

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมมอเตอร์กระแสสลับ

AC MOTOR CONTROL



นายรัช จันทร์ขำ
นายเพิ่มพูน อัมพันธ์แดง

๔๗.

๕๓๙๑ ๗

๒๕๔๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72260
วัน,เดือน,ปี..... 12 ส.ย. 2550

.b. 117 65859
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมมอเตอร์กระแสสลับ
AC MOTOR CONTROL

ผู้จัดทำ นายธวัช จันทร์ขำ รหัสประจำตัว 46010300
นายเพิ่มพูน อัมพันธ์แสง รหัสประจำตัว 46010550

อาจารย์ที่ปรึกษา.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. จงกล งามวิวิทย์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดาวร เบญจนราสุทธิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมมอเตอร์กระแสลับ

โดย

นายรัช จันท์จำ

นายเพิ่มพูน อำพันแดง

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.จกกล งามวิวิทย์

ผศ.ถาวร เบญจนาสุทธี

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสลับแบบวงเปิดด้วยการแปรค่าแรงดัน โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ (PIC 18F4331) เป็นอุปกรณ์ควบคุมหลัก ไมโครคอนโทรลเลอร์จะแปลงแรงดันอ้างอิงซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาสัญญาณพีดับบลิวเอ็มซึ่งมีควิตซ์ไชเกิ้ลที่สอดคล้อง และส่งสัญญาณดังกล่าวผ่านชุดวงจรขับไปขับมอเตอร์ เพื่อให้มอเตอร์มีความเร็วรอบและทิศทางการที่ต้องการ

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันอ้างอิงโดยการปรับค่าความต้านทาน ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถคำนวณหาสัญญาณพีดับบลิวเอ็มซึ่งมีควิตซ์ไชเกิ้ลที่สอดคล้องได้ และทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนไป โดยความเร็วรอบที่ได้จริงจากวงจรที่ออกแบบขึ้น สอดคล้องกับความเร็วตามการคำนวณทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC MOTOR CONTROL

By

Mr. Thawat Jankum

Mr. Preampoon Umpandang

Advisor

Assoc.Prof.Dr.Jongkol Ngamwiwit

Asst.Prof.Taworn Benjanarasuth

Academic Year 2006

Abstract

This thesis presents the open-loop speed control of AC induction motor by specifying the magnitude of input voltage. Microcontroller PIC 18F4331 is employed as a main controller. The tasks of the microcontroller consist of acquiring analog reference voltages to digital signals via its built-in A/D converter, computing command PWM signals with corresponding duty cycle and sending the PWM signals to the driver circuit. The speed of the motor can then be changed by varying the reference voltage.

From the experiments, the implemented controller is capable to acquire the reference voltages that can be adjusted by using a variable resistant. The corresponding PWM signals with suitable duty cycle can then be computed and transmitted to the driver circuit. As a result, the speed of the AC motor can be controlled to a desired value.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากคำแนะนำดี ๆ จาก รศ.ดร.จงกล งามวิวิทย์ และ ผศ.ถาวร เบญจนราษฎร์ และด้วยความรู้ที่ได้จากอาจารย์ทุกท่าน ที่นำมาบูรณาการและ ประยุกต์ใช้จนทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จได้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบคุณกำลังใจ กำลังกาย และกำลังสมองจากเพื่อน ๆ น้องๆ ที่มีให้ผู้จัดทำอย่างมากมาย และ คอยช่วยเหลือด้วยดีตลอดมาตั้งแต่เริ่มจัดทำจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนทุกคนในครอบครัว ที่คอย ห่วงใย และเป็นกำลังใจให้เสมอมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| เรื่อง | หน้า |
|-------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญรูป..... | VIII |

บทที่ 1 บทนำ

| | |
|---|---|
| 1.1 ความสำคัญของปริยฐานิพนธ์..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 วิธีการดำเนินงาน..... | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิจัย..... | 3 |

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....

| | |
|---|----|
| 2.1 บทนำเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... | 4 |
| 2.1.1 การกำเนิดแรงบิด..... | 5 |
| 2.1.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้า..... | 9 |
| 2.1.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน..... | 12 |
| 2.1.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่..... | 13 |
| 2.1.5 คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็ว..... | 17 |
| 2.1.6 การชดเชยแรงดันเพิ่มเมื่อความถี่ป้อนที่ค่าต่ำๆ..... | 18 |
| 2.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์..... | 19 |
| 2.2.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส..... | 20 |
| 2.2.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน..... | 20 |
| 2.2.3 พี ดับบลิว เอ็ม อินเวอร์เตอร์..... | 21 |
| 2.2.4 เทคนิคไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม..... | 22 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| เรื่อง | หน้า |
|--|-----------|
| 2.2.5 เทคนิคสเปซเวกเตอร์..... | 24 |
| 2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์..... | 24 |
| 2.3.1 บทนำ | 24 |
| 2.3.2 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์..... | 25 |
| 2.3.3 ข้อแตกต่างระหว่างไมโครโปรเซสเซอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์..... | 25 |
| 2.3.4 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล PIC | 26 |
| 2.3.4.1 หน่วยประมวลผลกลาง (CPU: Central Processing Unit)..... | 27 |
| 2.3.4.2 หน่วยความจำ..... | 27 |
| 2.3.4.3 พอร์ตอินพุต/เอาต์พุต (I/O port)..... | 28 |
| บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง..... | 29 |
| 3.1 การออกแบบและสร้างชุดกำลังของอินเวอร์เตอร์..... | 29 |
| 3.1.1 วงจรบริดจ์เร็คตีไฟเออร์..... | 29 |
| 3.1.2 การออกแบบและสร้างวงจรขับนำ IGBT..... | 30 |
| 3.1.3 การเลือกอุปกรณ์การสวิตซ์ซิ่ง..... | 31 |
| 3.2 ส่วนการควบคุม..... | 31 |
| 3.2.1 PIC18F4331กับการควบคุมกำลังงาน โดยสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม..... | 32 |
| 3.2.2 หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... | 33 |
| 3.3 หลักการทำงานของโปรแกรม..... | 34 |
| บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง..... | 40 |
| 4.1 การทดลองที่ 1 ทดลองการทำงานของวงจรส่วนควบคุม..... | 40 |
| 4.2 การทดลองที่ 2 ทดลองส่วนวงจรขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... | 41 |
| 4.3 การทดลองที่ 3 ทดลองควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... | 42 |
| บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป..... | 45 |
| 5.1 สรุปวิจารณ์ผลการทดลอง..... | 45 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| เรื่อง | หน้า |
|--|-----------|
| 5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน..... | 45 |
| 5.3 สรุปผลการดำเนินงาน..... | 46 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 47 |
| ภาคผนวก ก..... | 49 |
| ภาคผนวก ข..... | 74 |
| ภาคผนวก ค..... | 91 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1 ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการแปรค่าแรงดัน.....43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---------|--|
| 2.1 | โครงสร้างการวางขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็ก.....5 |
| 2.2 | การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน.....6 |
| 2.3 | โรเตอร์ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุน.....6 |
| 2.4 | หลักการเกิดกระแสเหนี่ยวนำ.....7 |
| 2.5 (ก) | วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....9 |
| 2.5 (ข) | วงจรสมมูลทางไฟฟ้ารวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....9 |
| 2.6 | กราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อปรับแรงดันที่สเตเตอร์.....13 |
| 2.7 | กราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่.....14 |
| 2.8 | กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบที่อัตราส่วน V_s/ω_s คงที่.....15 |
| 2.9 | กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของVVVF.....16 |
| 2.10 | พื้นที่การทำงานและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆที่ได้จากรูปที่ 2.9.....17 |
| 2.11 | กราฟคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่ค่าสลิปต่ำ.....18 |
| 2.12 | ความต้องการแรงดันชดเชยเพื่อรักษาฟลักซ์คงที่เมื่อความถี่ต่ำๆ.....19 |
| 2.13 | อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส.....20 |
| 2.14 | พี ดับบลิว เอ็ม อินเวอร์เตอร์.....21 |
| 2.15 | หลักการสร้างสัญญาณแบบไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม.....23 |
| 2.16 | หลักการสร้างสัญญาณแบบสเปซเวกเตอร์.....24 |
| 2.17 | โครงสร้างพื้นฐานของไมโคร โปรเซสเซอร์.....24 |
| 2.18 | โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์.....25 |
| 3.1 | วงจรบริดจ์เร็คติไฟเออร์.....30 |
| 3.2 | วงจรขับนำ IGBT.....31 |
| 3.3 | ลักษณะของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4331.....32 |
| 3.4 | วงจร H-Bridge.....33 |
| 3.5 | สัญญาณขับนำเกทของ T_{A1} และ T_{A2}33 |
| 3.6 | บล็อกไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการควบคุมความเร็วมอเตอร์.....34 |
| 3.7 | โพลัวชาร์ตแสดงการทำงานของลูปหลัก.....34 |
| 3.8 | โพลัวชาร์ตแสดงการตรวจสอบการผิดพลาด.....35 |
| 3.9 | โพลัวชาร์ตแสดงการทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางและการเปิดปิดการทำงาน.....36 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.10 โฟล์วชาร์ตแสดงการเกิดอินเตอร์รัปต์..... | 37 |
| 4.1 สัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์..... | 41 |
| 4.2 สัญญาณที่ได้จากการทำงานของวงจรควบคุมและวงจรจับ..... | 42 |
| 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดัน..... | 43 |
| ค.1 วงจรส่วนควบคุมหลัก..... | 91 |
| ค.2 วงจรจับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... | 92 |
| ค.3 วงจรจับมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 93 |
| ค.4 วงจรควบคุม..... | 93 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในปัจจุบันนี้การใช้มอเตอร์กระแสสลับแบบเหนี่ยวนำในภาคอุตสาหกรรม ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำมีข้อดีกว่ามอเตอร์กระแสตรง กล่าวคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความแข็งแรงทนทานมากกว่า ไม่ต้องมีการดูแลบำรุงรักษาแปร่งถ่าน และคอมมิวเตเตอร์ อีกทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำยังมีขนาดเล็กกว่ามอเตอร์กระแสตรงเมื่อเปรียบเทียบที่พิกัดกำลังที่เท่ากัน

จากการศึกษาพบว่าสิ่งที่มีผลต่อความเร็วรอบของมอเตอร์มีอยู่ 2 ปัจจัย คือ ขนาดของแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ และความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ หมายความว่าถ้าสามารถควบคุม ความถี่และแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้ก็จะสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้เช่นกัน

ในอดีตที่ผ่านมาการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้นจำเป็นต้องมีแผงวงจรมาก เพราะมีปัจจัยต่างๆ ที่ต้องควบคุม เพื่อให้ระบบนั้นสามารถทำงานได้ และทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้นมีความเร็วรอบ และทิศทางที่ต้องการ อีกทั้งยังต้องมีวงจรเพื่อป้องกันความผิดพลาดซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้

ในโครงการนี้ได้นำเสนอการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับแบบการแปรค่าแรงดันและความถี่ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (PIC 18F4331) ที่มีส่วนในการประมวลผลเชิงดิจิทัล (DSP: Digital Signal Processing) และถูกผลิตขึ้นเพื่อการใช้งานในส่วนควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะ เป็นส่วนควบคุมหลัก ไมโครคอนโทรลเลอร์จะแปลงแรงดันซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความถี่ของสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม เพื่อส่งสัญญาณผ่านชุดวงจรขับไปขับมอเตอร์ เพื่อทำให้มอเตอร์มีความเร็วรอบและทิศทางตามที่ต้องการ และในส่วนของวงจรควบคุมนั้นได้ทำสวิตซ์ต่างๆ และสัญญาณไฟ LED ไว้แสดงผลเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน และตรวจสอบความผิดพลาดอีกด้วย

การใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นส่วนควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้นมีข้อดีหลายประการ คือทำให้สามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ และใช้งานได้สะดวก พร้อมทั้งยังมีข้อดีในการลดการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องจากปัจจุบันนี้มีการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส อย่างแพร่หลาย เพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำมีข้อดีหลายประการ จึงเป็นที่นิยมใช้ทั้งในภาคอุตสาหกรรม และอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบต่างๆ เพื่อหาข้อดี ข้อเสียของการควบคุมความเร็วแบบต่างๆ
3. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมได้
4. เพื่อศึกษา ออกแบบ และทดลองวงจรต่างๆ เช่น วงจรส่วนกำลัง วงจรขับ วงจรในส่วนของการควบคุม ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
5. เพื่อศึกษาและทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยการแปรค่าแรงดันและความถี่ที่ให้กับมอเตอร์ โดยใช้การแปรค่าความต้านทาน จากตัวต้านทานที่สามารถแปรค่าได้ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อก มาเป็นข้อมูลดิจิทัลและนำค่านี้ไปกำหนดความถี่ของสัญญาณ พี คับบลิว เอ็ม ที่สั่งงานมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยผ่านชุดวงจรขับที่สร้างขึ้น เพื่อให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส นั้นมีความเร็วตามที่ต้องการ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษารูปร่างการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้น ต้องใช้ความรู้ความเข้าใจในหลายๆ ด้าน เพื่อให้มีความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆ ที่ต้องใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ จึงได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาขึ้นดังนี้

1. มีความเข้าใจทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และทฤษฎีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
2. มีความเข้าใจในหลักการการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมได้ตามที่ต้องการ
3. ศึกษาทดลองวงจรต่างๆที่ใช้ในการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
4. สามารถสร้างวงจรที่สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

1.4 วิธีการดำเนินการ

การจัดทำปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้มีการศึกษาหลายขั้นตอน โดยสามารถแบ่งเป็นลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

1. ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และเทคนิคการควบคุมความเร็วชนิดต่าง ๆ จากตำรา และวารสารต่าง ๆ
2. ออกแบบวงจรต่าง ๆ ที่ใช้ในการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
3. ศึกษาการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์
4. ทดลองวงจรแต่ละส่วน
5. ทดลองและปรับปรุงวงจรรวม
6. เก็บผลการทดลองที่ได้
7. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง
8. จัดทำรูปเล่มปฏิญานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิจัย

การจัดทำปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ มีข้อมูลและทฤษฎีที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และมีขั้นตอนในการศึกษาหลายขั้นตอน ทำให้เกิดประโยชน์จากการทำการศึกษา ดังนี้

1. มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
2. มีความรู้ความเข้าใจในเทคนิคการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบต่างๆ
3. สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์เพื่อการใช้งานในรูปแบบอื่น ๆ ได้
4. ได้เรียนรู้การแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทำงานเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานจริง
5. ความรู้ที่ได้จะเป็นพื้นฐานไปสู่การควบคุมในรูปแบบต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมาใช้ในงานที่มีการปรับความเร็วรอบเริ่มมีการใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างของมอเตอร์ให้เสียก่อน ซึ่งการศึกษาโครงสร้างโดยรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสจะทำให้มีความเข้าใจมากขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ออกแบบระบบควบคุมต่อไป ในบทนี้จะมีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำอยู่ด้วย เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานในการศึกษาต่อไป

2.1 บทนำเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ด้วยกัน 2 ส่วนได้แก่ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุน (Rotor) ซึ่งสามารถทำการแยกประเภทของมอเตอร์ได้ตามลักษณะของขดลวดที่โรเตอร์ ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) และแบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor) โดยความแตกต่างของมอเตอร์ทั้งสองแบบเป็นดังนี้

โรเตอร์แบบกรงกระรอก

- ฝั่งขดลวดลงแกนเหล็กทำให้เวลาหมุนไม่เกิดการเคลื่อนที่ของขดลวด
- ราคา, น้ำหนัก, ปริมาตร น้อยกว่ามอเตอร์แบบอื่น

โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์

- ขดลวดทองแดงพันรอบโรเตอร์
- มีการต่อกับแปรงถ่าน

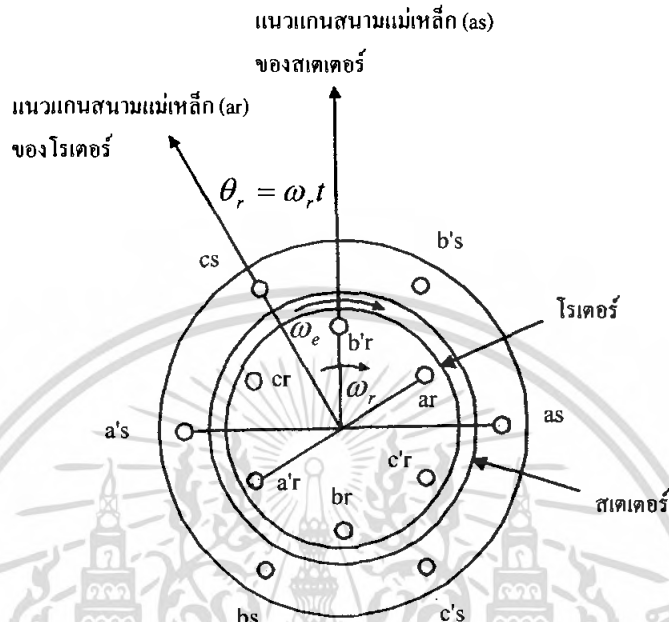
โครงสร้างทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะประกอบไปด้วยขดลวดสนามเฟสพันกระจายอยู่ในสล๊อต (Slot) โดยแต่ละเฟสจะวางห่างกันเป็นมุม 120 องศาทางไฟฟ้า

โครงสร้างทางด้านโรเตอร์นั้นจะประกอบไปด้วยแผ่นเหล็กลามิเนตอัดทับกัน โดยมีแท่งตัวนำสอดผ่านแผ่นเหล็กเหล่านี้ แล้วลัดวงจรหัวท้ายด้วยวงแหวนปิด (End Ring) จึงทำให้โครงสร้างคล้ายกับกรงกระรอก จึงเป็นที่มาของการเรียกโรเตอร์แบบกรงกระรอก โรเตอร์แบบนี้จะมีโครงสร้างที่ง่าย ราคาถูก และแข็งแรงมาก

ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็กในอุดมคติจะแสดงได้ดัง รูปที่ 2.1 ซึ่งแต่ละเฟสของ สเตเตอร์ประกอบด้วยขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก 1 ชุด เมื่อต่อไฟให้ขดลวดบนสเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่าน โรเตอร์ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำและแรงบิดที่ทำให้โรเตอร์หมุน ดังนั้นจึงเรียกเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทนี้ว่า เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการวางขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็ก

2.1.1 การกำเนิดแรงบิด

จากรูปที่ 2.1 เมื่อจ่ายไฟ 3 เฟส เข้าไปที่สเตเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 โดยที่สนามแม่เหล็กนี้ จะหมุนรอบสเตเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) ตามสมการที่ (2.1)

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

เมื่อ N_s คือ ความเร็วซิงโครนัสมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm)

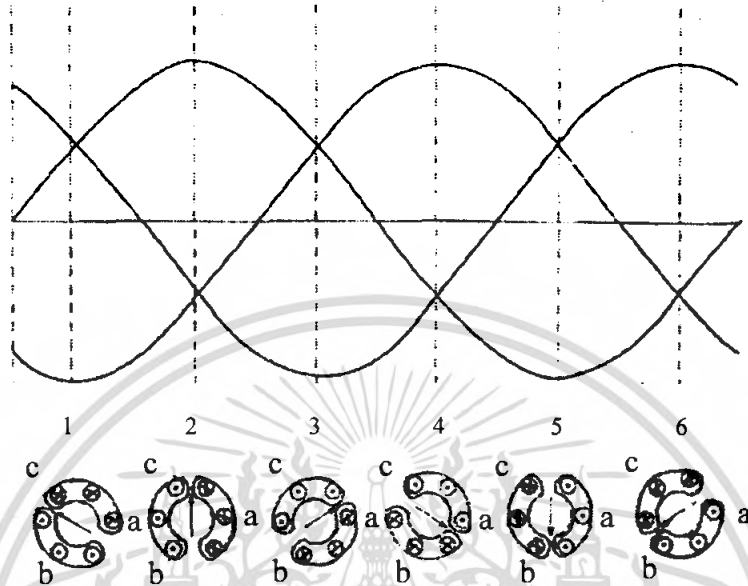
f_s คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

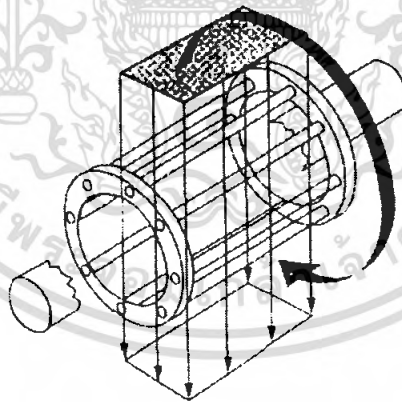
และในทันทีที่เกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบสเตเตอร์ ตัวโรเตอร์ซึ่งวางอยู่ภายในสเตเตอร์ก็จะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุนนี้ ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจรของโรเตอร์ซึ่งมีลักษณะลัดวงจร ดังรูปที่ 2.3 ทิศทางของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ที่เกิดขึ้นจะเป็นไปในลักษณะที่ทำให้กระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในทิศทางที่ต่อต้านกับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดขึ้นมา หลักการกำเนิดแรงเคลื่อนและกระแสเหนี่ยวนำนี้คือกฎของเลนซ์
นั่นเอง

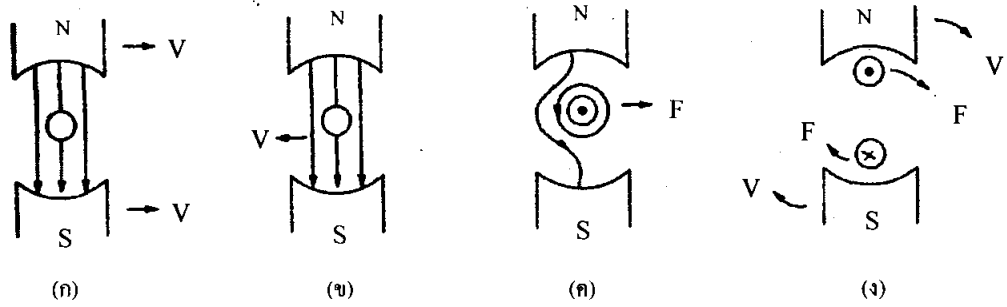


รูปที่ 2.2 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน



รูปที่ 2.3 โรเตอร์ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 หลักการเกิดกระแสเหนี่ยวนำ

หลักการกำเนิดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.4(ก) โดยสมมติว่ามีแม่เหล็กคู่หนึ่งเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กและในสนามแม่เหล็กนี้วงตัดผ่านแท่งตัวนำไปทางขวาด้วยความเร็ว v จากหลักการความเร็วสัมพัทธ์อาจกล่าวได้ว่ามีผลเหมือนกับว่าสนามแม่เหล็กอยู่กับที่ และตัวนำถูกทำให้วิ่งผ่านไปทางซ้ายด้วยความเร็ว v แทน ดังแสดงในรูป 2.4 (ข) ใช้กฎของเลนซ์ก็จะได้ว่า กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะต้องมีทิศทางที่ทำให้เกิดแรงผลักตัวนำไปทางขวา ทั้งนี้เพื่อต่อต้านการเคลื่อนที่ไปทางซ้ายซึ่งทิศทางดังกล่าวในกรณีนี้ก็คือ กระแสต้องมีทิศออกจากหน้ากระดาษดังรูปที่ 2.4(ค) เมื่อพิจารณาแท่งตัวนำ 2 ตัว ที่ประกอบกันเป็นโรเตอร์ที่มีสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์หมุนตัดผ่าน จะทำให้แรงบิดเกิดขึ้นบนโรเตอร์ตามรูปที่ 2.4 (ง)

มอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นหากขาดความเร็วที่แตกต่างระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์กับความเร็วบนตัวโรเตอร์ การเหนี่ยวนำย่อมไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อใดก็ตามเมื่อมอเตอร์มีภาระแม่เหล็กเล็กน้อยเช่นแรงเสียดทานต่อการหมุนของมอเตอร์ ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนช้ากว่าสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ทันที ซึ่งความแตกต่างระหว่างความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ กับความเร็วของโรเตอร์เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สลิป ซึ่งมีค่าเท่ากับ $N_s - N_r$ และสามารถเขียนเป็น สลิปต่อหนึ่งหน่วย (Per Unit Slip) ได้ดังนี้

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_r} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s}$$

- เมื่อ ω_s คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กหมุนบนโรเตอร์
 ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์
 ω_{sl} คือ ความเร็วเชิงมุมของสลิป
 N_s คือ ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์
 N_r คือ ความเร็วของโรเตอร์

โดยปกติมักจะเรียกค่าสลิปหนึ่งหน่วยว่าสลิป แต่ถือเป็นเข้าใจว่า หมายถึงสลิปต่อหนึ่งหน่วย เมื่อโรเตอร์ถูกสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์หมุนตัดผ่าน ด้วยความเร็ว ω_{sl} จึงทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนโรเตอร์มีความเร็วเชิงมุมเท่ากับ ω_{sl} เช่นกัน ค่า ω_{sl} นี้จะขึ้นอยู่กับโหลด เพราะเมื่อโหลดมากขึ้น จะมีผลทำให้โรเตอร์หมุนช้าลงและส่งผลต่อเนื่องทำให้ $\omega_s - \omega_r$ มีค่ามากขึ้น กล่าวคือโรเตอร์จะถูกสนามแม่เหล็กสลิปหมุนตัดด้วยความเร็วมากขึ้นตามกฎของฟาราเดย์

เมื่อการหมุนตัดมีความเร็วมากขึ้น แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำก็ยิ่งมากขึ้นตามสมการ $\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt}$ ผลคือกระแสในตัวโรเตอร์มากขึ้น และด้วยหลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อกระแสในด้านทุติยภูมิมากขึ้นก็ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์ซึ่งเป็นกระแสปฐมภูมิมีค่ามากขึ้น จึงกล่าวได้ว่าภาระทางกลจะถูกส่งผ่านเข้าสู่ภาระทางไฟฟ้าในรูปของค่าสลิปหรือค่าความแตกต่างระหว่าง ω_s กับ ω_r นั่นเอง

เนื่องจากว่าโรเตอร์นั้นก็หมุนด้วยความเร็ว ω_r อยู่แล้ว ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กบนโรเตอร์จึงหมุนด้วยความเร็ว $\omega_r + \omega_{sl} = \omega_s$ เทียบกับจุดหยุดนิ่งบนสเตเตอร์ ซึ่งความเร็วเชิงมุมนี้ก็มีความเร็วเชิงมุมเดียวกับสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์ ดังนั้นแรงบิดจึงเกิดจากสมการแม่เหล็กที่เกิดจากสมการแม่เหล็กทั้ง 2 ตัวนี้รวมกันทางเวกเตอร์ และหาได้จากสมการ

$$T = \pi \left(\frac{P}{2} \right) l r B_p F_p \sin \delta \quad (2.3)$$

เมื่อ l คือ ความยาวตามแนวแกนของตัวนำที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก

r คือ รัศมีของโรเตอร์

B_p คือ ค่าสูงสุดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศ (Air gap flux density)

F_p คือ ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ (Rotor mmf)

สมการที่ (2.3) นี้สามารถเขียนได้อีกรูปหนึ่งคือ

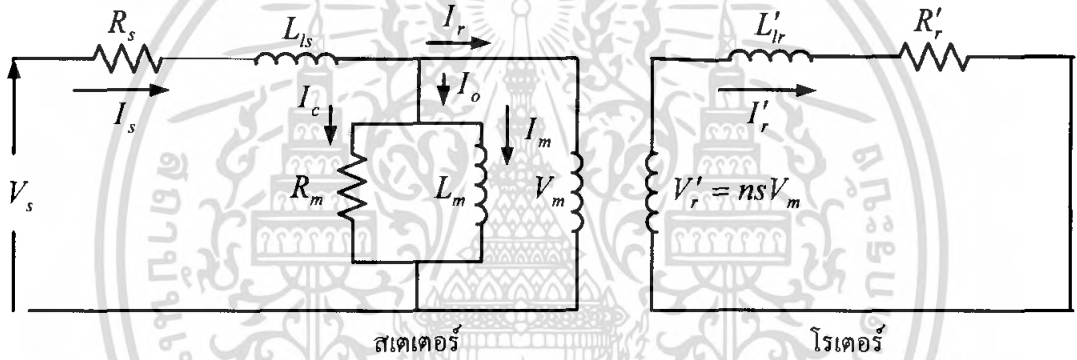
$$T = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) |\overline{\psi}_m| |I_r| \sin \delta \quad (2.4)$$

เมื่อ $|\overline{\psi}_m|$ คือ ค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กสลิปต่อขั้วแม่เหล็ก

