



ชุดจำลองโหลดสำหรับทดสอบมอเตอร์
LOAD EMULATOR FOR MOTOR TEST



โดย

นายกิตติกร ศีลาสุวรรณ
นายเรืองยศ ภูชี้ข้าง
นายสาโรช พึ่งหิรัญ
นายตีบศักดิ์ คุณละ

พ.ศ. ๒๕๔๕
๒๕๔๕

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 42598
วัน, เดือน, ปี..... 4 ส.ย. 2545

b.....
i.....

ปฏิญานិพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2543

ชุดจำลองโหลดสำหรับทดสอบมอเตอร์

LOAD EMULATOR FOR MOTOR TEST



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

อ.สุรินทร์ คำฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2543

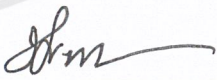
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

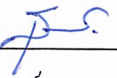
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดจำลองโหลดสำหรับทดสอบมอเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติกร ศิลาสุวรรณ
2. นายเรืองยศ ภูซ่าง
3. นายสาโรช พึ่งหิรัญ
4. นายสืบศักดิ์ กุลละ


อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ)


อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ.สุรินทร์ คำฝอย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOAD EMULATOR FOR MOTOR TEST

Kittikorn Silasuwan

Ruengyot Poochang

Saroch Phunghiran

Suebsuk Khoonla

Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinnares Advisor

Surin Khomfoi Advisor

2000

ABSTRACT

This thesis proposes load emulator for motor test which uses dc motor to generate the required load torque. DC motor is controlled under 4-quadrant operation by using personal computer for receiving the require load torque value and rotation direction via keyboard and then sends the signal to MCS-51 Microcontroller for generating reference signal compared with actual current from current sensor by using PI controller. In this thesis, drive and power circuit module are controlled by bipolar switching method. Moreover, full bridge dc-dc converter with switching component called IGBT and current sensor circuit with sends actual current value back to PI control circuit are used for dc motor drive and feedback control part, respectively.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	I
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ).....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 เนื้อหาภายในเล่ม.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ภายในโครงการ.....	5
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง(DC motor).....	5
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดลวดสนาม(Separately-excited dc motor).....	6
2.3 การเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	8
2.4 การเบรกแบบไดนามิก (Dynamic Braking).....	8
2.5 หลักการของ 4 ควอดแดรนต์(4 Quadrant).....	10
2.6 ริปเปิ้ลในกระแสอาร์เมเจอร์(Ripple in Armature Current).....	13
2.7 ทฤษฎีเกี่ยวกับ ไอจีบีที(IGBT Theory).....	14
2.7.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ ไอจีบีที.....	14
2.7.2 คุณสมบัติของกระแสและศักย์คาไฟฟ้า.....	16
บทที่ 3 การประยุกต์ใช้งาน.....	17
3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51.....	17
3.1.1 โครงสร้างภายในของ MCS-51.....	17
3.1.2 หน่วยความจำโปรแกรม.....	17
3.1.3 รีจิสเตอร์เฉพาะ(SFR:Special Function Register).....	22
3.1.4 วงจรนับ/จับเวลา(Timer/Counter).....	23
3.1.5 การอินเทอร์รัปต์(Interrupt).....	25
3.1.6 สัญญาณนาฬิกา.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.7 พอร์ตอินพุท/เอาต์พุท(Input/Output Port).....	26
3.2 การทำงานของโปรแกรม.....	26
3.2.1 ส่วนโปรแกรมสั่งงานในคอมพิวเตอร์.....	27
3.2.2 ส่วนโปรแกรมที่ป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์.....	29
3.2.2.1 ส่วนโปรแกรมหลัก.....	29
3.2.2.2 ส่วนโปรแกรมการบริการการอินเทอร์รัปต์.....	31
3.3 การสื่อสารแบบอนุกรม.....	32
3.3.1 การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส.....	32
3.3.2 มาตรฐานพอร์ตอนุกรมแบบ RS-232.....	33
3.3.3 คอนเน็คเตอร์สำหรับพอร์ต RS-232 และการเชื่อมต่อ.....	34
บทที่ 4 วงจรที่ใช้ในโครงงาน.....	38
4.1 วงจรเดดไทม์(Dead Time Circuit).....	38
4.2 วงจรขับเคลื่อน(Drive Circuit).....	40
4.3 วงจรไดนามิกเบรก(Dynamic Braking Circuit).....	41
4.4 วงจรฟูลบริดจ์ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์(Full-bridge dc-dc Converter Circuit).....	42
4.5 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน(Current Sensor Circuit).....	43
4.6 วงจรควบคุมแบบพีไอ(Proportional Plus Integral Control Circuit).....	44
4.7 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก(D/A Converter Circuit).....	45
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	47
5.1 การทดลองล็อกโรเตอร์เทสต์(Lock Rotor Test).....	47
5.2 การทดลองการหาความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแส.....	52
5.3 การทดลองการทำงานของชุดจำลองโพลดใน Open Loop.....	55
5.4 การทดสอบการทำงานของชุดจำลองโพลด(Load Emulator Test).....	63
บทที่ 6 วิจัยโครงงาน อุปกรณ์และข้อเสนอแนะ.....	69
6.1 ด้านฮาร์ดแวร์.....	69
6.2 ด้านซอฟต์แวร์.....	70

สารบัญ(ต่อ)

ภาคผนวก

โปรแกรมที่ใช้

คำชี้แจง(Data sheet)

- A dynamic mechanical load emulation test facility to evaluate the performance of ac inverter.
- Mitsubishi intelligent power module PM25RSB120

กิตติกรรมประกาศ

บรรณานุกรม



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างโดยรวมของการทำงาน.....	2
รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	5
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	6
รูปที่ 2.3 กราฟพารามิเตอร์ต่างๆ เทียบกับความเร็ว.....	8
รูปที่ 2.4 การเบรคแบบไดนามิค.....	9
รูปที่ 2.5 การอธิบายการทำงานแบบ 4 ควอนแดรนต์.....	10
รูปที่ 2.6 วงจรฟูลบริดจ์ดีซี- ดีซี คอนเวอร์เตอร์.....	11
รูปที่ 2.7 แสดงสัญญาณพีคดับลิวเอ็มแบบไบโพลาร์.....	12
รูปที่ 2.8 แสดงริปเปิ้ลในกระแสอาร์เมเจอร์.....	14
รูปที่ 2.9 แสดงคุณลักษณะของกระแสและความต่างศักย์.....	15
รูปที่ 3.1 โครงสร้างภายในของ MCS-51.....	18
รูปที่ 3.2 การจัดพื้นที่หน่วยความจำของ 8051.....	19
รูปที่ 3.3 การจัดพื้นที่หน่วยความจำข้อมูลของ 8051.....	20
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของหน่วยความจำทั้งไบต์และบิต.....	21
รูปที่ 3.5 แสดงรีจิสเตอร์ที่สำคัญ.....	24
รูปที่ 3.6 การทำงานของไทมเมอร์ 2 ในโหมดคOUNTER โหลด.....	24
รูปที่ 3.7 การแสดงส่วนอินเทอร์เฟสกับผู้ใช้งาน.....	27
รูปที่ 3.8 โฟลวชาร์ตของโปรแกรมการสั่งงานคอมพิวเตอรื.....	28
รูปที่ 3.9 โฟลวชาร์ตการทำงานของส่วนโปรแกรมหลัก.....	30
รูปที่ 3.10 โฟลวชาร์ตโปรแกรมการบริการการอินเทอร์รัปต์ในส่วนของพอร์ตอนุกรม.....	31
รูปที่ 3.11 รูปแบบอย่างง่ายที่สุดของข้อมูลอนุกรม.....	32
รูปที่ 3.12 รูปแบบอย่างง่ายที่สุดของข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส.....	33
รูปที่ 3.13 การจัดขของคอนเน็กเตอร์พอร์ตอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232 ทั้งแบบ DB-9 และ DB-25.....	35
รูปที่ 3.14 การต่ออุปกรณ์ภายนอกกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอรืในลักษณะต่างๆ.....	36
รูปที่ 4.1 วงจรเคคไทม์.....	38
รูปที่ 4.2 สัญญาณเมื่อผ่านตัวเก็บประจุ.....	39
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของการปรับความต้านทานกับค่าเวลาหน่วง.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 วงจรจับเกท.....	40
รูปที่ 4.5 สัญญาณที่ออกจากออปโต.....	40
รูปที่ 4.6 สัญญาณที่ออกมาจาก LM311.....	41
รูปที่ 4.7 วงจรไดนามิกเบรค.....	41
รูปที่ 4.8 แสดงวงจรที่ใช้ฟลูบรีดจ์ คีซี-คีซี อินเวอร์เตอร์.....	42
รูปที่ 4.9 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน.....	43
รูปที่ 4.10 วงจรควบคุมแบบพีไอ.....	44
รูปที่ 4.11 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก(D/A Converter).....	45
รูปที่ 5.1 การต่ออุปกรณ์ในการทดลองที่ 1.....	47
รูปที่ 5.2 กราฟที่ได้จากผลการทดลองระหว่างแรงดันและกระแสอาร์มเจอร์.....	49
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงดันอาร์มเจอร์ในการทดลองที่ 1.....	50
รูปที่ 5.4 การต่ออุปกรณ์ในการทดลองที่ 2.....	52
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสในการทดลองที่ 2.....	54
รูปที่ 5.6 การทดสอบชุดจำลองโหลดแบบวงจรเปิด.....	56
รูปที่ 5.7 กระแสและแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดอาร์มเจอร์ขณะหมุนฟอร์เวิร์ด.....	57
รูปที่ 5.8 กระแสที่ทำให้มอเตอร์หมุนฟอร์เวิร์ด.....	57
รูปที่ 5.9 แรงดันที่จ่ายให้อาร์มเจอร์หมุนฟอร์เวิร์ด.....	58
รูปที่ 5.10 กระแสและแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดอาร์มเจอร์หมุนฟอร์เวิร์ดขณะไม่มีโหลด.....	58
รูปที่ 5.11 กระแสที่ทำให้มอเตอร์หมุนฟอร์เวิร์ดขณะไม่มีโหลด.....	59
รูปที่ 5.12 แรงดันที่จ่ายให้อาร์มเจอร์หมุนฟอร์เวิร์ดขณะไม่มีโหลด.....	59
รูปที่ 5.13 ภาพกระแสและแรงดันขณะเบรค.....	60
รูปที่ 5.14 แรงดันและกระแสเมื่อมอเตอร์หมุนรีเวอร์ส.....	60
รูปที่ 5.15 กระแสเมื่อมอเตอร์หมุนรีเวอร์ส.....	61
รูปที่ 5.16 กระแสและแรงดันของมอเตอร์เมื่อหมุนรีเวอร์สขณะไม่มีโหลด.....	61
รูปที่ 5.17 ภาพสัญญาณที่ใช้ขับ ไอจีบีที.....	62
รูปที่ 5.18 แสดงช่วงเวลาแคด ไทม์.....	62
รูปที่ 5.19 การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	63
รูปที่ 5.20 แสดงพารามิเตอร์ของกระแสที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ต่างๆ.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.21 กราฟความเร็วรอบที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ต่างๆ.....	66
รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบที่ความถี่ต่างๆ.....	67
รูปที่ 5.23 ค่ากระแสอ้างอิงที่ต้องการเทียบกับค่ากระแสจริงที่ไหลผ่านขดลวดอาร์มเจอร์.....	67
รูปที่ 5.24 แสดงกระแสอ้างอิงเทียบกับกระแสจริงที่ผ่านขดลวดอาร์มเจอร์และผ่านฟีดเตอร์	68



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 รีจิสเตอร์เฉพาะ(SFR:Special Function Register).....	22
ตารางที่ 3.2 โปรแกรมสแตตัสเวิร์ด(Status word Program).....	23
ตารางที่ 3.3 แสดงสัญญาณที่เข้ามาอินเทอร์รัปต์.....	25
ตารางที่ 3.4 ขาพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต.....	26
ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันอาร์มเจอร์ในผลการทดลองที่ 5.1.....	48
ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอาร์มเจอร์กับความถี่รอบในการทดลองที่ 5.1.....	49
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองที่ 5.2.....	53
ตารางที่ 5.4 ค่ากระแสและความเร็วที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 15 Hz.....	64
ตารางที่ 5.5 ค่ากระแสและความเร็วที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 20 Hz.....	64
ตารางที่ 5.6 ค่ากระแสและความเร็วที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 25 Hz.....	65
ตารางที่ 5.7 ค่ากระแสและความเร็วที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 30 Hz.....	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการ

อุตสาหกรรมในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีและอุปกรณ์ ต่างๆมาประยุกต์ใช้อย่างมาก อุปกรณ์ที่ใช้อย่างแพร่หลายก็คือ มอเตอร์ แยกเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ แม้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับจะได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากมีราคาและค่าบำรุงรักษาต่ำกว่า แต่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็ยังนิยมใช้กันอยู่ในงานบางอย่าง เช่นงานที่ต้องการแรงบิดสูงๆ, การขับเคลื่อนโหลดหนักๆ เนื่องจากประสิทธิภาพดีกว่าและการควบคุมความเร็วหรือตำแหน่งทำได้ง่ายกว่า

ก่อนการใช้งานอาจต้องการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์ก่อนว่าสามารถใช้กับแรงบิดโหลด (Load Torque) ที่ต้องการได้หรือไม่ แต่ก่อนอาจใช้วิธีถ่วงด้วยตุ้มน้ำหนัก แต่จะเกิดความไม่สะดวกเมื่อมอเตอร์มีขนาดใหญ่

โครงการนี้จึงเข้ามาตอบสนองความต้องการในจุดนี้ โดยการใช้มอเตอร์กระแสตรงอีกตัวหนึ่งบวกกับชุดควบคุมมอเตอร์ ทำหน้าที่เสมือนโหลดที่สามารถปรับค่าได้แรงบิดโหลด T_L ได้ด้วยการป้อนค่าผ่านทางหน้าจอกอมพิวเตอร์ ทำให้เกิดความสะดวกมากกว่าเดิม อีกทั้งมีการใช้เทคโนโลยี ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาช่วยเนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการควบคุม และมีความสะดวกในการติดต่อกับผู้ใช้งาน

การรับ- ส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ จะใช้วิธีการส่งข้อมูลแบบอนุกรมเนื่องจาก การรับ - ส่งข้อมูลแบบขนาน จะเป็นการรับหรือส่งข้อมูลคราวละ 4 หรือ 8 บิต ในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะทำให้การรับและส่งข้อมูลทำได้ที่มีความเร็วสูง ซึ่งหมายความว่าจำนวนของสายที่ใช้ในการส่งจะต้องมีมากเท่ากับจำนวนบิตที่จะส่งด้วย นอกจากนี้ยังจะต้องรวมถึงสายที่ใช้สำหรับการควบคุมและการตรวจสอบการรับส่งข้อมูลด้วย ซึ่งอาจจะต้องใช้สายมากเป็น 2 เท่าของจำนวนบิตข้อมูลที่จะส่งได้ ซึ่งก็เป็นปัญหาในเรื่องราคาของสายที่ใช้ในการเชื่อมต่อแบบขนาน มักจะมีราคาแพง

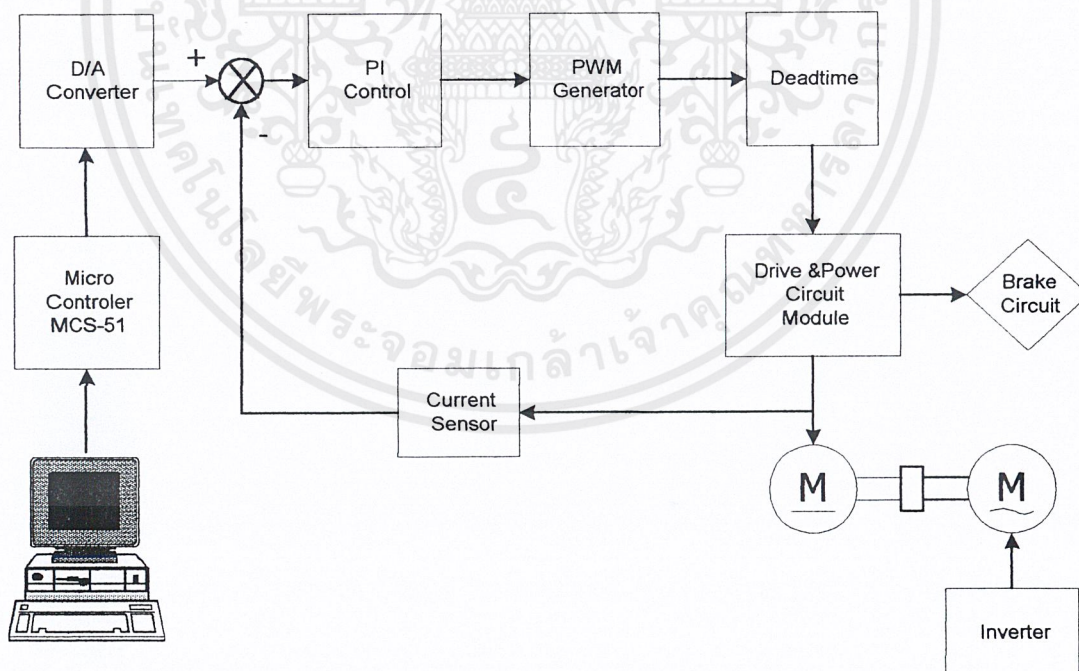
ในขณะที่การรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมเป็นการรับส่งข้อมูลครั้งละ 1 บิต แต่ก็สามารถรับส่งข้อมูลคราวละหลายๆ บิตได้ หากแต่จะต้องมีการตกลงกันระหว่างตัวส่งและตัวรับว่า จะส่งรับข้อมูลคราวละกี่บิต ตัวรับจะต้องรอข้อมูลมาให้ครบเสียก่อนจึงจะทำการประมวลผล ส่งผลการสื่อสารข้อมูลอนุกรมอาจมีความเร็วต่ำกว่าแบบขนาน ในด้านจำนวนสายสัญญาณการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมจะใช้จำนวนสายที่น้อยกว่ามาก อย่างน้อยที่สุดใช้เพียง 2-3 เส้นเท่านั้น แต่

อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลอาจต่ำกว่าแบบขนาน ทำให้ระยะทางในการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมสามารถทำได้มากกว่าและมีราคาประหยัดกว่า

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ

1. เพื่อศึกษาการสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบคิซี - คิซี พูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ โดยใช้ ไอจีบีที (IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor) ควบคุมแบบ 4 - ควอดแรนต์
2. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการส่งสัญญาณกระแสอ้างอิงผ่านพอร์ตอนุกรม
3. เพื่อศึกษาการควบคุมสัญญาณด้วย PI Control
4. เพื่อศึกษาการใช้คอมพิวเตอร์ในส่วนของอินเทอร์เฟซระหว่างผู้ใช้งานกับส่วนควบคุมมอเตอร์

1.3 ขอบเขตของโครงการ



รูป 1.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างโดยรวมของการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการนี้สามารถควบคุมทิศทางของมอเตอร์ให้ไปข้างหน้า (Forward) , ย้อนกลับ (Reverse) , เบรก (Brake) ได้โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดอาเมเจอร์ ในรูปของการปรับค่า duty cycle (Duty Cycle) ของสัญญาณพัลส์บวกลวเอเอ็ม (PWM - Pulse Width Modulation) ที่สร้างโดยการนำกระแสอ้างอิงมาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ได้จาก ไอซี เบอร์ SG3524 เพื่อควบคุมค่าแรงบิดของมอเตอร์ โดยใช้โมดูลซึ่งมี IGBT เป็นอุปกรณ์สวิต ซึ่งที่ความถี่ 5 kHz , พิกัดแรงดัน 1200 V , พิกัดกระแส 30 A

มอเตอร์ที่ใช้เป็นตัวเสมือนโหลดมีคุณสมบัติดังนี้

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดลวดกระตุ้น (Separately -excited DC- Motor)

พิกัดกำลัง 1.5 กิโลวัตต์

พิกัดกระแส 15 แอมป์ พิกัดแรงดัน 130 โวลต์

พิกัดความเร็วรอบ 1800 รอบ/นาทิต

มีการควบคุมย้อนกลับโดยการตรวจจับค่าของแรงบิดในรูปของกระแสอาร์เมเจอร์เรียกว่า เคนเรนทเซนเซอร์ (Current sensor) เพื่อไปเทียบกับค่าแรงบิด - กระแสที่เซตค่าไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้ได้ค่าแรงบิดที่เที่ยงตรงกับค่าที่ต้องการ

1.4 เนื้อหาภายในเล่ม

บทที่ 1 จะกล่าวถึงที่มาว่าทำไมจึงใช้มอเตอร์กระแสตรงในการทำโครงการชุดจำลอง โหลด, วัตถุประสงค์และขอบเขตในการทำโครงการ

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในโครงการ เริ่มจากทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรงและข้อดี, ข้อเสีย, การเบรกแบบไดนามิก, การทำงานแบบ 4 ควอดแรนต์ โดยใช้วงจรถูกบังคับ ดิซี - ดิซี คอนเวอร์เตอร์, สัญญาณพัลส์บวกลวเอเอ็มแบบไบโพลาร์ (PWM - bipolar voltage switching)

บทที่ 3 จะเป็นการประยุกต์ใช้งานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 และการนำวงจรสแน็บเบอร์ไปใช้ในวงจร , การรับส่งข้อมูลอนุกรมระหว่างคอมพิวเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์

บทที่ 4 กล่าวถึงวงจรที่ใช้ในโครงการเฉพาะที่สำคัญ โดยแต่ละวงจรจะมีรูปวงจรและอธิบายการทำงานของวงจร ซึ่งจะมีวงจรเดคไทม์ , วงจรขับเกท , วงจรไดนามิกเบรก , วงจรฟูลบริดจ์ ดิซี - ดิซี คอนเวอร์เตอร์, วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน , วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (D/A converter)

บทที่ 5 ประกอบด้วยการทดลอง ทดสอบต่างๆ คือ การทดสอบถือคโรเตอร์ , การทดลองหาความสัมพันธ์ของแรงบิดกับกระแส , การทดสอบการทำงานของชุดจำลอง โหลดที่ค่า duty cycle ต่างๆ และการทดสอบการทำงานของชุดจำลอง โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 เป็นการวิจารณ์โครงการ กล่าวถึงปัญหาต่างๆ ที่พบและการแก้ปัญหา พร้อมเทคนิคบางประการที่ช่วยในการทำโครงการ

ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ และโปรแกรมวิซวลเบสิกที่ใช้สั่งงานในคอมพิวเตอร์

ภาคผนวก ข .รวบรวมค่าชี้ต (Data sheet) ของอุปกรณ์ที่สำคัญต่างๆ เช่น ไอจีบีที, เคอเรนซ์เซนเซอร์, รูปชิ้นงานแสดงส่วนประกอบต่างๆ และ เอกสารทางวิชาการ



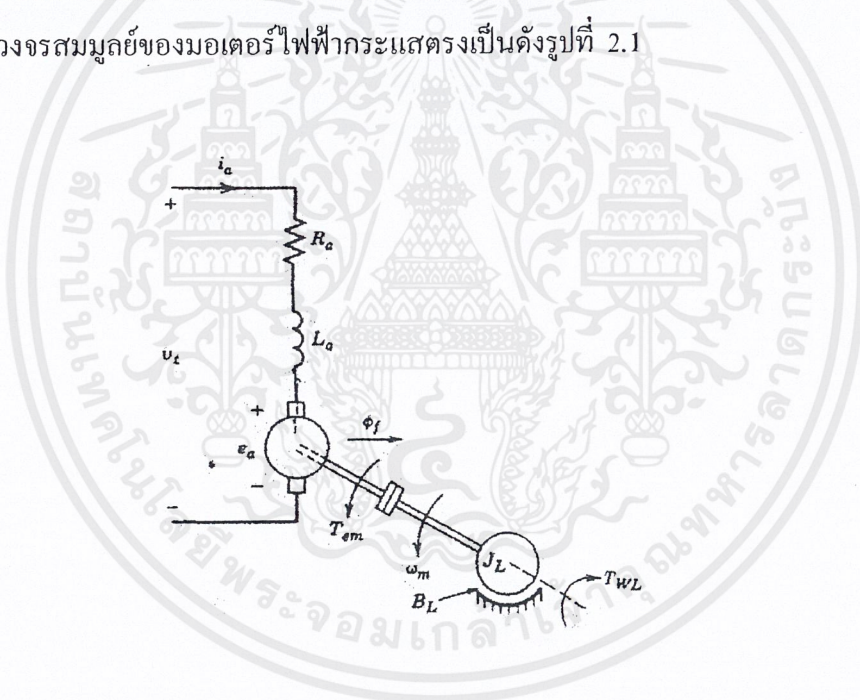
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในโรงงาน

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล มีขดลวดตัวนำเรียกว่าขดลวดอาร์เมเจอร์(Armature Winding) เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอเตอร์จะเกิดกระแสไหลผ่านแปรงถ่าน ซีคอมมิวเตเตอร์(Commutator) และขดลวดอาร์เมเจอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กซึ่งจะตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์ก่อให้เกิดแรงบิดขึ้น ทำให้ส่วนของโรเตอร์หมุน โดยแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์เป็นตัวจัดทิศทางกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ เพื่อให้เกิดแรงกระทำกับขดลวดตัวนำในทิศทางที่ทำให้เกิดการหมุนอย่างต่อเนื่อง วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1. มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูงมากจึงเหมาะกับการยกของหรืองานประเภทขับเคลื่อน
2. ควบคุมง่ายกว่าและนุ่มนวลกว่ามอเตอร์กระแสสลับที่ทำงานแบบเดียวกัน
3. ช่วงความเร็วที่ควบคุมได้กว้าง สามารถเพิ่มความเร็วให้สูงหรือต่ำกว่าปกติได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1. ต้องจัดหาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไว้ใช้งาน
2. มีวิธีการสตาร์ทที่ยุ่งยากกว่ามอเตอร์กระแสสลับในมอเตอร์ขนาดใหญ่
3. ค่าบำรุงรักษามากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเนื่องจากการสึกหรอของคอมมิวเตเตอร์ที่เกิดจากอาร์ค การขัดสีกับแปรงถ่าน
4. มีราคาแพงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน

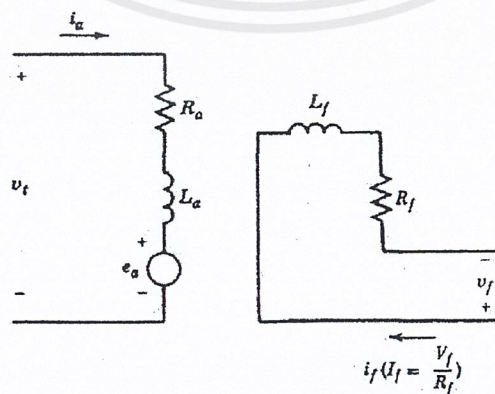
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดลวดกระตุ้นสนาม

(Separately – excited DC motor)

เป็นมอเตอร์ที่มีขดลวดที่แยกจากขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งสามารถสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ_f ได้อย่างอิสระเพื่อใช้ควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์มีวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.2

การควบคุมทำได้ 2 ส่วนคือ ควบคุมแรงดันที่วงจรอาร์เมเจอร์หรือควบคุมแรงดันที่วงจรสนามแม่เหล็ก โดยทั่วไปการควบคุมแรงดันจะเป็นการเพิ่มลดแรงดันโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในวงจรที่เรียกว่า วงจรเรียงกระแสแบบควบคุมได้ (Phase-Controlled Rectifier) หรือ วงจรชอปเปอร์ (Chopper)

จากทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้า แรงบิดขึ้นอยู่กับกระแสอาร์เมเจอร์ เพราะฉะนั้นกระแสที่ต่อเนื่องจึงเป็นเรื่องสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมอเตอร์หมุนที่ความเร็วต่ำๆ การใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะมีผลต่อการบั่นทอนสัญญาณ ดังนั้นเราจึงต้องใช้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ที่มีความถี่ในการตัดสัญญาณสูง แต่ผลเสียคือสัญญาณรบกวนมากเมื่อความถี่สูงมากๆ และความสูญเสียจากการสับสวิตซ์ (Switching Loss)



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือ

$$T_{em} = k_t \phi_f I_a$$

$$E_a = k_c \phi_f \omega_m$$

เมื่อ

T_{em} คือ แรงบิดทางไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

E_a คือ แรงดันไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ (Armature voltage)

k_t คือ ค่าคงที่ของแรงบิด (Torque constant)

k_c คือ ค่าคงที่ของแรงดัน (Voltage constant)

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (Armature current)

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุม

ϕ_f คือ ฟลักซ์ในขดลวดฟิลด์

ขณะทำงานเป็นมอเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V_t) จะมีค่ามากกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_a) ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าจะจ่ายออกมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์ ดังสมการ

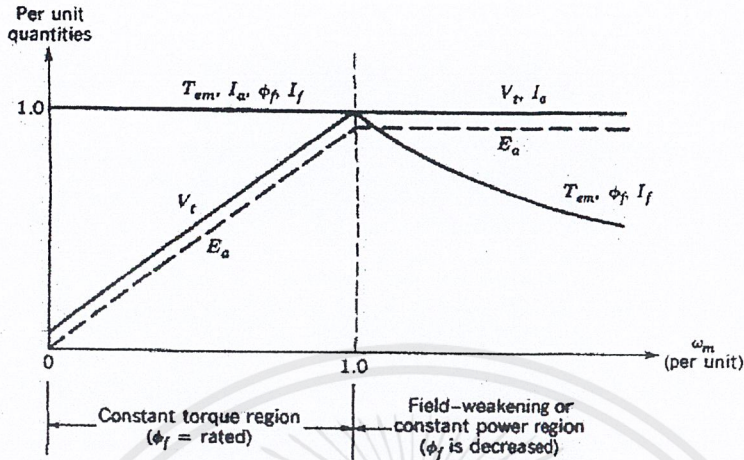
$$V_t = E_a + I_a R_a + L \frac{d}{dt}$$

จาก 3 สมการข้างต้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ ω_m ได้ดังนี้

$$\omega_m = \frac{1}{k_c \phi_f} \left(V_t - \frac{R_a}{k_t \phi_f} T_{em} \right)$$

จากสมการนี้ เราสามารถควบคุม V_t และ ϕ_f เพื่อให้ได้ค่าแรงบิดและค่าความเร็วที่ต้องการได้ แต่โครงงานนี้ใช้การควบคุม V_t โดยให้ ϕ_f คงที่ โดยการป้อนคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เพื่อควบคุมแรงดันโดยใช้หลักการของ พีดีบีทวเอ็ม ทำให้เกิดการควบคุมแบบ 4 ควอดแรนต์ ผ่านทางวงจรถูกส่งไปควบคุมมอเตอร์ ลักษณะของพารามิเตอร์ต่างๆเทียบกับความเร็วเป็นดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟพารามิเตอร์ต่างๆเทียบกับความเร็ว

จากรูปจะเห็นว่าช่วงความเร็วจากศูนย์ถึงค่าพิกัดเรียกว่าช่วงแรงบิดคงที่ ช่วงนี้ V_t แปรผันตรงกับความเร็ว เมื่อต้องการให้ความเร็วสูงขึ้นต้องรักษาค่า V_t ให้คงที่ (นั่นทำให้ E_a คงที่ด้วย) และลดค่า ϕ_f โดยการลด I_f ทำให้แรงบิดลดลงด้วย ส่วน I_a ห้ามเกินค่าพิกัดเพราะจะทำให้กระแสไหลไม่ต่อเนื่อง เพราะฉะนั้นค่า $E_a I_a$ จึงคงที่ เรียกว่าเป็นช่วงกำลังคงที่

2.3 การเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้เริ่มทำงานโดยที่ไม่ทำให้ทั้งแหล่งจ่ายและตัวมอเตอร์เสียหาย เนื่องจากกระแสตอนเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสูงมากเพราะขณะที่ความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับศูนย์ ($N_r = 0$) ซึ่งมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ($E_a = 0$) ดังนั้นกระแสเริ่มหมุน I_a จะเท่ากับ V_t / R_a ซึ่งจะมีค่าสูงมาก

การลดกระแสเริ่มหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำได้โดยใช้หลักการลดกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์หรือใช้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยที่จะได้รับค่าแรงบิดเริ่มหมุนที่ดีต้องควบคุมให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วเป็นค่าพิกัดและถ้าใช้การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งอาจเป็นวงจรถิซซออปเปอร์หรือคอนเวอร์เตอร์ซึ่งจะสะดวกในการควบคุมกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์

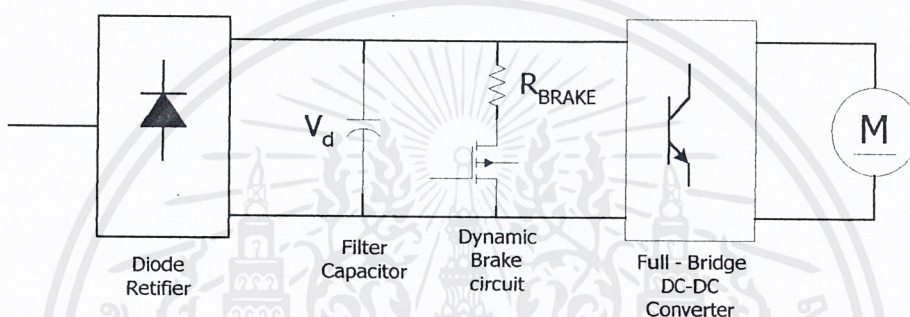
2.4 การเบรกแบบไดนามิก (Dynamic Braking)

