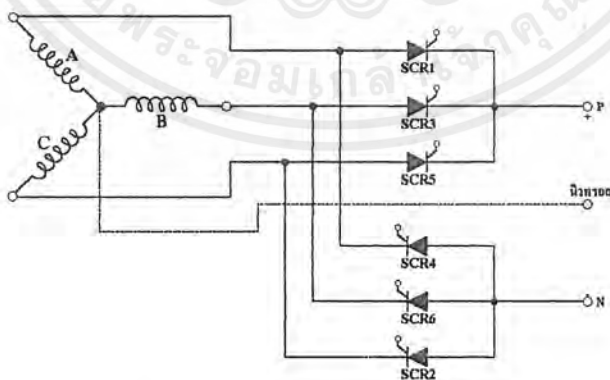
วงจร 3 เฟสฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมเฟสได้

4.1 หลักการทำงานพื้นฐานของวงจร

วงจร 3 เฟสฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมเฟสได้ จะใช้เอสซีอาร์ 6 ตัวต่อกัน ในลักษณะบริดจ์ดังรูปที่ 4.1(a) ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 4.1(b) การเขียนวงจรใหม่ในลักษณะนี้เพื่อเน้นให้เห็นว่าวงจรนี้ประกอบด้วยวงจรฮาล์ฟเวฟ 2 วงจรต่ออนุกรมกันอยู่โดยที่กลุ่มบนจะต่อแคโทดรวมกันไว้และทำงานในลักษณะปกติ ถ้ามุมทริก(α) เท่ากับ 0 องศา เอสซีอาร์ตัวที่มีแอมโวลต์เตจหรือ โวลต์เตจเป็นบวกมากที่สุดจะนำกระแสและจะให้เอาต์พุต



(a) ลักษณะวงจรทั่วไป

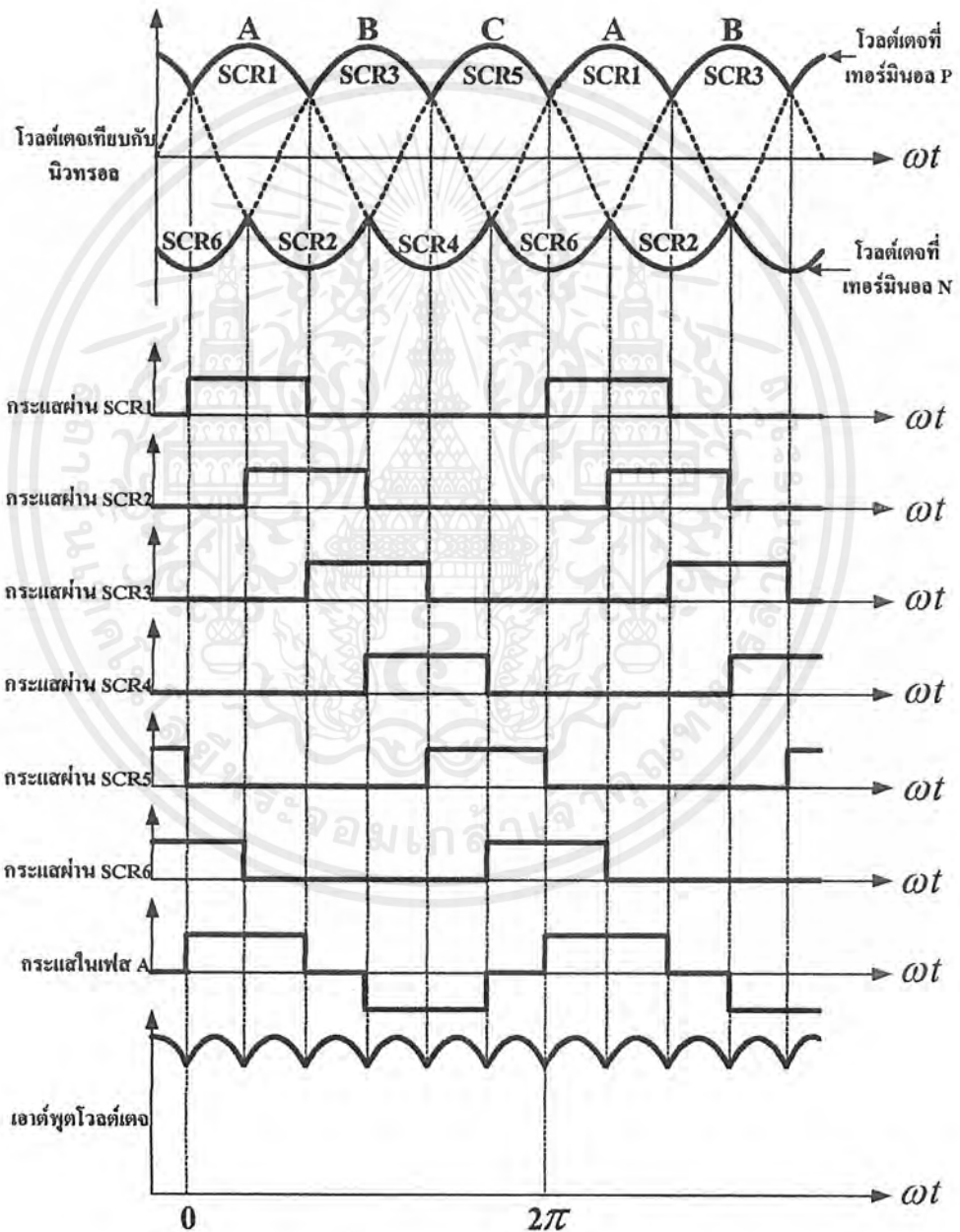


(b) วงจรฮาล์ฟเวฟ 2 วงจรซึ่งเขียนจากรูปที่ (a)

รูปที่ 4.1 วงจร 3 เฟสฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมเฟสได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์เดจที่เทอร์มินอล P เมื่อเทียบกับนิวทรัล สำหรับวงจรสามเฟสเฟในกุ่มล่างจะต่อแอนโคร่วมกันไว้และเอสซีอาร์ตัวที่มีแอนโคโนโวลต์เดจหรือโวลต์เดจเป็นลบมากที่สุดจะนำกระแสและเทอร์มินอล N จะเป็นลบเมื่อเทียบกับนิวทรัล แรงดันไฟฟ้าที่เทอร์มินอล P จึงมีลักษณะเหมือนส่วนบนของรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตโวลต์เดจ ขณะที่เทอร์มินอล N จะมีลักษณะเหมือนส่วนล่างของรูปคลื่นสัญญาณอินพุตโวลต์เดจ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณ โวลต์เดจและกระแสของวงจร 3 เฟสฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์ (กรณี $\alpha = 0$ และคอมมิวเตตดิ้งรีเอ็คแตนซ์เท่ากับ 0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านนิวทรอลหักล้างซึ่งกันและกัน การใช้นิวทรอลจึงไม่จำเป็นอีกต่อไป
เอาต์พุตโวลต์เตจระหว่างเทอร์มินอล P และ N คือระยะห่างระหว่างแนวตั้งระหว่างส่วนบนและ
ส่วนล่างของรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตโวลต์เตจในรูปที่ 4.2 ดังนั้นเอาต์พุตโวลต์เตจ
จึงประกอบขึ้นจากส่วนต่างๆของรูปคลื่น 3 เฟส ระหว่างลายน์ และริบเปิลจะมีลักษณะของคลื่น 6
เฟส เอาต์พุตโวลต์เตจเฉลี่ยจะเป็น 2 เท่าของกรณีสองเฟส 3 เฟสฮาล์ฟเวฟ ดังนั้นเมื่อไม่คิดการโอเวอร์
แล็ป (Overlap) และให้มุม $\alpha = 0$ จะได้เอาต์พุตโวลต์เตจโดยเฉลี่ย (V_{do}) ดังสมการที่ 4.1

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_{ph} = 2.34V_{ph} = 1.35V_L \quad \dots (4.1)$$

เมื่อ V_{ph} : แรงดันเฟส ค่าอาร์เอ็มเอส

V_L : แรงดันลายน์ ค่าอาร์เอ็มเอส

เอสซีอาร์แต่ละตัวจะให้กระแสดี.ซี. (I_d) ไหลผ่านได้นานสุดเป็นมุม $\alpha = 120^\circ$ ของ
แต่ละไซเคิล และ ณ. ทุกๆขณะจะมีเอสซีอาร์ 2 ตัวนำกระแสพร้อมกันเสมอเพื่อให้ครบวงจร ช่วง
การนำกระแสของเอสซีอาร์ในกลุ่มบนและกลุ่มล่างจะไม่ตรงกัน สำหรับเฟสในลำดับ A,B,C เอสซี
อาร์จะนำกระแสเป็นคู่ๆ คือ SCR_1 กับ SCR_2 , SCR_2 กับ SCR_3 , SCR_3 กับ SCR_4 , SCR_4 กับ SCR_5 ,
 SCR_5 กับ SCR_6 และ SCR_6 กับ SCR_1 ซึ่งหมายเลขที่เขียนกำกับไว้ในรูปที่ 4.2 จะตรงกับลำดับใน
การนำกระแสของเอสซีอาร์ การคอมมิวเตทจะเกิดขึ้นทุกๆ 60° และจะเกิดขึ้นสลับกันระหว่างกลุ่ม
บนและกลุ่มล่างของเอสซีอาร์ สำหรับกรณีที่โหลดมีอินดักแตนซ์ (Inductance) มากพอที่จะทำให้
กระแสเอาต์พุต (I_d) มีลักษณะเรียบและต่อเนื่องแล้ว กระแสซึ่งไหลผ่านเอสซีอาร์และกระแสเอ.ซี.
ในลายน์จะมีลักษณะรูปสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.2 และจะไม่มีองค์ประกอบของกระแสดี.ซี. ปรา
กฏใน เอ.ซี.ลายน์

เมื่อมุม $\alpha > 0$ เอาต์พุตโวลต์เตจจะมีลักษณะเปลี่ยนไป และจะได้เอาต์พุตโวลต์เตจเฉลี่ย
ดังสมการที่ 4.2

$$V_d = V_{do} \cos \alpha \quad \dots (4.2)$$

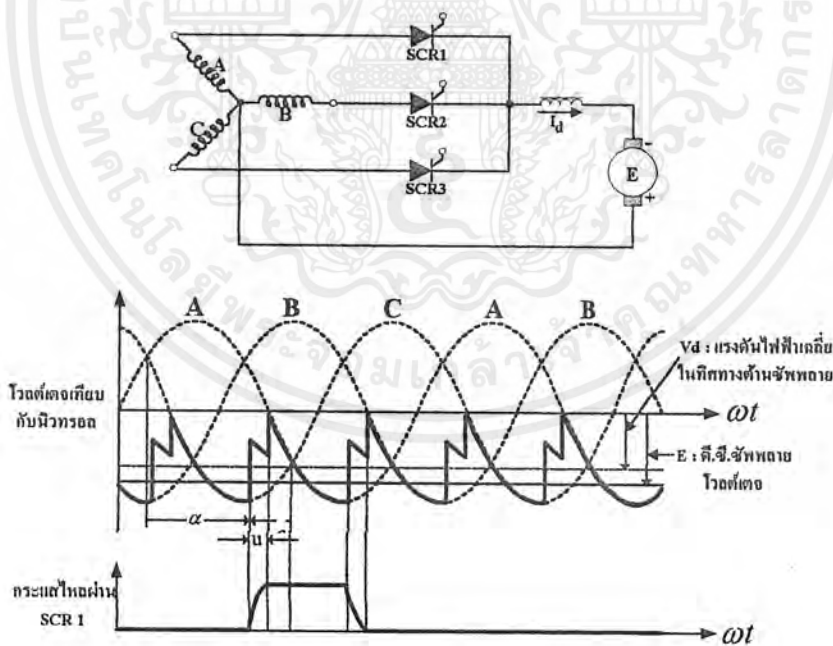
และในกรณีที่มิโอเวอร์แล็ปด้วยนั้นเอาต์พุตโวลต์เตจจะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปอีก
โดยที่โวลต์เตจจะลดลงไปอีกด้วยขนาด $\frac{3I_d \cdot X}{\pi}$ เมื่อ X คือ ทิเกลรีแอนด์แดนซ์สมมูลย์หรือรีแอ็ค

แดนซ์สำหรับการคอมมิวเตท ซึ่งจะเป็น 2 เท่าของกรณีสองเฟส 3 เฟสฮาล์ฟคอนเวอร์เตอร์ และการ
ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ของวงจร 3 เฟสฟูลเวฟคอนเวอร์เตอร์นี้จะทำได้เมื่อมุม $\alpha > 90^\circ$ ขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์

ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงการกลับทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้ โดยการกลับทิศทางการไหลของกระแส หรือกลับขั้วของโวลต์เดจอย่างใดอย่างหนึ่ง สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดที่ควบคุมเฟสได้นั้นจะใช้วิธีหลัง ทั้งนี้เพราะวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้จะให้กระแสไหลได้ทางเดียวเท่านั้น ในโหมดเรกติไฟเลอร์นั้นแต่ละเฟสของ เอ.ซี. ซัพพลายจะจ่ายกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ในขณะที่แอนโอดโวลต์เดจหรือโวลต์เดจเป็นบวก กระแสซึ่งไหลผ่านเอสซีอาร์จะไหลผ่านจะไหลจากแอนโอดไปยังแคโทดและพลังงานจะไหลกลับทิศได้ ถ้า เอ.ซี. ซัพพลายจ่ายกระแสในช่วงแอนโอดโวลต์เดจเป็นลบเท่านั้นซึ่งสามารถทำได้โดยวิธีหน่วงการคอมมิวเตทจนกระทั่งแอนโอดโวลต์เดจอยู่ในช่วงลบพร้อมกันนั้นจะบังคับให้กระแสไหลในทิศทางตรงกันข้ามเฟสโวลต์เดจที่เป็นลบ แหล่งกำเนิด ดี.ซี. ที่สร้างกระแสจำนวนนี้จะจ่ายพลังงานย้อนกลับเข้า เอ.ซี. ซัพพลาย และจะได้การทำงานในลักษณะอินเวอร์เตอร์ โดยที่การคอมมิวเตจจะต้องเริ่มขึ้นที่มุม $\alpha > 90^\circ$ ขึ้นไป และขณะนี้เอาต์พุตโวลต์เดจเฉลี่ย (V_d) ในสมการที่ 4.2 จะมีค่าเป็นลบ โวลต์เดจและกระแสในกรณีนี้สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรพื้นฐานและลักษณะรูปคลื่นสัญญาณการทำงาน โหมดอินเวอร์เตอร์ซึ่งใช้วิธี

ของการควบคุมเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งกระแส I_d มีลักษณะเรียบและคงที่ได้ด้วย คือ ซี.อินดักเตอร์ที่ต่ออยู่ จุดนิวทรอลของหม้อแปลง ขณะนี้จะเป็น ซี.ซี.เทอร์มินอลบวก และ ซี.ซี. ชัฟฟลายโวลต์เตจ (E) จะมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของ แรงดันไฟฟ้าสวน (V_d) ด้วยขนาดของโวลต์เตจที่ทำให้เกิดกระแส I_d ไหลผ่านความต้านทานใน วงจร การคอมมิวเตทในเชิงเฟสยังคงทำหน้าที่นี้อยู่ได้เพราะแอมโพลโวลต์เตจของเอสซีอาร์ตัวที่จะ ทริกให้นำกระแสเป็นบวกมากกว่าแอมโพลโวลต์เตจของเอสซีอาร์ที่นำกระแสอยู่ก่อนหน้า ผลต่าง ของโวลต์เตจระหว่างเฟสจะใช้ในการสร้างกระแสคอมมิวเตทวนไหลผ่านเอสซีอาร์ทั้ง 2 นี้ใน ลักษณะปกติ ถ้ามุม $\alpha > \pi$ ผลต่างของโวลต์เตจนี้จะไม่สามารถทำหน้าที่ในการคอมมิวเตทได้อีกต่อ ไป และเอสซีอาร์จะนำกระแสไปเรื่อยๆจนเข้าสู่ครึ่งไซเคิลบวก ดังนั้นโวลต์เตจที่ได้จากการเรคตี ไฟล์จะเสริมกับ ซี.ซี. โวลต์เตจของชัฟฟลายและทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น การคอมมิวเตทจึงต้องให้ เสรีจติ้นก่อนถึงตำแหน่งที่ผลต่างของโวลต์เตจระหว่างเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ กำหนดให้มุมซึ่งใช้ในการ ทริกเอสซีอาร์อยู่ก่อนหน้าตำแหน่งนี้เป็นมุม β นั่นคือ $\beta = \pi - \alpha$ มุม β นี้จะต้องมีค่าเพียงพอสำหรับช่วงเวลาการเกิด โอเวอร์แล็ปและช่วงเวลาเทอร์นออฟของเอสซีอาร์ สำหรับการทำงานของ โหมคอินเวอร์เตอร์นั้นการลดลงของโวลต์เตจเนื่องจากการเกิด โอเวอร์แล็ปจะมีผลทำให้แรง ดันไฟฟ้าสวนซึ่งมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้น และนั่นคือจะเพิ่มตามกระแสของโหลดด้วย



บทที่ 5

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ก่อนที่จะนำไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ใดไปใช้งานก็แล้วแต่ ผู้ออกแบบจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นั้นๆด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51 นั้นมีอยู่หลายเบอร์ให้เลือกใช้ ซึ่งแต่ละเบอร์มีความสามารถพิเศษเล็กน้อยแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งเป็นเบอร์พื้นฐานในตระกูลนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละเบอร์ในตระกูล MCS-51

ชื่อเบอร์	หน่วยความจำภายนอก		จำนวนไทมเมอร์/เคาน์เตอร์	จำนวนอินเตอร์รัปต์
	เก็บโปรแกรม	เก็บข้อมูล		
8052AH	8K×8 ROM	256×8 RAM	3×16-Bit	6
8051AH	4K×8 ROM	128×8 RAM	2×16-Bit	5
8051	4K×8 ROM	128×8 RAM	2×16-Bit	5
8032AH	ไม่มี	256×8 RAM	3×16-Bit	6
8031AH	ไม่มี	128×8 RAM	2×16-Bit	5
8031	ไม่มี	128×8 RAM	2×16-Bit	5
8751H	4K×8 EPROM	128×8 RAM	2×16-Bit	5
8751H-12	4K×8 EPROM	128×8 RAM	2×16-Bit	5

5.1 คุณสมบัติทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

คุณสมบัติทั่วไปที่สำคัญของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีดังนี้

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต
- มีวงจรรอสซิทิลเดเตอร์และวงจรมลิตสัญญาณนาฬิกาภายในไอซี
- มีขาสัญญาณอินพุตเอาต์พุตจำนวน 32 บิต
- สามารถเชื่อมต่อหน่วยความจำข้อมูลภายนอก (External Data Memory) โดย

อ้างถึงตำแหน่งแอดเดรสได้ถึง 64 K

- สามารถเชื่อมต่อหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก (External Program Memory) โดยอ้าง

ตำแหน่งแอดเดรสได้ถึง 64 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

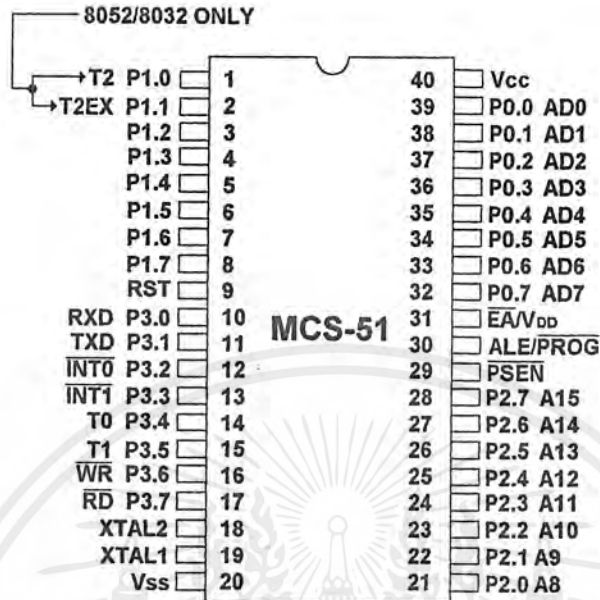
- มีหน่วยความจำโปรแกรมภายในตัว (On-Chip Program Memory) ขนาด 4 K โดยเฉพาะเบอร์ 8052 จะมีหน่วยความจำในส่วนนี้ถึง 8K สำหรับเบอร์ 8031 และ 8032 จะไม่มีหน่วยความจำในส่วนนี้
- มีหน่วยความจำข้อมูลภายในตัว (On-Chip Data Memory) ขนาด 128 ไบต์โดยเฉพาะเบอร์ 8032 และ 8052 จะมีหน่วยความจำในส่วนนี้ถึง 256 ไบต์
- หน่วยความจำข้อมูลภายในบางส่วนสามารถเข้าถึงข้อมูลในระดับบิตได้ด้วยทำโดยการควบคุมหรือการตรวจสอบสถานะบิตทำได้ง่าย ส่งผลให้การเขียน โปรแกรมทำได้ง่ายขึ้น
- มีไทเมอร์/เคาน์เตอร์ (Timer/Counters) ขนาด 16 บิต จำนวน 2 ตัว โดยเฉพาะเบอร์ 8032 และ 8052 จะมีไทเมอร์/เคาน์เตอร์จำนวน 3 ตัว
- การอินเตอร์รัปต์สามารถทำได้จาก 5 แหล่งกำเนิด โดยเฉพาะเบอร์ 8032 และ 8052 จะทำการอินเตอร์รัปต์ได้จาก 6 แหล่งกำเนิด โดยการอินเตอร์รัปต์ยังสามารถจัดลำดับความสำคัญได้เป็น 2 ระดับ
- มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมภายในตัวเองซึ่งทำงานเป็นแบบฟูลดูเพล็กซ์
- มีคำสั่งในการคำนวณคณิตศาสตร์และทางตรรกศาสตร์
- คำสั่งโดยส่วนใหญ่ใช้เวลาทำงานเพียง 1 ไมโครวินาที เมื่อใช้คริสตอลความถี่ 12 เมกะเฮิร์ตซ์
- ต้องการแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์เพียงชุดเดียว

5.2 โครงสร้างภายนอกของ MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ทุกเบอร์จะมีตำแหน่งขาพื้นฐานที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 สำหรับหน้าที่การใช้งานแต่ละขามีดังนี้

- ขา V_{CC} เป็นขาป้อนแรงดันไฟเลี้ยง +5 โวลต์
- ขา V_{SS} เป็นขาราวด์
- ขาพอร์ต 0 (Port 0) มี 8 ขาได้แก่ขา $P_{0,0}$ - $P_{0,7}$ เป็นขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตแบบ 2 ทิศทางสำหรับใช้งานทั่วไป โดยถ้าใช้งานเป็นอินพุตพอร์ตต้องทำการส่งค่าลอจิก “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตเพื่อกำหนดให้ขาพอร์ตเหล่านั้นอยู่ในสถานะปล่อยลอย ซึ่งในสถานะนี้เองที่สามารถนำมาใช้เป็นพอร์ตอินพุตอิมพีแดนซ์สูงได้ นอกจากพอร์ตนี้จะใช้เป็นพอร์ตอินพุตเอาต์พุตแล้วมันยังถูกใช้งานในการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกด้วย โดยทำหน้าที่ในการกำหนดตำแหน่งแอดเดรสไบต์ต่ำ (A_0 - A_7) ซึ่งจะใช้งานเป็นแบบมัลติเพล็กซ์กับการรับส่งข้อมูลขนาด 8 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 แสดงการจัดตำแหน่งขาต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

- ขาพอร์ต 1 (Port 1) มี 8 ขาได้แก่ขา P_{1.0}-P_{1.7} เป็นขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตแบบ 2 ทิศทางสำหรับใช้งานทั่วไป โดยถ้าใช้งานเป็นอินพุตพอร์ตต้องทำการส่งค่าลอจิก “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตเพื่อกำหนดให้เป็นพอร์ตอินพุต นอกจากนี้สำหรับเบอร์ 8032 และ 8052 ขาพอร์ต P_{1.0} และ P_{1.1} จะถูกนำมาใช้งานเป็นขา T2 และ T2EX ตามลำดับด้วย

- ขาพอร์ต 2 (Port 2) มี 8 ขาได้แก่ขา P_{2.0}-P_{2.7} เป็นขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตแบบ 2 ทิศทางสำหรับใช้งานทั่วไป โดยถ้าใช้งานเป็นอินพุตพอร์ตต้องทำการส่งค่าลอจิก “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตเพื่อกำหนดให้เป็นพอร์ตอินพุต นอกจากนี้พอร์ตนี้จะใช้งานเป็นพอร์ตอินพุตเอาต์พุตแล้วมันยังใช้ติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกด้วย โดยทำหน้าที่ในการกำหนดตำแหน่งแอดเดรสไบต์สูง (A₈-A₁₅)

- ขาพอร์ต 3 (Port 3) มี 8 ขาได้แก่ขา P_{3.0}-P_{3.7} เป็นขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตแบบ 2 ทิศทางสำหรับใช้งานทั่วไป โดยถ้าใช้งานเป็นอินพุตพอร์ตต้องทำการส่งค่าลอจิก “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตเพื่อกำหนดให้เป็นพอร์ตอินพุต นอกจากนี้พอร์ตนี้จะใช้งานเป็นพอร์ตอินพุตเอาต์พุตแล้วมันยังถูกใช้งานในหน้าที่พิเศษต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงหน้าที่พิเศษของแต่ละขาของพอร์ต P₃

ขาพอร์ต	หน้าที่พิเศษ
P3.0	RXD (Serial Input Port)
P3.1	TXD (Serial Output Port)
P3.2	$\overline{\text{INT0}}$ (External Interrupt 0)
P3.3	$\overline{\text{INT1}}$ (External Interrupt 1)
P3.4	T0 (Timer 0 External Input)
P3.5	T1 (Timer 1 External Input)
P3.6	$\overline{\text{WR}}$ (External Data Memory Write Strobe)
P3.7	$\overline{\text{RD}}$ (External Data Memory Read Strobe)

- ขารีสต (RST) ใช้สำหรับการรีเซ็ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยการรีเซ็ตต้องคงสถานะเป็นลอจิก “1” อย่างน้อยนาน 2 แมนชีนไซเคิล ในขณะที่ออสซิลเลเตอร์ยังทำงานอยู่

- ขา ALE/PROG เป็นขาสัญญาณที่ทำหน้าที่ควบคุมการแลตช์ (Latch) ค่าตำแหน่งแอดเดรสไบต์ไบต์ต่ำ (Address Latch Enable) เมื่อต้องการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก นอกจากนี้ขานี้ยังทำหน้าที่เป็นอินพุตรับพัลส์ในการ โปรแกรม (Program Pulse Input) ในส่วนของหน่วยความจำ EPROM สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ที่มีหน่วยความจำภายในเป็น EPROM