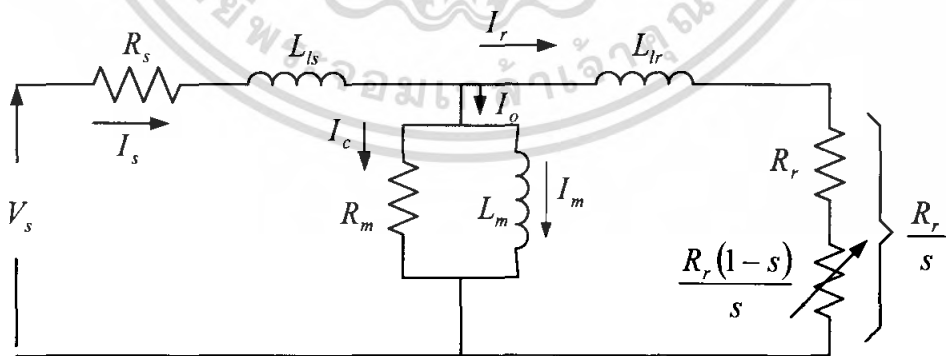
$|I_r|$ คือ กระแสสูงสุดบนโรเตอร์

2.1.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

ตามที่ได้ทราบแล้วว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบไปด้วย ส่วนประกอบหลักๆ 2 ส่วนด้วยกัน คือ ในส่วนของขดลวดด้านปฐมภูมิ และขดลวดด้านทุติยภูมิ เพียงแต่ต่างกันตรงที่ด้านทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถหมุนได้ ดังนั้นจึงสามารถเขียน วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ในลักษณะเดียวกันกับหม้อแปลงไฟฟ้าทุกประการ ดังแสดง ในรูปที่ 2.5 พลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำจะจ่ายผ่านทางด้านสเตเตอร์เท่านั้น แล้ว เหนี่ยวนำพลังงาน ไปสู่ด้าน โรเตอร์ ซึ่งสามารถเรียกพฤติกรรมที่เกิดขึ้นแบบนี้ได้ว่า “Singly Excited” ซึ่งต่างจากมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบซิงโครนัสที่จะต้องมิชคฟิวส์อิสระต่อภายนอกหรือที่ เรียกว่า “Doubly Excited” กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถพิจารณาได้ จากการไหลของพลังงานผ่านวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งถ้ามีความเข้าใจเกี่ยวกับวงจร สมมูลของมอเตอร์แล้วจะทำให้การศึกษารูปแบบของกำลังงานการสูญเสียเป็นไปได้อย่างยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.5 (ก) วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.5 (ข) วงจรสมมูลทางไฟฟ้ารวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อ V_s คือ แรงดันต่อเฟสที่ป้อนให้กับมอเตอร์

I_s คือ กระแสต่อเฟสทางด้านสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- R_s คือ ความต้านทานต่อเฟสทางด้านสเตเตอร์
 L_{ls} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสเตเตอร์
 L_m คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก
 R_m คือ ความต้านทานแทนการสูญเสียของแกนเหล็ก
 I_r คือ กระแสต่อเฟสทางด้านโรเตอร์ที่ย้ายมาทางสเตเตอร์
 R_r คือ ความต้านทานต่อเฟสทางด้านโรเตอร์ที่ย้ายมาทางสเตเตอร์
 L_{lr} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของโรเตอร์
 I_m คือ กระแสแมกนีไทซิง (Magnetizing current) ต่อเฟส
 I_c คือ กระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก
 I_o คือ กระแสที่ทำให้เกิดกระแสเอ็กไซไซตริง (Exciting current)

จากรูปที่ 2.5 (ก)

$$I_r = nI_r' = \frac{n^2 s V_m}{R_r' + j\omega_s L_{lr}} \quad (2.5)$$

ค่าพารามิเตอร์ R_r และ L_{lr} เป็นค่าที่โอนไปไว้ทางสเตเตอร์แล้ว จากภาพและสมการที่ (2.5) จะเห็นว่าถ้าค่า s ยิ่งมาก I_r ก็ยิ่งมากตาม ณ จุดที่มอเตอร์หยุดนิ่ง $s=1$ เปรียบเสมือนการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ในขณะที่ความเร็วซิงโครนัส $s=0$ เปรียบเสมือนการเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง การรับโหลดของมอเตอร์จะถูกส่งผ่านเข้าสู่ระบบในรูปของการเปลี่ยนค่าสลิป s ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ถ้าโหลดน้อยค่าสลิป s ก็เข้าใกล้ 0 แต่ถ้าโหลดมากค่าสลิป s ก็วิ่งเข้าหา 1

จากรูปที่ 2.4 สามารถเขียนสมการอยู่ในรูปของขนาดได้คือ

$$T = k\psi_m I_r \sin \delta \quad (2.6)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่เนื่องจาก ω_m จะแปรผันตรงกับ I_m ดังนั้น

$$T = k'I_m I_r \sin \delta \quad (2.7)$$

จากรูปที่ 2.5 หากประมาณว่า $R_m \rightarrow \infty$ จนมีผลทำให้ $I_c \rightarrow 0$ จะทำให้ $I_o \cong I_m$ และถ้าหลัง $V_m \cong 90^\circ$ และมีผลทำให้ $I_r \cos(\delta - 90^\circ) = I_r \sin \theta$ แต่เนื่องจาก $\cos(\delta - 90^\circ) = \sin \delta$ จึงเขียนสมการ T ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} T &= k'I_m I_r \sin \theta \\ &= k'I_m I_o \end{aligned} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $I_a = I_s \sin \theta$ ซึ่งถือเป็นส่วนประกอบของแรงบิด (Torque component) ที่เฟ่งตัวอยู่ใน กระแสสเตเตอร์ สำหรับค่าทางไฟฟ้าอื่นๆ สามารถระบุได้ดังนี้
กำลังงานอินพุตที่จ่ายให้กับมอเตอร์

$$P_{in} = 3V_s I_s \cos \phi \quad (2.9)$$

กำลังงานสูญเสียในตัวนำที่สเตเตอร์

$$P_{cu-stator} = 3I_s^2 R_s \quad (2.10)$$

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก

$$P_{iron} = 3 \frac{V_m^2}{R_m} \quad (2.11)$$

กำลังงานที่ข้ามช่องอากาศไปโรเตอร์

$$P_g = 3I_r^2 \frac{R_r}{s} \quad (2.12)$$

กำลังงานสูญเสียในตัวนำที่โรเตอร์

$$P_{cu-rotor} = 3I_r^2 R_r \quad (2.13)$$

กำลังงานไฟฟ้าขาออก

$$P_o = P_g - P_{cu-rotor} = 3I_r^2 \frac{1-s}{s} \quad (2.14)$$

กำลังงานเอาต์พุตทางกลของมอเตอร์

$$P_{sh} = P_o - P_{mesh} \quad (2.15)$$

เมื่อ P_{mesh} คือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านทางกล ส่วนกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กที่โรเตอร์นั้นได้ถูกนำไปรวมไว้กับสเตเตอร์ตั้งแต่เขียนวงจร สมมูลแล้ว ดังนั้น

$$\begin{aligned} T &= \frac{P_o}{\omega_m} \\ &= \frac{3}{\omega_m} I_r^2 R_r \frac{1-s}{s} \end{aligned} \quad (2.16)$$

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์มีค่าเท่ากับ $\left(\frac{2}{P}\right)\omega$, สำหรับ $\omega_m = \left(\frac{2}{P}\right)\omega$, ซึ่ง ω , คือ

ความเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ เป็นความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่ามากกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเท่ากับความเร็วเชิงมุมทางกลของตัวโรเตอร์เองเสมอ ถ้าเป็นมอเตอร์ 2 ขั้ว ความเร็วของ ω_r และ ω_m ก็จะเท่ากัน เนื่องจากว่าในขณะที่สนามแม่เหล็กเดินทางจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งซึ่งถือเป็น 180° ไฟฟ้า ตัวโรเตอร์จริงๆก็จะเดินทางได้ระยะ 180° ทางกลเช่นกัน แต่ถ้าเป็นมอเตอร์ 4 ขั้ว ในขณะที่สนามแม่เหล็กเดินทางจากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่งซึ่งถือเป็น 180° ไฟฟ้าตัวโรเตอร์จะหมุนไปได้เพียง 90° ทางกลเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงให้ $\omega_m = \left(\frac{2}{P}\right)\omega_r$

จากสมการที่ (2.2)

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}, \quad \omega_r = \omega_s - s\omega_s = \omega_s(1-s)$$

จะได้

$$\omega_r = \omega_s - s\omega_s = (1-s)\omega_s \quad (2.17)$$

$$\omega_m = \left(\frac{2}{P}\right)(1-s)\omega_s \quad (2.18)$$

แทนสมการที่ (2.18) ลงในสมการที่ (2.16) จะได้

$$T = \frac{3I_r^2 R_r (1-s)}{s \left(\frac{2}{P}\right) (1-s) \omega_s} \quad (2.19)$$

แทนสมการที่ (2.12) ลงในสมการที่ (2.19) จะได้

$$T = \left(\frac{P}{2}\right) \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2.20)$$

เนื่องจาก

$$I_r = \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + R_r/s)^2 + \omega_s^2 (L_{ls} + L_{lr})^2}} \quad (2.21)$$

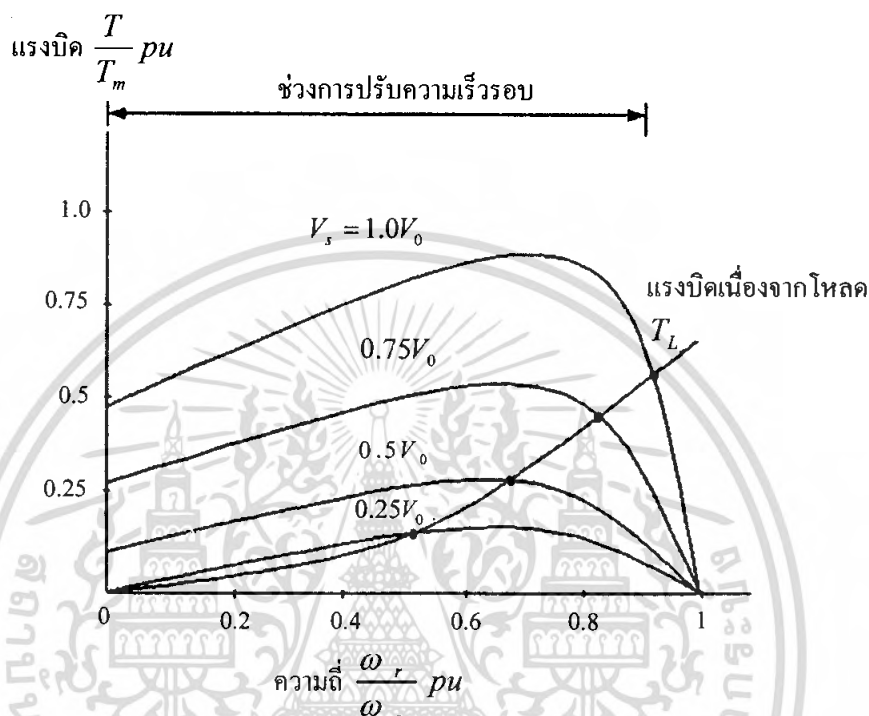
$$T = 3 \left(\frac{P}{2}\right) \frac{R_r}{s\omega_s} \frac{V_s^2}{(R_s + R_r/s)^2 + \omega_s^2 (L_{ls} + L_{lr})^2} \quad (2.22)$$

2.1.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน

การปรับแรงดันสเตเตอร์โดยคงความถี่ไว้ถือเป็นวิธีควบคุมความเร็วรอบที่ง่ายที่สุด ซึ่งสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น ใช้เอซี ชอปเปอร์ (AC-Chopper) ควบคุมโดยปรับค่าความต้านทาน ออโต้ทรานสฟอร์มเมอร์ (AUTO-transformer) และอื่นๆ รูปที่ 2.6 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์แรงบิดความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งได้จากสมการที่ (2.22) โดยเปลี่ยนแปลงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับโรงเรียนเอกชนแห่งหนึ่ง มีข้อห้ามมิให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันในระดับต่างๆกันในรูปยังแสดงถึงเส้นกราฟของโหลด โดยยกตัวอย่างเป็นโหลดประเภท ใบพัด ซึ่ง $T_L = \alpha\omega_r^2$ และแสดงจุดตัดระหว่างกราฟแรงบิดของโหลดและกราฟแรงบิดของมอเตอร์ที่แรงดันต่างๆกันไป จุดตัดที่เน้นคือจุดสมดุลการทำงานซึ่งมอเตอร์จะทำงาน ณ ตำแหน่งแรงบิด-ความเร็วรอบที่จุดตัดนั้นปรากฏอยู่ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสลิปมีค่ามากพอสมควร



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อปรับแรงดันที่สเตเตอร์

ซึ่งเป็นผลให้สามารถปรับความเร็วรอบได้เป็นระยะกว้างพอประมาณ แต่ต้องคำนึงถึงอย่างหนึ่งว่า ถ้าสลิปมากกระแสก็จะมากกว่าปกติที่โหลดเดียวกันเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำจะแปรผันโดยตรงกับ ω_s ส่งผลต่อเนื้อให้กำลังงานสูญเสียในตัวนำมีค่ามากกว่าปกติตาม I^2R มอเตอร์ที่ใช้จึงต้องเป็นมอเตอร์ที่ออกแบบเพื่อรองรับการทำงานช่วงสลิปมากได้ เพราะขณะที่มอเตอร์ร้อนขึ้นแต่การระบายความร้อนมีน้อยลงเนื่องจากมอเตอร์มีความเร็วลดลง มอเตอร์พัดลมที่ใช้ตามบ้านเป็นตัวอย่างอีกอันหนึ่งของการควบคุมความเร็วด้วยการเปลี่ยนแรงดัน

2.1.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่

ถ้านำสมการที่ (2.22) มาเขียนกราฟโดยเปลี่ยนแปลงความถี่ให้มากกว่าความถี่ปกติในขณะที่ยังคงที่ ผลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดสูงสุดจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าการที่ความถี่เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่า ω_L มากขึ้น มีผลทำให้กระแสลดลง เมื่อกระแสลดลง ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศ (Air gap flux) ซึ่งเป็นผลผลิต

โดยตรงของกระแสก็จะลดลงตาม แรงบิดของมอเตอร์ซึ่งเกิดจากแรงปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กก็ จะลดลงด้วย แรงบิดสูงสุดแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.23)

$$T_m = 3 \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 \frac{\omega_{slm} R_r}{R_r^2 + \omega_{slm}^2 L_{lr}^2} \tag{2.23}$$

โดยที่

$$s_m = \pm \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + \omega_s^2 (L_{ls} + L_{lr})^2}} \tag{2.24}$$

ถ้าไม่คิด R_s และ L_{ls} จะได้

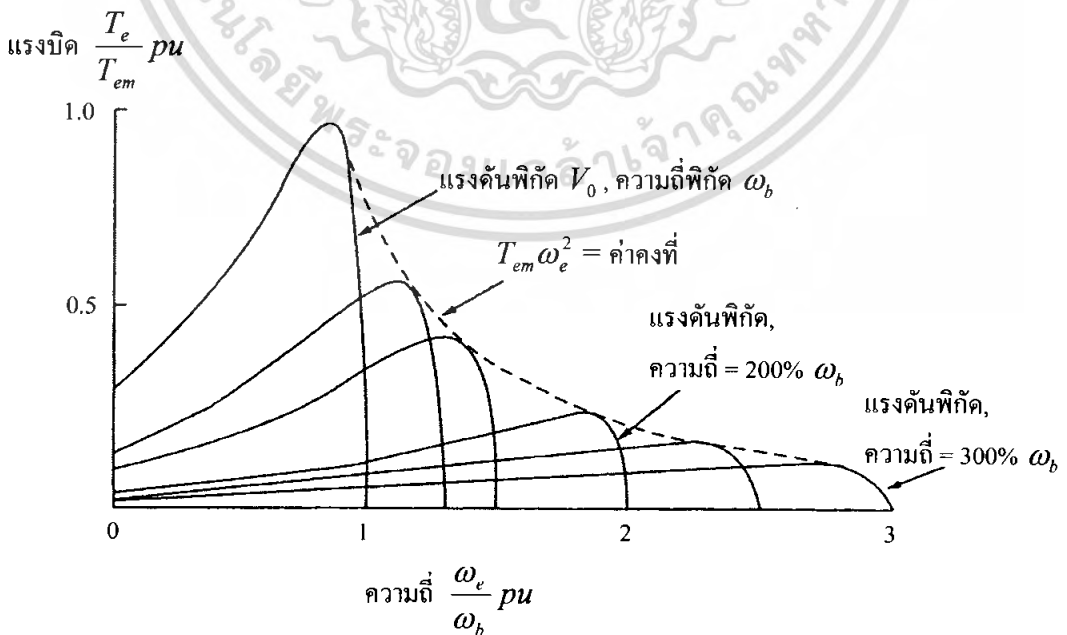
$$s_m = \pm \frac{R_r}{\omega_s L_{lr}} \tag{2.25}$$

$$s_m \omega_s = \pm \frac{R_r}{L_{lr}} \tag{2.26}$$

$$s_m \omega_s = \omega_{slm} \tag{2.27}$$

$$\omega_{slm} = \pm \frac{R_r}{L_{lr}} \tag{2.28}$$

เมื่อ ω_{slm} คือ ความถี่สลิปที่ค่าแรงบิดสูงสุด

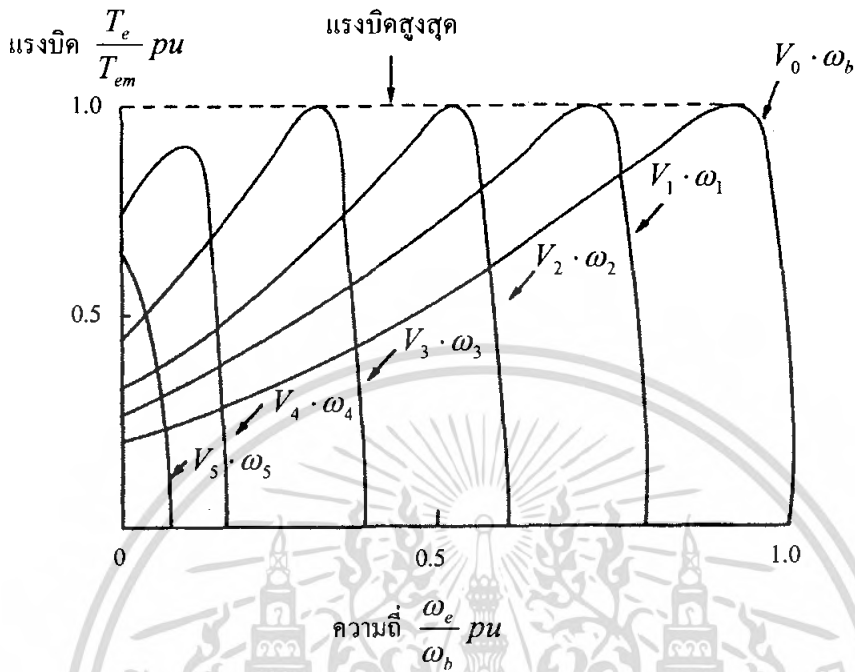


รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจันทบุรี และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_0 > V_1 > V_2 > V_3 > V_4 > V_5$$

$$\omega_b > \omega_1 > \omega_2 > \omega_3 > \omega_4 > \omega_5$$



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบที่อัตราส่วน V_s/ω_s คงที่

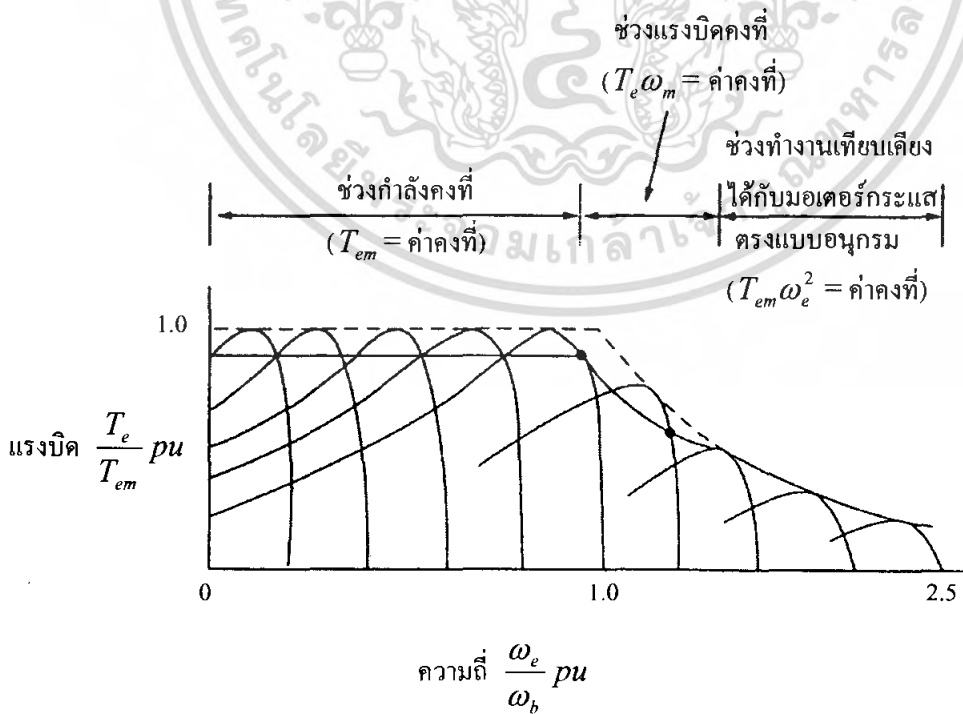
เมื่อนำค่าไปแทนลงในสมการที่ (2.23) จะได้

$$T_m \omega_s^2 = \text{constant} \quad (2.29)$$

ในทางตรงกันข้ามถ้าลดความถี่ลงในขณะที่คงค่าแรงดันไว้ จะส่งผลให้กระแสมากขึ้น เป็นสาเหตุให้ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศมากขึ้นเรื่อยๆ และเกิดการอิ่มตัว (Saturation) ในที่สุด นอกจากนี้กระแสที่มากขึ้นจะทำให้มอเตอร์ร้อนกว่าปกติ ดังนั้นการปรับความถี่ในพื้นที่ของกราฟที่ต่ำกว่าความถี่พิกัดนั้น เราจึงจำเป็นต้องลดค่าแรงดันลง เพื่อคงค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กไว้ไม่ให้มากเกินไป รูปที่ 2.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบ ซึ่งเป็นผลจากการคงค่า V_s/ω_s ให้คงที่ไว้ ค่าแรงบิดสูงสุดซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.23) จึงมีค่าคงที่ ยกเว้นบริเวณที่ความถี่ต่ำๆ ซึ่ง ณ บริเวณนั้นแรงดันก็ต่ำด้วยเป็นผลทำให้สัดส่วนของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานในขดลวดต่อแรงดันที่ป้อนมีค่าเด่นชัดขึ้น กระแสที่ควรจะคงที่จึงตกลง ซึ่งเป็นผลให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กลดลงและแรงบิดก็ลดลงในที่สุด เพื่อเป็นการแก้ปัญหานี้ในย่านความถี่ต่ำจึงมักจะเพิ่มแรงดันเข้าไป เพื่อเอาชนะแรงดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ ซึ่งเราเรียกแรงดันในส่วนนี้ว่า “boost voltage” โดยทั่วไปแล้วจะเรียกระบบควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีเปลี่ยนแปลงทั้งแรงดันและความถี่ว่า VVVF (Variable Voltage , Variable Frequency)

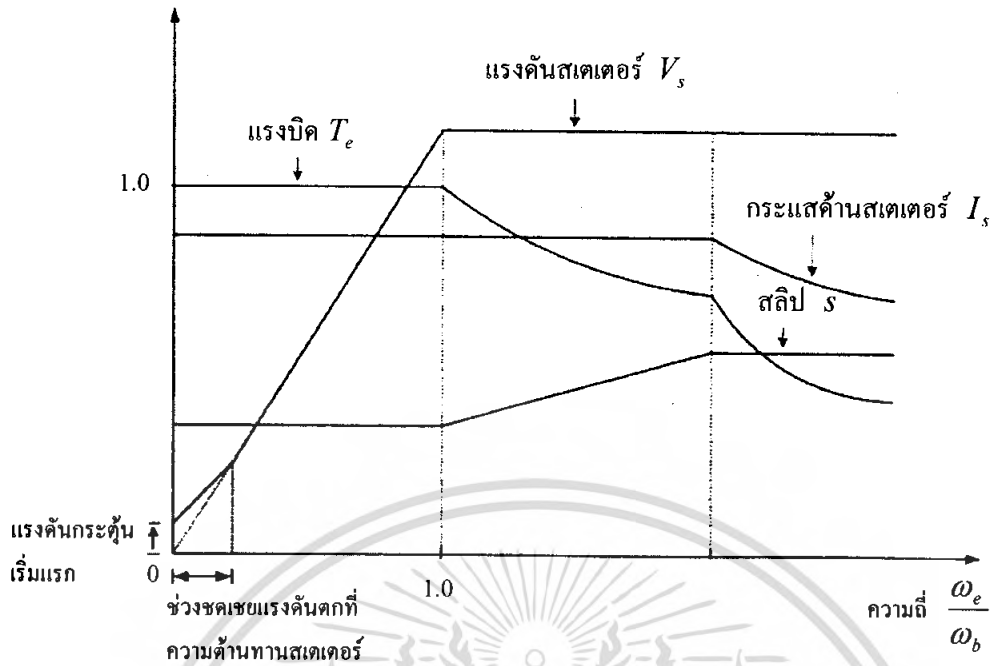
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมให้มอเตอร์ทำงานนั้นโดยปกติแล้วจะไม่ใช้งานมอเตอร์ที่มีค่า T_m แต่จะลดลงมาตามการใช้งานจริง นอกจากนี้ยังนิยมที่จะกำหนดให้ค่าแรงบิดสูงสุดของการใช้งานมีค่าต่ำกว่า T_m ซึ่งมีผลทำให้ T ที่ใช้งานจริงนั้นมีค่าน้อยกว่า T_m ทั้งยังทำให้การทำงานของมอเตอร์มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้นเมื่อภาระของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าหลังจากบริเวณแรงบิดคงที่ (Constant-Torque Region) จะสามารถกำหนดให้มอเตอร์ทำงานในบริเวณกำลังคงที่ (Constant-Power Region) ได้ เพราะ ณ บริเวณนี้ถือเป็นบริเวณที่แรงดันจะเพิ่มขึ้นต่อไปไม่ได้แล้วเนื่องจากถึงค่าพิกัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคงค่าแรงดันไว้ เมื่อเพิ่มให้มากขึ้นจนมากกว่าความถี่พิกัด ลักษณะของเส้นโค้งคุณสมบัติก็จะเปลี่ยนไปเหมือนกับรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นว่านับจากจุดความถี่พิกัดนี้ ค่าแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถรับได้จะเป็นไปตามเส้นประ อย่างไรก็ตามถ้าไม่ได้ให้มอเตอร์รับภาระที่แรงบิดสูงสุด ก็สามารถกำหนดให้มอเตอร์ทำงานในลักษณะกำลังคงที่ได้ตามแนวของเส้นทึบ โดยมีช่วงการทำงานอยู่ระหว่างความถี่พิกัดกับจุดที่เส้นทึบกับเส้นประชนกันพอดี การกำหนดให้มอเตอร์ทำงานที่กำลังคงที่นี้จะเป็นไปได้ 2 ลักษณะสำหรับวิธีแรกที่ทำได้คือการกำหนดแรงบิด T ที่เหมาะสมเพื่อทำให้ $T\omega_m$ มีค่าคงที่ ค่า T นี้จะค่อยๆ เหยิบเข้าใกล้ T_m มากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ผลก็คือสลิปเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้กระแสมีค่าคงที่ต่อเนื่องไปจนถึงจุดที่ $T = T_m$ เป็นอันสิ้นสุดช่วงกำลังคงที่ ส่วนอีกวิธีหนึ่งที่ทำได้คือการปรับความถี่สลิปโดยตรงเข้าไปที่โรเตอร์ซึ่งจะทำได้ในกรณีที่โรเตอร์เป็นแบบโรเตอร์พันขดลวด อย่างไรก็ตามหลังจากจุดที่ $T = T_m$ แล้ว การทำงานของมอเตอร์ก็จะเข้าสู่บริเวณ $T\omega_s^2 =$ ค่าคงที่ตามรูปที่ 2.7 ต่อไป



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของVVVF

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 พื้นที่การทำงานและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆที่ได้จากรูปที่ 2.9