เป็นการเบรกโดยการทำให้เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสเปลี่ยนการทำงานจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ใช้หลักการของการกระจายพลังงานผ่านความต้านทานค่าหนึ่ง ที่เรียกว่า R_{Brake} ที่ต่อขนานกับวงจรกำลังที่ขับเคลื่อนมอเตอร์แปลงเป็นพลังงานความร้อนสูญเสียออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอก ทำให้การเบรคมีความรวดเร็วยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการป้องกันอุปกรณ์ในส่วนอื่นเสียหาย เนื่องจากกระแสกระชากในเวลาที่มีการเบรคหรือเปลี่ยนทิศทางหมุนอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.4

การที่ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำได้เนื่องจากตัวหมุนของเครื่องจักร หมุนอยู่แล้วเพียงแต่คงกระแสป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์ E_a เมื่อมีความต้านทานต่ออยู่ดังรูปที่ 2.4 จะทำให้มีกระแสไหล โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุน ทำให้มอเตอร์และโหลดลดความเร็วลง



รูปที่ 2.4 การเบรคแบบไดนามิก

วิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถระบายความร้อนได้ง่ายและรวดเร็ว มีความสามารถในการลดอัตราเร็วเป็นอย่างดี แต่มีข้อเสียคือเมื่อความเร็วรอบต่ำลงแรงบิดที่ต้านก็จะต่ำลงด้วย

สมการของ มอเตอร์กระแสตรง

$$V_t = E_a + I_a R_a + L \frac{di}{dt}$$

สมการแรงบิดทางไฟฟ้า

$$T_{em} = k_t \phi_f I_a$$

เมื่อ ϕ_f คงที่

$$T_{em} \propto I_a$$

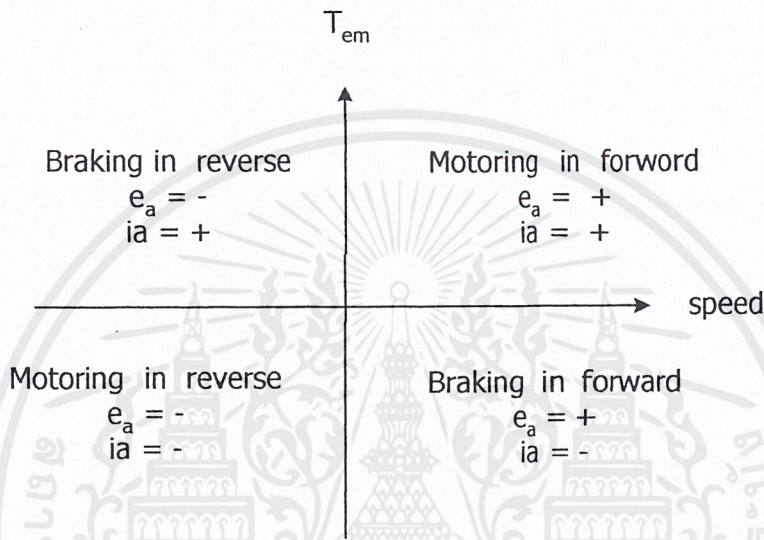
แรงดันย้อนกลับ (back- emf)

$$E_a = k_c \phi_f \omega_m$$

$$E_a \propto \omega_m$$

2.5 หลักการของ 4 ควอดแดรนต์

การเบรคจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันอินพุตลดลงน้อยกว่าแรงดันที่อาร์เมเจอร์ทำให้กระแสอาร์เมเจอร์ไหลกลับทิศทำให้ แรงบิดทางไฟฟ้ากลับทิศดังนั้นมอเตอร์จะทำตัวเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งพลังงานที่จ่ายกลับมานี้จะคืนกลับสู่แหล่งจ่ายหรือสูญเสียไปในความต้านทาน



รูปที่ 2.5 การทำงานของมอเตอร์แบบ 4 ควอดแดรนต์

ในขณะเบรค แรงดันที่อาร์เมเจอร์ไม่กลับขั้วทำให้มอเตอร์ไม่กลับทิศแต่เมื่อมอเตอร์เริ่มหยุดความเร็วลดลงทำให้ แรงดันที่อาร์เมเจอร์ ลดลง มอเตอร์หยุดและ ทำให้แรงดันที่อาร์เมเจอร์กลับขั้ว มอเตอร์จะเริ่มกลับทิศหมุนในควอดแดรนต์ที่ 3

สรุปการทำงานของควอดแดรนต์ต่างๆ

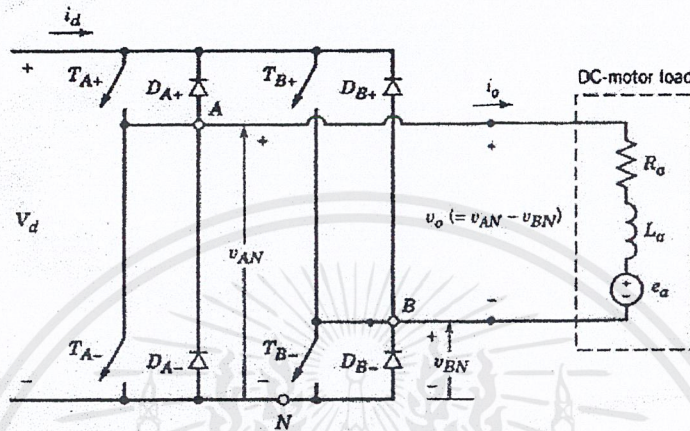
ควอดแดรนต์ที่ 1 มอเตอร์หมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ด (Forward) แรงบิดและแรงดันที่อาร์เมเจอร์มีค่าเป็นบวก

ควอดแดรนต์ที่ 2 เป็นฟอร์เวิร์ดเบรคกิ้ง (Forward Braking) ซึ่งมอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากกระแสอาร์เมเจอร์ไหลกลับทิศ (เครื่องหมายลบ) ทำให้แรงบิดกลับทิศด้วย แต่แรงดันที่อาร์เมเจอร์ยังเป็นบวก และจะลดลงเรื่อยๆ ทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลงจนหยุดนิ่งเมื่อแรงดันที่อาร์เมเจอร์มีค่าเป็นศูนย์

ควอดแดรนต์ที่ 3 มอเตอร์หมุนในทิศทางรีเวอร์ส (Reverse) แรงบิด,แรงดันและกระแสที่อาร์เมเจอร์มีค่าเป็นลบ

ควอดแดรนต์ที่ 4 เป็นรีเวอร์สเบรคกิ้ง (Braking) ซึ่งมอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากกระแสอาร์เมเจอร์มีกลับทิศ(เครื่องหมายบวก)ทำให้แรงบิดเป็นบวกด้วย

แต่แรงดันที่อาร์เมเจอร์ยังเป็นลบ และจะลดลงเรื่อยๆ ทำให้ความเร็วมอเตอร์ลดลงจนหยุดนิ่งเมื่อแรงดันที่อาร์เมเจอร์มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 2.6 วงจรฟูลบริดจ์ คีซี - คีซี คอนเวอร์เตอร์

การควบคุม 4 ควอนแดรนต์ จะใช้วงจร ฟูลบริดจ์ คีซี - คีซี คอนเวอร์เตอร์ ซึ่ง แรงดันเอาต์พุตสามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและขั้ว ส่วนกระแสเอาต์พุตควบคุมได้ทั้งขนาดและทิศทางการไหล การ สวิตช์ของวงจรจะเป็นแบบพีคดับลิวเอ็มชนิด ไบ โพลาร์ (สวิตช์ 2 ตัว จะทำงานพร้อมกัน T_{A+} , T_{B-} และ T_{B+} , T_{A-}) ในการใช้งานจริง สวิตช์ จะมีช่วงเวลาที่ยุคทำงานพร้อมกันในกึ่งเดียวกันเรียกว่าแบลนกกิงไทม์ (blanking time) เพื่อป้องกันการ ลัดวงจร ของวงจรด้านอินพุต

$$V_o = +v_d \text{ เมื่อ } T_{A+}, T_{B-} \text{ ทำงาน}$$

$$V_o = -v_d \text{ เมื่อ } T_{B+}, T_{A-} \text{ ทำงาน}$$

จะเห็นว่า แรงดันเอาต์พุตจะควบคุมโดยสถานะของการสับสวิตช์

พีคดับลิวเอ็ม แบบ ไบโพลาร์

$$V_{control} > V_{tri} \text{ ช่วง } T_{A+}, T_{B-} \text{ ทำงาน}$$

$$V_{control} < V_{tri} \text{ ช่วง } T_{B+}, T_{A-} \text{ ทำงาน}$$

$$\frac{v_{tri}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{t}{T_s/4} \quad 0 < t < T_s/4 \quad \dots(1)$$

ที่ $t = t_1$ จากรูป a $v_{tri} = v_{control}$

$$t_{on} = 2t_1 + \frac{T_s}{2}$$

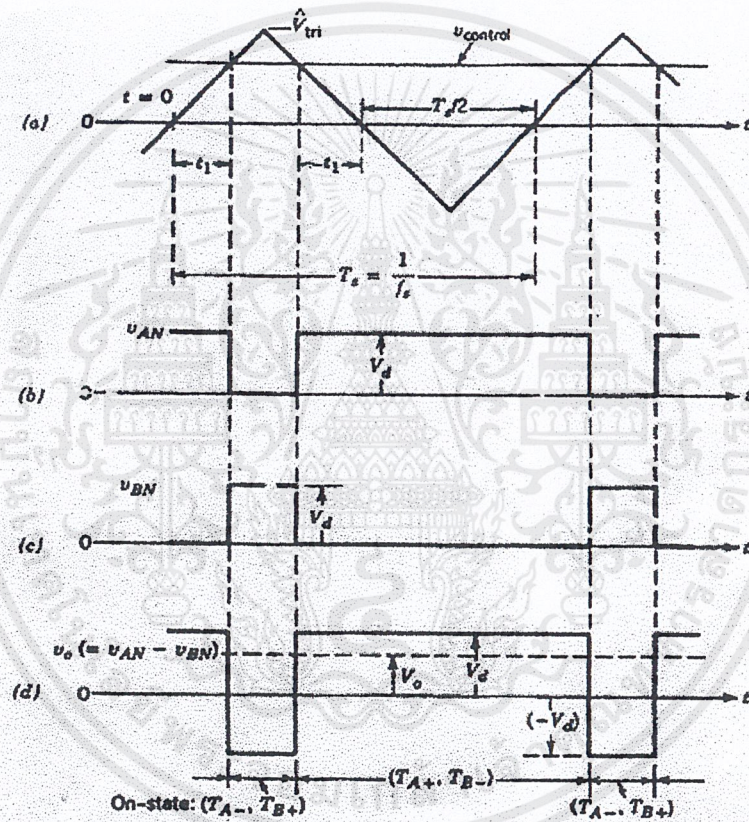
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก (1) } t_1 = \frac{v_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}} T_s/4$$

จากรูป a,b ช่วง t_{on} ของ สวิตช์ (T_{A+} , T_{B-})

นำ t_1 มาแทนจะได้

$$t_{\text{on}} = \frac{T_s}{2} \frac{v_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}} + \frac{T_s}{2}$$



รูป 2.7 แสดง พีดับบลิวเอ็ม แบบ ไบโพลาร์

ที่ $t = t_1$ จากรูป a $v_{\text{tri}} = v_{\text{control}}$

$$t_{\text{on}} = 2t_1 + \frac{T_s}{2}$$

$$\text{จาก (1) } t_1 = \frac{v_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}} T_s/4$$

จากรูป a,b ช่วง t_{on} ของ สวิตช์ (T_{A+} , T_{B-})

นำ t_1 มาแทนจะได้

$$t_{\text{on}} = \frac{T_s}{2} \frac{v_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}} + \frac{T_s}{2}$$

$$= \frac{T_s}{2} \left(1 + \frac{v_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}} \right)$$

$$\text{Duty cycle} = D_1 = \frac{t_{\text{on}}}{T_s} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}} \right) \text{ Duty cycle ของ สวิตช์ คู่ที่ 2}$$

$$D_2 = 1 - D_1$$

$$\text{จากรูป } V_o = V_{\text{AN}} - V_{\text{BN}} = D_1 V_d - D_2 V_d = (2 D_1 - 1) V_d \text{ แทนค่า } D_1$$

$$\text{จะได้ } V_o = \frac{v_d}{\hat{V}_{\text{tri}}} v_{\text{control}} = k V_{\text{control}}$$

ฟูลบริดจ์ ดิซี-ดิซี คอนเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการสวิตช์ แบบโพลาร์ สถานะของสวิตช์จะเป็นตัวกำหนดขั้วของ แรงดันเอาต์พุตและการควบคุมค่า คิวตี้ไซเคิล หรือ V_{control} นั้นจะปรับขนาดของ แรงดันเอาต์พุตโดยถ้าแรงดันเอาต์พุตมากกว่าแรงดันอินพุต กระแสอาร์เมเจอร์ ไหลกลับทิศได้

2.6 ริปเปิ้ลในกระแสอาร์เมเจอร์ (Ripple in the Armature Current)

ในระบบรูปที่ 2.6 ภายใต้เงื่อนไข steady-state operation ให้ค่า ω_m มีค่าคงที่ ถ้ามีแรงเฉื่อยพอเพียง ดังนั้นค่า $e_a(t) = E_a$ แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าและกระแสอาร์เมเจอร์แสดงค่าในเทอมดิซีและส่วนที่เป็นริปเปิ้ล ได้ดังนี้

$$v_t(t) = V_t + v_r(t)$$

$$i_a(t) = I_a + i_r(t)$$

เมื่อ $v_r(t)$, $i_r(t)$ คือ ส่วนที่เป็นริปเปิ้ล ใน v_t และ i_a ตามลำดับ

จาก

$$v_t = e_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

เมื่อมีส่วนที่เป็นริปเปิ้ล จะได้

$$V_t + v_r(t) = E_a + R_a [I_a + i_r(t)] + L_a \frac{di_r(t)}{dt}$$

จะได้

$$V_t = E_a + R_a I_a$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_r(t) = R_a i_r(t) + L_a \frac{di_a}{dt}$$

ค่ากระแส ริปเปิ้ล ในเบื้องต้นใช้ค่า L_a ในการคำนวณ จึงทำให้ค่า R_a ไม่มีผล ซึ่งจะได้ว่า

$$v_r(t) \cong L_a \frac{di_r(t)}{dt}$$

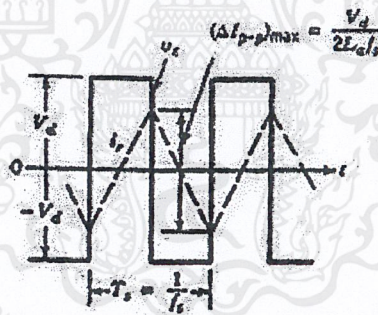
แรงดัน ริปเปิ้ล ของ พีคดับบลิวเอ็ม แบบ ไบโพลาร์ แสดงค่าสูงสุดเมื่อแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งแสดงรูปคลื่น ได้ดังนี้

$$\left(\Delta I_{P-P}\right)_{\max} = \frac{V_d}{2L_a f_s} \dots\dots 1$$

เมื่อ V_d คือ แรงดันไฟตรงป้อนเข้า

f_s คือความถี่สวิตชิง

จากสมการ 1 ค่ากระแส ริปเปิ้ล สูงสุดเป็นสัดส่วนผกผันกับ L_a และ f_s โดยที่ L_a สามารถเพิ่มได้จากการต่อขดลวดอนุกรมที่อาเมเจอร์



รูป 2.8 แสดงริปเปิ้ล ในกระแสอาเมเจอร์

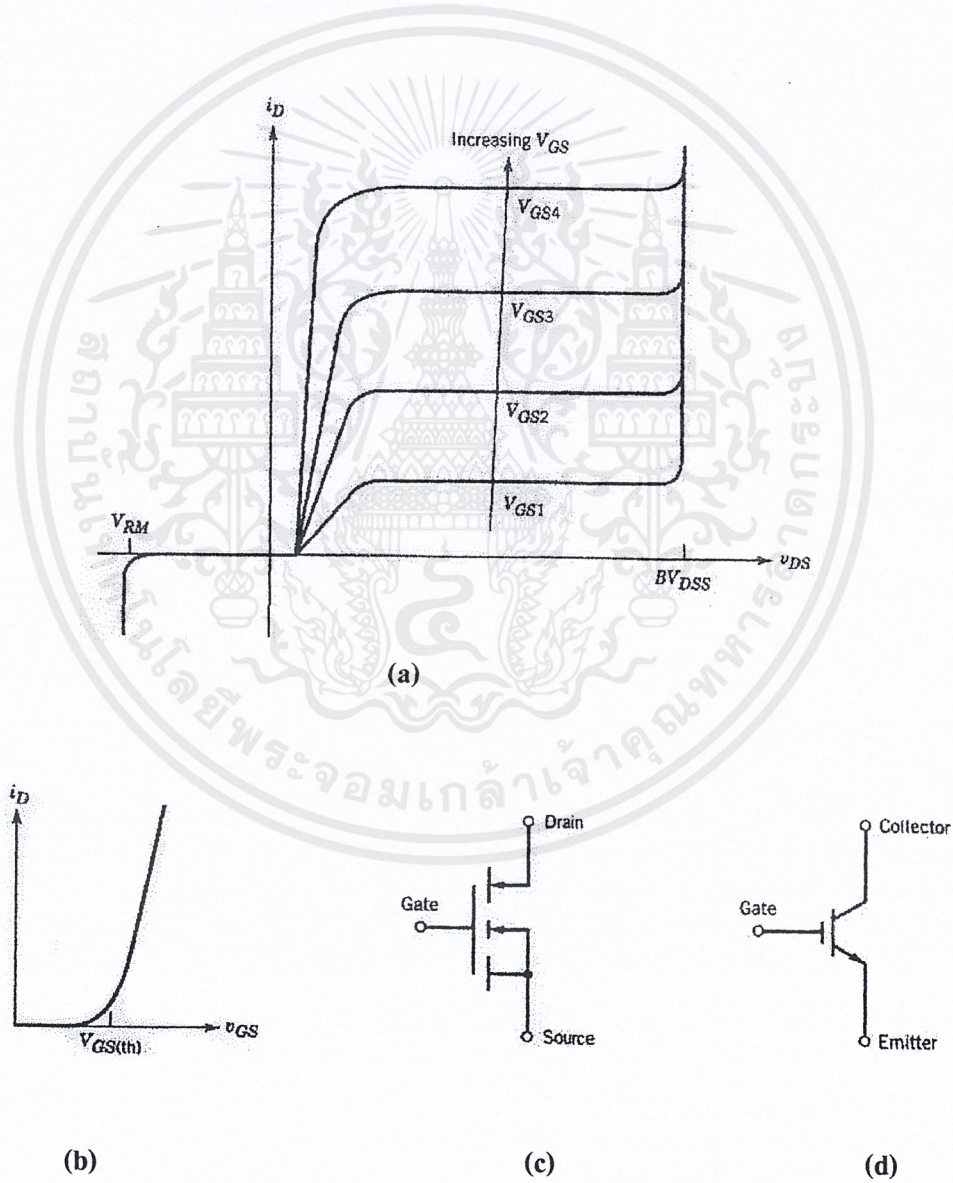
2.7 ทฤษฎีเกี่ยวกับ ไอจีบีที

2.7.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ ไอจีบีที

อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลที่พอจะคุ้นเคยและใช้งานอย่างกว้างขวาง ในขณะนี้ก็เห็นจะไม่พ้น เอสซีอาร์, ไตรแอก ,ทรานซิสเตอร์และมอสเฟต โดยเฉพาะทรานซิสเตอร์และมอสเฟต ที่จะเป็นจุดพัฒนาการของอุปกรณ์ชนิดใหม่นี้ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชนิดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป กล่าวคือ ทรานซิสเตอร์ขณะอยู่ในสภาวะนำกระแสจะมีอัตราการสูญเสียกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานต่ำ มีอัตราทนแรงดันและขยายกระแสได้สูงแต่ความเร็วในการสวิตช์ยังต่ำอยู่ โดยเฉพาะช่วงหยุดนำกระแสจะมีช่วงเวลาที่ยาวกว่า ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ตรงข้ามกับมอทเฟสที่มีความเร็วในการสวิตช์ทำงานนำกระแสและหยุดนำกระแสได้เร็วกว่ามาก แต่ก็มีอัตราการสูญเสียกำลังงานสูงมากเช่นกัน จากเหตุผลที่กล่าวมาของทรานซิสเตอร์และมอสเฟต จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ประเภทนี้จนสามารถได้อุปกรณ์ เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลชนิดใหม่ขึ้นมา โดยคุณสมบัติต่างๆ จะรวมเอาข้อได้เปรียบของทรานซิสเตอร์และมอทเฟสเข้ามารวมไว้ในอุปกรณ์ชนิดใหม่นี้ โดยมีการตั้งชื่อ หรือเรียกชื่ออย่างเป็นทางการว่า ไอจีบีที



รูป 2.9 แสดงคุณลักษณะของกระแสและความต่างศักย์

(a) ลักษณะเอาท์พุท (b) Transfer Characteristic

(c) ,(d) สัญลักษณ์ของไอจีบีทีชนิด n-channel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 คุณสมบัติของกระแสและศักดาไฟฟ้า

ลักษณะของกระแสและศักดาไฟฟ้าของ ไอจีบีที ชนิด n Channel ดังแสดงในรูป2.7(a)ในทิศทาง forward จะเหมือนกับ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ที่ใช้ในลอจิกเซอร์กิต แตกต่างกันเพียงควบคุมการทำงานด้วยแรงดัน แทนที่จะควบคุมการทำงานด้วยกระแสเหมือนกับทรานซิสเตอร์ คุณสมบัติของ ไอจีบีที ชนิด p Channel จะเหมือนกันเพียงขั้วของความต่างศักย์แต่ทิศของกระแสจะกลับกัน

ในรูป2.9(b)เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D และ V_{GS} ลักษณะเหมือนกับของมอสเฟต ลักษณะเส้นกราฟจะเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงของกระแสเดรน และไม่เป็นเชิงเส้นที่จุดที่กระแสเดรนมีค่าต่ำ เมื่อ V_{GS} มีค่าต่ำกว่าค่าหนึ่งเรียกว่า $V_{GS(th)}$ (Threshold Voltage) ไอจีบีที จะอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส ความต่างศักย์คร่อมเกต และซอร์สสูงสุดที่ยอมให้ใช้ได้ขึ้นอยู่กับค่ากระแสเดรนสูงสุดที่ยอมให้ไหลในตัวไอจีบีที

2.8 วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ (Proportional Plus Integral Control)

สำหรับการควบคุมแบบป้อนกลับนี้จะใช้เพื่อรักษาระดับกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงไป และเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหน้าที่เป็นโหลดโดยคัปปลิง(Coupling)กับอินดักชันมอเตอร์(Induction Motor) เพื่อให้ได้แรงบิดคงที่

รายละเอียดของวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ(Proportional Plus Integral Control) ศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิงที่[9]

บทที่ 3

การประยุกต์ใช้งาน

ในโครงการนี้ มีการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8052 ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสร้างพลัสต์สัญญาณพีคดับบลิวเอ็มและเป็นตัวควบคุมแรงบิดของระบบ โครงสร้างและการทำงานได้ปรับปรุงมาจากตัว MCS – 51 ดังนั้นในบทนี้จะอธิบาย MCS – 51 เป็นหลักรวมกับส่วนที่เพิ่มขึ้นมาใน 8052

3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

คุณสมบัติพื้นฐานของ MCS-51

- หน่วยประมวลผลกลางขนาด 8 บิต
- สามารถประมวลผลข้อมูลได้ในระดับบิต
- สามารถอ้างอิงตำแหน่งของหน่วยความจำโปรแกรมได้ 64 กิโลไบต์
- สามารถอ้างอิงตำแหน่งของหน่วยความจำข้อมูลได้ 64 กิโลไบต์
- มีหน่วยความจำข้อมูลภายใน (Internal RAM) จำนวน 128 ไบต์
- พอร์ทอินพุท / เอาท์พุทแบบขนาน 32 เส้น สามารถแยกทำงานได้อิสระ
- มีวงจรควบคุมการอินเทอร์รัปต์จากแหล่งกำเนิด 6 แหล่ง
- มีวงจรออสซิลเลเตอร์ภายใน

3.1.1 โครงสร้างภายในของMCS – 51

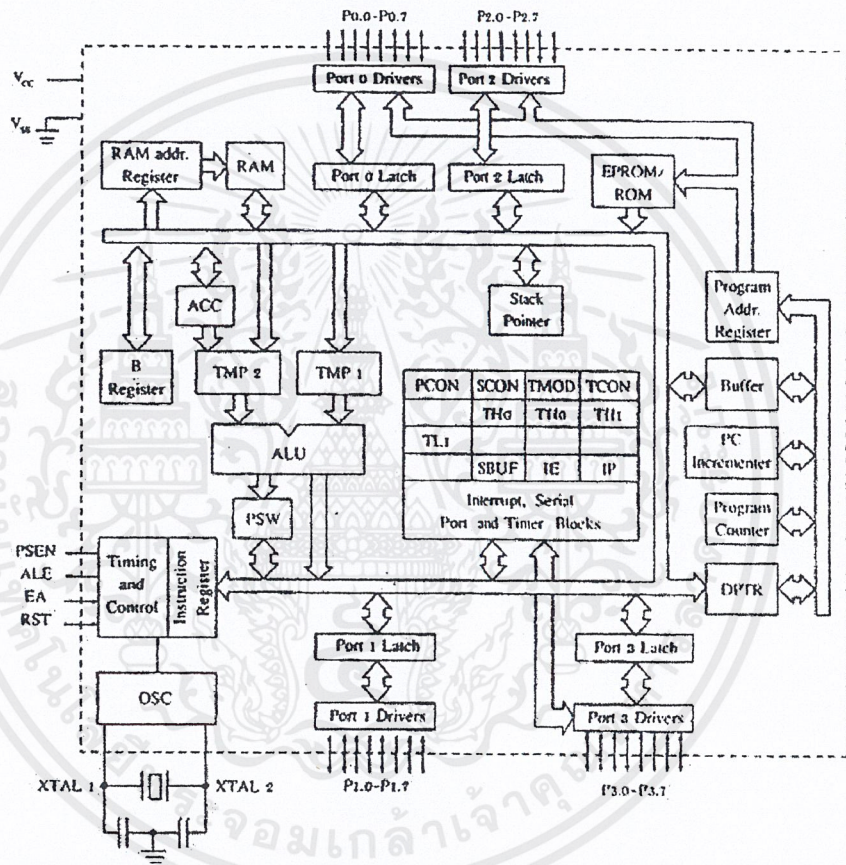
โครงสร้างภายในของ MCS-51 เป็นดังรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าและบล็อกที่เป็นวงจรควบคุมรีจิสเตอร์ (Register) และหน่วยความจำภายใน จะถูกเชื่อมต่อเชื่อมต่อกันด้วยกันผ่านทางเส้นสัญญาณที่เรียกว่าบัส (Bus) รีจิสเตอร์และหน่วยความจำเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในระหว่างการประมวลผลคำสั่ง หน้าที่ของโปรแกรมที่ผู้ใช้สร้างขึ้นมาจะเป็นการควบคุมการรับหรือส่งข้อมูลระหว่างรีจิสเตอร์เหล่านี้ ซึ่งอาจจะทำงานร่วมกับหน่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์และตรรกะ (ALU : Arithmetic and Logic Unit) โครงสร้างของMCS – 51 เป็นดังรูปที่ 3.1

3.1.2 หน่วยความจำ

MCS – 51 แยกการจัดการหน่วยความจำออกเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูล ซึ่งทำหน้าที่แตกต่างกัน อีกทั้งใช้วิธีการอ้างอิงตำแหน่งสัญญาณการติดต่อแยกจากกัน

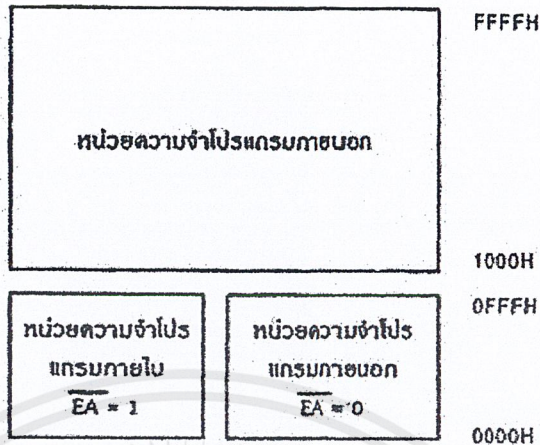
(1). หน่วยความจำโปรแกรม

เป็นหน่วยความจำที่อยู่ในรูปของ ROM เมื่อมีการตัดไฟฟ้าออกข้อมูลจะไม่หายไป จึงใช้สำหรับบรรจุคำสั่ง โปรแกรม หรือข้อมูลที่คงที่ต่างๆ มี 2 แบบคือ หน่วยความจำภายในตัว MCS-51 เหมาะกับงานที่ต้องการอุปกรณ์ที่กะทัดรัด อีกแบบคือ ใช้ไอซีภายนอกซึ่งเชื่อมต่อกับพอร์ท P0 และ P2 ในการอ้างอิงแอดเดรสและข้อมูล



รูปที่ 3.1 โครงสร้างภายในของ MCS - 51

หน่วยความจำโปรแกรมภายในของ MCS - 51 มี 4 กิโลไบต์หน่วยความจำภายนอกอีก 60 กิโลไบต์ สามารถเลือกใช้งานได้ 2 ลักษณะคือเลือกใช้หน่วยความจำภายในรวมกับหน่วยความจำภายนอกหรือเลือกใช้หน่วยความจำภายนอกทั้งหมด 64 กิโลไบต์ก็ได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การจัดพื้นที่หน่วยความจำโปรแกรมของ 8051

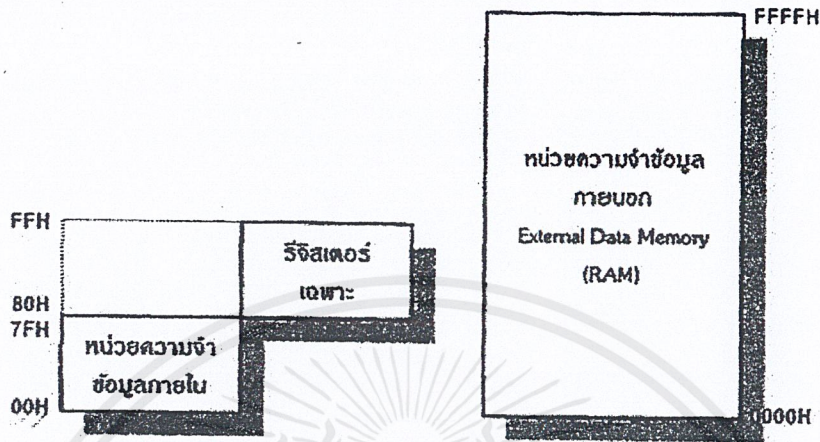
(2). หน่วยความจำข้อมูลภายใน

เป็นหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลชั่วคราวในระหว่างการทำงานตามคำสั่ง หน่วยความจำภายในของ MCS- 51 มี 128 ไบต์ ส่วน MCS- 52 มีขนาด 256 ไบต์ โดย 128 ไบต์แรกเป็นหน่วยความจำที่ใช้อยู่ทั่วไป 128 ไบต์สูง (80H – FFH) เป็นพื้นที่ที่ซ้อนทับกันอยู่ระหว่างหน่วยความจำกับริจิสเตอร์หน้าที่พิเศษ (SFR – Special Function Register) 20 ตำแหน่ง

แอดเดรส 00H – 1FH จำนวน 32 ไบต์จะถูกใช้งานในฐานะรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไปแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มเรียกว่าแบงก์ จะเลือกใช้งานได้ครั้งละ 1 แบงก์ จำนวน 8 ไบต์ ปกติแล้วจะมีการทำงานในแบงก์ 0 เท่านั้น

แอดเดรส 20H – 2FH จำนวน 16 ไบต์ เป็นส่วนที่สามารถใช้งานในลักษณะไบต์หรือบิตก็ได้ คือบิต 00 (LSB ของ 20H) ถึง 7FH (MSB ของ 2FH) รวม 128 บิต การใช้งานอ้างอิงแบบบิตจะทำให้การทำงานรวดเร็วขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ที่ถูกออกแบบมาเพื่อการทำงานควบคุมโดยเฉพาะ