- ขา PSEN (Program Store Enable) ทำหน้าที่เป็นสัญญาณสโตรบเพื่ออ่านคำสั่งจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลคำสั่งจากหน่วยความจำภายนอก ขานี้จะส่งสัญญาณสโตรบจำนวน 2 ครั้งในแต่ละแมนชีนไซเคิล แต่ในขณะที่ติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอกจะไม่มีการส่งสัญญาณสโตรบแต่อย่างใด

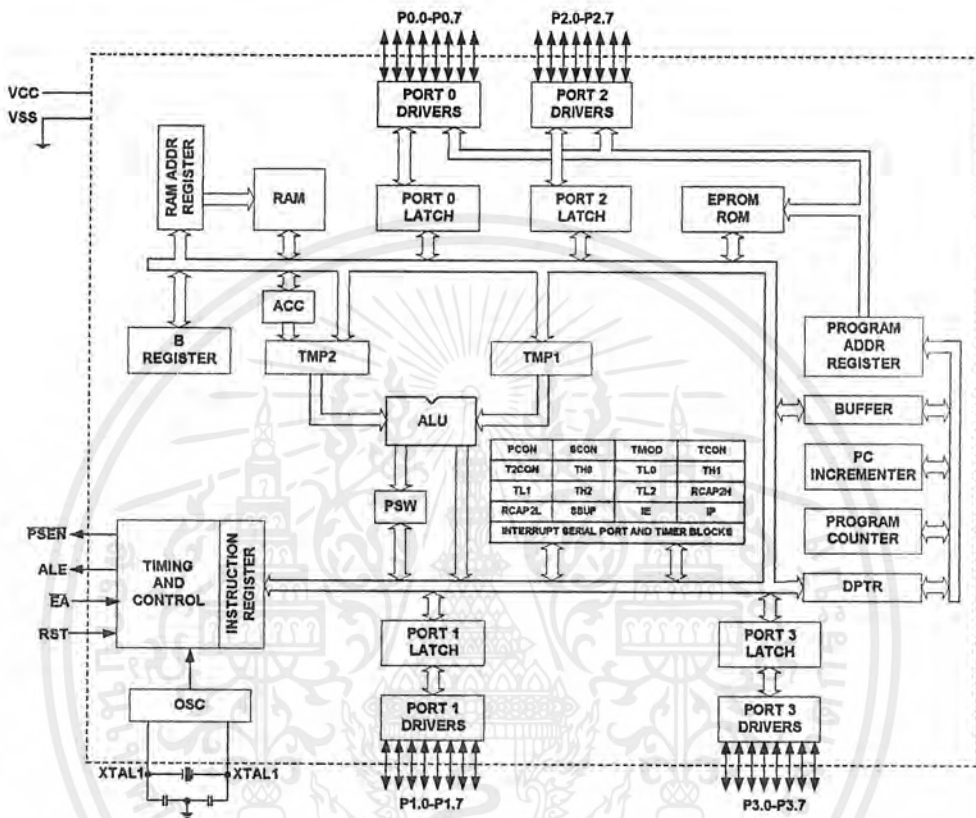
- ขา EA/VPP (External Access Enable/VPP) เป็นขาสำหรับการเลือกใช้หน่วยความจำโปรแกรมจากภายในหรือจากภายนอกโดยถ้ามีสถานะลอจิก “0” จะหมายถึงให้ไมโครคอนโทรลเลอร์รับคำสั่งจากหน่วยความจำภายนอกที่ตำแหน่งแอดเดรส 0-0FFFH (0-1FFFH ถ้าเป็นเบอร์ 8052) อย่างไรก็ตามถ้าบิตป้องกัน (Security Bit) ในหน่วยความจำ EPROM ถูกโปรแกรมไว้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะไม่รับคำสั่งจากหน่วยความจำภายนอกเลย นอกจากนี้ขานี้ยังทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้าสำหรับ โปรแกรม (V_{pp}) ขนาด 21 โวลต์ เพื่อใช้ในระหว่างการโปรแกรม EPROM

- ขา XTAL1 และ XTAL2 เป็นขาอินพุตและเอาต์พุตของวงจรมอสเฟตควอตซ์คริสตัลสำหรับใช้ต่อร่วมกับคริสตัลภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 โครงสร้างภายในของ MCS-51

โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 แสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงโครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

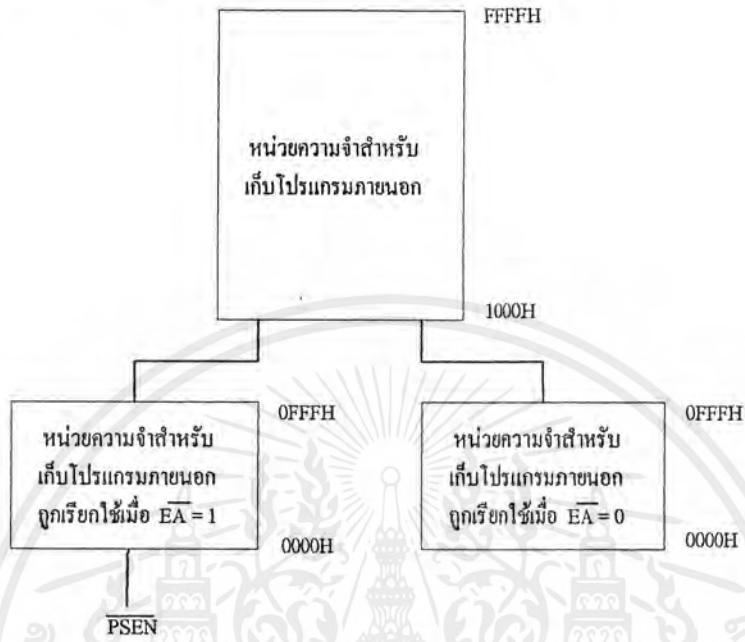
5.4 การจัดหน่วยความจำ

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 แบ่งชนิดหรือหน้าที่ของหน่วยความจำเป็น 2 ส่วนคือ หน่วยความจำโปรแกรม (Program Memory) และหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory)

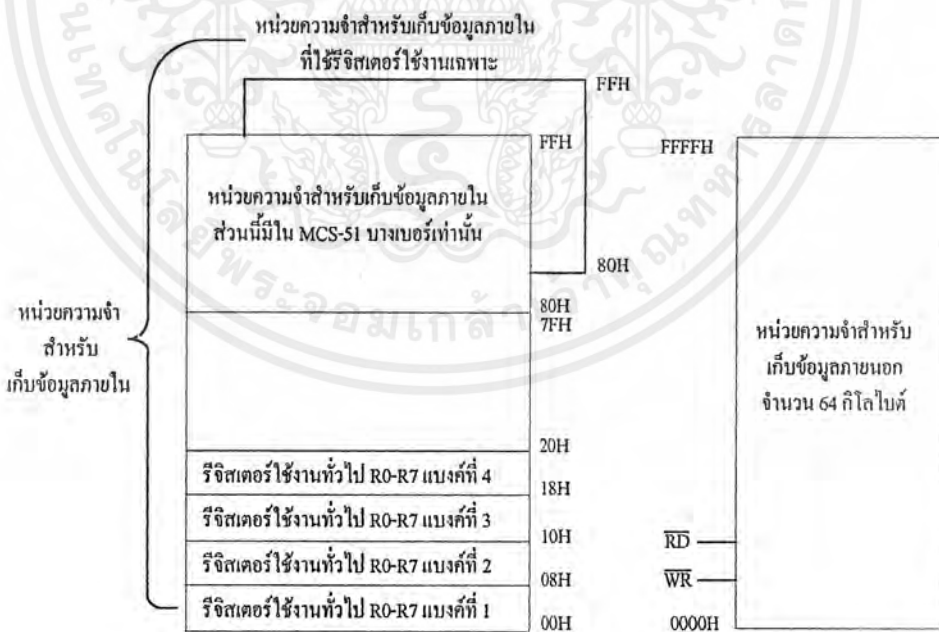
หน่วยความจำโปรแกรมจะใช้สำหรับเก็บโปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งบางเบอร์จะมีหน่วยความจำส่วนนี้อยู่ภายในตัว โดยอาจจะมิขนาดไม่เท่ากันหรือเป็นหน่วยความจำต่างชนิดกัน เช่น บางเบอร์เป็น ROM และบางเบอร์อาจเป็น EPROM และบางเบอร์อาจไม่มีหน่วยความจำในส่วนนี้เลย โปรแกรมการทำงานจะถูกเก็บไว้ยังหน่วยความจำภายนอกทั้งหมด สำหรับหน่วยความจำข้อมูลจะใช้สำหรับเก็บข้อมูลหรือค่าตัวแปรต่างๆ จากการทำงานของโปรแกรม ซึ่งใน MCS-51 ทุกเบอร์จะมีหน่วยความจำในส่วนนี้อยู่จำนวนหนึ่ง แต่อาจมีขนาดมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยแตกต่างกันไปในแต่ละเบอร์ สำหรับการจัดโครงสร้างของหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูล แสดงไว้ดังในรูปที่ 5.3



(a) หน่วยความจำสำหรับเก็บ โปรแกรม



(b) หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูล

รูปที่ 5.3 แสดงการจัด โครงสร้างของหน่วยความจำทั้งในส่วนของหน่วยความจำโปรแกรม และหน่วยความจำข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.1 หน่วยความจำโปรแกรม

หน่วยความจำโปรแกรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ หน่วยความจำโปรแกรมภายในและหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก หน่วยความจำโปรแกรมภายในจะถูกเลือกใช้งานถ้าคำสั่งสัญญาณ EA มีค่าเป็นลอจิก “1” โดยจะถูกใช้งานในช่วงแอดเดรส 0-0FFFFH (หรือช่วงแอดเดรส 0-1FFFFH ในเบอร์ 8052) นอกเหนือจากช่วงแอดเดรสนี้จะใช้หน่วยความจำภายนอกทั้งหมด ในกรณีตรงกันข้ามถ้าคำสั่งสัญญาณ EA มีค่าเป็นลอจิก “0” ในช่วงแอดเดรส 0-0FFFFH (หรือช่วงแอดเดรส 0-1FFFFH ในเบอร์ 8052) จะถูกใช้จากหน่วยความจำภายนอก หรือกล่าวได้ว่าถ้าคำสั่งสัญญาณ EA มีค่าเป็นลอจิก “0” จะเป็นการเลือกใช้หน่วยความจำภายนอกทั้งหมดตลอดช่วงแอดเดรส

5.4.2 หน่วยความจำข้อมูล

หน่วยความจำข้อมูลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำข้อมูลภายในและหน่วยความจำข้อมูลภายนอก สำหรับหน่วยความจำข้อมูลภายในยังแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนย่อยคือ ส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลทั่วไปและส่วนที่ใช้เป็นรีจิสเตอร์ทำหน้าที่พิเศษ หรือ SFR (Special Function Register) โดยส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลทั่วไปจะถูกใช้สำหรับเก็บข้อมูลหรือค่าตัวแปรต่างๆ จากการทำงานของโปรแกรม ส่วนรีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษจะใช้งานเป็นรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานและบอกสถานะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ทุกเบอร์จะมีหน่วยความจำข้อมูลภายในขนาด 128 ไบต์ เป็นอย่างน้อย และบางเบอร์อาจมีถึงขนาด 256 ไบต์

5.4.3 รีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษ (SFR)

รีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษมีบทบาทอย่างมากในการควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์และทำให้การเขียนโปรแกรมทำได้สะดวกมากขึ้น รีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษทำหน้าที่สำคัญคือการควบคุมการทำงานในส่วนต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ และทำหน้าที่แสดงสถานะการทำงาน ซึ่งในรีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษบางตัวยังสามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต (Bit Addressable) ด้วยคำสั่งแสดงการจัดหน่วยความจำและตำแหน่งของรีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษต่างๆ ในรูปที่ 5.4

5.4.4 รีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไป

รีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไปมีไว้ให้สามารถนำข้อมูลไปพักไว้ชั่วคราวหรือใช้งานทั่วไปได้ตามต้องการ ซึ่งรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไปนี้มีอยู่ด้วยกัน 8 ตัว คือ รีจิสเตอร์ R₀-R₇ โดยรีจิสเตอร์ทั้ง 8 ตัวถูกจัดให้อยู่รวมกันและมีให้เลือกใช้ถึง 4 แบนด์ (Bank) นั่นคือมีรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไปถึง 32 ตัวให้ใช้งาน เพียงแต่การเลือกใช้รีจิสเตอร์ R₀-R₇ ในแบนด์ใดแบนด์หนึ่งจะถูกกำหนดจากบิต RS0 , RS1 ในรีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษ PSW ดังนั้นการเลือกจึงเลือกได้เพียงแบนด์เดียวในขณะที่โดยขณะหนึ่ง อย่างไรก็ตามค่าข้อมูลที่เก็บไว้ในรีจิสเตอร์แบนด์ใดก็ตามที่มีชื่อเดียวกันแต่อยู่คนละแบนด์จะไม่มีผลซึ่งกันและกันเลย ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมใช้งานรีจิสเตอร์ทั่วไปนี้ได้ 32 ตัว อย่างเต็มที่และไม่ยุ่งยากในการเขียนโปรแกรม

ตำแหน่ง	(MSB)	บิตแอดเดรส								(LSB)	รีจิสเตอร์
แอดเดรส	WDI	T32	SERR	IZC	P3HZ	P2HZ	PIHZ	ALF	หน้าที่พิเศษ		
0FBH	FF	FE	FD	EC	EB	EA	F9	F8	IOCON		
0F0H	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1	F0	B		
0E0H	E7	E6	E5	E4	E3	E2	E1	E0	ACC		
0D0H	CY	AC	F0	RS1	RS0	0V	F1	P	PSW		
0CDH	ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต								TH2		
0CCH	ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต								TL2		
0CBH	ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต								RCAP2H		
0CAH	ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต								RCAP2L		
0C8H	TF2	EXF2	RCLK	TCLK	EXEN2	TR2	CT2	CP/RL2	T2CON		
0B8H	CF	CE	CD	CC	CB	CA	C9	C8	IP		
0B0H	PCT	PT2	PS	PT1	PX1	PT0	PX0	P3			
0A8H	BF	-	BD	BC	BB	BA	B9	B8	IE		
0A0H	EA	ET2	ES	ET1	EX1	ET0	EX0	P2			
99H	AF	-	AD	AC	AB	AA	A9	A8	SBUF		
98H	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	SCON		
90H	ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต								P1		
8DH	SM0	SM1	SM2	REN	TBR	RB8	T1	R1	TH1		
8CH	9F	9E	9D	9C	9B	9A	99	98	TH0		
8BH	97	96	95	94	93	92	91	90	TL1		
8AH	ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต								TL0		
89H	ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต								TMOD		
88H	TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0	TCON		
87H	8F	8E	8D	8C	8B	8A	89	88	PCON		
83H	ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต								DPH		
82H	ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต								DPL		
81H	ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต								SP		
80H	87	86	85	84	83	82	81	80	P0		

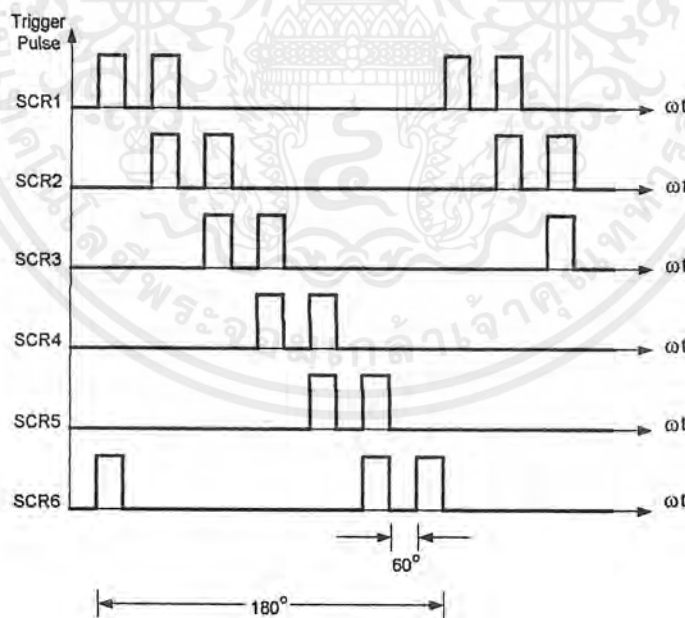
รูปที่ 5.4 แสดงการจัดหน่วยความจำและตำแหน่งของรีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

วงจรสร้างสัญญาณทริกเพื่อควบคุมเอสซีอาร์

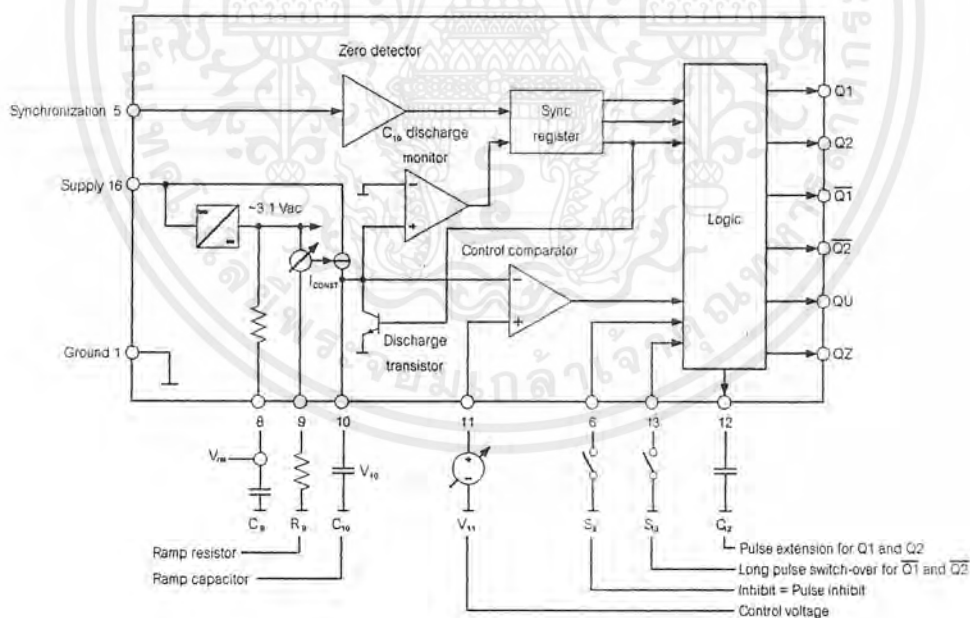
ในการสร้างสัญญาณทริก นั้นจะต้องคำนึงถึงขนาดของพัลส์ที่ใช้ในการทริกช่วงเวลาที่เกิดพัลส์หรือความกว้างของพัลส์ และพัลส์ที่ใช้ในการทริกต้องมีระยะเวลาหนานพอที่จะทำให้กระแสแอนโอด เพิ่มขึ้นสูงกว่ากระแสแลตซิ่ง ของเอสซีอาร์ที่จะควบคุมมิฉะนั้นเอสซีอาร์ ก็จะไม่นำกระแสได้ โดยเฉพาะถ้าโหลดที่ควบคุมเป็นประเภทอินดักทีฟโหลด (Inductive Load) กระแสแอนโอดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามคุณสมบัติของอินดักทีฟ ทำให้สัญญาณพัลส์ต้องมีความกว้างมากกว่าเดิม และเพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณทริกจะทำงานได้สมบูรณ์กับโหลดที่เป็นอินดักทีฟ สัญญาณทริกที่ใช้ควรมีความถี่สูงที่เรียกว่า พัลส์เทรน (Pulse Train) และที่สำคัญในการทริกเอสซีอาร์ของวงจร 3 เฟสพูลเวฟคอนเวอร์เตอร์ คือสัญญาณที่ใช้ในการทริกจะต้องเป็นพัลส์คู่ที่มีระยะห่างกัน 60 องศาทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 6.1 และสัญญาณทริกที่จะป้อนเข้าขาเกต ของเอสซีอาร์ควรผ่านหม้อแปลงพัลส์ เพื่อทำการแยกกราวด์ (Ground) ของวงจรกำลังและวงจรควบคุมออกจากกัน เพื่อป้องกันความเสียหายของวงจรควบคุมหากเกิดการลัดวงจรด้านวงจรกำลัง



รูปที่ 6.1 แสดงสัญญาณทริกที่ใช้กับวงจร 3 เฟส พูลเวฟคอนเวอร์เตอร์

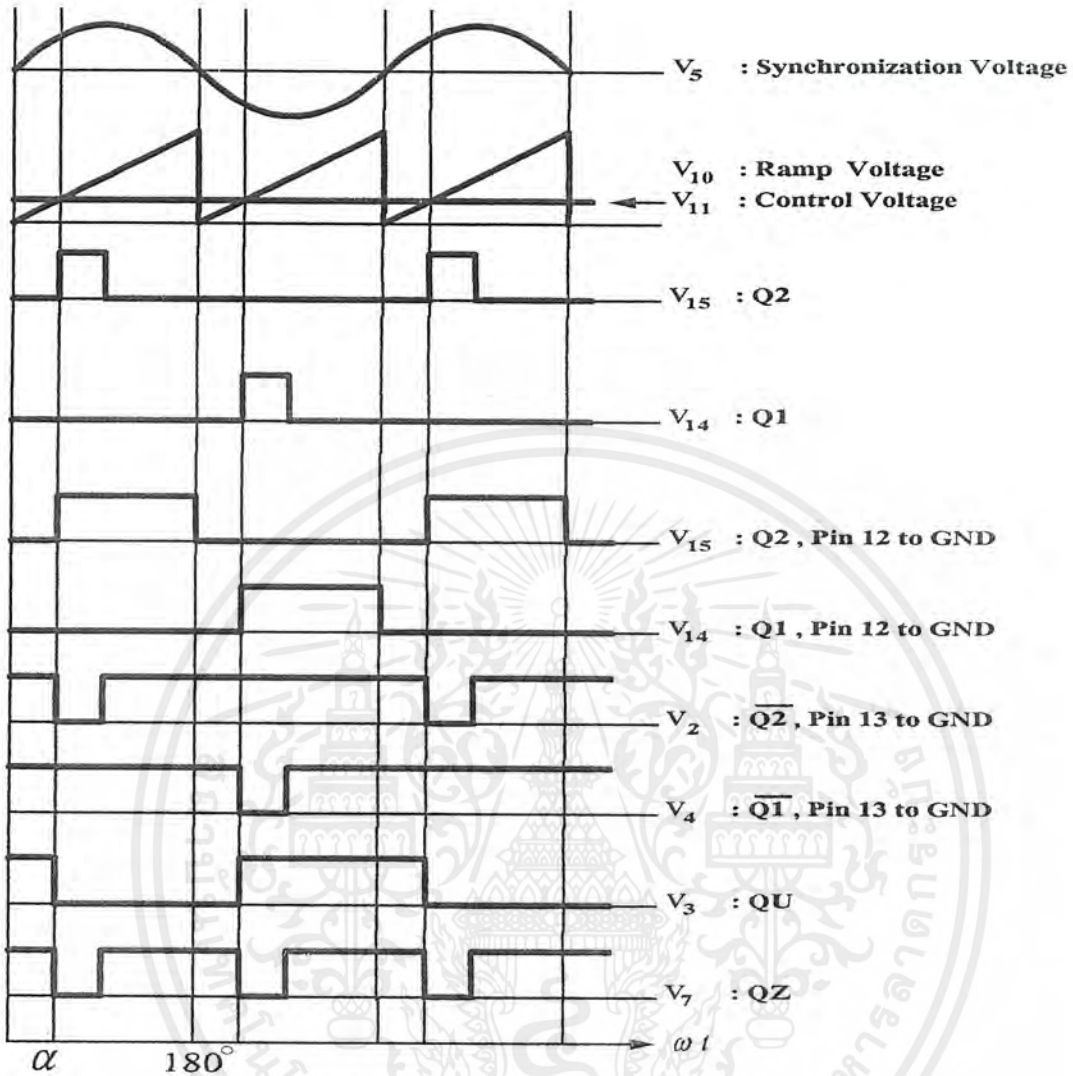
6.1 วงจรสร้างสัญญาณทริกเกอร์ที่ใช้ TCA#785

มีการทำงานดังนี้คือนำสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับป้อนเข้าขา 5 ซึ่งเป็นแรงดันซิงโครไนซ์ (Synchronization Voltage) และขา 1 (กราวด์) ของ TCA#785 เพื่อนำไปสร้างสัญญาณแรมป์ (Ramp) ซึ่งทุกครั้งที่ถูกคลื่นของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ จะเกิด 1 สัญญาณแรมป์โดยใช้วิธีตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์โวลต์ (Zero Crossing) ซึ่งมีไดโอด D_1 และ D_2 เป็นตัวตัดยอดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เหลือบวกและลบ 0.6 โวลต์ สัญญาณแรมป์จะปรากฏที่ขา 10 โดยความชันของสัญญาณแรมป์สามารถปรับได้ที่ R_1 และ C_1 ซึ่งต่ออยู่ภายนอก สัญญาณนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจะป้อนเข้าขา 11 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าควบคุม (Control Voltage) ซึ่งส่งมาจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก ซึ่งควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าควบคุม และสัญญาณแรมป์ใช้วงจรเปรียบเทียบ (Comparator) ภายใน TCA#785 ซึ่งจะให้สัญญาณพัลส์ออกมาที่ขา 15 (ช่วงครึ่งคลื่นบวก) และที่ขา 14 (ช่วงครึ่งคลื่นลบ) ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.2 แสดง โครงสร้างภายในของวงจรรวมเบอร์ TCA#785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 แสดงรูปคลื่นสัญญาณด้านเข้า และด้านออกของวงจรรวมเบอร์ TCA#785

ความกว้างของสัญญาณแรมป์ถูกกำหนดโดย C_{12} ซึ่งถ้าไม่มีการต่อ C_{12} เข้าที่ขา 12 จะได้ลักษณะพัลส์ที่ออกมาทางขา 14 และ 15 มีลักษณะพัลส์ที่มีความกว้าง $30 \mu\text{S}$ แต่ถ้าต้องการให้สัญญาณพัลส์ยาวทำได้โดยการต่อขา 12 กับขา 1 (กราวด์) ความกว้างของพัลส์มีความสัมพันธ์กับค่า C_{12} ดังแสดงในตารางที่ 6.1