2.1.5 คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็ว

จากความสัมพันธ์ของการควบคุมมอเตอร์ ถ้าค่าความถี่โรเตอร์มีค่าน้อยๆ การรักษาค่าของฟลักซ์แม่เหล็กให้มีค่าคงที่จะทำให้ความสัมพันธ์ของแรงบิดทางกลด้านเอาต์พุตและค่าความถี่โรเตอร์มีลักษณะที่เป็นเชิงเส้นตลอดทุกช่วงของความถี่

$$T_m \approx K_1 s f \tag{2.30}$$

เมื่อ K_1 คือ ค่าคงที่

จากสมการที่ (2.30) จะเป็นการแสดงถึงคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็ว เมื่อค่าความถี่มีการเปลี่ยนแปลง จะนิยมแสดงค่าของแรงบิดทางกลให้อยู่ในเทอมของความเร็วสลลป

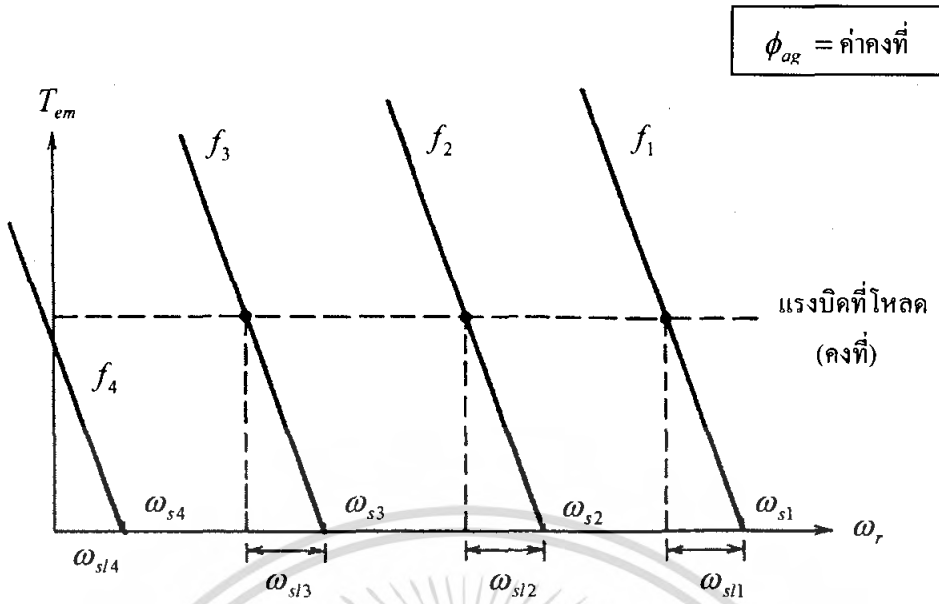
$$\omega_{sl} = \frac{f_{sl}}{f} \omega_s = \frac{4\pi}{P} f_{sl} \tag{2.31}$$

และจากสมการที่ (2.30) และ (2.31) จะได้

$$T_m \approx K_2 \omega_{sl} \tag{2.32}$$

เมื่อ K_2 คือ ค่าคงที่

72260



รูปที่ 2.11 กราฟคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่ค่าสลิปต่ำ

คุณลักษณะในรูปที่ 2.11 ค่าความถี่ f จะถูกแทนด้วย f_1 ซึ่งก็คือค่าของความเร็วซิงโครนัส ω_{s1} นั้นเอง จากความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วจะเลื่อนไปตามแนวนอนในลักษณะที่ขนานกันไปโดยจะมีการแสดงที่ค่าความถี่ต่างๆ จำนวน 4 ค่า ในการอธิบายกราฟในภาพที่ 2.11 ให้เราพิจารณาที่ค่าความถี่ f_1 และ f_2 ค่าความเร็วซิงโครนัส ω_{s1} และ ω_{s2} จะมีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ f_1 และ f_2 โดยจะเห็นได้ว่าค่า ω_{s1} จะมีค่าเท่ากับค่า ω_{s2} ถ้าแรงบิดของโหลดที่ความถี่ทั้งสองเท่ากัน ดังนั้นจากระนาบของแรงบิด-ความเร็วของรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าที่แรงบิดเท่ากัน ค่าความเร็ว สลิปที่ใช้ก็จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งทำให้คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่ความถี่ต่างๆ มีลักษณะเหมือนกัน และมีการขนานกันไปตามแนวนอน ถ้าค่าแรงบิดของโหลดคงที่ก็จะทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียในโรเตอร์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้ก็เพื่อทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลง

2.1.6 การชดเชยแรงดันเพิ่มเมื่อความถี่ป้อนที่ค่าต่ำๆ

เมื่อความถี่ป้อนเข้าต่ำลง ผลของความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์จะต้องถูกนำมาพิจารณาด้วยแม้ว่าความถี่สลิปจะมีค่าต่ำก็ตาม สำหรับการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทั่วไปเทอมของ $2\pi fL_r$ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอม $R_r \frac{f}{f_{sl}}$ ในวงจรสมมูล โดยกระแสที่ไหลเข้าวงจรโรเตอร์ (I_r) จะอินเฟสกันกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ช่องอากาศ (E_1) ถ้าเราใช้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขดลวดสเตเตอร์เป็นเฟเซอร์อ้างอิง เนื่องจาก $\hat{I} = I_r + jI_m$ ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\hat{V}_s \approx [E + (2\pi fL_{ls})I_m + R_s I_r] + j[(2\pi fL_{ls})I_r - R_s I_m] \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

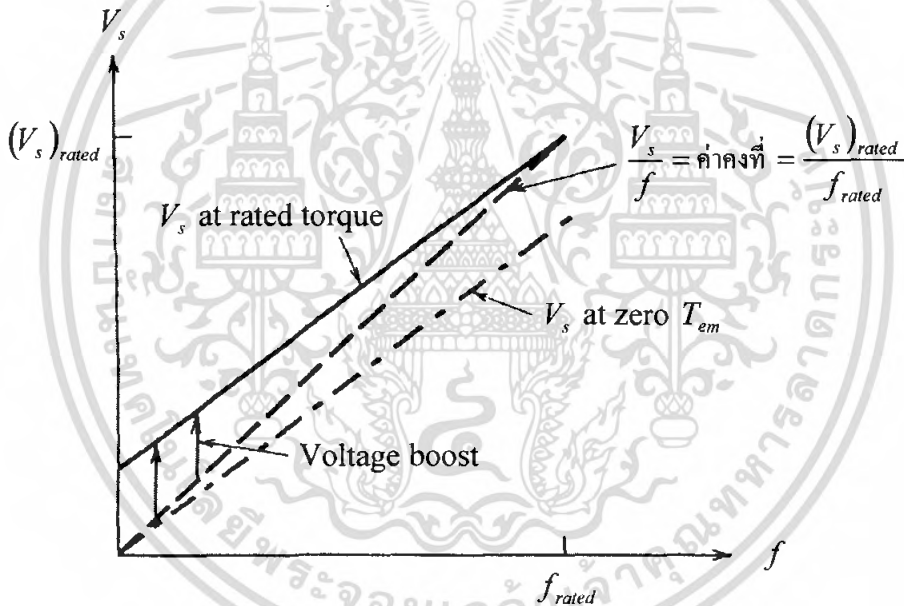
เทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการที่ (2.33) นั้นเป็นส่วนที่ตั้งฉากกันกับ V_s ซึ่งไม่มีผลต่อขนาดของ V_s มากนัก ดังนั้นจึงสามารถที่จะละทิ้งไปได้นั้นคือ

$$V_s \approx [E_1 + (2\pi fL_{ls})I_m + R_s I_r] \quad (2.34)$$

เมื่อ ϕ คงที่ E_1 จะแปรผันไปตามความถี่ที่ป้อน ($E_1 = k_3 \phi f$) และถ้า ϕ คงที่ I_m ก็จะมีค่าคงที่ด้วยจากสมการที่ 2.34 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_s = k_{13} f + R_s I_r \quad (2.35)$$

ถ้า f สูงๆ $R_s I_r$ จะไม่มีผลมากนักโดยสามารถละทิ้งไปได้ ดังนั้น $V_s \approx E_1$ แต่ถ้า f ต่ำๆ $R_s I_r$ จะมีผลมากขึ้นทำให้ไม่สามารถละทิ้งไปได้ จึงต้องเพิ่มแรงดันป้อนเพื่อให้อัตราส่วน $\frac{E_1}{f}$ คงที่เพื่อรักษาแรงบิดให้คงที่ที่พิกัด



รูปที่ 2.12 ความต้องการแรงดันชดเชยเพื่อรักษาฟลักซ์คงที่เมื่อความถี่ต่ำๆ

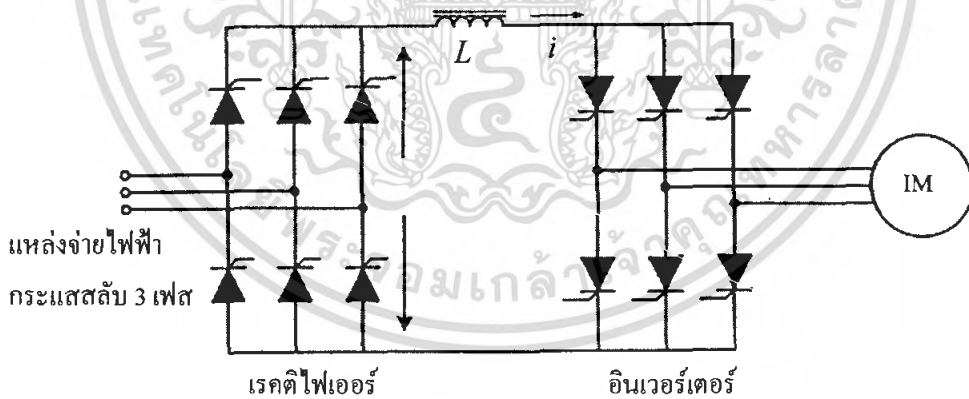
2.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์

ในปัจจุบัน อินเวอร์เตอร์ได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (CSI: Current-Source Inverter) และอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (VSI: Voltage-Source Inverter) โดยมีลักษณะที่แตกต่างกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (CSI: Current-Source Inverter)

อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสมีใช้อยู่ไม่มากในอุตสาหกรรมของบ้านเราการประยุกต์ใช้งานเกือบทั้งหมดของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสจะเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ เหตุเพราะว่าอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสจะทำงานได้ดีที่โหลดมากๆ แต่จะมีปัญหาเมื่อโหลดน้อยๆ นอกจากนี้ลักษณะของอุปกรณ์และวงจรก็เหมาะสมสำหรับ โหลดมากๆ เมื่อภาระเปลี่ยนกระแสจะคงที่แต่แรงดันเปลี่ยนแปลงไปตามภาระโหลด แต่อย่างไรก็ตามไม่ใช่ว่าจะไม่สามารถเปลี่ยนค่ากระแสได้เลย เพียงแต่ ณ ค่ากระแสใดๆ เมื่อโหลดเปลี่ยนกระแสจะไม่เปลี่ยนมีเพียงแต่แรงดันเท่านั้นที่เปลี่ยน ซึ่งก็เป็นไปตามหลักการพื้นฐาน $V = IR$ โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสจะประกอบไปด้วยทริสเตอร์เรกติไฟเออร์ที่สามารถควบคุมได้โดยการควบคุมเฟสของเอซีไลน์ และยังมีอินคักเตอร์ขนาดใหญ่ต่ออนุกรมอยู่ แต่ไม่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ด้วยเพื่อสร้างแหล่งจ่ายกระแสให้กับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นข้อแตกต่างของ โครงสร้างทางวงจรกับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Inverter: VSI) และในส่วนของอินเวอร์เตอร์จะมีทริสเตอร์เพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์รูปร่างของกระแสที่จ่ายออกทางด้านเอาต์พุต จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของการควบคุมที่อินเวอร์เตอร์ซึ่งอาจจะเป็นแบบบันได 6 ขั้นหรือแบบพี คับบลิว เอ็ม ก็ได้ แต่ลักษณะของแรงดันเอาต์พุตจะมีรูปร่างเข้าใกล้รูปไซน์ นอกจากนี้แรงดันทางด้านเอาต์พุตจะเกิดสไปค์ เนื่องจากการคอมมิวเตทด้วย



ภาพที่ 2.13 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส

2.2.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (VSI: Voltage-Source Inverter)

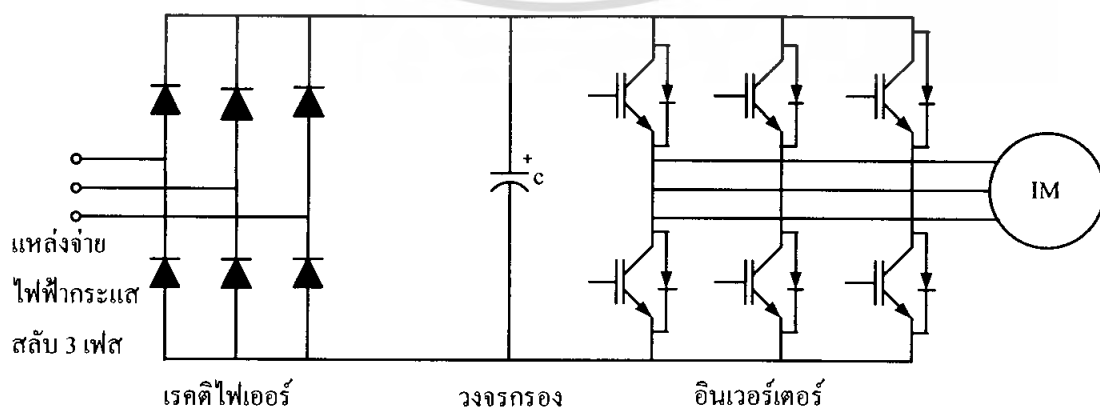
อินเวอร์เตอร์แบบนี้จะมีภาคเรกติไฟเออร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับอินเวอร์เตอร์โดยดีซีลิงค์จะมีขนาดของตัวเก็บประจุที่มีค่ามากกรองแรงดันให้ราบเรียบ กล่าวคือแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ เมื่อ โหลดเปลี่ยนแรงดันจะคงที่แต่กระแสเปลี่ยนแปลงไปตามโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันนั้นถือได้ว่าเป็นประเภทของอินเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันมีข้อดีคือสามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้โดยง่าย นอกจากนี้ยังสามารถปรับความถี่ได้ในช่วงกว้าง ส่วนข้อเสียคือ มักจะมีปัญหาในเรื่องการลัดวงจรของอุปกรณ์ สวิตซ์ซึ่งในกึ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะต้องมีวงจรประวิงเวลา (Dead Time) เพื่อป้องกันการลัดวงจรซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คืออินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-Wave Inverter) หรืออินเวอร์เตอร์รูปคลื่นขั้นบันได (Step-Wave Inverter) กับอินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตความกว้างของพัลส์ หรือ พี ดับบลิว เอ็ม อินเวอร์เตอร์ (Pulse Width Modulation Inverter) อินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมนั้น มักใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในภาคกำลัง แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คืออินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่น 6 ขั้น (Six-Step Inverter) และอินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่น 12 ขั้น (Twelve-Step Inverter) ในปัจจุบันจะไม่ค่อยพบอินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเพราะแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะประกอบไปด้วยสเปคตร้าฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ต่ำเช่น $6k \pm 1$, $12k \pm 1$ และถือเป็นเทคโนโลยีเก่า ดังนั้นจะกล่าวถึง พี ดับบลิว เอ็ม อินเวอร์เตอร์เท่านั้น

2.2.3 พี ดับบลิว เอ็ม อินเวอร์เตอร์ (PWM INVERTER)

สำหรับพี ดับบลิว เอ็ม อินเวอร์เตอร์ ในส่วนของแรงดันดีซีลิงค์นั้น ปกติจะใช้ไดโอดเรกติไฟเออร์เพื่อทำให้แรงดันดีซีลิงค์มีค่าคงที่ โดยไม่สามารถควบคุมแรงดันดีซีได้ ส่งผลให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านอินพุตดีซีขึ้นและลดขนาด LCฟิลเตอร์ให้เล็กลง ดังนั้นความถี่และแรงดันเอาต์พุตของแรงดันมูลฐานสามารถควบคุมได้โดยใช้เทคนิคพี ดับบลิว เอ็ม ซึ่งอยู่ในส่วนของอินเวอร์เตอร์ เทคนิคพี ดับบลิว เอ็มนี้จะให้แรงดันเอาต์พุตที่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำน้อยลง แต่มีจำนวนครั้งของการสวิตซ์สูงขึ้น ทำให้มีปัญหาในเรื่องของกำลังงานสูญเสียจากการสวิตซ์ แต่จะใช้งานได้ดีในย่านความถี่ต่ำ ส่งผลให้แรงบิดเริ่มต้นมีค่าสูงและลดปัญหาการกระเพื่อมของแรงบิด นอกจากนี้ยังลดปัญหาของกำลังงานสูญเสียจากการสวิตซ์อีกด้วย



รูปที่ 2.14 พี ดับบลิว เอ็ม อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อดีของพี ดับบลิว เอ็ม อินเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวมานั้น มีประโยชน์ต่อการพัฒนาวงจรอินเวอร์เตอร์อย่างมาก ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์สำหรับการสวิตช์แบบเกตเทอร์น-ออฟ (Gate Turn-Off Power device) ได้รับการพัฒนาให้สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการสวิตช์แบบพี ดับบลิว เอ็มจึงเป็นที่รู้จักและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ซึ่งเทคนิคพี ดับบลิว เอ็มมีหลายเทคนิค แต่ในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะเทคนิคไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม (Sinusoidal PWM, SPWM) และเทคนิคสเปซเวกเตอร์ (Space Vector, SVPWM) เท่านั้น

2.2.4 เทคนิคไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม (SPWM: Sinusoidal PWM)

เทคนิคนี้จะใช้หลักการนำรูปคลื่นไซน์เป็นสัญญาณอ้างอิงที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานที่ต้องการออกแบบมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ แต่โดยทั่วไปจะเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ที่ออกแบบไว้ ซึ่งค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูดสัญญาณไซน์อ้างอิงเทียบกับแอมพลิจูดของสัญญาณพาหะเรียกว่า ดัชนีการมอดูเลต (m_a) สามารถเขียนเป็นสมการรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิงได้ดังนี้

$$v_r = m_a \sin \omega t \quad (2.36)$$

โดยที่ $m_a = \frac{\hat{V}_r}{\hat{V}_{tri}}$

เมื่อ \hat{V}_r คือ แอมพลิจูดสัญญาณไซน์อ้างอิง

\hat{V}_{tri} คือ แอมพลิจูดสัญญาณพาหะ

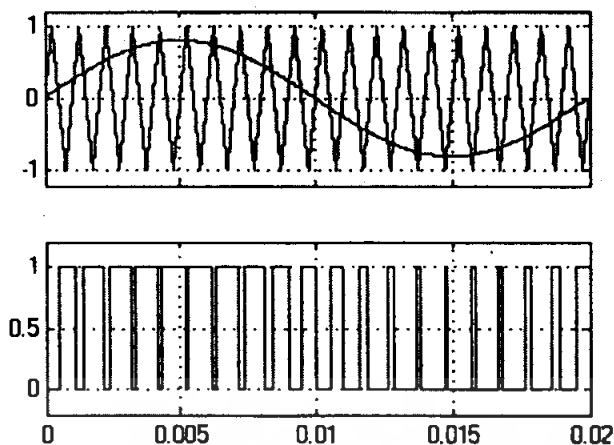
ค่าอัตราส่วนระหว่างความถี่ของสัญญาณพาหะกับสัญญาณไซน์อ้างอิงจะนิยามโดยค่า m_f ซึ่งหาได้จาก

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_r} \quad (2.37)$$

เมื่อ f_r คือความถี่ของสัญญาณไซน์อ้างอิง

f_{tri} คือความถี่ของสัญญาณพาหะ

ตัวอย่างการสวิตช์แบบไซน์ พี ดับบลิว เอ็มแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 หลักการสร้างสัญญาณแบบไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม

สำหรับการพิจารณาแรงดันเอาต์พุตที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้ 2 ย่าน คือ

1. ย่านดัชนีการมอดูเลตเชิงเส้น (Linear Modulation) ($m_a \leq 1$) เป็นย่านที่แรงดันเอาต์พุตแปรผันตรงกับค่าของดัชนีการมอดูเลต ซึ่งแรงดันมูลฐานมีค่าคงสมการ

$$V_{1,rms} = \frac{V_d \times m_a}{\sqrt{2}} \quad (2.38)$$

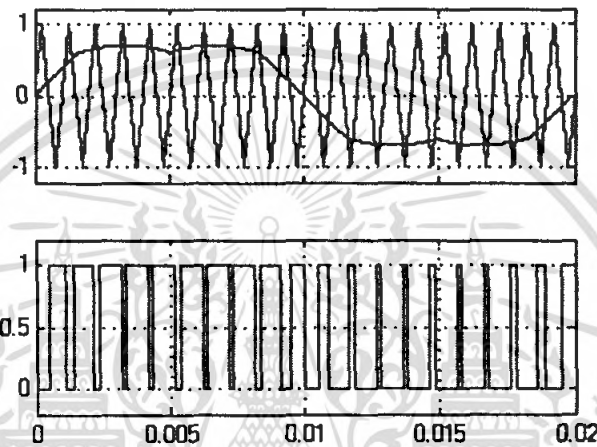
เมื่อ V_d คือ ค่าระดับแรงดันคิซีลิ่งค์

2. ย่านดัชนีการมอดูเลตเกิน (Overmodulation) ($m_a > 1$) เป็นย่านที่แรงดันเอาต์พุตไม่แปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับค่าขนาดของดัชนีการมอดูเลต โดยทั่วไปแล้วไม่ค่อยมีการนำย่านนี้ไปใช้งาน

เทคนิคไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม นั้นสามารถสร้างได้โดยการใช้วงจรถอนาลอก หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นเทคนิคทางดิจิทัล การสร้างด้วยวงจรถอนาลอกทำได้โดยการสร้างสัญญาณอ้างอิงซึ่งเป็นรูปคลื่นไซน์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับขั้วออปแอมป์กับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อให้ได้สัญญาณพี ดับบลิว เอ็ม ดังรูปที่ 12.5 วิธีการสร้างแบบนี้เรียกว่า Natural Sampling ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายส่วนการสร้างโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำได้โดยการเก็บสถานะสวิทช์ซึ่งไว้ใน Look up Table หรือคำนวณเวลาจริง (Real-Time) วิธีการสร้างแบบนี้เรียกว่า เรกกูลาแซมปลิง (Regular Sampling) ซึ่งจะเป็นการประมาณค่าความกว้างพัลส์ของเทคนิคเนเชอรัลแซมปลิง (Natural Sampling) โดยการใช้สัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณไซน์ เพียงแต่จะสุ่มสัญญาณไซน์ (v_{samp}) ด้วยเวลาคงที่และแน่นอน เพื่อทำให้เกิดความกว้างพัลส์

2.2.5 เทคนิคสเปซเวกเตอร์ (Space Vector, SVPWM)

เทคนิคสเปซเวกเตอร์เหมาะสำหรับการสร้าง พี ดับบลิว เอ็ม ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากมีความเหมาะสมของสมการที่ใช้ในการคำนวณ โดยมีย่านเชิงเส้นของการมอดูเลตสูงกว่า เทคนิคไซน์ พี ดับบลิว เอ็ม ประมาณ 1.15 เท่าก่อนเกิดสภาวะโอเวอร์มอดูเลต รูปคลื่นสมมูลของเทคนิคนี้สามารถสร้างด้วยวงจรถอดออกซึ่งทำได้โดยการผสมสัญญาณไซน์อ้างอิง กับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่เป็น 3 เท่าของสัญญาณไซน์อ้างอิงด้วยขนาด 0.25 เท่า ของสัญญาณไซน์อ้างอิง ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 หลักการสร้างสัญญาณแบบสเปซเวกเตอร์

จะสังเกตเห็นได้ว่าเทคนิคการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส นั้นมีด้วยกันหลายวิธี ในการจะนำมาใช้นั้นก็ต้องทราบถึงข้อดีและข้อเสียของการควบคุมความเร็วแต่ละประเภท เพื่อช่วยในการตัดสินใจว่าเหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้หรือไม่

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

2.3.1 บทนำ

การพัฒนาโครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์มีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีการปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้นอย่างเป็นลำดับ พร้อมทั้งยังมีการพัฒนาระบบการคำนวณ และฟังก์ชันพิเศษเพิ่มขึ้นมากมาย ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในปัจจุบันสามารถทำงานได้ภายในตัวเดียวไม่ต้องอาศัยวงจรภายนอกช่วยมากนัก การบันทึกโปรแกรมลงในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ก็สามารถทำได้จากคอมพิวเตอร์โดยตรง (In-System Programming Capability) โดยการผ่านทางพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ ขนาดของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ในปัจจุบันก็มีการออกแบบให้มีสถาปัตยกรรมที่มีขนาดกะทัดรัดลง ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีใช้กันในประเทศไทยปัจจุบันมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

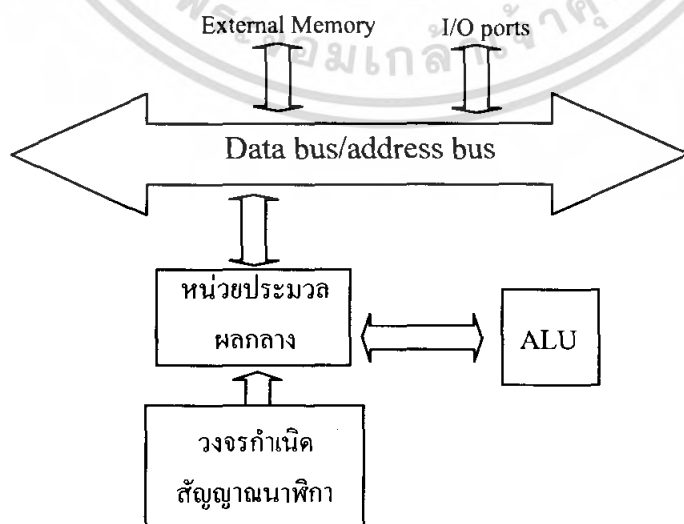
หลายยี่ห้อ ไม่ว่าจะเป็น PIC และ BASIC Stamp ของบริษัทไมโครชิพ AVR และ MCS-51 ของบริษัทแอตเมต Z-80 และ Z-180 ของ Zilog 68HC11 ของ บริษัทโมโตโลล่า ซึ่งแต่ละบริษัทก็พยายามพัฒนาผลิตภัณฑ์ของตนเองให้มีความสามารถสูงสุดและเหมาะแก่ผู้ใช้งานมากที่สุด การหาข้อมูลและตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานก็สามารถหาได้ง่าย ทั้งเป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ทำให้การนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้งานเป็นหน่วยประมวลผล และตัวควบคุมการทำงานไม่ใช่เรื่องยากอีกต่อไป

2.3.2 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่งซึ่งภายในประกอบด้วยวงจรอื่น ๆ หลายวงจรและทำงานร่วมกัน เช่น หน่วยประมวลผลกลาง (CPU: Central Processing Unit) หน่วยความจำทางคณิตศาสตร์และลอจิก (ALU: Arithmetic Logic Unit) วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) หน่วยความจำ (Memory: ROM, RAM) วงจรรับสัญญาณอินพุตและขับสัญญาณเอาต์พุต (I/O port) เป็นต้น และด้วยเหตุนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานควบคุมได้ดี เนื่องจากสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมได้อย่างอิสระ ตามความต้องการของผู้ใช้

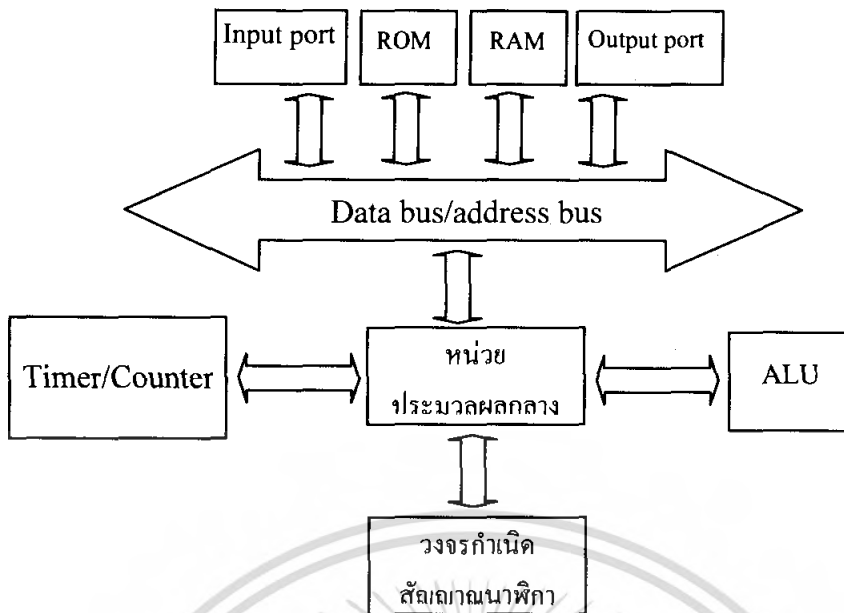
2.3.3 ข้อแตกต่างระหว่างไมโครโปรเซสเซอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น ซีพียูเบอร์ Z80 เป็นต้น จะไม่มีหน่วยความจำแรม (RAM) รอม (ROM) และพอร์ต (Port) อยู่ในตัวชิพ ทำให้ต้องต่อหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกเพิ่มและต้องใช้ IC ขยายพอร์ตเพิ่มเติม ข้อดีคือ สามารถเพิ่มหน่วยความจำได้ตลอด ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีวงจรพื้นฐานประกอบอยู่ภายในชิพ เช่น หน่วยความจำแรม รอม และวงจรรับสัญญาณอินพุตและขับสัญญาณเอาต์พุต ดังนั้น ในระบบไมโครคอนโทรลเลอร์จึงมีขนาดเล็กกว่าและราคาต่ำกว่าระบบไมโครโปรเซสเซอร์