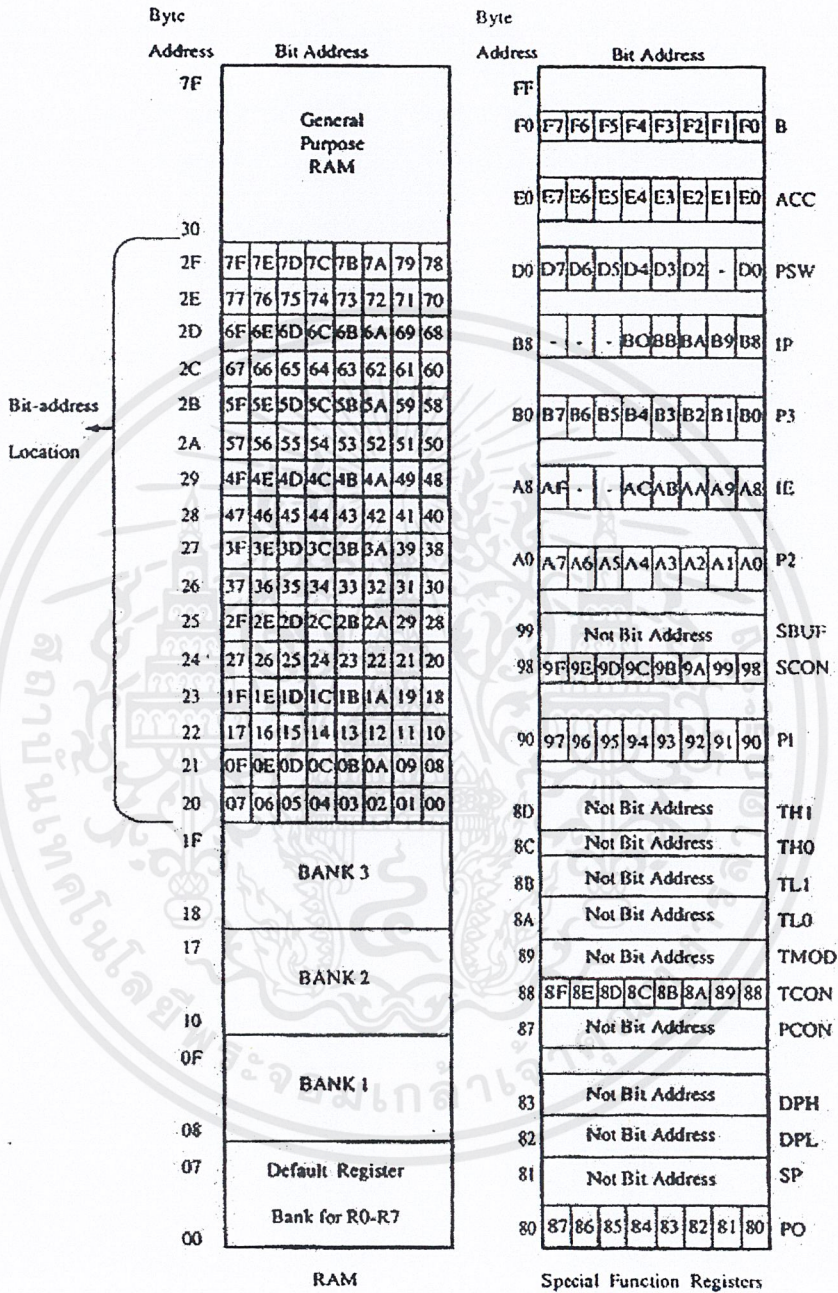
แอดเดรส 30H – 7FH จำนวน 80 ไบต์ สามารถใช้งานเป็นไบต์ข้อมูลได้อิสระ การจัดพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การจัดพื้นที่หน่วยความจำข้อมูลของ 8051

(3). หน่วยความจำข้อมูลภายนอก

สามารถต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้ 64 กิโลไบต์ ซึ่งเราจะต่อหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเมื่อเราต้องการใช้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลในขณะที่โปรแกรมทำงานจำนวนมาก ตำแหน่งของมันจะอยู่ที่ 0000H- FFFFH ในการใช้งานเราสามารถแบ่งส่วนหนึ่งของพื้นที่หน่วยความจำข้อมูลภายนอกมาใช้เป็นพอร์ตอินพุตหรือพอร์ตเอาต์พุตก็ได้



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของหน่วยความจำทั้งแบบไบต์และแบบบิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 รีจิสเตอร์เฉพาะ (Special Function Register)

เป็นรีจิสเตอร์ที่ทำหน้าที่เฉพาะอย่าง อยู่ในตำแหน่งของหน่วยความจำตั้งแต่ 80H ขึ้นไป เราสามารถอ้างถึงตำแหน่งได้โดยตรง และบางตัวสามารถอ้างอิงข้อมูลแบบบิตได้ดังรูป 3.5

สัญลักษณ์	ชื่อ	ตำแหน่ง
*ACC	Accumulator	E0H
*B	B Register	F0H
*PSW	Program Status Word	D0H
SP	Stack Pointer	81H
DPTR	Data Pointer	
DPL	Low Byte	82H
DPH	High Byte	83H
*P0	Port 0	80H
*P1	Port 1	90H
*P2	Port 2	A0H
*P3	Port 3	B0H
*IP	Interrupt Priority Control	B8H
*IE	Interrupt Enable	A8H
TMOD	Timer/Counter Mode Control	89H
*TCON	Timer/Counter Control	88H
+*T2CON	Timer/Counter 2 Control	C8H
TH0	Timer/Counter 0 High Byte	8CH
TL0	Timer/Counter 0 Low Byte	8AH
TH1	Timer/Counter 1 High Byte	8DH
TL1	Timer/Counter 1 Low Byte	8BH
+*TH2	Timer/Counter 2 High Byte	CDH
+*TL2	Timer/Counter 2 Low Byte	CCH
+*RCAP2H	T/C Capture Register High Byte	CBH
+*RCAP2L	T/C Capture Register Low Byte	CAH
*SCON	Serial Control	98H
SBUF	Serial Data Buffer	99H
PCON	Power Control	87H

* = สามารถอ้างตำแหน่งข้อมูลแบบบิตได้

+ = มีเฉพาะใน 8052 และ 8032 เท่านั้น

ตารางที่ 3.1 รีจิสเตอร์เฉพาะ SFR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีจิสเตอร์หน้าที่เฉพาะที่ใช้ในโครงการที่สำคัญคือ

DTPR - Data Pointer เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิตใช้สำหรับเป็นตัวชี้ตำแหน่งของหน่วยความจำภายนอกหรือตำแหน่งของอุปกรณ์อินพุทเอาต์พุทที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการติดต่อด้วย ประกอบด้วยรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต 2 ตัวคือ DPH และ DPL เลือกรการใช้งานในลักษณะ 8 บิต 2 ตัว หรือ 16 บิต 1 ตัวก็ได้

SBUF – Serial Buffer สำหรับการสื่อสารอนุกรม เป็นบัฟเฟอร์รับ-ส่งข้อมูลไปทางพอร์ตอนุกรม

TMOD – Timer Mode Control เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิตสำหรับเลือกโหมดการทำงานของวงจรมนับ/จับเวลา1,2

PSW- Program Status Word เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิตทำหน้าที่แสดงสถานะการทำงานของโปรแกรมหรือเรียกว่าแฟลก บิตต่างๆภายในPSW เป็นดังนี้

ตารางที่ 3.2 PSW

ชื่อบิต	ตำแหน่ง	ความหมาย
CY	PSW.7	Carry Flag
AC	PSW.6	Auxiliary Carry Flag
F0	PSW.5	Zero Flag
RS1	PSW.4	บิต 1 สำหรับเลือกรีจิสเตอร์แบงค์
RS0	PSW.3	บิต 0 สำหรับเลือกรีจิสเตอร์แบงค์
OV	PSW.2	Overflow Flag
-	PSW.1	-
P	PSW.0	Parity Flag

3.1.4 วงจรมนับ/จับเวลา (Timer / Counter)

มีขนาด 16 บิต จำนวน 2 ตัว คือ T0 และ T1 แต่ละตัวแบ่งเป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิตได้แก่ TH0 , TL0 และ TH1 , TL1 ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้อย่างอิสระ โดยควบคุมให้นับสัญญาณภายใน หรือนับสัญญาณพัลส์จากภายนอกก็ได้ การควบคุมจะใช้รีจิสเตอร์ 2 ตัว คือ TMOD และ TCON การทำงานของตัวนับจะเพิ่มค่าขึ้นจากที่กำหนดเริ่มต้นไปเรื่อยๆจนถึงค่าสูงสุดของรีจิสเตอร์แล้ว หากนับต่อไปจะเกิดการ Overflow รีจิสเตอร์จะกลับไปเป็น 0 และ Timer Flag แสดงการอินเตอร์รัปต์จะถูกเซต

เราสามารถตั้งค่าการทำงานได้ 4 โหมด โดยตั้งค่าใน TMOD ดังนี้

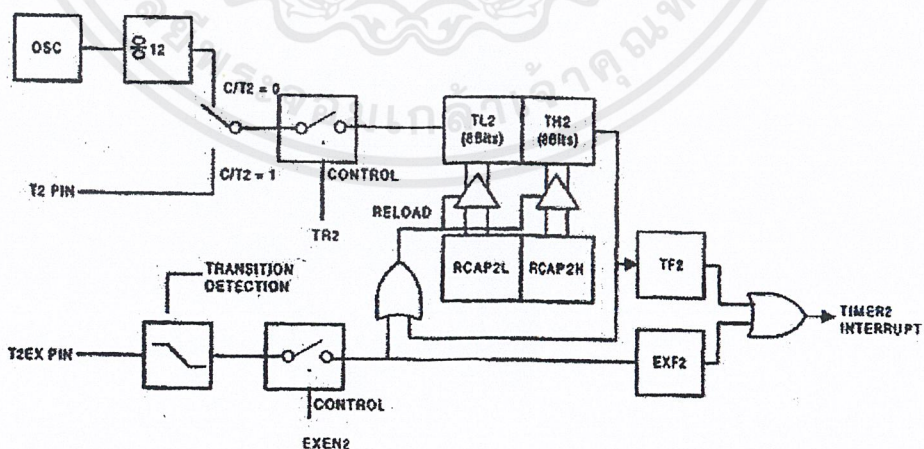
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โหมด 0 โดยรีจิสเตอร์ตัวนับจะถูกกำหนดให้มี 13 บิต ประกอบด้วย TH 8 บิต และ TL 5 บิต
- โหมด 1 การทำงานเหมือนกับโหมด 0 แต่ตัวนับจะเป็น 16 บิต
- โหมด 2 ใช้รีจิสเตอร์ TL1 เป็นตัวนับเพียงตัวเดียว และเมื่อ TL1 นับจนเป็น “ 1 “ หมดทุกบิตก็จะมี การไหลคค่าจากรีจิสเตอร์ TH1 เข้าไปใน TL1 โดยอัตโนมัติและทำการเซ็ท TFH ค่าใน TH1 นี้สามารถตั้งค่าได้โดยใช้ซอฟต์แวร์
- โหมด 3 เป็นการเพิ่มตัวจับเวลาขึ้นอีกหนึ่งตัว แต่จะเป็นขนาด 8 บิตทั้งคู่ โดยการทำงานอื่นๆ จะเหมือนกับโหมด 0

โครงงานนี้มีการใช้ Timer 2 ซึ่งมีเฉพาะใน 8052 หรือ 8032 เท่านั้น ภายใน Timer 2 มีรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิตเพิ่มจาก Timer 0 และ Timer 1 อยู่ 2 ตัวคือ RCAP2L และ RCAP2H เรา กำหนดการทำงานได้จากรีจิสเตอร์ T2CON ในรูป 3.5 โดยมีการทำงาน 3 โหมดคือ โหมดแคปเจอร์ (Capture), โหมดออโต้รีโหลด (Auto Reload) และในโหมดสร้างอัตรารับส่งข้อมูล (Baudrate Generator) สำหรับโครงงานนี้ใช้ในส่วนของออโต้รีโหลดดังรูปที่ 3.6

7	6	5	4	3	2	1	0
TF2	EXF2	RCLK	TCLK	EXEN2	TR2	C/ T2	CP/RL2

รูป 3.5 รีจิสเตอร์ T2CON



รูปที่ 3.6 การทำงานของ Timer 2 ในโหมด Auto Reload

การทำงานในโหมดนี้เราสามารถเลือกการทำงานได้ 2 แบบ โดยการกำหนดในบิต EXEN2 ที่อยู่ในรีจิสเตอร์ T2CON ดังนี้

หากกำหนดบิต EXEN2 = 0 เมื่อค่าของการนับเกิดการ โอเวอร์ โฟลวขึ้นนอกจากจะเซต แฟล็ก TF2 แล้วยังทำให้เกิดการ โหลดค่าในรีจิสเตอร์ RCAP2L และ RCAP2H ไปกำหนดให้กับรีจิสเตอร์ TL2 และ TH2 เพื่อเป็นค่าเริ่มต้นของการนับครั้งต่อไป

หากกำหนดบิต EXEN2 = 1 เมื่อค่าของการนับเกิดการ โอเวอร์ โฟลวขึ้นจะทำงานเหมือนกับ โหมดที่ 1 แล้วโดยอัตโนมัติ ที่พิเศษคือ ยังสามารถควบคุมที่ขา T2EX อีกด้วย โดยการโหลดจะกระทำเมื่อสัญญาณที่ขา T2EX เปลี่ยนจาก 1 ไป 0 และจะทำให้แฟล็ก EFX2 ถูกเซตด้วย ซึ่งแฟล็ก EFX2 นี้จะเป็นสัญญาณร้องขอการอินเทอร์รัปต์ต่อไป

3.1.5 การอินเทอร์รัปต์

สามารถกำหนดให้มีการยอมหรือไม่ยอมให้มีการอินเทอร์รัปต์ของแต่ละสัญญาณได้ โดยใช้วิธีการกำหนดค่าของบิตภายในรีจิสเตอร์ IE ซึ่งมีทั้งแบบที่ระบุถึงอินเทอร์รัปต์โดยรวมทั้งหมด และแบบอินเทอร์รัปต์แต่ละประเภทได้ การเซตบิตหมายถึงยอมให้มีการอินเทอร์รัปต์

สัญญาณที่เข้ามาทำการอินเทอร์รัปต์ CPU มี 5 ลักษณะดังตารางที่ 3.1

สัญญาณ	ความหมาย
INT 0	สัญญาณภายนอกจากขา P3.2
INT1	สัญญาณภายนอกจากขา P3.3
TIMER 0	สัญญาณ โอเวอร์ โฟลวของ T0
TIMER 1	สัญญาณ โอเวอร์ โฟลวของ T1
SERIAL PORT	การอินเทอร์รัปต์จากการรับ/ส่งข้อมูลอนุกรม
TIMER 2	สัญญาณ โอเวอร์ โฟลวของ T2

ตารางที่ 3.3 แสดงสัญญาณที่เข้ามาอินเทอร์รัปต์

ระดับความสำคัญ(Priority) ของสัญญาณอินเทอร์รัปต์ คือ อินเทอร์รัปต์ จากภายนอก 0 , ไทเมอร์/เคาเตอร์ 0 , อินเทอร์รัปต์ภายนอก 1 , ไทเมอร์เคาเตอร์ 1 , จากวงจรรับส่งข้อมูลอนุกรม

3.1.6 สัญญาณนาฬิกา

วงจรรอสซิงเคลเตอร์ภายในมีหน้าที่สร้างสัญญาณนาฬิกา ซึ่งใช้เป็นฐานในการกำหนด จังหวะการทำงานของหน่วยต่างๆทั้งหมด ช่วงเวลาพื้นฐานที่เป็นหน่วยย่อยในการทำงานเรียกว่า “สแตท (State) “โดย 6 สแตทเป็น 1 Machine Cycle ปกติหาจาก 12 / ความถี่สัญญาณคริสตัล

3.1.7 พอร์ตอินพุท / เอาท์พุท

มีจำนวน 4 พอร์ต พอร์ตละ 8 บิต สามารถใช้งานในลักษณะสัญญาณเดี่ยวหรือกลุ่มของสัญญาณได้ บางพอร์ตสามารถนำไปใช้ในงานอื่นได้ เช่น

พอร์ต 0 ใช้เป็นมัลติเพล็กซ์ระหว่าง บัสแอดเดรสไบต์ต่ำและบัสข้อมูลสำหรับหน่วยความจำภายนอก

พอร์ต 2 ใช้เป็นบัสแอดเดรสไบต์สูงร่วมกับพอร์ต 0

พอร์ต 3 สามารถนำไปเป็นขาสัญญาณควบคุมต่างๆดังนี้

I/O ปกติ	สามารถใช้เป็นขา	หน้าที่
P3.0	RxD	ขารับข้อมูลของพอร์ตอนุกรม
P3.1	TxD	ขาส่งข้อมูลของพอร์ตอนุกรม
P3.2	INT0\	ขาอินพุทสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอก
P3.3	INT 1\	ขาอินพุทสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอก
P3.4	T 0	สัญญาณพัลส์ภายนอกสำหรับ Timer 0
P3.5	T 1	สัญญาณพัลส์ภายนอกสำหรับ Timer 1
P3.6	WR\	สัญญาณเพื่อเขียนข้อมูลไปหน่วยความจำภายนอก
P3.7	RD\	สัญญาณเพื่ออ่านข้อมูลเพื่อหน่วยความจำภายนอก

ตาราง 3.4 ขาพอร์ตอินพุท / เอาท์พุท

3.2 การทำงานของโปรแกรม

เนื่องจากการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์จะสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ แล้วส่งข้อมูลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นการควบคุมแรงบิดของ DC Motor ดังนั้นโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมจะมี 2 ส่วนคือ

1. โปรแกรมที่เขียนลงในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้รับค่าแรงบิดและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แล้วคำนวณให้อยู่ในรูปกระแสอ้างอิง แล้วส่งข้อมูลของกระแสอ้างอิงไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์โดยผ่านทางพอร์ตอนุกรม ซึ่งโปรแกรมที่ใช้คือ วิซวลเบสิก 6

2. โปรแกรมที่เขียนป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ จะเป็นการกำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ในการรับ-ส่งค่ากระแสอ้างอิง โดยจะรับค่ากระแสอ้างอิงจากคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม (P3.0-RXD) และส่งค่ากระแสอ้างอิงไปให้กับวงจร PI Controller ผ่านทางพอร์ต 0 ซึ่งสามารถอธิบายส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

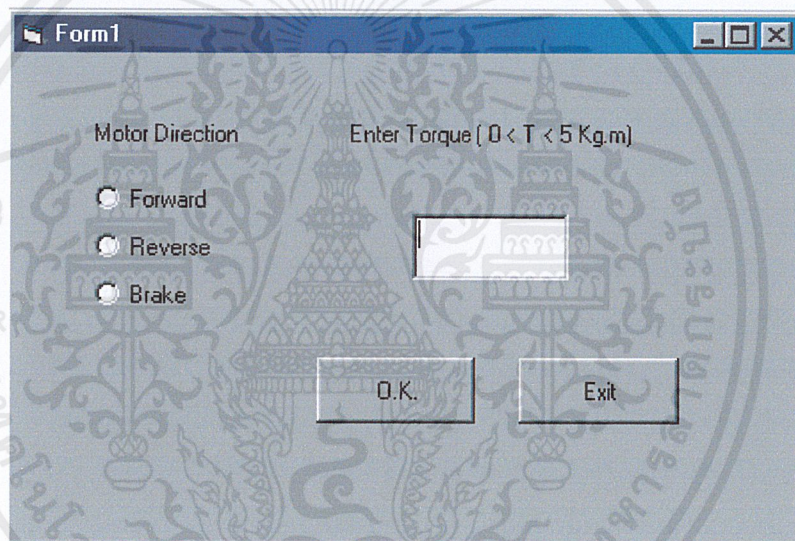
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ส่วนโปรแกรมสั่งงานในคอมพิวเตอร์

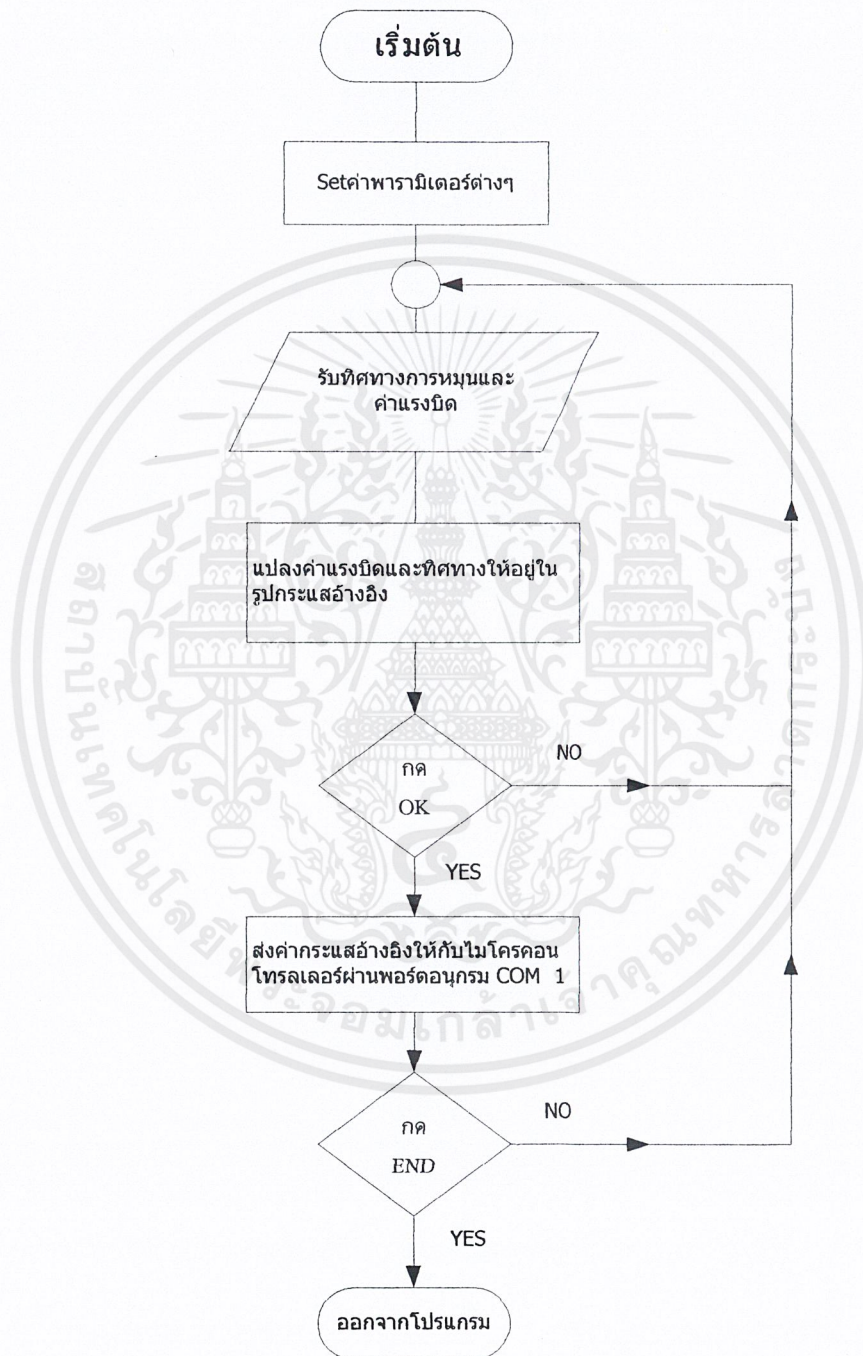
ในส่วนของการสั่งงานที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ จะใช้โปรแกรมวิชวลเบสิก 6 เป็นตัวสร้างโปรแกรมแล้วแปลงเป็นไฟล์ในสกุล .EXE ซึ่งแสดงอินเทอร์เฟสดังรูปที่ 3.7, โพล์ชาร์ต ได้ดังรูปที่ 3.8

การเซตค่าพารามิเตอร์ จะเป็นการกำหนดให้มีการส่งข้อมูลออกทางพอร์ตอนุกรม COM1 และมีอัตราการรับส่งข้อมูลหรือ Baud rate เท่ากับ 9600 บิตต่อวินาที ไม่มีพาริตีบิต จำนวนบิตข้อมูล 8 บิต และบิตปิดท้าย 1 บิต โดยค่าการเซตจะเขียนเป็น Op code ได้ดังนี้

MsComm.setting = "9600,n,8,1 "



รูปที่ 3.7 แสดงส่วนอินเทอร์เฟสกับผู้ใช้งาน



รูปที่ 3.8 โฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมการตั้งงานคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ส่วนโปรแกรมที่ป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์

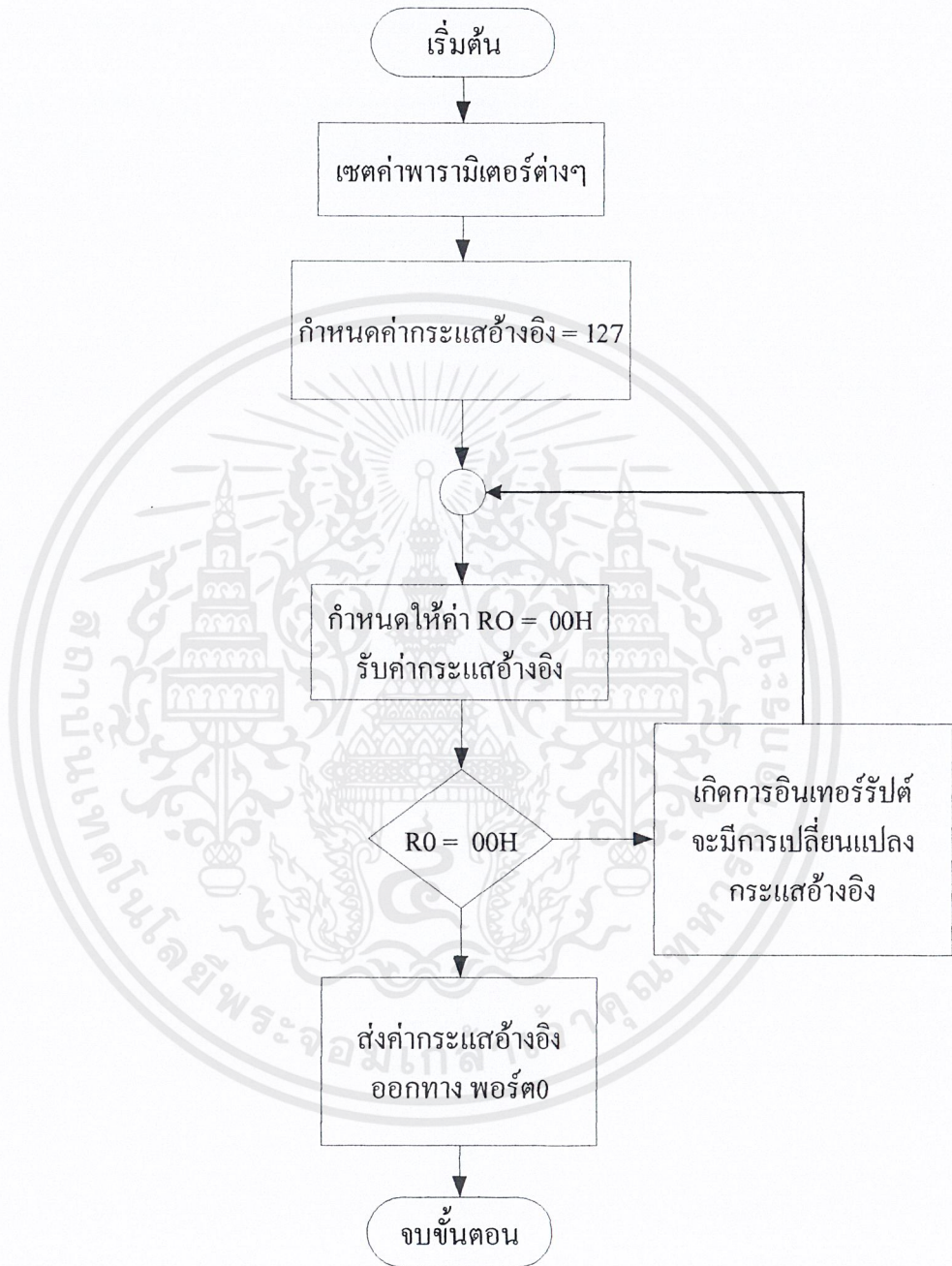
โปรแกรมที่ป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้โปรแกรมภาษาแอสเซมบลี (Assembly) โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือส่วนโปรแกรมหลัก และส่วนที่เป็นโปรแกรมบริการอินเทอร์พรีต

3.2.2.1 ส่วนโปรแกรมหลัก (Main Program)

ในส่วนของโปรแกรมนี้อาจเป็นส่วนเริ่มต้นของการทำงานอื่นๆ โดยจะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานตามที่เราร้องขอได้และทำการกำหนดค่ากระแสอ้างอิงเริ่มต้นไว้ที่ 127 (ซึ่งเมื่อผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกแล้วค่ากระแสอ้างอิงจะมีค่าเท่ากับ 0) หากเกิดการอินเทอร์พรีตก็จะมีเปลี่ยนค่ากระแสอ้างอิง ค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จะถูกส่งไปให้กับวงจร PI Controller ผ่านทางพอร์ต0 โดยสามารถเขียนเป็นโฟลวชาร์ต แสดงการทำงานได้ดังรูป3.9

การเซตค่าพารามิเตอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ประกอบด้วย

- ตั้งค่าให้ Timer ทำงานเป็นวงจรรนับ ในโหมด 8 บิต Auto-Reload (โหมด 2) เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดค่าอัตรา Baud rate ในการรับข้อมูลแบบอนุกรม โดยค่าคริสตอลที่ใช้คือ 11.0592 MHz และอัตรา Baud rate ที่ต้องการคือ 9600 บิต ต่อวินาที ซึ่งจะตรงกับค่า Baud rate ที่เซตในคอมพิวเตอร์ ดังนั้นค่าที่ตั้งให้กับ TH1 คือ -3 และเซต TR1 ให้ Timer 1 เริ่มทำงานได้
- ทำการกำหนดให้เกิดการอินเทอร์พรีตเมื่อมีการรับข้อมูลจากพอร์ตอนุกรม
- ทำการกำหนดค่าให้กับรีจิสเตอร์ที่ควบคุมการทำงานของพอร์ตอนุกรม โดยกำหนดให้ทำงานในแบบ UART ชนิด 8 บิต อัตราการส่งเปลี่ยนแปลงได้ (โหมด1) ซึ่งกำหนดไว้ที่ 9600 บิต ต่อวินาที



รูปที่3.9 แสดงโฟลวชาร์ตการทำงานของส่วนโปรแกรมหลัก

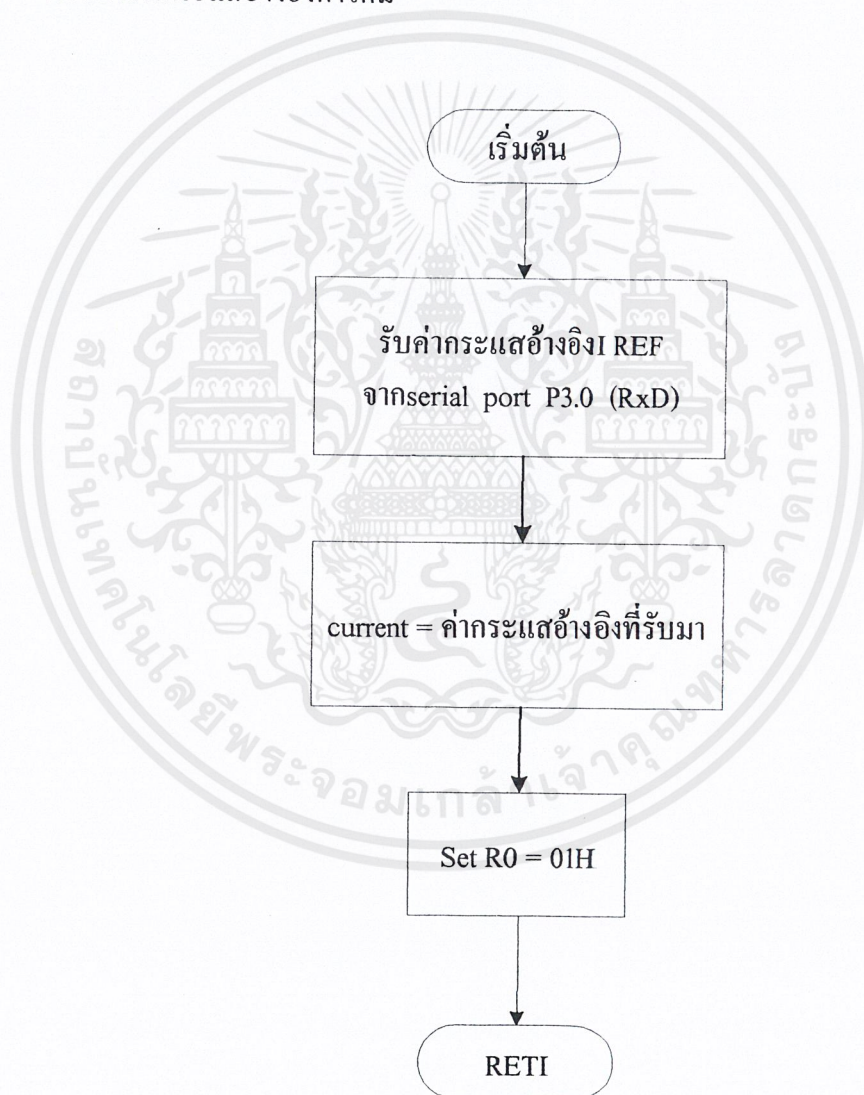
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 ส่วนโปรแกรมการบริการการอินเทอร์พต์ (Interrupt Service Routine)

ในส่วนโปรแกรมบริการอินเทอร์พต์นี้ ได้มีการอนุญาตให้มีการเกิดการอินเทอร์พต์ขึ้นจาก SERIAL PORT โดยมีรายละเอียดดังนี้

โปรแกรมการบริการการอินเทอร์พต์ส่วน Serial Port

อินเทอร์พต์ในส่วนนี้จะเป็นอินเทอร์พต์ที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ผ่านวงจรแปลงระดับสัญญาณ (RS-232 Receiver) เข้าสู่พอร์ตอนุกรมทางพอร์ต P 3.0 (RXD) ข้อมูลที่ได้จะถูกกำหนดเป็นค่ากระแสแอมป์ค่าใหม่

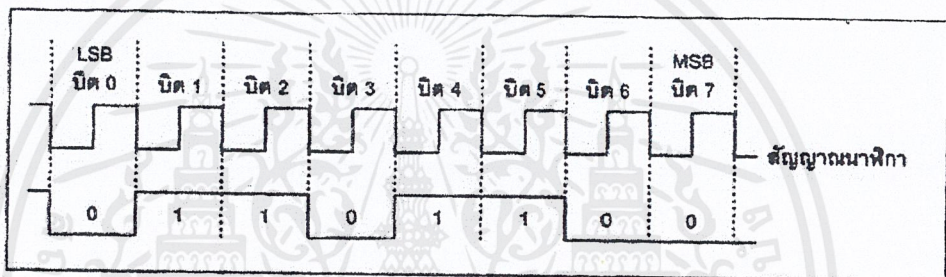


รูปที่ 3.10 Flowchart โปรแกรมบริการอินเทอร์พต์ในส่วนของ Serial Port

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสื่อสารแบบอนุกรม

การสื่อสารแบบอนุกรมนั้นจะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือการสื่อสารอนุกรมแบบซิงโครนัส และการสื่อสารอนุกรมแบบอะซิงโครนัส การสื่อสารแบบซิงโครนัสจะมีสัญญาณนาฬิกา ร่วมอยู่กับการรับและส่งสัญญาณด้วย ตัวอย่างการส่งข้อมูลแบบซิงโครนัสก็คือคีย์บอร์ดของคอมพิวเตอร์ ซึ่งเส้นหนึ่งจะเป็นสายของสัญญาณนาฬิกา ส่วนสายอีกเส้นจะเป็นสายของข้อมูล ดังนั้นการติดต่อกันแบบซิงโครนัสนี้จะต้องใช้สายในการเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุด 3 เส้นคือ สัญญาณนาฬิกา, ข้อมูล และกราวด์ ดังรูปที่ 3.12 แสดงให้เห็นถึงไทมิงไคอะแกรมของการส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส



รูปที่ 3.11 รูปแบบอย่างง่ายที่สุดของข้อมูลอนุกรม

3.3.1 การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

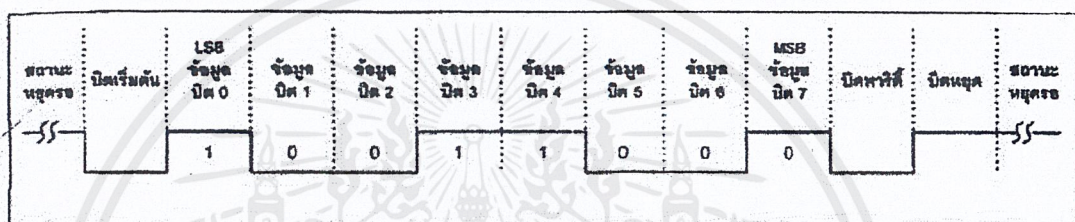
การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัสคือการรับและส่งข้อมูลไปในสายโดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกา ร่วมด้วยเหมือนกับการส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส แต่จะใช้การกำหนดค่าสัญญาณนาฬิกาทั้งภาครับและภาคส่งให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งเรียกสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการกำหนดค่าให้ภาครับและภาคส่งนี้ว่า อัตราการถ่ายทอดข้อมูล หรือ บอดเรต (baudrate) มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที (*bit per second : bps*)

รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งแบบอะซิงโครนัสประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกันคือ

1. บิตเริ่มต้น (Start Bit) ซึ่งจะมีขนาด 1 บิต
2. บิตข้อมูลแบบอนุกรมจะมีขนาด 5,6,7 หรือ 8 บิต
3. บิตตรวจสอบพาริตี (Parity Bit) จะมีขนาด 1 บิต หรือไม่มี
4. บิตปิดท้าย (Stop Bit) จะมีขนาด 1,1.5 หรือ 2 บิต

รูปที่ 3.12 แสดงรูปแบบของข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส ซึ่งเมื่อไม่มีข้อมูลที่จะส่ง ขา DATA จะมีสถานะลอจิก "1" ซึ่งจะเรียกสถานะนี้ว่าสถานะหยุดรอ (waiting stage) การเริ่มต้นส่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลจะเริ่มจากการให้ขา DATA มีลอจิก “0” ด้วยช่วงเวลา 1 บิต ซึ่งจะเรียกบิตนี้ว่าบิตเริ่มต้นจากนั้นบิตข้อมูลจะถูกส่งออกไป โดยเริ่มจากบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด(LSB)ก่อน ซึ่งข้อมูลในไบต์ที่จะส่งอาจจะมีจำนวนบิต 5,6,7 หรือ 8 บิตก็ได้ จากนั้นจะตามด้วยบิตพาริตี ซึ่งใช้เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งข้อมูล บิตสุดท้ายที่จะส่งคือบิตปิดท้าย ซึ่งจะให้ขาขาตัวมีสถานะลอจิก “1” อีกครั้งด้วยระยะเวลาอย่างน้อย 1 บิต,1.5 บิต หรือ 2 บิต เพื่อเป็นการแสดงว่าสิ้นสุดข้อมูลแล้ว



รูปที่ 3.12 รูปแบบอย่างง่ายที่สุดของข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส

อุปกรณ์พิเศษที่ได้รับการออกแบบมาสำหรับการรับและส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสเรียกว่า **Universal Asynchronous Receiver /Transmitter** หรือ **UART** อัตราความเร็วในการรับและส่งข้อมูลของการรับส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสคือ ค่าบอดเรต ซึ่งก็คือค่าจำนวนบิตต่อวินาทีที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูล บอดเรตมาตรฐานที่ใช้สำหรับพอร์ตอนุกรม RS-232 ได้แก่ 110, 150, 300, 600, 1200,2400, 4800, 9600, และ 19200 บิตต่อวินาที และมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามเทคโนโลยีของคอมพิวเตอร์

การตรวจสอบพาริตีสามารถกำหนดให้เป็นแบบคี่ (odd), แบบคู่ (even) หรือไม่มีการตรวจสอบพาริตีก็ได้ การตรวจสอบพาริตีเป็นการตรวจสอบจำนวนรวมของบิตที่เป็นลอจิก “1” ภายในข้อมูลที่ส่งไป 1 ไบต์ว่ามีจำนวนรวมเป็นเลขคู่หรือเลขคี่โดยต้องรวมบิตพาริตีเข้าไปด้วย โดยในโครงการนี้จะกำหนดค่าบอดเรตไว้ที่ 9600 บิตต่อวินาที ไม่มีพาริตีบิตและบิตปิดท้ายมีขนาด 1 บิต

3.3.2 มาตรฐานพอร์ตอนุกรมแบบ RS-232

มาตรฐาน RS-232 ได้กำหนดรูปแบบของอุปกรณ์เชื่อมต่อข้อมูล (Data Terminal Equipment :DTE) กับวงจรข้อมูลปลายทาง (Data Circuit Terminating : DCE) ไว้ว่า อุปกรณ์ DTE จะต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีการประมวลผลในตัวเช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือไมโคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

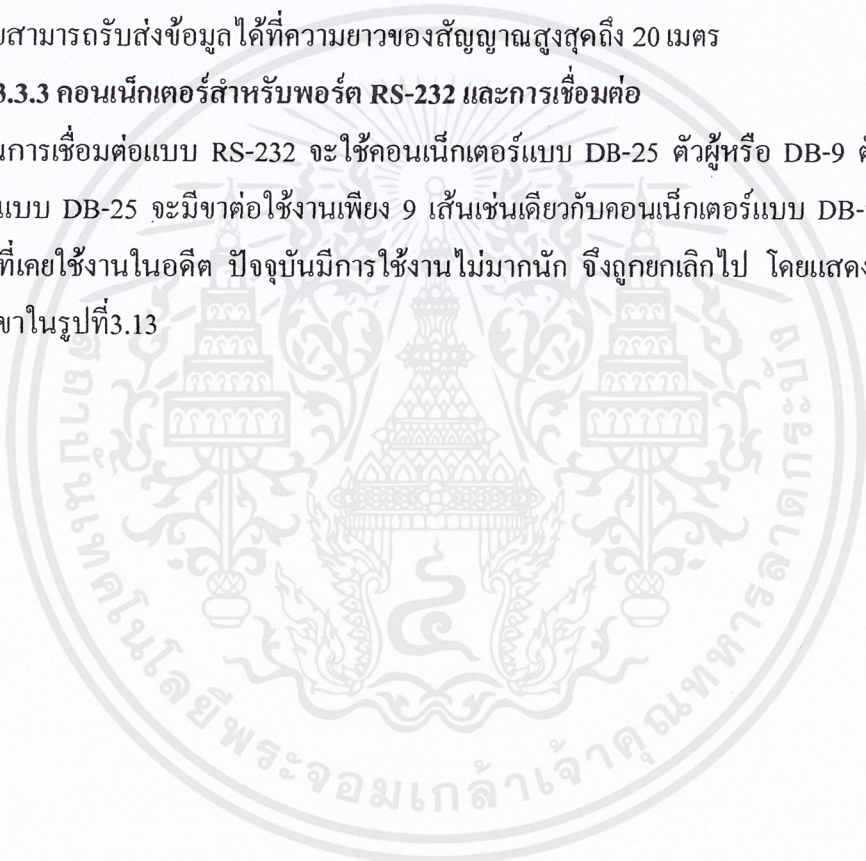
คอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความสามารถในการสร้างบิตข้อมูลแบบอนุกรมได้ ส่วนอุปกรณ์ DCE จะทำหน้าที่เพียงเป็นตัวรับข้อมูลที่ส่งมาจาก DTE เท่านั้น โดยการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองจะกระทำผ่านมาตรฐาน RS-232

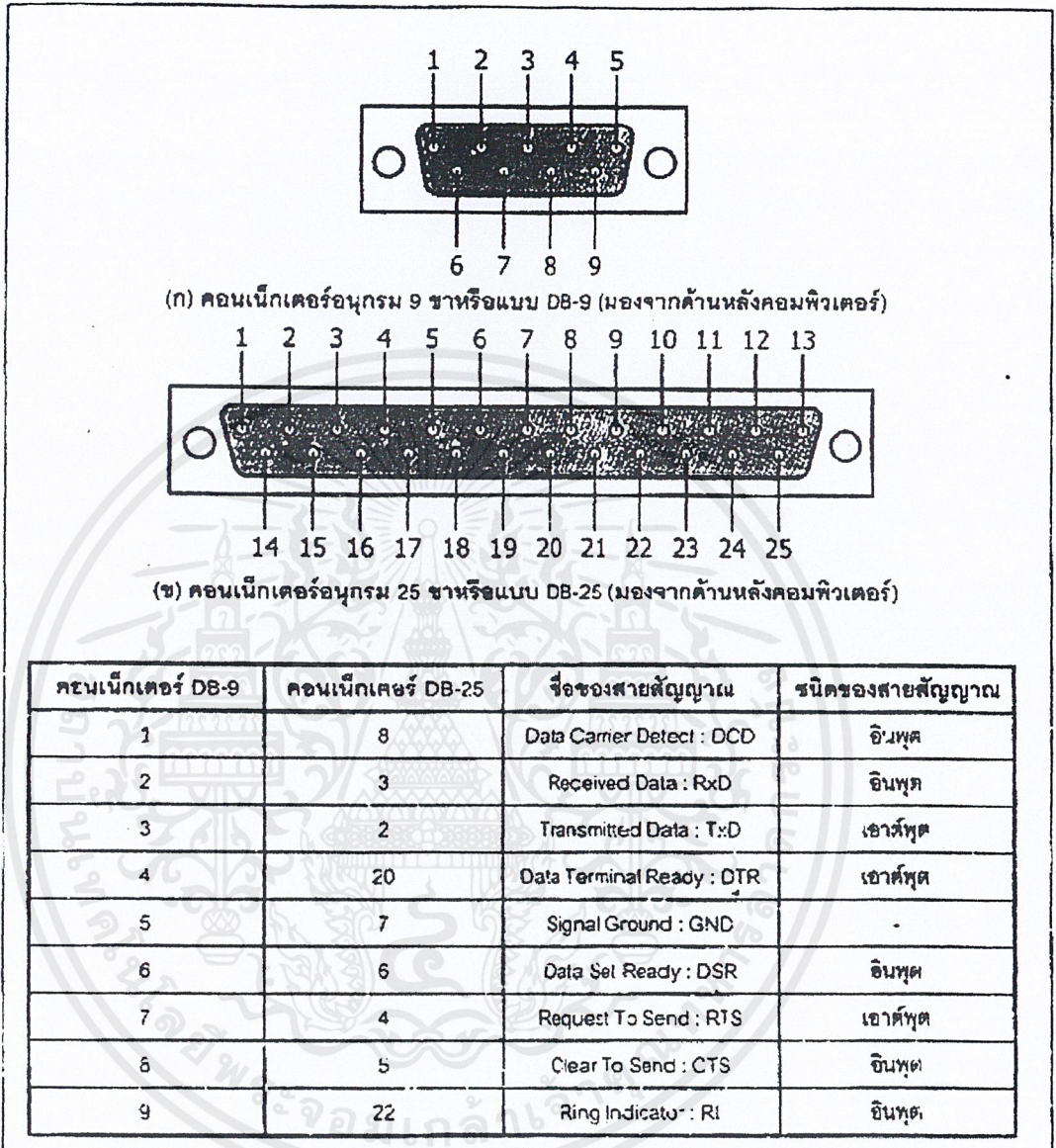
ข้อแตกต่างระหว่างอุปกรณ์ DTE และอุปกรณ์ DCE อย่างหนึ่งที่ได้ชี้ชัดคือ คอนเน็กเตอร์ของ DTE จะเป็นตัวผู้ ส่วนคอนเน็กเตอร์ของ DCE จะเป็นตัวเมีย ซึ่งพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นแบบ DTE ส่วนคอนเน็กเตอร์ที่อยู่ที่ไม่เต็มจะเป็นแบบ DCE

สำหรับการใช้งานบนคอมพิวเตอร์ พอร์ตอนุกรม RS-232 มักใช้เชื่อมต่อกับโมเด็มหรือเมาส์ โดยสามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยความยาวของสัญญาณสูงสุดถึง 20 เมตร

3.3.3 คอนเน็กเตอร์สำหรับพอร์ต RS-232 และการเชื่อมต่อ

มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ RS-232 จะใช้คอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 ตัวผู้หรือ DB-9 ตัวผู้ซึ่งคอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 จะมีขาต่อใช้งานเพียง 9 เส้นเช่นเดียวกับคอนเน็กเตอร์แบบ DB-9 เนื่องจากขาอื่นๆ ที่เคยใช้งานในอดีต ปัจจุบันมีการใช้งานไม่มากนัก จึงถูกยกเลิกไป โดยแสดงรูปร่างและตำแหน่งขาในรูปที่ 3.13

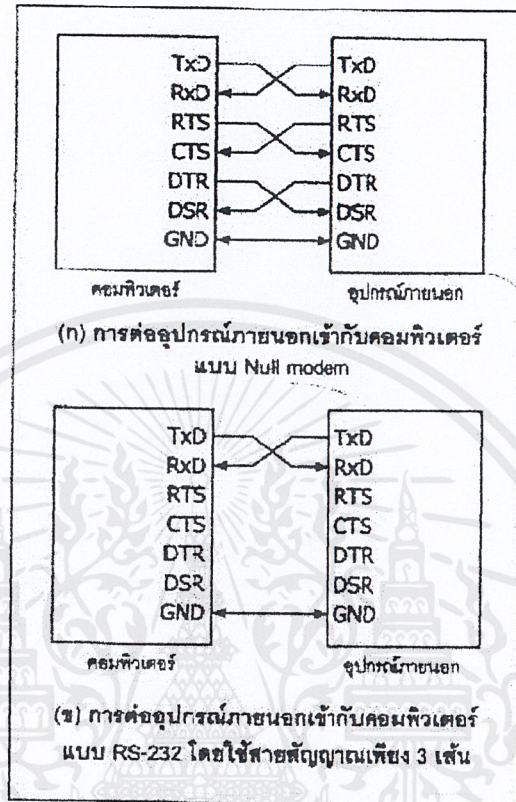




รูปที่ 3.13 การจัดขาของคอนเนคเตอร์พอร์ตอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232 ทั้งแบบ DB-9 และ

DB - 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การต่ออุปกรณ์ภายนอกกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ในลักษณะต่างๆ

สำหรับการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกแสดงดังในรูปที่ 3.15 ลูกศรในรูปแสดงถึงทิศทางของข้อมูล ในรูปที่ 3.14 (ก) เป็นการเชื่อมต่อแบบนูลโมเด็ม (Null modem) หรือการเชื่อมต่อโดยตรงโดยไม่ต้องผ่านโมเด็ม โดยมีการตรวจสอบหรือแฮนด์เช็กเต็มรูปแบบ ส่วนในรูปที่ 3.14 (ข) เป็นการเชื่อมต่อแบบ นูลโมเด็มในลักษณะที่ใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้น โดยเส้นหนึ่งสำหรับส่งข้อมูล อีกเส้นสำหรับรับข้อมูล และเส้นสุดท้ายเป็นกราวด์ สำหรับรายละเอียดหน้าที่การทำงานในแต่ละขาของพอร์ตอนุกรม RS-232 มีดังนี้

- Data Carrier Detect : DCD หรืออาจเรียกว่า Carrier Detect :CD ขานี้จะแอกตีฟเมื่อมีการส่งสัญญาณพาห้จากอุปกรณ์สื่อสารข้อมูล เช่น โมเด็ม สำหรับการใช้งานปกติ ขานี้จะไม่ได้ถูกใช้งานมากนัก
- Receive Data :RD หรือ RxD ขานี้ใช้เพื่อรับสัญญาณอนุกรมเข้ายังคอมพิวเตอร์โดยนำข้อมูลที่อ่านได้เก็บไว้ในรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Transmitted Data : TD หรือ TxD ขานี้ใช้เพื่อส่งข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์ โดยนำข้อมูลที่เกิดขึ้นในบัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูลส่งออกไป
- Data Terminal Ready:DTR เป็นขาสัญญาณที่ส่งออกจากคอมพิวเตอร์เพื่อให้อุปกรณ์ปลายทางรับรู้ว่าการติดต่อด้วย โดยขา DTR นี้จะเชื่อมต่อกับขา DSR ของอุปกรณ์ปลายทางและ ขาDTR ของอุปกรณ์ปลายทางจะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของคอมพิวเตอร์ ถ้าใช้การเชื่อมต่อเป็นแบบนูล โมเด็มซึ่งใช้สายในการเชื่อมต่อเพียง 3 สาย จะต้องต่อขา DTR และ DSR ของตัวมันเองเข้าด้วยกันและต้องต่อกับขา DCD ด้วยในกรณีที่โปรแกรมสื่อสารที่ใช้มีการตรวจจับสัญญาณพาห์
- Signal Ground :GND ขากราวด์ของระบบ
- Data set Ready :DSR ขานี้จะใช้คู่กับขา DTR เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อกันระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ปลายทาง ซึ่งขา DSR นี้จะเป็นขาสำหรับรับข้อมูลจากภายนอกซึ่งถูกส่งมาจากขา DTR
- Request To Send : RTS เป็นขาสำหรับส่งสัญญาณร้องขอให้ทางอุปกรณ์ปลายทางส่งข้อมูลกลับมายังคอมพิวเตอร์ โดยขาที่รับสัญญาณ RTS ก็คือขา CTS ในกรณีที่ใช้การเชื่อมต่อแบบ Null modem 3 สาย จะต้องเชื่อมต่อกับขา RTS และ CTS ของตัวมันเองเข้าด้วยกันเพื่อให้การรับและส่งข้อมูลสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา
- Clear To Send : CTS ขานี้จะคอยรับสัญญาณจากขา RTS เมื่อรับสัญญาณได้ ข้อมูลที่ขา TxD จะถูกส่งออกไป ดังนั้นขานี้จึงถูกใช้เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ต่อพ่วงว่าพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือไม่
- Ring Indicator : RI ใช้แสดงสถานะสัญญาณเรียกจากสายโทรศัพท์ ปกติในการสื่อสารโดยทั่วไปสายนี้จะไม่ถูกใช้งาน จะใช้งานก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมต่อกับ โมเด็มและโปรแกรมมีการตรวจสอบสัญญาณนี้เท่านั้น

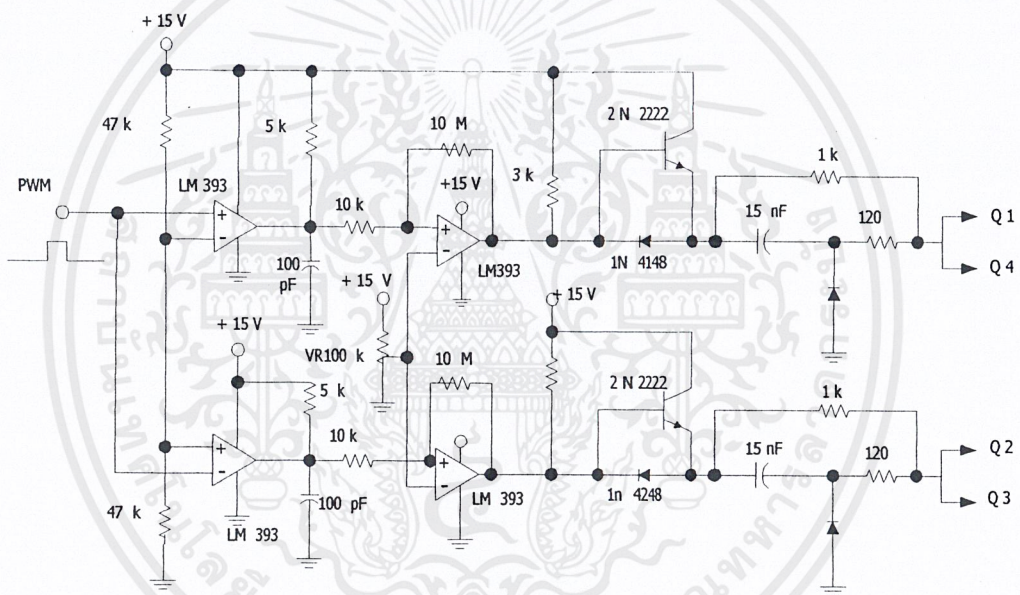
โดยในโครงการนี้เราจะต่อเชื่อมแบบใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้น วิธีในการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมผ่านพอร์ตอนุกรม RS-232 จะมีได้หลายวิธี แต่วิธีที่เราเลือกใช้คือการเขียนข้อมูลไปยังแอดเดรสของพอร์ตโดยตรง เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากที่สุด ซึ่งพอร์ตอนุกรมที่เราใช้คือพอร์ตอนุกรม COM1 (แอดเดรส 3F8H) โดยใช้คำสั่งภาษาวิซวลเบสิก 6

บทที่ 4

วงจรที่ใช้ในโครงการ

4.1 วงจรเดดไทม์ (Dead Time Circuit)

เนื่องจากในวงจร พูลบริดจ์ คีซี - คีซี คอนเวอร์เตอร์ สวิตช์ในกิ่งเดียวกันจะไม่สามารถเปิด-ปิดได้ในทันที เพราะอุปกรณีสวิตช์ในแต่ละชนิดจึงมีช่วงเวลาหยุดนำกระแส (Turn off time) อยู่ จึงต้องการทำให้สัญญาณทริกของสวิตช์ในกิ่งเดียวกันมีการขาดช่วงเล็กน้อยเพื่อป้องกันการลัดวงจรซึ่งวงจรเดดไทม์ก็คือ วงจรที่ใช้ในการหน่วงสัญญาณทริกของสวิตช์นั่นเอง



รูปที่4.1 วงจรเดดไทม์

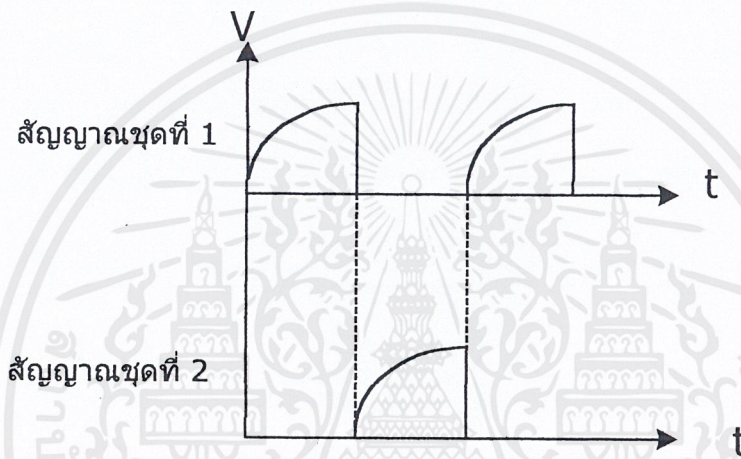
การทำงานของวงจร

พิจารณาวงจรในรูป 4.1 วงจรจะรับสัญญาณพีคดับลิวเอ็มจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านเข้ามายัง LM 393 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparater) ที่ตัวซ้ายบน และตัวล่าง ทำให้สัญญาณแยกเป็นสองชุดที่ต่างเฟสกัน

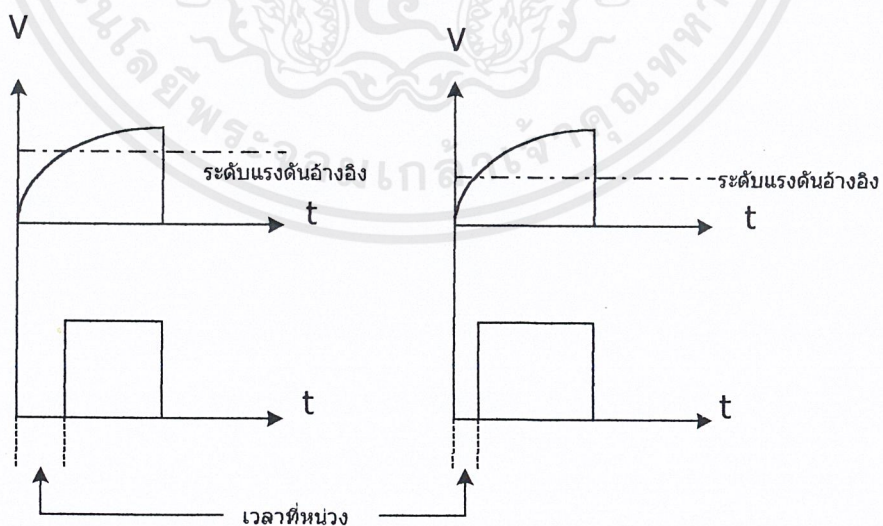
จากนั้นสัญญาณผ่านตัวเก็บประจุ 100 pF ทำให้เกิดการหน่วงสัญญาณดังรูป 4.2

เมื่อผ่าน LM393 ตัวขวามือ และขวาล่าง จะเป็นช่วงการปรับสัญญาณเคตไทม์ โดยการปรับที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ (Adjustable Resistor) ยิ่งค่าความต้านทานมากเท่าไร แรงดันอ้างอิงยิ่งมาก ทำให้เวลาที่วงจรหน่วงมากขึ้นดังรูป 4.3

หลังจากนั้นสัญญาณผ่านทรานซิสเตอร์ 2N 2222 เพื่อขยายกระแสให้เพียงพอต่อการขับสัญญาณ สัญญาณขาออกแต่ละชุดจะนำไปใช้เป็นสัญญาณทริกของสวิทช์ 2 ตัวในช่วงการทำงานเดียวกัน



รูปที่ 4.2 สัญญาณเมื่อผ่านตัวเก็บประจุ

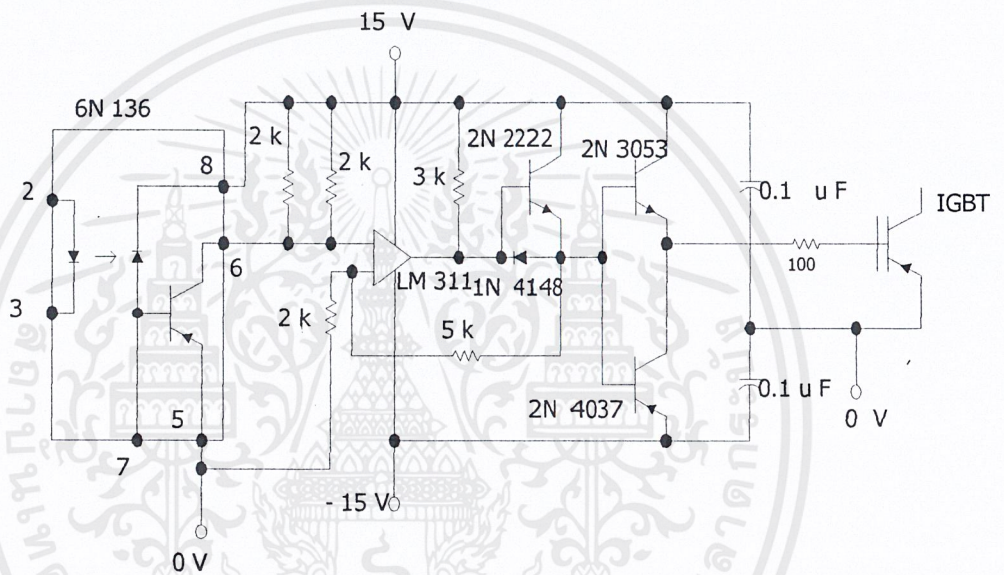


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการปรับค่าความต้านทานกับช่วงเวลาหน่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

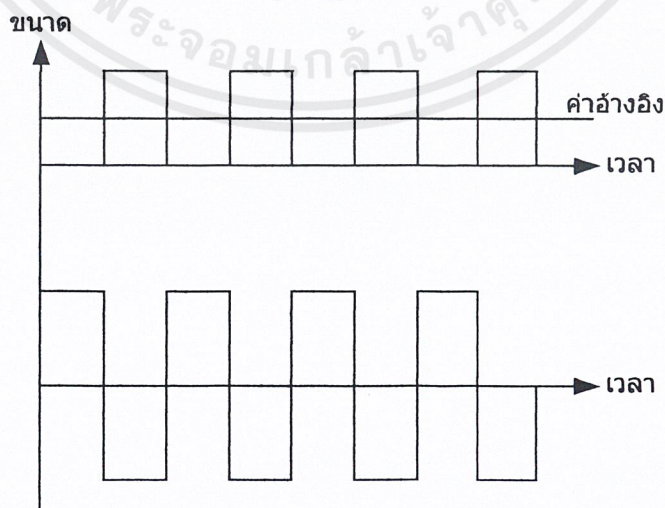
4.2 วงจรขับเกต (Gate Drive Circuit)

เป็นวงจรเพิ่มแรงดันจากสัญญาณอินพุต เพื่อให้แรงดันคงที่และเพียงพอกับสัญญาณขับของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งแต่ละชนิด โดยวงจรนี้จะแยกกราวด์ของวงจรที่จะไปขับสวิตช์แต่ละตัวออกจากกันเพื่อป้องกันการเสียหายอันเกิดจากการลัดวงจร เพราะถ้าระดับแรงดันอ้างอิงของสัญญาณขับสวิตช์ที่อยู่ใกล้เคียงกันเป็นค่าเดียวกัน จะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้ รวมทั้งต้องแยกกราวด์ของวงจรควบคุมและวงจรกำลังเพื่อป้องกันการรบกวนกันของทั้งสองวงจร



รูปที่ 4.4 วงจรขับเกต

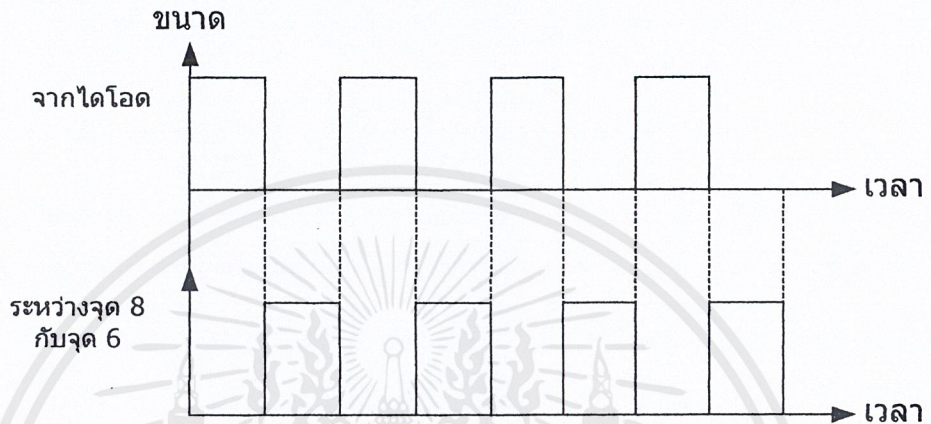
การทำงานของวงจร



รูป 4.5 สัญญาณที่ออกจากออปโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

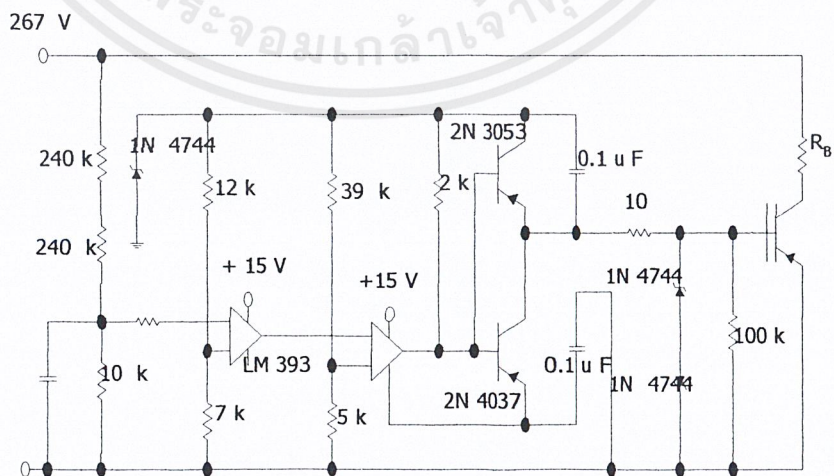
ภายในอปโตไดโอดจากรูปไดโอดส่งสัญญาณแสงมา เมื่อจับสัญญาณที่ระหว่างจุด 8 กับจุด 6 กลับเฟสกับสัญญาณที่ส่งมาจากไดโอด จากนั้นสัญญาณจะผ่านตัวคอมแพเรเตอร์ (LM311) ทำให้เกิดเป็นพัลส์บวกและลบ



รูป4.6 สัญญาณที่ออกมาจาก LM311

พัลส์บวกผ่านเข้าทรานซิสเตอร์ 2N2222 ซึ่งต่อคาร์ถึงต้นกับ 2N3053 เพื่อขยายกระแส IGBT ทำงาน โดยแรงดันแต่กระแสต้องพอที่จะทำงาน พัลส์ลบทำให้ 2N4037 ทำงานและทำให้ IGBT หยุดทำงาน ได้เร็วไม่เกิดการสูญเสียสวิทชิง

