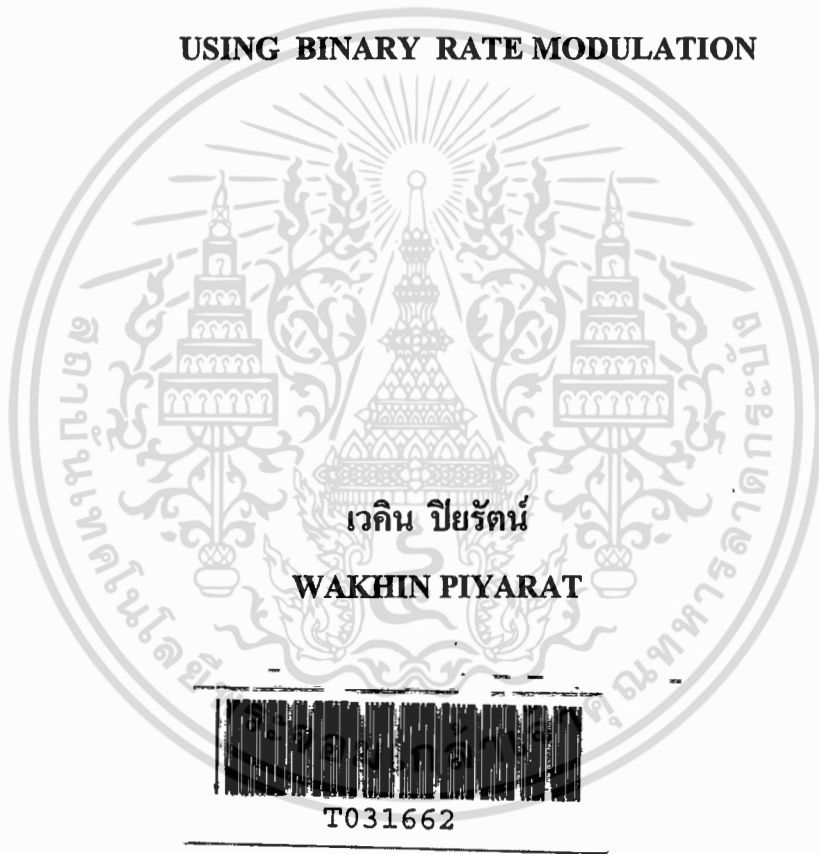


การควบคุมความเร็วรอบคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยวิธีการแบบ

BINARY RATE MODULATION

SPEED REGULATION OF SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR

USING BINARY RATE MODULATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2541

ISBN 974-622-340-2

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 31662
วัน, เดือน, ปี..... 21 ส.ค. 2541

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SPEED REGULATION OF SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR USING
BINARY RATE MODULATION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ISBN 974-622-340-2 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 1998

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมความเร็วรอบคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ด้วยวิธีการแบบ Binary Rate Modulation
นักศึกษา	นายเวทิน ปิยรัตน์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2541

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ด้วยวิธีการผสมสัญญาณแบบ Binary Rate (BRM) ที่มีการกำหนดรูปแบบ BRM ขนาด 8 บิต โดยสร้างรูปแบบของ BRM 8 รูปแบบหลัก คือ $f_1, f_2, f_4, f_{16}, f_{32}$ และ f_{128} ที่อิสระต่อกัน (Linear Independent waveforms) แล้วนำมากระทำ Linear combination ทำให้ได้รูปแบบของ BRM จำนวน 256 รูปแบบ (f_0 ถึง f_{255}) ส่งไปควบคุมมอเตอร์ตาม การกำหนดของตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้ถูกกำหนดจากไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 ผลจากเทคนิคการควบคุมแบบ BRM นั้นทำให้สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้มีผลการตอบสนองกลับสู่สภาวะคงตัว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้อย่างเร็ว นอกจากนี้ยังมีการกำหนดการจ่ายพลังงานที่ป้อนให้กับมอเตอร์ได้อย่างเหมาะสมกับสภาวะของการทำงานที่แท้จริง ทั้งขณะไร้โหลดและขณะขับโหลดที่ค่าต่าง ๆ โดยการเลือกรูปแบบของ BRM ที่เหมาะสมกับสภาวะของการทำงานแล้วส่งไปควบคุมมอเตอร์ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพและสมรรถนะในการทำงานสูง

Thesis Title	Speed Regulation of Single phase Induction Motor Using Binary Rate Modulation
Student	Mr. Wakhin Piyarat
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Vittaya Tipsuwanporn
Degree	Master of Engineering in Electrical Engineering
Year	1998

ABSTRACT

This thesis presents the technique of single phase induction motor control by Binary Rate Modulation (BRM), using BRM 8 bit. The eight frequency waveforms i.e. f_1 , f_2 , f_4 , f_8 , f_{16} , f_{32} , f_{64} and f_{128} are constructed with linear independence, then linear combination is made to form 256 BRM waveform (f_0 to f_{255}), then transmitted to control motor by PI control function, which generated by 8051 microcontroller and the out is the transmitted to motor under control. The advantage of BRM over the other technique is fast response to speed control with smooth running and appropriate power consuming, both no load and full load. Henceforth, the motor running effectively, with high efficiency.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นและสำเร็จลุล่วงได้อย่างดีนั้น ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกประทับใจและซาบซึ้ง ในการสนับสนุนและความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณทาง ครอบครัว เพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้การสนับสนุน และให้กำลังใจ มาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ คุณพ่อ และ คุณแม่ รวมทั้งผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 วิธีการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์	2
1.6 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์	2
1.7 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 หลักการพื้นฐานของ BRM	4
2.3 โครงสร้างและการออกแบบระบบควบคุม	7

IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลการทดลอง	17
3.1 ผลการทดลองส่วนที่ 1	19
3.2 ผลการทดลองส่วนที่ 2	28
3.3 ผลการทดลองส่วนที่ 3	29
บทที่ 4 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	33
4.1 สรุปผลการทดลอง.....	33
4.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	36
บรรณานุกรม	38
ภาคผนวก	39
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์	40
ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย	49
ประวัติผู้เขียน	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การควบคุมมอเตอร์โดยตรงของมอเตอร์ตัวที่ 1	29
3.2 การควบคุมด้วยวงจรควบคุมแรงดันของมอเตอร์ตัวที่ 1	30
3.3 การควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิค BRMของมอเตอร์ตัวที่ 1	30
3.4 การควบคุมมอเตอร์โดยตรงของมอเตอร์ตัวที่ 2	31
3.5 การควบคุมด้วยวงจรควบคุมแรงดันของมอเตอร์ตัวที่ 2	31
3.6 การควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิค BRMของมอเตอร์ตัวที่ 2	32



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างพื้นฐานของการผสมสัญญาณ BRM.....	4
2.2 รูปพัลส์ BRM ($m = 8$)	6
2.3 ค่า ripple ที่เอาต์พุต เมื่อ $T/T_p = 0.01$ และ $m = 4$	7
2.4 โครงสร้างของระบบควบคุม.....	7
2.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ Root Locus	9
2.6 บล็อกไคแกรมการทำงานของระบบทั้งหมด.....	9
2.7 วงจรกำลัง.....	10
2.8 วงจรขับนำ	11
2.9 วงจรควบคุมการสวิตช์	11
2.10 การเชื่อมต่อทางฮาร์ดแวร์.....	12
2.11 แผนภาพการทำงานของระบบทั้งหมด.....	13
2.12 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมแบบ PI.....	14
2.13 แผนภาพการสร้างรูปแบบพัลส์ BRM.....	15
2.14 แผนภาพการกำหนดรูปแบบ BRM เพื่อการประหยัดพลังงาน.....	16
3.1 บล็อกไคแกรมการทดสอบการควบคุมมอเตอร์.....	17
3.2 การทดสอบการควบคุมมอเตอร์	18
3.3 แสดงชุดควบคุมแบบ BRM (ด้านบน).....	18
3.4 แสดงชุดควบคุมแบบ BRM (ด้านข้าง).....	19
3.5 รูปพัลส์ BRM รูปแบบที่ 1, 2, 4, 6 และ 8	19
3.6 รูปพัลส์ BRM รูปแบบที่ 16, 32, 64 และ 128	20
3.7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะไร้โหลด.....	20
3.8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะขับ โหลด 0.3 N-m.	21
3.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะขับ โหลด 0.6 N-m.....	21
3.10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะขับ โหลด 0.9 N-m.	22
3.11 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะขับ โหลด 1.2 N-m.....	22

VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะขับ โหลด 1.5 N-m.....	23
3.13 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะขับ โหลด 1.75 N-m.	23
3.14 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะไว้ โหลด.....	24
3.15 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะขับ โหลด 0.3 N-m.....	24
3.16 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะขับ โหลด 0.6 N-m.....	25
3.17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะขับ โหลด 0.9 N-m.	25
3.18 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะขับ โหลด 1.2 N-m.....	26
3.19 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะขับ โหลด 1.5 N-m.....	26
3.20 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะขับ โหลด 1.8 N-m.	27
3.21 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะขับ โหลด 2.1 N-m.....	27
3.22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะขับ โหลด 2.4 N-m.....	28
3.23 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง โหลดของมอเตอร์ตัวที่ 1.....	28
3.24 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง โหลดของมอเตอร์ตัวที่ 2.....	29
4.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติต่างๆ ของ SPIM ของมอเตอร์ตัวที่ 1.....	38
4.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติต่างๆ ของ SPIM ของมอเตอร์ตัวที่ 2.....	39

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันนี้ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวได้ถูกนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ทั้งในบ้านเรือน ที่ทำงาน และโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างที่แข็งแรงทนทาน จึงไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษากันบ่อยครั้ง แต่สำหรับการควบคุมมอเตอร์ดังกล่าวนี้ทำได้ยาก [3] ซึ่งโดยปกติแล้วนั้นการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวและสามเฟส ส่วนใหญ่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบ PWM การควบคุมแบบเฟสหรือการควบคุมด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเทคนิคการควบคุมดังกล่าวนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและยุ่งยาก [3-4] รวมทั้งส่วนใหญ่ไม่ได้พิจารณาถึงเรื่องการประหยัดพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์มากนัก แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมแบบ Binary Rate Modulation (BRM) มาควบคุมแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ตามการใช้งานที่แท้จริง เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพและสมรรถนะในการทำงานสูงและมีการประหยัดพลังงาน ซึ่งมีประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อวิจัหาเทคโนโลยีใหม่ ๆ สำหรับใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวให้มีสมรรถนะในการทำงานที่เหมาะสมได้ตามต้องการ