รูปที่ 2.17 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครโปรเซสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์

2.3.4 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล PIC

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (PIC) มีโครงสร้างหลายลักษณะ ทั้ง 8 ขา (pins), 14 ขา, 28 ขา และ 40 ขา ซึ่งมีให้เลือกใช้มากมายขึ้นอยู่กับว่าจะเลือกใช้ขนาดหน่วยความจำ (Memory) เท่าใด ให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ทำ โดยสามารถแบ่งหน่วยความจำได้ 3 แบบ คือ

- (1) หน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช (FLASH Program Memory) มีขนาดความจุ 1 ถึง 32 กิโลไบต์
 - (2) หน่วยความจำข้อมูล (Data Memory RAM) มีขนาดความจุ 64 ถึง 1536 ไบต์
 - (3) หน่วยความจำข้อมูลอีพรอม (EEPROM Data Memory) มีขนาดความจุถึง 256 ไบต์
- PIC18F4331 มีพอร์ตใช้งานทั้งสิ้น 5 พอร์ต คือ พอร์ต เอ (PORTA) 8 บิต พอร์ต บี (PORTB) 8 บิต พอร์ต ซี (PORTC) 8 บิต PORTD 8 บิต และ PORTE 4 บิต เป็นพอร์ตแบบมี 2 ทิศทาง คือ สามารถเป็นได้ทั้งอินพุต และเอาต์พุต และยังเป็นพอร์ตที่สามารถแปลงสัญญาณ ADC (Analog to Digital Converter) ได้อีกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC มีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

- มีพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต ขนาด 4 บิต 8 บิต จำนวน 5 พอร์ต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช 1 ถึง 32 กิโลไบต์
- มีหน่วยความจำข้อมูลแรม 64 ถึง 1536 ไบต์
- มีหน่วยความจำข้อมูลอีพรอม 256 ไบต์
- ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ (Timer / Counter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Timer 0 ขนาด 8 บิต
- Timer 1 ขนาด 16 บิต
- Timer 2 ขนาด 8 บิต
- มีกระแสซิงก์และกระแสซอร์ส (High Sink/Source Current) 25 มิลลิแอมป์
- มีวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC: Analog to Digital Converter) 10 บิต
- มีวงจรสื่อสารแบบอนุกรมทั้ง SPI และ I²C (Master/Slav)
- มีวงจรพัลส์ วิตซ์ มอดูเลชัน (PWM: Pulse Width Modulation) ความละเอียดสูงสุดถึง 10 บิต
- มีหน่วยความจำแบบแฟลช สามารถเขียนและลบได้มากกว่า 100,000 ครั้ง

2.3.4.1 หน่วยประมวลผลกลาง (CPU: Central Processing Unit)

หน่วยประมวลผลกลางเปรียบเทียบกับสมองของคนเรานั้นเอง เพราะการคำนวณต่างๆ เกิดขึ้นที่นี้หน่วยประมวลผลกลางนั้น จะประกอบด้วยวงจรต่าง ๆ หลายวงจร เช่น วงจรควบคุมเวลาและระบบการทำงาน (Timing and Control Unit) ซึ่งจะทำหน้าที่จัดการทั้งหมดของวงจรทั้งประมวลผลและควบคุมตามคำสั่งที่ได้รับ การคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก (ALU: Arithmetic and Logic Unit) โดยจะทำหน้าที่คำนวณและประมวลผลทางคณิตศาสตร์และระบบลอจิก วงจรถอดรหัสคำสั่ง (Instruction decoder) จะทำหน้าที่แปลงคำสั่งทั้งหมดเพื่อให้เป็นภาษาเครื่อง วงจรควบคุมการทำงานของเคาท์เตอร์ (Counter) วงจรควบคุมสัญญาณนาฬิกา ตลอดจนหน่วยความจำภายในเช่น รีจิสเตอร์(Register), แอดเดรส(Address), ซับแทรคชัน(Subtraction), บัฟเฟอร์(Buffer) และอื่นๆที่ใช้ในการเก็บข้อมูลและประมวลผลของหน่วยประมวลผลกลาง เป็นต้น

2.3.4.2 หน่วยความจำ

ในการเขียนโปรแกรมให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นต้องคำนึงถึงชนิดของหน่วยความจำและวิธีการเข้าถึงด้วย สำหรับหน่วยความจำในระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC นั้น จะมีหน่วยความจำโปรแกรมใช้งาน 3 ประเภท ดังนี้

- หน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช (FLASH Program Memory)

หน่วยความจำแบบแฟลช (Flash ROM) ในปัจจุบันนี้หน่วยความจำชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์อีกหลายรุ่น โดยมีคุณสมบัติในการเขียนโปรแกรมและลบโปรแกรมได้มากกว่า 100,000 ครั้ง ซึ่งการทำงานจะมีความเร็วสูงมากเหมาะกับการพัฒนางานที่มีขนาดใหญ่

- หน่วยความจำโปรแกรม (Data Memory RAM)
หน่วยความจำส่วนนี้มีไว้ใช้เก็บข้อมูลขณะประมวลผลโปรแกรม สามารถอ่านและเขียนข้อมูลในขณะมีไฟเลี้ยง แต่เมื่อไม่จ่ายไฟเลี้ยงข้อมูลต่าง ๆ จะสลายไป
- หน่วยความจำแบบอีอีพรอม (EEPROM Data Memory)
หน่วยความจำแบบอีอีพรอม จะเป็นหน่วยความจำที่สามารถเขียนและลบโปรแกรมได้ด้วยกระแสไฟฟ้าภายในหน่วยความจำถาวรของพรอม (PROM: Programmable Read Only Memory) โดยภายในมีการพัฒนาให้แรม (RAM: Random Access Memory) ที่มีหน่วยความจำชั่วคราว ให้สามารถเก็บข้อมูลได้ถาวรแบบหน่วยความจำรอม (ROM: Read Only Memory) โดยสามารถเขียนและลบโปรแกรมได้จำนวนหลาย ๆ ครั้ง

2.3.4.3 พอร์ตอินพุต/เอาต์พุต (I/O port)

ไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีพอร์ตสำหรับติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกแล้วแต่วัตถุประสงค์ในการใช้งานและคุณสมบัติของพอร์ต โดยสามารถติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกทำหน้าที่เป็นอินพุตและเอาต์พุตได้ เช่น ปุ่มกด, สวิตช์, อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ, LCD, ไทเมอร์ เคาท์เตอร์ ตลอดจนการแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล เป็นต้น

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ในปัจจุบันถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้งานด้านอุตสาหกรรมโดยมีการผลิตมากมายหลายชนิดหลายรุ่น ซึ่งแต่ละรุ่นก็จะมีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานแต่ละประเภท ไม่เหมือนกัน โดยขึ้นกับวัตถุประสงค์ของผู้ใช้เป็นหลัก

บทที่ 3

การออกแบบและวิเคราะห์

บทนี้จะกล่าวถึงการสร้างระบบควบคุม วงจรต่างๆที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส วงจรที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ และส่วนของวงจรกำลังที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรต่าง ๆ

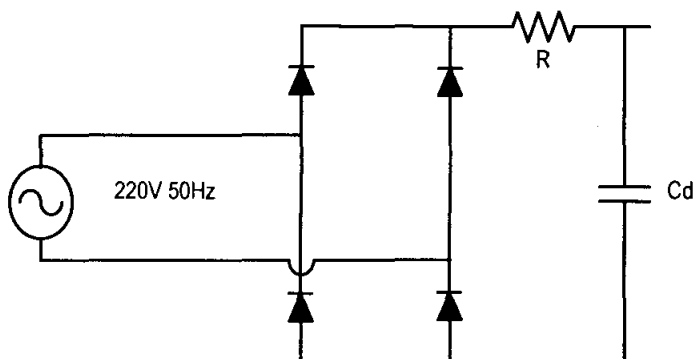
ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และในส่วนของ การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4331 เป็นส่วนควบคุมสำคัญและทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือสูง

3.1 การออกแบบและสร้างชุดกำลังของอินเวอร์เตอร์

ชุดวงจรกำลัง อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในการทำงานจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้วมาทำการแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่าง ๆ เพื่อป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งในส่วนของชุดกำลังของวงจร อินเวอร์เตอร์นี้จะเลือกใช้ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ (Power Transistor) แบบ IGBT (G4PH40UD) มีพิกัดทนแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 1200 โวลต์, 21 แอมป์ และสามารถใช้ได้กับความถี่สวิทซ์สูงสุดได้ถึง 40 กิโลเฮิร์ต การควบคุมการทำงานของสวิทซ์กำลังของชุดวงจรอินเวอร์เตอร์จำเป็นต้องมีอุปกรณ์แยกกราวด์ของสัญญาณ (Isolator) ที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน ซึ่งอุปกรณ์ในการแยกกราวด์ที่ใช้ในการทำงานนี้จะใช้ออปโตทรานซิสเตอร์ (Optotransistor) TLP250 จำนวน 6 ตัว ทำหน้าที่แยกกราวด์ของสัญญาณทางไฟฟ้า

3.1.1 วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์

วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ เป็นวงจรที่ใช้สำหรับแปลงสัญญาณไฟกระแสสลับ 1 เฟสให้เป็นสัญญาณไฟตรง ซึ่งสัญญาณนี้จะนำไปผ่านวงจรกรองแรงดันเพื่อให้สัญญาณเรียบขึ้น และนำสัญญาณไฟตรงที่ได้นี้ไปเป็นไฟเลี้ยงให้ส่วนกำลังของวงจรต่อไป ลักษณะของวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โดยในส่วนของวงจรเรกติไฟเออร์นี้เมื่อเราเปิดสวิทซ์ครั้งแรกจะมีการชาร์จประจุให้แก่คาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์ ซึ่งจะมีขนาดใหญ่



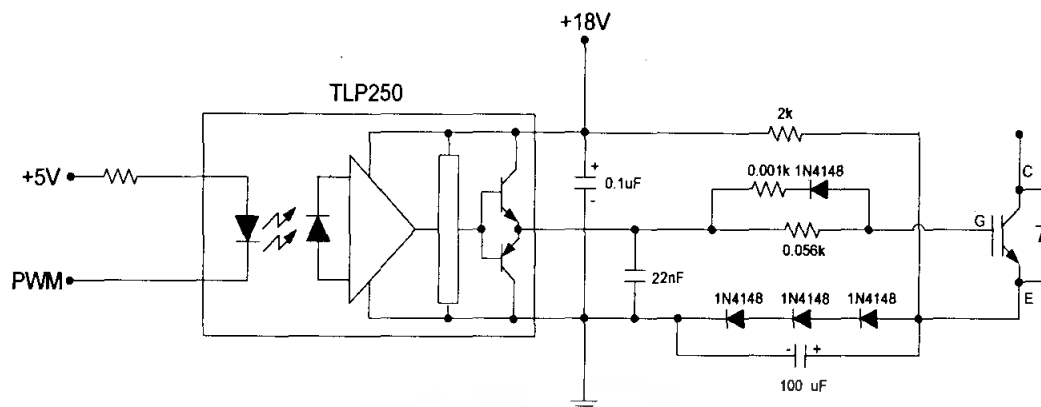
รูปที่ 3.1 วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์

จากรูปวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ขนาดของไดโอดสามารถพิจารณาได้จากขนาดแรงดันตกคร่อมที่ตัวไดโอดขณะให้ไบอัสย้อนกลับ ซึ่งค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวไดโอดมีค่าประมาณ 310 โวลต์ จึงเลือกใช้ อุปกรณ์เบอร์ 40EPS12 เนื่องจาก อุปกรณ์เบอร์นี้สามารถทนแรงดันได้ถึง 800-1200 โวลต์และทนกระแสเฉลี่ยได้ถึง 40 แอมป์

3.1.2 การออกแบบและสร้างวงจรขับนำ IGBT

วงจรขับนำ IGBT มีลักษณะดังรูปที่ 3.12 ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ คือ ถ้าสัญญาณพัลส์พีดับบลิว เอ็ม มีสถานะระดับสัญญาณสูงจะทำให้ T_{R1} ของ ออฟโตทรานซิสเตอร์ (Optotransistor) TLP 250 ทำงานและ T_{R2} ไม่ทำงานจึงทำให้ขา 6 มีระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 18 โวลต์ ซึ่งกระแสไฟฟ้าก็จะไหลผ่าน T_{R1} และตัวความต้านทาน 56 โอห์ม แล้วเข้าขาเกตของ IGBT โดยแรงดันไฟฟ้า V_{GE} ของ IGBT ค่าประมาณ 15 โวลต์ สาเหตุที่ทำให้แรงดันไฟฟ้า V_{GE} ของ IGBT มีค่าประมาณ 15 โวลต์ แทนที่จะมีค่าประมาณ 18 โวลต์ เนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้าที่ขา 6 ของออฟโตทรานซิสเตอร์ TLP 250 ถูกหักล้างด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ไดโอด (Diode) 1N4148 ทั้งสามตัวที่ต่ออนุกรมกัน โดยไม่พิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 56 โอห์ม เพราะมีค่าน้อยมาก ซึ่งการทำงานของวงจรขับนำในสถานะดังที่ได้กล่าวมานี้จะทำให้ IGBT ทำงาน

ถ้าสัญญาณพัลส์ พีดับบลิว เอ็ม มีสถานะระดับสัญญาณต่ำ จะทำให้ T_{R2} ของออฟโตทรานซิสเตอร์ TLP250 ทำงานและ T_{R1} ไม่ทำงานจึงทำให้ขา 6 มีระดับแรงดันไฟฟ้าประมาณเท่ากับ 0 โวลต์ ซึ่งทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าก็จะไหลจากขาเกต (Gate) ของ IGBT ผ่านความต้านทาน 1 โอห์ม และ ไดโอด 1N4148 ที่ต่ออนุกรมกันแล้วไหลลงกราวด์ โดยแรงดันไฟฟ้า V_{GE} ของ IGBT มีค่าประมาณ -2 โวลต์ นั่นเอง



รูปที่ 3.2 วงจรขับนำ IGBT

3.1.3 การเลือกอุปกรณ์การสวิตซ์ซิ่ง

IGBT เป็นอุปกรณ์ในการสวิตซ์ซิ่ง ซึ่งมีคุณสมบัติการใช้งานที่ความถี่สูงๆ ได้เป็นอย่างดี ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ทั่วไปจะทำงานได้ไม่ดีเพราะมีช่วงเวลาหน่วง (Delay Time) มาก ในการเปิด-ปิด ถึงแม้จะมีการพัฒนาทรานซิสเตอร์ให้ใช้งานที่ความถี่สูงๆ ก็ตาม ข้อดีอีกข้อของ IGBT คือสามารถรับกระแสสูงๆ ได้ จากข้อดีทั้งสองข้อที่มีมากกว่าทรานซิสเตอร์ทั่วไปจึงเลือกใช้ IGBT เพื่อใช้ในการสวิตซ์ซิ่ง และนอกจากนี้แล้วยังช่วยในการลดเสียงรบกวนที่เกิดจากสวิตซ์ซิ่งได้ เนื่องจากความถี่ที่เราใช้นั้นสูงกว่าที่คนเราจะได้ยิน การที่เราเลือกใช้ความถี่สูงๆ ในการสวิตซ์ซิ่ง เนื่องจากว่ายิ่งใช้ความถี่ในการเปิด-ปิดสูงเท่าใด ก็จะสามารถแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเลียนแบบรูปกราฟของไซน์ได้ใกล้เคียงและละเอียดมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการควบคุมมอเตอร์ ทั้งในด้านความเร็วและแรงบิด

ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ IGBT เบอร์ G4PH40UD เพราะสามารถทนแรงดันได้ถึง 1200 โวลต์ สามารถรองรับกระแสได้ถึง 21 แอมป์ และความถี่การสวิตซ์ซิ่งสูงสุดได้ถึง 40 กิโลเฮิร์ต

3.2 ส่วนการควบคุม

ในปริญญาณิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ซึ่งมีความสะดวกในการใช้ควบคุมมอเตอร์กระแสสลับสามเฟสเนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้มีฟังก์ชันที่เอื้อต่อการสร้างสัญญาณพี คับบลิว เอ็ม ซึ่งเป็นสัญญาณที่จะนำมาขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

การใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 18F4331ของบริษัท ไมโครชิพซึ่งถูกผลิตขึ้นเพื่อการใช้งานในส่วนควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะ และสามารถประมวลผลเชิงดิจิทัล (DSP: Digital Signal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

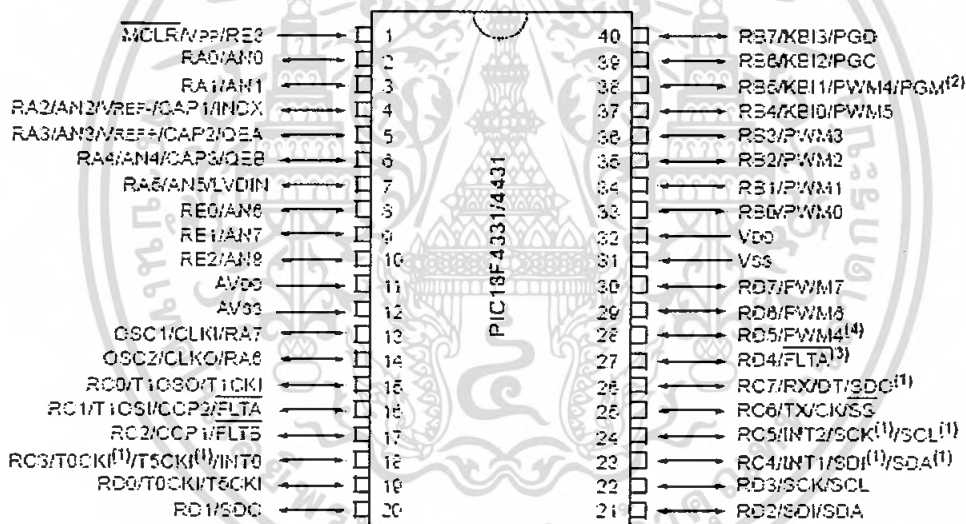
Processing) ได้ มาใช้ประมวลผลการควบคุมความเร็วรอบและทิศทางการหมุนทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ ใช้งานได้สะดวก และยังสามารถลดการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ได้อีกด้วย

3.2.1 PIC18F4331กับการควบคุมกำลังงานโดยสัญญาณ พี คับบลิว เอ็ม

PIC18F4331 สามารถสร้างสัญญาณ พี คับบลิว เอ็ม ได้หลายสัญญาณ และมีช่องเอาต์พุตหลายช่อง จึงทำให้นำไปใช้ควบคุมมอเตอร์และควบคุมพลังงานได้ง่าย

คุณลักษณะเด่นของPIC18F4331ในการสร้างสัญญาณ พี คับบลิว เอ็ม มีดังนี้

- สัญญาณ พี คับบลิว เอ็ม มี 8 เอาต์พุตให้เลือกใช้งาน
- ความละเอียดสูงสุด 14 บิต
- สามารถเปลี่ยนความถี่ของมอเตอร์กำลังทำงานได้
- มีโหมดการทำงานแบบซิงเกิล-พัลส์ (Single-Pulse)
- สามารถโปรแกรมในส่วนของการทำงานได้

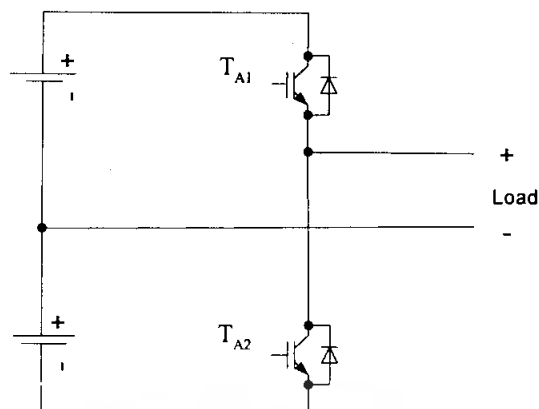


รูปที่ 3.3 ลักษณะของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4331

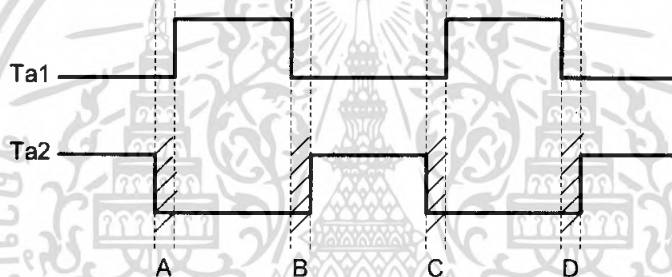
ในตัว PIC2X31 สามารถสร้างสัญญาณ พี คับบลิว เอ็ม ได้ 3 แบบ โดยมีเอาต์พุต 6 ช่อง และในเบอร์ PIC4X31 สามารถสร้างสัญญาณ พี คับบลิว เอ็ม ได้ 4 แบบ โดยมีช่องเอาต์พุต 8 ช่อง จึงทำให้นำไปใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ และควบคุมพลังงานได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันที่ใช้ประมวลผลค่าประวิงเวลา (Dead time) โดยการประวิงเวลาจะเป็นการแยกสัญญาณที่จะนำไปควบคุมสัญญาณพัลส์ของอุปกรณ์สวิตซ์ในชุดบนและล่างในกึ่งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นวงจรเฮซ-บริดจ์ (H-Bridge) ซึ่งจะมีสัญญาณขั้วเกท T_{A1} และ T_{A2} ต้องมีค่านองกันเล็กน้อย นั่นคือส่วนที่แรเงา A, B, C และ D ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจร H-Bridge



รูปที่ 3.5 สัญญาณขับนำเกตของ T_{A1} และ T_{A2}

สาเหตุที่ต้องมีการประวิงเวลาสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม นั้นเพื่อป้องกันการทำงาน ณ เวลาเดียวกันของ IGBT ในกิ่งเดียวกัน เพราะถ้า IGBT ในกิ่งเดียวกันทำงานพร้อมกันแล้วจะเกิดการลัดวงจรขึ้นที่ตัว IGBT จะทำให้เกิดความเสียหายในวงจรได้

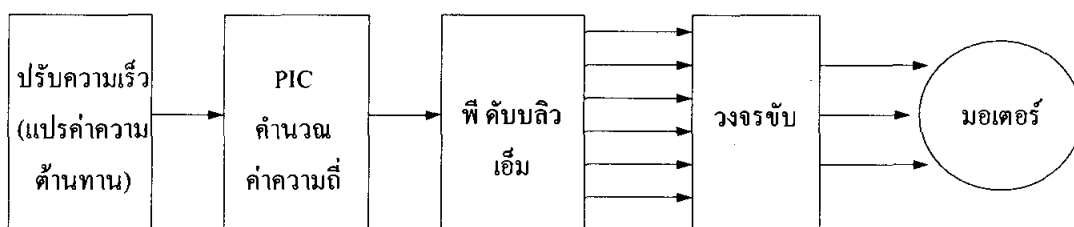
3.2.2 หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ในการทำโครงงานนี้เลือกใช้การควบคุมแบบการแปรค่าแรงดันและความถี่แบบไม่มีการป้อนกลับ หรือใช้แรงดันควบคุมความถี่ของสัญญาณที่ใช้ส่งสัญญาณพัลส์ของมอเตอร์โดยเลือกใช้คุณสมบัติหลัก 2 ประการของไมโครคอนโทรลเลอร์ คือคุณลักษณะเด่นของ PIC18F4331 ในการสร้างสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม และการแปลงสัญญาณอนาลอกไปเป็นดิจิทัลด้วยความเร็วสูง (HSADC: High Speed Analog-to-Digital Converter) มาใช้ในการควบคุมความเร็ว

ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาลอก(Analog) ที่ได้รับจากตัวต้านทานที่สามารถแปรค่าได้ มาเป็นข้อมูลดิจิทัลและนำค่านี้ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

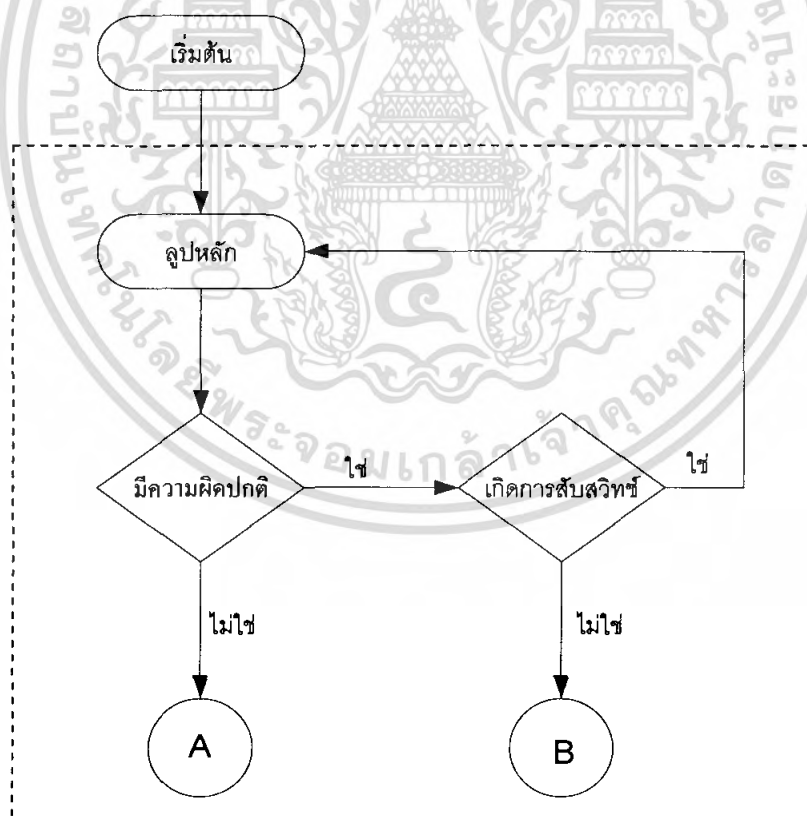
กำหนดความถี่ของสัญญาณ พี คับบลิว เอ็ม ที่สั่งงานมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยผ่านชุดวงจรขับที่สร้างขึ้น สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ได้ดังนี้