4.3 วงจรไดนามิกเบรค



รูปที่ 4.7 วงจรไดนามิกเบรค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรไดนามิกเบรก

LM393 ถ้าแรงดันอินพุตมากกว่าค่าที่แรงดันอ้างอิง เอาท์พุต เท่ากับ 0 โวลต์

ถ้าแรงดันอินพุตน้อยกว่าค่าที่แรงดันอ้างอิงเอาท์พุต เท่ากับ +15 โวลต์

LM311 ถ้าแรงดันอินพุตมากกว่าค่าที่แรงดันอ้างอิง เอาท์พุต = -15 โวลต์ มอสเฟตไม่ทำงาน

ถ้าแรงดันอินพุตน้อยกว่าค่าที่แรงดันอ้างอิงเอาท์พุต = +15 โวลต์ มอสเฟต ทำงาน

ค่าแรงดันที่ตั้งไว้ให้วงจรไดนามิกเบรกทำงานเท่ากับ 267 โวลต์ ซึ่งจะมีแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน 10 K ประมาณ 5.45 โวลต์ โดยได้ตั้งแรงดันอ้างอิงของ LM393 เท่ากับ 5 โวลต์

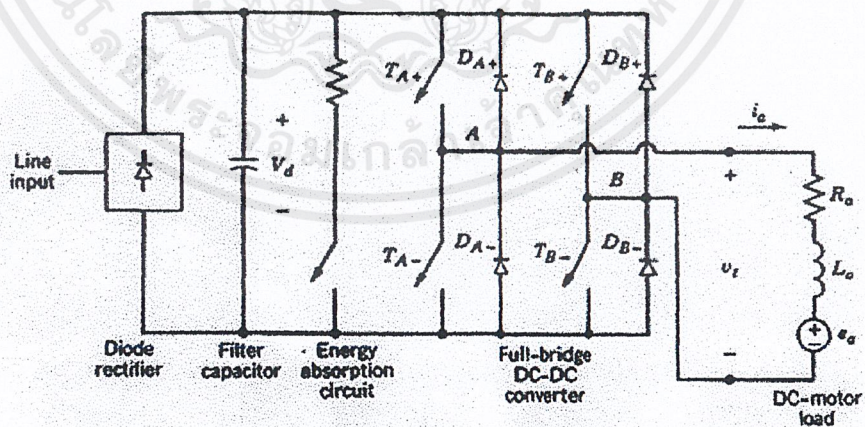
และถ้ามากกว่าแรงดันอ้างอิงของ LM393 ทำให้เอาท์พุตของ LM393 จะออกเป็น 0 โวลต์ และผ่านเข้าขา 3 ของ LM311 ออกมาเป็น +15 โวลต์ เพื่อไปทริกที่ขาเกตของมอสเฟต

แต่ถ้าแรงดันที่คร่อมความต้านทาน 10 K น้อยกว่าแรงดันอ้างอิงของ LM393 เอาท์พุตจะออกเป็น +15 โวลต์ และผ่าน LM311 ออกมาเป็น -15 โวลต์ ทำให้มอสเฟต ไม่ทำงาน

ทรานซิสเตอร์จะช่วยจ่ายกระแสเพราะออปแอมป์จ่ายกระแสได้น้อยส่งผลให้สัญญาณทริกจากออปแอมป์ไม่เพียงพอที่จะไปขับที่ขาเกตของมอสเฟตให้ทำงานได้ ซึ่งมอสเฟตจะทำงานก็ต่อเมื่อแรงดันที่ตกคร่อมขาเกตเป็นบวก

4.4 วงจรฟูลบริดจ์ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์

(Full – bridge DC – DC Converter)



รูปที่ 4.8 แสดงวงจรที่ใช้ฟูลบริดจ์ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของฟูลบริดจ์ ดีซี – ดีซี คอนเวอร์เตอร์

เริ่มจากสวิตช์ T_{A+} , T_{B-} ทำงานกระแสอาร์เมเจอร์และแรงดันย้อนกลับจะมีทิศทางดังรูปซึ่งกำหนดให้เป็นทิศทางบวก มอเตอร์จะหมุนฟอร์เวิร์ด

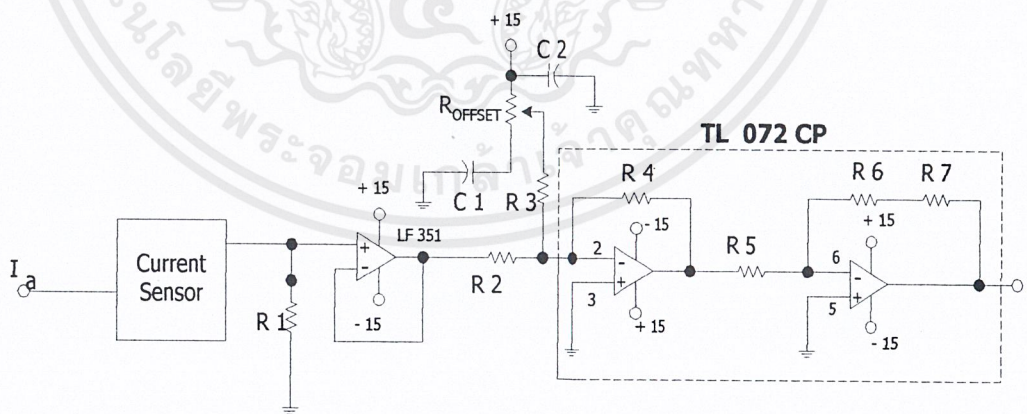
ต่อมาสวิตช์ T_{B+} , T_{A-} จะทำงานแต่ค่าความเหนี่ยวนำในมอเตอร์ทำให้กระแสยังคงทิศทางเดิมและไดโอดที่อยู่คร่อมสวิตช์ D_{B+} , D_{A-} ฟอร์เวิร์ดไบอัส ทำให้มีกระแสไหล แต่แรงดันย้อนกลับจะกลับขั้วทำให้เกิดการเบรคของ ฟอร์เวิร์ดจากค่าแรงดันที่กลับขั้ว

เมื่อกระแสที่จ่ายมาจากค่าความเหนี่ยวนำหมดแล้วสวิตช์ T_{B+} , T_{A-} จะทำงานทำให้กระแสและแรงดันกลับทิศในสภาวะนี้มอเตอร์จะมีการทำงานแบบรีเวอร์ส

เมื่อสวิตช์ T_{A+} , T_{B-} จะทำงาน ไดโอดที่อยู่คร่อมสวิตช์ D_{A+} , D_{B-} จะฟอร์เวิร์ดไบอัส คงทิศกระแสแต่แรงดันจะกลับขั้วทำให้เกิดการเบรคของรีเวอร์ส

4.5 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน

เมื่อต้องการควบคุมแรงบิดไม่ให้เปลี่ยนแปลงไปมา จึงต้องมีการ 피ดแบ็คแรงบิดในรูปของกระแสเพราะแรงบิดแปรผันตรงกับกระแส โดยการใช้ตัวจับกระแส ต่อกับมอเตอร์ แล้วมีการแปลงกระแสให้อยู่ในรูปแรงดันก่อน เพราะต้องเปลี่ยนข้อมูลให้อยู่ในรูปดิจิตอลก่อนนำไปใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.9 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน

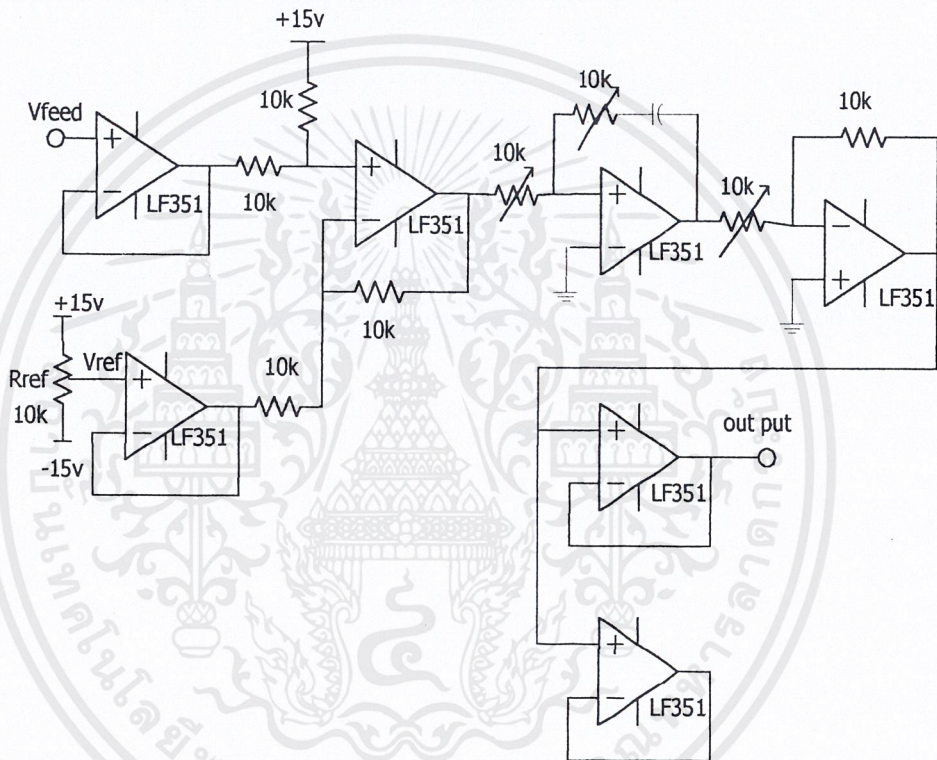
การทำงานของวงจร

สัญญาณกระแสจากตัวจับกระแสมาเข้า LF 351 ซึ่งใช้เป็นตัวแยกความต้านทานทั้งสองด้านไม่ให้ส่งผลถึงกัน ส่วนออปแอมป์ตัวที่ 2 ซึ่งอยู่ใน TL 072 CP ก็จะใช้เพื่อปรับค่าออฟเซต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Offset) โดยปรับที่ความต้านทานปรับค่าได้ ส่วนออปแอมป์ตัวที่ 3 ซึ่งอยู่ใน TL072CP ใช้เพื่อขยายเกน (Gain) ของสัญญาณ โดยการปรับเกนที่ความต้านทานปรับค่าได้เช่นเดียวกับตัวแรก สำหรับตัวเก็บประจุค่าน้อยๆที่ใช้ต่อกับแหล่งจ่ายเพื่อป้องกัน Noise จากแหล่งจ่าย

4.6 วงจรควบคุมแบบพีไอ (Proportional Plus Integral Control)



รูปที่ 4.10 แสดงวงจรควบคุมแบบพีไอ (PI control)

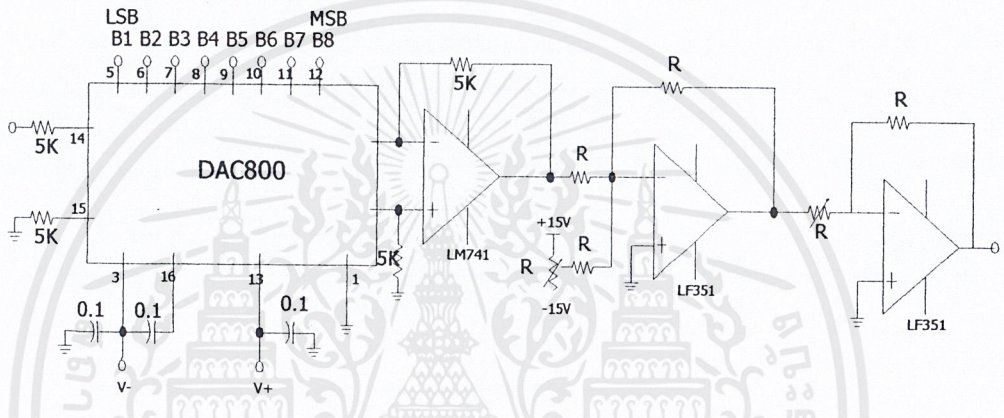
การทำงานของวงจร

เมื่อทำการปรับค่า K_p และ K_i ของวงจรควบคุมแบบพีไอ (PI control) ได้แล้ว การทำงานของวงจรควบคุมแบบพีไอ (PI control) คือถ้าทำการปรับค่ากระแสอ้างอิง (V_{ref}) ที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ (R_{ref}) ไว้ค่าหนึ่ง เมื่อทำการขั้มมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่งค่ากระแสจริง (I_{actual}) กลับมาในรูปของแรงดัน โดยใช้ Current Sensor เรียกค่านี้อันว่า V_{feed} ที่วงจรควบคุมแบบพีไอ (PI control) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ V_{ref} ที่ตั้งไว้ หากมีค่าไม่เท่ากัน วงจรควบคุมแบบพีไอ (PI control) ก็จะทำการสร้างสัญญาณไปตัดสัญญาณรูปฟันเลื่อย (Saw tooth) เพื่อเปลี่ยนค่าคิวตี้ไซเคิล (duty cycle) ที่จะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ได้ค่า V_{feed} เท่ากันกับ V_{ref} โดยจะมีการส่งค่า V_{feed} มาเปรียบเทียบกับ V_{ref} อยู่ตลอดเวลาเพื่อจะทำ
ให้ค่า I_{actual} มีค่าคงที่ ซึ่งก็หมายถึงค่าแรงบิดก็จะมีค่าคงที่ด้วย

4.7 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (D/A Converter)



รูปที่ 4.12 แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก

การทำงานของวงจร

ส่วนแรกมีการทำงานโดยเมื่อเราป้อนสัญญาณไฟตรงเข้าที่บิตใดบิตนั้นจะเป็นหนึ่งที่ไม่
ป้อนให้วงจรจะป้อนศูนย์เข้ามาแปลงเป็นเลขฐานสิบ แล้วนำไปเข้าสู่วงจรตรวจสอบว่าวงจรที่
เราต่อถูกต้องหรือไม่ ข้อมูลเพิ่มเติมดูได้จากคำอธิบาย

$$E_0 = V_{\text{REF}} \left(\frac{-255}{256} - \frac{2X}{256} \right)$$

X คือเลขฐานสิบ

E_0 คือแรงดันที่วัดที่เอาต์พุตของ LM741

ส่วนที่สองจะนำสัญญาณที่ได้จากส่วนแรกไปเข้าอีกรวมจรที่ต่อเพื่อให้สามารถปรับค่า V_{ref} ได้ในย่านที่กว้างขึ้นจากค่าสูงสุดค่านลบถึงค่านบวก โดยปรับที่ความต้านทานปรับค่าได้ตัวแรก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 การทดลอง Lock Roter Test

วัตถุประสงค์ เพื่อค่าความต้านทานภายในและหาค่าคงที่เวลาของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำไปใช้ในการซิมูลิงค์(simulink)ในโปรแกรม PSPICE

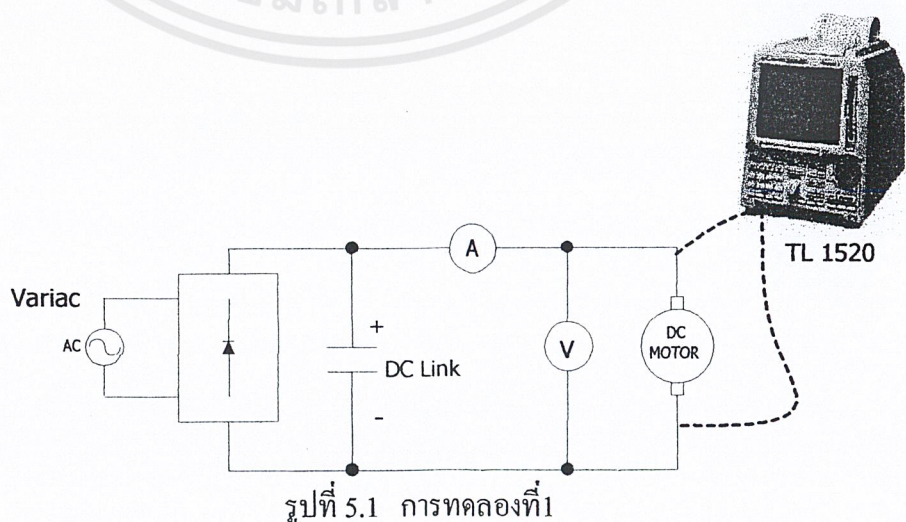
สมมุติฐาน ค่าความต้านทานที่หาได้มีค่าตรงกับความเป็นจริง
อุปกรณ์ที่ใช้

- DC Motor แบบ Separately Excited

พิกัดแรงดัน		V
พิกัดกำลังไฟฟ้า	1.5	kW
พิกัดกระแส	15	A
ความเร็วรอบ	1800	RPM

- วงจรเรียงกระแส
- DC Link 1 ชุด
- VOM 1 ตัว
- Variac 2 ตัว
- Digital Oscilloscope 1 ชุด

วงจรในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อดวงจรมอเตอร์บล็อกไดอะแกรม
2. จ่ายแรงดันให้ขดลวดฟิวส์ที่ค่าหนึ่งซึ่งไม่ควรมากเกินไปประมาณ แรงดันไฟตรง 10 โวลต์
3. จ่ายแรงดันให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ให้มีค่าต่างๆ ที่ทำให้มอเตอร์หมุนช้าๆ (แต่ลือคโรเตอร์ไว้)
4. ทุกค่าของแรงดันที่เพิ่มขึ้นสำหรับอาร์เมเจอร์ทำการบันทึกค่ากระแสอาร์เมเจอร์และแรงดันย้อนกลับ
5. นำผลการทดลองมาพอดกราฟหาค่า ความต้านทานในขดลวดอาร์เมเจอร์จากสไลด์ช่วงที่เป็นเชิงเส้นที่สุด โดยจะเป็นค่าโดยประมาณ

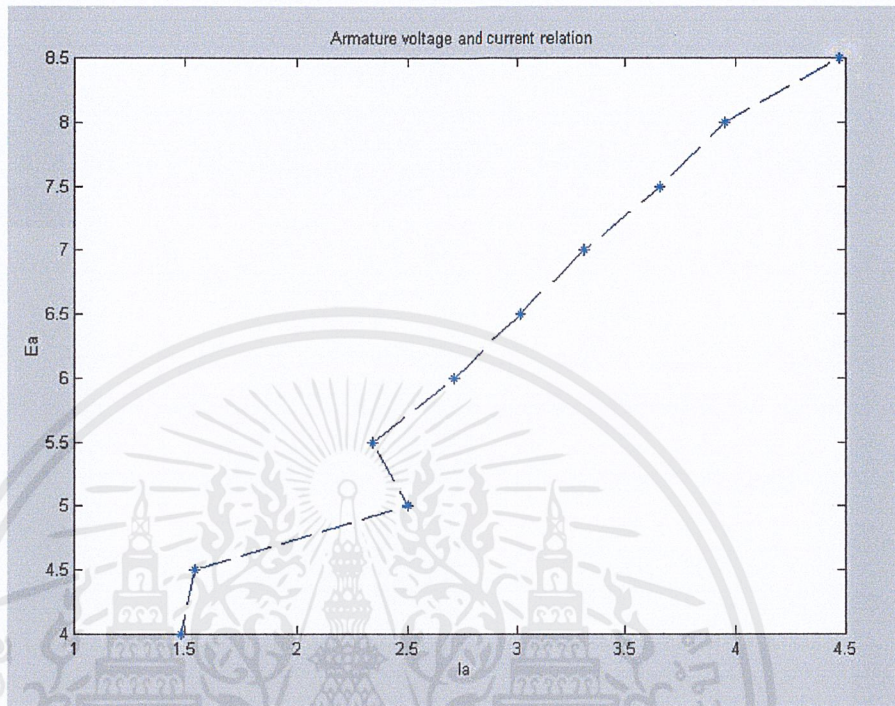
ผลการทดลอง

1. ทดสอบหาค่า R_s โดยวิธี Lock Roter Test

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$e_s(V)$	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5
$I_s(A)$	1.48	1.54	2.5	2.34	2.71	3.02	3.31	3.657	3.95	4.47
$V_r(V)$	10.21	10.21	10.21	10.21	10.21	10.21	10.21	10.21	10.21	10.21

หมายเหตุ

V_F ที่ประมาณ 10 โวลต์ เป็นต้น ไปที่ทำให้มอเตอร์หมุนเมื่อปรับแรงดันย้อนกลับขึ้นจาก 4 โวลต์ เป็นต้น ไป ถ้าค่า V_F ต่ำๆ (น้อยกว่า 10 โวลต์) แม้จะปรับแรงดันย้อนกลับขึ้นมอเตอร์ก็จะไม่หมุนจึงต้องปรับ V_F ให้อยู่ค่าประมาณ 10 โวลต์ แล้วปรับแรงดันย้อนกลับจาก 4 โวลต์ ขึ้นไป (เริ่มจากมอเตอร์หยุดนิ่ง จนกระทั่งมอเตอร์หมุนแต่จะลือคเอาไว้)

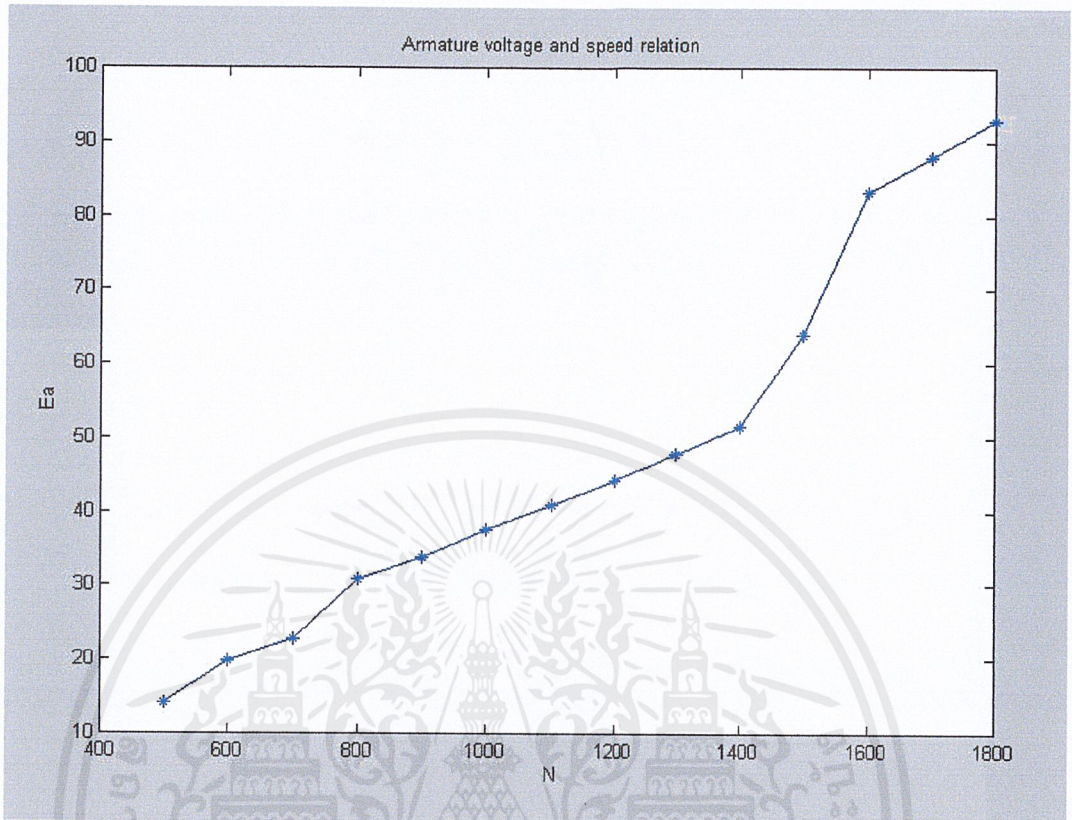


รูปที่ 5.2 กราฟที่ได้จากผลการทดลองระหว่างแรงดันและกระแสอาร์เมเจอร์

2. ทดสอบความสัมพันธ์ของ N , e_a , I_a เพื่อหาค่า ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
N	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
e_a (V)	14.1	19.76	22.78	30.84	33.86	37.63	41	44.3	47.83	51.50	64	83.2	88	93
I_a (A)	1.11	0.88	0.89	0.79	0.79	0.8	0.81	0.82	0.83	0.86	0.79	0.72	0.74	0.74
V_f (V)	30.42	40.3	40.3	50	50	50	50	50	50	50	60.4	80.3	80.3	80.3

นำมาเขียนกราฟได้ดังรูป



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงดันอาร์เมเจอร์ในการทดลองที่ 1

3. ทดสอบเพื่อหาค่า Time Constant

จะได้ $i_{a0} = 0.98 \text{ A}$

$N = 1800 \text{ rpm}$

$\Delta T = 4.24 \text{ SEC}$

$V_{a0} = 130 \text{ V}$

จาก

$$\Delta e_a = k_a \Phi \Delta \omega + \Delta i_a R_a$$

$$k_a \Phi = \frac{\Delta e_a - \Delta i_a R_a}{\Delta \omega} = \frac{6.67 - 0.02(1.613)}{200 \times \frac{2\pi}{60}} = 0.32 \text{ V SEC/rad}$$

หาค่า B จาก

$$B = k_a \Phi \frac{\Delta i_a}{\Delta \omega}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.32 \times \frac{0.02}{2\pi \times \frac{200}{60}}$$

$$= 0.31 \times 10^{-3} \text{ Nm Sec/rad}$$

การคำนวณหาค่า Mechanical Time Constant ของการเคลื่อนที่ τ_m

$$i_{as} = \frac{V_{an}}{R_{an}} \text{ (จาก Name plate)}$$

$$= \frac{130}{1.613} = 80.6 \text{ A}$$

$$T_{as} = \frac{V_{an}}{\omega_0} \times i_{as} = \frac{130}{2\pi \times \frac{1800}{60}} \times 80.6 = 55.59 \text{ Nm}$$

จาก

$$\tau = \frac{(V_{a0} i_{a0} - i_{a0} R_a) t_1 \times 60}{T_{as} n_0 2\pi}$$

$$= \frac{(130 \times 0.98 - 0.98 \times 1.613) \times 4.24 \times 60}{55.59 \times 1800 \times 2\pi}$$

$$= \frac{(127.4 \times -1.581) \times 4.24 \times 60}{55.59 \times 1800 \times 2\pi}$$

$$= 0.05091131194333 \text{ Sec}$$

พารามิเตอร์ที่วัดได้จากเครื่อง Siemens

$$J = 0.15 \text{ kg-m}^2$$

$$R_a = 1.429 \text{ โอห์ม}$$

$$L_a = 15.01 \text{ mH}$$

$$R_f = 180 \text{ โอห์ม}$$

วิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาจากกราฟค่าที่ได้แสดงว่าแรงบิดและกระแสมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้น และเมื่อคำนวณค่า R_a จากกราฟจะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับเครื่องซีเมนส์

5.2 การทดลองการหาความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแส

จุดประสงค์ - เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสนำไปเก็บเป็นข้อมูลในไมโคร

คอนโทรลเลอร์ MCS – 51 (8052)

สมมุติฐาน - แรงบิดแปรผันตรงกับกระแสตามทฤษฎี

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. DC motor separately excited

พิกัดแรงดัน	130	V
พิกัดกำลังไฟฟ้า	1.5	kW
พิกัดกระแส	15	A
ความเร็วรอบ	1800	RPM

2. DC motor ที่ใช้เป็น Generator

3. Torque Meter

4. Multi - meter 2 ตัว

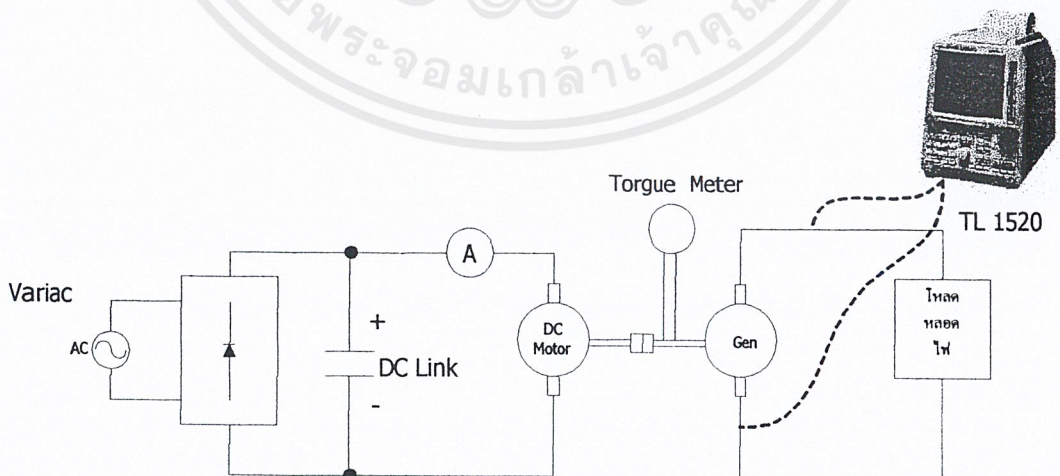
5. Variac 3 ตัว

6. DC Link

7. Digital Storage Oscilloscope

8. โหลดหลอดไฟ

9. สายไฟและกล่องเชื่อมต่อ



รูปที่ 5.4 การต่ออุปกรณ์ในการทดลองที่ 1 Lock Roter Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลอง

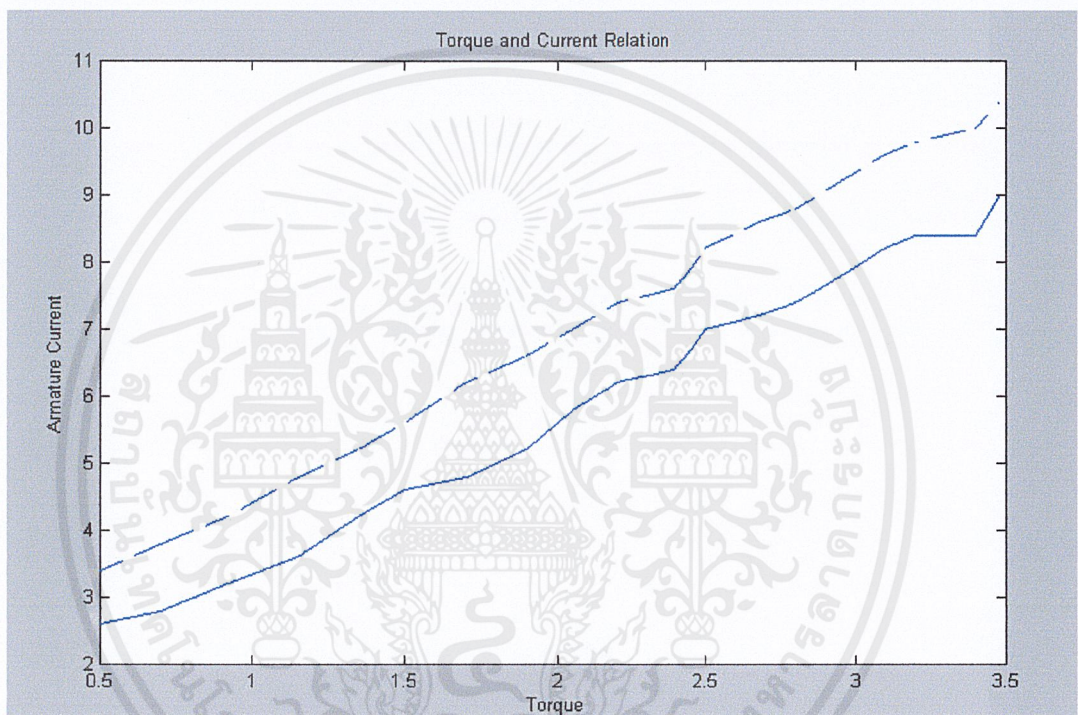
1. ต่อบรรจุตามรูปที่ 5.4
2. เพิ่มแรงดันที่ขดลวดสร้างสนาม (V_f) ของมอเตอร์ให้มีค่าๆหนึ่ง อาจจะประมาณ 30 V
3. เพิ่มแรงดันให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ (V_a) ค่อยๆเพิ่มจนถึงค่าพิกัด ในขณะที่เพิ่ม V_a ให้เพิ่ม V_f ตามไปด้วย โดยให้ V_f ถึงค่าพิกัดก่อน
4. เพิ่มแรงดันให้ขดลวดสร้างสนามของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วคงไว้ที่ค่าๆหนึ่ง
5. เปิดหลอดไฟที่หลอดแล้ววัดค่ากระแสอาร์เมเจอร์ และบันทึกค่าแรงบิดในทุกๆครั้งที่มีการเพิ่มหลอดไฟเข้าไปเป็นหลอด (กระแสจะไม่ค่อยคงที่ จึงเก็บในรูปของค่ากระแส Max และค่า Min เอาไว้ที่แรงบิดค่าๆหนึ่ง
6. นำมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์แรงบิดและกระแส

ผลการทดลอง

จำนวนหลอด	กระแสอาร์เมเจอร์ Ia		แรงบิด Torque
	Max	Min	
1	3.4	2.6	0.73
2	3.8	2.8	1.04
3	4.2	3.2	1.35
4	4.8	3.6	1.69
5	5.2	4.2	1.99
6	5.6	4.6	2.21
7	6.2	4.8	2.50
8	6.6	5.2	2.79
9	6.7	5.8	3.02
10	7.4	6.2	3.24
11	7.4	6.4	3.53
12	8.2	7.0	3.68
13	8.6	7.2	3.94
14	8.8	7.4	4.12
15	9.2	7.8	4.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15	9.2	7.8	4.34
16	9.6	8.2	4.56
17	9.8	8.4	4.71
18	10	8.4	5.00
19	10.4	9.0	5.12