1.2.2 เพื่อค้นคว้าวิจัยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM ให้เป็นที่ยอมรับและนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายต่อไป

1.2.3 เพื่อหาแนวทางการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ให้มีประสิทธิภาพสูงและมีการประหยัดพลังงาน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการวิเคราะห์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยเทคนิค BRM ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุม

1.3.2 หาวิธีที่ทำให้การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยเทคนิค BRM นั้นมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการควบคุม และให้ผลการตอบสนองได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

1.3.3 สร้างเครื่องต้นแบบจากหลักการควบคุมแบบ BRM เพื่อใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าทฤษฎีจากบทความ วารสารต่างๆ เอกสารและตำราทางวิชาการที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับหลักการ BRM

1.4.2 วิเคราะห์ระบบควบคุมจากสมการทางคณิตศาสตร์และเขียนโปรแกรม เพื่อประมวลผลสำหรับการใช้ในการควบคุมมอเตอร์

1.4.3 ออกแบบวงจรที่ใช้ในระบบควบคุมในแต่ละส่วน

1.4.4 ทำการสร้าง และประกอบเป็นชุดควบคุมความเร็วสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่สามารถทดสอบผลได้ตามทฤษฎีที่นำเสนอ

1.4.5 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1.5.1 สามารถนำหลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ด้วยเทคนิค BRM มาใช้ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Driver)

1.5.2 รู้จักแก้ปัญหาจากผลการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบดั้งเดิม ที่มีการนำมาปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาดโดยวิธีการใหม่

1.5.3 เป็นพื้นฐานในการศึกษาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM

1.5.4 สามารถนำเทคนิค BRM มาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมอุณหภูมิ แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ชิ่ง และในงานที่ประยุกต์ใช้หลักการ PWM ฯลฯ

1.6 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมแบบ BRM เพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวให้มีผลการตอบสนองตามสภาวะของการเปลี่ยนแปลงความเร็วทั้งขณะมอเตอร์ทำงานตอนไว้โหลดและขณะทำงานขับ โหลดที่ค่าต่างๆ ได้อย่างแม่นยำและมีการประหยัดพลังงาน โดยมีการกำหนดรูปแบบของพัลส์ BRM สำหรับการจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ตามการใช้งานที่แท้จริงของโหลดอย่างเหมาะสมซึ่งการสร้างรูปพัลส์ BRM นั้นทำได้ง่ายกว่าและสะดวก

เอกสารกว่าเทคนิคการควบคุมแบบ PWM [2,5] โดยการสร้างรูปพัลส์ BRM แต่ละรูปแบบที่อิสระต่อกัน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นกรณี BRM ขนาด 8 บิตนั้นรูปพัลส์หลักที่สร้างขึ้นคือ $f_1, f_2, f_4, f_6, f_8, f_{32}, f_{64}$ และ f_{128} แล้วนำรูปแบบ BRM หลักๆมากระทำ Linear Combination เพื่อให้ได้รูปแบบอื่นๆส่งไปควบคุมมอเตอร์ ผลจากการควบคุมทำให้การควบคุมความเร็วมอเตอร์มีความถูกต้องสูงตามอัตราของการเปลี่ยนแปลงความเร็วเอาท์พุท และยังให้ผลตอบสนองต่อสภาวะดังกล่าวทำได้อย่างรวดเร็ว

1.7 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบวงจรสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้เทคนิค BRM ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งเป็นบท ๆ ได้ดังนี้ คือ

บทที่ 1 บทนำได้กล่าวถึงแนวทางทั่ว ๆ ไปที่นำมาสู่งานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขต วิธีการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย หลักการใหม่ที่ได้นำเสนอ และรายละเอียดในแต่ละบทอย่างคร่าวๆ

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของ BRM ทฤษฎีการควบคุมและการออกแบบระบบควบคุมสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

บทที่ 3 ผลการทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยเทคนิค BRM มีการทดสอบคุณสมบัติการทำงานต่าง ๆ ของระบบ อาทิเช่น คุณสมบัติแรงบิด - ความเร็ว ของมอเตอร์

บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

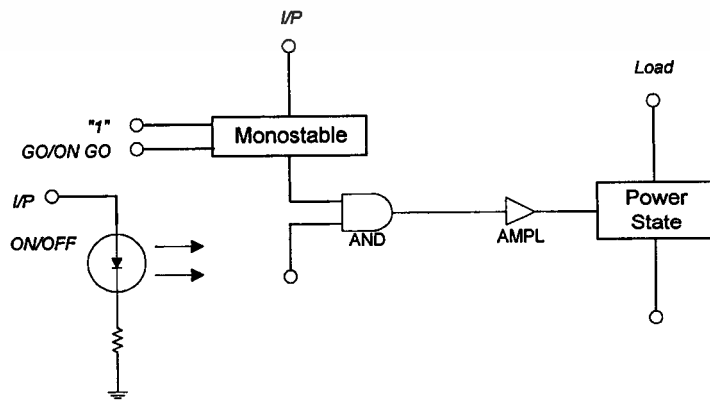
สำหรับบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ดังเช่น หลักการพื้นฐานของเทคนิคการควบคุมแบบ BRM การออกแบบระบบควบคุมที่ใช้ และแนวทางของการวิเคราะห์ตามหลักการควบคุมแบบ BRM