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการควบคุมความเร็วมอเตอร์

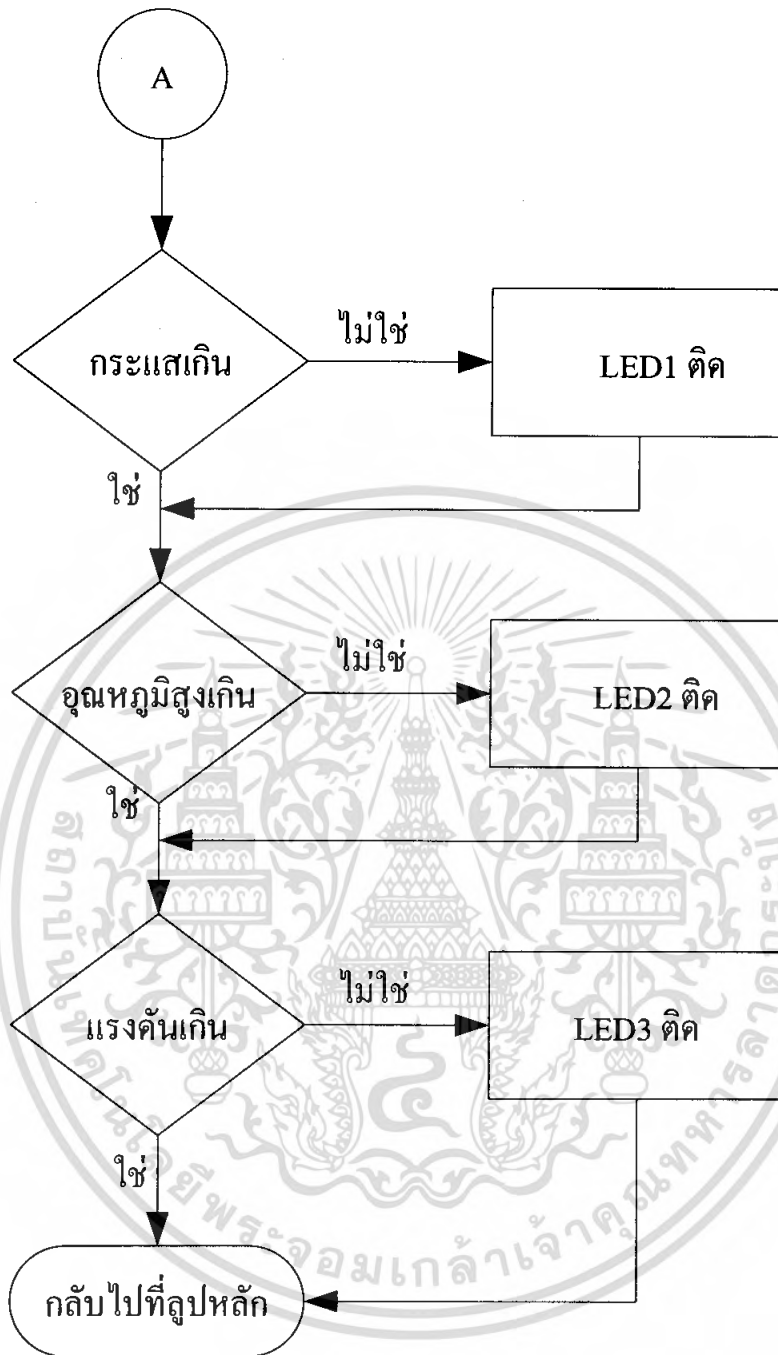
3.3 หลักการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมที่ทำงานบนไมโครคอนโทรลเลอร์ นั้นค่อนข้างมีความซับซ้อนเนื่องจากมีขั้นตอนในการทำงานมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องบริหารทรัพยากรของไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ดี โดยสามารถแสดงขั้นตอนการทำงาน (Flow chart) ได้ดังนี้



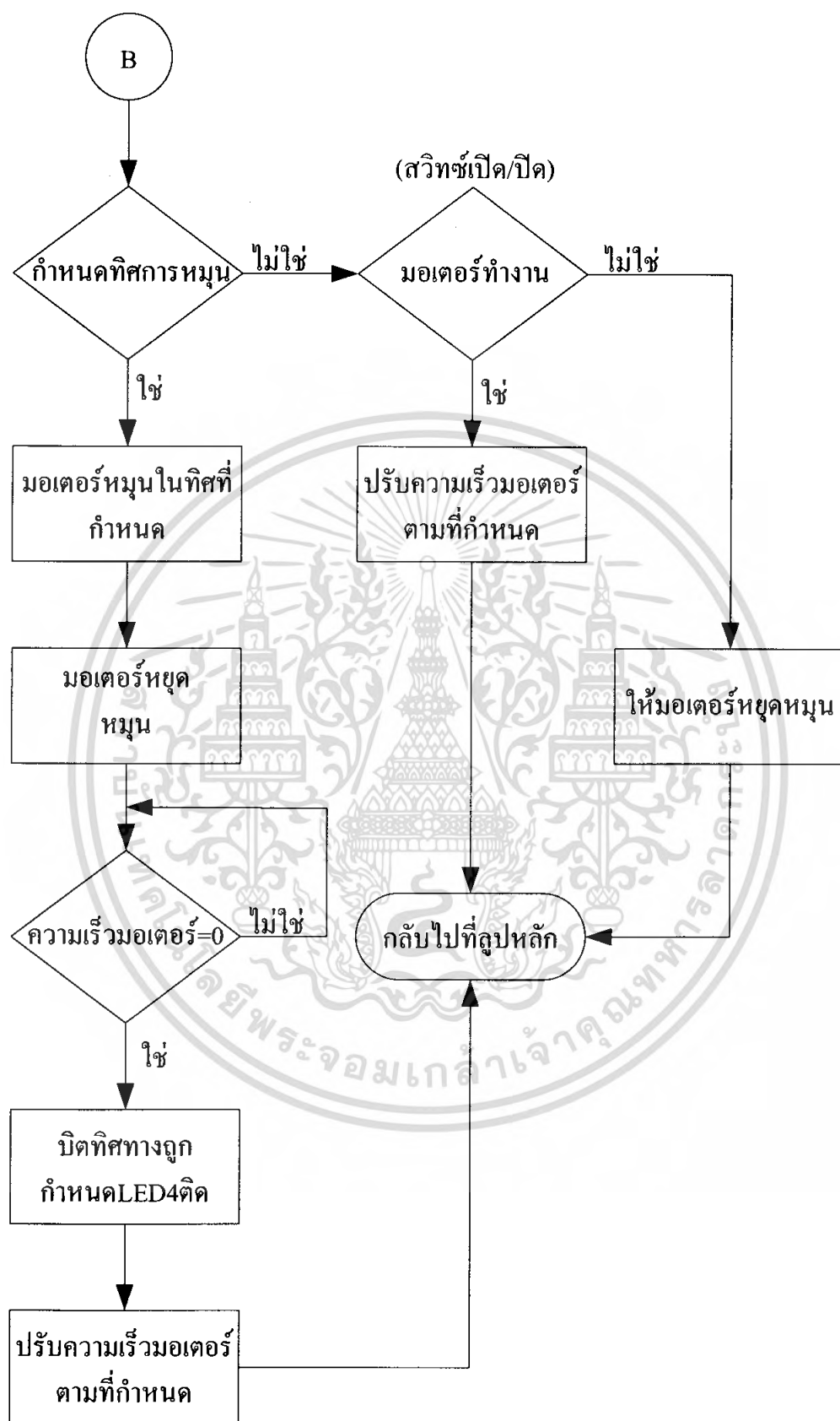
รูปที่ 3.7 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของลูปหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



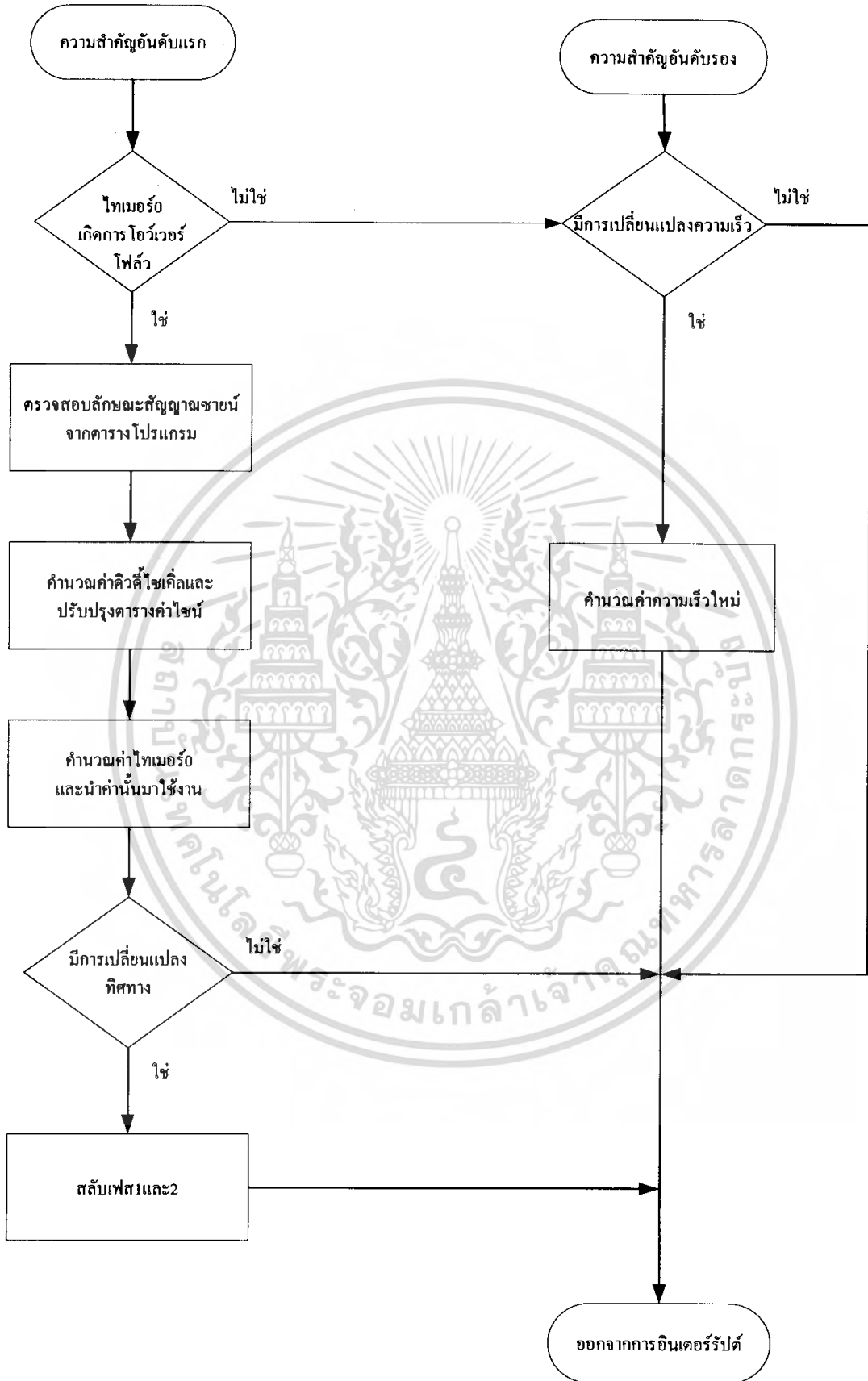
รูปที่ 3.8 โฟลว์ชาร์ตแสดงการตรวจสอบการผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางและการเปิดปิดการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 โฟลว์ชาร์ตแสดงการเกิดอินเอร์ร่ปต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขั้นตอนการทำงานข้างต้น เมื่อเริ่มต้นจะมีการตรวจสอบที่ลูปลูกซึ่งการตรวจสอบสามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอนคือ

1. ตรวจสอบความผิดปกติเนื่องจากการเกิดกระแสเกิน อุณหภูมิสูงเกิน หรือแรงดันเกิน ถ้าตรวจพบความผิดปกติในกรณีใดกรณีหนึ่งใน 3 กรณีนี้โปรแกรมจะกลับไปเริ่มทำงานที่ลูปลูกและตรวจสอบความผิดปกติซ้ำ หากไม่พบความผิดปกติจะมีการแสดงสัญญาณไฟ LED และจะตรวจสอบในขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

2. กรณีไม่พบความผิดปกติโปรแกรมจะทำการตรวจสอบลักษณะการสั่งงานของผู้ใช้ ถ้าไม่มีการสั่งงานจากผู้ใช้ โปรแกรมจะกลับไปทำงานที่ลูปลูก ถ้ามีการสั่งงานจากผู้ใช้ โปรแกรมจะตรวจสอบว่า สวิตช์กำหนดทิศทางกำหนดให้หมุนไปทางไหน และถ้ามีการเปลี่ยนทิศทางของมอเตอร์ โปรแกรมจะตรวจสอบว่ามอเตอร์หยุดหมุนแล้วหรือไม่ หากตรวจสอบพบว่ามอเตอร์หยุดหมุนแล้ว จึงจะสั่งให้มอเตอร์หมุนเปลี่ยนทิศทาง ขั้นตอนต่อไป โปรแกรมจะ ตรวจสอบสถานะของการสั่งทำงานและสั่งหยุด ถ้ามีการสั่งให้ทำงาน มอเตอร์ก็จะหมุนด้วยความเร็วที่ผู้ใช้กำหนดไว้ แต่ถ้าผู้ใช้สั่งหยุด มอเตอร์ก็จะหมุนช้าลงจนความเร็วเท่ากับศูนย์

สิ่งที่ทำให้เกิดการอินเตอร์รัปต์ จากขั้นตอนการทำงาน โปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่า รีจิสเตอร์ไทมเมอร์ 0 (Timer0) เกิดการโอเวอร์โฟลว์หรือไม่ ถ้าใช่โปรแกรมจะอ่านค่าสัญญาณรูปคลื่นรูปไซน์จากตารางที่ได้ทำการโปรแกรมไว้ จากนั้นจะคำนวณค่าดีวตี้ไซเคิล(Duty Cycle) โดยใช้ค่าความเร็วที่ได้จากการกำหนดโดยผู้ใช้เป็นตัวคำนวณ ค่าอนาคไทมเมอร์ 0 ใหม่ ตรวจสอบการเปลี่ยนทิศทางของผู้ใช้ถ้ามีการเปลี่ยนทิศทางจะทำการสลับเฟสระหว่างเฟส 1 กับเฟส 2 กรณียังไม่เกิดโอเวอร์โฟลว์ PIC จะแปลงค่าอนาล็อกไปเป็นดิจิทัลเพื่อนำไปกำหนดค่าความถี่ให้กับมอเตอร์

ในส่วนของวงจรส่วนควบคุมนั้น ได้จัดทำสวิตช์ต่างๆ และสัญญาณไฟ LED ไว้แสดงผล เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น ซึ่งสวิตช์ และสัญญาณไฟที่ใช้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- สวิตช์ เปิด/ปิด ใช้สำหรับเปิดและปิดการทำงานของวงจรทั้งหมด
- สวิตช์ หมุนซ้าย/หมุนขวา ใช้สำหรับเลือกทิศการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
- สวิตช์ หยุด/ทำงาน ใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์ให้หยุดหรือทำงาน
- ตัวต้านทานแปรค่า ใช้สำหรับปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
- LED L แสดงสถานะทิศทางการหมุนซ้ายของมอเตอร์
- LED R แสดงสถานะทิศทางการหมุนขวาของมอเตอร์
- LED Stop แสดงสถานะการหยุดทำงานของมอเตอร์
- LED Run แสดงสถานะการทำงานของมอเตอร์
- LED Power แสดงสถานะของไฟในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- LED Error บอกรถึงข้อผิดพลาดของระบบ โดยเมื่อสัญญาณไฟนี้ติดระบบจะหยุดการทำงานทันที เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ให้เป็นไปตามที่ต้องการ หลังจากศึกษาในส่วนทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์แบบต่างๆ แล้ว จึงได้มีการออกแบบวงจรเพื่อใช้ในการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส รวมทั้งวงจรส่วนการควบคุม และในเนื้อหาของบทนี้ก็จะกล่าวถึงการทดลองเพื่อวัดสัญญาณจากส่วนเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จะนำไปใช้สร้างสัญญาณขับมอเตอร์ การทดลองเพื่อวัดสัญญาณที่จะนำไปใช้ในการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสจากวงจรขับที่ได้ออกแบบไว้ และนำผลที่ได้จากการทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมาพล็อตกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดัน ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การทดลองที่ 1 ทดลองการทำงานของวงจรส่วนควบคุม

วัตถุประสงค์ของการทดลอง

วงจรส่วนควบคุมนั้นเป็นส่วนสำคัญที่ใช้เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในการทดลองการทำงานของวงจรมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่
2. เพื่อตรวจสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรว่ามีความผิดพลาดหรือไม่

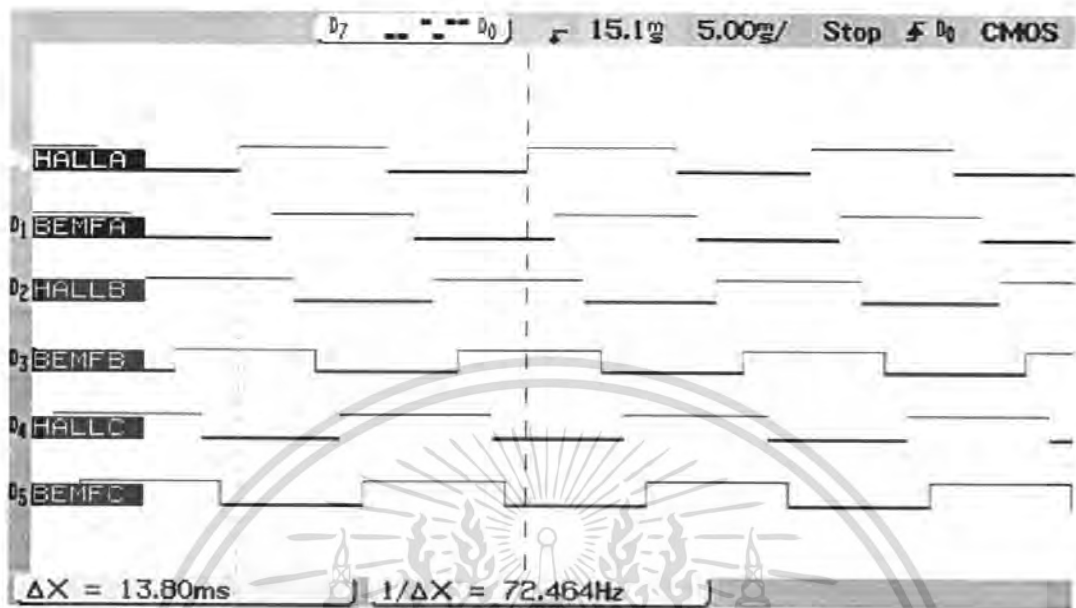
วิธีการทดลอง

การทดลองที่ 1 มีวิธีการทดลองดังนี้

1. นำวงจรส่วนควบคุมที่ได้สร้างขึ้นเสร็จสมบูรณ์แล้วมาจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจร
2. บันทึกค่าสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์

ผลที่ได้จากการทดลอง

เมื่อได้ทดสอบการทำงานของวงจรส่วนควบคุมแล้ว สามารถบันทึกสัญญาณที่ได้จากการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์

จากผลการทดลองที่ได้ จะสังเกตเห็นว่าสัญญาณที่ออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นมีทั้งหมด 6 สัญญาณ ซึ่งสัญญาณแต่ละสัญญาณนั้นก็จะทำให้อุปกรณ์สวิทซ์ (IGBT) แต่ละตัวเพื่อให้ อุปกรณ์สวิทซ์ ขั้วมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อไป

4.2 การทดลองที่ 2 ทดลองส่วนวงจรขั้วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

วัตถุประสงค์ของการทดลอง

วงจรขั้วนั้นเป็นส่วนที่รับสัญญาณจากวงจรส่วนควบคุมเพื่อทำให้อุปกรณ์สวิทซ์ทำงาน และเมื่อทำงานแล้วจะส่งสัญญาณเพื่อขั้วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ให้มีความเร็วรอบตามต้องการ ซึ่งการทดลองส่วนวงจรขั้วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส นี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อทดสอบวงจรว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่
2. เพื่อตรวจสอบสัญญาณที่ได้ว่ามีความผิดพลาดหรือไม่

วิธีการทดลอง

การทดลองที่ 2 มีวิธีการทดลองดังนี้

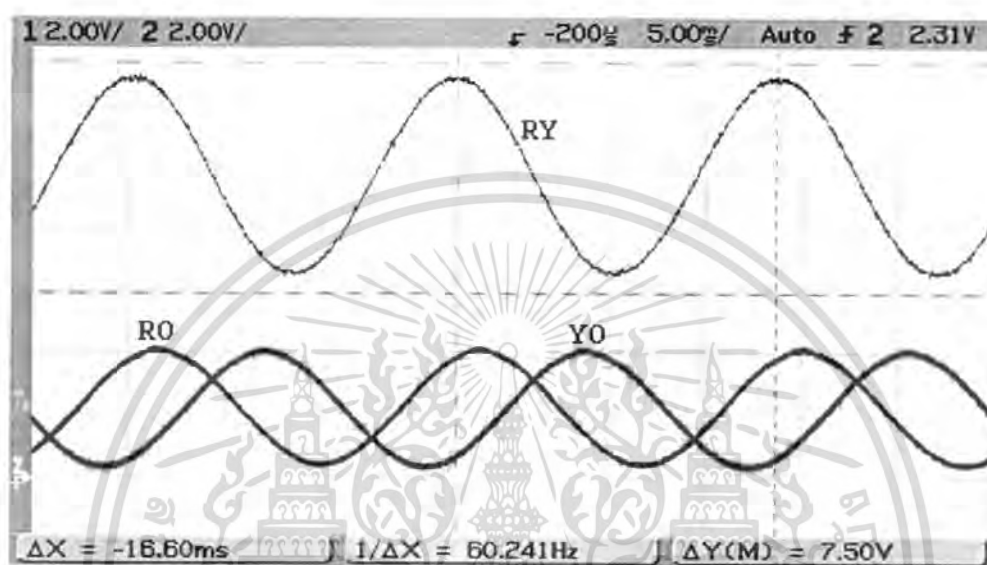
1. นำวงจรส่วนควบคุมที่ได้สร้างขึ้นเสร็จสมบูรณ์แล้วมาทดลองร่วมกันกับวงจรขั้ว เพื่อจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. บันทึกสัญญาณที่ได้จากวงจรขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ผลที่ได้จากการทดลอง

เมื่อได้ทดสอบการทำงานของวงจรขับแล้ว สามารถบันทึกสัญญาณที่ได้จากการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิง ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สัญญาณที่ได้จากการทำงานของวงจรควบคุมและวงจรขับ

รูปสัญญาณที่ได้จากการทดลองนั้นจะสังเกตเห็นว่าเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ 3 เฟส ที่จะนำไปขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั่นเอง โดยทฤษฎีแล้วสัญญาณนั้นคือสัญญาณ พี คับบลิว เอ็ม แต่เนื่องด้วยความถี่ที่สูง จึงทำให้มองเห็นเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ดังรูป

4.3 การทดลองที่ 3 ทดลองควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

วัตถุประสงค์ของการทดลอง

การทดลองควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มีวัตถุประสงค์ในการทดลองดังนี้

1. เพื่อทดลองว่าการแปรค่าแรงดันนั้นมีผลต่อความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
2. เพื่อทดลองการใช้งานของวงจรรวมว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริงหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง

การทดลองที่ 3 มีวิธีการทดลองดังนี้

1. นำสัญญาณขับมอเตอร์ที่ได้จากวงจรรวม มาขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แล้วทดลองแปรค่าแรงดัน สังเกตผลการเปลี่ยนแปลง
2. บันทึกผลการทดลอง

ผลที่ได้จากการทดลอง

เมื่อทดลองควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการแปรค่าแรงดันจากตัวต้านทานปรับค่าได้ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

| แรงดัน (Volt) | %PWM | รอบต่อนาที (RPM) |
|---------------|--------|------------------|
| 0.82 | 6.86 | 100 |
| 1.71 | 14.29 | 594.06 |
| 1.71 | 14.29 | 857.14 |
| 2.29 | 19.05 | 1153.85 |
| 2.49 | 20.76 | 1583.11 |
| 3.41 | 28.38 | 2150.54 |
| 5.12 | 42.67 | 3726.71 |
| 6.49 | 64.10 | 4800.00 |
| 7.77 | 64.76 | 5154.64 |
| 8.27 | 68.95 | 5617.98 |
| 9.46 | 78.86 | 6437.77 |
| 12 | 100.00 | 8000.00 |

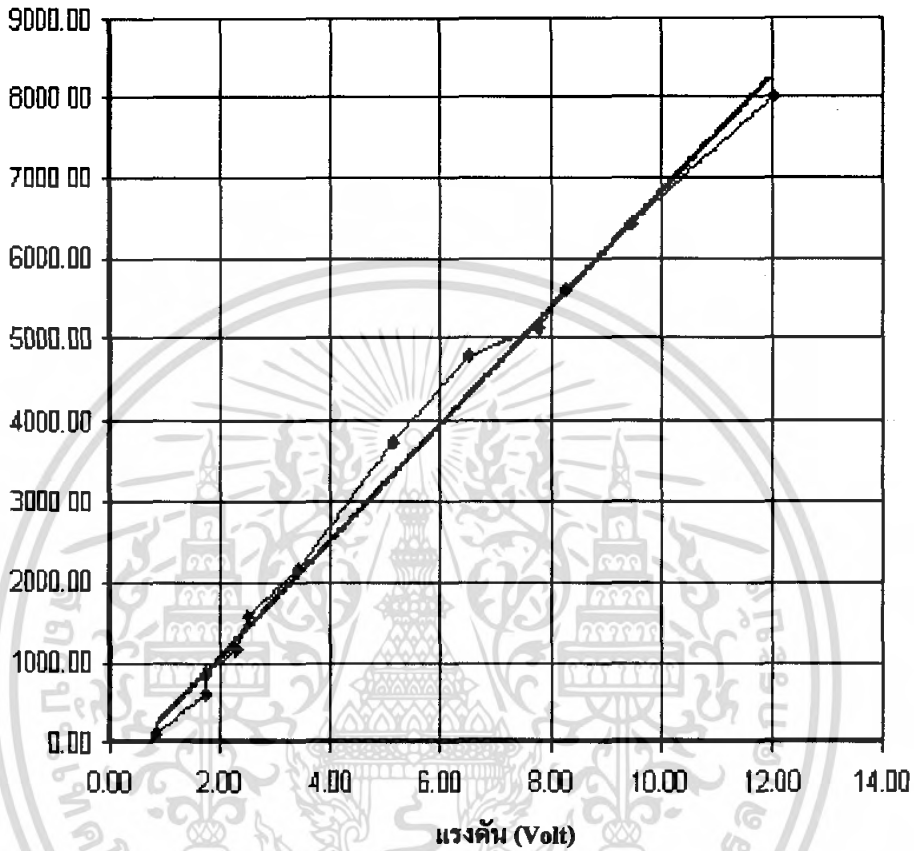
ตารางที่ 4.1 ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการแปรค่าแรงดัน

ผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.1 สามารถนำมาพล็อตกราฟดังรูปที่ 4.3 เพื่อเทียบกันระหว่างความเร็วรอบที่ได้จากวงจรที่ออกแบบไว้กับ ความเร็วรอบตามทฤษฎีของการขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความเร็วรอบเป็นสมการเส้นตรงซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.1 และเมื่อแทนค่า $f = V/k\phi$ จะได้ว่า $N_s \propto V$ หากพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้น ความเร็วรอบของมอเตอร์ยิ่งเพิ่มขึ้นตามเส้นกราฟที่เป็นทฤษฎี โดยมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลาดเคลื่อนบ้าง และจากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่าหากต้องการเพิ่มความเร็วรอบให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทำได้โดยเพิ่มแรงดันนั่นเอง

ความเร็วรอบ (RPM)



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดัน

หมายเหตุ แรงดันที่ใช้คือแรงดันที่ได้จากวงจรขับเพื่อใช้ในการขับมอเตอร์ แต่ถูกปรับให้ต่ำลง เพื่อความปลอดภัยในการทดลอง และเพื่อให้สามารถใช้อุปกรณ์ในการวัดสัญญาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทดลองเพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการแปรค่าแรงดันและความถี่นั้น ผลการทดลองที่ได้คือเมื่อเพิ่มแรงดัน โดยการปรับค่าความต้านทาน ผลที่ได้คือความเร็วรอบของมอเตอร์มากขึ้น ดังที่แสดงด้วยกราฟที่ได้พล็อตไว้ตามความสัมพันธ์ของแรงดันและความเร็วรอบเพื่อเป็นการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วรอบที่ได้ตามทฤษฎีและความเร็วรอบที่ได้จริงจากวงจรที่ออกแบบขึ้น โดยจะเห็นค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากทฤษฎีเนื่องจากปัจจัยหลายด้านที่มีผลต่อความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เช่น คุณสมบัติของมอเตอร์ที่นำมาใช้ในการทดลอง ความคลาดเนื่องจากสัญญาณที่ออกจากวงจร เป็นต้น

การทดลองในครั้งนี้สามารถนำวงจรไปใช้ขับและควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ให้เป็นไปตามต้องการได้ อีกทั้งยังสามารถที่จะพัฒนาในส่วนของวงจรและโปรแกรมเพื่อให้มีการป้อนกลับเพื่อการควบคุมโดยอัตโนมัติได้ต่อไป

5.2 ปัญหาและอุปสรรคการทำวิจัย

เนื่องจากการจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีขั้นตอนในการทำงานหลายขั้นตอน อีกทั้งยังมีข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นต้องทำความเข้าใจมาก จึงทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ดังนี้

1. ในโครงงานนี้มีทฤษฎีต่างๆ เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องในการทำงานหลายอย่างจึงทำให้มีข้อมูลในส่วนทฤษฎีมาก อีกทั้งยังมีส่วนประกอบของวงจรที่ต้องใช้ในการขับและควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส หลายวงจร ทั้งในส่วนของวงจรกำลัง วงจรขับ วงจรส่วนการควบคุม จึงทำให้เกิดปัญหาการผิดพลาดจากวงจรเหล่านี้ทำให้เสียเวลาในการหาข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในส่วนของวงจรต่างๆ ในการขับและควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส นั้นมีจำนวนค่อนข้างมากจึงเกิดปัญหาในการนำมาใช้ และในการนำอุปกรณ์อื่นมาใช้ทดแทนอุปกรณ์ที่ขาด เนื่องจากการขาดประสบการณ์ในการเลือกใช้อุปกรณ์