----- กระแสแอมแปร์สูงสุด

————— กระแสแอมแปร์ต่ำสุด

รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสในการทดลองที่ 1

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากกราฟที่ได้จะเห็นว่ากระแสที่ได้ค่อนข้างมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับแรงบิดตามทฤษฎีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-กระแสของมอเตอร์ตัวนี้ได้ดังนี้

$$\frac{X-X_1}{Y-Y_1} = \frac{X_2-X_1}{Y_2-Y_1} = \frac{1}{m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X1 = 3 \quad Y1 = 0.5$$

$$X2 = 9.7 \quad Y2 = 3.48$$

$$m = \frac{3.48 - 0.5}{9.7 - 3}$$

$$= 0.445$$

$$Y = mX + C$$

$$0.5 = 0.445 \cdot 3 + C$$

$$C = -0.835$$

$$Y = 0.445X - 0.835$$

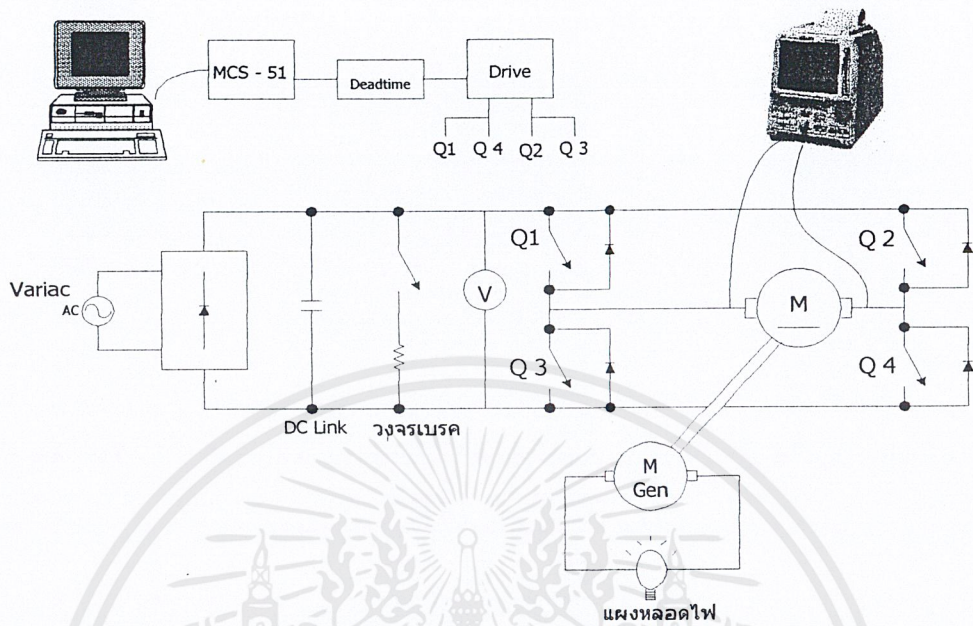
$$\therefore T = 0.445I_a - 0.835$$

จะได้ค่าแรงบิดนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์โดยจะเก็บค่ากระแสหนึ่งค่าจะได้ค่าแรงบิดหนึ่งค่า เมื่อ feed back กระแสกลับมาจะนำไปเปรียบเทียบกับกระแสที่เราเก็บค่าไว้ ถ้าค่าแรงบิดยังไม่ได้ตามต้องการจะมีการเพิ่มหรือลดกระแสเพื่อให้ได้แรงบิดกับกระแสตามที่ต้องการ

5.3 การทดลองการทำงานของชุดจำลองโพลใน Open loop

จุดประสงค์ เพื่อใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงได้ สมมุติฐาน มอเตอร์กระแสตรงสามารถทำงานตามที่คอมพิวเตอร์สั่งได้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- ชุดโครงงานชุดจำลองโพล
- DC Motor Generator
- DC - Link 3 ชุด
- VOM 2 ตัว
- Digital Oscilloscope
- Variac 3 ชุด
- โพลดหลอดไฟ 100วัตต์ 16 ดวง
- สายไฟและกล่องเชื่อมสาย



รูปที่ 5.6 การทดสอบชุดจำลองโพลด ที่ Open loop

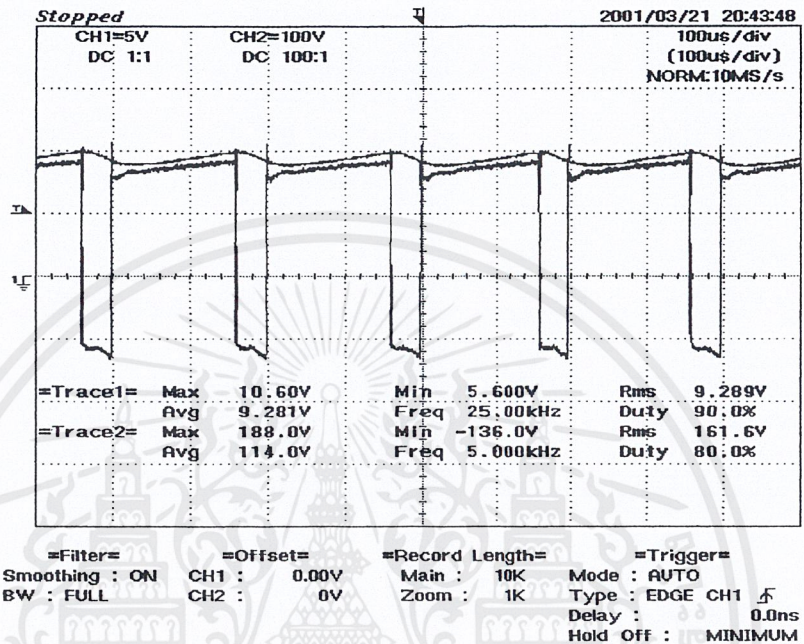
ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อกับกรณีดังรูปที่ 5.6
2. ป้อนแรงดันให้ขดลวด Field จนถึงค่าพิกัด
3. ป้อนแรงดันให้ขดลวดอาร์เมเจอร์จนถึงค่าพิกัด ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 130 โวลต์ป้อนค่าDuty ผ่านทางแป้นพิมพ์ของ PC โดยให้ค่า Duty สูงสุดที่ 80 % ได้ค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ คงค่าที่Variac ไว้
4. ป้อนแรงดันให้ขดลวดField ของมอเตอร์กระแสตรงอีกตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (เป็นตัววัดแรงบิด) ให้ถึงพิกัด 80 โวลต์
5. ทำการเก็บค่าจาก Oscilloscope

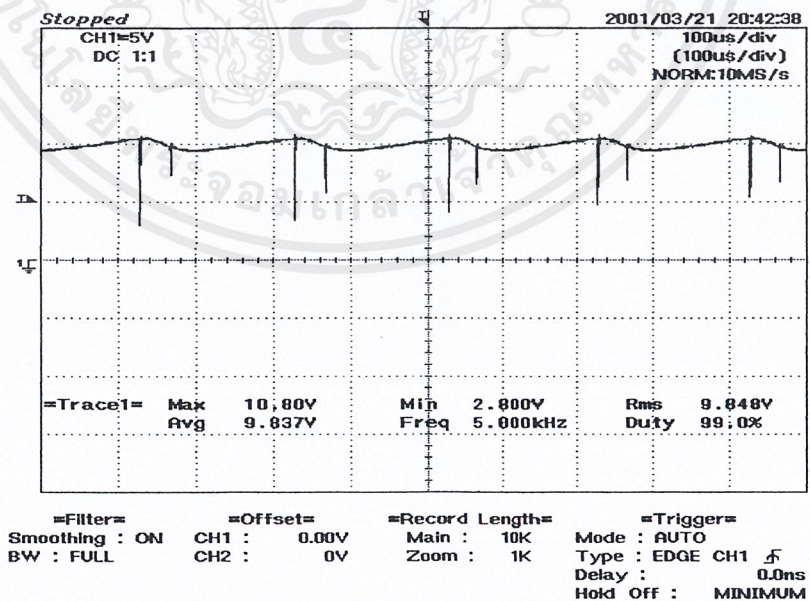
ผลการทดลอง

ในช่วงหมุนแบบฟอร์เวิร์ด

ขณะต่อโหลดที่ค่า $D = 80\%$

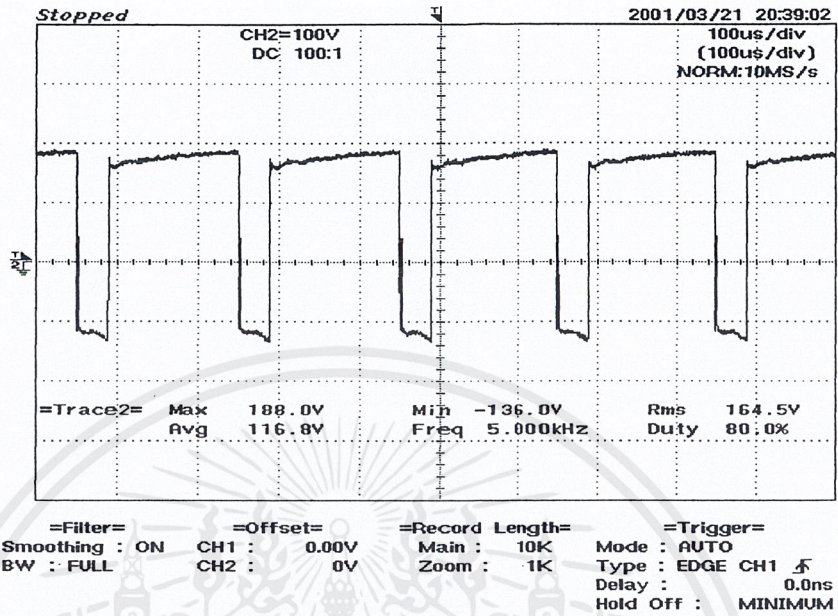


รูปที่ 5.7 กระแสและแรงดันที่จ่ายให้กับขดอาร์มเจอร์ขณะหมุนฟอร์เวิร์ด



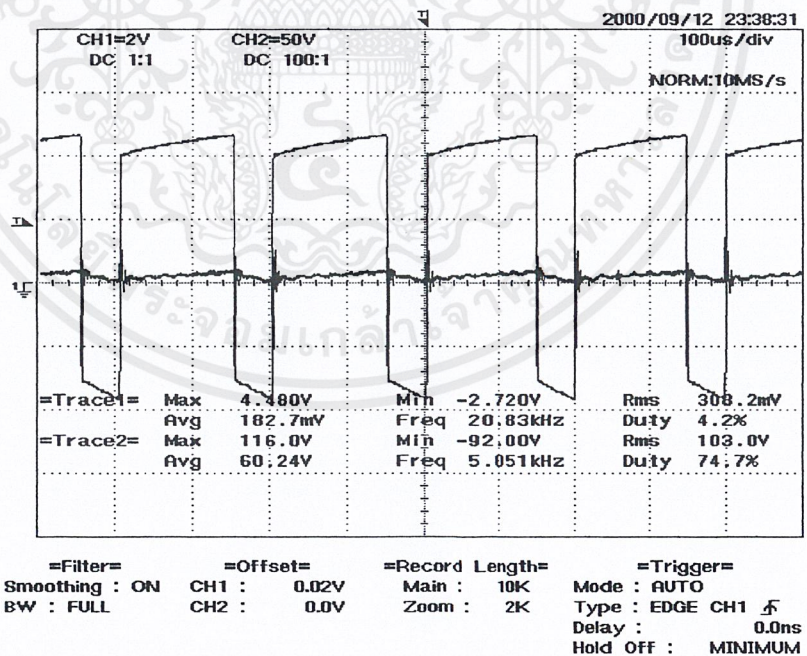
รูปที่ 5.8 กระแสที่ทำให้มอเตอร์หมุนฟอร์เวิร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



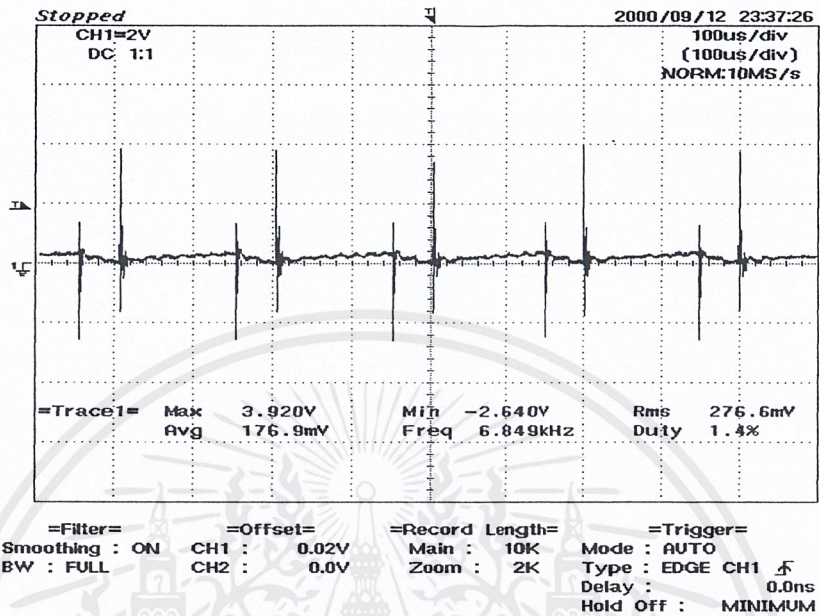
รูปที่ 5.9 แรงดันที่จ่ายให้อาเมเจอร์หมุน พอร์เวิร์ด

ขณะไม่มีโหลด

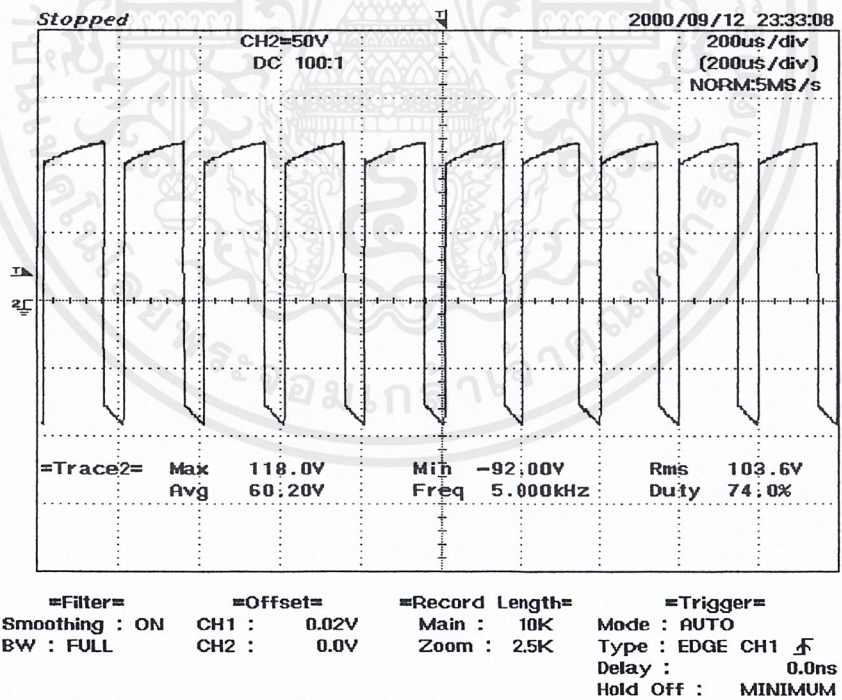


รูปที่ 5.10 กระแสและแรงดันที่จ่ายให้กับขดอาร์เมเจอร์เมื่อหมุนพอร์เวิร์ดขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



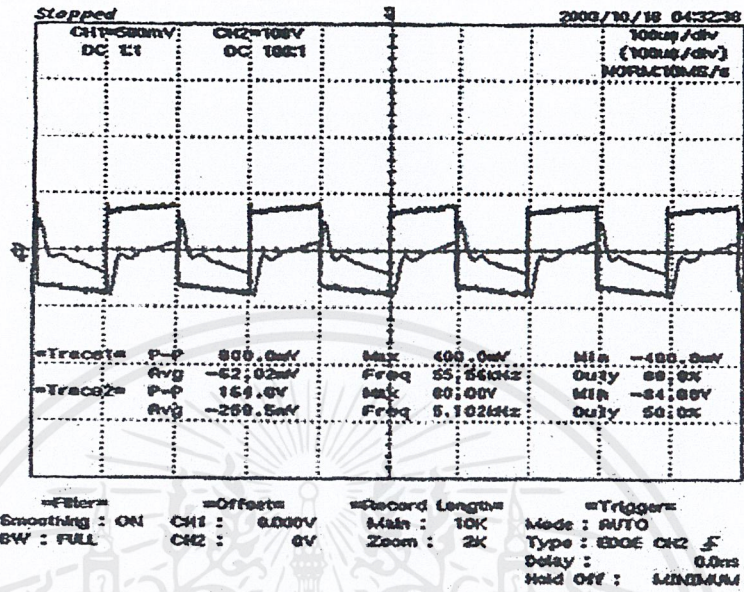
รูปที่ 5.11 กระแสที่ทำให้มอเตอร์หมุนฟอร์เวิร์ดขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 5.12 แรงดันที่จ่ายให้อาเมเจอร์หมุน forward ขณะไม่มีโหลด

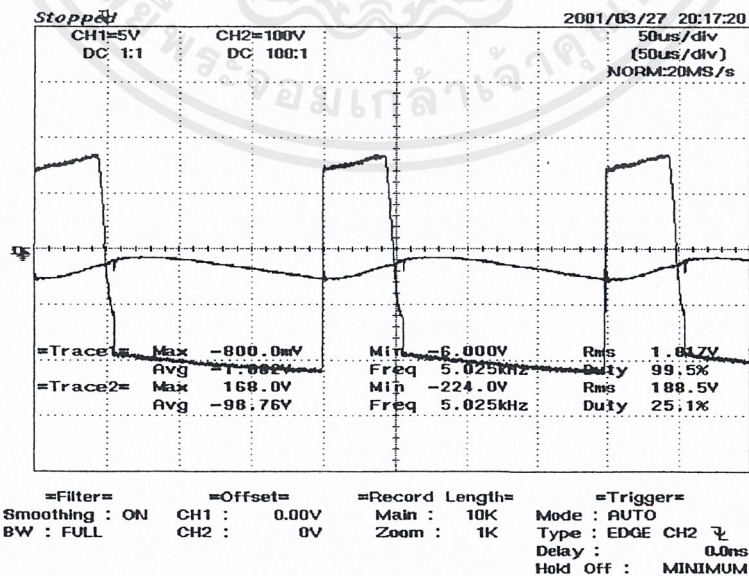
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะมอเตอร์เบรก



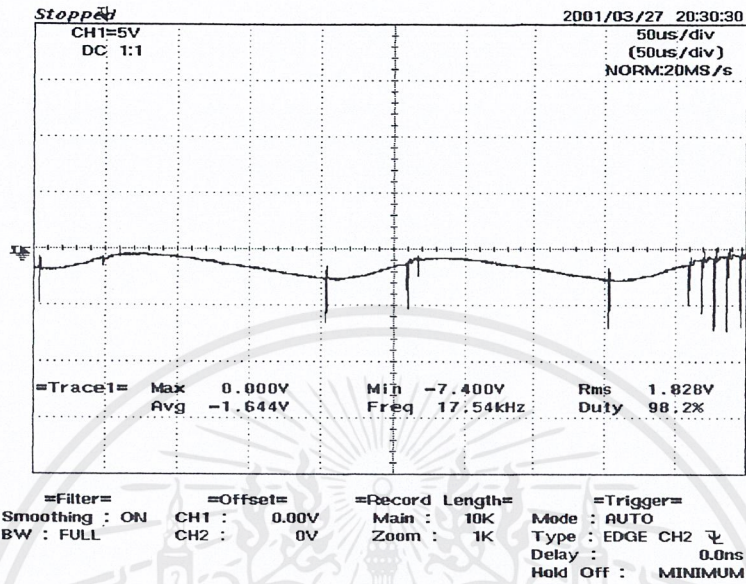
รูปที่ 5.13 ภาพกระแสและแรงดันขณะเบรก

เมื่อมอเตอร์หมุนรีเวอร์สและมีโหลด

ที่ค่าดีวตีไซเคิล $D = 25\%$ 

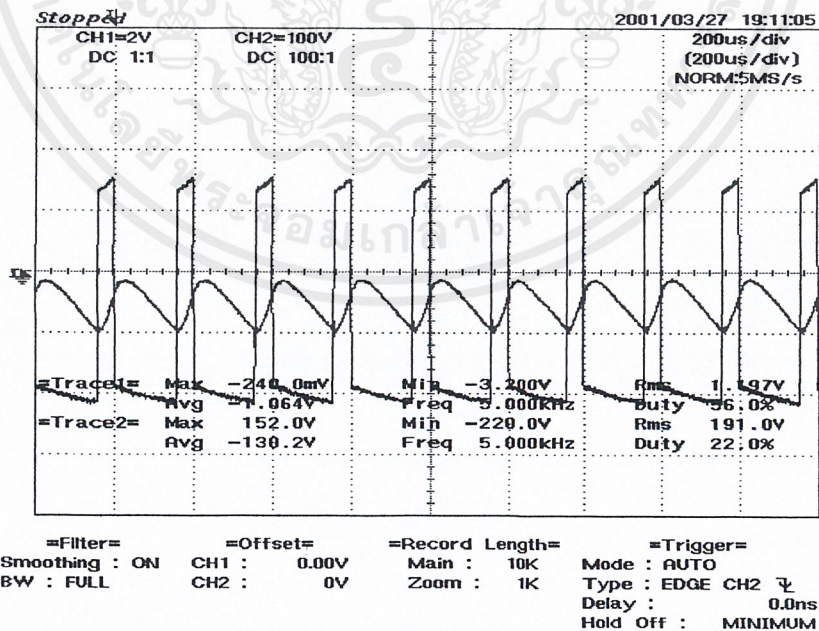
รูปที่ 5.14 รูปแรงดันและกระแสเมื่อมอเตอร์หมุนรีเวอร์ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 กระแสเมื่อมอเตอร์หมุนรีเวอร์ส

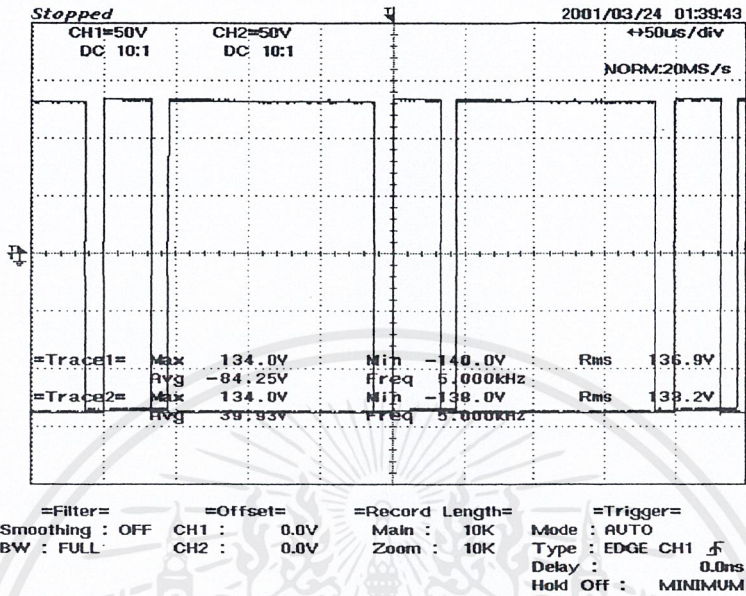
ขณะไม่ได้ต่อโหลด



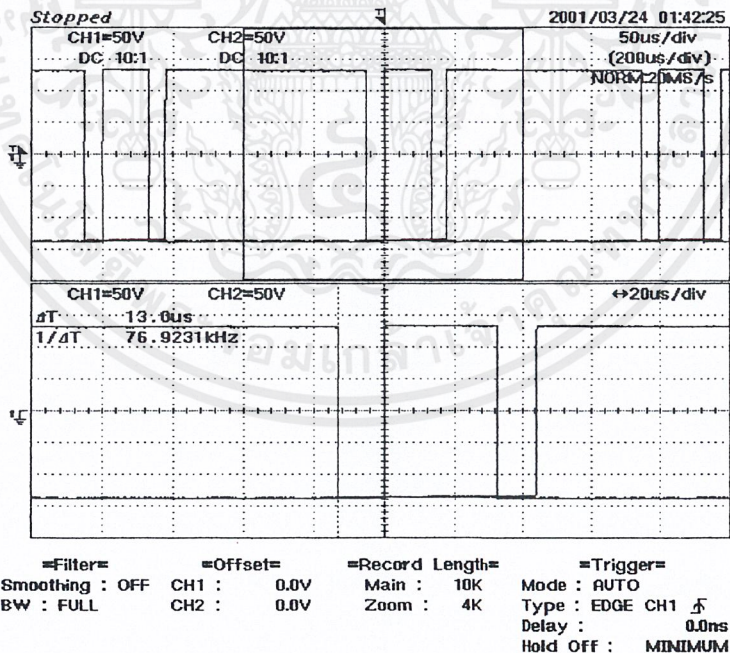
รูปที่ 5.16 กระแสและแรงดันของมอเตอร์เมื่อหมุนรีเวอร์สขณะไม่ต่อโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ใช้ขับไอซีบีที



รูปที่ 5.17 ภาพสัญญาณที่ใช้ขับ ไอซีบีที



รูปที่ 5.18 แสดงช่วงเวลาแคดไทม์

วิเคราะห์ผลการทดลอง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานตามที่คอมพิวเตอร้งสั่งได้ แต่ค่าคิวิตซ์ไชเคลจจะมีค่าจำกัด เนื่องจากการคำนวณในการเขียน โปรแกรมและสามารถกลับทางหมุนมอเตอร์แบบทันทีทันใดได้

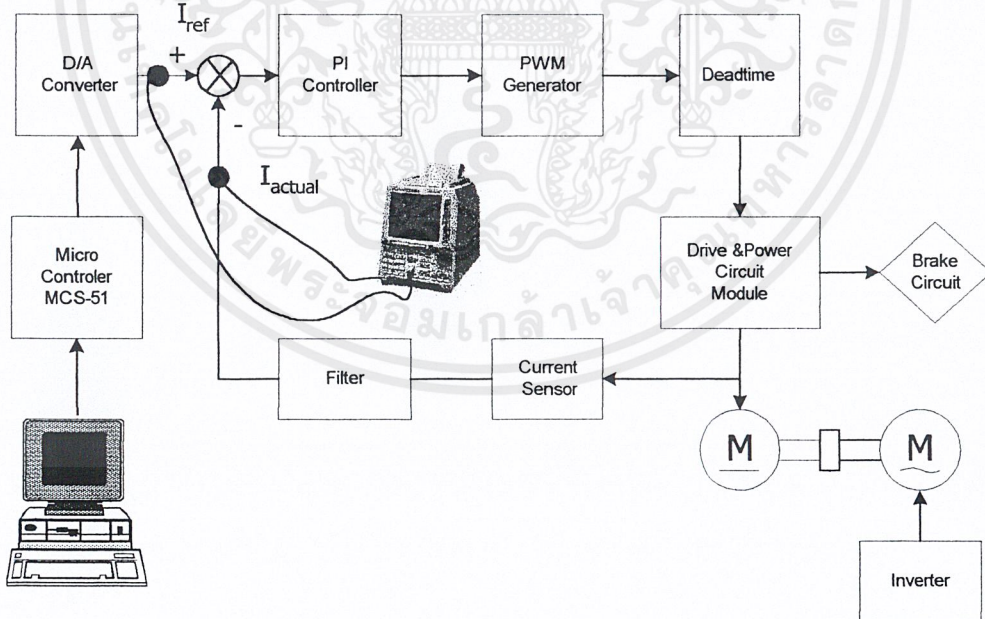
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ไม่สามารถกลับทางหมุนจากค่าคิวดี้ไซเคิลสูงสุดทางด้านฟอร์เวิร์ดไปสู่คิวดี้ไซเคิลสูงสุดทางด้านรีเวอร์ส ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

การทดลองที่ 5.4 การทดสอบการทำงานของชุดจำลองโหลด

วัตถุประสงค์ เพื่อตรวจสอบว่าชุดจำลองโหลดสามารถคงค่ากระแสให้คงที่ได้ อุปกรณ์

1. ชุดจำลองโหลด
2. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เครื่อง
3. อินเวอร์เตอร์แบบปรับความถี่ 1 เครื่อง
4. Variac 2 เครื่อง
5. VOM 2 เครื่อง
6. Digital Oscilloscope 1 เครื่อง
7. Tachometer 1 เครื่อง



รูปที่ 5.19 การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ต่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
2. ปรับแรงดันไฟฟ้าของขดลวดฟลัดให้ถึงพิกัด
3. ปรับค่ากระแสอ้างอิงให้เป็นศูนย์
4. ปรับแรงดันอามเพอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ถึงพิกัด
5. ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์
6. ป้อนค่าแรงบิดที่ต้องการที่คอมพิวเตอร์

ผลการทดลอง

ตาราง 5.4 ค่ากระแสและความเร็ว ที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 15 Hz

กระแสอ้างอิง	กระแสจริง	ความเร็ว(รอบ/นาที)	กระแสอินเวอร์เตอร์
0.0	0.2	435	1.5
1.0	0.9	412	3.3
1.5	1.5	401	3.8
2.0	1.9	397	4
2.5	2.4	392	4.5
3.0	3.2	382	4.8
3.5	3.5	377	5
3.6	3.8	370	5.4
4.0	4.3	366	5.6
4.5	4.4	363	5.7
5.0	4.9	358	6.0
5.5	5.3	355	6.3
6.0	5.0	352	6.5
6.5	5.6	350	7.3

ตาราง 5.5 ตารางกระแสและความเร็วที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 20 Hz

กระแสอ้างอิง	กระแสจริง	ความเร็ว(รอบ/นาที)	กระแสอินเวอร์เตอร์
0.0	0.0	570	2.0
1.0	1.0	531	3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5	1.4	530	3.6
2.0	1.9	518	4.1
2.5	2.4	512	4.5
3.0	2.8	508	5.1
3.5	3.4	507	5.3

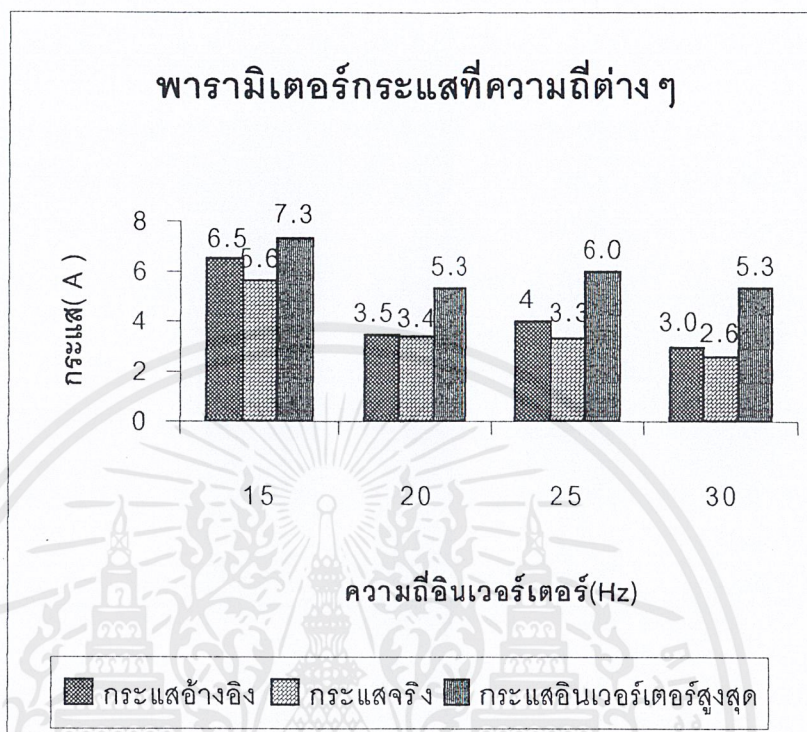
ตาราง5.6 ตารางกระแสและความเร็วที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 25 Hz

กระแสอ้างอิง	กระแสจริง	ความเร็ว(รอบ/นาที)	กระแสอินเวอร์เตอร์
0.0	0.0	735	2.0
1.0	0.9	695	3.5
1.5	1.2	682	4.0
2.0	1.8	667	4.5
2.5	2.1	679	4.8
3.0	2.7	667	5.5
3.4	2.9	662	5.6
4.0	3.3	660	6.0

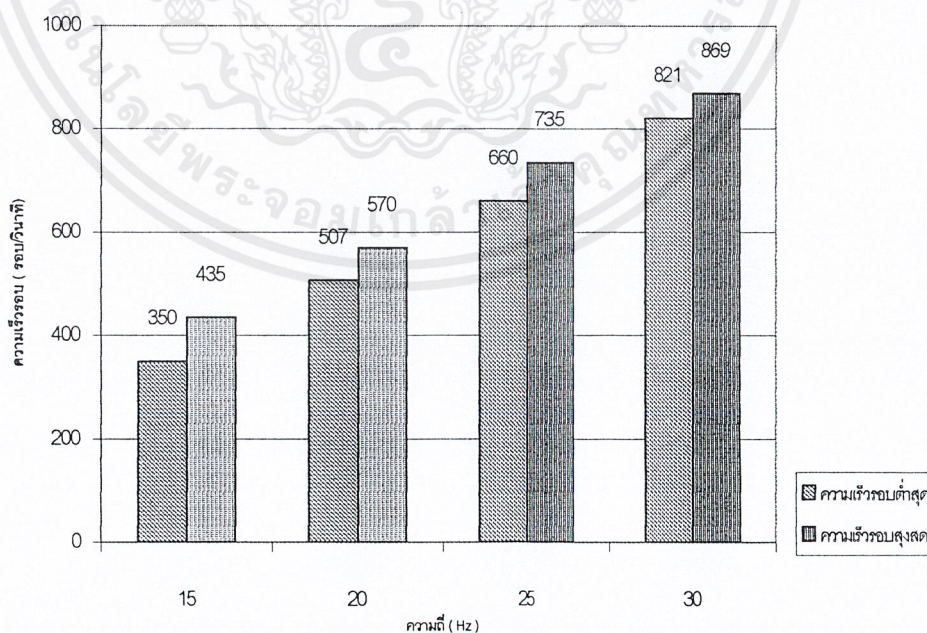
ตาราง5.7 ตารางกระแสและความเร็วที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 30 Hz