2.2 หลักการพื้นฐานของ BRM

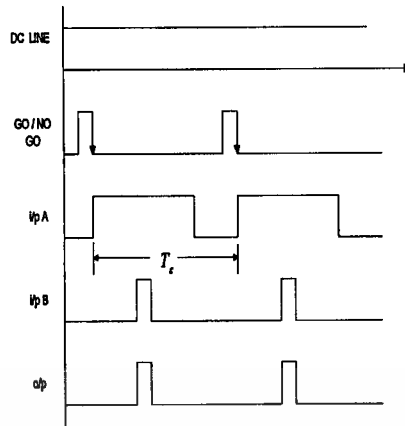
สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมแบบ BRM มาใช้ในการควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ซึ่งเทคนิคการควบคุมแบบ BRM นั้นสามารถกำหนดการจ่ายพลังงานที่ป้อนเข้ามอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม โดยมีการกำหนดตำแหน่งของพัลส์ BRM ด้วยวิธีการ Linear Combination จากพัลส์ BRM รูปแบบหลักที่สร้างขึ้นโดยอิสระต่อกัน (Linear Independent waveforms) แล้วส่งไปควบคุมมอเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด

2.2.1 หลักการสร้างพัลส์ BRM

พื้นฐานการสร้างพัลส์ BRM แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรโมโนสเตเบิล ถูกป้อนเข้าที่อินพุต A ของ AND Gate เพื่อกำหนดขอบเขตของคาบเวลา T ในแต่ละช่วงที่มีการกำเนิดพัลส์ BRM การส่งสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปยังอินพุต A เกิดขึ้นจากการกำหนดพัลส์ Go และ NO Go ในส่วนของพัลส์ BRM ที่ได้จากตัวควบคุม จะถูกส่งผ่านเข้าไปยังอินพุต B ของ AND Gate ทำให้ได้เอาต์พุตตามที่ต้องการส่งไปควบคุมมอเตอร์ต่อไป



(ก)



(จ)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของการผสมสัญญาณ BRM

จากโครงสร้างของการกำเนิดพัลส์ BRM ที่แสดงดังรูปที่ 2.1 นั้น ถ้ากำหนดให้มีการส่งรูปพัลส์ BRM เป็นจำนวน B พัลส์ ดังนั้นรูปพัลส์ BRM ที่ส่งออกไปโดยสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.1)

$$B = k_m (2^m) + k_{m-1} (2^{m-1}) \dots + k_1 (2^1) + k_0 (2^0) \quad (2.1)$$

และจากสมการ(2.1) เมื่อพิจารณาพลังงานในแต่ละส่วนส่งออกไปในช่วงเวลา T ถ้ากำหนดให้ 2^m คือ ผลรวมของจำนวนพัลส์ต่อไซเคิล และ R คือ ค่าพลังงานในแต่ละพัลส์ของคาบเวลา T เมื่อ cycle time $(T_c) = (2^m \times T)$ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยหาได้ตามสมการ (2.2)

$$P = \frac{BR}{T_c} = R \left[k_m \frac{f}{2} + k_{m-1} \frac{f}{2^2} \dots + k_1 \frac{f}{2^m} + k_0 \frac{f}{2^{m+1}} \right] \quad (2.2)$$

เมื่อกำหนดให้ B คือ จำนวนพัลส์ที่ส่ง

m คือ จำนวนบิต

f คือ ความถี่ = $\frac{1}{T}$

$k_m, k_{m-1}, \dots, k_1, k_0$ คือ ไบนารีบิตของ B

จากสมการ(2.2) จะสังเกตเห็นได้ว่าการส่งพัลส์ที่ความถี่ $\frac{f}{2}, \frac{f}{2^2}, \dots, \frac{f}{2^m}, \frac{f}{2^{m+1}}$ ขึ้นอยู่กับจำนวน

binary บิตของพัลส์ B ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างรูปแบบ BRM จึงกำหนดให้มีการกระจายของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รูปแบบ BRM ให้ได้พลังงานเฉลี่ยสูงสุดในทุกๆ รูปแบบตามช่วงเวลา T_c ด้วยการกำหนดความถี่ไม่ว่าใครจะเห็นต่างก็สน อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักเป็น Linear independent waveforms คำนี้คือ $f_1, f_2, f_4, f_8, f_{16}, f_{32}, f_{64}$ และ f_{128}
 ที่อิสระต่อกันมากระทำ Linear Combination ตัวอย่างเช่น $f_3 = f_4 + f_1$ (กรณี $m=8$) ดังนั้น
 รูปพัลส์ที่เกิดขึ้นสามารถเขียนในเทอมคณิตศาสตร์ [5] ได้ตามสมการ (2.3)

$$f_{2^a} = M \sum_{b=0}^{2^a-1} \left\{ u\left(t - \left(\frac{2^m}{2^{a+1}} - 1 + b \frac{2^m}{2^a}\right)T\right) - u\left(t - \left(\frac{2^m}{2^{a+1}} + b \frac{2^m}{2^a}\right)T\right) \right\} \quad (2.3)$$