3. ในการทดลองนั้นใช้แรงดันไฟฟ้าสูง อีกทั้งยังมีปัจจัยในด้านความผิดพลาดของวงจรทำให้เกิดความเสียหายขึ้น

4. ในการทดลองใช้แรงดันไฟฟ้าสูงจึงทำให้เกิดอุปสรรคในการวัดสัญญาณ เนื่องจากว่าอุปกรณ์วัดสัญญาณมีข้อจำกัดในเรื่องการรับแรงดัน จึงต้องทำให้ต้องลดแรงดันลงมาเพื่อให้สามารถวัดสัญญาณ และความเปลี่ยนแปลงต่างๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 สรุปผลการดำเนินงาน

1. มีความเข้าใจในทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นส่วนควบคุมหลักของการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
2. มีความเข้าใจในการทำงานของวงจรขับและวงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
3. ได้ออกแบบวงจรขับและวงจรควบคุมที่สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้อย่างดี
4. ได้ทดลองวงจรขับและวงจรควบคุมที่ได้ออกแบบจนสามารถใช้งานได้จริง และนำมาใช้เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
5. ได้เรียนรู้ถึงการวางแผนในการทำงาน วิธีการทำงานร่วมกับผู้อื่น วิธีแก้ปัญหาที่เกิดจากการทำงาน เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตได้จริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัยวัฒน์ ลีมพรจิตวิไล, วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล. **เรียนรู้และปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์.**
กรุงเทพมหานคร: บริษัท อิน โนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด
- [2] James Maas. Industrial Electronics. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- [3] ชานินทร์ จุฬิม. **“การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบความถี่สลับที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2546.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการขับและการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (PIC18F4331) เป็นส่วนควบคุมหลักเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทำงาน โดยโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมมีดังนี้

```
;User defined variables
;-----
;Oscillator frequency
#define OSCILLATOR      d'20000000'
;-----
;Timer0 prescaler
#defineTIMER0_PRESCALE  d'16'
;-----
;number of entries in the sine table, or the sampling frequency
#defineSINE_TABLE_ENTRIES  d'19'
;-----
SAMPLES_PER_CYCLE = (SINE_TABLE_ENTRIES-1)*d'2'
INSTRUCTION_CYCLE = (OSCILLATOR)/d'4'
FREQUENCY_SCALE =
(INSTRUCTION_CYCLE/SAMPLES_PER_CYCLE)/(TIMER0_PRESCALE/4)
;Timer prescale/4 is done to compensate ADC multiplication factor of 4 to the
frequency)
;-----
;PWM frequency definition
#define TIMER2_PRESCALE  d'01'
#definePWM_FREQUENCY d'20000'
;#define      PWM_FREQUENCY d'16000'
PR2_VALUE = (OSCILLATOR/(4*PWM_FREQUENCY*TIMER2_PRESCALE))-
1
;-----
;ADC initialization
#defineFosc_by_2    b'000'
#defineFosc_by_8    b'001'
#defineFosc_by_32   b'010'
#defineFRC          b'011'
#defineFosc_by_4    b'100'
#defineFosc_by_16   b'101'
#defineFosc_by_64   b'110'

#defineADC_CLOCK      Fosc_by_32
#defineADC_CHANNEL    d'0'
#defineADC_ON_BIT     b'1'
#define LEFT_JUSTIFIED
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#define ADC_PORT_CONFIG      b'1110'; Refer the table in the manual for
selection
```

```
ADCON0_VALUE =
((ADC_CLOCK<<6)|(ADC_CHANNEL<<4)|(ADC_ON_BIT))

    if ((ADC_CLOCK==Fosc_by_2)|| (ADC_CLOCK
==Fosc_by_8)|| (ADC_CLOCK==Fosc_by_32)|| (ADC_CLOCK==FRC))
        ifndef LEFT_JUSTIFIED
ADCON1_VALUE = ((1<<7) | (ADC_PORT_CONFIG))
        else
ADCON1_VALUE = ADC_PORT_CONFIG
        endif
    endif
    if
        ((ADC_CLOCK==Fosc_by_4)|| (ADC_CLOCK==Fosc_by_16)|| (ADC_CLO
CK==Fosc_by_64))
        ifndef LEFT_JUSTIFIED
ADCON1_VALUE = ((1<<7) | (1<<6) | (ADC_PORT_CONFIG))
        else
ADCON1_VALUE = ((1<<6) | (ADC_PORT_CONFIG))
        endif
    endif
endif
```

```
-----
;
;*****
;*****
    include      <p18f2431.inc>
    include      <MC_18F2431.inc>
;*****
;*****
```

```
    __CONFIG __CONFIG1H, 0x02 ; OSC_HS_1H
& _FCMEN_OFF_1H & _IESO_OFF_1H
    __CONFIG __CONFIG2L, 0x06 ; PWRTEN_ON_2L & _BOREN_ON_2L &
    _BORV_20_2L
    __CONFIG __CONFIG2H, 0x3E ; WDTEN_OFF_2H
    __CONFIG __CONFIG3L, 0x24 ; 0x3c ; _PWMPIN_OFF_3L &
    _LPOL_LOW_3L & _HPOL_LOW_3L & _GPTREN_ON_3L
    __CONFIG __CONFIG3H, 0x9D ; _FLTAMX_RC1_3H &
    _PWM4MX_RB5_3H
    __CONFIG __CONFIG4L, 0x7b
    __CONFIG __CONFIG5L, 0x0F
    __CONFIG __CONFIG5H, 0xC0
    __CONFIG __CONFIG6L, 0x0F
    __CONFIG __CONFIG6H, 0xE0
    __CONFIG __CONFIG7L, 0x0F
    __CONFIG __CONFIG7H, 0x40
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;FLAGS bits
#define MOTOR_FREQ_COUNTER      0
#define FLAG_FAULT              1
#define PARAM_DISPLAY          2
#define POSITION_BIT             3
#define OFFSET1_FLAG           4
#define OFFSET2_FLAG           5
#define OFFSET3_FLAG           6
#define MOTOR_FREQ_COUNTER7    7

;FLAGS1 bits
#define DEBOUNCE                0
#define KEY_RS                  1
#define KEY_FR                  2
#define KEY_PRESSED             3
#define RUN_STOP                4
#define FWD_REV                 5
#define FREQ_UPDATE             6
#define FEEDBACK_UPDATE         7

;Keys parameters
#define KEY_PORT                 PORTB
#define RUN_STOP_KEY            6
#define FWD_REV_KEY             7
#define DEBOUNCE_COUNT         0xFF

;Delay parameters
#define DELAY_COUNT1            0xFF
#define DELAY_COUNT2            0xFF

;LED parameters
#define LED_PORT                 PORTC
#define RUN_STOP_LED           0
#define FWD_REV_LED            2

;Duty cycle limit definition, for 20KHz @20MHz, 2uS deadtime
#define MINH_DUTY_CYCLE        0x00 ;minimum duty cycle corresponds to 3 x
deadtime = 3 x 2uS = 6uS PDC = 6uS/(4/Fosc)
#define MINL_DUTY_CYCLE        0x3C ; try doubling from 0x1E ;
#define MAXL_DUTY_CYCLE        0xE0 ;maximum duty cycle is 4 x PTPER
#define MAXH_DUTY_CYCLE        0x03

;Duty cycle limit definition, for 16KHz @20MHz, 2uS deadtime
#define MINH_DUTY_CYCLE        0x00 ;minimum duty cycle
corresponds to 3 x deadtime = 3 x 2uS = 6uS PDC = 6uS/(4/Fosc)
#define MINL_DUTY_CYCLE        0x1E ;
#define MAXL_DUTY_CYCLE        0xDC ;maximum duty cycle is 4 x
PTPER
#define MAXH_DUTY_CYCLE        0x04

```



```

*****
*****
*****
*****
MAIN_LOOP
    btfss  FLAGS,MOTOR_FREQ_COUNTER      ;back from Timer0
overflow?
    bra    bypass                        ;No
    call   UPDATE_PWM_DUTYCYCLES        ;Yes, update the PWM duty cycle
with new value
    call   UPDATE_TABLE_OFFSET          ;Update 3 offsets
    call   CALCULATE_NEW_SPEED
    bcf    FLAGS,MOTOR_FREQ_COUNTER     ;Clear the flag
bypass

    btfss  ADCON0, GO                    ;If AD Conversion is
complete
    bsf    ADCON0, GO                    ; then start a
new conversion

    call   KEY_CHECK                     ;Check keys change
    call   PROCESS_KEY_PRESSED

    btfsc  FLTCONFIG,FLTAS
    call   FAULTA_PROCESS

    btfsc  FLAGS,FLAG_FAULT
    call   TOGGLE_LEDS
    bra    MAIN_LOOP

*****
*****
*****
*****
;
ROUTINES
*****
*****
*****
*****
;High priority interrupt service routine
;Timer0 overflow are checked
*****
*****

```

ISR_HIGH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    btfsc PIR1,ADIF          ;HSADC Interrupt?
    bra    READ_ADC_RESULTS ;Yes
;
; btfsc PIR3,PTIF          ;PWM Interrupt?
; bra    PWM_INTERRUPT    ;Yes
btfsc INTCON,TMR0IF        ;Timer0 overflow Interrupt?
bra    TIMER0_OVERFLOW    ;Yes
RETFIE    FAST

;-----
READ_ADC_RESULTS

    movff ADRESH,FREQUENCY ;first value is group A, assigned
to AN8, current measurement
    movlw 0x30              ;Minimum Frequency set to 5Hz
    (scaling factor X4)
    cpfsgt FREQUENCY       ; if frequency is less than
or equal to 5Hz..
    movwf FREQUENCY        ; set it to 5Hz
    movlw 0xD0              ;Limiting V/F to F= 60Hz (scaling factor
X4)
    cpfslt FREQUENCY       ; if frequency is greater
than or equal to 60Hz..
    movwf FREQUENCY        ; set it to
60Hz
    movlw 0x22
    addwf FREQUENCY,F
    bcf    PIR1,ADIF        ;ADIF flag is cleared for
next interrupt
    RETFIE    FAST

;-----
PWM_INTERRUPT
    dcfstz MOTOR_FREQUENCY,F ;Replace
with NOPs if to be removed
    bsf    FLAGS,MOTOR_FREQ_COUNTER
    bcf    PIR3,PTIF        ;Timer2 to PR2
match?
    RETFIE    FAST

;-----
TIMER0_OVERFLOW            ;TMR0 overflow
ISR
;
; movff  FREQ_REF_H,TMR0H   ;Load the Higher byte of
SpeedCommand to TMR0H
    movlw 0xFF
    movwf TMR0H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

movff MOTOR_FREQUENCY,TMR0L           ;Load the Lower byte of
SpeedCommand to TMR0L

```

```

bsf     FLAGS,MOTOR_FREQ_COUNTER
bcf     INTCON,TMR0IF                 ;Clear TMR0IF
RETFIE  FAST

```

```

;*****
;*****

```

```

;Low priority interrupt service routine

```

```

;*****
;*****

```

```

ISR_LOW

```

```

RETFIE  FAST

```

```

;*****
;*****

```

```

;*****
;*****

```

```

;
SUBROUTINES

```

```

;*****
;*****

```

```

;*****
;*****

```

```

;*****
;*****

```

```

;UPDATE_PWM_DUTYCYCLES

```

```

;
;This routine will update the PWM duty cycle on CCPx according to the
;offset to the table with 0-120-240 degrees.
;This routine scales the PWM value from the table based on the frequency to keep
V/F

```

```

;constant.

```

```

;*****
;*****

```

```

UPDATE_PWM_DUTYCYCLES

```

```

movf  TABLE_OFFSET1,W           ;Load the table offset for
Phase 1
movf  PLUSW0,W                   ;Use offset to access value in sine
table via indirect addressing
mulwf FREQUENCY, W              ;Table_value X Frequency
movff PRODH,PDC0H_TEMP         ;Copy high product into
temporary variable for PDC0H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        movff PRODL,PDC0L_TEMP           ;Copy low product into
temporary variable for PDC0L

;      movlw 0x1E                       ;Add 78h (1Eh shifted left two
bits), in order to prevent 0 duty cycle
;      addwf PDC0L_TEMP, F
;      btfsc STATUS, C
;      incf  PDC0H_TEMP, F

UPDATE_PWM2
        movf  TABLE_OFFSET2,W         ;Load the table offset for
Phase 2
        movf  PLUSW0,W                 ;Use offset to access value in sine
table via indirect addressing
        mulwf FREQUENCY, W            ;Table_value X Frequency
        movff PRODH,PDC1H_TEMP        ;Copy high product into
temporary variable for PDC1H
        movff PRODL,PDC1L_TEMP        ;Copy low product into
temporary variable for PDC1L

;      movlw 0x1E                       ;Add 78h (1Eh shifted left two
bits), in order to prevent 0 duty cycle
;      addwf PDC0L_TEMP, F
;      btfsc STATUS, C
;      incf  PDC0H_TEMP, F

UPDATE_PWM3
        movf  TABLE_OFFSET3,W         ;Load the table offset for
Phase 3
        movf  PLUSW0,W                 ;Use offset to access value in sine
table via indirect addressing
        mulwf FREQUENCY, W            ;Table_value X Frequency
        movff PRODH,PDC2H_TEMP        ;Copy high product into
temporary variable for PDC2H
        movff PRODL,PDC2L_TEMP        ;Copy low product into
temporary variable for PDC2L

;      movlw 0x1E                       ;Add 78h (1Eh shifted left two
bits), in order to prevent 0 duty cycle
;      addwf PDC0L_TEMP, F
;      btfsc STATUS, C
;      incf  PDC0H_TEMP, F

TRUNCATE_PWM123                          ;Truncate results
of multiply to 10 uppermost bits
        bcf          STATUS,C          ;discarding lower two bits
and right justifying
        rlc         PDC0L_TEMP,F
        rlc         PDC0H_TEMP,F
        rlc         PDC0L_TEMP,F

```

```

rlcf PDC0H_TEMP,F
rlcf PDC0L_TEMP,W
andlw 0x3
movff PDC0H_TEMP,PDC0L_TEMP
movwf PDC0H_TEMP

```

```

bcf STATUS,C
rlcf PDC1L_TEMP,F
rlcf PDC1H_TEMP,F
rlcf PDC1L_TEMP,F
rlcf PDC1H_TEMP,F
rlcf PDC1L_TEMP,W
andlw 0x3
movff PDC1H_TEMP,PDC1L_TEMP
movwf PDC1H_TEMP

```

```

bcf STATUS,C
rlcf PDC2L_TEMP,F
rlcf PDC2H_TEMP,F
rlcf PDC2L_TEMP,F
rlcf PDC2H_TEMP,F
rlcf PDC2L_TEMP,W
andlw 0x3
movff PDC2H_TEMP,PDC2L_TEMP
movwf PDC2H_TEMP

```

```

;testofPWM
; infsnz temp, f
; incf temp1, f
; btfs temp1, 2 ;if this bit is set temp1=4
; goto donewiththis
; clrf temp
; clrf temp1
;donewiththis
; movff temp, PDC0L_TEMP
; movff temp1, PDC0H_TEMP

; movlw 0x01
; movwf PDC0L_TEMP
; movlw 0x00
; movwf PDC0H_TEMP
; movlw 0xe8
; movwf PDC1L_TEMP
; movlw 0x03
; movwf PDC1H_TEMP

```

```
call CHECK_LIMITS
```

```
bsf PWMCON1, UDIS ;Disable updates to duty cycle
and period
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        movff PDC0L_TEMP,PDC0L      ;Transfer temporary values into duty
cycle registers
        movff PDC0H_TEMP,PDC0H
        movff PDC1L_TEMP,PDC1L
        movff PDC1H_TEMP,PDC1H
        movff PDC2L_TEMP,PDC2L
        movff PDC2H_TEMP,PDC2H

;
;   movlw 0xFA
;   movwf PDC0L
;   movlw 0x00
;   movwf PDC0H
;   movlw 0xF4
;   movwf PDC1L
;   movlw 0x01
;   movwf PDC1H
;   movlw 0xEE
;   movwf PDC2L
;   movlw 0x02
;   movwf PDC2H

        bcf          PWMCON1, UDIS      ;Enable updates to duty cycle and
period to update simultaneously.

        return

;*****
;*****
;UPDATE_TABLE_OFFSET
;
;This routine Updates the offset pointers to the table after every access
;*****
;*****
UPDATE_TABLE_OFFSET
        btfss      FLAGS,OFFSET1_FLAG      ;If set incr. on table
        bra          DECREMENT_OFFSET1
        movlw     (SINE_TABLE_ENTRIES-1)   ;Check for the last value
on the table
        cpfslt    TABLE_OFFSET1
        bra          CLEAR_OFFSET1_FLAG
        incf      TABLE_OFFSET1,F        ;Increment offset1
        bra          UPDATE_OFFSET2

CLEAR_OFFSET1_FLAG
        bcf          FLAGS,OFFSET1_FLAG

DECREMENT_OFFSET1
        dcfsnz    TABLE_OFFSET1,F        ;Decrement offset1

```

```
bsf          FLAGS,OFFSET1_FLAG
```

UPDATE_OFFSET2

```
btfsz  FLAGS,OFFSET2_FLAG          ;If set incr. on table
bra    DECREMENT_OFFSET2
movlw  (SINE_TABLE_ENTRIES-1)      ;Check for the last value
on the table
cpfsz  TABLE_OFFSET2
bra    CLEAR_OFFSET2_FLAG
incf   TABLE_OFFSET2,F            ;Increment offset2
bra    UPDATE_OFFSET3
```

CLEAR_OFFSET2_FLAG

```
bcf          FLAGS,OFFSET2_FLAG
```

DECREMENT_OFFSET2

```
dcfsnz TABLE_OFFSET2,F            ;Decrement offset2
bsf          FLAGS,OFFSET2_FLAG
```

UPDATE_OFFSET3

```
btfsz  FLAGS,OFFSET3_FLAG          ;If set incr. on table
bra    DECREMENT_OFFSET3
movlw  (SINE_TABLE_ENTRIES-1)      ;Check for the last value
on the table
cpfsz  TABLE_OFFSET3
bra    CLEAR_OFFSET3_FLAG
incf   TABLE_OFFSET3,F            ;Increment offset3
return
```

CLEAR_OFFSET3_FLAG

```
bcf          FLAGS,OFFSET3_FLAG
```

DECREMENT_OFFSET3

```
dcfsnz TABLE_OFFSET3,F            ;Decrement offset3
bsf          FLAGS,OFFSET3_FLAG
return
```

CALCULATE_NEW_SPEED

```
movff  FREQUENCY,MOTOR_FREQUENCY
bcf    STATUS,C
rrcf   MOTOR_FREQUENCY,F
bcf    STATUS,C
rrcf   MOTOR_FREQUENCY,F
movlw  0xB5
addwf  MOTOR_FREQUENCY,F
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
; movwf MOTOR_FREQUENCY
; movlw 0x20
; addwf MOTOR_FREQUENCY,W
; movwf MOTOR_FREQUENCY
```

```
return
```

```
*****
*****
```

```
;CHECK_LIMIT ROUTINE
```

```
; for frequency < 60Hz, duty cycle will be less than MAX_DUTY_CYCLE (4 x
PTPER) due to
```

```
; the selection of sine table values
```

```
; it is still necessary to ensure that PDC is greater or equal to
MINL_DUTY_CYCLE (3 x deadtime)
```

```
;
```

```
*****
*****
```

```
CHECK_LIMITS
```

```
CHK_PWM0_MIN ;Test to see if PDC0H:PDC0L <
0:MINL_DUTY_CYCLE
```

```
movf PDC0H_TEMP, F ;First, is PDC0H = 0?
```

```
bnz CHK_PWM1_MIN ; if no, then PDC cannot be
less than minimum, check next value
```

```
movlw MINL_DUTY_CYCLE ;Second, is PDC0L >
MINL_DUTY_CYCLE?
```

```
cpfsft PDC0L_TEMP ; if yes, then PDC is
not less than minimum, check next value
```

```
movwf PDC0L_TEMP ; if no, make it the
minimum value
```

```
CHK_PWM1_MIN ;Test to see if PDC1H:PDC1L <
0:MINL_DUTY_CYCLE
```

```
movf PDC1H_TEMP, F ;First, is PDC1H = 0?
```

```
bnz CHK_PWM2_MIN ; if no, then PDC cannot be
less than minimum, check next value
```

```
movlw MINL_DUTY_CYCLE ;Second, is PDC1L >
MINL_DUTY_CYCLE?
```

```
cpfsft PDC1L_TEMP ; if yes, then PDC is
not less than minimum, check next value
```

```
movwf PDC1L_TEMP ; if no, make it the
minimum value
```

```
CHK_PWM2_MIN ;Test to see if PDC2H:PDC2L <
0:MINL_DUTY_CYCLE
```

```
movf PDC2H_TEMP, F ;First, is PDC2H = 0?
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        bnz         DONE_CHECK_LIMITS    ;    if no, then PDC cannot be
less than minimum, check next value
        movlw MINL_DUTY_CYCLE            ;Second, is PDC2L >
MINL_DUTY_CYCLE?
        cpdfsgt   PDC2L_TEMP             ;    if yes, then PDC is
not less than minimum, check next value
        movwf PDC2L_TEMP                 ;    if no, make it the
minimum value

DONE_CHECK_LIMITS
        return

```

```

;*****
;
;*****
;This routine stops the motor by driving the PWMs to 0% duty cycle.
;*****
;*****
STOP_MOTOR
        bcf         PIE1,ADIE
        bcf         INTCON,TMR0IE
        clrf        OVDCOND              ;enable output overrides before setting
duty cycle to zero (due to an errata)
;        clrf        PDC0H
;        clrf        PDC1H
;        clrf        PDC2H
;        clrf        PDC3H
;        clrf        PDC0L
;        clrf        PDC1L
;        clrf        PDC2L
;        clrf        PDC3L
        clrf        TABLE_OFFSET1
        clrf        TABLE_OFFSET2
        clrf        TABLE_OFFSET3
        bcf         FLAGS, MOTOR_FREQ_COUNTER
;        goto        $-2

        return

```

```

;*****
;
;*****
;This routine starts motor from previous stop with motor parameters initialized
;*****
;*****
RUN_MOTOR_AGAIN
        bsf         FLAGS1,RUN_STOP
        bcf         FLAGS,FLAG_FAULT
        bsf         PIE1,ADIE
        call        INIT_MOTOR_START

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    call    UPDATE_PWM_DUTYCYCLES    ;Yes, update the PWM duty cycle
with new value
    call    UPDATE_TABLE_OFFSET      ;Update 3 offsets
    bsf     INTCON,TMR0IE
    movlw  b'11111111'                ;after duty cycles contain non-
zero values,
    movwf  OVDCOND                    ;OVDCOND is
configured such that there is no output override

    return

```

```

*****
;
*****
;
*****

```

KEY SWITCH SUBROUTINES

```

*****
;
*****
;
*****

```

```

*****
;
*****

```

;This routine checks for the keys status. 2 keys are checked, Run/Stop and Forward(FWD)/Reverse(REV)

```

*****
;
*****

```

KEY_CHECK

```

;    movf  PORTB,WREG
;    btfss WREG,RUN_STOP_KEY
;    btfss KEY_PORT,RUN_STOP_KEY    ;Is key pressed
"RUN/STOP"?
    goto  CHECK_FWD_REV_KEY
    btfsc FLAGS1,DEBOUNCE
    return
    call  KEY_DEBOUNCE
    btfss FLAGS1,DEBOUNCE
    return
    bsf   FLAGS1,KEY_RS
    return

```

CHECK_FWD_REV_KEY

```

;    btfss KEY_PORT,FWD_REV_KEY    ;Is key pressed
"FWD/REV"?
    goto  SET_KEYS
    btfsc FLAGS1,DEBOUNCE
    return
    call  KEY_DEBOUNCE
    btfss FLAGS1,DEBOUNCE

```

```

return
bsf      FLAGS1,KEY_FR
return

SET_KEYS
  btfss  FLAGS1,DEBOUNCE
  return
  bcf    FLAGS1,DEBOUNCE
  bsf    FLAGS1,KEY_PRESSED
  btfss  FLAGS1,KEY_RS
  bra    ITS_FWD_REV
  btg    FLAGS1,RUN_STOP
  return

ITS_FWD_REV
  btg    FLAGS1,FWD_REV
  return

;*****
;*****
KEY_DEBOUNCE
  decfsz DEBOUNCE_COUNTER,F
  return
  bsf    FLAGS1,DEBOUNCE
  movlw  DEBOUNCE_COUNT
  movwf  DEBOUNCE_COUNTER
  return
;*****
;*****
PROCESS_KEY_PRESSED
  btfss  FLAGS1,KEY_PRESSED
  return
  btfss  FLAGS1,KEY_RS
  goto   CHECK_FWD_REV
  btfss  FLAGS1,RUN_STOP
  goto   STOP_MOTOR_NOW
  call   RUN_MOTOR_AGAIN
  bcf    FLAGS1,KEY_PRESSED
  bcf    FLAGS1,KEY_RS

  bsf    LED_PORT,RUN_STOP_LED
  return

STOP_MOTOR_NOW
  call   STOP_MOTOR           ;STOP motor
  bcf    FLAGS1,KEY_PRESSED
  bcf    FLAGS1,KEY_RS
  bcf    LED_PORT,RUN_STOP_LED
  return

CHECK_FWD_REV

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;   btfsz  FLAGS1,KEY_FR
;   return

;   btg    LED_PORT,FWD_REV_LED
;   bcf    LED_PORT,RUN_STOP_LED
;   call   STOP_MOTOR
;
;
;   call   DELAY
;   call   DELAY
;   call   DELAY
;   call   DELAY
;
;   btg    FLAGS,MOTOR_DIRECTION
;
;   call   RUN_MOTOR_AGAIN
;   bcf    FLAGS1,KEY_PRESSED
;   bcf    FLAGS1,KEY_FR
;   bsf    LED_PORT,RUN_STOP_LED
;   return

```

```

;*****
;*****

```

```

; FAULTA_PROCESS

```

```

;*****
;*****

```

```

FAULTA_PROCESS

```

```

    bsf    PORTC,0

    bsf    FLAGS,FLAG_FAULT
    call   STOP_MOTOR
    bcf    FLTCONFIG,FLTAS
    bcf    FLAGS1,KEY_PRESSED
    bcf    FLAGS1,KEY_RS
    bcf    FLAGS1,RUN_STOP
    return

```

```

;*****
;*****

```

```

; TOGGLE_LEDS

```

```

;*****
;*****

```

```

TOGGLE_LEDS

```

```

    incfsz COUNTER_SP,F
    return
    incfsz COUNTER_SP1,F
    return
    btg    PORTC,0
    return

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

movlw b'00000000'          ; ADCON1 is configured such that:
movwf ADCON1              ; a) Vref+ and Vref- are Avdd
and Avss, respectively.   ; b) The FIFO buffer is
disabled
movlw b'00110010'        ; ADCON2 is configured such that:
movwf ADCON2              ; a) The A/D result is left justified
(so remember to read ADRESL before reading ADRESH)
                           ; b) The A/D acquisition
time is set to 12Tad, as required for sequential conversion.
                           ; c) The A/D conversion
clock is set to Fosc/32.
movlw b'00000000'        ; ADCON3 is configured such that:
movwf ADCON3              ; a) An interrupt is generated on
every 2nd and 4th write to the FIFO buffer.
                           ; b) No external ADC
triggers are enabled.
movlw b'00000000'        ; ADCHS is configured such that:
movwf ADCHS              ; a) Group A signal is AN0,
current reference         ; b) Group B signal is
AN1, speed reference     ; c) Group C signal is
AN6,
movlw b'00000011'        ; ANSEL0 is configured such that:
movwf ANSEL0             ; a) AN0 and AN1 and AN6 are
analog input pins.      ; b) Corresponding bits of TRISA are
also set to inputs.
movwf TRISA
movlw b'00000001'        ; ADCON0 is configured such that:
movwf ADCON0             ; a) Single shot mode is enabled
                           ; b) Single-channel mode
is enabled
                           ; c) Group A signal is
sampled (speed ref on development board)
                           ; d) The ADC is turned
on.
return

```

```

;*****
;*****

```

```

;Initialize PCPWM

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนตัวของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

; NOTES:
; 1) PTPER has 12-bit resolution, 4 LSBs of PTPERH and 8 bits of
PTPERL
; 2) In edge aligned mode, PTMR reset to zero on match with PTPER
; 3) PDC has 14-bit resolution, 6 LSBs of PDCxH and 8 bits of PDCxL
; 4) Lower 2 bits of PDC compared to Q clocks
;
; 5) Resolution(of duty cycle)= log((Fosc/4)/Fpwm)/log(2) =
log(5Mhz/20kHz)/log(2) = 8 bits
; so 6 LSBs of PDCxH and 2 MSBs of PDCxL will be used.
; (for 16kHz, resolution = log(5Mhz/16kHz)/log(2) = 8 bits, also.)
;
;*****
;*****

```

INIT_PCPWM