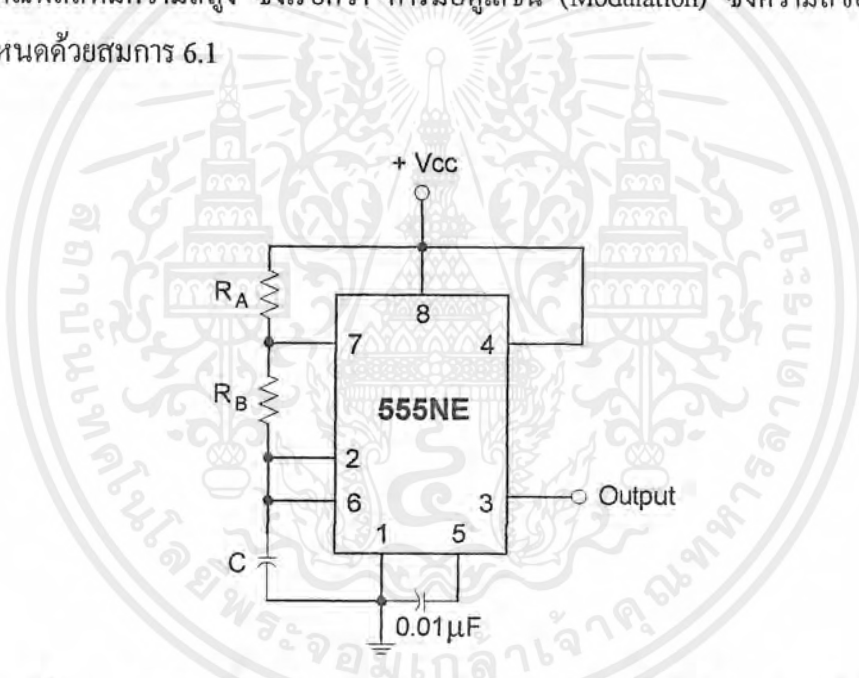
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ของความกว้างของสัญญาณพัลส์ด้านออก กับค่า C_{12}

C12 (pF)	0	150	220	330	680	1000
Pulse width (μ S)	30	93	137	205	422	620

6.2 การเพิ่มความถี่ของสัญญาณ โดยใช้ IC#555

สัญญาณพัลส์ที่ได้จากขา 14 และ 15 ของ TCA#785 จะส่งเข้าสู่ขา 4 ของไอซีเบอร์ 555NE ที่ต่อเป็นวงจรออสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator) ดังแสดงในรูปที่ 6.4 เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สูง ซึ่งเรียกว่า การมอดูเลชัน (Modulation) ซึ่งความถี่ของสัญญาณพัลส์ถูกกำหนดด้วยสมการ 6.1



รูปที่ 6.4 แสดงการต่อไอซีเบอร์ 555NE เป็นวงจรออสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

$$f(\text{Hz}) = \frac{1.44}{C(R_A + 2R_B)} \quad \dots(6.1)$$

และเปอร์เซ็นต์คิวตี้ไซเคิล (% duty cycle) คือ

$$\%D = \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B} \quad \dots(6.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณพัลส์ความถี่สูงจากขา 3 ของไอซีเบอร์ 555NE จะส่งไปขาเบสของทรานซิสเตอร์ทำการขยายสัญญาณและทำงานในลักษณะเปิดปิดตามสัญญาณพัลส์ความถี่สูงที่ส่งมา ก่อนจะนำเข้าหม้อแปลงพัลส์เพื่อทำการแยกกราวด์ต่อไป

6.3 การออกแบบหม้อแปลงพัลส์

ในการออกแบบหม้อแปลงพัลส์ มีขั้นตอนดังนี้

- กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
 - ค่าความต้านทานของแหล่งจ่ายไฟ (R_p) = 15 Ω
 - ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการทริกเอสซีอาร์ ($V_{G,max}$) = 3 V
 - ค่ากระแสเกตสูงสุด ($I_{G,max}$) = 150 mA
 - ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลง ($N_p:N_{e1}:N_{e2}$) = 1:1:1
 - ค่าความเหนี่ยวนำด้านขดลวดปฐมภูมิ (L_p) = 25 mA

● หาค่าจำนวนรอบของขดลวด

จากสูตร ค่าเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิ

$$L_p = \frac{\mu_0 \mu_e A_e N_p^2}{l_e} \quad \dots(6.3)$$

เมื่อ

L_p : ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิ

μ_0 : ค่า Permeability ของอากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

μ_e : ค่า Effective Permeability ของแกนหม้อแปลง

A_e : ค่า Effective Cross-Section Area ของแกนหม้อแปลง

l_e : ค่า Effective Length ของวงจรมแม่เหล็ก

N_p : จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ

$$\text{กำหนดให้} \quad \frac{\mu_0 \mu_e A_e}{l_e} = A_L \quad \dots(6.4)$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า} \quad L_p = N_p^2 A_L \quad \dots(6.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะได้ว่า
$$N_p = \sqrt{\frac{L_p}{N_L}} \quad \dots(6.6)$$

- เลือกแกน EI-35 2E6 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้
 $A_c = 1.038 \text{ cm}^2$, $A_L = 4700 \text{ nH/turn}^2$, $A_w = 1.36 \text{ cm}^2$
 คำนวณหาจำนวนขดลวดค้ำานปฐมภูมิโดยใช้สมการที่ 6.6

จะได้
$$N_p = \sqrt{\frac{25 \times 10^{-3}}{470 \times 10^{-9}}}$$

$$= 72.93 \text{ รอบ}$$

ให้ $N_p = N_{g1} = N_{g2} = 73 \text{ รอบ}$

- คำนวณหา B_{\max}
 เมื่อ B_{\max} : ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (W_b/m^2)

ค่า Attenuation factor : $a = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \dots (6.7)$

$$R_1 = R_i + R_p$$

$$= 15 + (5\% \text{ ของ } R_i)$$

$$= 15.75 \Omega$$

$$R_2 = \frac{R_L + R_C}{2n^2}$$

$$= \frac{20 + (5\% \text{ ของ } R_i)}{2(1/1)^2}$$

$$= 10.5 \Omega$$

ดังนั้น ค่า
$$a = \frac{10.5}{10.5 + 15.75} = 0.4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณหาค่า B_{\max} ของหม้อแปลงเราจะใช้สูตรดังนี้
ในกรณีที่ใช้ขึงเกิลพัลส์

$$B_{\max} = \frac{a \cdot V \cdot t_d}{N_p \cdot A_e} \quad \dots (6.8)$$

ในกรณีที่ใช้พัลส์เทรน

$$B_{\max} = \frac{V \cdot t_d}{N_p \cdot A_e} \left[\frac{L_p}{R_l \cdot T_p} + a \left(1 - \frac{t_d}{T_p} \right) \right] \quad \dots (6.9)$$

เมื่อ t_d : ความกว้างของช่วงพัลส์

T_p : คาบของสัญญาณพัลส์

เนื่องจากใช้หม้อแปลงแกนเฟอไรท์ซึ่งเป็นแกนที่ใช้กับสัญญาณความถี่สูงซึ่งสัญญาณพัลส์เทรนที่ได้จากขา 3 ของไอซีเบอร์ 555NE มีความถี่ประมาณ 4 kHz ที่เปอร์เซ็นต์ดีวตีไซเคิล เท่ากับ 70%

ดังนั้น $T_p = \frac{1}{4 \times 10^3} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ Sec}$

และ $t_d = 0.7(2.5 \times 10^{-4}) = 1.75 \times 10^{-4} \text{ Sec}$

แทนค่าในสมการที่ 6.9 จะได้

$$B_{\max} = \frac{3 \times 1.75 \times 10^{-4}}{73 \times 1.038 \times 10^{-4}} \left[\frac{25 \times 10^{-3}}{15.75 \times 2.5 \times 10^{-4}} + 0.4 \left(1 - \frac{1.75 \times 10^{-4}}{2.5 \times 10^{-4}} \right) \right]$$

$$= 448.8 \text{ mT}$$

เมื่อดูว่า ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดอิ่มตัว (B_{sat}) ของแกนเฟอไรท์แกน EI-35 2E6 พบว่าค่า B_{sat} ที่อุณหภูมิ 20°C มีค่าเท่ากับ 480 mT จะเห็นได้ว่าค่า B_{\max} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า B_{sat} ดังนั้นค่าที่คำนวณได้จึงใช้ได้

● หาขนาดขดลวด

$$\text{จากค่า Primary Winding Turn / cm}^2 = \frac{N_p}{k \cdot A_w} \quad \dots(5.10)$$

กำหนดให้ค่า k มีค่าเท่ากับ 0.3

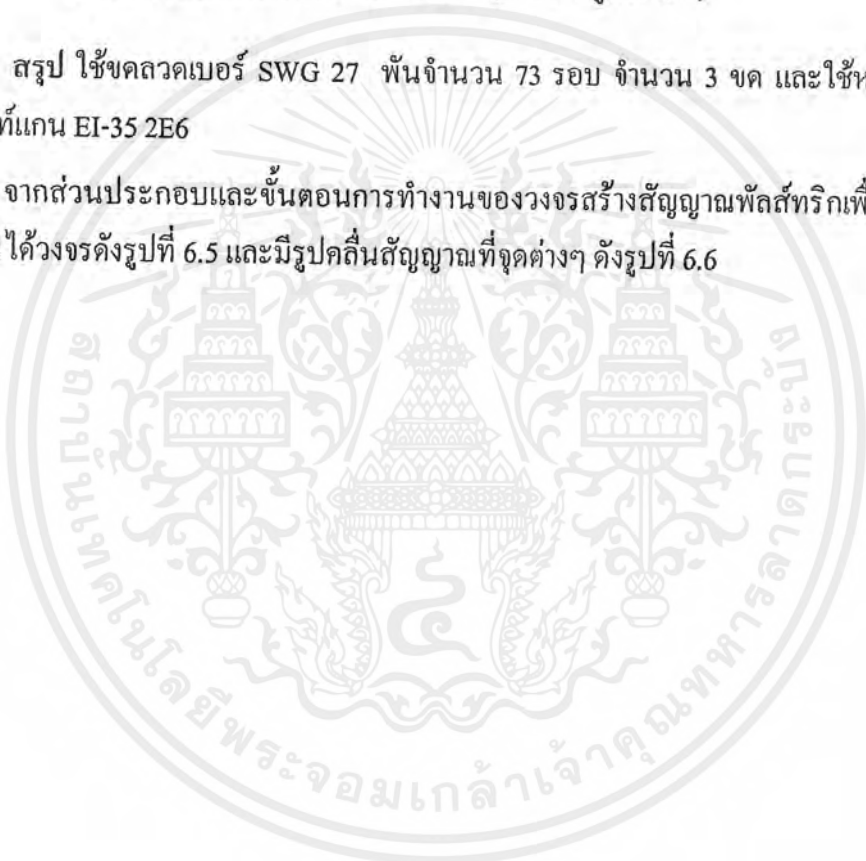
และเนื่องจากมีขดลวดรวมทั้งหมด 3ขด ดังนั้นจึงใช้ค่า $A_w = 136/3 = 0.453 \text{ cm}^2$

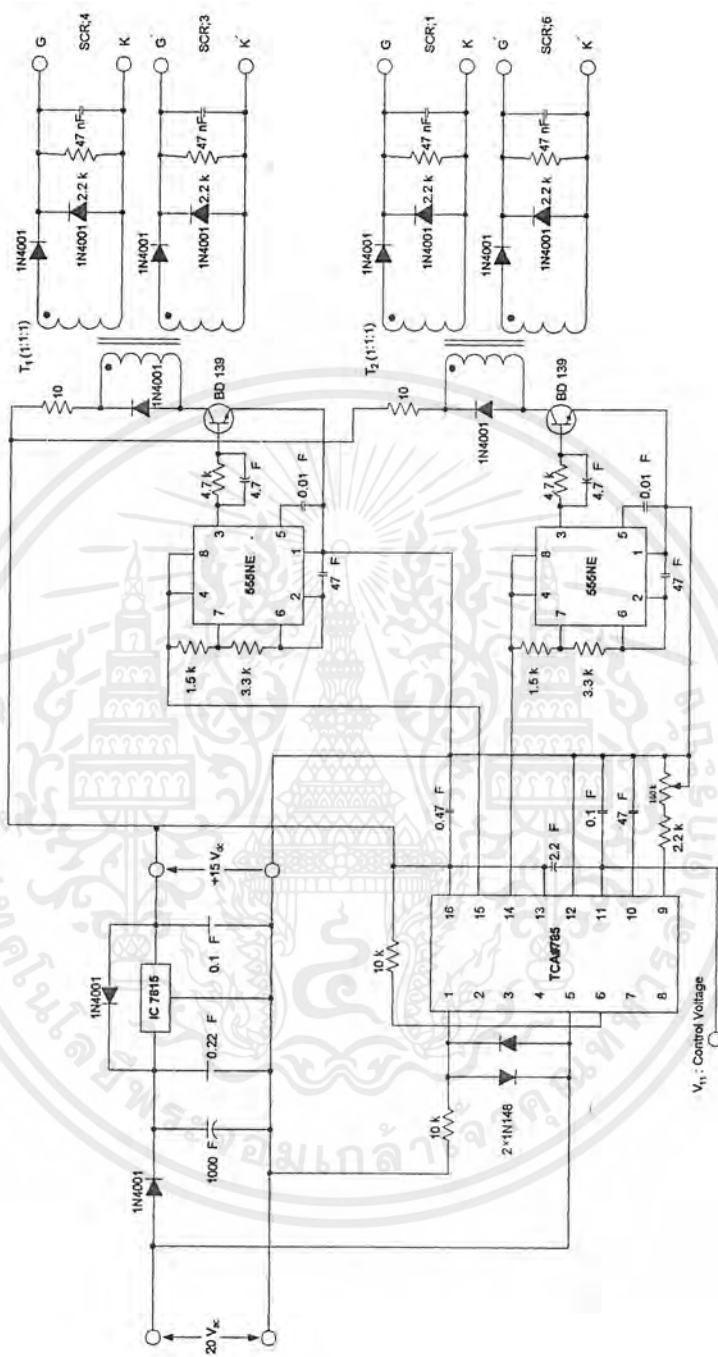
$$\text{ดังนั้นค่า Primary Winding Turn / cm}^2 = \frac{73}{0.3 \times 0.453} = 537.16 \text{ turn / cm}^2$$

จะได้ขนาดขดลวดเท่ากับ 0.417 mm (เส้นผ่านศูนย์กลาง)

สรุป ใช้ขดลวดเบอร์ SWG 27 พันจำนวน 73 รอบ จำนวน 3 ขด และใช้หม้อแปลงแกนเฟอไรท์แกน EI-35 2E6

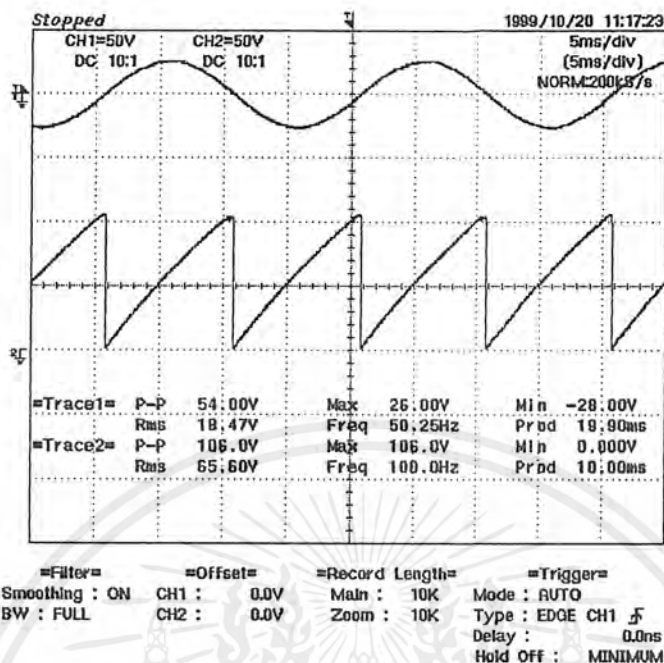
จากส่วนประกอบและขั้นตอนการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ทริกเพื่อควบคุมเอสซีอาร์จะ ได้วงจรดังรูปที่ 6.5 และมีรูปคลื่นสัญญาณที่จุดต่างๆ ดังรูปที่ 6.6



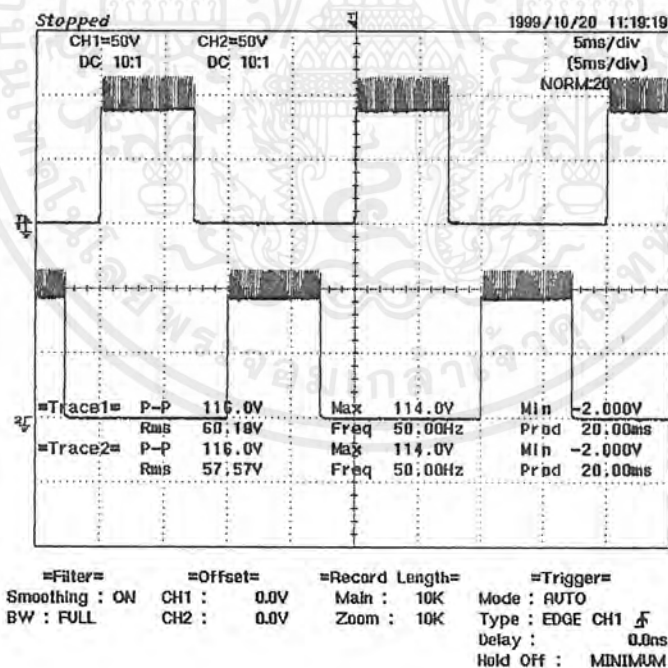


รูปที่ 6.5 วงจรสร้างสัญญาณทริกเอสซีอาร์ของวงจร 3 เฟส พูลเวฟคอนเวอร์เตอร์ (แสดงวงจรเพียงชุดเดียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

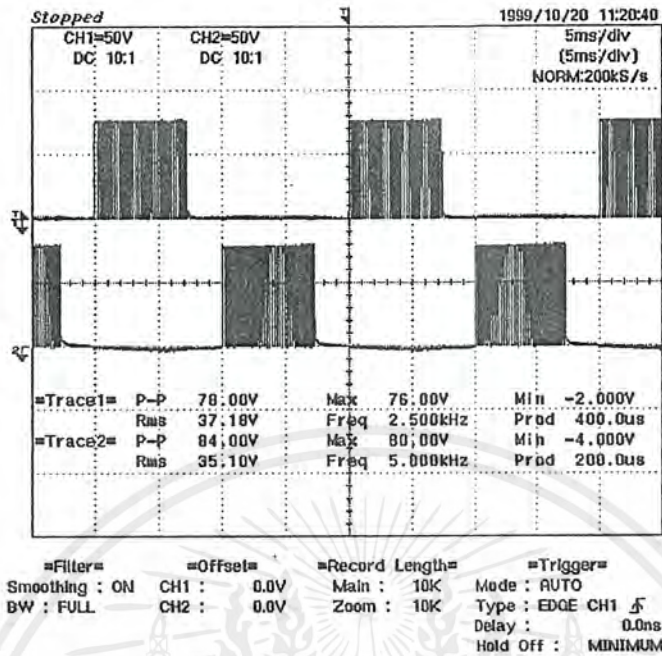


รูปที่ 6.6 (a) แสดงสัญญาณ V_{syn} (ขา 5) และ V_{ramp} (ขา 10) ของ TCA#785

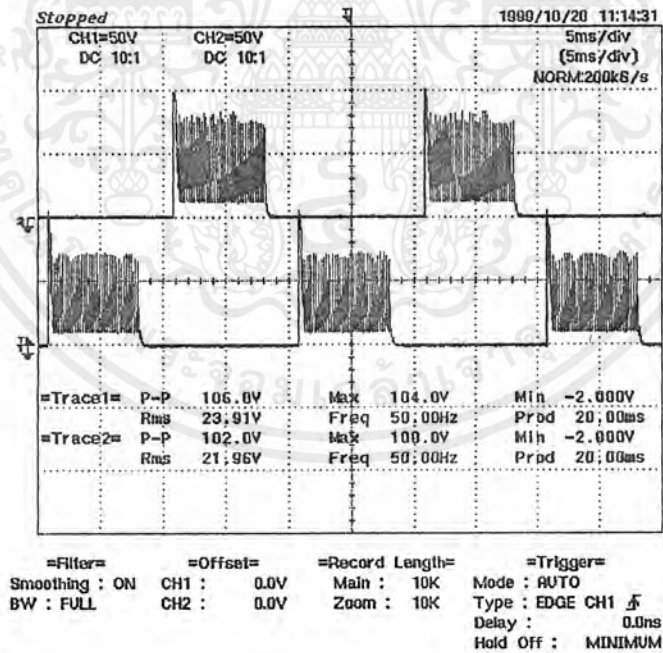


รูปที่ 6.6 (b) แสดงสัญญาณเอาต์พุต V_{14} และ V_{15} ของ TCA#785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 (c) แสดงสัญญาณเอาต์พุต V_3 ของ IC#555NE เมื่อสัญญาณอินพุตเป็น V_{14} และ V_{15} ของ TCA#785



รูปที่ 6.6 (d) แสดงสัญญาณเอาต์พุตทางค่านทุติยภูมิของหม้อแปลงพัลส์ เมื่อสัญญาณอินพุตทางค่านปฐมภูมิเป็น V_3 ของ IC#555NE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การตรวจับสัญญาณความเร็วรอบและกระแส

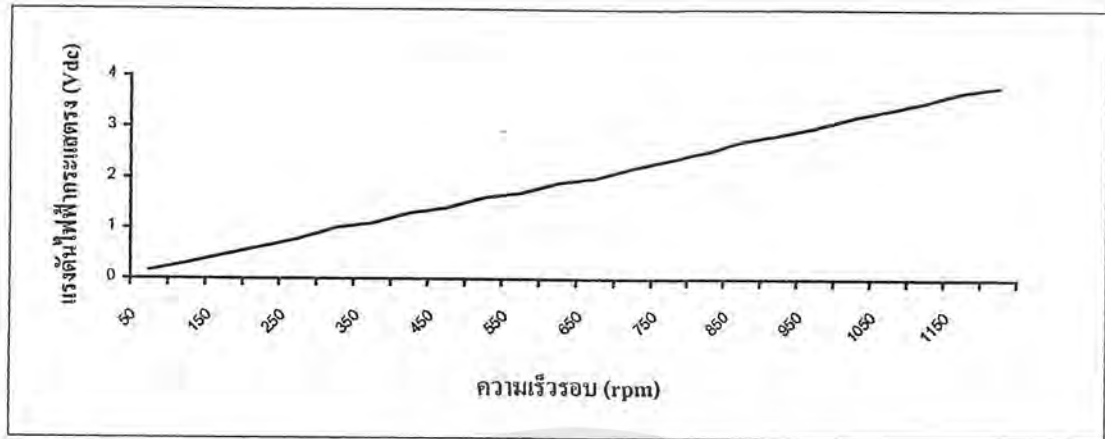
7.1 ชุดตรวจับความเร็วรอบ

ประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ เทค โคเจนเนอเรเตอร์ (Tacho Generator) เป็นเซ็นเซอร์ตรวจับความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่ง โครงงานนี้ใช้ดีซีเทค โคเจนเนอเรเตอร์ เป็นตัวตรวจับความเร็วรอบโดยการต่อพ่วงกับเพลาของมอเตอร์ที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งจะได้เอาต์พุตที่ออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับความเร็วรอบ โดยมีค่าผลการทดลองตามตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงของเทค โคเจนเนอเรเตอร์

ความเร็วรอบ (RPM)	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Vdc)	ความเร็วรอบ (RPM)	แรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง (Vdc)
50	0.16	650	2
100	0.31	700	2.2
150	0.48	750	2.35
200	0.63	800	2.5
250	0.79	850	2.72
300	1	900	2.85
350	1.1	950	3
400	1.3	1000	3.2
450	1.4	1050	3.35
500	1.6	1100	3.5
550	1.7	1150	3.7
600	1.9	1200	3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของเทคโนโลยีมอเตอร์

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าถ้าเราต้องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ อยู่ใน ช่วงความเร็ว 0-600 รอบ (rpm) และถ้าเราต้องการเอาต์พุตของเทคโนโลยีมอเตอร์ มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 5 โวลต์ เพื่อนำเข้าวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลก่อนนำไปประมวลผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 7.2 ดังนั้นในการติดตั้งเทคโนโลยีมอเตอร์จึงต้องทำการทดสอบของ ความเร็วมอเตอร์กับเทคโนโลยีมอเตอร์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 รอบ

7.2 ชุดตรวจจับกระแสอาร์เมเจอร์

ในโครงการนี้จะใช้หม้อแปลงกระแส (Current Transformer : CT) เป็นตัวจับค่ากระแส มีขั้นตอนการแปลงค่ากระแสเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 7.2 โดยใช้วิธีวัดกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วนำไปเปรียบเทียบค่ากระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงที่ไหลเข้ามอเตอร์ สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเมื่อนำมาผ่านวงจรเรกติไฟต์เออร์แล้วจะได้สัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มคลื่น ซึ่งสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้เมื่อผ่านวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล แล้วสามารถนำไปใช้ประมวลผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์

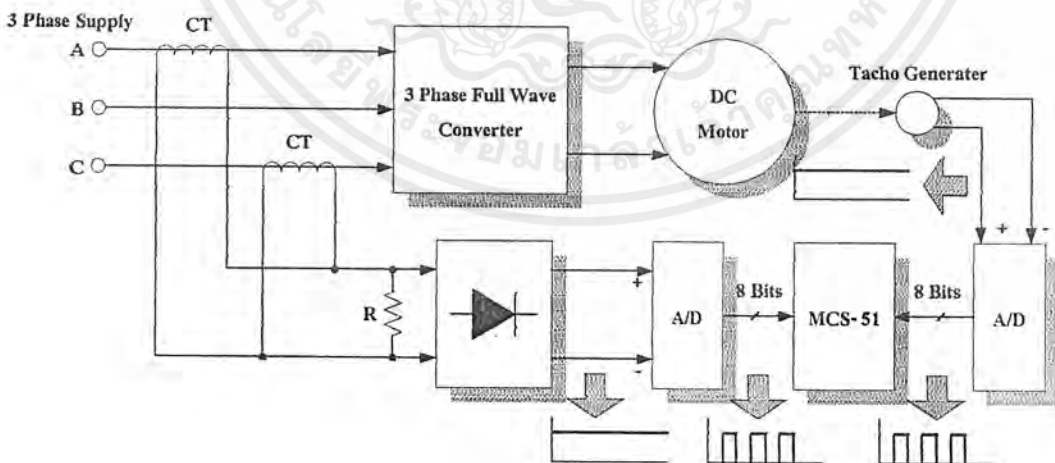
การทำงานของหม้อแปลงกระแส อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด เหมือนในหม้อแปลงทั่วไปที่มีขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (N_1 & N_2) แต่ของหม้อแปลงกระแสจะแตกต่างกัน นั่นคือ N_1 จะมีค่าเพียง 1/2 ขด ขณะที่ขดทางด้านทุติยภูมิ (N_2) มีขนาดมากกว่า N_1 ซึ่งจะเห็นว่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ปลายขด N_2 ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.2 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแส

กระแส (A)	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Vdc)		
	1 รอบ	2 รอบ	3 รอบ
1.3	0	0	0
2.22	0	0	0.05
3.1	0.04	0.12	0.15
4	0.1	0.22	0.3