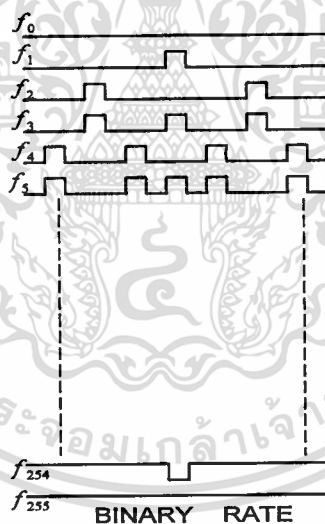
เมื่อ $u(t)$ คือ Unit Step Function

a คือ ค่าของไบนารี ($a = 0, 1, 2, \dots, m-1$)

M คือ ขนาดของความถี่

T คือ pulse time

สำหรับรูปแบบต่าง ๆ ของพัลส์ที่ได้จากการกำหนดตามรูปแบบ BRM สามารถแสดง
 ดังรูปที่ 2.2 ($m=8$)



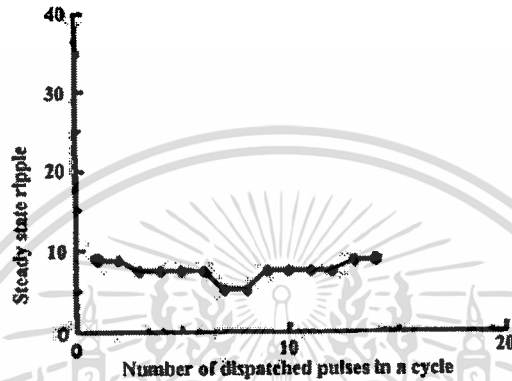
รูปที่ 2.2 รูปพัลส์ BRM ($m=8$)

ถ้าพิจารณาอินพุตที่เป็นพัลส์ของพลังงานหนึ่งหน่วยต่อไซกิลที่ง่ายให้กับมอเตอร์ ด้วยการ on time aT และ off time bT ค่า ripple เอาต์พุตในสภาวะคงตัวของความเร็วมอเตอร์กำหนดได้ตามเอกสารอ้างอิง [5] คือ

$$ripple = \frac{K_p (1 - e^{-aT/T_p}) (1 - e^{-bT/T_p})}{(1 - e^{-(a+b)T/T_p})} \quad (2.4)$$

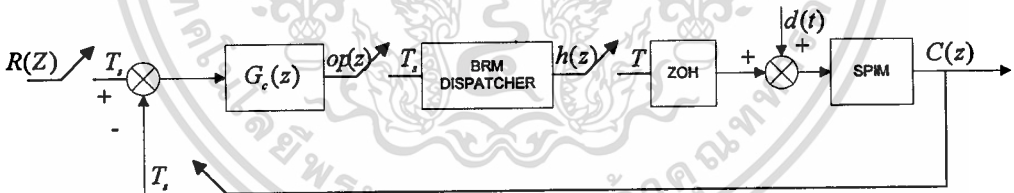
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้ K_p คือ ค่าคงที่ของ plant และ T_p คือ time constant โดยที่ ripple คือ ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของการตอบสนองในสถานะคงตัวต่อ pulse train ซึ่งผลของ ripple ตามสมการ (2.4) สามารถนำมาพิจารณาได้โดยการทดลองกำหนดให้อัตราส่วนของ $T/T_p = 0.01$ และ $m = 4$ (15 pulse ต่อไซเคิล) ผลของ ripple ในสถานะคงตัวที่รูปแบบต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 แต่ถ้ามีการเพิ่ม $m > 4$ อย่างเช่นในงานวิจัยนี้จะใช้ $m = 8$ เมื่อต้องการให้ ripple มีค่าใกล้เคียงดังรูปที่ 2.20 นั้น จะต้องให้อัตราส่วนของ $T/T_p < 0.001$



รูปที่ 2.3 ค่า ripple ที่เอาต์พุต เมื่อ $T/T_p = 0.01$ และ $m = 4$

2.3 โครงสร้างและการออกแบบระบบควบคุม



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของระบบควบคุม

สำหรับการออกแบบระบบควบคุมนั้น ได้กำหนดโครงสร้างของระบบควบคุมแบบลูปปิดไว้ดังรูปที่ 2.4 โดยออกแบบตัวควบคุม $G(z)$ เป็นแบบ proportion plus integral [1] ที่กำหนดให้ K_c คือ อัตราขยายของตัวควบคุม และ T_i คือ integral time ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมสามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$G_c(z) = K_c \left\{ 1 + \frac{T_i}{T} \frac{z}{z-1} \right\} \quad (2.5)$$