```

movlw b'00000100' ; PTC0N0 is configured such that:
movwf PTC0N0 ; a) Postscale value is 1:4
; b) PWM time base input
is Fosc/4 ; c) PWM time base mode
is free-running for edge-aligned operation

movlw 0x9C ; PTPERL and PTPERH are set up for a
8KHz PWM frequency.
movwf PTPERL ; PTPERH:PTPERL =
((Fosc/4)/(PWMfreq x PTMRps))-1
movlw 0x00 ; PTPERH:PTPERL =
((20MHz/4)/(8KHz x 4))-1 = 156d = 9Ch
movwf PTPERH

movlw b'01000000' ; PWMCON0 is configured such that:
movwf PWMCON0 ; a) PWM0, PWM1, PWM2, PWM3,
PWM4, and PWM5 are enabled for output.
; b) All PWM I/O pairs
are set to complimentary mode

movlw b'00000001' ; PWMCON1 is configured such that:
movwf PWMCON1 ; a) Special event trigger post-
scaler is set to 1:1
; b) Special event trigger
occurs when time-base is counting upwards
; c) Updates from duty
cycle and period buffer registers are enabled.
; d) Output overrides via
OVDCON are synchronous to the PWM timebase.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยในขอบเขตของโครงการวิจัยที่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเท่านั้น ไม่สามารถนำออกนอกระบบหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

```
movwf DTCON
Fosc/2.
```

```
; a) Clock source for dead-time is
```

```
time value / (Fosc/2) = 1uS.
```

```
; b) Dead time = Dead
```

```
movlw b'00000000'
movwf OVDCOND
```

```
movlw b'00000000'
PWM outputs are 0 upon power-up.
movwf OVDCONS
```

```
;OVDCONS is configured such that all
```

```
movlw b'00000001'
catastrophic mode.
movwf FLTCONFIG
for use with ICD2
```

```
;Fault A and FaultB are enabled in
```

```
cycle-by-cycle mode
```

```
; a) Enable fault condition on break-point
```

```
cycle-by-cycle mode
```

```
; b) Enable FaultA in
```

```
disable PWM channels 0 to 5
```

```
; c) Enable FaultB in
```

```
; d) Fault A and Fault B
```

```
clear.
```

```
movlw 0x00
movwf SEVTCMPL
movlw 0x00
movwf SEVTCMPH
```

```
;SEVTCMPL and SEVTCMPH are
```

```
clrf PDC0L
PDC3L, PDC0H, PDC1H, PDC2H, PDC3H
clrf PDC1L
cycles are initially 0.
```

```
;PDC0L, PDC1L, PDC2L,
```

```
clrf PDC2L
clrf PDC3L
clrf PDC0H
clrf PDC1H
clrf PDC2H
clrf PDC3H
```

```
; are clear so that duty
```

```
bsf PTCON1, PTEN
to enable the PWM time base.
```

```
;PTEN bit in the PTCON1 is set
```

```
;-----
;infinite_loop
; goto infinite_loop
;-----
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

return

```

;*****
;*****

```

;Initialize Timer0

```

;*****
;*****

```

INIT_TMR0

```

    movlw b'11000110'                ;T0CON is configured

```

such that:

```

    movwf T0CON                       ;a) TMR0 ON,
                                        ;b) 8-bit

```

operation,

```

                                        ;c) clock

```

source is instruction cycle clock,

```

                                        ;d)

```

prescaler is 1:128

```

    movlw 0xF8                        ;Timer0 Initialisation

```

```

    movwf TMR0H

```

```

    movlw 0x5E

```

```

    movwf TMR0L

```

```

    return

```

```

;*****
;*****

```

;Initialize PORTC

```

;*****
;*****

```

INIT_PORTC

```

    movlw b'10110110'

```

```

    movwf TRISC

```

```

;    bsf    PORTC,0

```

```

;*****
;*****

```

;Initialize interrupts

```

;*****
;*****

```

INIT_INTERRUPTS

```

    bsf    PIE1,ADIE                ;AD Converter

```

Interrupt enable (will trigger on 2nd and 4th writes to FIFO)

```

;    bsf    PIE3,PTIE                ;PWM timer

```

interrupt

```

    bsf    INTCON,TMR0IE

```

```

    movlw b'10010011'                ;Power ON reset status

```

bit/Brownout reset status bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        movwf RCON                                ;and Instruction flag bits
are set                                         ;Enable

Priority levels on Interrupts

        bsf          INTCON,GIEL                 ;Enable
low priority interrupts

        bsf          INTCON,GIEH                 ;Enable
high priority interrupts

return

```

```

;*****
;*****
;Initialize Motor
;*****
;*****
INIT_MOTOR_START
    movlw 0x12                                ;Initialize the table offset
to 3 registers
    movwf TABLE_OFFSET1                       ;to form 0-120-240
degrees
    bcf          FLAGS,OFFSET1_FLAG             ;Offset flags
initialization
    movlw 0x00
    movwf TABLE_OFFSET2
    bsf          FLAGS,OFFSET2_FLAG
    movlw 0x08
    movwf TABLE_OFFSET3
    bsf          FLAGS,OFFSET3_FLAG
;    bsf          PORTC,0

CONT_INIT_MOT
    movlw 0x30                                ;Initialize frequency to
12Hz
    movwf FREQUENCY
    bsf          FLAGS,MOTOR_FREQ_COUNTER
return