เหตุที่ใช้หม้อแปลงกระแสวัดกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับก็เนื่องมาจากว่าลักษณะของสัญญาณของกระแสจะเป็นสัญญาณไซน์ เหมือนแรงดันทำให้สามารถเห็นแนวโน้มชัดเจนได้ดี และสัญญาณที่ออกมาทางขดทุติยภูมิ ก็มีลักษณะสมมาตรเป็นสัญญาณไซน์ด้วยทำให้เมื่อผ่านวงจรเรคตีไฟลีย์อร์สัญญาณกระแสที่ได้จะถูกค้องมากขึ้น ซึ่งถ้าวัดทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง ลักษณะจะไม่เป็นไซน์ แต่ขึ้นกับมุมทริกของเอสซีอาร์ ทำให้สัญญาณที่ได้ทางทุติยภูมิไม่สมมาตร ดังนั้นเมื่อผ่านวงจรเรคตีไฟลีย์อร์จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ซึ่งเมื่อทำการทดลองป้อนกระแสและพันสายไฟกับหม้อแปลงกระแสที่รอบต่างๆแล้ววัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านวงจรเรคตีไฟลีย์อร์จะได้ผลดังตารางที่ 7.2



รูปที่ 7.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการตรวจจับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

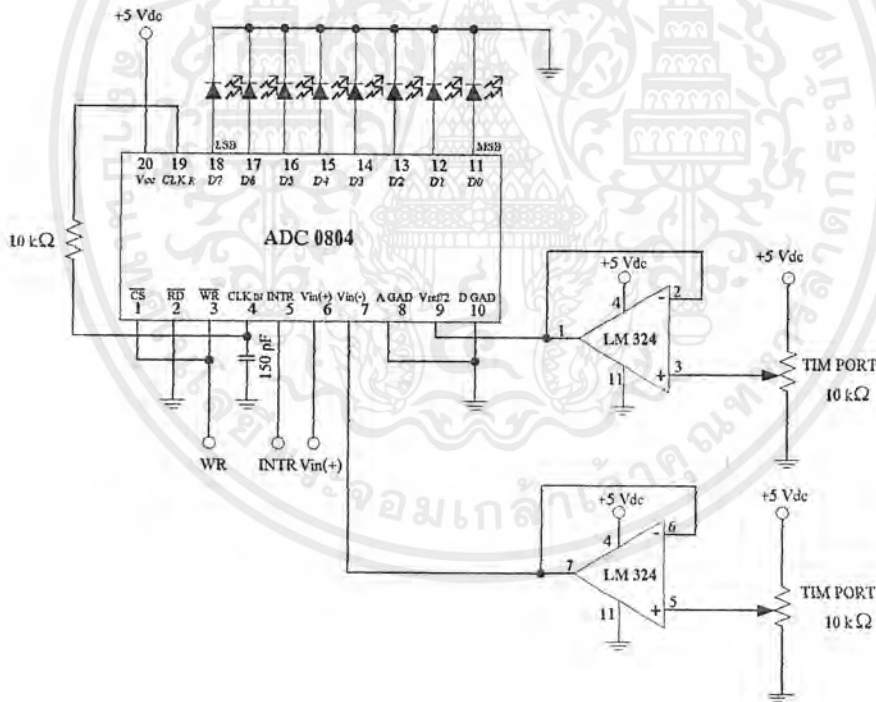
บทที่ 8

การแปลงค่าสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล และสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก

8.1 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D)

สัญญาณอนาลอก ที่ได้จากตัวตรวจจับความเร็วรอบ และค่ากระแสป้อนเข้ามอเตอร์ ที่ได้จากการตรวจจับสัญญาณในบทที่ 7 จะต้องนำมาแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อนำไปใช้ในการส่งเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป โดยในการแปลงสัญญาณจะใช้ไอซีเบอร์ ADC 0804 เป็นตัวแปลงสัญญาณ โดยสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นสัญญาณเลขฐานสองขนาด 8 บิต ซึ่งมีความเร็วในการแปลงสัญญาณประมาณ $100 \mu\text{s}$ ซึ่งมีการต่อวงจรดังรูปที่

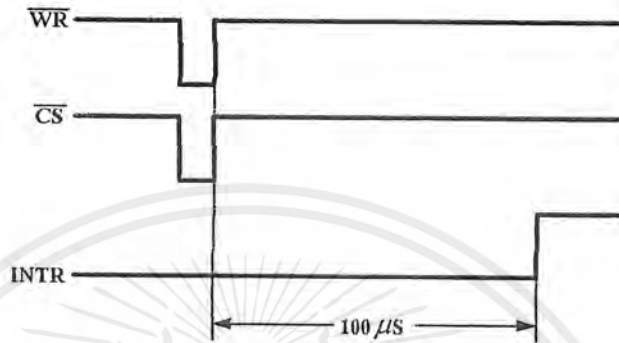
8.1



รูปที่ 8.1 แสดงการต่อวงจร A/D ที่ใช้ไอซีเบอร์ ADC 0804

การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลนี้จำเป็นที่จะต้องเริ่ม Start A/D ก่อน โดยทำให้ขา \overline{WR} เป็นสภาวะ Low ประมาณ $100 \mu\text{s}$ เมื่อแปลงสัญญาณเสร็จแล้วจะมีสัญญาณออกมาที่ขา INTR เป็น High ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมต้องทำการเขียนพอร์ต A/D ก่อน เพื่อให้ \overline{WR} และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\overline{CS} ของ A/D แอคทีฟ หลังจากนั้นก็รอขา INTR เป็น High แล้วจึงอ่านข้อมูลไปเก็บเป็นการสิ้นสุดการทำงาน 1 รอบ หรืออีกวิธีหนึ่งเมื่อทำการ Start A/D แล้วให้วนลูปรอนกว่าเวลาครบ $100 \mu S$ แล้วจึงอ่านค่าไปเก็บ



รูปที่ 8.2 ไคอะแกรมเวลาในการทำงานของวงจร A/D

ในขั้นตอนการทดลองวงจรนี้ที่ขาเอาต์พุตสัญญาณดิจิทัล (ขา 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18) จะต่อกับ LED เพื่อแสดงสถานะของสัญญาณเอาต์พุต แต่ในขณะที่ใช้งานจริงจะนำสัญญาณเอาต์พุตนี้ต่อโดยตรงกับพอร์ตอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์

จากการทดลองจะให้การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 0-5 โวลต์ป้อนที่ขา 6 ซึ่งได้ผลการทดลองเมื่อเทียบกับค่าการคำนวณตามสมการที่ 8.1 จะได้ผลดังตารางที่ 8.1

สูตรคำนวณ

$$V_m = \left[\frac{D7}{2} + \frac{D6}{4} + \frac{D5}{8} + \frac{D4}{16} + \frac{D3}{32} + \frac{D2}{64} + \frac{D1}{128} + \frac{D0}{256} \right] \cdot V_{cc} \quad \dots (8.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.1 ผลการทดลองวงจร A/D

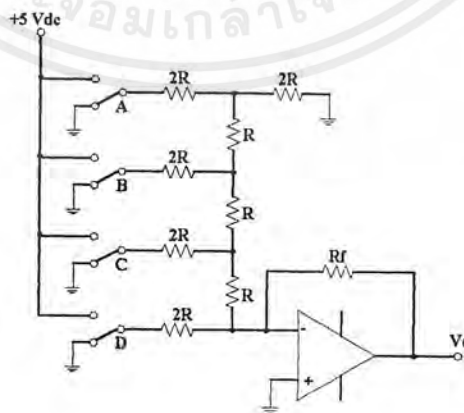
ไบนารีด้านเอาต์พุตของ ADC 0804	V _{in} จากการวัด (โวลต์)	V _{in} จากการคำนวณ (โวลต์)
0000 0000	0	0
0000 1000	0.1	0.15
0100 0100	1.3	1.32
1100 0100	3.7	3.83
1111 1111	5	5

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จะมีความใกล้เคียงกับผลจากการคำนวณมากแสดงว่าสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้

8.2 การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก (D/A)

เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลจากโปรแกรม และเงื่อนไขที่ตั้งไว้เสร็จแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณดิจิทัลและแปลงเป็นสัญญาณอนาลอกโดยใช้วงจร D/A ก่อนที่จะส่งเข้าวงจรควบคุมมุมทริกของเอสซีอาร์ต่อไป

วงจรพื้นฐานของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก จะใช้ออปแอมป์ (OP-Amp) เป็นตัวรวมสัญญาณและอาศัยเทคนิคในการต่อวงจรที่อินพุตของออปแอมป์ ซึ่งวงจรพื้นฐานที่จะกล่าวนี้คือ วงจร R-2R Ladder ดังแสดงในรูปที่ 8.3



รูปที่ 8.3 วงจร R-2R Ladder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร R-2R Ladder มีสมการของแรงดันเอาต์พุต คือ

$$V_o = \left(\frac{V_{ref}}{16} \right) \cdot D \quad \dots (8.2)$$

เมื่อ V_{ref} : แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 2.55 โวลต์

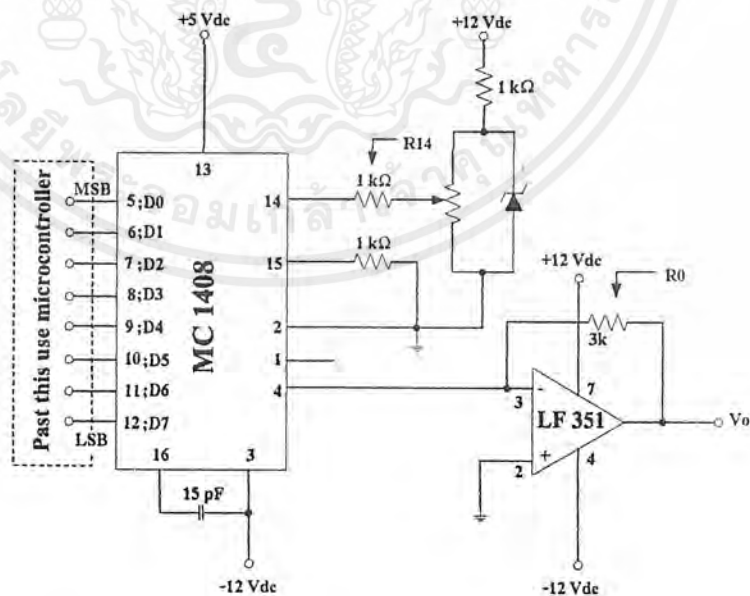
D : เลขฐานสิบที่แปลงมาจากสัญญาณอินพุต

ตัวอย่าง มีอินพุตป้อนเข้าวงจร R-2R Ladder เป็น 0101 โดยที่ $V_{ref} = 2.55$ โวลต์ สามารถคำนวณหา V_o ได้จากสมการที่ 8.2 เมื่อ $D = 0101 = 5_{10}$

แทนค่าในสมการที่ 8.2 จะได้

$$\begin{aligned} V_o &= \left(\frac{2.55}{16} \right) \cdot 5 \\ &= 0.7968 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

ในโครงการนี้จะใช้ไอซีเบอร์ MC1408 เป็นตัวสร้างสัญญาณดิจิทัล 8 บิตให้เป็นกระแส แล้วใช้ออปแอมป์เบอร์ 741 แปลงกระแสที่ได้ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้อยู่ในช่วง 0-6 โวลต์โดยวงจรแสดงดังรูปที่ 8.4



รูปที่ 8.4 แสดงการต่อวงจร D/A ที่ใช้ไอซีเบอร์ MC 1408

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรสามารถที่จะคำนวณหาค่าแรงดัน V_0 ได้โดยสมการที่ 8.3 คือ

$$V_0 = \frac{V_{ref}}{R_{14}} \cdot R_0 \left[\frac{D7}{2} + \frac{D6}{4} + \frac{D5}{8} + \frac{D4}{16} + \frac{D3}{32} + \frac{D2}{64} + \frac{D1}{128} + \frac{D0}{256} \right] \quad \dots (8.3)$$

ซึ่งจากการทดลองต้องการจะให้ V_0 ออกมาในช่วง 0-6 โวลต์ เพื่อที่จะนำไปเป็นแรงดันอ้างอิง (V_{11} ของไอซีเบอร์ TCA#785) ในการปรับมุมทริก

เมื่อทำการป้อนสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิตที่ค่าต่างๆ โดยที่ปรับค่า $V_{ref} = 2$ โวลต์จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 ผลการทดลองวงจร D/A

ไบนารีที่ป้อนเข้า MC1408	V_0 จากการวัด (โวลต์)	V_0 จากการคำนวณ (โวลต์)
0000 0000	0	0
0001 1001	0.6	0.58
0011 0011	1.2	1.19
0100 1100	1.8	1.78
0110 0110	2.4	2.39
1000 0000	3.1	3
1001 1001	3.6	3.58
1011 0011	4.2	4.19
1100 1100	4.8	4.78
1110 0110	5.1	5.25
1111 1111	6	5.97

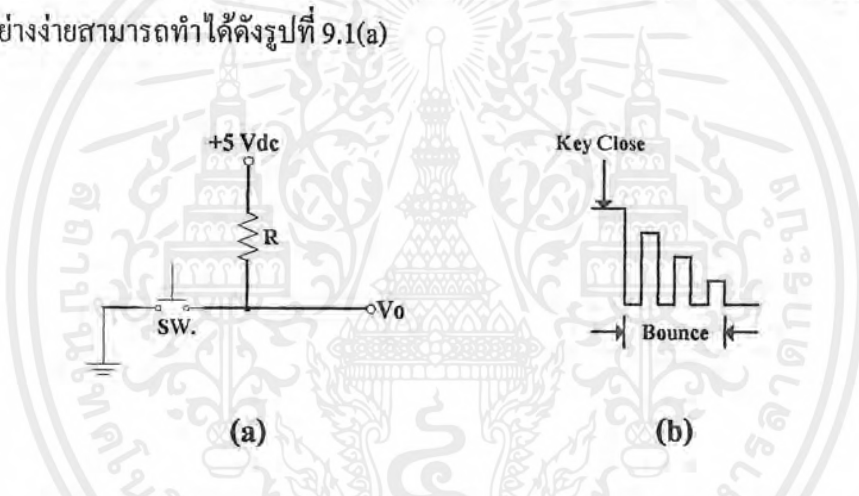
จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้มาก จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในช่วงแรงดันที่ออกแบบไว้ได้ (0-6 โวลต์)

บทที่ 9

การอ่านค่าคีย์บอร์ดและหน่วยแสดงผลแบบ LCD

9.1 การต่อคีย์บอร์ดกับไมโครคอนโทรลเลอร์

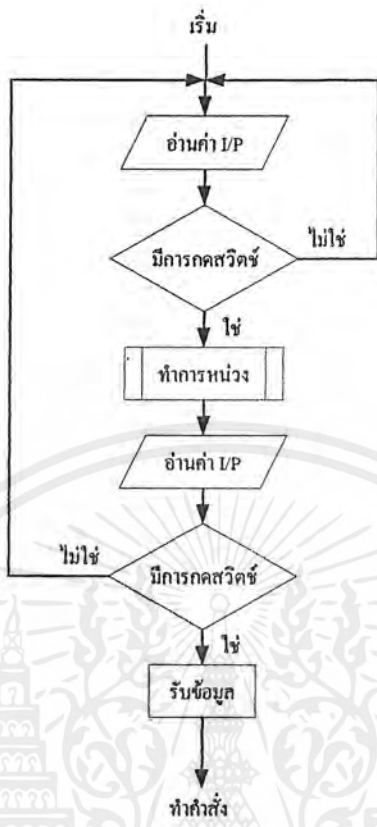
สวิตช์หรือคีย์บอร์ดถือว่าเป็นอุปกรณ์อินพุตพื้นฐานที่สุด เนื่องจากมนุษย์สามารถเข้าใจและใช้งานได้ง่ายที่สุด และไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับข้อมูลจากสวิตช์หรือคีย์บอร์ดนี้ได้ การต่อสวิตช์เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำได้หลายวิธี แต่ถ้าต้องการต่อสวิตช์จำนวนมากเข้ากับระบบจะนิยมการจัดเรียงสวิตช์แบบเมตริกซ์ (Matrix) โดยคีย์บอร์ดแต่ละตัวจะสร้างลอจิก “0” หรือลอจิก “1” และจะถูกนำไปต่อกับบิตข้อมูลของพอร์ตอินพุต การสร้างสัญญาณลอจิกจากสวิตช์อย่างง่ายสามารถทำได้ดังรูปที่ 9.1(a)



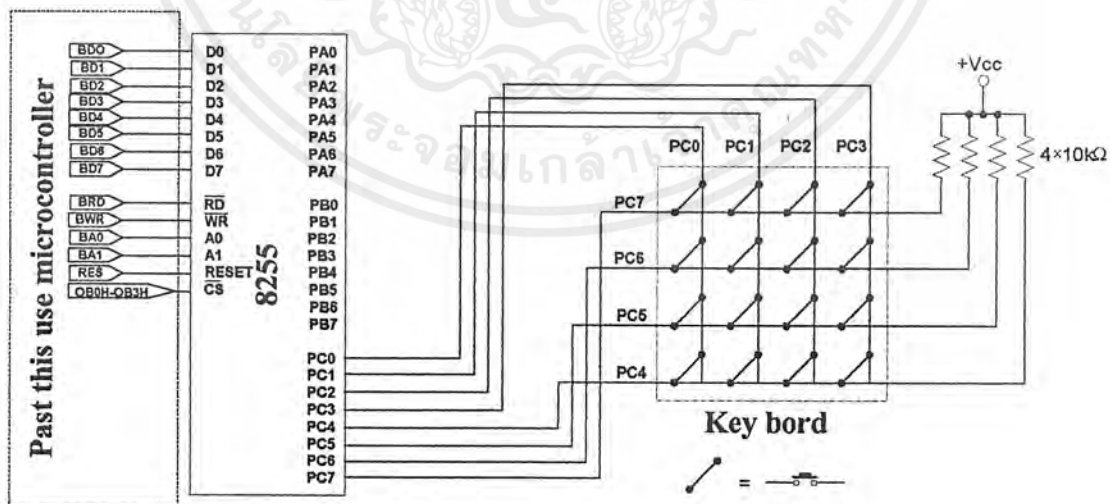
รูปที่ 9.1 แสดงวงจรของสวิตช์และการเกิดการบาวนซ์ขณะกดสวิตช์

ขณะยังไม่กดสวิตช์เอาต์พุตจะเป็นลอจิก “1” เมื่อกดสวิตช์เอาต์พุตจะเป็นลอจิก “0” แต่เนื่องจากในการกดสวิตช์โดยทั่วไปจะปรากฏพัลส์ที่ไม่ต้องการขึ้นมาซึ่งเกิดจากการกระเด็นของหน้าสัมผัส ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การบาวนซ์ (Bounce) ดังแสดงในรูปที่ 9.1(b)

การเกิดบาวนซ์จะทำให้การรับข้อมูลผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงต้องแก้สัญญาณบาวนซ์โดยใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรมจะทำงานโดยการตรวจสอบการกดสวิตช์ครั้งแรก แล้วรอสักระยะเวลาช่วงหนึ่ง เพื่อที่จะให้ผ่านช่วงเวลาที่เกิดการบาวนซ์ผ่านไปแล้วทำการอ่านข้อมูลจากสวิตช์อีกครั้งหนึ่งเพื่อจะนำไปเป็นข้อมูล การแก้สัญญาณบาวนซ์นั้นสามารถนำมาเขียนเป็นโฟลว์ชาร์ตดังรูปที่ 9.2



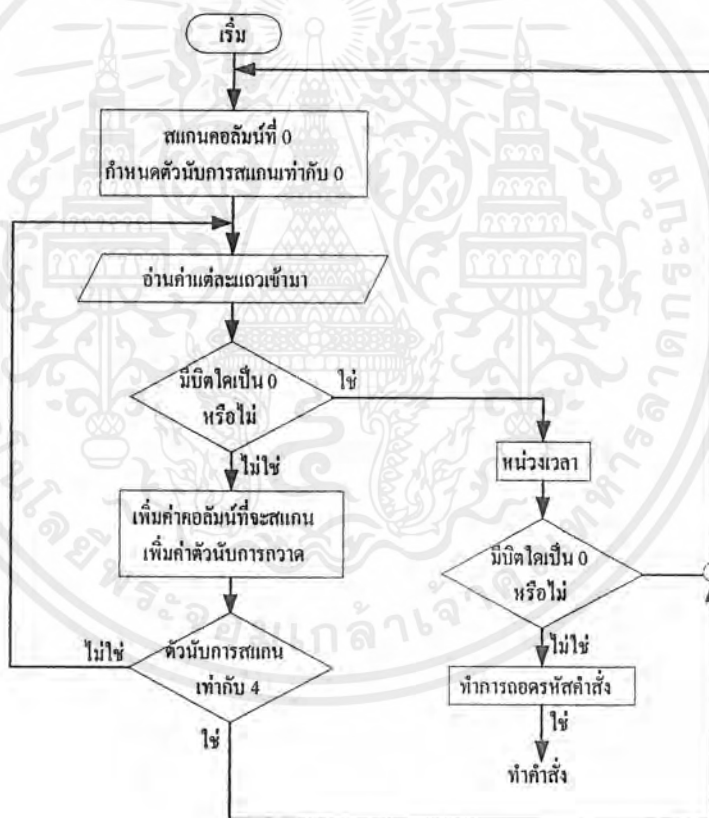
รูปที่ 9.2 โฟลว์ชาร์ตแสดงการแก้สัญญาณบววนซ์



รูปที่ 9.3 วงจรแสดงการต่อคีย์บอร์ดแบบเมตริกซ์ขนาด 4x4 กับ ไอซีเบอร์ 8255

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 9.3 เป็นวงจรมแสดงการต่อคีย์บอร์ดแบบเมตริกซ์ขนาด 4×4 กับไอซีเบอร์ 8255 ซึ่งพอร์ต C ของ 8255 จะควบคุมให้พอร์ต PC0-PC3 เป็นเอาต์พุต และพอร์ต PC4-PC7 เป็นอินพุต และจำเป็นต้องมี R-Pull up ไว้เพื่อเมื่อยังไม่มีการกดสวิตช์จะได้มีสถานะคงที่อยู่ค่าๆ หนึ่ง เพราะจะทำการสแกนลอจิก "0" ที่คอลัมน์ หลักการก็คือ ส่งข้อมูลลอจิก "0" ให้กับคอลัมน์แรก ส่วนคอลัมน์อื่นส่งมุดลอจิก "1" แล้วอ่านข้อมูลแต่ละแถวเพื่อดูว่ามีแถวใดเป็นลอจิก "0" บ้าง ถ้ามีแสดงว่ามีมีการกดสวิตช์ จากนั้นก็ไปทำการตรวจสอบว่าเป็นแถวใดและคอลัมน์ใดก็จะทำให้ทราบว่ามีสวิตช์ตัวใดมีการกดค่าใดจากนั้นก็นำค่าที่ได้ไปทำงานตามโปรแกรมต่อไป แต่ถ้าอ่านแล้วไม่มีแถวใดเป็นลอจิก "0" ก็ส่งลอจิก "0" ไปคอลัมน์ถัดไปแล้วอ่านค่าที่แถวใหม่ ทำอย่างนี้จนกว่าจะสแกนหมดทุกคอลัมน์ดังแสดงในโฟลว์ชาร์ทรูปที่ 9.4



รูปที่ 9.4 โฟลว์ชาร์ทแสดงการสแกนคีย์บอร์ด

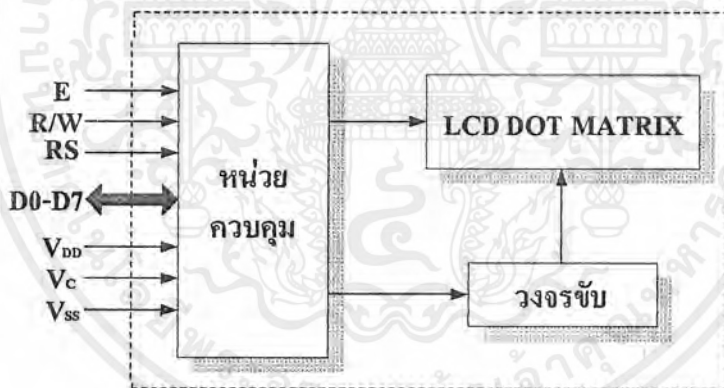
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2 หน่วยแสดงผลแบบ LCD

หน่วยแสดงผลแบบ LCD (Liquid Crystal Display) มีโครงสร้างเป็นแบบคอตเมตริกซ์ เป็นอุปกรณ์แสดงผลชนิดหนึ่งที่น่าิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากกินพลังงานต่ำ มีขนาดเล็ก มีความละเอียดสูง สามารถแสดงตัวอักษรและรูปภาพได้หลายแบบ การที่จะทำให้ LCD แต่ละจุดสว่างเป็นรูปร่างหรือตัวอักษรต่าง ๆ นั้นจะต้องใช้วงจรขับที่มีความซับซ้อนมาก ในปัจจุบันจึงมีการสร้างเป็นบอร์ด LCD สำเร็จรูป (LCD Module) เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน โดยโครงสร้างภายในประกอบด้วย จอภาพแบบ LCD วงจรขับสัญญาณ และตัวควบคุม LCD ทำให้บอร์ด LCD แสดงผลลักษณะต่างๆ จะทำได้โดยการเขียนคำสั่งควบคุมและเขียนข้อมูลให้กับ LCD โมดูลเท่านั้น

9.2.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของ LCD โมดูล

หน่วยแสดงผลแบบ LCD โมดูลที่พบทั่วไปในท้องตลาดจะมีโครงสร้างที่สะดวกต่อการใช้งาน โดยส่วนประกอบทั่วไปเป็นดังรูปที่ 9.5



รูปที่ 9.5 โครงสร้างทั่วไปของ LCD โมดูล

ส่วนที่เป็น LCD Dot Matrix จะประกอบด้วยจุดขนาดเล็กจำนวนมากโดยแต่ละจุดจะถูกบังคับให้ติดสว่างในรูปร่างต่างๆ ด้วยวงจรถับ ส่วนหน่วยควบคุมจะประกอบด้วยหน่วยความจำและรีจิสเตอร์ต่างๆ ทำหน้าที่กำหนดลักษณะการทำงานของ LCD รูปร่างของการแสดงผล รวมทั้งควบคุมส่วนต่างๆ ภายในโมดูล

โดยทั่วไปแล้วขาต่างๆ ของ LCD โมดูลประกอบด้วย

1. ขา V_{DD} ขานี้จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟ +5 โวลต์
2. ขา V_{SS} ขานี้จะต่อกับกราวด์ของแหล่งจ่ายไฟ
3. ขา V_C ขานี้จะเป็นขาที่ควบคุมความสว่างของ LCD
4. ขา RS เป็นขาที่ใช้ควบคุมรีจิสเตอร์ภายในหน่วยควบคุม เนื่องจากมีรีจิสเตอร์อยู่ 2 ประเภทคือ รีจิสเตอร์คำสั่ง (Command Register) และรีจิสเตอร์ข้อมูล (Data Register) ถ้าหากขานี้เป็นลอจิก "0" หมายความว่าเลือกรีจิสเตอร์ข้อมูล ถ้าเป็นลอจิก "1" หมายความว่าเลือกรีจิสเตอร์คำสั่ง
5. ขา R/W เป็นขาสัญญาณที่ใช้เลือกว่าจะอ่านหรือเขียนข้อมูลให้กับ LCD ถ้าเป็นลอจิก "0" หมายความว่าอ่านข้อมูล ถ้าเป็นลอจิก "1" หมายความว่าเขียนข้อมูล
6. ขา E (Enable) เป็นขากำหนดลักษณะการอ่านเขียนข้อมูล