เมื่อกำหนดให้ T_i คือ เวลาในการลุ่ม $= (2^m - 1)T$ และจากรูปที่ 2.4 นั้น ถ้าพิจารณาให้อุปกรณ์ Zero Order Hold (ZOH) ต่อรวมอยู่กับ plant ซึ่งสามารถกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_{ph}(s) = G_h(s)G_p(s) = K_p \left\{ \frac{1 - e^{-sT_s}}{s(T_p s + 1)} \right\} \quad (2.6)$$

โดยที่ฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการ (2.6) เขียนในรูปของ Z- Transform ได้ดังนี้ คือ

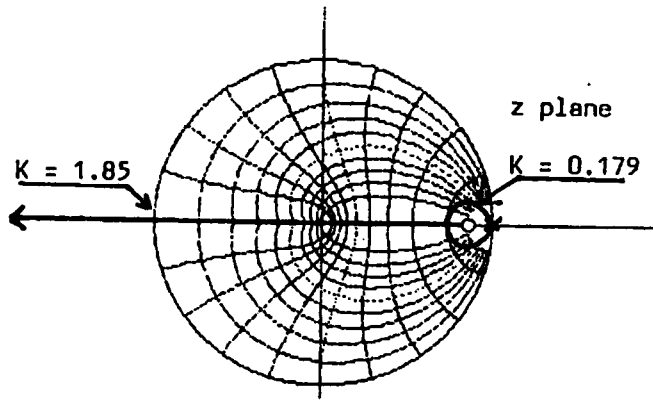
$$G_{ph}(z) = K_p \left\{ \frac{1 - e^{-T_s/T_p}}{z - e^{-T_s/T_p}} \right\} \quad (2.7)$$

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของระบบควบคุมดังรูปที่ 2.4 และฟังก์ชันถ่ายโอนในส่วนต่างๆ ของระบบแล้วนั้นสามารถกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบป้อนกลับได้ดังสมการ(2.8) โดยกำหนดให้ BRM dispatcher คือ dc gain (K_d) ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1294 mW/bit

$$\begin{aligned} G(z) &= \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{K_d G_c(z) G_{ph}(z)}{1 + K_d G_c(z) G_{ph}(z)} \\ &= \frac{K_d K_c K_p \left[\frac{(1 + T_s/T_i)z - 1}{z - 1} \right] \times \left[\frac{1 - e^{-T_s/T_p}}{z - e^{-T_s/T_p}} \right]}{1 + K_d K_c K_p \left[\frac{(1 + T_s/T_i)z - 1}{z - 1} \right] \times \left[\frac{1 - e^{-T_s/T_p}}{z - e^{-T_s/T_p}} \right]} \end{aligned} \quad (2.8)$$

สำหรับสมการ (2.8) ถ้ากำหนดให้ $x = e^{-T_s/T_p}$ และ $K = K_c K_d K_p (1-x)$ ดังนั้นสมการคุณลักษณะเขียนได้ตามสมการ (2.9) ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้เทคนิค Root locus ที่กำหนดให้ K จากการทดสอบด้วยวิธี Trial and error ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.179 ถึง 1.85 โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้น แสดงดังรูปที่ 2.5 และเมื่อกำหนดค่า T, T_p, K_p, K_d สำหรับการพล็อต Root locus นั้น ด้วยการเปลี่ยนแปลง T ที่ค่าต่างๆ ในการพิจารณาผลการตอบสนองของระบบป้อนกลับดังรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดค่า K_c สูงๆ สำหรับการควบคุมแบบ BRM นั้น ส่งผลให้สัญญาณรบกวนลดลงและผลตอบสนองในสถานะทำได้อย่างรวดเร็ว

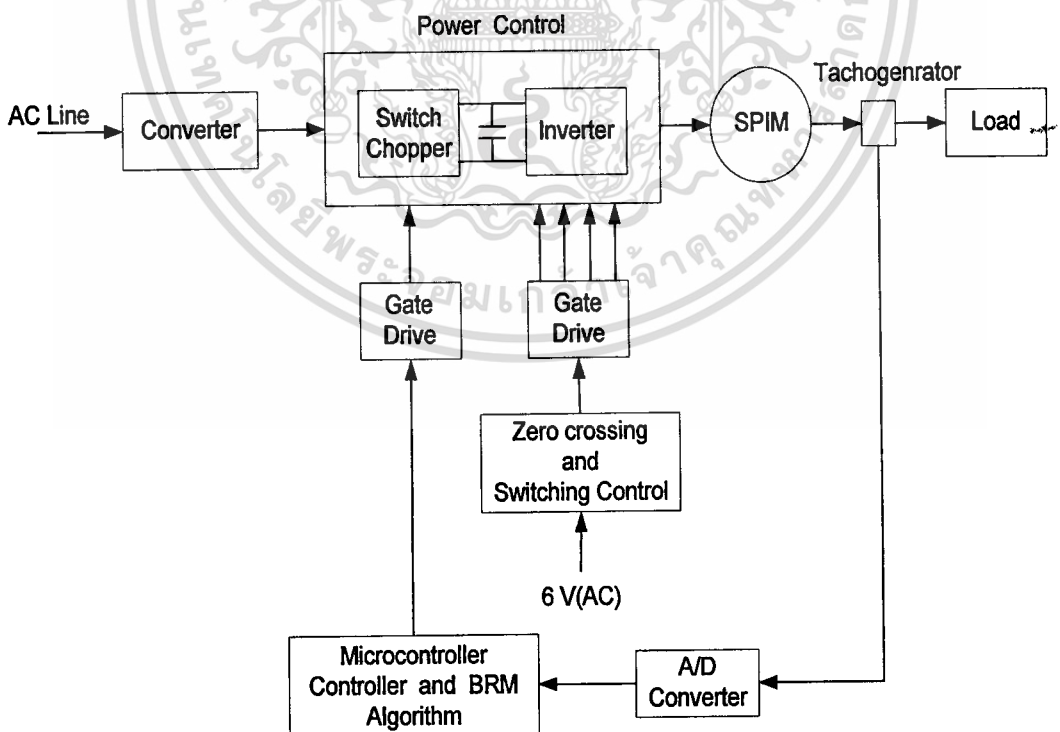
$$(z-1)(z-x) + K \left\{ (1 + T_s/T_p)z - 1 \right\} = 0 \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ Root Locus