```

```

;*****
;*****
;Upon initialization the Sine table contents are copied to the RAM from
;Program memory
;*****
;*****
COPY_TABLE_TO_RAM
    movlw UPPER sine_table                     ;Initialize Table pointer to the
first

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เอกสารแสดงข้อมูลอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้

ในปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้ได้มีการเลือกใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดนั้นก็ยังมีข้อมูลจำเพาะที่ควรทราบเพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาและพัฒนารูปแบบในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ข้อมูลต่างๆ นำมาแสดงเฉพาะในส่วนที่สำคัญกับการขับและควบคุมความเร็วมอเตอร์ อันจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาต่อไป

MICROCHIP PIC18F2331/2431/4331/4431

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with nanoWatt Technology, High Performance PWM and A/D

14-bit Power Control PWM Module:

- Up to 4 channels with complementary outputs
- Edge- or center-aligned operation
- Flexible dead-band generator
- Hardware fault protection inputs
- Simultaneous update of duty cycle and period:
 - Flexible special event trigger output

Motion Feedback Module:

- Three independent input capture channels:
 - Flexible operating modes for period and pulse width measurement
 - Special Hall Sensor interface module
 - Special event trigger output to other modules
- Quadrature Encoder Interface:
 - 2 phase inputs and one index input from encoder
 - High and low position tracking with direction status and change of direction interrupt
 - Velocity measurement

High-Speed, 200 Ksps 10-bit A/D Converter:

- Up to 9 channels
- Simultaneous two-channel sampling
- Sequential sampling: 1, 2 or 4 selected channels
- Auto-conversion capability
- 4-word FIFO with selectable interrupt frequency
- Selectable external conversion triggers
- Programmable acquisition time

Flexible Oscillator Structure:

- Four crystal modes up to 40 MHz
- Two external clock modes up to 40 MHz
- Internal oscillator block:
 - 8 user selectable frequencies: 31 kHz to 8 MHz
 - OSCTUNE can compensate for frequency drift
- Secondary oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Fail-Safe Clock Monitor:
 - Allows for safe shutdown of device if clock fails

Power-Managed Modes:

- Run CPU on, peripherals on
- Idle CPU off, peripherals on
- Sleep CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 μ A typical
- Sleep current down to 0.1 μ A typical
- Timer1 oscillator, 1.8 μ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer (WDT), 2.1 μ A typical
- Two-Speed oscillator start-up

Peripheral Highlights:

- High current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupts
- Two Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
 - Capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns ($T_{cy}/16$)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (T_{cy})
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10 bits
- Enhanced USART module:
 - Supports RS-485, RS-232 and LIN 1.2
 - Auto-Wake-up on Start bit
 - Auto-Baud detect
- RS-232 operation using internal oscillator block (no external crystal required)

Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle data EEPROM memory typical
- Flash/data EEPROM retention: 100 years
- Self-programmable under software control
- Priority levels for interrupts
- 8 X 8 Single-cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Single-supply In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
 - Drives PWM outputs safely when debugging

| Device | Program Memory | | Data Memory | | I/O | 10-bit A/D (ch) | CCP | SSP | | EUSART | Quadrature Encoder | 14-bit PWM (ch) | Timers 8/16-bit |
|------------|----------------|----------------------------|--------------|----------------|-----|-----------------|-----|-----|-------------------------|--------|--------------------|-----------------|-----------------|
| | Flash (bytes) | # Single-Word Instructions | SRAM (bytes) | EEPROM (bytes) | | | | SPI | Slave I ² C™ | | | | |
| PIC18F2331 | 8192 | 4096 | 768 | 256 | 34 | 5 | 2 | Y | Y | Y | Y | 5 | 1/3 |
| PIC18F2431 | 16384 | 8192 | 768 | 256 | 24 | 5 | 2 | Y | Y | Y | Y | 6 | 1/3 |
| PIC18F4331 | 8192 | 4096 | 768 | 256 | 36 | 9 | 2 | Y | Y | Y | Y | 3 | 1/3 |
| PIC18F4431 | 16384 | 8192 | 768 | 256 | 36 | 9 | 2 | Y | Y | Y | Y | 3 | 1/3 |

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 10-1: PORTA FUNCTIONS

| Name | Bit # | Buffer | Function |
|-------------------------|-------|--------|--|
| RA0/AN0 | bit 0 | TTL | Input/output or analog input. |
| RA1/AN1 | bit 1 | TTL | Input/output or analog input. |
| RA2/AN2/VREF-/CAP1/INDX | bit 2 | TTL/ST | Input/output, analog input, VREF-, capture input, or QE1 Index input. |
| RA3/AN3/VREF+/CAP2/QEA | bit 3 | TTL/ST | Input/output, analog input, VREF+, capture input, or Quadrature Channel A input. |
| RA4/AN4/CAP3/QEB | bit 4 | TTL/ST | Input/output, analog input, capture input, or Quadrature Channel B input. |
| RA5/AN5/LVDIN | bit 5 | TTL | Input/output, analog input, or low-voltage detect input. |
| OSC2/CLKO/RA6 | bit 6 | TTL | OSC2, clock output or I/O pin. |
| OSC1/CLKI/RA7 | bit 7 | TTL | OSC1, clock input or I/O pin. |

Legend: TTL = TTL input, ST = Schmitt Trigger input

TABLE 10-2: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH PORTA

| Name | Bit 7 | Bit 6 | Bit 5 | Bit 4 | Bit 3 | Bit 2 | Bit 1 | Bit 0 | Value on POR, BOR | Value on all other Resets |
|--------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------------------|-------------------|---------------------------|
| PORTA | RA7 ⁽¹⁾ | RA6 ⁽¹⁾ | RA5 | RA4 | RA3 | RA2 | RA1 | RA0 | xx0x 0000 | 0000 0000 |
| LATA | LATA7 ⁽¹⁾ | LATA6 ⁽¹⁾ | LATA Data Output Register | | | | | | xxxx xxxx | 0000 0000 |
| TRISA | TRISA7 ⁽¹⁾ | TRISA6 ⁽¹⁾ | PORTA Data Direction Register | | | | | | 1111 1111 | 1111 1111 |
| ADCON1 | VCFG1 | VCFG0 | — | FIFCEN | BFEN1 | BFOVFL | ADPNT1 | ADPNT0 | 00-1 0000 | 00-1 0000 |
| ANSEL0 | ANS7 ⁽²⁾ | ANS6 ⁽²⁾ | ANS5 ⁽²⁾ | ANS4 | ANS3 | ANS2 | ANS1 | ANS0 | 1111 1111 | 1111 1111 |
| ANSEL1 | — | — | — | — | — | — | — | ANS0 ⁽²⁾ | ---- -1 | ---- -1 |

Legend: x = unknown, u = unchanged, — = unimplemented locations read as '0'. Shaded cells are not used by PORTA.

Note 1: RA7:RA6 and their associated latch and data direction bits are enabled as I/O pins based on oscillator configuration; otherwise, they are read as '0'.

Note 2: ANS5 through ANS8 are available only on the PIC18F4X31 devices.

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 10-3: PORTB FUNCTIONS

| Name | Bit # | Buffer | Function |
|-----------------------|-------|-----------------------|---|
| RB0/PWM0 | bit 0 | TTL ⁽¹⁾ | Input/output pin, or PCPWM output PWM0. Internal software programmable weak pull-up. |
| RB1/PWM1 | bit 1 | TTL ⁽¹⁾ | Input/output pin, or PCPWM output PWM1. Internal software programmable weak pull-up. |
| RB2/PWM2 | bit 2 | TTL ⁽¹⁾ | Input/output pin, or PCPWM output PWM2. Internal software programmable weak pull-up. |
| RB3/PWM3 | bit 3 | TTL ⁽¹⁾ | Input/output pin, or PCPWM output PWM3. Internal software programmable weak pull-up. |
| RB4/KBI0/PWM5 | bit 4 | TTL | Input/output pin (with interrupt-on-change), or PCPWM output PWM5. Internal software programmable weak pull-up. |
| RB5/KBI1/PWM4/ PGM | bit 5 | TTL/ST ⁽²⁾ | Input/output pin (with interrupt-on-change) or PCPWM output PWM4. Internal software programmable weak pull-up. Low-voltage ICSP enable pin. |
| RB6/KBI2/PGC | bit 6 | TTL/ST ⁽²⁾ | Input/output pin (with interrupt-on-change). Internal software programmable weak pull-up. Serial programming clock. |
| RB7/KBI3/PGD | bit 7 | TTL/ST ⁽²⁾ | Input/output pin (with interrupt-on-change). Internal software programmable weak pull-up. Serial programming data. |

Legend: TTL = TTL input, ST = Schmitt Trigger input

Note 1: This buffer is a TTL input when configured as digital I/O.

2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode.

TABLE 10-4: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH PORTB

| Name | Bit 7 | Bit 6 | Bit 5 | Bit 4 | Bit 3 | Bit 2 | Bit 1 | Bit 0 | Value on POR, BOR | Value on all other Resets |
|---------|-------------------------------|-----------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|-------------------|---------------------------|
| PORTB | RB7 | RB6 | RB5 | RB4 | RB3 | RB2 | RB1 | RB0 | x...x q...q | nnnn nnnn |
| LATB | LATB Data Output Register | | | | | | | | x...x x...x | nnnn nnnn |
| TRISB | PORTB Data Direction Register | | | | | | | | 1111 1111 | 1111 1111 |
| INTCON | GIE/GIEH | PEIE/GIEL | TMR0IE | INT0IE | RBIE | TMR0IF | INT0IF | RBIF | 0000 000x | 0000 000u |
| INTCON2 | RBP1 | INTEDG0 | INTEDG1 | INTEDG2 | — | TMR0IP | — | RBIP | 1111 -1-1 | 1111 -1-1 |
| INTCON3 | INT2IP | INT1IP | — | INT2IE | INT1IE | — | INT2IF | INT1IF | 11-0 0-00 | 11-0 0-00 |

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition. Shaded cells are not used by PORTB.

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 10-5: PORTC FUNCTIONS

| Name | Bit # | Buffer Type | Function |
|----------------------|-------|-------------|--|
| RC0/T1OSO/T1CKI | bit 0 | ST | Input/output port pin or Timer1 oscillator output/Timer1 clock input. |
| RC1/T1OSI/CCP2/FLTA | bit 1 | ST/CMOS | Input/output port pin, Timer1 oscillator input, or Capture2 input/Compare2 output/PWM output when CCP2MX configuration bit is disabled, or FLTA input. |
| RC2/CCP1/FLT B | bit 2 | ST | Input/output port pin, Capture1 input/Compare1 output/PWM1 output, or FLT B input. |
| RC3/T0CKI/T5CKU/INT0 | bit 3 | ST | Input/output port pin, Timer0 and Timer5 alternate clock input, or external interrupt 0. |
| RC4/INT1/SDI/SDA | bit 4 | ST | Input/output port pin, SPI Data in, I ² C Data I/O, or external interrupt 1. |
| RC5/INT2/SCK/SCL | bit 5 | ST | Input/output port pin or Synchronous Serial Port Clock I/O, or external interrupt 2. |
| RC6/TX/CK/SS | bit 6 | ST | Input/output port pin, EUSART Asynchronous Transmit, EUSART Synchronous Clock, or SPI Slave Select input. |
| RC7/RX/DT/SDO | bit 7 | ST | Input/output port pin, EUSART Asynchronous Receive, EUSART Synchronous Data, or SPI Data out. |

Legend: ST = Schmitt Trigger input

TABLE 10-6: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH PORTC

| Name | Bit 7 | Bit 6 | Bit 5 | Bit 4 | Bit 3 | Bit 2 | Bit 1 | Bit 0 | Value on POR, BOR | Value on all other Resets |
|---------|-------------------------------|-----------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|-------------------|---------------------------|
| PORTC | RC7 | RC6 | RC5 | RC4 | RC3 | RC2 | RC1 | RC0 | x00x x00x | uuuu uuuu |
| LATC | LATC Data Output Register | | | | | | | | x00x x00x | uuuu uuuu |
| TRISC | PORTC Data Direction Register | | | | | | | | 1111 1111 | 1111 1111 |
| INTCON | GIE/GIEH | PEIE/GIEL | TMR0IE | INT0IE | RBIE | TMR0IF | INT0IF | RBIF | 0000 000x | 0000 000u |
| INTCON2 | RBPU | INTEDG0 | INTEDG1 | INTEDG2 | — | TMR0IP | — | RBIP | 1111 -1-1 | 1111 -1-1 |
| INTCON3 | INT2IP | INT1IP | — | INT2IE | INT1IE | — | INT2IF | INT1IF | 11-0 0-00 | 11-0 0-00 |

Legend: x = unknown, u = unchanged

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 10-7: PORTD FUNCTIONS

| Name | Bit # | Buffer Type | Function |
|-----------------|-------|-------------|--|
| RD0/T0CKI/T5CKI | bit 0 | ST | Input/output port pin. |
| RD1/SDO | bit 1 | ST | Input/output port pin. |
| RD2/SDI/SDA | bit 2 | ST | Input/output port pin. |
| RD3/SCK/SCL | bit 3 | ST | Input/output port pin. |
| RD4/FLTA | bit 4 | ST | Input/output port pin. |
| RD5/PWM4 | bit 5 | ST | Input/output port pin, or PCPWM output PWM4. |
| RD6/PWM6 | bit 6 | ST | Input/output port pin, or PCPWM output PWM6. |
| RD7/PWM7 | bit 7 | ST | Input/output port pin, or PCPWM output PWM7. |

Legend: ST = Schmitt Trigger input, TTL = TTL input

TABLE 10-8: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH PORTD

| Name | Bit 7 | Bit 6 | Bit 5 | Bit 4 | Bit 3 | Bit 2 | Bit 1 | Bit 0 | Value on POR, BOR | Value on all other Resets |
|-------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|---------------------------|
| PORTD | RD7 | RD6 | RD5 | RD4 | RD3 | RD2 | RD1 | RD0 | xxxx xxxx | nnnn nnnn |
| LATD | LATD Data Output Register | | | | | | | | xxxx xxxx | nnnn nnnn |
| TRISD | PORTD Data Direction Register | | | | | | | | 1111 1111 | 1111 1111 |

Legend: x = unknown, u = unchanged, - = unimplemented, read as '0'. Shaded cells are not used by PORTD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC18F2331/2431/4331/4431

TABLE 10-9: PORTE FUNCTIONS

| Name | Bit # | Buffer Type | Function |
|--------------|-------|-------------|---|
| RE0/AN6 | bit 0 | ST | Input/output: port pin, analog input. |
| RE1/AN7 | bit 1 | ST | Input/output: port pin, analog input. |
| RE2/AN8 | bit 2 | ST | Input/output: port pin, analog input. |
| MCLR/VPP/RE3 | bit 3 | ST | Input only port pin or programming voltage input (if MCLR is disabled); Master Clear input or programming voltage input (if MCLR is enabled). |

Legend: ST = Schmitt Trigger input, TTL = TTL input

TABLE 10-10: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH PORTE

| Name | Bit 7 | Bit 6 | Bit 5 | Bit 4 | Bit 3 | Bit 2 | Bit 1 | Bit 0 | Value on POR, BOR | Value on all other Resets |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------------------|---------------------------|-------|-------|-------------------|---------------------------|
| PORTE | — | — | — | — | RE3 ⁽¹⁾ | RE2 | RE1 | RE0 | ---- q000 | ---- q000 |
| LATE | — | — | — | — | — | LATE Data Output Register | | | ---- -xxx | ---- -uuu |
| TRISE | — | — | — | — | — | PORTE Data Direction bits | | | ---- -111 | ---- -111 |
| ANSEL0 | ANS7 | ANS6 | ANS5 | ANS4 | ANS3 | ANS2 | ANS1 | ANS0 | 1111 1111 | 1111 1111 |
| ANSEL1 | ANS15 | ANS14 | ANS13 | ANS12 | ANS11 | ANS10 | ANS9 | ANS8 | ---- --0 | ---- --0 |

Legend: x = unknown, u = unchanged, - = unimplemented, read as '0', q = value depends on condition.
Shaded cells are not used by PORTE.

Note 1: Implemented only when Master Clear functionality is disabled (CONFIG3H<7> = 0).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC18F2331/2431/4331/4431

11.0 TIMER0 MODULE

The Timer0 module has the following features:

- Software selectable as an 8-bit or 16-bit timer/counter
- Readable and writable
- Dedicated 8-bit software programmable prescaler
- Clock source selectable to be external or internal
- Interrupt-on-overflow from FFh to 0Ch in 8-bit mode and FFFFh to 0000h in 16-bit mode
- Edge select for external clock

Figure 11-1 shows a simplified block diagram of the Timer0 module in 8-bit mode and Figure 11-2 shows a simplified block diagram of the Timer0 module in 16-bit mode.

The T0CON register (Register 11-1) is a readable and writable register that controls all the aspects of Timer0, including the prescale selection.

REGISTER 11-1: T0CON: TIMER0 CONTROL REGISTER

| R/W-1 | R/W-1 | R/W-1 | R/W-1 | R/W-1 | R/W-1 | R/W-1 | R/W-1 |
|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TMR0ON | T016BIT | T0CS | T0SE | PSA | T0PS2 | T0PS1 | T0PS0 |
| bit 7 | | | | | | | bit 0 |

- bit 7 **TMR0ON:** Timer0 On/Off Control bit
 1 = Enables Timer0
 0 = Stops Timer0
- bit 6 **T016BIT:** Timer0 16-bit Control bit
 1 = Timer0 is configured as an 8-bit timer/counter
 0 = Timer0 is configured as a 16-bit timer/counter
- bit 5 **T0CS:** Timer0 Clock Source Select bit
 1 = Transition on T0CKI pin
 0 = Internal instruction cycle clock (CLKO)
- bit 4 **T0SE:** Timer0 Source Edge Select bit
 1 = Increment on high-to-low transition on T0CKI pin
 0 = Increment on low-to-high transition on T0CKI pin
- bit 3 **PSA:** Timer0 Prescaler Assignment bit
 1 = Timer0 prescaler is NOT assigned. Timer0 clock input bypasses prescaler.
 0 = Timer0 prescaler is assigned. Timer0 clock input comes from prescaler output.
- bit 2-0 **T0PS2:T0PS0:** Timer0 Prescaler Select bits
 111 = 1:256 prescale value
 110 = 1:128 prescale value
 101 = 1:64 prescale value
 100 = 1:32 prescale value
 011 = 1:16 prescale value
 010 = 1:8 prescale value
 001 = 1:4 prescale value
 000 = 1:2 prescale value

Legend:

| | | |
|--------------------|------------------|--|
| R = Readable bit | W = Writable bit | U = Unimplemented bit, read as '0' |
| - n = Value at POR | '1' = Bit is set | '0' = Bit is cleared x = Bit is unknown |

PIC18F2331/2431/4331/4431

17.0 POWER CONTROL PWM MODULE

The Power Control PWM module simplifies the task of generating multiple, synchronized pulse width modulated (PWM) outputs for use in the control of motor controllers and power conversion applications. In particular, the following power and motion control applications are supported by the PWM module:

- Three-phase and Single-phase AC Induction Motors
- Switched Reluctance Motors
- Brushless DC (BLDC) Motors
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Multiple DC Brush Motors

The PWM module has the following features:

- Up to eight PWM I/O pins with four duty cycle generators. Pins can be paired to get a complete half-bridge control.
- Up to 14-bit resolution, depending upon the PWM period.
- "On-the-fly" PWM frequency changes.
- Edge- and Center-aligned Output modes.
- Single-pulse Generation mode.
- Programmable dead time control between paired PWMs.
- Interrupt support for asymmetrical updates in Center-aligned mode.
- Output override for Electrically Commutated Motor (ECM) operation; for example, BLDC.
- Special Event comparator for scheduling other peripheral events.
- PWM outputs disable feature sets PWM outputs to their inactive state when in Debug mode.

The Power Control PWM module supports three PWM generators and six output channels on PIC18F2X31 devices, and four generators and eight channels on PIC18F4X31 devices. A simplified block diagram of the module is shown in Figure 17-1. Figure 17-2 and Figure 17-3 show how the module hardware is configured for each PWM output pair for the complementary and independent output modes.

Each functional unit of the PWM module will be discussed in subsequent sections.

PIC18F2331/2431/4331/4431

20.0 10-BIT HIGH-SPEED ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (A/D) MODULE

The high-speed Analog-to-Digital (A/D) Converter module allows conversion of an analog signal to a corresponding 10-bit digital number.

The A/D module supports up to 5 input channels on PIC18F2X31 devices, and up to 9 channels on the PIC18F4X31 devices.

This high-speed 10-bit A/D module offers the following features:

- Up to 200K samples per second
- Two sample and hold inputs for dual-channel simultaneous sampling
- Selectable simultaneous or sequential sampling modes
- 4-word data buffer for A/D results
- Selectable data acquisition timing
- Selectable A/D event trigger
- Operation in Sleep using internal oscillator

These features lend themselves to many applications including motor control, sensor interfacing, data acquisition and process control. In many cases, these features will reduce the software overhead associated with standard A/D modules.

The module has 9 registers:

- A/D Result High Register (ADRESH)
- A/D Result Low Register (ADRESL)
- A/D Control Register 0 (ADCON0)
- A/D Control Register 1 (ADCON1)
- A/D Control Register 2 (ADCON2)
- A/D Control Register 3 (ADCON3)
- A/D Channel Select Register (ADCHS)
- Analog I/O Select Register 0 (ANSEL0)
- Analog I/O Select Register 1 (ANSEL1)

International
IR Rectifier

PD- 91621B

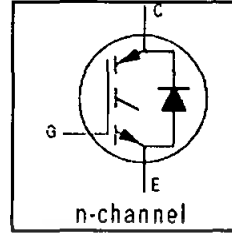
IRG4PH40UD

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH
ULTRAFAST SOFT RECOVERY DIODE

UltraFast CoPack IGBT

Features

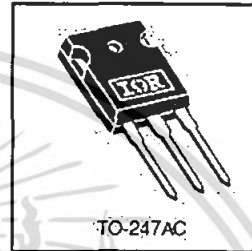
- UltraFast: Optimized for high operating frequencies up to 40 kHz in hard switching, >200 kHz in resonant mode
- New IGBT design provides tighter parameter distribution and higher efficiency than previous generations
- IGBT co-packaged with HEXFRED™ ultrafast, ultra-soft-recovery anti-parallel diodes for use in bridge configurations
- Industry standard TO-247AC package



| |
|-----------------------------------|
| $V_{CES} = 1200V$ |
| $V_{CE(on)} \text{ typ.} = 2.43V$ |
| @ $V_{GE} = 15V, I_C = 21A$ |

Benefits

- Higher switching frequency capability than competitive IGBTs
- Highest efficiency available
- HEXFRED diodes optimized for performance with IGBTs. Minimized recovery characteristics require less/no snubbing

**Absolute Maximum Ratings**

| | Parameter | Max. | Units |
|---------------------------|--|------------------------------------|-------|
| V_{CES} | Collector-to-Emitter Breakdown Voltage | 1200 | V |
| $I_C @ T_C = 25^\circ C$ | Continuous Collector Current | 41 | A |
| $I_C @ T_C = 100^\circ C$ | Continuous Collector Current | 21 | |
| I_{CM} | Pulsed Collector Current Φ | 82 | |
| I_{LM} | Clamped Inductive Load Current Φ | 82 | |
| $I_F @ T_C = 100^\circ C$ | Diode Continuous Forward Current | 8.0 | |
| I_{FM} | Diode Maximum Forward Current | 130 | V |
| V_{GE} | Gate-to-Emitter Voltage | ± 20 | |
| $P_D @ T_C = 25^\circ C$ | Maximum Power Dissipation | 160 | W |
| $P_D @ T_C = 100^\circ C$ | Maximum Power Dissipation | 65 | |
| T_J | Operating Junction and | -55 to + 150 | °C |
| T_{STG} | Storage Temperature Range | | |
| | Soldering Temperature, for 10 seconds | 300 (0.063 in. (1.6mm) from case) | |
| | Mounting torque, 6-32 or M3 screw. | 10 lbf·in (1.1 N·m) | |

Thermal Resistance

| | Parameter | Min. | Typ. | Max. | Units |
|-----------------|---|------|----------|------|--------|
| $R_{\theta JC}$ | Junction-to-Case - IGBT | — | — | 0.77 | °C/W |
| $R_{\theta JC}$ | Junction-to-Case - Diode | — | — | 1.7 | |
| $R_{\theta CS}$ | Case-to-Sink, flat, greased surface | — | 0.24 | — | |
| $R_{\theta JA}$ | Junction-to-Ambient, typical socket mount | — | — | 40 | g (oz) |
| W_i | Weight | — | 6 (0.21) | — | |

www.irf.com

1

7/7/2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRG4PH40UD

International
IOR RectifierElectrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

| | Parameter | Min. | Typ. | Max. | Units | Conditions |
|---------------------------------|---|------|------|-----------|---------|---|
| $V_{BR}(CES)$ | Collector-to-Emitter Breakdown Voltage ⁽¹⁾ | 1200 | — | — | V | $V_{GE} = 0V, I_C = 250\mu A$ |
| $\Delta V_{BR}(CES)/\Delta T_J$ | Temperature Coeff. of Breakdown Voltage | — | 0.43 | — | V/°C | $V_{GE} = 0V, I_C = 1.0mA$ |
| $V_{CE(on)}$ | Collector-to-Emitter Saturation Voltage | — | 2.43 | 3.1 | V | $I_C = 21A, V_{GE} = 15V$ |
| | | — | 2.97 | — | | $I_C = 41A$ |
| | | — | 2.47 | — | | $I_C = 21A, T_J = 150^\circ\text{C}$ |
| $V_{GE(th)}$ | Gate Threshold Voltage | 3.0 | — | 6.0 | | $V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250\mu A$ |
| $\Delta V_{GE(th)}/\Delta T_J$ | Temperature Coeff. of Threshold Voltage | — | -11 | — | mV/°C | $V_{CE} = V_{GE}, I_C = 250\mu A$ |
| g_{fe} | Forward Transconductance ⁽²⁾ | 16 | 24 | — | S | $V_{CE} = 100V, I_C = 21A$ |
| I_{CES} | Zero Gate Voltage Collector Current | — | — | 250 | μA | $V_{GE} = 0V, V_{CE} = 600V$ |
| | | — | — | 5000 | | $V_{GE} = 0V, V_{CE} = 600V, T_J = 150^\circ\text{C}$ |
| V_{FM} | Diode Forward Voltage Drop | — | 2.6 | 3.3 | V | $I_C = 8.0A$ |
| | | — | 2.4 | 3.1 | | $I_C = 8.0A, T_J = 125^\circ\text{C}$ |
| I_{GES} | Gate-to-Emitter Leakage Current | — | — | ± 100 | nA | $V_{GE} = \pm 20V$ |

Switching Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

| | Parameter | Min. | Typ. | Max. | Units | Conditions |
|--------------|--|------|------|------|------------|--|
| Q_g | Total Gate Charge (turn-on) | — | 86 | 130 | | $I_C = 21A$ |
| Q_{ge} | Gate - Emitter Charge (turn-on) | — | 13 | 20 | nC | $V_{CC} = 400V$ See Fig. 8 |
| Q_{gc} | Gate - Collector Charge (turn-on) | — | 29 | 44 | | $V_{GE} = 15V$ |
| $t_{d(on)}$ | Turn-On Delay Time | — | 46 | — | | $T_J = 25^\circ\text{C}$ |
| t_r | Rise Time | — | 35 | — | ns | $I_C = 21A, V_{CC} = 800V$ |
| $t_{d(off)}$ | Turn-Off Delay Time | — | 97 | 150 | | $V_{GE} = 15V, R_G = 10\Omega$ |
| t_f | Fall Time | — | 240 | 360 | | Energy losses include "tail" and diode reverse recovery. |
| E_{on} | Turn-On Switching Loss | — | 1.80 | — | mJ | See Fig. 9, 10, 18 |
| E_{off} | Turn-Off Switching Loss | — | 1.93 | — | | |
| E_{Σ} | Total Switching Loss | — | 3.73 | 4.6 | | |
| $t_{d(on)}$ | Turn-On Delay Time | — | 42 | — | ns | $T_J = 150^\circ\text{C}$. See Fig. 11, 18 |
| t_r | Rise Time | — | 32 | — | | $I_C = 21A, V_{CC} = 800V$ |
| $t_{d(off)}$ | Turn-Off Delay Time | — | 240 | — | | $V_{GE} = 15V, R_G = 10\Omega$ |
| t_f | Fall Time | — | 510 | — | | Energy losses include "tail" and diode reverse recovery. |
| E_{Σ} | Total Switching Loss | — | 7.04 | — | mJ | |
| L_E | Internal Emitter Inductance | — | 13 | — | nH | Measured 5mm from package |
| C_{ies} | Input Capacitance | — | 1800 | — | pF | $V_{GE} = 0V$ |
| C_{oes} | Output Capacitance | — | 120 | — | | $V_{CC} = 30V$ See Fig. 7 |
| C_{ros} | Reverse Transfer Capacitance | — | 18 | — | | $f = 1.0MHz$ |
| t_{rr} | Diode Reverse Recovery Time | — | 63 | 95 | ns | $T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 14 |
| | | — | 106 | 160 | | $T_J = 125^\circ\text{C}$ |
| I_{rr} | Diode Peak Reverse Recovery Current | — | 4.5 | 8.0 | A | $T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 15 |
| | | — | 6.2 | 11 | | $T_J = 125^\circ\text{C}$ |
| Q_{rr} | Diode Reverse Recovery Charge | — | 140 | 380 | nC | $T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 16 |
| | | — | 335 | 880 | | $T_J = 125^\circ\text{C}$ |
| di_{rr}/dt | Diode Peak Rate of Fall of Recovery During t_b | — | 133 | — | A/ μs | $T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 17 |
| | | — | 85 | — | | $T_J = 125^\circ\text{C}$ |

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC

TLP250

Transistor Inverter
 Inverter For Air Conditioner
 IGBT Gate Drive
 Power MOS FET Gate Drive

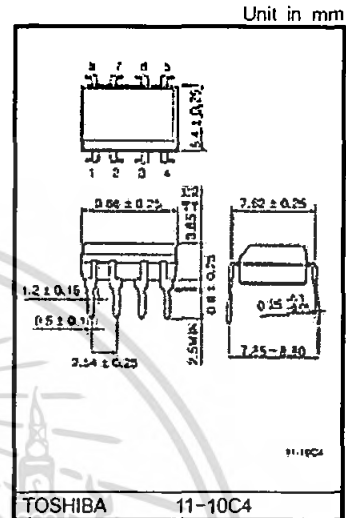
The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
 This unit is 8-lead DIP package.
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): $10\text{--}35\text{V}$
- Output current (I_O): $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500\text{V}_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1677, file No.E67349
- Option (D4) type

VDE approved: DIN VDE0884/06.92.certificate No.76823
 Maximum operating insulation voltage: 630V_{PK}
 Highest permissible over voltage: 4000V_{PK}

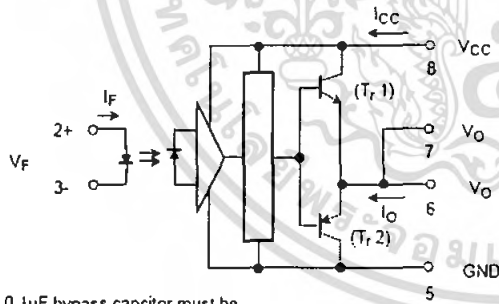
(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

- Creepage distance: $6.4\text{mm}(\text{min.})$
- Clearance: $6.4\text{mm}(\text{min.})$



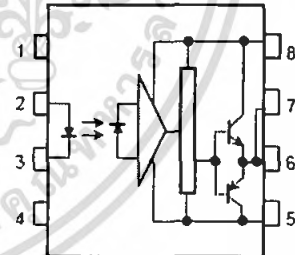
TOSHIBA 11-10C4
 Weight: 0.54 g

Schematic



A 0.1μF bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

Pin Configuration (top view)



- 1: N.C.
- 2: Anode
- 3: Cathode
- 4: N.C.
- 5: GND
- 6: V_O (Output)
- 7: V_O
- 8: V_{CC}

Truth Table

| | Tr1 | Tr2 |
|---------------|-----|-----|
| Input LED On | On | Off |
| Input LED Off | Off | On |

TOSHIBA

TLP250

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

| Characteristic | | Symbol | Rating | Unit | |
|---|---|------------------------------|----------|---------|---|
| LED | Forward current | I_F | 20 | mA | |
| | Forward current derating (Ta ≥ 70°C) | $\Delta I_F / \Delta T_a$ | -0.36 | mA / °C | |
| | Peak transient forward current (Note 1) | I_{FPT} | 1 | A | |
| | Reverse voltage | V_R | 5 | V | |
| | Junction temperature | T_J | 125 | °C | |
| Detector | "H" peak output current ($P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15\text{kHz}$) (Note 2) | I_{OPH} | -1.5 | A | |
| | "L" peak output current ($P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15\text{kHz}$) (Note 2) | I_{OPL} | +1.5 | A | |
| | Output voltage | (Ta ≤ 70°C) | V_O | 35 | V |
| | | (Ta = 85°C) | | 24 | |
| | Supply voltage | (Ta ≤ 70°C) | V_{CC} | 35 | V |
| | | (Ta = 85°C) | | 24 | |
| | Output voltage derating (Ta ≥ 70°C) | $\Delta V_O / \Delta T_a$ | -0.73 | V / °C | |
| | Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C) | $\Delta V_{CC} / \Delta T_a$ | -0.73 | V / °C | |
| | Junction temperature | T_j | 125 | °C | |
| Operating frequency (Note 3) | f | 25 | kHz | | |
| Operating temperature range | T_{opr} | -20-85 | °C | | |
| Storage temperature range | T_{stg} | -55-125 | °C | | |
| Lead soldering temperature (10 s) (Note 4) | T_{sol} | 260 | °C | | |
| Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 5) | BV_S | 2500 | Vrms | | |

Note 1: Pulse width $P_W \leq 1\mu s$, 300pps

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform, $I_{OPH} \leq -1.0A (\leq 2.5\mu s)$, $I_{OPL} \leq +1.0A (\leq 2.5\mu s)$

Note 4: It is 2 mm or more from a lead root.

Note 5: Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

Note 6: A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

Recommended Operating Conditions

| Characteristic | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|----------------------------|-------------------|------|------|---------|------|
| Input current, on (Note 7) | $I_{F(ON)}$ | 7 | 8 | 10 | mA |
| Input voltage, off | $V_{F(OFF)}$ | 0 | — | 0.8 | V |
| Supply voltage | V_{CC} | 15 | — | 30 20 | V |
| Peak output current | I_{OPH}/I_{OPL} | — | — | ±0.5 | A |
| Operating temperature | T_{opr} | -20 | 25 | 70 85 | °C |

Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs.

TOSHIBA**TLP250****Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)**

| Characteristic | | Symbol | Test Circuit | Test Condition | Min. | Typ.* | Max. | Unit | |
|--|--------------|---------------------------|--------------|--|--|-----------|-------|---------------|---|
| Input forward voltage | | V_F | — | $I_F = 10 \text{ mA}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$ | | 1.6 | 1.8 | V | |
| Temperature coefficient of forward voltage | | $\Delta V_F / \Delta T_a$ | — | $I_F = 10 \text{ mA}$ | — | -2.0 | — | mV / °C | |
| Input reverse current | | I_R | — | $V_R = 5\text{V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$ | | — | 10 | μA | |
| Input capacitance | | C_T | — | $V = 0$, $f = 1\text{MHz}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$ | — | 45 | 250 | pF | |
| Output current | "H" level | I_{OPH} | 3 | $V_{CC} = 30\text{V}$ (*1) | $I_F = 10 \text{ mA}$ $V_{E-S} = 4\text{V}$ | -0.5 | -1.5 | — | A |
| | "L" level | I_{OPL} | 2 | | $I_F = 0$ $V_{E-S} = 2.5\text{V}$ | 0.5 | 2 | — | |
| Output voltage | "H" level | V_{OH} | 4 | $V_{CC1} = +15\text{V}$, $V_{EE1} = -15\text{V}$ $R_L = 200\Omega$, $I_F = 5\text{mA}$ | 11 | 12.8 | — | V | |
| | "L" level | V_{OL} | 5 | $V_{CC1} = +15\text{V}$, $V_{EE1} = -15\text{V}$ $R_L = 200\Omega$, $V_F = 0.8\text{V}$ | — | -14.2 | -12.5 | | |
| Supply current | "H" level | I_{CCH} | — | $V_{CC} = 30\text{V}$, $I_F = 10\text{mA}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$ | — | 7 | — | mA | |
| | | | | $V_{CC} = 30\text{V}$, $I_F = 10\text{mA}$ | — | — | 11 | | |
| | "L" level | I_{CCL} | — | $V_{CC} = 30\text{V}$, $I_F = 0\text{mA}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$ | — | 7.5 | — | | |
| | | | | $V_{CC} = 30\text{V}$, $I_F = 0\text{mA}$ | — | — | 11 | | |
| Threshold input current | "Output L→H" | I_{FLH} | — | $V_{CC1} = +15\text{V}$, $V_{EE1} = -15\text{V}$ $R_L = 200\Omega$, $V_O > 0\text{V}$ | — | 1.2 | 5 | mA | |
| Threshold input voltage | "Output H→L" | I_{FHL} | — | $V_{CC1} = +15\text{V}$, $V_{EE1} = -15\text{V}$ $R_L = 200\Omega$, $V_O < 0\text{V}$ | 0.8 | — | — | V | |
| Supply voltage | | V_{CC} | — | | 10 | — | 35 | V | |
| Capacitance (input-output) | | C_S | — | $V_S = 0$, $f = 1\text{MHz}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$ | — | 1.0 | 2.0 | pF | |
| Resistance(input-output) | | R_S | — | $V_S = 500\text{V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$ R.H. ≤ 60% | 1×10^{12} | 10^{14} | — | Ω | |

* All typical values are at $T_a = 25^\circ\text{C}$ (*1): Duration of IO time ≤ 50 μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Switching Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

| Characteristic | Symbol | Test Circuit | Test Condition | Min. | Typ.* | Max. | Unit |
|---|----------|--------------|--|-------|-------|------|-------------------|
| Propagation delay time | L→H | t_{PLH} | 6 $I_F = 8\text{mA}$ (Note 7) $V_{CC1} = +15\text{V}$, $V_{EE1} = -15\text{V}$ $R_L = 200\Omega$ | — | 0.15 | 0.5 | μs |
| | H→L | t_{PHL} | | — | 0.15 | 0.5 | |
| Output rise time | t_r | | | — | — | — | |
| Output fall time | t_f | | | — | — | — | |
| Common mode transient immunity at high level output | C_{MH} | 7 | $V_{CM} = 600\text{V}$, $I_F = 8\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$ | -5000 | — | — | V / μs |
| Common mode transient immunity at low level output | C_{ML} | 7 | $V_{CM} = 600\text{V}$, $I_F = 0\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$ | 5000 | — | — | V / μs |

* All typical values are at $T_a = 25^\circ\text{C}$

Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs .



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International
IR Rectifier

SAFEIR Series
40EPS12

INPUT RECTIFIER DIODE



$$V_F < 1V @ 20A$$

$$I_{FSM} = 475A$$

$$V_{RRM} 800 - 1200V$$

Description/Features

The 40EPS.. rectifier **SAFEIR** series has been optimized for very low forward voltage drop, with moderate leakage.

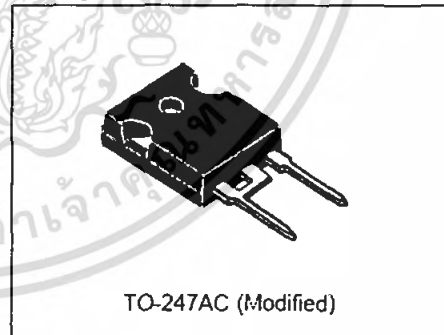
The glass passivation technology used has reliable operation up to 150° C junction temperature.

Typical applications are in input rectification and these products are designed to be used with International Rectifier Switches and Output Rectifiers which are available in identical package outlines.

Major Ratings and Characteristics

| Characteristics | 40EPS.. | Units |
|---------------------------------|------------|-------|
| $I_{F(AV)}$ Sinusoidal waveform | 40 | A |
| V_{RRM} Range (*) | 800 - 1200 | V |
| I_{FSM} | 475 | A |
| V_F @ 20A, $T_J = 25^\circ C$ | 1.0 | V |
| T_J | -40 to 150 | °C |

Package Outline



40EPS.. SAFER Series

Bulletin I2104 rev. B 10/01

International
IRF Rectifier

Voltage Ratings

| Part Number | V_{RSM} , maximum peak reverse voltage V | V_{RSM} , maximum non repetitive peak reverse voltage V | I_{RRM} 150°C mA |
|-------------|---|--|-----------------------|
| 40EPS08 | 600 | 900 | 1 |
| 40EPS12 | 1200 | 1300 | |

Absolute Maximum Ratings

| Parameters | 40EPS.. | Units | Conditions |
|--|---------|-------------------|--|
| $I_{F(AV)}$ Max. Average Forward Current | 40 | A | @ $T_C = 105^\circ\text{C}$, 180° conduction half sine wave |
| I_{FSM} Max. Peak One Cycle Non-Repetitive Surge Current | 400 | A | 10ms Sine pulse, rated V_{RRM} applied |
| | 475 | | 10ms Sine pulse, no voltage reappplied |
| I^2t Max. I^2t for fusing | 800 | A ² s | 10ms Sine pulse, rated V_{RRM} applied |
| | 1131 | | 10ms Sine pulse, no voltage reappplied |
| I^2t Max. I^2t for fusing | 11310 | A ² vs | t=0.1 to 10ms, no voltage reappplied |

Electrical Specifications

| Parameters | 40EPS.. | Units | Conditions |
|---------------------------------------|---------|-------|---------------------------------|
| V_{FM} Max. Forward Voltage Drop | 1.1 | V | @ 40A, $T_J = 25^\circ\text{C}$ |
| r_s Forward slope resistance | 7.16 | mΩ | $T_J = 150^\circ\text{C}$ |
| $V_{F(TO)}$ Threshold voltage | 0.74 | V | |
| I_{RM} Max. Reverse Leakage Current | 0.1 | mA | $T_J = 25^\circ\text{C}$ |
| | 1.0 | | $T_J = 150^\circ\text{C}$ |

$V_R = \text{rated } V_{RRM}$

Thermal-Mechanical Specifications

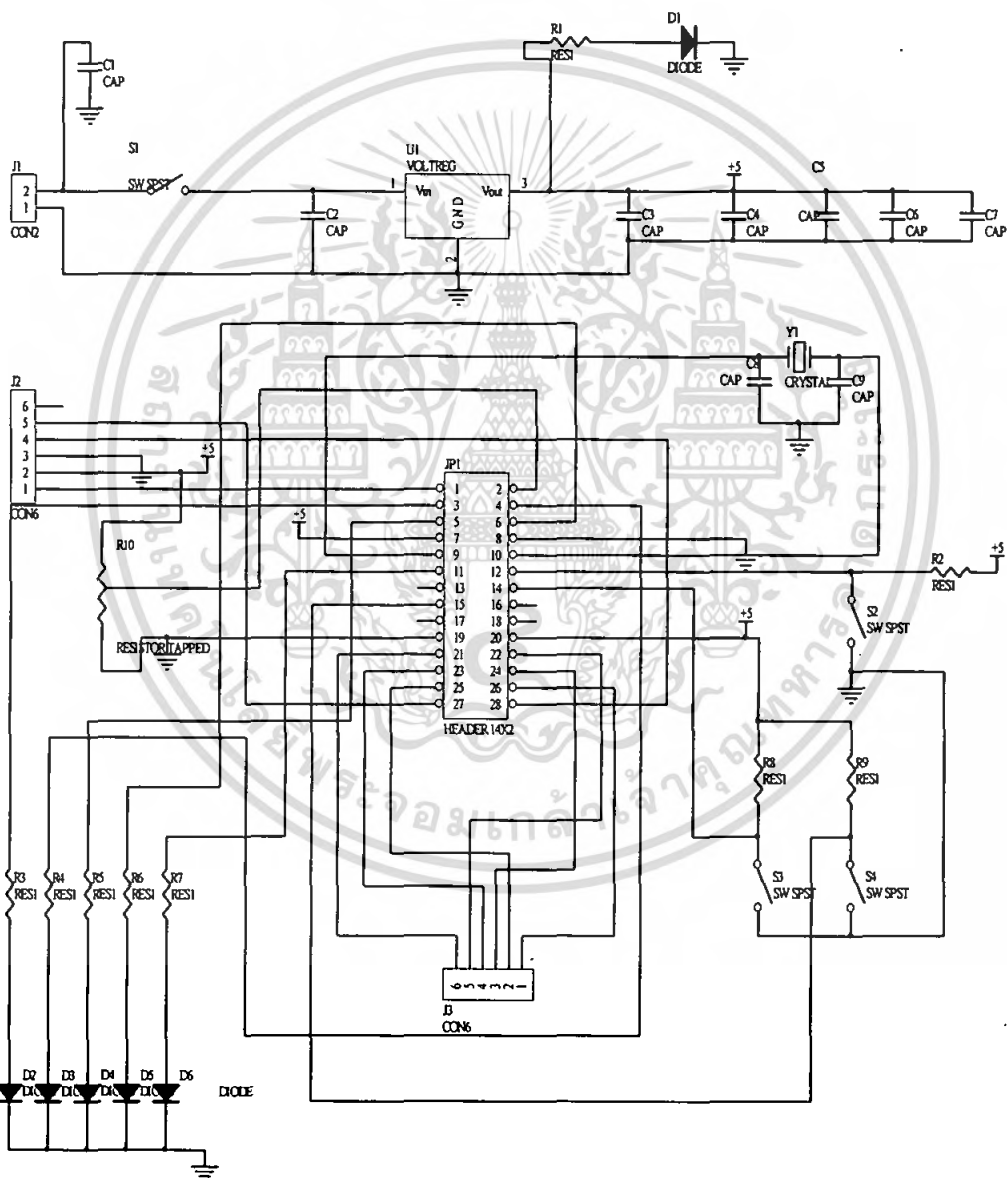
| Parameters | 40EPS.. | Units | Conditions |
|---|------------|---------|--------------------------------------|
| T_J Max. Junction Temperature Range | -40 to 150 | °C | |
| T_{stg} Max. Storage Temperature Range | -40 to 150 | °C | |
| R_{thJC} Max. Thermal Resistance Junction to Case | 0.6 | °C/W | DC operation |
| R_{thJA} Max. Thermal Resistance Junction to Ambient | 40 | °C/W | |
| R_{thCS} Typical Thermal Resistance, Case to Heatsink | 0.2 | °C/W | Mounting surface, smooth and greased |
| w _{ref} Approximate Weight | 6 (0.21) | g (oz.) | |
| T Mounting Torque | Min. | 6 (5) | Kg-cm (lbf-in) |
| | Max. | 12 (10) | |
| Case Style | TO-247AC | | JEDEC (Modified) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

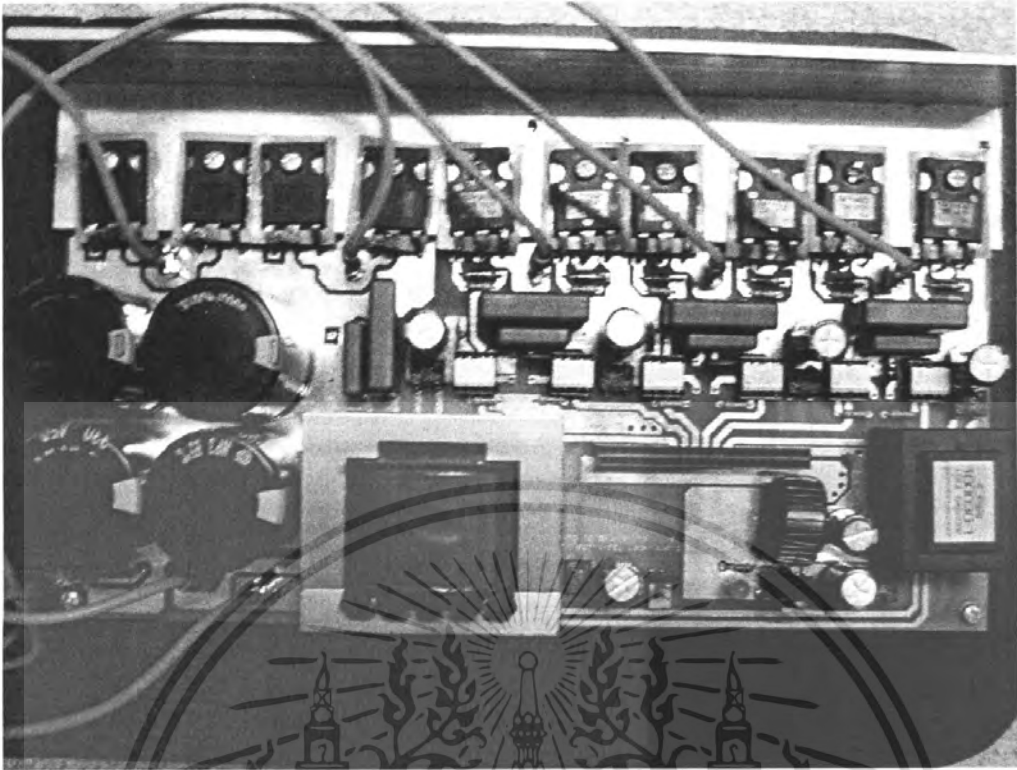
วงจรที่ใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองการขับและควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยมี ส่วนประกอบของวงจรต่างๆ รวมกันในแผงวงจร 2 แผ่น คือในส่วนของการขับและวงจรกำลัง กับ ส่วนของการควบคุม ซึ่งสามารถแสดง ได้ดังรูป

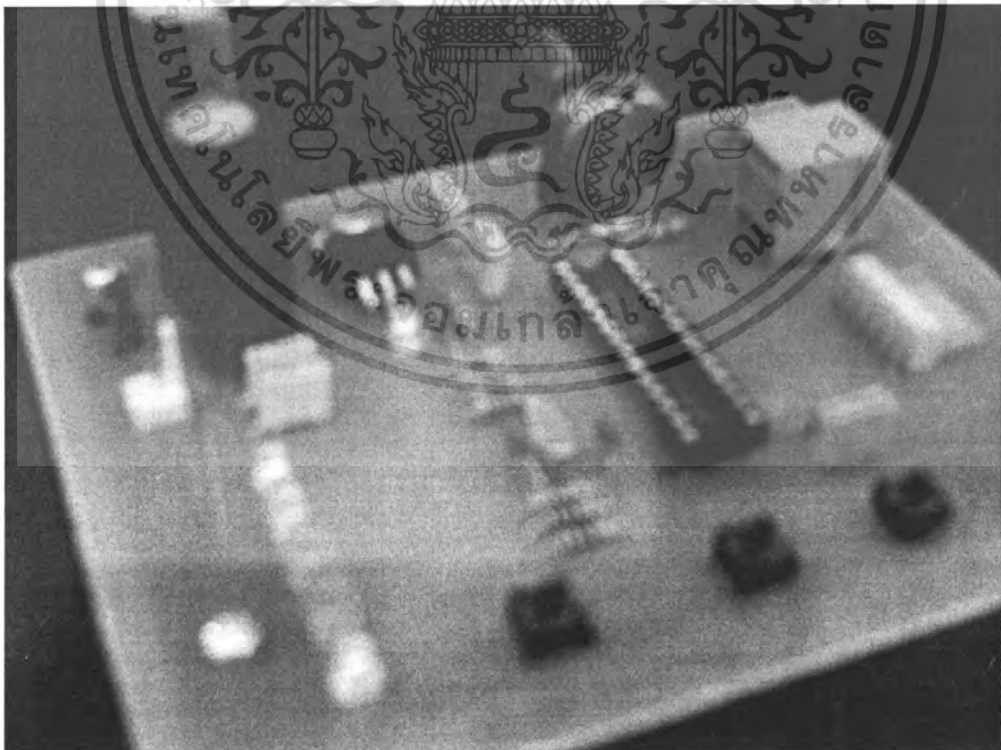


รูปที่ ค.1 วงจรส่วนควบคุมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 วงจรขับมอเตอร์



รูปที่ ก.4 วงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้