สำหรับการเชื่อมต่อ LCD โมดูลเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นทำได้หลายวิธี โดยอาจต่อ LCD โมดูลเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรง โดยให้ไมโครคอนโทรลเลอร์มองว่าเป็นชิพตัวหนึ่งคล้ายกับหน่วยความจำ การต่อแบบนี้เรียกว่าการต่อแบบ Memory Map แต่จะทำให้เสียเนื้อที่หน่วยความจำบางส่วนไป การติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับ LCD โมดูลจะใช้คำสั่งเหมือนกับการติดต่อกับหน่วยความจำ หรืออีกวิธีหนึ่งเราอาจต่อ LCD โมดูลเข้ากับพอร์ตอินพุตเอาต์พุตของระบบที่มีอยู่แล้วจากนั้นใช้การเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณขึ้นมาเพื่อติดต่อกับ LCD โมดูล นอกจากนี้สัญญาณข้อมูลที่จะส่งให้กับ LCD โมดูลสามารถเลือกใช้แบบ 8 บิตหรือ 4 บิตได้อีกด้วย

ในโครงการนี้จะใช้วิธีแรกในการติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพราะบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นบอร์ด ANT-32 ของบริษัท SILA โดยมีการต่อพอร์ต LCD โมดูลแบบ Memory Map โดยมีค่าแอดเดรสเป็น FA00H-FB00H แอดเดรสต่างๆ จะใช้ต่อกับ LCD โมดูลดังตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 แอดเดรสต่างๆ จะใช้ต่อกับ LCD โมดูล

ตำแหน่งแอดเดรส	หน้าที่
FA00H	เขียนคำสั่ง
FA01H	อ่านคำสั่ง(Busy)
FA02H	เขียนข้อมูล
FA03H	อ่านข้อมูล

9.2.2 การใช้งาน LCD โมดูล

เริ่มจากการเขียนคำสั่งควบคุมต่างๆ ให้กับรีจิสเตอร์คำสั่งของ LCD โมดูล โดยมีคำสั่งหลายคำสั่งสำหรับกำหนดการทำงานของ LCD โมดูล เช่น ต้องการให้รับข้อมูลแบบ 4 บิต หรือ 8 บิต ต้องการให้มี CURSOR หรือ ไม่ เมื่อแสดงข้อมูลแล้วจะให้ CURSOR เลื่อนไปทางใด โดยคำสั่งต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 9.2 และการทำงานแต่ละคำสั่งจะต้องใช้เวลาในการทำงานด้วย ถ้าหาก LCD โมดูลทำคำสั่งยังไม่เรียบร้อยจะไม่สามารถเขียนคำสั่งใหม่เข้าไปได้ ต่อจากนั้นเมื่อต้องการแสดงข้อมูลหรือตัวอักษรในตำแหน่งต่างๆ ของจอภาพจะต้องเขียนข้อมูลนั้นให้กับรีจิสเตอร์ข้อมูลเพื่อให้ส่งข้อมูลไปยังหน่วยความจำสำหรับแสดงผลของ LCD โมดูล

สามารถสรุปได้ว่าการเขียนข้อมูลให้กับ LCD โมดูลจะมี 2 ลักษณะ คือ เป็นคำสั่งและเป็นข้อมูล ซึ่งจะถูกกำหนดด้วยขา RS ถ้าขา RS เป็นลอจิก "0" หมายความว่า เป็นคำสั่งควบคุม ถ้า RS เป็นลอจิก "1" หมายความว่า เป็นข้อมูล และในการเขียนข้อมูลตัว LCD โมดูลจะต้องใช้เวลาในการทำงานดังที่แสดงในตารางที่ 9.2 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถตรวจสอบการทำงานของ LCD โมดูลได้ทางแฟล็ก BF (Busy Flag) ถ้าแฟล็ก BF เป็นลอจิก "0" หมายความว่า LCD โมดูลสามารถรับข้อมูลต่อไปได้ ดังนั้นในการเขียนข้อมูลทุกครั้งจะต้องตรวจสอบแฟล็กนี้ด้วย

สำหรับหน่วยความจำภายใน LCD โมดูล มีอยู่ 2 ชนิด คือ DDRAM (Display Data RAM) และ CGRAM (Character Generator RAM) โดย DDRAM เป็นหน่วยความจำภายในตัว LCD โมดูล ถ้าหากเขียนค่ารหัส ASCII ลงในหน่วยความจำจะทำให้ LCD โมดูลแสดงตัวอักษร ส่วน CGRAM เป็นหน่วยความจำที่สามารถสร้างภาพตัวอักษรเองได้

ตารางที่ 9.2 รูปแบบของคำสั่งควบคุมการเขียนข้อมูล รวมทั้งสภาวะของขาสัญญาณต่างๆที่จำเป็น

คำสั่ง	RS	R/W	บิตข้อมูล								เวลาทำงาน	
			7	6	5	4	3	2	1	0		
CLEAR DISPLAY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1640 us
CURSOR AT HOME	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	*	1640 us
ENTRY MODE SET	0	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S	40 us
DISPLAY ON/OFF	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B		40 us
DISPLAY SHIFT	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	*	*		40 us
FUNCTION SET	0	0	0	0	1	DL	N	F	*	*		40 us
SET CGRAM ADD	0	0	0	1	CGRAM ADDRESS						40 us	
SET DDREM ADD	0	0	1	DDRAM ADDRESS						40 us		
BUSY , ADD , READ	0	1	BF	ADDRESS						0 us		
WR CGRAM , DDRAM	1	0	WRITE DATA						40 us			
RD CGRAM , DDRAM	1	1	READ DATA						40 us			

ดังนั้นถ้าหากเราต้องการให้ LCD โมดูลแสดงข้อความต่างๆหลังจากเขียนคำสั่งควบคุมต่างๆ ลงไปแล้ว จะต้องเขียนข้อมูลรหัส ASCII ที่จะแสดงผลให้กับแอดเดรสของตำแหน่งต่างๆบน LCD โมดูลสำหรับการกำหนดแอดเดรสของ DDRAM เมื่อทำการกำหนดไว้แล้วการอ่านเขียนข้อมูลต่อจากนี้ จะเป็นไปตามแอดเดรสที่กำหนดทันทีโดยแอดเดรสของ LCD โมดูล แต่ละรุ่นจะแตกต่างกันบ้างซึ่งในโครงงานนี้เลือกใช้ LCD โมดูลรุ่น DMC-162 ซึ่งจะแสดงผลแบบ 2 บรรทัด บรรทัดละ 16 ตัวอักษร โดยแอดเดรสของ LCD โมดูลรุ่นนี้แสดงในตารางที่ 9.3

ตารางที่ 9.3 แอดเดรสของ LCD โมดูลรุ่น DMC-162

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางคำสั่งที่ 9.2 จะเห็นว่า การเขียนข้อมูลแอดเดรสให้ DDRAM จะกำหนดให้บิต 7 เป็นลอจิก "1" เสมอ เพื่อให้สะดวกต่อการเรียกใช้และเป็นแอดเดรสที่สอดคล้องกับ LCD โมดูลแต่ละรุ่น สำหรับการเขียนข้อมูลลงหน่วยความจำ DDRAM เมื่อเขียนข้อมูลลงไปแล้วค่าแอดเดรสจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยอัตโนมัติ โดยถูกกำหนดจากค่า I/D ในคำสั่ง Entry Mode Set



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 10

โปรแกรมควบคุมความเร็วรอบและการเบรคมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

10.1 การเริ่มทำงานของโปรแกรม

เมื่อเริ่มต้นทำงานโปรแกรมส่งค่า $FFFF_H$ ที่พอร์ตที่ต่อกับวงจร D/A เพื่อให้ขณะยังไม่ มีคำสั่งใดมุมทริกของเอสซีอาร์จะอยู่ที่มุม 180° ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์มีค่าเป็น 0 โวลท์และที่จอ LCD จะแสดงข้อความ “2-QUARANT DC MOTOR CONTROL” จากนั้นจะเข้าสู่การ สแกนคีย์บอร์ดเพื่อรอรับคำสั่ง ซึ่งคำสั่งให้เลือก คือ

- SPEED : ตั้งให้มอเตอร์หมุน (โดยถ้าตั้งให้มอเตอร์หมุนก็จะมีกรรับค่าความเร็ว รอบ ที่ต้องการนั้นด้วย)
- STOP : ตั้งให้มอเตอร์หยุดหมุน(เบรคมอเตอร์)

เมื่อมีการกดคำสั่ง SPEED จอ LCD จะแสดงข้อความ “SPEED CONTROL;MAX 600 RPM” หมายถึงความเร็วสูงสุดที่สามารถควบคุมได้ไม่เกิน 600 รอบต่อนาที จากนั้นโปรแกรมจะ เข้าสู่โปรแกรมควบคุมความเร็วรอบ

แต่หากมีการกดคำสั่ง STOP จอ LCD จะแสดงข้อความ “REGENERATIVE BRAKING” จากนั้นโปรแกรมจะเข้าสู่โปรแกรมควบคุมการเบรคต่อไป ดังแสดงการเริ่มทำงานของ โปรแกรมในรูปที่ 10.1

10.2 การทำงานของโปรแกรมควบคุมความเร็วรอบ

การทำงานของโปรแกรมจะเริ่มจากการรับค่าความเร็วรอบที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 10.2 (a) จะเริ่มจากการสแกนคีย์บอร์ดเพื่อรับค่าความเร็วรอบที่ต้องการ 3 หลัก และจอ LCD จะ แสดงค่าความเร็วรอบที่ป้อนเข้าไปด้วยโดยถ้าป้อนความเร็วมากกว่า 600 รอบต่อนาทีแล้วกดปุ่ม ENTER จอ LCD จะแสดงข้อความ “ERROR” จากนั้นโปรแกรมจะเคลียร์หน้าจอ LCD แล้วรับค่า ความเร็วรอบใหม่ เมื่อป้อนค่าความเร็วรอบที่ต้องการแล้วกดปุ่ม ENTER จอ LCD ยังคงแสดง ความเร็วรอบที่ต้องการอยู่ จากนั้นโปรแกรมก็จะเข้าสู่โปรแกรมควบคุมความเร็วรอบต่อไป ดัง แสดงในรูปที่ 10.2 (b) การทำงานจะรับค่าความเร็วปัจจุบันซึ่งได้จากส่วนวงจรตรวจจับความเร็ว รอบ โดยผ่านวงจร A/D เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเร็วรอบที่ต้องการควบคุม โดยการเปรียบ เทียบมีกรณีดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีความเร็วรอบปัจจุบันเท่ากับความเร็วรอบที่ต้องการ

ถ้าค่าความเร็วรอบปัจจุบันเท่ากับความเร็วรอบที่ต้องการอยู่แล้ว โปรแกรมก็จะหนดเวลาแล้วกลับเข้าสู่การควบคุมความเร็วรอบ เพื่อเริ่มต้นทำงานวนซ้ำกับที่กล่าวมาข้างต้น

- กรณีความเร็วรอบปัจจุบันน้อยกว่าความเร็วรอบที่ต้องการ

จะมีการตรวจสอบว่าสามารถเพิ่มความเร็วรอบขึ้นอีกได้หรือไม่ เนื่องจากการเพิ่มความเร็วรอบทำได้โดยการลดมุมทริก ซึ่งมุมทริกที่ลดต้องไม่ต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่สามารถทำงานได้ ถ้าตรวจสอบแล้วสามารถลดมุมทริกได้อีก ก็จะลดมุมทริกลงมา 1 ระดับ แล้วก็จะหนดเวลาแล้ววนการทำงานซ้ำในส่วนควบคุมความเร็วรอบอีก

- กรณีความเร็วรอบปัจจุบันมากกว่าความเร็วรอบที่ต้องการ

จะมีการตรวจสอบว่าสามารถลดความเร็วรอบได้อีกหรือไม่ เนื่องจากได้กำหนดมุมทริกสำหรับความเร็วรอบที่ต่ำสุดเป็น 90° ถ้าหากสามารถลดความเร็วรอบลงได้ก็จะเพิ่มมุมทริกขึ้น 1 ระดับ จากนั้นก็จะหนดเวลาแล้ววนการทำงานซ้ำในส่วนควบคุมความเร็วรอบ

ในโปรแกรมควบคุมความเร็วรอบดังรูปที่ 10.2(a) และ 10.2(b) จะมีการสแกนคีย์บอร์ดเพื่อตรวจสอบว่ามีการกดปุ่ม CLEAR หรือไม่อยู่ในรูปด้วย ซึ่งคำสั่ง CLEAR หมายถึงการเคลียร์หน้าจอ LCD ในการรับคำสั่งใหม่แต่คำสั่งนี้มอเตอร์ยังหมุนที่ความเร็วรอบที่ต้องการค่าเดิมอยู่เพียงแต่ออกมารับค่าความเร็วรอบค่าใหม่ หรือหยุดมอเตอร์

10.3 โปรแกรมการเบรคมอเตอร์

มีการทำงานตามรูปที่ 10.3 ซึ่งการหยุดมอเตอร์มีการทำงานดังนี้ การทำงานของโปรแกรมก็จะเริ่มต้นโดยทำการตรวจสอบค่าความเร็วรอบปัจจุบันซึ่งมีอยู่ 2 กรณี คือ ถ้าความเร็วรอบเป็นศูนย์แสดงว่ามอเตอร์หยุดแล้วก็เสมือนว่าได้ทำคำสั่งนี้เสร็จแล้ว โปรแกรมจะออกมารับคำสั่งใหม่ แต่หากความเร็วรอบขณะนั้นไม่เท่ากับศูนย์ก็แสดงว่ามอเตอร์กำลังหมุนอยู่ โปรแกรมจะทำให้คอนเวอร์เตอร์หยุดทำงานของมอเตอร์ทำงาน โดยทำการเลื่อนมุมทริกของเอสซีอาร์ไปที่ 180° และตรวจสอบค่ากระแสแล้วจนกระแสมีค่าเป็นศูนย์จากนั้นก็กลับขั้วของขดลวดฟิลต์เพื่อทำให้ค่าของแรงเคลื่อนย้อนกลับ ของมอเตอร์กลับทิศทาง ถ้าเป็นการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องจะสามารถเริ่มต้นมุมทริกได้ที่ $180-\alpha^\circ$ เพื่อให้แรงดันที่ขั้วเทอร์มินอลเท่ากับแรงดันย้อน

กลับแล้วค่อยๆ ลดมุมทริกกลงโดยควบคุมให้แรงดันที่เทอร์มินอลมีค่าน้อยกว่าแรงดันย้อนกลับตลอดเวลาจนมอเตอร์หยุดหมุน แต่หากการทำงานเป็นแบบกระแสไม่ต่อเนื่องนั้น ไม่สามารถทราบตำแหน่งมุมทริกที่จะทำให้แรงดันที่เทอร์มินอลมีค่าเท่ากับแรงดันย้อนกลับจึงต้องเริ่มมุมทริกที่มุม 180° ซึ่งที่ตำแหน่งนี้ค่าแรงดันที่เทอร์มินอลจะมีค่าไม่ต่ำกว่าแรงดันย้อนกลับแล้วค่อยๆ ลดมุมทริกลงมาจนแรงดันที่เทอร์มินอลมีค่าน้อยกว่าแรงดันย้อนกลับ กระแสก็สามารถไหลออกจากมอเตอร์ได้ จากนั้นการลดมุมทริกลงมาจะต้องให้แรงดันที่เทอร์มินอลมีค่าน้อยกว่าแรงดันย้อนกลับตลอดเวลา จนมีค่าความเร็วรอบเป็นศูนย์หรือมุมทริกเป็น 90° ในช่วงนี้มอเตอร์จะจ่ายพลังงานกลับคืนสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเป็นการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ เมื่อมอเตอร์หยุดหมุนแล้วก็หยุดคอนเวอร์เตอร์ (เพิ่มมุมทริกไปที่ 180°) ทำการตรวจสอบค่ากระแสออกจนกว่ามีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นทำการกลับขั้วขดลวดฟิลด์ แล้วโปรแกรมก็จะออกมารับคำสั่งใหม่ต่อไป (ในขณะที่โปรแกรมกำลังทำคำสั่งหยุดหมุนอยู่ไม่สามารถเปลี่ยนไปทำคำสั่งอื่นได้ ต้องรอจนกว่าจะทำคำสั่งหยุดหมุนเสร็จ)

10.4 การปรับค่ามุมทริกโดยใช้ตารางโคไซน์

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เทอร์มินอลของคอนเวอร์เตอร์สามารถกำหนดได้โดยการควบคุมที่มุมทริกของเอสซีอาร์ โดยในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณทริก สามารถที่จะปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ควบคุมการปรับมุมของสัญญาณทริก (ขา 11 ของ TCA#785) จาก 0-6 โวลต์เพื่อให้สัญญาณทริกที่สร้างมีการเปลี่ยนแปลงมุมทริกได้จาก 0-180 องศา

ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการปรับมุมทริกได้จากเอาต์พุตของวงจร D/A ซึ่งส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งค่าดิจิตอล 8 บิตป้อนเป็นอินพุตให้กับวงจรดังกล่าว ค่าดิจิตอล 8 บิตนี้ได้จากการคำนวณค่าจากตารางโคไซน์ (Cosine Table) ที่อยู่ในโปรแกรม ซึ่งสร้างจากการกำหนดให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ 600 ช่วง จาก 0-600 RPM ค่าความเร็วรอบที่เป็นรอบต่อนาที จาก 0-600 แต่ละค่าจะถูกหารด้วย 600 เพื่อเทียบให้ค่าสูงสุดเป็นหนึ่งแล้วหาค่าอาร์คคอสของค่าความเร็วรอบที่ถูกหารด้วย 600 ได้เป็นมุมทริกในหน่วยองศา เนื่องจากค่ามุมทริกในช่วง 0-90 องศาแบ่งย่อยออกเป็น 600 ช่วง ดังนั้นค่ามุมในหน่วยขององศาที่จะถูกหารด้วย 90 แล้วคูณด้วย 600 แปลงเป็นเลขฐาน 16 เพื่อเก็บไว้ในตารางโคไซน์

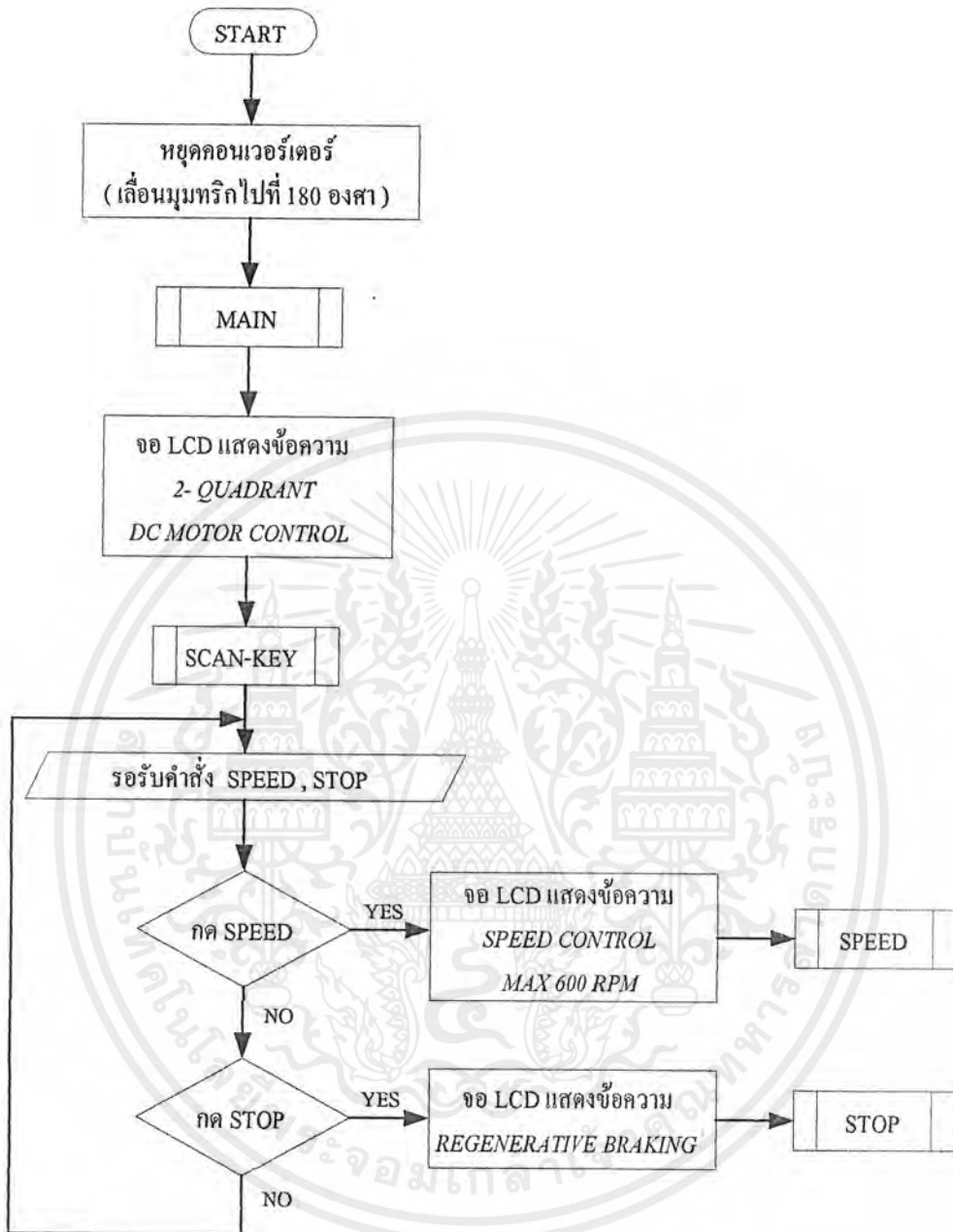
เช่น $600RPM \rightarrow \frac{600}{600} = 1 \rightarrow \cos^{-1}(1) = 0^\circ \rightarrow 0^\circ \times \frac{600}{90} = 000H$

หรือ $0RPM \rightarrow \frac{0}{600} = 0 \rightarrow \cos^{-1}(0) = 90^\circ \rightarrow 90^\circ \times \frac{600}{90} = 258H$

ในการแบ่งช่วงของมุมทริกจาก 0-180 องศาได้แบ่งออกเป็น 1200 ช่วง แต่เนื่องจากในช่วง 0-90 องศาและช่วง 90-180 องศามีความสมมาตรกันดังนั้นจึงสร้างตารางโคไซน์เพียง 600 ค่าแล้วค่อยนำค่าจากตารางโคไซน์มาคำนวณก่อนที่จะส่งออกไปปรับค่ามุมทริกในช่วงต่างๆ

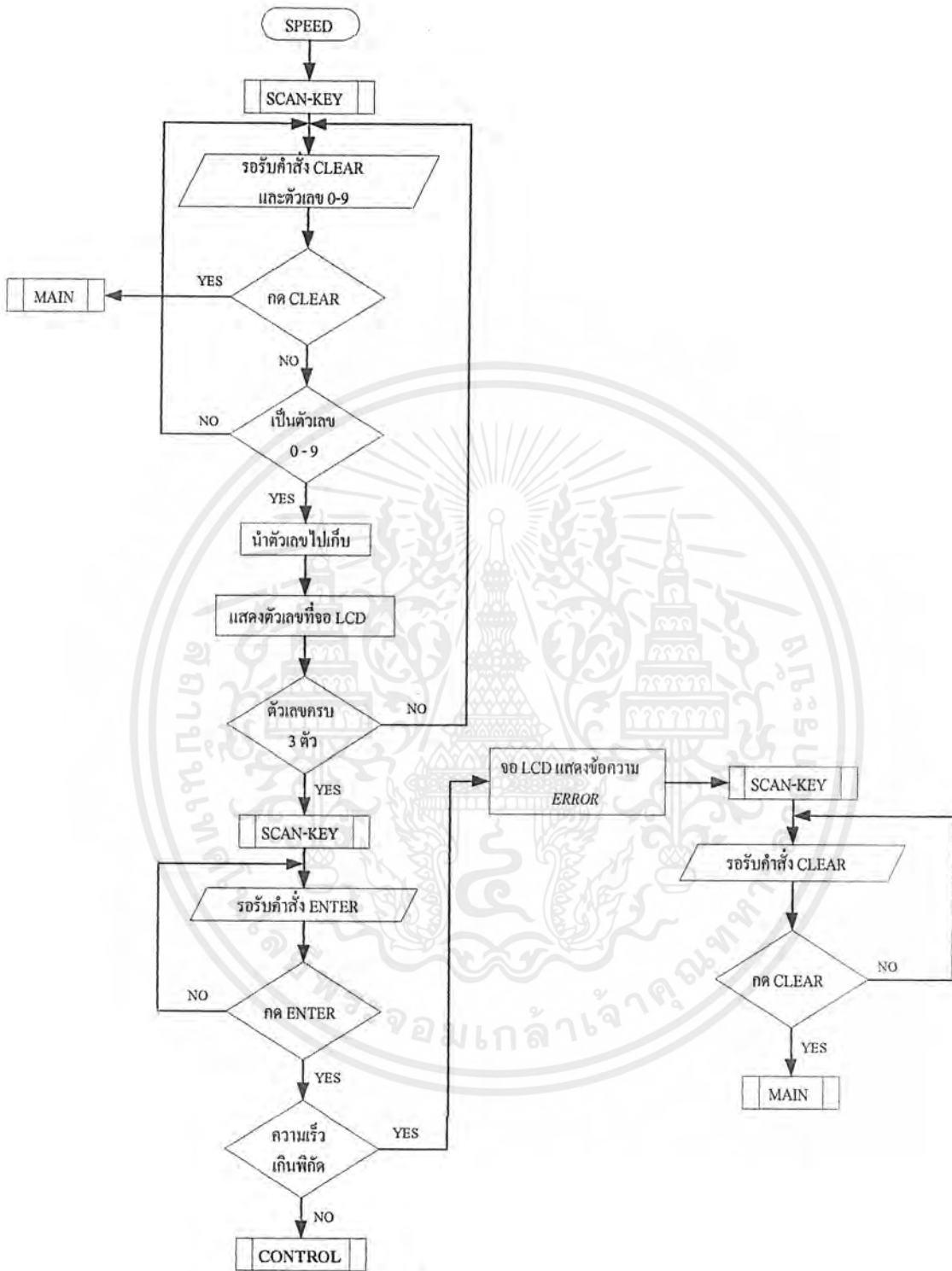


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



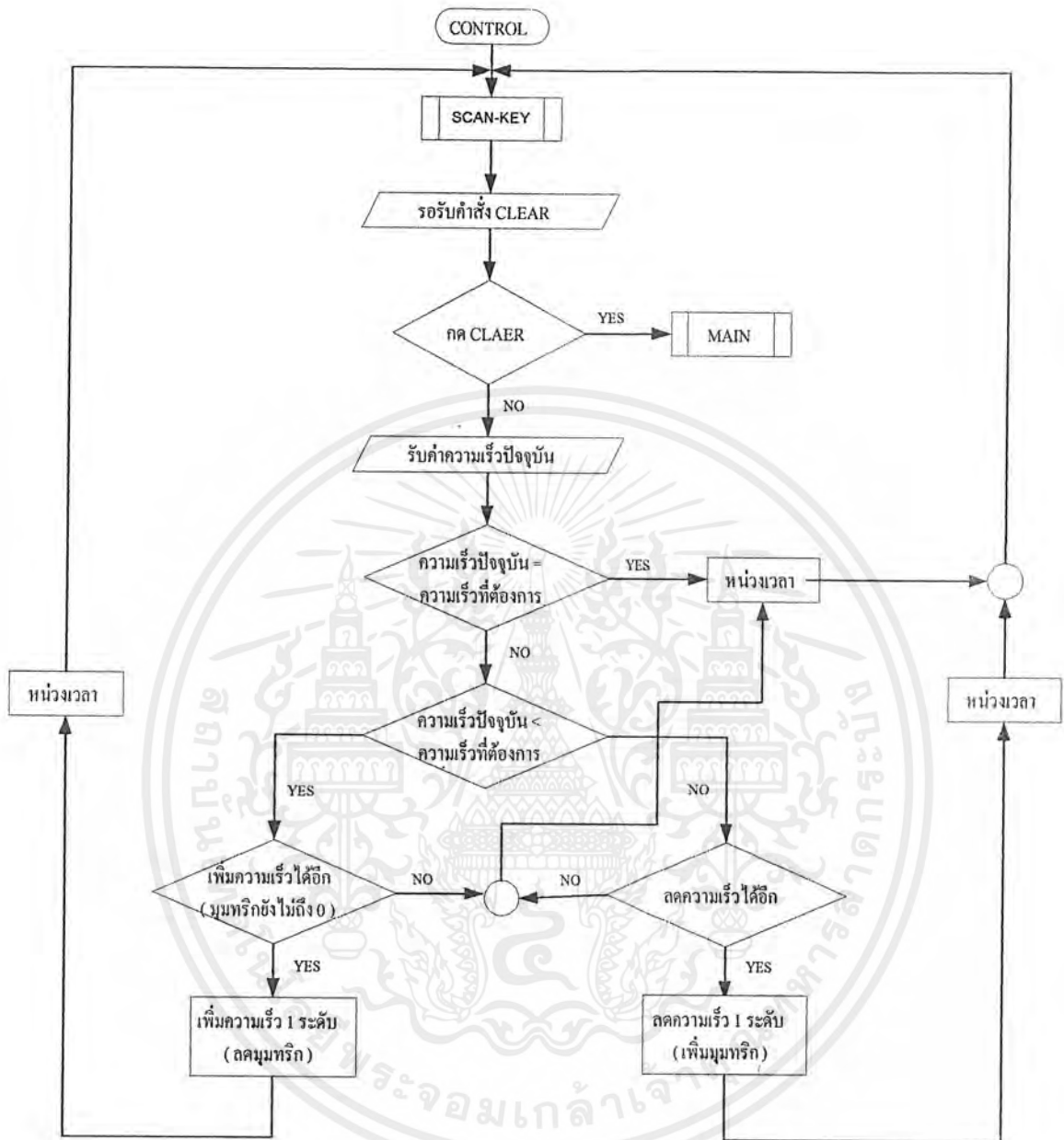
รูปที่ 10.1 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานเริ่มต้นของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