กระแสอ้างอิง	กระแสจริง	ความเร็ว(รอบ/นาที)	กระแสอินเวอร์เตอร์
0.0	0.323	869	2.0
1.0	1.022	846	3.5
1.5	1.404	843	4.0
2.0	1.835	829	4.5
2.5	2.35	824	5
3.0	2.6	821	5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

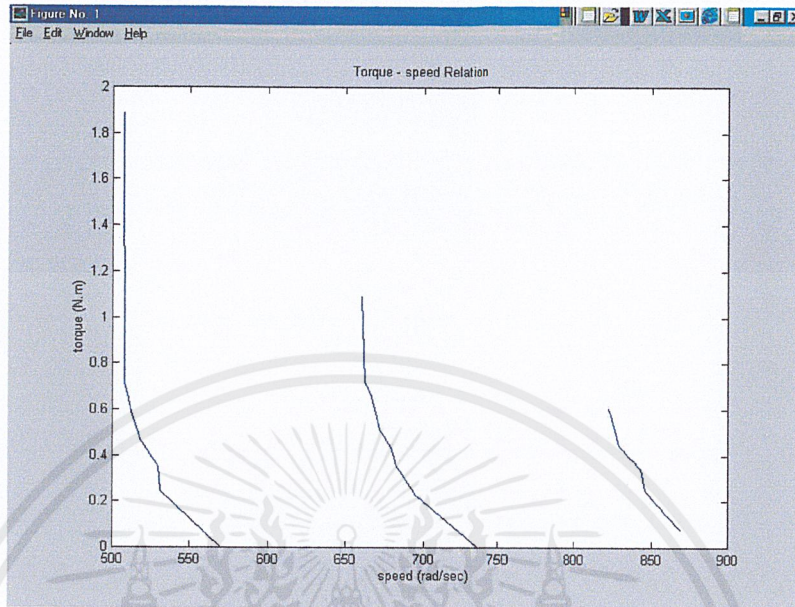


รูปที่ 5.20 แสดงพารามิเตอร์ของกระแสที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ต่างๆ



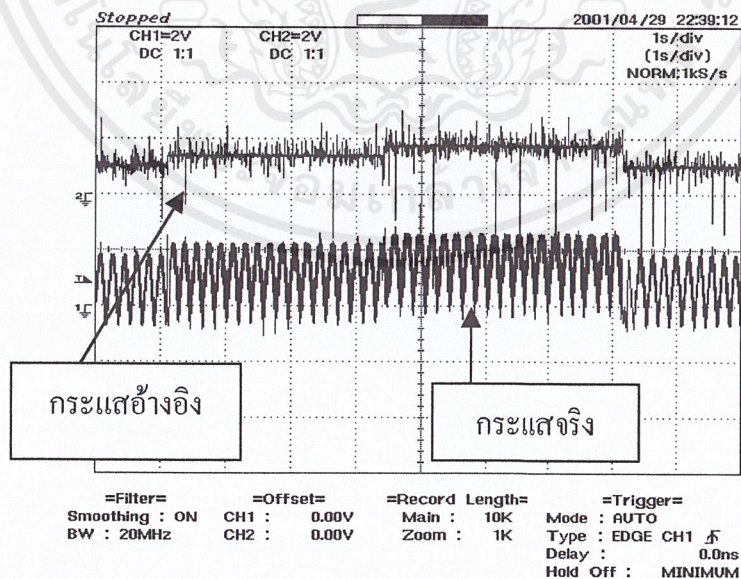
รูปที่ 5.21 กราฟความเร็วรอบที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



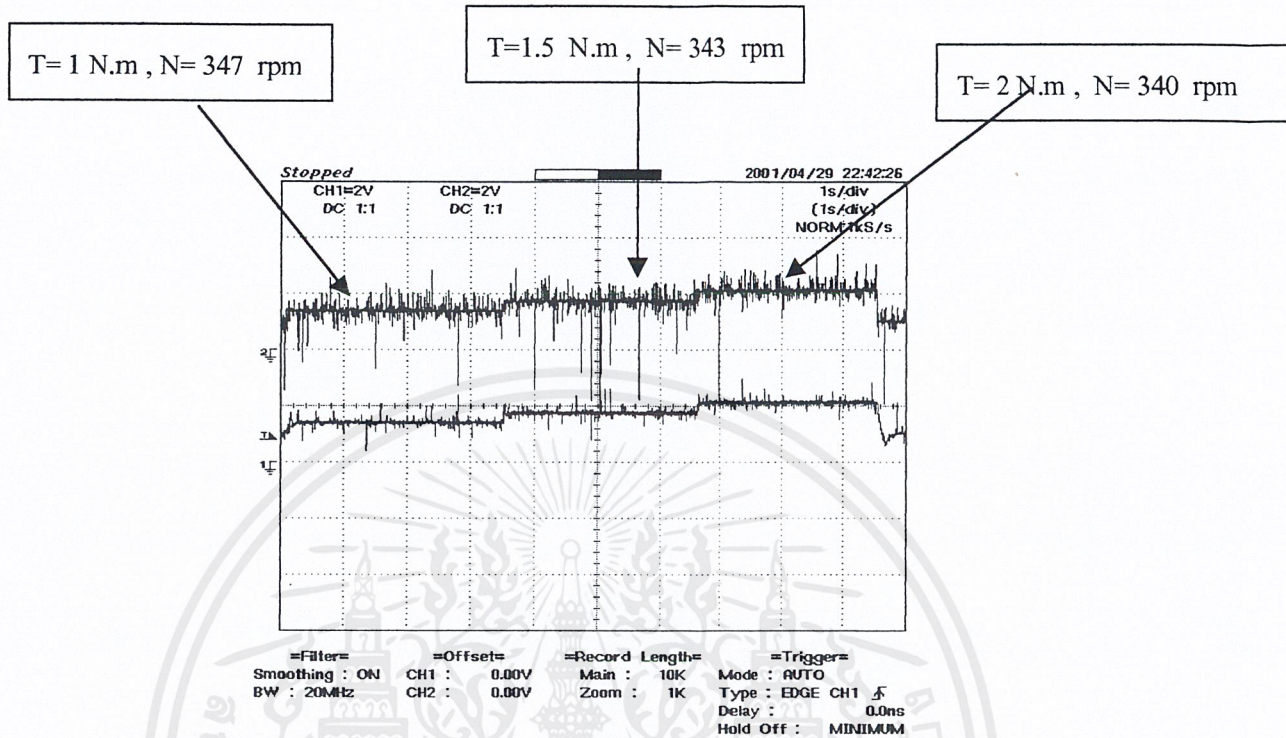
รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบที่ความถี่ต่างๆ

กราฟของกระแสแรงที่ไหลผ่านขดลวดความจอร์เมื่อมีการปรับแรงบิดเป็นช่วงๆ



รูปที่ 5.23 แสดงค่ากระแสอ้างอิงที่ต้องการเทียบกับค่ากระแสจริงที่ไหลผ่านขดลวดความจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 แสดงกระแสอ้างอิงเทียบกับกระแสจริงที่ผ่านขดลวดความถี่และผ่านฟิลเตอร์

สรุปผลการทดลอง

เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดจะทำให้ค่ากระแสอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่ากระแสจริงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังเหตุได้จากรูปที่ 5.23 และเมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสอินเวอร์เตอร์ที่ค่ากระแสอ้างอิงเดียวกันจะพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเร็วรอบ(ค่าความเร็วรอบจะขึ้นกับค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์) เนื่องจากหลักของพลังงานเมื่อค่าของแรงบิดมีค่าคงที่

สรุปผลการทำโครงการ

ชุดจำลองโพลสามารถควบคุมแรงบิดให้คงที่ได้ตามที่ต้องการ โดยสามารถปรับแรงบิดเพื่อทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นขั้นๆได้ แต่ระดับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมีค่าไม่สูงมากนัก เนื่องจากวงจรป้องกันมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง

บทที่ 6

วิจารณ์โครงการ

ปัญหา อุปสรรคและข้อเสนอแนะ

ในการทำโครงการชุดจำลองโพลดีมีปัญหาและอุปสรรคเกิดขึ้นมากมาย ในบทนี้จึงได้รวบรวมปัญหาที่น่าสนใจรวมทั้งเทคนิคต่าง ๆ เอาไว้ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการของรุ่นต่อไป

6.1 ด้านฮาร์ดแวร์

- การขาดความรู้ในการใช้อุปกรณ์จำพวกไอซี ทรานซิสเตอร์ต่างๆ ทำให้เกิดความเสียหายของอุปกรณ์ดังกล่าวในช่วงแรกของการทำโครงการ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ดังนั้นก่อนที่จะสร้างวงจรใดๆ ต้องศึกษาสเปคของอุปกรณ์ให้เสียก่อน
- เนื่องจากโครงการจะต้องทำการใช้คอมพิวเตอร์ และ ไมโครคอนโทรลเลอร์มาสั่งให้มอเตอร์ทำงาน ดังนั้นวงจรที่เกี่ยวข้องจึงมาก ต้องพยายามปรับให้แต่ละวงจรทำงานสัมพันธ์กันด้วย บางครั้งจึงเกิด Error ขึ้นในผลการทดลอง เนื่องจากการปรับเซตค่าต่างๆของแต่ละวงจรแล้วแต่ยังไม่ดีพอ
- พวกอุปกรณ์ที่ใช้วัดหรือเก็บข้อมูล เช่น VOM หรือ Storage Oscilloscope มีน้อย ไม่เพียงพอกับความต้องการใช้งานเช่นเดียวกับมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ ทำให้ต้องเสียเวลารอการใช้งานเราจึงแก้ปัญหาด้วยการทำงานตอนกลางคืนแทน ซึ่งมีข้อดีคือฟ้าปรึญญาโท มักจะอยู่ช่วงนี้เวลามีปัญหาอะไรสามารถปรึกษาได้ทันที
- ในการออกแบบวงจร หากเป็นวงจรที่มีความซับซ้อน ขอแนะนำให้ใช้โปรแกรม Protel แล้วใช้การตัดสติ๊กเกอร์ หากเป็นวงจรง่ายๆ ใช้การออกแบบด้วยมือก็ได้ อาทิ วงจรกำลัง เป็นต้น ข้อควรระวังคือส่วนที่มีการหักมุมต่างๆควรทำให้โค้งหรือป้านมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพราะมีผลดีคือช่วยลดสัญญาณรบกวนต่างๆ ปัญหาที่เล็กน้อยที่เกิดขึ้นหากใช้สติ๊กเกอร์ที่ไม่ดีคือมียางเหนียวเวลาที่ดึงแผ่นสติ๊กเกอร์ออก ซึ่งทำให้เวลาเอาไปแช่ในกรดกัดปรินท์ลายทองแดงที่ไม่ต้องการจะหลุดไปไม่หมด แนะนำให้ใช้สติ๊กเกอร์อย่างดีไปเลย เช่นยี่ห้อโกดัก จะทำให้การกัดปรินท์มีความรวดเร็ว หากมียางเหนียวๆ ให้ใช้ทินเนอร์เช็ดให้สะอาดก่อนนำไปแช่ จะช่วยได้ระดับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การที่สร้างวงจรจับเกต, วงจรกำลัง โดยทำลงแผ่นปริ๊นท์ จะมีความ Stable น้อยกว่าการใช้ Module ซึ่งมีวงจรดังกล่าวอยู่ใน นอกจากนี้นี้ยังช่วยลดการเกิดความเสียหายต่อ IGBT ได้ ngerณีที่เกิดการช้อตในกึ่งเดียวกัน

6.2 ด้านซอฟต์แวร์

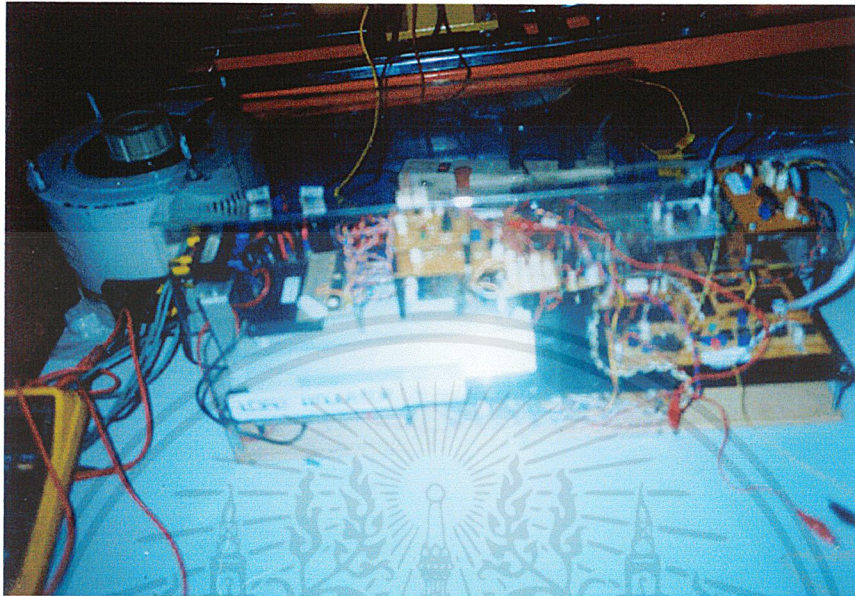
- ในการต่อเชื่อมระหว่างคอมพิวเตอรืและไมโครคอนโทรลเลอร์ (8052) จะไม่สามารถต่อโดยตรงได้ เนื่องจากระดับแรงดันของสัญญาณที่ใช้ในคอมพิวเตอรืและในไมโครคอนโทรลเลอร์จะไม่เท่ากัน โดยระดับแรงดันของสัญญาณที่ใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์มีขนาด 0 V แทนสัญญาณที่ลอจิกเป็น 0 และมีขนาด 5 V แทนสัญญาณที่มีลอจิกเป็น 1 ส่วนสัญญาณภายในคอมพิวเตอรืจะใช้แรงดันที่มีแอมพลิจูดขนาด 3 - 12 V แทนสัญญาณที่มีลอจิกเป็น 0 และแรงดันที่มีแอมพลิจูดขนาด -3 -- -12 V แทนสัญญาณที่มีลอจิก 1 ดังนั้นเราจึงต้องมีตัวแปลงระดับแรงดันให้เข้ากันได้โดยผ่านวงจรรีซีฟเวอร์ (Receiver) โดยใช้ไอซี MAX 232 เป็นตัวแปลง
- กระแสจริงที่ไหลผ่านในอานเมเจอร์กับกระแสที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีจะมีค่าไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น ในสภาวะที่แรงบิดเป็นศูนย์ I_u ทางทฤษฎีต้องเป็นศูนย์ แต่กระแสจริงที่วัดได้จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากในขดลวดอานเมเจอร์จะมีค่าความต้านทานภายใน ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดค่ากระแสอ้างอิงจึงมีความ ผิดพลาดขึ้นเล็กน้อย
- โปรแกรมที่ใช้ส่งงานมอเตอร์ทางคอมพิวเตอรื จะมีการใช้พอร์ตอนุกรมเป็นตัวส่งผ่านข้อมูล ซึ่งต้องมีไฟล์บางตัวจึงจะสามารถทำงานได้ ตัวอย่างเช่น mscomm32.ocx , msvbvm60. dll ดังนั้นจึงต้องหาไฟล์เหล่านี้มาลงก่อน



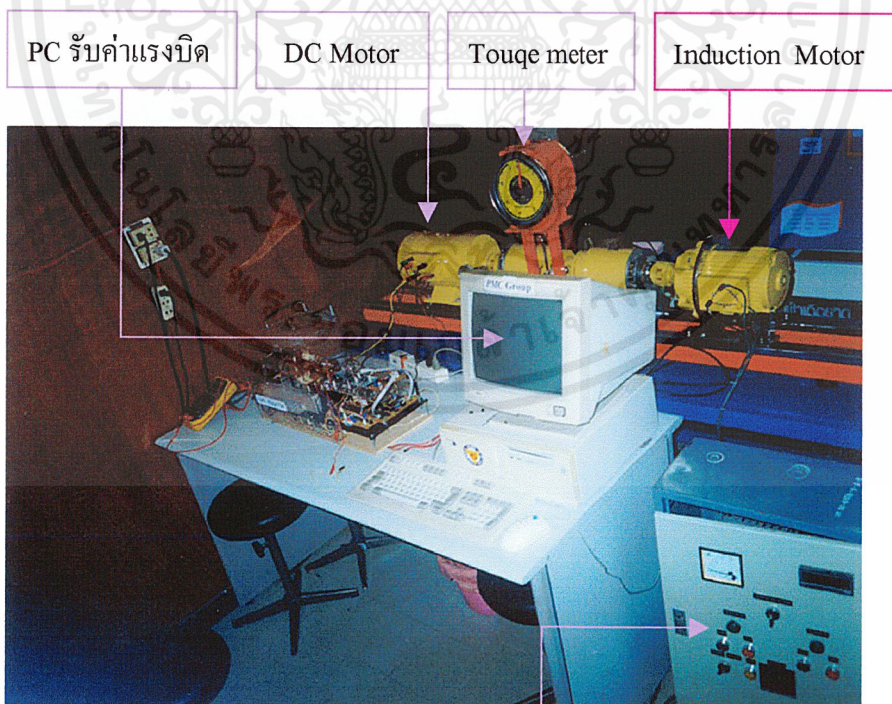
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปชิ้นงาน Load Emulator



รูปที่ 1 ชิ้นงานส่วนคอนโทรล



รูปที่ 2 อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในชุดจำลองโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการทำงานในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อรับค่ากระแสอ้างอิงจาก
คอมพิวเตอรื

; JES.ASM

CPU"8051.TBL"

HOF"INT8"

INCL"HEAD51.H"

WMCON: EQU 96H

ORG 0000H

LJMP MAIN

ORG 0040H

MAIN: MOV R2,#127

MOV IE,#90H

MOV SCON,#50H

MOV TMOD,#20H

MOV TH1,#-3

SETB TR1

MOV P1,#00H

SETB P1.2

LOOP: JNB RI,LOOP

MOV A,SBUF

MOV P0,A

CLR RI

SJMP LOOP

END

ชุดคำสั่งที่เขียนในวิชวลเบสิก

```
Public T As String
```

```
Public buff As String
```

```
Private Sub cmdExit_Click()
```

```
End
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdSend_Click()
```

```
T = txtOutput.Text
```

```
buff = Chr(T)
```

```
MSComm1.output = buff
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
MSComm1.Settings = "9600,n,8,1"
```

```
If Not MSComm1.PortOpen Then
```

```
MSComm1.CommPort = 1
```

```
MSComm1.PortOpen = True
```

```
Else
```

```
MsgBox ("Port already Open "), , "ComPort Error"
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Public Function output(Torque As String)
```

```
If optForward = True Then
```

```
output1 = ((Val(Torque) + 0.835) * 1 / 0.445 * 1 / 6 + 2.5) * 51
```

```
End If
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

If optReverse = True Then
output1 = (((Val(Torque) + 0.835) * -1 / 0.445) * 1 / 6 + 2.5) * 51
End If
If optStop = True Then output1 = 127
output = Str(CInt(output1))
End Function

```

```

Private Sub optForward_Click()
txtTorque.Enabled = True
txtTorque.Text = ""
End Sub

```

```

Private Sub optReverse_Click()
txtTorque.Enabled = True
txtTorque.Text = ""
End Sub

```

```

Private Sub optStop_Click()
txtTorque.Enabled = False
txtOutput.Text = Str(output(txtTorque.Text))
End Sub

```

```

Private Sub txtTorque_Change()
txtOutput.Text = Str(output(txtTorque.Text))
End Sub

```

A DYNAMIC MECHANICAL LOAD EMULATION TEST FACILITY TO EVALUATE THE PERFORMANCE OF AC INVERTERS.

C. R. Hewson, G. M. Asher, M. Sumner

The University of Nottingham, U.K.

INTRODUCTION

It is usual practice in the drives industry to commission commercial 3-phase induction motor drives (V-f, sensorless or sensed vector) on site with the load application in-situ. Converter parameters are usually set by trial and error and successful commissioning relies on the experience of the commissioning engineer. Often drives maybe operational but their performance may not be optimised for the application. Commissioning drives on-site can be time consuming and if the ac inverter is an integral part of a production process this downtime can be costly. Some loads are very difficult to commission; these include periodic impact loads, high starting torque loads, loads with vibrational modes, and those that require the drive to catch spinning loads.

This paper describes the design and development of a high performance test facility to be used for the off-site commissioning and performance evaluation of commercial ac inverters. The test facility comprises a PC based system simulation package and a dynamic mechanical loading rig capable of emulating both linear and non-linear systems.

In the first instance drive commissioning can be investigated using software simulation. This offers the user a flexible design tool without the need for a hardware rig. However software simulation can never be completely realistic. Therefore the test facility also comprises a hardware based load emulator which is controlled to produce the dynamic shaft torque characteristic of a given mechanical load. In this way the test facility achieves the maximum practical verification that a load / drive combination will work that can be obtained in a laboratory situation.

This paper will outline the design, construction and operation of the test facility. Its philosophy will primarily be described with reference to the hardware based load emulator rig. A discussion of the global control structure designed to operate both the hardware and software tools will be provided. The target mechanical load is a passenger lift and the paper will outline the mechanical characteristics of this application.

Finally practical results for the hardware test facility will show it is now fully operational.

OVERVIEW OF THE SIMULATION AND EMULATION RIG

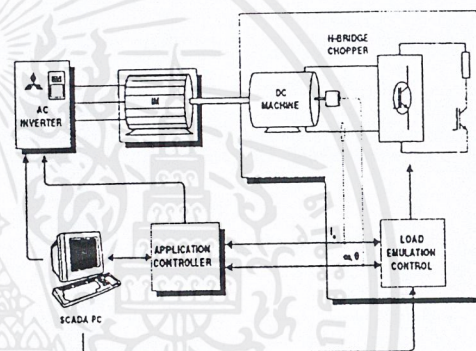


Figure 1: Block diagram displaying the constituent elements of the test facility.

Figure 1. shows the test rig that has been developed to simulate and emulate linear and non-linear mechanical loads. It highlights the four standard elements of the test facility. Currently the hardware rig consists of a Mitsubishi A240e V-f and sensorless vector inverter connected to a standard squirrel cage induction machine, both rated at 7.5kW. This combination is controlled by a PC housed I/O card which is programmed to behave as a programmable logic controller (PLC). An I/O card was chosen as it was easily reconfigured to adapt to changes in the rig during development. The final element of the hardware test facility is the load emulator. This is an H-Bridge controlled dc machine rated at 11kW. This power rating was chosen as it encompasses a wide range of commonly encountered mechanical loads. The combination of H-Bridge chopper and dc machine was chosen over ac sensed vector technology due to ease of implementation. The control structures for the torque and speed of the dc machine are easy to implement with high

bandwidths achievable. These control loops form the basis of the load emulation.

Figure 1 illustrates that the global control of the rig is implemented on a desktop PC running a supervisory control and data acquisition (SCADA) package. The primary function of SCADA is to provide each element of the test rig with the parameters it requires for its initial and real time operation. Its secondary function is to monitor the status of the load emulation so that the effect of changes in inverter parameters can be observed.

THE LOAD EMULATOR HARDWARE

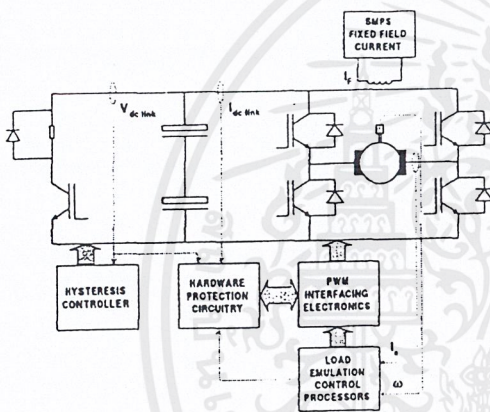


Figure 2: The H-Bridge and dynamic braking chopper controlling the dc machine.

The H-Bridge converter enables operation of the dc machine in all four quadrants of the torque – speed plane. The switching elements of the converter are IGBT devices switching at 10kHz. The implementation of a unipolar PWM strategy, described in Mohan et al [1], effectively doubles the switching frequency of the output voltage waveform allowing improved frequency response and less torque ripple. These measures are sufficient to enable a high bandwidth armature current controller of approximately 800Hz to be implemented. A simple brake chopper removes regenerative energy from the converter. This operates under hysteresis control with a fixed frequency output of 2kHz when the dc link voltage is in range. The converter hardware is protected by a number of trip circuits these include overcurrent, overvoltage and a processor watchdog which causes a trip signal should the processors fail. The field of the dc machine is supplied by a current

controlled switch mode power supply. This controls the field at constant rated current.

The load emulation control algorithm to mimic the mechanical process dynamics is implemented on a network of parallel processors. These processors are used for ease of development as they can be simply reconfigured to accommodate changes in the control structure. An incremental position encoder to measure shaft speed and a Hall effect transducer monitoring armature current provide feedback signals for load emulation control. A torque transducer provides a direct measurement of shaft torque that is used for calibration and steady state load emulation verification purposes. The network of processors also provides the H-Bridge chopper with PWM. This is fed through some interfacing electronics and finally supplied to the individual gate drivers of the IGBTs. Finally a purpose built digital I/O processor supplies the SCADA package with information about the status of the load emulation.

LOAD EMULATION CONTROL

A substantial body of work exists about practical steady state mechanical load emulation for testing ac machine – ac inverter combinations [2-3]. However the emulation of fast mechanical dynamics has received very little attention in research literature. Work that has addressed this area is restricted mainly to simulation studies [3-8]. It is very often these transient load dynamics that are the cause of problems encountered in commissioning ac inverters.

The principle of the control loop for the load emulator is to control the dc machine to provide a dynamic torque, T_{dc} , that is sufficient to mimic the shaft torque, T_{sh} , of the desired mechanical load according to eqn. (1):

$$T_{dc} = T_e - J_{ac} \frac{d\omega}{dt} - B_{ac}\omega - T_{sh} \quad (1)$$

The intuitive solution to this problem is to feed a measure of the machine shaft speed, ω , into an inverse model of the load dynamics to provide T_{dc} . This method can achieve satisfactory open-loop load emulation. However as outlined in [9] using the inverse load dynamics to calculate T_{dc} where the load emulation is part of a closed loop system causes severe degradation of the modeled mechanical load dynamics. This is obviously not acceptable if the load emulator is to be a flexible tool to evaluate a range of commercial ac inverters in many different modes of operation.

The block diagram shown in figure 3. shows the control structure for the load emulator.

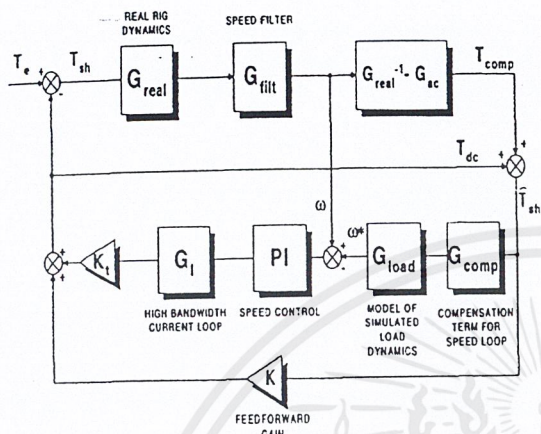


Figure 3: The control structure to enable the emulation of fast mechanical process dynamics on a dc machine.

In figure 3. the torque on the shaft of the dc machine T_{sh} is used to provide a demand speed ω . This is fed into a speed-tracking loop that ultimately produces, T_{dc} , our desired dc machine torque. As shown in [9] this structure can produce exact emulation of the target mechanical load if the electrically developed torque, T_e , or the shaft torque, T_{sh} , is available. For the general case of a V-f inverter driving the mechanical load this is not the case. The output from direct torque transducers needs to be heavily filtered if it to be used in a closed loop control structure and this severely limits the bandwidth of the signal making emulation of fast dynamics very difficult. Also, in general, V-f inverters don't provide a dynamic output of the electrically developed torque. This is not the case in sensed vector or ac servo drives and in these instances exact emulation is achievable.

With no fast measurement of torque the signal has to be estimated. This estimate is derived from a measurement of the dc machine armature current and from feeding the machine speed into the inverse dynamics of the actual mechanical rig. This estimate of shaft torque is fed into $G_{load}(s)$ the block that describes the mechanical dynamics of the load. For a linear load best emulation has been achieved by discretising the load through pole-zero mapping. In the case of non-linear loads such as the passenger lift $G_{load}(s)$ is a set of non-linear backward difference equations that may include load disturbances. The output from $G_{load}(s)$ is a

reference speed that is the desired speed of the machine if it were driving the real mechanical load.

The problem of controlling the dc machine to behave as a mechanical load is that the speed loop and the process of shaft torque estimation add unwanted dynamic effects which degrade the accuracy of the modeled $G_{load}(s)$. To overcome this a feedforward gain, $0 < K \leq 1$, and a compensation term for the speed loop dynamics is added to the control structure. In emulations where the torque needn't be estimated the case $K=1$ provides exact emulation of the mechanical load [9] namely that:

$$\frac{\omega}{T_e} = G_{load}(s) \quad (2)$$

However for the general case introduced in this paper there are limits on the value of K : $K < 1$ otherwise a singularity occurs in the torque estimation. This means that emulation can never be exact. For the case of the target passenger lift load good emulation has been achieved with $K=0$.

THE ELECTRONIC PROCESS EMULATION RIG

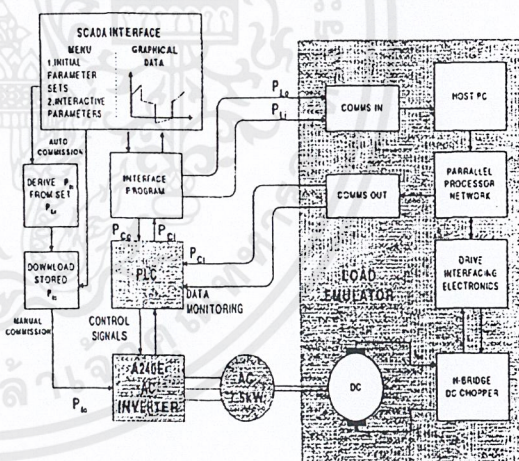


Figure 4: The electronic process emulation rig (the four constituent elements of the rig are highlighted in grey).

Figure 4. shows the electronic process emulation rig (E.P.E.R.). The four constituent elements of the E.P.E.R. when emulating a passenger lift are:

1. AC Machine
2. Application controller – PLC
3. AC Inverter - e.g. Mitsubishi A240E 7.5kW inverter

4. Load emulator – e.g. DC dynamometer emulating a lift load.

Global control of the system is provided by the SCADA package. The primary function of the SCADA package is to communicate parameter sets to initialise and provide real time control signals to the individual elements of the rig. These sets can be clearly defined for a general target mechanical load emulation. These parameter sets are now described and illustrated with reference to the target mechanical load, the passenger lift.

P_{Lo} – Initial mechanical process parameters that remain unchanged during simulation / emulation. These parameters include fixed masses, gear ratio's, dimensions etc. It is accepted that for some applications such parameters may be difficult to derive accurately (although most manufacturers are able to supply masses and dimensions so that inertial parameters can often be derived). It is not felt that this detracts from the benefits of investigating the effects of inverter parameter changes.

P_{Li} – Interactive mechanical process parameters. This set consists of those that the load emulator requires during real-time load emulation. In the case of a lift this is simply the number of passengers entering or leaving the lift at a given floor.

P_{Mo} – AC Machine ratings. This set defines the machine being used. For the E.P.E.R., the set is merely the ratings of the machine and the machine's equivalent circuit parameters are not required. It is used only for the purposes of off-line auto commissioning described below.

P_{Io} – Initial AC Inverter parameters. These parameters set up the ac inverter for operation with a particular mechanical load. The parameter set for the inverter is shown in figure 4. as being derived in one of two ways. The first is the simplest, the load is known and a set of parameters for the ac inverter has been obtained through trial and error. These parameters are simply called up from memory and downloaded to the inverter for the given load. Most drive manufacturers have developed parameter downloading systems so that parameters do not need to be entered on the inverter keypad. It is assumed here that this downloading process is integrated with the SCADA package.

The second method relies on a purpose-written software object for each load type. The program

acts on parameter set P_{Mo} and P_{Lo} and derives the set P_{Io} . This is termed off-line autocommissioning. The set P_{Io} is downloaded into the inverter under SCADA control.

P_{Co} – Initial application controller values. For the E.P.E.R., this merely involves calling up the appropriate emulation object for the application. The program will contain a set of default initial conditions.

P_{Ci} – Interactive application controller parameters. This set replaces P_{Li} and provides the real time control signals required to control the ac inverter. This particular set of parameters can be further sub-divided into:

- (i) Load feedback variables. These are the variables required by the application controller for control purposes. In the case of the lift load this involves communication of the position of the lift car in the shaft to the PLC.
- (ii) User defined variables. These are input by the user into SCADA and communicated via interface software to the application controller. This is simply the number of passengers in our example lift load.
- (iii) Data monitoring variables. This is a set of data used purely for monitoring the status of the emulation and will include information such as shaft speed, torque etc.

THE TARGET MECHANICAL LOAD

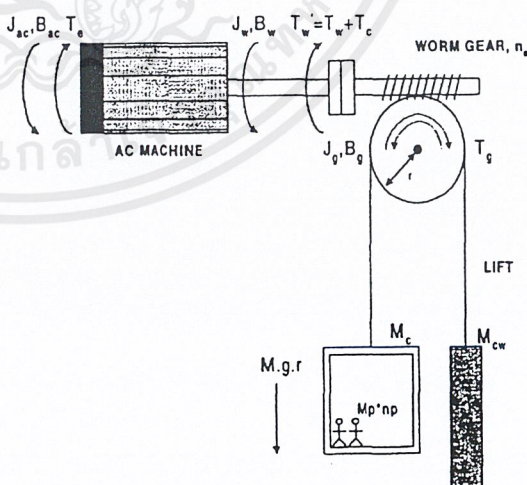


Figure 5: A generalized block diagram of the mechanical elements of a passenger lift.