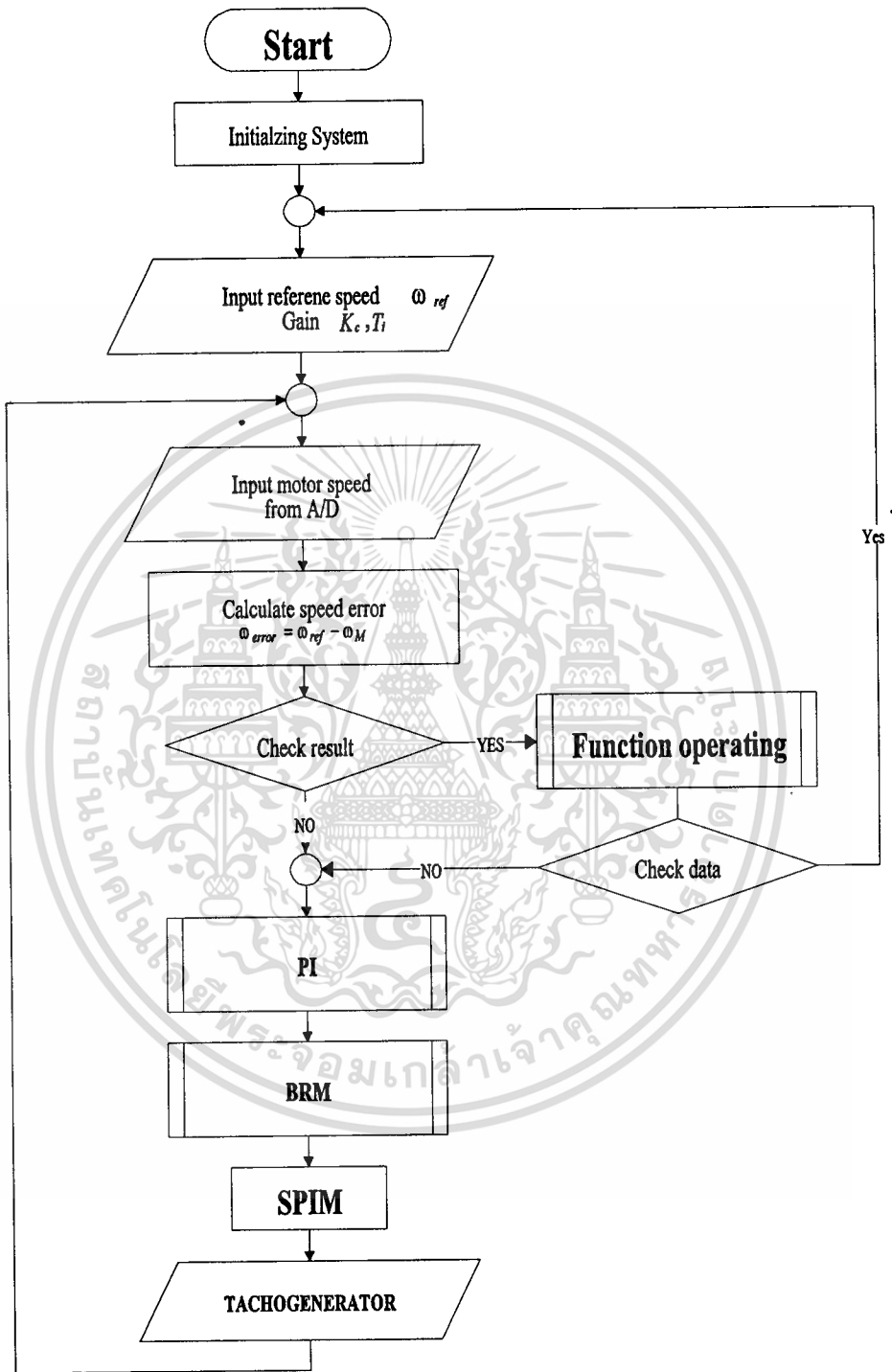
2.3.1 การออกแบบทางฮาร์ดแวร์

สำหรับโครงสร้างของการควบคุมทางฮาร์ดแวร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 เมื่อมีสัญญาณป้อนกลับจาก Tachogenerator มายังส่วนวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 ประมวลผลตามกริยาการควบคุมแบบ PI แล้วตัดสินใจเลือกส่งรูปแบบ BRM ที่เหมาะสมจากการคำนวณ เพื่อส่งไปยังวงจรขับนำผ่านเข้าสู่ชุดอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้ได้ตามต้องการ