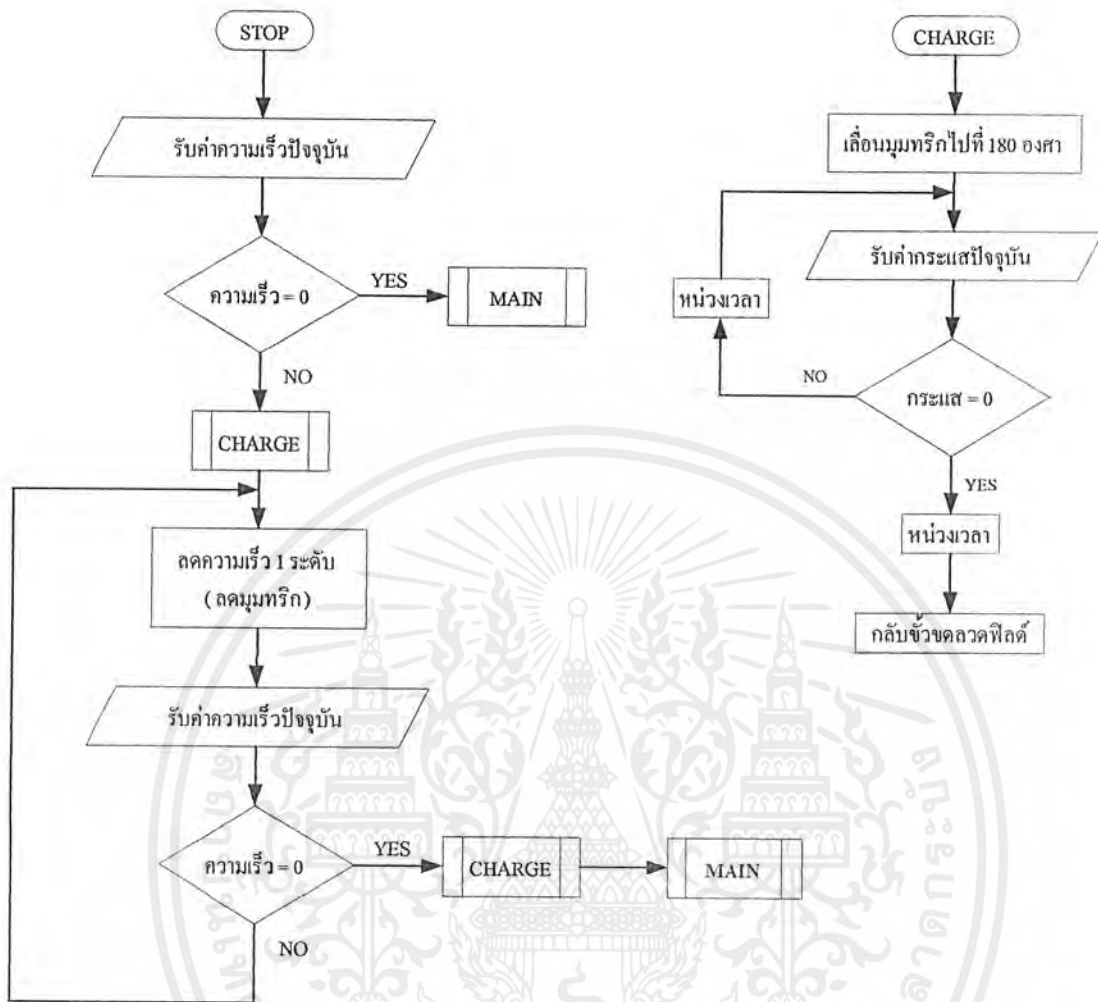
รูปที่ 10.2 (a) โฟลว์ชาร์ตแสดงการรับค่าความเร็วรอบที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10.2 (b) โพลีซาร์ทีแสดงการควบคุมความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10.3 โพลีซาร์ที่แสดงการเบรกมือเดอริ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 11

การทดลองและผลการทดลอง

จากวงจรและโปรแกรมที่ได้กล่าวมาในบทข้างต้นได้นำมารวมกันเพื่อประกอบเป็นชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอดแรนต์ ที่สมบูรณ์ และได้ทดลองนำชุดควบคุมนี้มาขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ที่มีขนาดและข้อมูลดัง Name Plate ในภาคผนวก ก. ซึ่งมอเตอร์ได้ต่อพ่วงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำการจ่ายโหลดซึ่งเป็นโหลดไฟขนาดต่างๆ

11.1 การทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สภาวะโหลดขนาดต่างๆ

ทดลองป้อนค่าความเร็วรอบไปที่ค่าต่างๆ แล้วทำการวัดค่าความเร็วรอบ (N_r) , ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขั้วเทอร์มินอลของมอเตอร์ (V_t) และค่ากระแสอาร์มเจอร์ (I_a) ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 11.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_r , V_t และ I_a ขณะไม่จ่ายโหลด

N_r ; ที่สั่ง (rpm)	ค่าที่วัดได้ขณะไม่จ่ายโหลด		
	N_r (rpm)	V_t (v)	I_a (A)
50	72	26.1	7.6
100	146	50	8.1
150	183	63.3	8.3
200	225	78.5	8.8
250	274	94.2	9.1
300	317	109	9.5
350	360	124	9.7
400	395	136.4	9.8
450	435	149	10.2
500	470	163	10.5
550	510	174	10.6
600	549	190	11.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_r , V_l และ I_a ขณะจ่ายโหลดขนาด 1430 วัตต์

N_r ; ที่ตั้ง (rpm)	ค่าที่วัดได้ขณะจ่ายโหลด 1430 วัตต์		
	N_r (rpm)	V_l (v)	I_a (A)
50	67	27.2	10.3
100	123	53.7	11.6
150	164	65	11.9
200	204	80.3	12.5
250	253	95	13
300	295	111	13.7
350	348	127	14.2
400	395	137.4	15.3
450	430	150.1	15.9
500	470	165	16.2
550	524	175	16.5
600	544	192.5	17

ตารางที่ 11.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_r , V_l และ I_a ขณะจ่ายโหลดขนาด 2350 วัตต์

N_r ; ที่ตั้ง (rpm)	ค่าที่วัดได้ขณะจ่ายโหลด 2350 วัตต์		
	N_r (rpm)	V_l (v)	I_a (A)
50	66	27	14.5
100	123	54.2	15.2
150	165	66.4	15.9
200	204	81	16
250	251	95.7	17.4
300	294	110.9	17.9
350	348	127.2	18.4
400	394	137.3	19.1
450	429	149.8	19.6
500	463	164.8	20
550	520	174.3	20.8
600	535	191.8	21.4

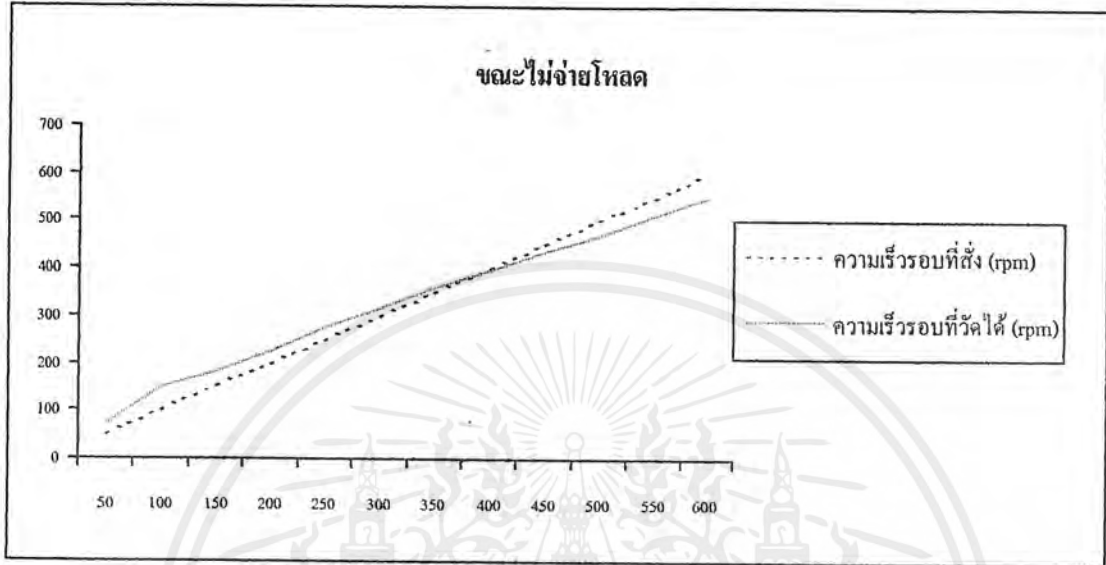
ตารางที่ 11.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_r , V_t และ I_a ขณะจ่ายโหลดขนาด 3300 วัตต์

N_r ; ที่ตั้ง (rpm)	ค่าที่วัดได้ขณะจ่ายโหลด 3300 วัตต์		
	N_r (rpm)	V_t (v)	I_a (A)
50	66	26.8	16
100	122	54	17.9
150	163	66	18.3
200	203	81	19.1
250	251	95.5	20
300	297	111	20.4
350	349	127.7	21.9
400	397	138	22.3
450	445	149.9	22.8
500	482	164.5	23.2
550	545	174	24
600	578	191.7	24.4

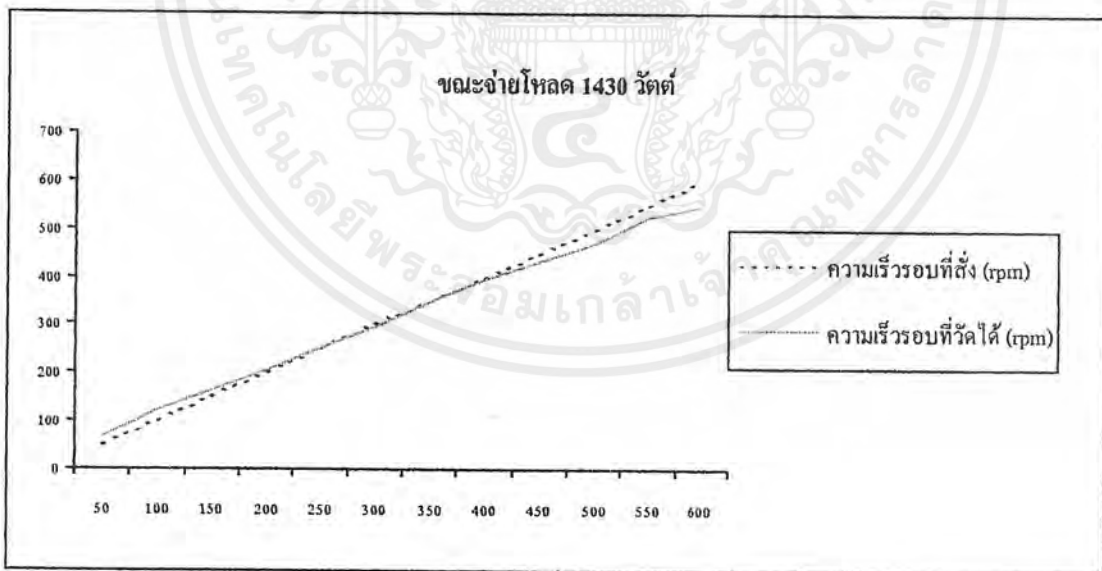
ตารางที่ 11.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_r , V_t และ I_a ขณะจ่ายโหลดขนาด 4250 วัตต์

N_r ; ที่ตั้ง (rpm)	ค่าที่วัดได้ขณะจ่ายโหลด 4250 วัตต์		
	N_r (rpm)	V_t (v)	I_a (A)
50	65	26.8	17.2
100	120	54.2	18.9
150	162	66.3	19.4
200	200	80	20.5
250	251	95.9	21
300	297	111.2	22.3
350	348	127.3	23.3
400	400	139	24.1
450	447	151	25.1
500	488	164.9	25.9
550	545	174.5	26.8
600	583	192	27.4

นำผลการทดลองนี้มาเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วรอบที่สั่งกับความเร็วรอบที่วัดได้ ขณะจ่ายโหลดสถานะต่างๆ จะได้กราฟดังนี้

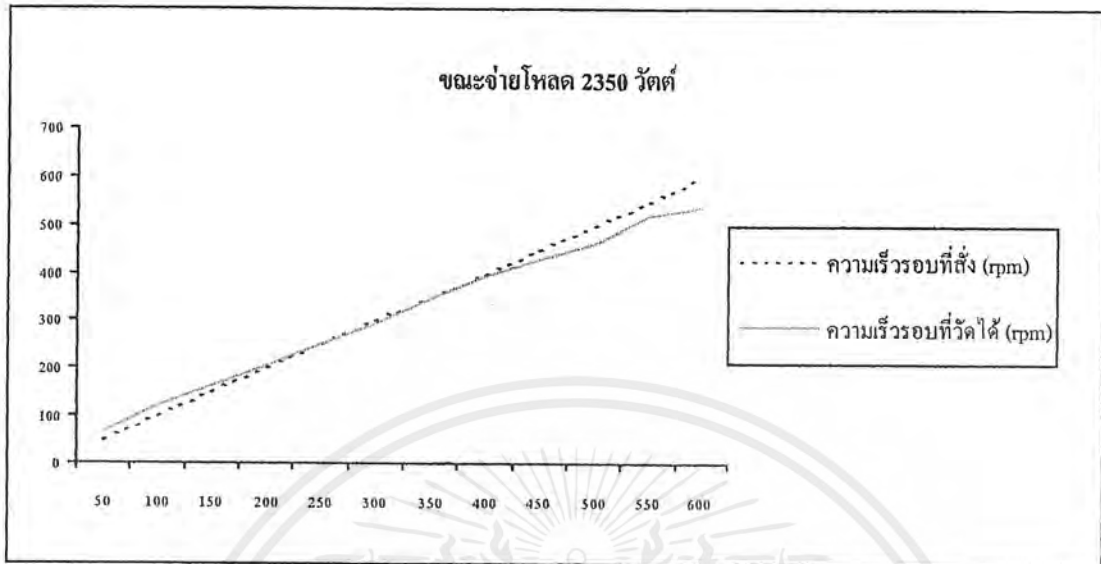


รูปที่ 11.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบที่สั่งกับความเร็วรอบที่วัดได้ ขณะไม่จ่ายโหลด

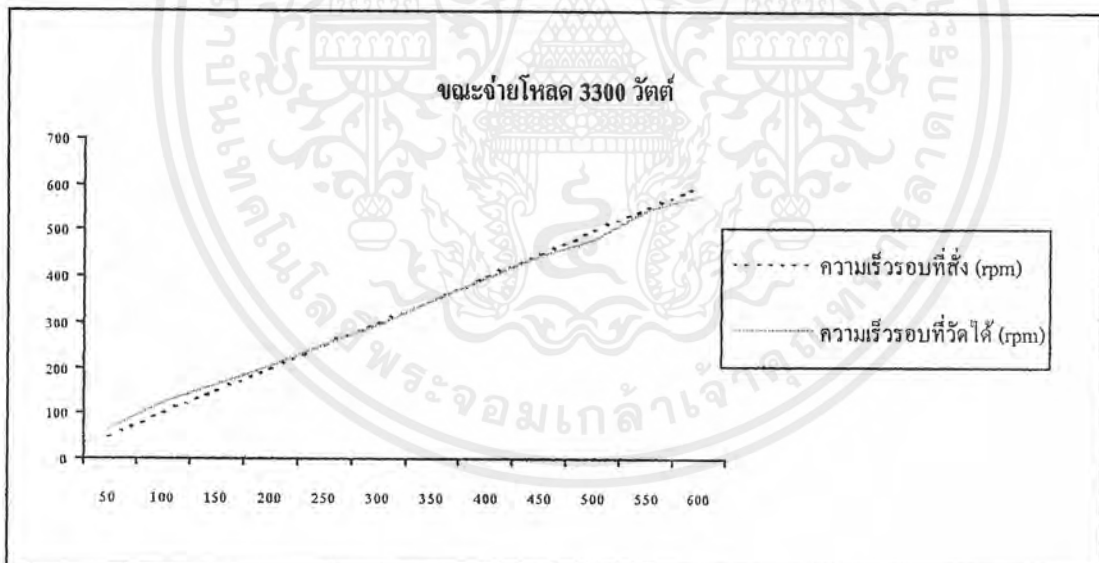


รูปที่ 11.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบที่สั่งกับความเร็วรอบที่วัดได้ ขณะจ่ายโหลด 1430 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

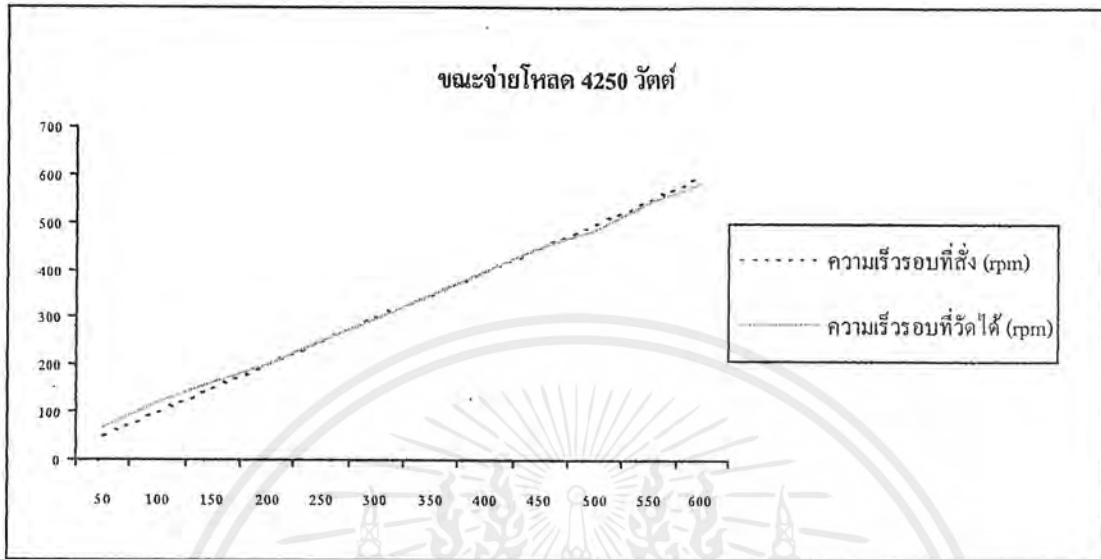


รูปที่ 11.3 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบที่สั่งกับความเร็วรอบที่วัดได้ ขณะจ่ายโหลด 2350 วัตต์



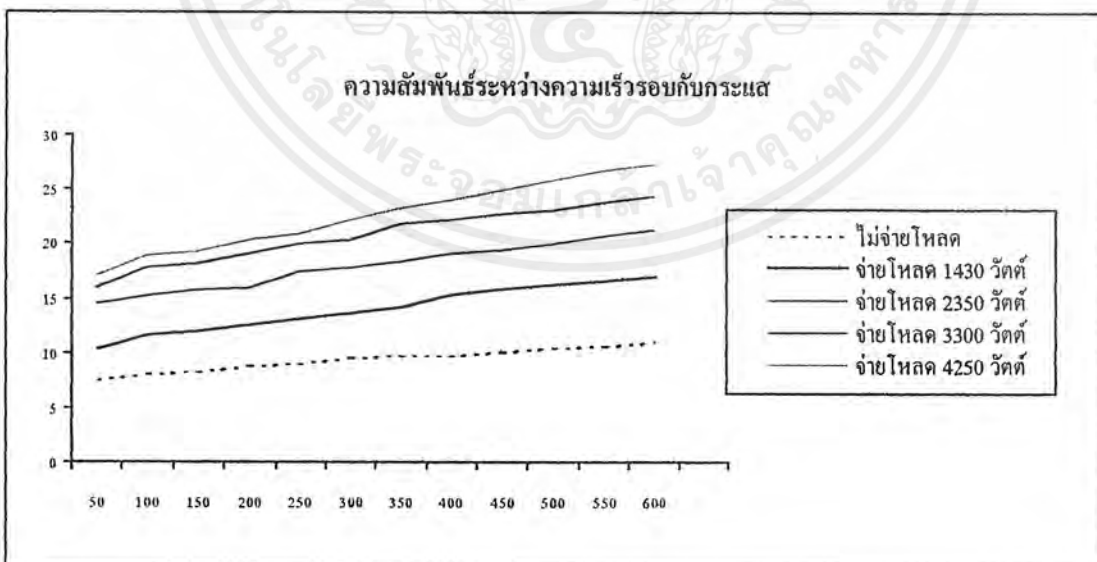
รูปที่ 11.4 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบที่สั่งกับความเร็วรอบที่วัดได้ ขณะจ่ายโหลด 3300 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11.5 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบที่สั่งกับความเร็วรอบที่วัดได้ ขณะจ่ายไหล 4250 วัตต์

นำผลการทดลองมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบกับค่ากระแสอาร์เมเจอร์ที่วัดได้ ที่สภาวะ โหลดขนาดต่างๆ



รูปที่ 11.6 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแส ขณะสภาวะ โหลดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

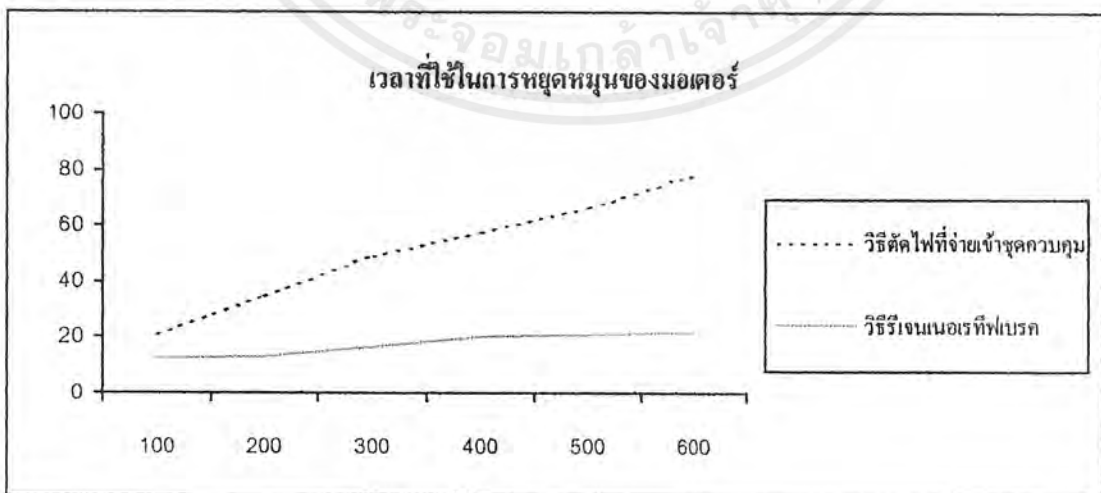
11.2 การทดลองการเบรคมอเตอร์ด้วยวิธีรีเจนเนอเรทีฟเบรค

ทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์ไปที่ความเร็วรอบค่าต่างๆ โดยใช้ชุดควบคุมจากนั้นทำการหยุดมอเตอร์โดยวิธีตัดไฟที่จ่ายเข้าสู่ชุดควบคุม และทำการหยุดมอเตอร์โดยป้อนคำสั่ง STOP (วิธีรีเจนเนอเรทีฟเบรค) ให้ชุดควบคุม แล้วจับเวลาในการหยุดหมุนของมอเตอร์ของทั้ง 2 วิธี ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 11.6 แสดงเวลาในการหยุดหมุนที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยวิธีตัดไฟที่จ่ายเข้าสู่ชุดควบคุม และวิธีรีเจนเนอเรทีฟเบรค

ความเร็วรอบที่ตั้ง (rpm)	เวลาที่ใช้ในการหยุดหมุน (Sec)	
	วิธีตัดไฟที่จ่ายเข้าสู่ชุดควบคุม	วิธีรีเจนเนอเรทีฟเบรค
100	21	12
200	35	13
300	49	17
400	58	20
500	67	21
600	78	22