The block diagram highlights the mechanical elements of an average passenger lift. The torque developed by the ac machine, T_e , is transmitted to the traction sheave of the lift by an overwormed gearbox. T_w is the theoretically perfect worm gear torque developed on the machine shaft by T_e . Frictional losses in the gearbox are represented by a compensation torque T_c . This torque is a non-linear function, its value dependent on the direction of power flow in the mechanical drive. The lift contains a single roped drum. This is connected to a fixed mass counterweight, fixed weight load car and variable passenger load.

The dynamic equations defining the lift are:

$$n = f(\omega_g, T_g) \tag{3}$$

$$\frac{d\omega_g}{dt} = \frac{1}{J} \{ T_w - Mgr - B\omega_g \} \tag{4}$$

$$\frac{dx}{dt} = \omega_g r \tag{5}$$

J - System inertia referred to machine side: This includes the inertia of the worm and machine couplings reflected through the gear, the lumped inertia of the lift drum and the inertial contribution of the counterweight masses etc.

B - System friction referred to machine side: This is auxiliary friction due to bearings etc.

M - Effective mass of lift

r - Radius of lift drum

n - Effective torque gear ratio: This accounts for losses in the gearbox by reflecting the machine side torque, T_w , through a non-ideal gear ratio.

PRACTICAL RESULTS FOR THE E.P.E.R.

Figure 6a and 6b show the E.P.E.R. emulating the mechanical process dynamics of a lift load. In figure 6a the PLC is controlling the emulated lift load to go from the ground to the first floor with a full passenger load. The inverter is operating in V-f mode. This situation realises the worst case motoring conditions that the ac inverter undergoes with this particular set of mechanical parameters. The lift load is rated at 6.5kW.

The second set of results in figure 6b shows the emulated load being lowered from the first to the ground floor. This represents the peak regenerative power the ac inverter will have to absorb for this set of mechanical parameters. The estimated torque and the measured speed shown in figure 6b are both noisy signals compared to those in figure 6a.

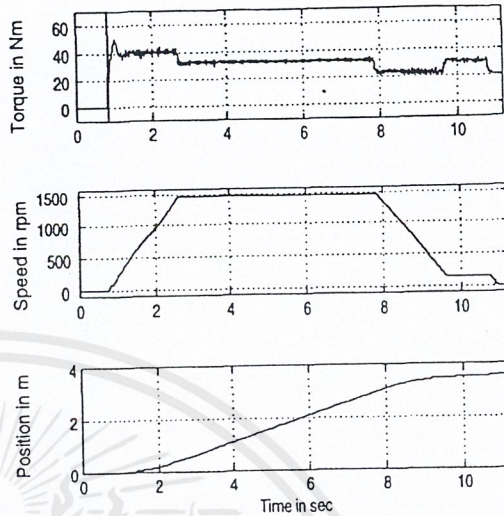


Figure 6a: Practical results from the E.P.E.R

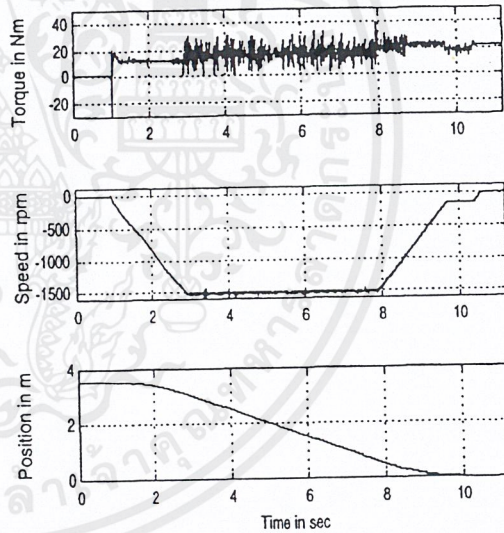


Figure 6b: Practical results from the E.P.E.R.

Top trace – The estimated ac machine shaft torque
 Middle trace – The machine shaft speed.
 Bottom trace – The position of the lift car in the lift shaft.

This increase in noise only occurs when the external brake unit supplied with the V-f drive is in operation. This noise was found to be a function of the brake chopper and highlights the practical benefit of the test rig; namely real inverter

Characteristics are being highlighted without the mechanical load.

CONCLUSIONS

This paper has described a laboratory system for investigating the performance of a variable speed induction motor drive with a particular load application. The system can emulate linear and non-linear load dynamics including load disturbances. The test facility contains a high bandwidth armature current controlled dc machine dynamometer to emulate mechanical loads. The results presented show a real-time emulation of a 100 hp system driven by a worm gear train capable of standard overhauling operation. These practical results have been achieved at a realistic power rating and show the E.P.E.R. is now fully operational. The system is operating under basic SCADA control and the autocommissioning software is under development.

It is felt the emulation and simulation systems described provide a useful test bed and training aid for the performance investigation and troubleshooting of induction motor drive applications in an off-line laboratory environment.

REFERENCES

- [1] Mohan, Undeland and Robbins, 1995, "Power Electronics", John Wiley and sons.
- [2] Wasko C.R., 1986, "500HP, 120Hz Current-fed Field Oriented Control for Fuel Pump Test Stands", Conference Record IEEE-IAS Annual Meeting, pp 314-320.
- [3] Wasko C.R., 1987, "A Universal Dynamometer for Testing Motor Drive Systems", Conference Record IEEE-IAS Annual Meeting, pp 409-412.
- [4] Carrol J.J., Dawson D.M., 1993, "A Non-Linear Control Technique for the Development of a Computer Controlled Dynamometer", American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC, vol.53, pp 31-36.
- [5] Newton R.W., Betz R.E. and Penfold H.B., 1995, "Emulating Dynamic load characteristics Using a Dynamic Dynamometer", Proceedings of the Int. Conference on Power Electronics and Drive Systems, vol. 1, pp 465-470.
- [6] Sandholt P., Ritchie E., Pedersen J.K. and Betz R.E., 1996, "A Dynamometer Performing Dynamical Emulation of Loads with Non-Linear Friction", IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics, vol. 2, pp 873-878.
- [7] Collins E.R. and Huang Y., 1994, "A Programmable Dynamometer for Testing Rotating Machinery Using a Three-Phase Induction Machine", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, no. 3, pp 521-527.
- [8] Betz R.E., Penfold H.B. and Newton R.W., 1994, "Local Vector Control of an AC Drive System Load Simulator", IEEE Conference on Control Applications-Proceedings, vol. 1, pp 721-726.
- [9] Akpolat Z.H., 1997, "Internal Report-2", University of Nottingham, Department of Electrical and Electronic Engineering.

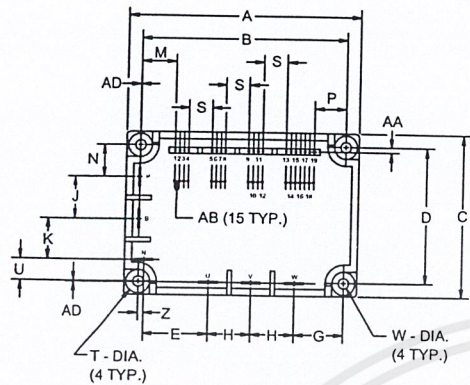
ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank Mitsubishi Electric U.K. and Liftwise Plc. for their support and advice given for this work.

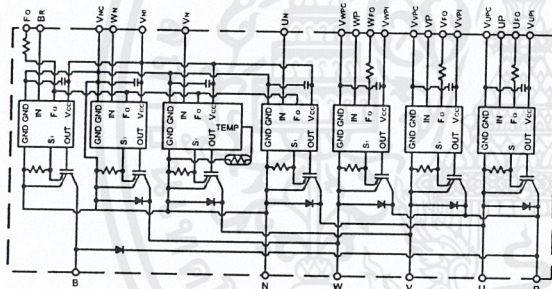
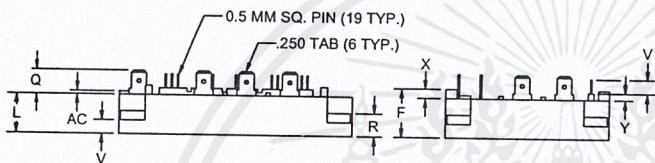
MITSUBISHI INTELLIGENT POWER MODULES

PM25RSB120

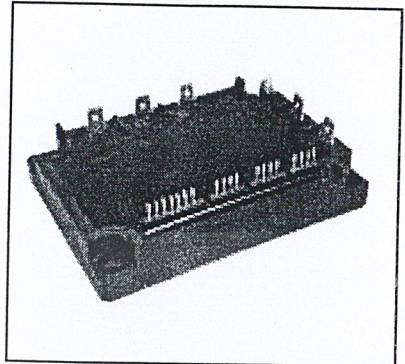
FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE



- | | |
|---------------------|----------------------|
| 1. V _{UPC} | 11. W _P |
| 2. U _{Fo} | 12. V _{WPi} |
| 3. U _P | 13. V _{NC} |
| 4. V _{UPi} | 14. V _{Ni} |
| 5. V _{VPC} | 15. B _R |
| 6. V _{Fo} | 16. U _N |
| 7. V _P | 17. V _N |
| 8. V _{VPI} | 18. W _N |
| 9. V _{WPC} | 19. F _o |
| 10. W _{Fo} | |



Outline Drawing and Circuit Diagram



Description:

Mitsubishi Intelligent Power Modules are isolated base modules designed for power switching applications operating at frequencies to 20 kHz. Built-in control circuits provide optimum gate drive and protection for the IGBT and free-wheel diode power devices.

Features:

- Complete Output Power Circuit
- Gate Drive Circuit
- Protection Logic
 - Short Circuit
 - Over Current
 - Over Temperature
 - Under Voltage

Applications:

- Inverters
- UPS
- Motion/Servo Control
- Power Supplies

Ordering Information:

Example: Select the complete part number from the table below -i.e. PM25RSB120 is a 1200V, 25 Ampere Intelligent Power Module.

Type	Current Rating Amperes	V _{CES} Volts (x 10)
PM	25	120

Dimensions	Inches	Millimeters
A	3.96 ± 0.04	100.5 ± 1.0
B	3.48 ± 0.02	88.5 ± 0.5
C	2.76 ± 0.04	70.0 ± 1.0
D	2.30 ± 0.02	58.5 ± 0.5
E	1.191 ± 0.02	30.25 ± 0.5
F	0.83	21.0
G	0.75	19.0
H	0.73	18.5
J	0.71	18.0
K	0.69	17.5
L	0.67	17.0
M	0.581	14.76
N	0.541	13.75
P	0.541	13.74

Dimensions	Inches	Millimeters
Q	0.41	10.5
R	0.39	10.0
S	0.394 ± 0.010	10.00 ± 0.25
T	0.39 Dia.	Dia. 10.0
U	0.364	9.25
V	0.24	6.0
W	0.18 Dia.	Dia. 4.5
X	0.16	4.0
Y	0.12	3.0
Z	0.88 ± 0.02	2.25 ± 0.5
AA	0.086 ± 0.02	2.18 ± 0.5
AB	0.079 ± 0.010	2.00 ± 0.25
AC	0.06	1.5
AD	0.01 ± 0.02	0.25 ± 0.5



PM25RSB120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

Absolute Maximum Ratings, $T_j = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Ratings	Symbol	PM25RSB120	Units
Power Device Junction Temperature	T_j	-20 to 150	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to 125	$^\circ\text{C}$
Case Operating Temperature	T_C	-20 to 100	$^\circ\text{C}$
Mounting Torque, M4 Mounting Screws	—	0.98 ~ 1.47	N · m
Module Weight (Typical)	—	330	Grams
Supply Voltage Protected by OC and SC ($V_D = 13.5 - 16.5\text{V}$, Inverter Part, $T_j = 125^\circ\text{C}$)	$V_{\text{CC(prot.)}}$	800	Volts
Isolation Voltage (Main Terminal to Baseplate, AC 1 min.)	V_{iso}	2500	Vrms

Control Sector

Supply Voltage (Applied between $V_{\text{UP1}}-V_{\text{UPC}}$, $V_{\text{VP1}}-V_{\text{VPC}}$, $V_{\text{WP1}}-V_{\text{WPC}}$, $V_{\text{N1}}-V_{\text{NC}}$)	V_D	20	Volts
Input Voltage (Applied between U_P-V_{UPC} , V_P-V_{VPC} , W_P-V_{WPC} , $U_N \cdot V_N \cdot W_N \cdot B_r-V_{\text{NC}}$)	V_{CIN}	20	Volts
Fault Output Supply Voltage Applied between ($U_{\text{FO}}-V_{\text{UPC}}$, $V_{\text{FO}}-V_{\text{VPC}}$, $W_{\text{FO}}-V_{\text{WPC}}$, $F_{\text{O}}-V_{\text{NC}}$)	V_{FO}	20	Volts
Fault Output Current (Sink Current at U_{FO} , V_{FO} , W_{FO} and F_{O} Terminal)	I_{FO}	20	mA

IGBT Inverter Sector

Collector-Emitter Voltage ($V_D = 15\text{V}$, $V_{\text{CIN}} = 15\text{V}$)	V_{CES}	1200	Volts
Collector Current, ($T_C = 25^\circ\text{C}$)	I_C	25	Amperes
Peak Collector Current, ($T_C = 25^\circ\text{C}$)	I_{CP}	50	Amperes
Supply Voltage (Applied between P - N)	V_{CC}	900	Volts
Supply Voltage, Surge (Applied between P - N)	$V_{\text{CC(surge)}}$	1000	Volts
Collector Dissipation	P_C	132	Watts

Brake Sector

Collector-Emitter Voltage	V_{CES}	1200	Volts
Collector Current, ($T_C = 25^\circ\text{C}$)	I_C	10	Amperes
Peak Collector Current, ($T_C = 25^\circ\text{C}$)	I_{CP}	20	Amperes
Supply Voltage (Applied between P - N)	V_{CC}	900	Volts
Supply Voltage, Surge (Applied between P - N)	$V_{\text{CC(surge)}}$	1000	Volts
Collector Dissipation	P_C	62	Watts
Diode Forward Current	I_F	10	Amperes
Diode DC Reverse Voltage	$V_{\text{R(DC)}}$	1200	Volts

Sep.1998



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical and Mechanical Characteristics, $T_j = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Characteristics	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Control Sector						
Over Current Trip Level Inverter Part	OC	$-20^\circ\text{C} \leq T \leq 125^\circ\text{C}$, $V_D = 15\text{V}$	32	62	—	Amperes
Over Current Trip Level Brake Part			15	30	—	Amperes
Short Circuit Trip Level Inverter Part	SC	$-20^\circ\text{C} \leq T \leq 125^\circ\text{C}$, $V_D = 15\text{V}$	—	101	—	Amperes
Short Circuit Trip Level Brake Part			—	41	—	Amperes
Over Current Delay Time	$t_{\text{off}}(\text{OC})$	$V_D = 15\text{V}$	—	10	—	μs
Over Temperature Protection	OT	Trip Level	111	118	125	$^\circ\text{C}$
	OT_r	Reset Level	—	100	—	$^\circ\text{C}$
Supply Circuit Under Voltage Protection	UV	Trip Level	11.5	12.0	12.5	Volts
	UV_r	Reset Level	—	12.5	—	Volts
Supply Voltage	V_D	Applied between $V_{\text{UP1}}-V_{\text{UPC}}$, $V_{\text{VP1}}-V_{\text{VPC}}$, $V_{\text{WP1}}-V_{\text{WPC}}$, $V_{\text{N1}}-V_{\text{NC}}$	13.5	15	16.5	Volts
Circuit Current	I_D	$V_D = 15\text{V}$, $V_{\text{CIN}} = 15\text{V}$, $V_{\text{N1}}-V_{\text{NC}}$	—	44	60	mA
		$V_D = 15\text{V}$, $V_{\text{CIN}} = 15\text{V}$, $V_{\text{XP1}}-V_{\text{XPC}}$	—	13	18	mA
Input ON Threshold Voltage	$V_{\text{th(on)}}$	Applied between	1.2	1.5	1.8	Volts
Input OFF Threshold Voltage	$V_{\text{th(off)}}$	U_P-V_{UPC} , V_P-V_{VPC} , W_P-V_{WPC} , $U_N \cdot V_N \cdot W_N \cdot B_r-V_{\text{NC}}$	1.7	2.0	2.3	Volts
PWM Input Frequency	f_{PWM}	3- ϕ Sinusoidal	—	15	20	kHz
Fault Output Current	$I_{\text{FO(H)}}$	$V_D = 15\text{V}$, $V_{\text{FO}} = 15\text{V}$	—	—	0.01	mA
	$I_{\text{FO(L)}}$	$V_D = 15\text{V}$, $V_{\text{FO}} = 15\text{V}$	—	10	15	mA
Minimum Fault Output Pulse Width	t_{FO}	$V_D = 15\text{V}$	1.0	1.8	—	ms

PM25RSB120

**FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE**

Electrical and Mechanical Characteristics, $T_j = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Characteristics	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
IGBT Inverter Sector						
Collector Cutoff Current	I_{CES}	$V_{CE} = V_{CES}, T_j = 25^\circ\text{C}$	—	—	1.0	mA
		$V_{CE} = V_{CES}, T_j = 125^\circ\text{C}$	—	—	10	mA
Emitter-Collector Voltage	V_{EC}	$-I_C = 25\text{A}, V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 5\text{V}$	—	2.5	3.5	Volts
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 0\text{V}, I_C = 25\text{A}$	—	2.5	3.5	Volts
		$V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 0\text{V}, I_C = 25\text{A}, T_j = 125^\circ\text{C}$	—	2.2	3.2	Volts
Inductive Load Switching Times	t_{on}		0.5	1.0	2.5	μs
	t_{rr}	$V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 0 \leftrightarrow 15\text{V}$	—	0.15	0.3	μs
	$t_{C(on)}$	$V_{CC} = 600\text{V}, I_C = 25\text{A}$	—	0.4	1.0	μs
	t_{off}	$T_j = 125^\circ\text{C}$	—	2.0	3.0	μs
	$t_{C(off)}$		—	0.7	1.2	μs
Brake Sector						
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 0\text{V}, I_C = 10\text{A}, T_j = 25^\circ\text{C}$	—	2.8	3.8	Volts
		$V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 0\text{V}, I_C = 10\text{A}, T_j = 125^\circ\text{C}$	—	2.5	3.5	Volts
Diode Forward Voltage	V_{FM}	$-I_C = 10\text{A}, V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 5\text{V}$	—	2.5	3.5	Volts
Collector Cutoff Current	I_{CES}	$V_{CE} = V_{CES}, T_j = 25^\circ\text{C}$	—	—	1	mA
		$V_{CE} = V_{CES}, T_j = 125^\circ\text{C}$	—	—	10	mA



PM25RSB120

**FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE**

Thermal Characteristics

Characteristic	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
Junction to Case Thermal Resistance	$R_{th(j-c)Q}$	Each Inverter IGBT	—	—	0.95	°C/Watt
	$R_{th(j-c)F}$	Each Inverter FWDi	—	—	2.5	°C/Watt
	$R_{th(c-f)Q}$	Each Brake IGBT	—	—	2.0	°C/Watt
	$R_{th(c-f)F}$	Each Brake FWDi	—	—	2.5	°C/Watt
Contact Thermal Resistance	$R_{th(c-f)}$	Case to Fin Per Module, Thermal Grease Applied	—	—	0.036	°C/Watt

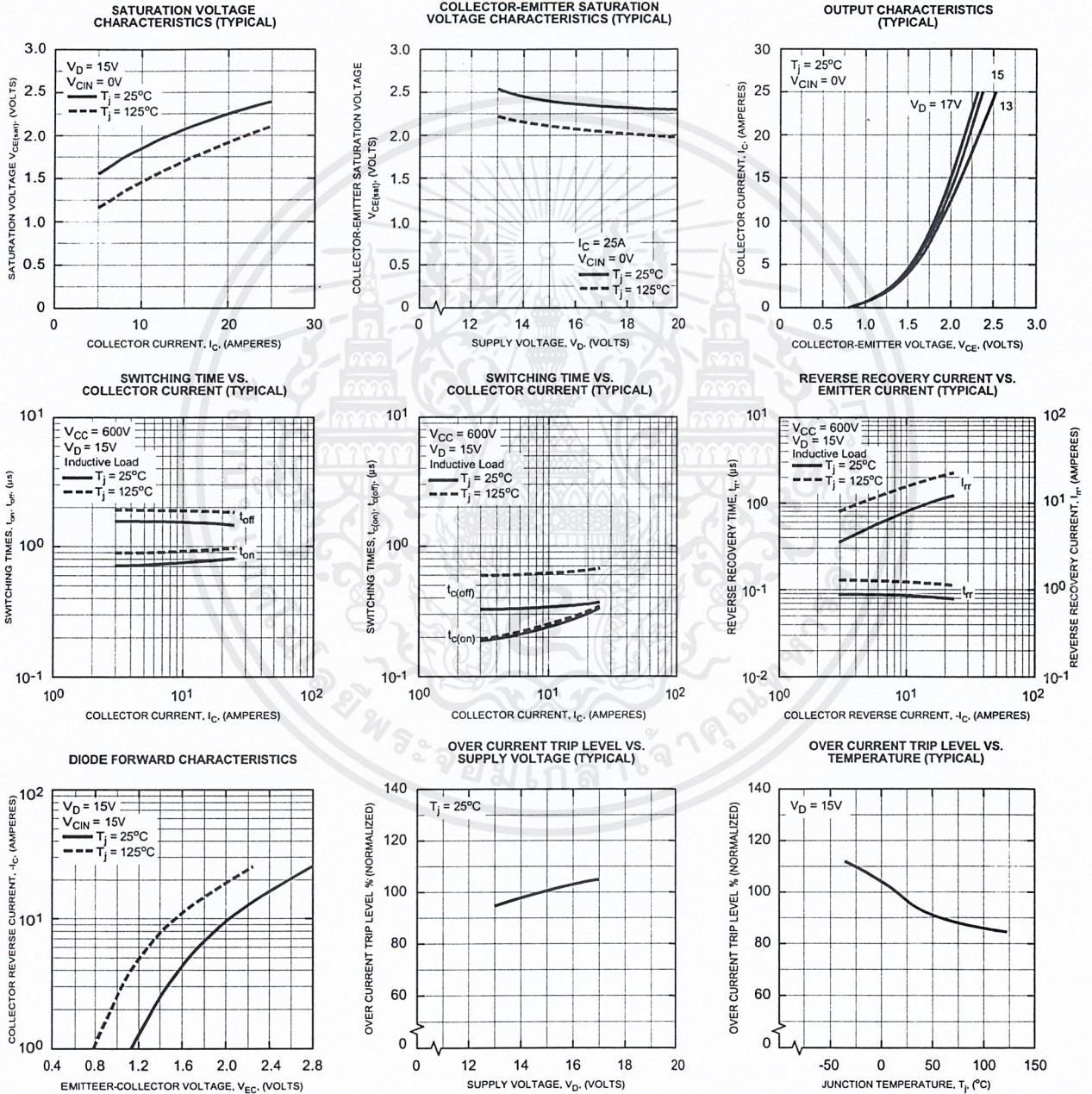
Recommended Conditions for Use

Characteristic	Symbol	Condition	Value	Units
Supply Voltage	V_{CC}	Applied across P-N Terminals	0 ~ 800	Volts
	V_D	Applied between V_{UP1} - V_{UPC} , V_{N1} - V_{NC} , V_{WP1} - V_{WPC} , V_{WP1} - V_{WPC}	15 ± 1.5	Volts
Input ON Voltage	$V_{CIN(on)}$	Applied between	0 ~ 0.8	Volts
Input OFF Voltage	$V_{CIN(off)}$	$U_P, V_P, W_P, U_N, V_N, W_N, B_r$	4.0 ~ V_D	Volts
PWM Input Frequency	f_{PWM}	Using Application Circuit	5 ~ 20	kHz
Minimum Dead Time	t_{dead}	Input Signal	≥ 2.5	μs

PM25RSB120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

Inverter Part

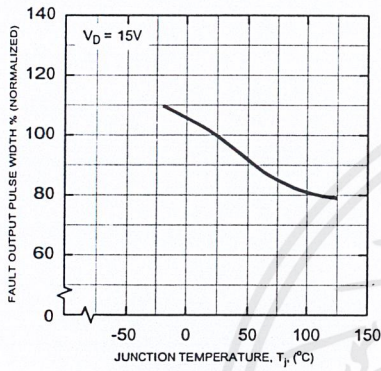


PM25RSB120

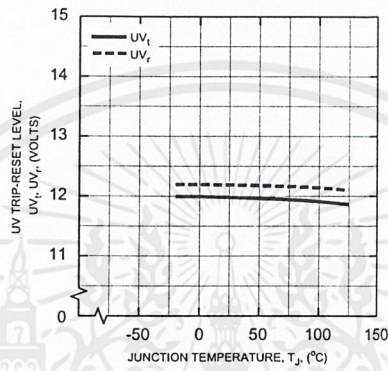
FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

Inverter Part

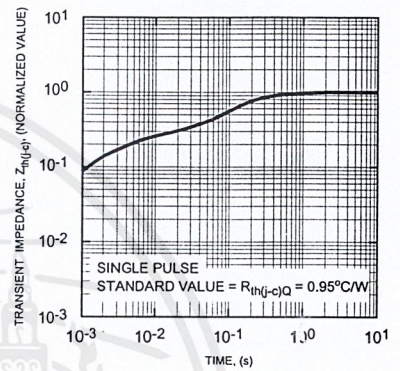
FAULT OUTPUT PULSE WIDTH VS. TEMPERATURE (TYPICAL)



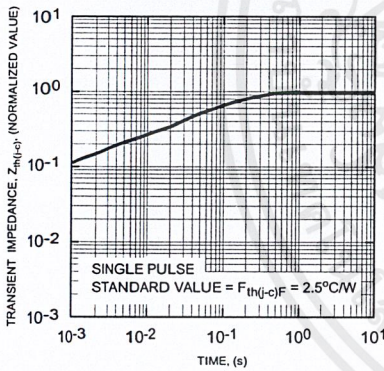
CONTROL SUPPLY VOLTAGE TRIP-RESET LEVEL TEMPERATURE DEPENDENCY (TYPICAL)



TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE CHARACTERISTICS (Each IGBT)



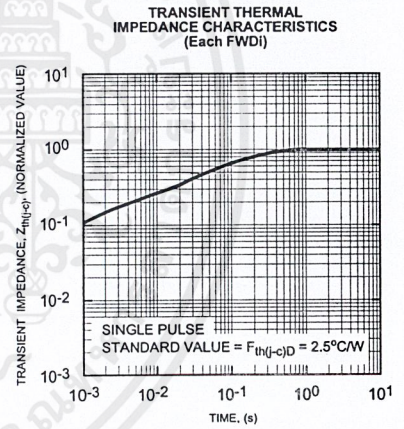
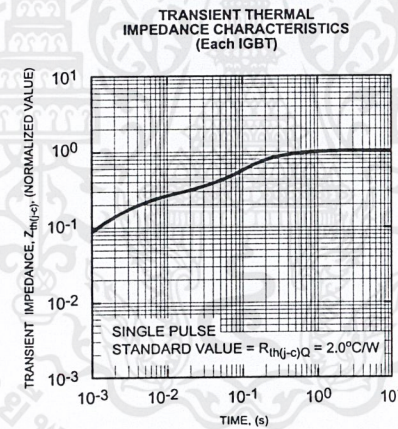
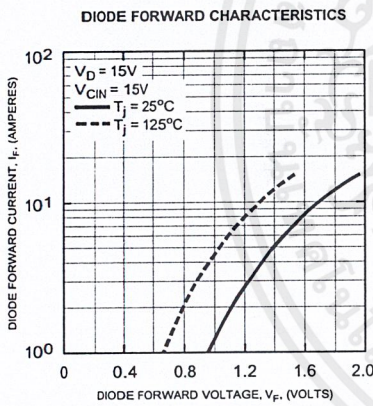
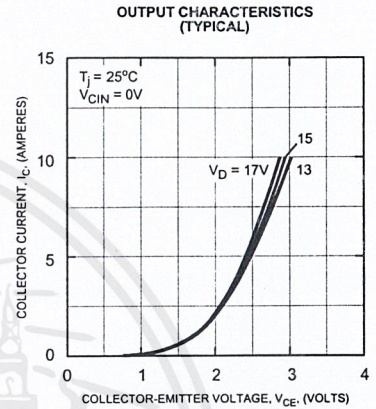
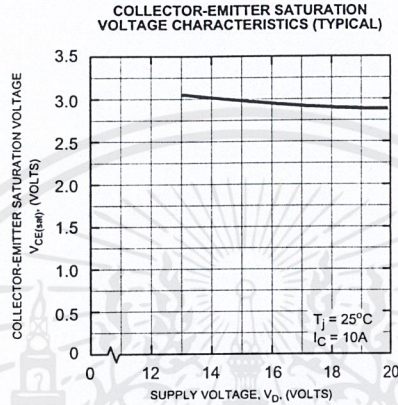
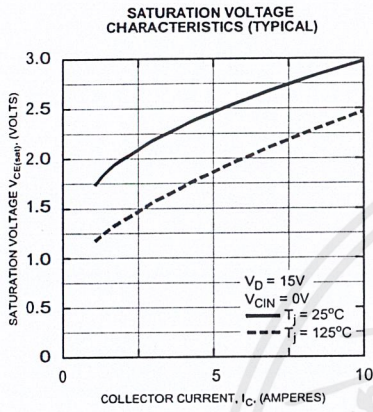
TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE CHARACTERISTICS (Each FWDI)



PM25RSB120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

Brake Part



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.วิจิตร ภิณเรศ , อ. สุรินทร์ คำฝอย เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้ และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโปรเจกมาโดยตลอด และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ได้ให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำโปรเจกนี้ และขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโทที่คอยให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ตลอดมา พร้อมทั้งให้กำลังใจ ดังนี้

1. พี่ตี : พี่ป.โทที่ปรึกษาโปรเจกผู้สนับสนุนอุปกรณ์ที่สำคัญมาก...กกก(APY???)
2. พี่ทัศน์ : ผู้รอบรู้แห่งตึก L : พี่เสก โลโซ มือกีตาร์อันดับหนึ่ง
3. พี่ติง : เซียนPI ผู้มีอิสระในเวลาเลิกงาน ไซ้เกาะเจ้า
4. พี่เอ็ด : มือหนึ่งด้าน Protel ผู้มีร่างกายกำยำที่สุดในตึก L
5. พี่โก้ : เอตตะทัคคะด้านไมโคร ๗ Heroของน้องๆ ขวัญใจพี่ไอ้
6. พี่รัฐ & พี่กมลสันต์ : พี่ที่ใจดีให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์มาโดยตลอด
7. พี่ซอล : นุ่มลึกที่สุดในตึกL เฮ้า!!! Red alert ต่อคิกว่าพี่ ไซ้ม๊วย ไซ้ม๊วย
8. พี่เฉลิมชาติ : ราชาคาราโอเกะ แห่งตึก L อนาคตไกลถ้าร้องแนวลูกทุ่ง
9. พี่ไอ้ : สายที่สุดในตึก L เป็นที่หมายปองของคนทั้งตึก (ไม่เชื่อถามพี่คนที่5)
10. พี่จ๊อบ : แม้มันค้อยได้พบหน้า แต่น้องๆก็ขอขอบคุณสำหรับ...

และขอขอบคุณเพื่อนๆห้อง 4B ที่ให้กำลังใจ รวมทั้งผู้ที่ให้ความช่วยเหลือซึ่งไม่สามารถกล่าวถึงได้ครบทุกคน

บรรณานุกรม

- [1]. N.Mohan , T.M.Underland , W.P. Robbins , “ Power Electronics : Converter,applications and desing” , second Edition John Wiley & Sons , 1995
- [2]. National Data Acquisition Databook , National Semiconductor
- [3]. รศ. สมยศ จุณณะปิยะ , “ การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51” , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2541
- [4]. อุดม จีนประดับ , “ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ” , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ , 2541
- [5]. สมศักดิ์ ศรีขจรเกียรติ, “ Visual Basic 6. Teach Yourself ” , บิблиโอไฟล์ พับลิชชิง , 2542
- [6]. ปรินุญานินพนธ์ การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแดรนต์โดยใช้ไอจีบีที (4 Quadrant IGBT dc drives), ชนินทร์ สิริชาญชัยกุล, ชาตรี กิจวรรณจักร์, โชคอำนวย อัสวพรพิพัฒน์, 2542
- [7].ปรินุญานินพนธ์ การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง, ชนาเนตต์ แสนศรีแก้ว, ภูริ โสธรวิทย์, ยุพดี วงษ์กรรเวช
- [8]. ปรินุญานินพนธ์ การควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบ 4 ควอดแดรนต์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์, พิชัย จินตโกศสวิทย์, ยงยุทธ สกูลหรั่ง, รัฐเวทย์ แววสง่า, สุทธิพล พรหมอักษร
- [9]. ปรินุญานินพนธ์ การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแดรนต์โดยวิธีซอปเปอร์ , ธวัชชัย ฉายไพศาล, นที ศรีพุ่ม, ปิติพัฒน์ สาครินทร์, 2541
- [10]. ปรินุญานินพนธ์ การออกแบบและการวิเคราะห์ 1 เฟสเดลต้ามีอดูเลตอินเวอร์เตอร์สำหรับแหล่งจ่ายไฟต่อเนื่อง (Design and analysis of Single-Phase Delta-Modulated Inverter for UPS) , พรชัย พรหมยารัตน์, มาลี ปรินุญานินเวศน์, อานนท์ รอดรักษา, 2542