นำผลการทดลองจากตารางที่ 11.6 มาเปรียบเทียบเวลาในการหยุดหมุนของมอเตอร์ของทั้ง 2 วิธี จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 11.7



รูปที่ 11.7 กราฟเปรียบเทียบเวลาในการหยุดหมุนของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 12

สรุปผลและวิจารณ์

12.1 วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในบทที่ 11 ปรากฏว่าเมื่อขั้วมอเตอร์ไปที่ความเร็วรอบค่าต่างๆ ค่าความเร็วรอบที่วัดได้จะมีค่าแตกต่างกับค่าความเร็วรอบที่ตั้ง โดยเฉพาะความเร็วรอบค่าต่ำๆ เพราะสัญญาณของกระแสมีลักษณะไม่ต่อเนื่องทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เป็นไปตามทฤษฎีได้ เนื่องจากค่าอินดักแตนซ์ (L) ในตัวมอเตอร์ต่ำเกินไปทำให้การสะสมพลังงานต่ำ และเมื่อมีการจ่ายโหลดมากขึ้นค่าความเร็วรอบที่วัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วรอบที่ตั้งมากขึ้น

ในช่วงมุมเข้าใกล้ 0 องศา ชุดทริกไม่สามารถทำงานได้ ทำให้มีปัญหาในการควบคุมความเร็วรอบ โดยเฉพาะถ้าโหลดมีค่าสูงขึ้น ถ้าต้องการรักษาความเร็วรอบให้คงที่ จะต้องเพิ่มแรงดันโดยการลดมุมทริกซึ่งถ้าลดมุมทริกจนชุดทริกไม่สามารถทำงานได้ก็จะทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ ทำให้มอเตอร์ไม่สามารถหมุนเข้าสู่ความเร็วปกติได้

จากผลการทดลองการเบรกเพื่อหยุดการหมุนของมอเตอร์โดยชุดควบคุม ซึ่งเป็นการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ จะใช้เวลาในการหยุดหมุนน้อยกว่าวิธีการหยุดหมุน โดยการตัดแหล่งจ่ายไฟออกไป นอกจากนี้ค่ากระแสที่มอเตอร์ป้อนกลับเพื่อใช้ในการเบรคก็มีค่าไม่สูงมาก ทำให้การเบรกไม่รุนแรงเกินไป

12.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

1. เกิดปัญหาเมื่อนำไอซีต่างรุ่น ต่างยี่ห้อ มาต่อใช้งานในวงจรทริกทำให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้แม้จะรุ่นเดียวกันก็ยังมีค่าแตกต่างกัน โดยเฉพาะ TCA#785 บางตัวไม่สามารถสร้างสัญญาณแรมป์ที่มีความสูงเท่ากันได้ แต่มีค่าใกล้เคียง ทำให้วงจรทริกเอสซีอาร์ทำงานที่มุมแตกต่างกันเล็กน้อย อาจจะใช้แก้ไขโดยการใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพดี
2. เมื่อมีการนำส่วนของวงจรต่างๆ มารวมกัน เช่น วงจรตรวจจับกระแส และความเร็วรอบและไมโครคอนโทรลเลอร์ ปรากฏว่าเกิดสัญญาณรบกวนซึ่งกันและกัน ซึ่งสามารถแก้ปัญหาคือได้โดยการใช้คาปาซิเตอร์ (C) ชนิดที่เป็นแบบมัลติเลเยอร์ ต่อระหว่างไฟเลี้ยงกับกราวด์ในตำแหน่งที่ใกล้กับไอซีมากที่สุด และแยกวงจรกำลังกับวงจรควบคุมออกจากกัน

3. ในส่วนของโปรแกรมควบคุมนั้นยังไม่เน้นไปทางระบบป้องกันมากนักซึ่งนั่นคือโปรแกรมในส่วนป้องกันยังไม่สมบูรณ์เต็มที่ ซึ่งคงต้องพัฒนาต่อไป
4. ส่วนของวงจร D/A ในที่ส่งไปควบคุมวงจรทริกมีขนาดเพียง 8 บิต ซึ่งทำให้ค่าความเร็วรอบที่สามารถควบคุมได้ไม่ละเอียดนัก สามารถแก้ไขโดยการเปลี่ยนมาใช้วงจร D/A ขนาด 12 บิตแทนจะควบคุมความเร็วรอบได้ละเอียดขึ้น
5. เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมมีขนาดใหญ่และเคลื่อนย้ายลำบาก ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบกับโหลดที่มีขนาดเหมาะสมกับพิกัดของมอเตอร์ได้ ทำให้การทดสอบชุดควบคุมไม่สมบูรณ์ อาจแก้ไขโดยการหาโหลดที่มีขนาดเหมาะสมกับมอเตอร์ซึ่งจะทำให้กำลังที่มอเตอร์จ่ายออกมาไม่สูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ และทำให้มีประสิทธิภาพในการควบคุมสูงขึ้นด้วย

12.3 สรุป

การขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกการกระตุ้นสนามแม่เหล็กแบบ 2 ควอดแรนต์ โดยใช้ชุดควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถตั้งให้มอเตอร์วิ่งไปที่ความเร็วรอบที่ต้องการได้ใกล้เคียง ในกรณีที่มีโหลดมากพอที่จะทำให้กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่โหลดน้อย จะไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบที่ความเร็วต่างๆ ได้ เนื่องจากวงจรในส่วนป้องกันและโปรแกรมยังไม่สมบูรณ์ยังต้องแก้ไขและปรับปรุงก่อนนำไปใช้งานจริงต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

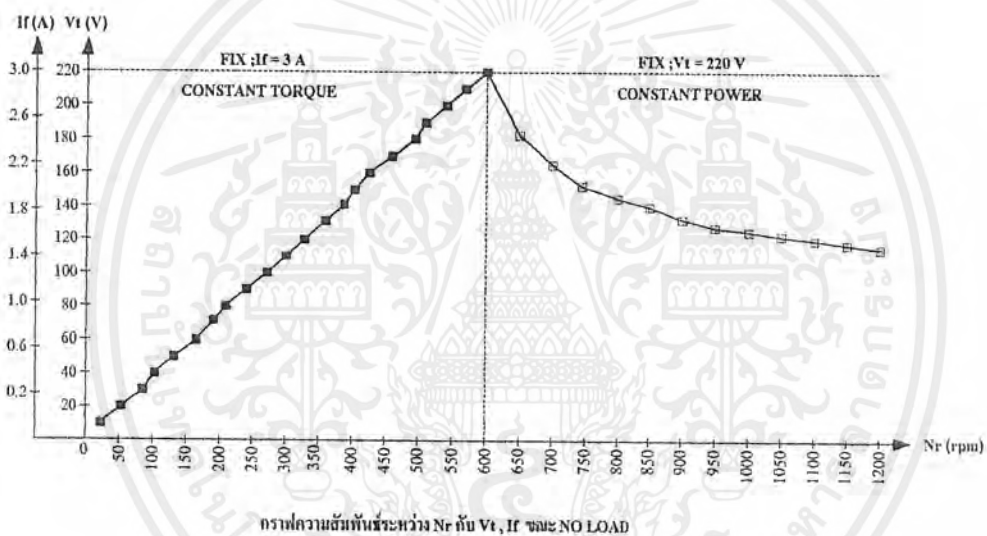
ข้อมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

NAME PLATE

Power 50 B.H.P , Speed 600 RPM

$V_i = 220 \text{ V}$, $I_a = 195 \text{ A}$ (Full load)

$V_f = 220 \text{ V}$, $I_f = 3.8 \text{ A}$



ข้อมูลของเทคโคเจนเนอเรเตอร์

NAME PLATE

Output 6 W , 1200 RPM

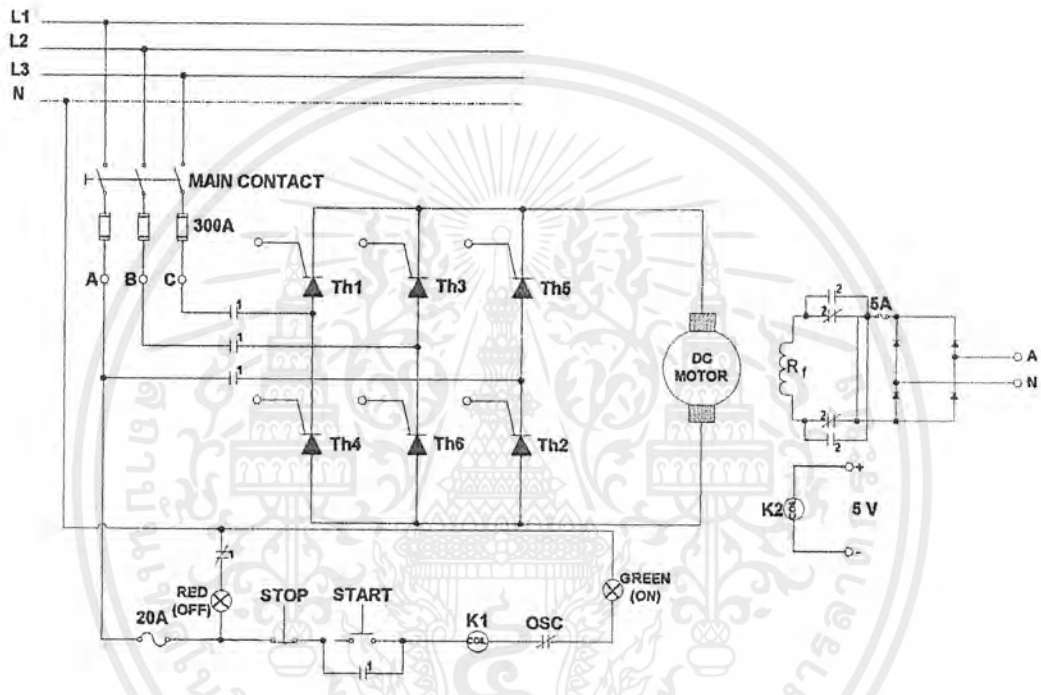
Volt 9 V , Amp 1.5 A

Output Volt 2.9 3.3 V/1000 RPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

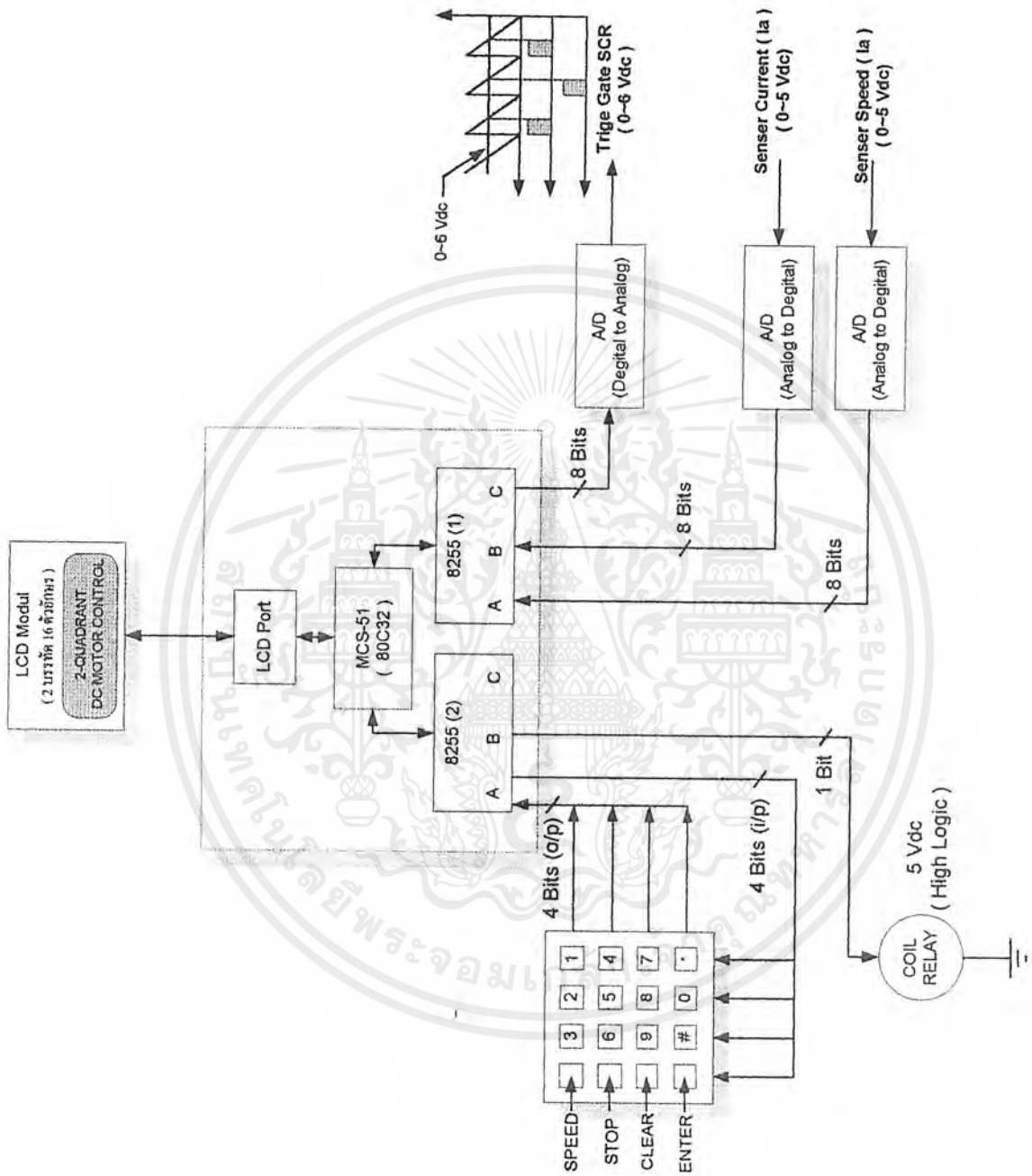
ภาคผนวก ข.

แผนผังของระบบต่างของโรงงานนี้



รูปแสดงแผนผังวงจรระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงแผนผังการต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

โปรแกรมควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอดแรนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DCMOTOR.ASM

```

F800=    1    USER1PA    EQU    0F800H
F801=    2    USER1PB    EQU    0F801H
F802=    3    USER1PC    EQU    0F802H
F803=    4    USER1CO    EQU    0F803H
FC00=    5    USER2PA    EQU    0FC00H
FC01=    6    USER2PB    EQU    0FC01H
FC02=    7    USER2PC    EQU    0FC02H
FC03=    8    USER2CO    EQU    0FC03H
FA00=    9    LCD_WC      EQU    0FA00H
FA01=   10    LCD_BUSY    EQU    0FA01H
FA02=   11    LCD_WD      EQU    0FA02H
FA03=   12    LCD_RD      EQU    0FA03H
8000=   13    DISPMEM1    EQU    8000H
8020=   14    DISPMEM2    EQU    8020H
8040=   15    KEYBUF      EQU    8040H
8041=   16    KEYBUFOLD    EQU    8041H
8042=   17    KEYENABLE    EQU    8042H
8043=   18    RPM1        EQU    8043H
8044=   19    RPM10       EQU    8044H
8045=   20    RPM100      EQU    8045H
8046=   21    OUTPUT      EQU    8046H
0000    22                ORG    0000H
0000 020200 23          LJMP  START
000B    24                ORG    000BH
000B 1205B7 25          LCALL  TIMER0INTER
000E 22    26          RET

```

DCMOTOR.ASM

```

0200      27                ORG 0200H
0200 1207A2  28  START:    LCALL DELAYONSTART
0200      29  ;*****
0200      30  ;          SETVALUE          ;
0200      31  ;*****

0203      32  START1:

0203 758901  33                MOV  TMOD,#01H
0206 D2AF    34                SETB IE.7
0208 D2A9    35                SETB IE.1
020A D28C    36                SETB TCON.4
020C 752000  37                MOV  20H,#00H
020F 1206C2  38                LCALL USERPORTSET
0212 120759  39                LCALL LCDSETUP
0215 1206CF  40                LCALL CLEARRAMDISP
0218 90FC00  41                MOV  DPTR,#USER2PA
021B 74FF    42                MOV  A,#0FFH
021D F0      43                MOVX @DPTR,A
021E 90FC01  44                MOV  DPTR,#USER2PB
0221 7400    45                MOV  A,#00H
0223 F0      46                MOVX @DPTR,A
0224 7400    47                MOV  A,#00H
0226 908043  48                MOV  DPTR,#RPM1
0229 F0      49                MOVX @DPTR,A
022A 908044  50                MOV  DPTR,#RPM10
022D F0      51                MOVX @DPTR,A
022E 908045  52                MOV  DPTR,#RPM100

```

DCMOTOR.ASM

```

0231 F0    53          MOVX  @DPTR,A

54 ;*****.
55 ;   INPUT SPEED FROM KEY ;
56 ;*****.

0232    57      MAIN:
0232    58      INPUTSPEED:
0232 908000 59          MOV  DPTR,#DISPMEM1
0235 AB83  60          MOV  R3,DPH
0237 AC82  61          MOV  R4,DPL
0239 9004BA 62          MOV  DPTR,#TEXT1
023C 7820  63          MOV  R0,#20H
023E 7400  64      SENDSPEED1: MOV  A,#00H
0240 93    65          MOVC A,@A+DPTR
0241 A3    66          INC  DPTR
0242 A983  67          MOV  R1,DPH
0244 AA82  68          MOV  R2,DPL
0246 8B83  69          MOV  DPH,R3
0248 8C82  70          MOV  DPL,R4
024A F0    71          MOVX  @DPTR,A
024B A3    72          INC  DPTR
024C AB83  73          MOV  R3,DPH
024E AC82  74          MOV  R4,DPL
0250 8983  75          MOV  DPH,R1
0252 8A82  76          MOV  DPL,R2
0254 D8E8  77          DJNZ  R0,SENDSPEED1

```

DCMOTOR.ASM

```

0256 908020 79      MOV  DPTR,#DISPMEM2
0259 AB83   80      MOV  R3,DPH
025B AC82   81      MOV  R4,DPL
025D 9004DA 82      MOV  DPTR,#TEXT2
0260 7810   83      MOV  R0,#10H
0262 7400   84      SELECTMENU2: MOV  A,#00H
0264 93     85      MOVC A,@A+DPTR
0265 A3     86      INC  DPTR
0266 A983   87      MOV  R1,DPH
0268 AA82   88      MOV  R2,DPL
026A 8B83   89      MOV  DPH,R3
026C 8C82   90      MOV  DPL,R4
026E F0     91      MOVX @DPTR,A
026F A3     92      INC  DPTR
0270 AB83   93      MOV  R3,DPH
0272 AC82   94      MOV  R4,DPL
0274 8983   95      MOV  DPH,R1
0276 8A82   96      MOV  DPL,R2
0278 D8E8   97      DJNZ R0,SELECTMENU2

027A      99      LOOPMAIN1:
027A 1205FD 100     LCALL SCANKEY
027D 908040 101     MOV  DPTR,#KEYBUF
0280 E0     102     MOVX A,@DPTR
0281 B44803 103     CJNE A,#48H,NOPRESSMAIN1
0284 0203C8 104     LJMP STOPPROGRAM

```

DCMOTOR.ASM

```

0287      105      NOPRESSMAIN1:
0287 B48803  106          CJNE  A,#88H,NOPRESSMAIN2
028A 020290  107          LJMP  SPEEDPROGRAM
028D      108      NOPRESSMAIN2:
028D 02027A  109          LJMP  LOOPMAIN1
110      ;*****;
111      ;      SPEED PROGRAM      ;
112      ;*****;
0290      113      SPEEDPROGRAM:
0290 908000  114          MOV   DPTR,#DISPMEM1
0293 AB83   115          MOV   R3,DPH
0295 AC82   116          MOV   R4,DPL
0297 90058A 117          MOV   DPTR,#TEXT6
029A 7820   118          MOV   R0,#20H
029C 7400   119      SENDSPEED3:  MOV   A,#00H
029E 93     120          MOVC  A,@A+DPTR
029F A3     121          INC   DPTR
02A0 A983   122          MOV   R1,DPH
02A2 AA82   123          MOV   R2,DPL
02A4 8B83   124          MOV   DPH,R3
02A6 8C82   125          MOV   DPL,R4
02A8 F0     126          MOVX  @DPTR,A
02A9 A3     127          INC   DPTR
02AA AB83   128          MOV   R3,DPH
02AC AC82   129          MOV   R4,DPL
02AE 8983   130          MOV   DPH,R1

```

DCMOTOR.ASM

```

02B0 8A82 131      MOV  DPL,R2
02B2 D8E8 132      DJNZ R0,SENDSPEED3
02B4 908020 134     MOV  DPTR,#DISPMEM2
02B7 AB83 135      MOV  R3,DPH
02B9 AC82 136      MOV  R4,DPL
02BB 9004FA 137     MOV  DPTR,#TEXT7
02BE 7810 138      MOV  R0,#10H
02C0 7400 139     SELECTMENU4: MOV  A,#00H
02C2 93 140      MOV  A,@A+DPTR
02C3 A3 141      INC  DPTR
02C4 A983 142     MOV  R1,DPH
02C6 AA82 143     MOV  R2,DPL
02C8 8B83 144     MOV  DPH,R3
02CA 8C82 145     MOV  DPL,R4
02CC F0 146      MOVX @DPTR,A
02CD A3 147      INC  DPTR
02CE AB83 148     MOV  R3,DPH
02D0 AC82 149     MOV  R4,DPL
02D2 8983 150     MOV  DPH,R1
02D4 8A82 151     MOV  DPL,R2
02D6 D8E8 152     DJNZ R0,SELECTMENU4
02D8 908043 153    MOV  DPTR,#RPM1
02DB E0 154      MOVX A,@DPTR
02DC 90802A 155    MOV  DPTR,#802AH
02DF 4430 156     ORL  A,#30H
02E1 F0 157      MOVX @DPTR,A

```

DCMOTOR.ASM

```

02E2 908044 158      MOV  DPTR,#RPM10
02E5 E0      159      MOVX A,@DPTR
02E6 908029 160      MOV  DPTR,#8029H
02E9 4430    161      ORL  A,#30H
02EB F0      162      MOVX @DPTR,A
02EC 908045 163      MOV  DPTR,#RPM100
02EF E0      164      MOVX A,@DPTR
02F0 908028 165      MOV  DPTR,#8028H
02F3 4430    166      ORL  A,#30H
02F5 F0      167      MOVX @DPTR,A
02F6 1205FD 169      LOOPINPUTSCAN: LCALL SCANKEY
02F9 908042 170      MOV  DPTR,#KEYENABLE
02FC E0      171      MOVX A,@DPTR
02FD B4FF03 172      CJNE A,#0FFH,LL2
0300 020333 173      LJMP LLI
0303 908044 174      LL2:  MOV  DPTR,#RPM10
0306 E0      175      MOVX A,@DPTR
0307 908045 176      MOV  DPTR,#RPM100
030A F0      177      MOVX @DPTR,A
030B 908028 178      MOV  DPTR,#8028H
030E 4430    179      ORL  A,#30H
0310 F0      180      MOVX @DPTR,A
0311 908043 181      MOV  DPTR,#RPM1
0314 E0      182      MOVX A,@DPTR
0315 908044 183      MOV  DPTR,#RPM10
0318 F0      184      MOVX @DPTR,A

```

DCMOTOR.ASM

```

0319 908029 185      MOV  DPTR,#8029H
031C 4430 186      ORL  A,#30H
031E F0 187      MOVX @DPTR,A
031F 908042 188      MOV  DPTR,#KEYENABLE
0322 E0 189      MOVX A,@DPTR
0323 908043 190      MOV  DPTR,#RPM1
0326 F0 191      MOVX @DPTR,A
0327 90802A 192      MOV  DPTR,#802AH
032A 4430 193      ORL  A,#30H
032C F0 194      MOVX @DPTR,A
032D 74FF 195      MOV  A,#0FFH
032F 908042 196      MOV  DPTR,#KEYENABLE
0332 F0 197      MOVX @DPTR,A
0333 908040 200  LL1:  MOV  DPTR,#KEYBUF
0336 E0 201      MOVX A,@DPTR
0337 B41103 202      CJNE A,#11H,NOCLEAR1
033A 020232 203      LJMP MAIN
033D 204      NOCLEAR1:
033D B41803 205      CJNE A,#18H,NOENT1
0340 020346 206      LJMP CHECKSPEED
0343 207      NOENT1:
0343 0202F6 208      LJMP LOOPINPUTSCAN
209 ;*****.
210 ;      CHECK SPEED      ;
211 ;*****.
0346 908045 212  CHECKSPEED: MOV  DPTR,#RPM100

```

DCMOTOR.ASM

```

0349 E0    213      MOVX  A,@DPTR
034A C3    214      CLR   C
034B B40614 215      CJNE  A,#06H,LOOP10
034E 908044 216      MOV   DPTR,#RPM10
0351 E0    217      MOVX  A,@DPTR
0352 B4000A 218      CJNE  A,#00H,LOOP13
0355 908043 219      MOV   DPTR,#RPM1
0358 E0    220      MOVX  A,@DPTR
0359 B40003 221      CJNE  A,#00H,LOOP13
035C 020364 222      LJMP  LOOP12
035F 020367 223  LOOP13:  LJMP  LOOP11
0362 5003   224  LOOP10:  JNC   LOOP11
0364 0203BE 225  LOOP12:  LJMP  SPEEDNOERROR
0367 02036A 226  LOOP11:  LJMP  SPEEDERROR ;SPEED NO ERROR
227 ;*****
228 ;      SPEED ERROR ;
229 ;*****
036A      230      SPEEDERROR:
036A 908000 231      MOV   DPTR,#DISPMEM1
036D AB83   232      MOV   R3,DPH
036F AC82   233      MOV   R4,DPL
0371 90052A 234      MCV   DPTR,#TEXT9
0374 7820   235      MOV   R0,#20H
0376 7400   236  SENDSPEED7: MOV  A,#00H
0378 93     237      MOVC  A,@A+DPTR
0379 A3     238      INC   DPTR

```

DCMOTOR.ASM

```

037A A983 239      MOV  R1,DPH
037C AA82 240      MOV  R2,DPL
037E 8B83 241      MOV  DPH,R3
0380 8C82 242      MOV  DPL,R4
0382 F0 243      MOVX @DPTR,A
0383 A3 244      INC  DPTR
0384 AB83 245      MOV  R3,DPH
0386 AC82 246      MOV  R4,DPL
0388 8983 247      MOV  DPH,R1
038A 8A82 248      MOV  DPL,R2
038C D8E8 249      DJNZ R0,SENDSPEED7
038E 908020 251     MOV  DPTR,#DISPMEM2
0391 AB83 252      MOV  R3,DPH
0393 AC82 253      MOV  R4,DPL
0395 90050A 254     MOV  DPTR,#TEXT8
0398 7810 255      MOV  R0,#10H
039A 7400 256     SELECTMENU8: MOV  A,#00H
039C 93 257      MOVC A,@A+DPTR
039D A3 258      INC  DPTR
039E A983 259      MOV  R1,DPH
03A0 AA82 260      MOV  R2,DPL
03A2 8B83 261      MOV  DPH,R3
03A4 8C82 262      MOV  DPL,R4
03A6 F0 263      MOVX @DPTR,A
03A7 A3 264      INC  DPTR
03A8 AB83 265      MOV  R3,DPH

```

DCMOTOR.ASM

```

03AA AC82 266      MOV  R4,DPL
03AC 8983 267      MOV  DPH,R1
03AE 8A82 268      MOV  DPL,R2
03B0 D8E8 269      DJNZ R0,SELECTMENU8
03B2 1205FD 272 LOOP20:  LCALL SCANKEY
03B5 908040 273      MOV  DPTR,#KEYBUF
03B8 B411F7 274      CJNE A,#11H,LOOP20
03BB 020232 275      LJMP MAIN
276 ;*****
277 ;      SPEED NO ERROR
278 ;*****
03BE 1207AB 279 SPEEDNOERROR: LCALL DTOADECOD
03C1 90FC00 280      MOV  DPTR,#USER2PA
03C4 F0 281      MOVX @DPTR,A
03C5 020290 282      LJMP SPEEDPROGRAM
283 ;*****
284 ;      STOP PROGRAM
285 ;*****
03C8 286      STOPPROGRAM:
03C8 908020 287      MOV  DPTR,#DISPMEM2
03CB AB83 288      MOV  R3,DPH
03CD AC82 289      MOV  R4,DPL
03CF 90051A 290      MOV  DPTR,#TEXT10
03D2 7810 291      MOV  R0,#10H
03D4 7400 292 SELECTMENU9: MOV  A,#00H
03D6 93 293      MOVC A,@A+DPTR

```

DCMOTOR.ASM

```

03D7 A3    294      INC  DPTR
03D8 A983  295      MOV  R1,DPH
03DA AA82  296      MOV  R2,DPL
03DC 8B83  297      MOV  DPH,R3
03DE 8C82  298      MOV  DPL,R4
03E0 F0    299      MOVX @DPTR,A
03E1 A3    300      INC  DPTR
03E2 AB83  301      MOV  R3,DPH
03E4 AC82  302      MOV  R4,DPL
03E6 8983  303      MOV  DPH,R1
03E8 8A82  304      MOV  DPL,R2
03EA D8E8  305      DJNZ R0,SELECTMENU9
03EC 1205FD 306 LOOPCONF: LCALL SCANKEY
03EF B41803 307      CJNE A,#18H,LOOPCONF1
03F2 0203FE 308      LJMP STARTSTOP
03F5 B41103 309 LOOPCONF1: CJNE A,#11H,LOOPCONF2
03F8 020232 310      LJMP MAIN
03FB 0203EC 311 LOOPCONF2: LJMP LOOPCONF
03FE 908000 312 STARTSTOP: MOV  DPTR,#DISPMEM1
0401 AB83  313      MOV  R3,DPH
0403 AC82  314      MOV  R4,DPL
0405 90054A 315      MOV  DPTR,#TEXT3
0408 7820  316      MOV  R0,#20H
040A 7400  317 SENDSPEED: MOV  A,#00H
040C 93    318      MOVC A,@A+DPTR
040D A3    319      INC  DPTR

```

DCMOTOR.ASM

```

040E A983 320      MOV  R1,DPH
0410 AA82 321      MOV  R2,DPL
0412 8B83 322      MOV  DPH,R3
0414 8C82 323      MOV  DPL,R4
0416 F0 324      MOVX @DPTR,A
0417 A3 325      INC  DPTR
0418 AB83 326      MOV  R3,DPH
041A AC82 327      MOV  R4,DPL
041C 8983 328      MOV  DPH,R1
041E 8A82 329      MOV  DPL,R2
0420 D8E8 330      DJNZ R0,SENDSPEED
0422 908020 332     MOV  DPTR,#DISPMEM2
0425 AB83 333      MOV  R3,DPH
0427 AC82 334      MOV  R4,DPL
0429 9004EA 335     MOV  DPTR,#TEXT5
042C 7810 336      MOV  R0,#10H
042E 7400 337     SELECTMENU: MOV  A,#00H
0430 93 338      MOVC A,@A+DPTR
0431 A3 339      INC  DPTR
0432 A983 340      MOV  R1,DPH
0434 AA82 341      MOV  R2,DPL
0436 8B83 342      MOV  DPH,R3
0438 8C82 343      MOV  DPL,R4
043A F0 344      MOVX @DPTR,A
043B A3 345      INC  DPTR
043C AB83 346      MOV  R3,DPH

```

DCMOTOR.ASM

043E AC82	347	MOV R4,DPL
0440 8983	348	MOV DPH,R1
0442 8A82	349	MOV DPL,R2
0444 D8E8	350	DJNZ R0,SELECTMENU
0446 90FC00	351	MOV DPTR,#USER2PA
0449 74FF	352	MOV A,#0FFH
044B F0	353	MOVX @DPTR,A
044C 1205AA	354	LCALL DELAY
044F 90FC01	355	MOV DPTR,#USER2PB
0452 74FF	356	MOV A,#0FFH
0454 F0	357	MOVX @DPTR,A
0455 1205AA	358	LCALL DELAY
0458 1205AA	359	LCALL DELAY
045B 1205AA	360	LCALL DELAY
045E 1205AA	361	LCALL DELAY
0461 1205AA	362	LCALL DELAY
0464 1205AA	363	LCALL DELAY
0467 1205AA	364	LCALL DELAY
046A 1205AA	365	LCALL DELAY
046D 1205AA	366	LCALL DELAY
0470 1205AA	367	LCALL DELAY
0473 1205AA	368	LCALL DELAY
0476 1205AA	369	LCALL DELAY
0479 1205AA	370	LCALL DELAY
047C 1205AA	371	LCALL DELAY
047F 1205AA	372	LCALL DELAY

DCMOTOR.ASM

```

0482 1205AA 373      LCALL DELAY
0485 1205AA 374      LCALL DELAY
0488 1205AA 375      LCALL DELAY
048B 1205AA 376      LCALL DELAY
048E 1205AA 377      LCALL DELAY
0491 1205AA 378      LCALL DELAY
0494 1205AA 379      LCALL DELAY
0497 1205AA 380      LCALL DELAY
049A 1205AA 381      LCALL DELAY
049D 1205AA 382      LCALL DELAY
04A0 90FC01 383      MOV  DPTR,#USER2PB
04A3 7400 384      MOV  A,#00H
04A5 F0 385      MOVX @DPTR,A
04A6 1205FD 386      LCALL SCANKEY
04A9 7400 387      MOV  A,#00H
04AB 908043 388      MOV  DPTR,#RPM1
04AE F0 389      MOVX @DPTR,A
04AF 908044 390      MOV  DPTR,#RPM10
04B2 F0 391      MOVX @DPTR,A
04B3 908045 392      MOV  DPTR,#RPM100
04B6 F0 393      MOVX @DPTR,A
04B7 020232 394      LJMP MAIN

395 ;*****;
396 ;          TEXT          ;
397 ;*****;

04BA 322D5155 398 TEXT1:  DB  '2-QUADRANT DC MOTOR CONTROL'

```

DCMOTOR.ASM

```

04BE 41445241
04C2 4E542044
04C6 43204D4F
04CA 544F5220
04CE 434F4E54
04D2 524F4C20
04D6 20202020
04DA 22537065 399 TEXT2: DB "'Speed OR Stop" '
04DE 6564204F
04E2 52205374
04E6 6F702220
04EA 2022506C 400 TEXT5: DB "'Please wait" '
04EE 65617365
04F2 20776169
04F6 74222020
04FA 53706565 401 TEXT7: DB 'Speed = 000 RPM'
04FE 64203D20
0502 30303020
0506 52504D2E
050A 2022496E 402 TEXT8: DB "'Input Error" '
050E 70757420
0512 4572726F
0516 72222020
051A 20202250 403 TEXT10: DB "'Press ENT" '
051E 72657373
0522 20454E54

```

DCMOTOR.ASM

0526 22202020

052A 50726573 404 TEXT9: DB 'Press CLR to exit'

052E 7320434C

0532 5220746F

0536 20657869

053A 74202020

053E 20202020

0542 20202020

0546 20202020

054A 52656765 405 TEXT3: DB 'Regenerative Braking'

054E 6E657261

0552 74697665

0556 20427261

055A 6B696E67

055E 20202020

0562 20202020

0566 20202020

056A 496E7075 406 TEXT4: DB 'Input error press CLR'

056E 74206572

0572 726F7220

0576 70726573

057A 7320434C

057E 52202020

0582 20202020

0586 20202020

058A 53706565 407 TEXT6: DB 'Speed Control ;Max 600 RPM.'

DCMOTOR.ASM

```

058E 6420436F
...
0592 6E74726F
0596 6C203B4D
059A 61782036
059E 30302052
05A2 504D2E20
05A6 20202020
408 ;*****
409 ;          DELAY          ;
410 ;*****
05AA 780E 411 DELAY:  MOV  R0,#0EH
05AC 79FF 412 DELAYLOOP: MOV  R1,#0FFH
05AE 7B6F 413 DELAYLOOP1: MOV  R3,#06FH
05B0 DBFE 414          DJNZ  R3,S
05B2 D9FA 415          DJNZ  R1,DELAYLOOP1
05B4 D8F6 416          DJNZ  R0,DELAYLOOP
05B6 22 417          RET
418 ;*****
419 ;          TIMER 0 INTERRUPT          ;
420 ;*****
05B7 421          TIMER0INTER:
05B7 C0E0 422          PUSH  ACC
05B9 C000 423          PUSH  00
05BB C001 424          PUSH  01
05BD C002 425          PUSH  02
05BF C083 426          PUSH  DPH

```

DCMOTOR.ASM

```

05C1 C082 427      PUSH  DPL
05C3 E520 428      MOV   A,20H
05C5 04 429        INC   A
05C6 F520 430      MOV   20H,A
05C8 B40307 431    CJNE  A,#03H,NOSHIFT
05CB 7400 432      MOV   A,#00H
05CD F520 433      MOV   20H,A
05CF 0205D5 434    LJMP  SHIFT
05D2 0205ED 435    NOSHIFT: LJMP  ESHIFT
05D5 436          SHIFT:
05D5 908000 437    MOV   DPTR,#8000H
05D8 E0 438        MOVX  A,@DPTR
05D9 F8 439        MOV   R0,A
05DA 0582 440      INC   DPL
05DC 7920 441      MOV   R1,#20H
05DE E0 442        NEXTSHIFT: MOVX  A,@DPTR
05DF 1582 443      DEC   DPL
05E1 F0 444        MOVX  @DPTR,A
05E2 0582 445      INC   DPL
05E4 0582 446      INC   DPL
05E6 D9F6 447      DJNZ  R1,NEXTSHIFT
05E8 E8 448        MOV   A,R0
05E9 90801F 449    MOV   DPTR,#801FH
05EC F0 450        MOVX  @DPTR,A
05ED 451          ESHIFT:
05ED D082 452      POP   DPL

```

DCMOTOR.ASM

```

05EF D083 453 POP DPH
05F1 D002 454 POP 02
05F3 D001 455 POP 01
05F5 D000 456 POP 00
05F7 D0E0 457 POP ACC
05F9 1206EE 458 LCALL SCANDISP
05FC 32 459 RETI
460 ;*****;
461 ; SCANKEY ;
462 ;*****;
05FD 463 SCANKEY:
05FD 90FC02 464 MOV DPTR,#USER2PC
0600 7401 465 HAVEKEY: MOV A,#01H
0602 F0 466 MOVX @DPTR,A
0603 E0 467 MOVX A,@DPTR ;COLUMN 0 SCAN
0604 B40103 468 CJNE A,#01H,ENDCOLUMN0
0607 020611 469 LJMP NEXTCOLUMN1
060A 54F0 470 ENDCOLUMN0: ANL A,#0F0H
060C 4401 471 ORL A,#01H
060E 020644 472 LJMP ENDSKANKEY
0611 7402 473 NEXTCOLUMN1: MOV A,#02H
0613 90FC02 474 MOV DPTR,#USER2PC
0616 F0 475 MOVX @DPTR,A
0617 E0 476 MOVX A,@DPTR ;COLUMN 1 SCAN
0618 B40203 477 CJNE A,#02H,ENDCOLUMN1
061B 020625 478 LJMP NEXTCOLUMN2

```

DCMOTOR.ASM

```

061E 54F0 479 ENDCOLUM1: ANL A,#0F0H
0620 4402 480 ORL A,#02H
0622 020644 481 LJMP ENDSCANKEY
0625 7404 482 NEXTCOLUMN2: MOV A,#04H
0627 90FC02 483 MOV DPTR,#USER2PC
062A F0 484 MOVX @DPTR,A
062B E0 485 MOVX A,@DPTR ;COLUMN 2 SCAN
062C B40403 486 CJNE A,#04H,ENDCOLUMN2
062F 020639 487 LJMP NEXTCOLUMN3
0632 54F0 488 ENDCOLUMN2: ANL A,#0F0H
0634 4404 489 ORL A,#04H
0636 020644 490 LJMP ENDSCANKEY
0639 7408 491 NEXTCOLUMN3: MOV A,#08H
063B 90FC02 492 MOV DPTR,#USER2PC
063E F0 493 MOVX @DPTR,A
063F E0 494 MOVX A,@DPTR ;COLUMN 3 SCAN
0640 54F0 495 ANL A,#0F0H
0642 4408 496 ORL A,#08H
0644 497 ENDCANKEY:
0644 908040 498 MOV DPTR,#KEYBUF
0647 F0 499 MOVX @DPTR,A
0648 F507 500 MOV 07H,A
064A 908041 501 MOV DPTR,#KEYBUFOLD
064D E0 502 MOVX A,@DPTR
064E B50703 503 CJNE A,07H,HAOLD
0651 020666 504 LJMP NOOLD

```

DCMOTOR.ASM

```

0654      505      HAOLD:
-----
0654 908041  506      MOV  DPTR,#KEYBUFOLD
0657 E0      507      MOVX A,@DPTR
0658 B40803  508      CJNE A,#08H,NOCALLKEY
065B 120667  509      LCALL KEYDECODE
065E      510      NOCALLKEY:
065E 908040  511      MOV  DPTR,#KEYBUF
0661 E0      512      MOVX A,@DPTR
0662 908041  513      MOV  DPTR,#KEYBUFOLD
0665 F0      514      MOVX @DPTR,A
0666      515      NOOLD:
0666 22      517      RET
518 ;*****
519 ;      KEY DECODE
520 ;*****
0667      521      KEYDECODE:
0667 908040  522      MOV  DPTR,#KEYBUF
066A E0      523      MOVX A,@DPTR
066B B41205  524      CJNE A,#12H,NEXTCODE1
066E 7400      525      MOV  A,#00H
0670 0206BD  526      LJMP ENDKEYCODE
0673      527      NEXTCODE1:
0673 B48105  528      CJNE A,#81H,NEXTCODE2
0676 7401      529      MOV  A,#01H
0678 0206BD  530      LJMP ENDKEYCODE
067B      531      NEXTCODE2:

```

DCMOTOR.ASM

```

067B B48205 532      CJNE  A,#82H,NEXTCODE3
067E 7402  533      MOV   A,#02H
0680 0206BD 534      LJMP  ENDKEYCODE
0683      535      NEXTCODE3:
0683 B48405 536      CJNE  A,#84H,NEXTCODE4
0686 7403  537      MOV   A,#03H
0688 0206BD 538      LJMP  ENDKEYCODE
068B      539      NEXTCODE4:
068B B44105 540      CJNE  A,#41H,NEXTCODE5
068E 7404  541      MOV   A,#04H
0690 0206BD 542      LJMP  ENDKEYCODE
0693      543      NEXTCODE5:
0693 B44205 544      CJNE  A,#42H,NEXTCODE6
0696 7405  545      MOV   A,#05H
0698 0206BD 546      LJMP  ENDKEYCODE
069B      547      NEXTCODE6:
069B B44405 548      CJNE  A,#44H,NEXTCODE7
069E 7406  549      MOV   A,#06H
06A0 0206BD 550      LJMP  ENDKEYCODE
06A3      551      NEXTCODE7:
06A3 B42105 552      CJNE  A,#21H,NEXTCODE8
06A6 7407  553      MOV   A,#07H
06A8 0206BD 554      LJMP  ENDKEYCODE
06AB      555      NEXTCODE8:
06AB B42205 556      CJNE  A,#22H,NEXTCODE9
06AE 7408  557      MOV   A,#08H

```

DCMOTOR.ASM

```

06B0 0206BD 558      LJMPL   ENDKEYCODE
-----
06B3      559      NEXTCODE9:
06B3 B42405 560      CJNE   A,#24H,NEXTCODE10
06B6 7409 561      MOV    A,#09H
06B8 0206BD 562      LJMPL   ENDKEYCODE
06BB      563      NEXTCODE10:
06BB 74FF 564      MOV    A,#0FFH
06BD      565      ENDKEYCODE:
06BD 908042 566      MOV    DPTR,#KEYENABLE
06C0 F0 567      MOVX   @DPTR,A
06C1 22 568      RET
569 ;*****
570 ; USER 8255 PORT SETUP
571 ;*****
06C2 90F803 572  USERPORTSET: MOV    DPTR,#USER1CO
06C5 7480 573      MOV    A,#80H
06C7 F0 574      MOVX   @DPTR,A
06C8 90FC03 575      MOV    DPTR,#USER2CO
06CB 7488 576      MOV    A,#88H
06CD F0 577      MOVX   @DPTR,A
06CE 22 578      RET
579 ;*****
580 ; CLEAR RAM DISPLAY ;
581 ;*****
06CF C0E0 582  CLEARRAMDISP: PUSH  ACC
06D1 C001 583      PUSH  01H

```

DCMOTOR.ASM

```

06D3 908000 584      MOV  DPTR,#DISPMEM1
06D6 7420    585      MOV  A,#20H
06D8 7920    586      MOV  R1,#20H
06DA F0      587      NEXTCLEAR1: MOVX @DPTR,A
06DB A3      588      INC  DPTR
06DC D9FC    589      DJNZ R1,NEXTCLEAR1
06DE 908020 590      MOV  DPTR,#DISPMEM2
06E1 7420    591      MOV  A,#20H
06E3 7920    592      MOV  R1,#20H
06E5 F0      593      NEXTCLEAR2: MOVX @DPTR,A
06E6 A3      594      INC  DPTR
06E7 D9FC    595      DJNZ R1,NEXTCLEAR2
06E9 D001    596      POP  01H
06EB D0E0    597      POP  ACC
06ED 22      598      RET
600 ;*****
601 ; SCAN LCD DISPLAY ;
602 ;*****
06EE 603      SCANDISP:
06EE C0E0    604      PUSH ACC
06F0 C000    605      PUSH 00
06F2 C001    606      PUSH 01
06F4 C002    607      PUSH 02
06F6 C003    608      PUSH 03
06F8 C083    609      PUSH DPH
06FA C082    610      PUSH DPL

```

DCMOTOR.ASM

```

06FC C0F0  611      PUSH  B
06FE 90FA00 612      MOV  DPTR,#LCD_WC
0701 7480  613      MOV  A,#80H
0703 F0    614      MOVX @DPTR,A
0704 12078D 615      LCALL LCDBUSY
0707 908000 616      MOV  DPTR,#DISPMEM1
070A 7900  617      MOV  R1,#00H
070C      618      LOOPLINE1:
070C 758380 619      MOV  DPH,#80H
070F 8982  620      MOV  DPL,R1
0711 E0    621      MOVX A,@DPTR
0712 90FA02 622      MOV  DPTR,#LCD_WD
0715 F0    623      MOVX @DPTR,A
0716 12078D 624      LCALL LCDBUSY
0719 B92F03 625      CJNE R1,#2FH,NEXTCHAL1
071C 020723 626      LJMP LOOPLINE2
071F 09    627      NEXTCHAL1: INC  R1
0720 02070C 628      LJMP LOOPLINE1
0723      629      LOOPLINE2:
0723 90FA00 631      MOV  DPTR,#LCD_WC
0726 74C0  632      MOV  A,#0C0H
0728 F0    633      MOVX @DPTR,A
0729 12078D 634      LCALL LCDBUSY
072C 908020 635      MOV  DPTR,#DISPMEM2
072F 7920  636      MOV  R1,#20H
0731      637      LOOPLINE12:

```

DCMOTOR.ASM

```

0731 758380 638      MOV  DPH,#80H
0734 8982   639      MOV  DPL,R1
0736 E0     640      MOVX A,@DPTR
0737 90FA02 641      MOV  DPTR,#LCD_WD
073A F0     642      MOVX @DPTR,A
073B 12078D 643      LCALL LCDBUSY
073E B93F03 644      CJNE R1,#3FH,NEXTCHAL12
0741 020748 645      LJMP LOOPLINE22
0744 09     646      NEXTCHAL12: INC  R1
0745 020731 647      LJMP LOOPLINE12
0748      648      LOOPLINE22:
0748 D0F0    649      POP  B
074A D082    650      POP  DPL
074C D083    651      POP  DPH
074E D003    652      POP  03
0750 D002    653      POP  02
0752 D001    654      POP  01
0754 D000    655      POP  00
0756 D0E0    656      POP  ACC
0758 22     657      RET

659 ;*****;
660 ;      LCD SETUP      ;
661 ;*****;

0759      662      LCDSETUP:
0759 C0E0    663      PUSH ACC
075B C083    664      PUSH DPH

```

DCMOTOR.ASM

```

075D C082 665      PUSH  DPL
075F 12078D 666      LCALL LCDBUSY
0762 90FA00 667      MOV   DPTR,#LCD_WC
0765 7438 668      MOV   A,#00111000B ;FUNCTION SET
0767 F0 669      MOVX  @DPTR,A
0768 12078D 670      LCALL LCDBUSY
076B 90FA00 671      MOV   DPTR,#LCD_WC
076E 740C 672      MOV   A,#00001100B ;DISPLAY ON OFF CONTROL
0770 F0 673      MOVX  @DPTR,A
0771 12078D 674      LCALL LCDBUSY
0774 90FA00 675      MOV   DPTR,#LCD_WC
0777 7401 676      MOV   A,#00000001B ;CLEAR DESPLAY
0779 F0 677      MOVX  @DPTR,A
077A 12078D 678      LCALL LCDBUSY
077D 90FA00 679      MOV   DPTR,#LCD_WC
0780 7402 680      MOV   A,#00000010B ;ENTRY MODE SET
0782 F0 681      MOVX  @DPTR,A
0783 12078D 682      LCALL LCDBUSY
0786 D082 683      POP  DPL
0788 D083 684      POP  DPH
078A D0E0 685      POP  ACC
078C 22 686      RET

687 ;*****;
688 ;      LCD BUSY      ;
689 ;*****;

078D 690      LCDBUSY:

```

DCMOTOR.ASM

```

078D C0E0 691      PUSH  ACC
078F C083 692      PUSH  DPH
0791 C082 693      PUSH  DPL
0793 90FA01 694  BUSY:   MOV   DPTR,#LCD_BUSY
0796 E0 695      MOVX  A,@DPTR
0797 A2E7 696      MOV   C,ACC.7
0799 40F8 697      JC   BUSY
079B D082 698      POP   DPL
079D D083 699      POP   DPH
079F D0E0 700      POP   ACC
07A1 22 701      RET
703 ;*****;
704 ;   DELAY ON START   ;
705 ;*****;
07A2 780F 706  DELAYONSTART: MOV  R0,#0FH
07A4 79FF 707  LOOPDELAY:   MOV  R1,#0FFH
07A6 D9FE 708      DJNZ  R1,$
07A8 D8FA 709      DJNZ  R0,LOOPDELAY
07AA 22 710      RET
711 ;*****;
712 ;   D TO A DECODE   ;
713 ;*****;
07AB 908045 714  DTOADECOD: MOV  DPTR,#RPM100
07AE E0 715      MOVX  A,@DPTR
07AF B40003 716      CJNE  A,#00H,NEXT1

```

DCMOTOR.ASM

```

07B2 0207EA 717      LJMP  D00
07B5      718      NEXT1:
07B5 908045 719      MOV  DPTR,#RPM100
07B8 E0      720      MOVX A,@DPTR
07B9 B40103 721      CJNE A,#01H,NEXT2
07BC 02086E 722      LJMP  D01
07BF      723      NEXT2:
07BF 908045 724      MOV  DPTR,#RPM100
07C2 E0      725      MOVX A,@DPTR
07C3 B40203 726      CJNE A,#02H,NEXT3
07C6 0208F2 727      LJMP  D02
07C9 908045 729 NEXT3:  MOV  DPTR,#RPM100
07CC E0      730      MOVX A,@DPTR
07CD B40303 731      CJNE A,#03H,NEXT4
07D0 020981 732      LJMP  D03
07D3 908045 733 NEXT4:  MOV  DPTR,#RPM100
07D6 E0      734      MOVX A,@DPTR
07D7 B40403 735      CJNE A,#04H,NEXT5
07DA 020A10 736      LJMP  D04
07DD 908045 737 NEXT5:  MOV  DPTR,#RPM100
07E0 E0      738      MOVX A,@DPTR
07E1 B40503 739      CJNE A,#05H,NEXT6
07E4 020A94 740      LJMP  D05
07E7      741      NEXT6:
07E7 74BD 742      MOV  A,#0BDH
07E9 22      743      RET
                                END

```


กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ผศ. พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ ที่คอยเป็นห่วงและให้คำแนะนำยามเมื่อเกิดปัญหา ตลอดจนขอบคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในด้านต่างๆ รวมทั้งเจ้าหน้าที่และเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.A. Nadkarni and S. Ramesh Bhat , “ Pulse Transformer Design and Fabrication ” , Tata McGraw-Hill , New Delhi ,1985
- [2] Robert Boylestad. “ Electronic Device and Circuit Theory ” , 5th ed., Prentice-Hall. Singapore 1992
- [3] Gopal K. Dubey. “ Power Semiconductor Controlled Drives ” , Prentice-Hall. Singapore. 1990
- [4] Ned Mohan. Tore M. Undeland and William P. Robbins. “ Power Electronics ; Converters. Applications. And Design ” , Jonh Wiley & Sons. Singapore. 1989
- [5] “ เข้าใจ/สร้าง/เล่น ไมโครโปรเซสเซอร์ 2 ” , บริษัทซีอีคเคชั่น จำกัด (มหาชน)
- [6] “ คู่มือ RAM 31 (Version 1.1 , MCS-51 Remote Monitor) ” , บริษัท สิตารีเสิร์ช จำกัด
- [7] ชัยยงค์ แก้วมงคล และ นภัทร วัจนเทพินทร์ , “ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1 (วงจรคอนเวอร์เตอร์)” , บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด
- [8] พิษิต ล้ายอง , “ เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2537
- [9] วิชัย สังข์จันทรานนท์ , “ ควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ” , สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- [10] วิริยะ พิเชฐจำเริญ , “ เอ.ซี.มอเตอร์คอนโทรล ” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2533
- [11] สุเจตน์ จันทร์รัมย์ , “ ไมโครคอนโทรลเลอร์ชิพเดี่ยว 8051 ” , โครงการตำราวิชาการ ,วิทยาลัยมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้