รูปที่ 2.6 บล็อกไดแกรมการทำงานของระบบทั้งหมด

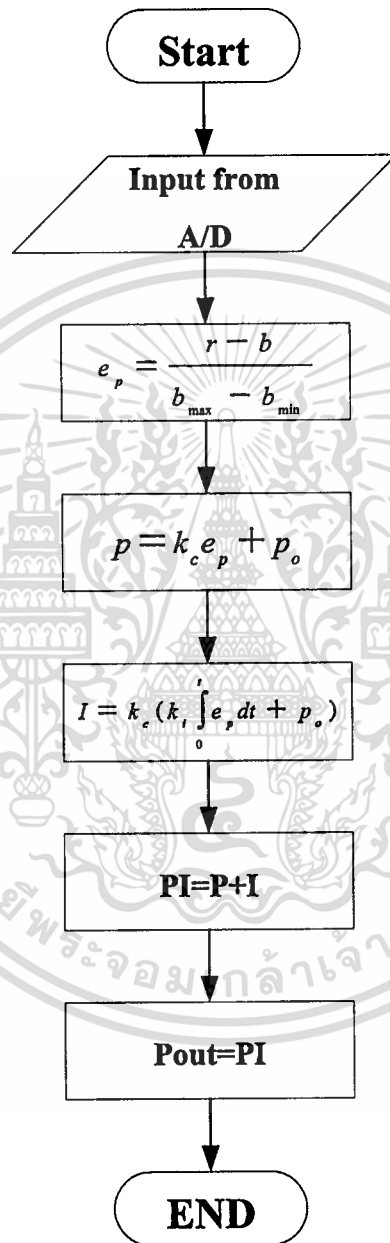
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แผนภาพการทำงานของระบบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

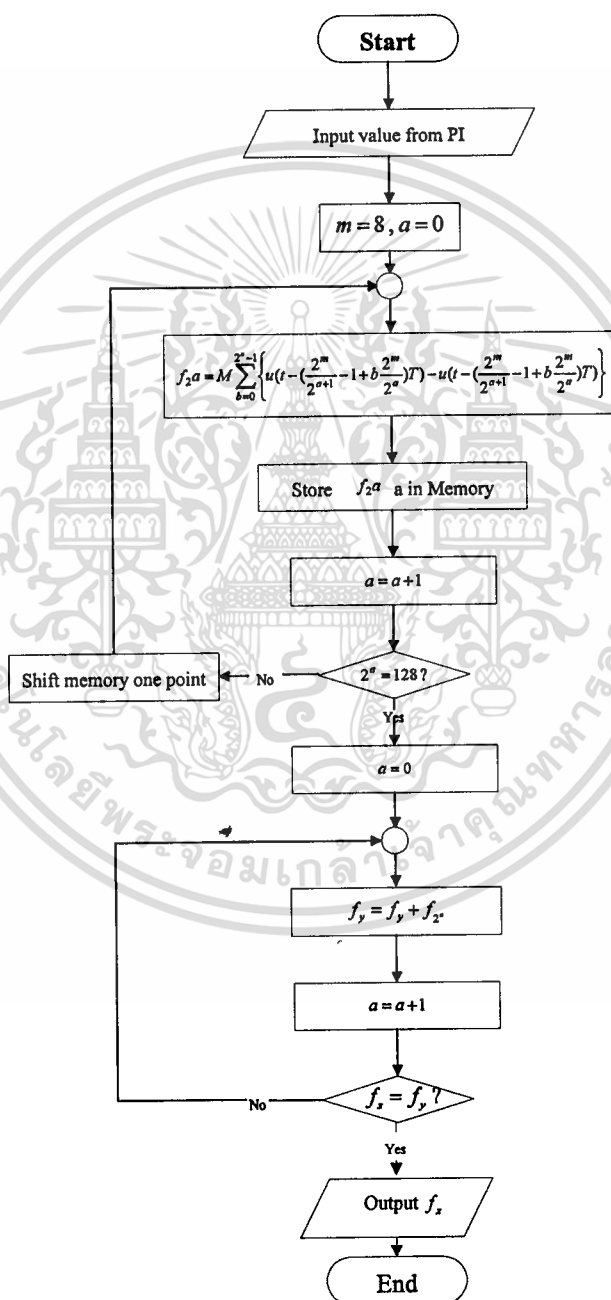
สำหรับตัวควบคุมแบบ PI ที่ใช้ในระบบควบคุมนั้นสามารถอธิบายการทำงานได้ดังรูปที่ 2.12 โดยที่ตัวควบคุมจะทำหน้าที่กำหนดรูปแบบ BRM เพื่อส่งไปยังชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 2.12 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมแบบ PI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

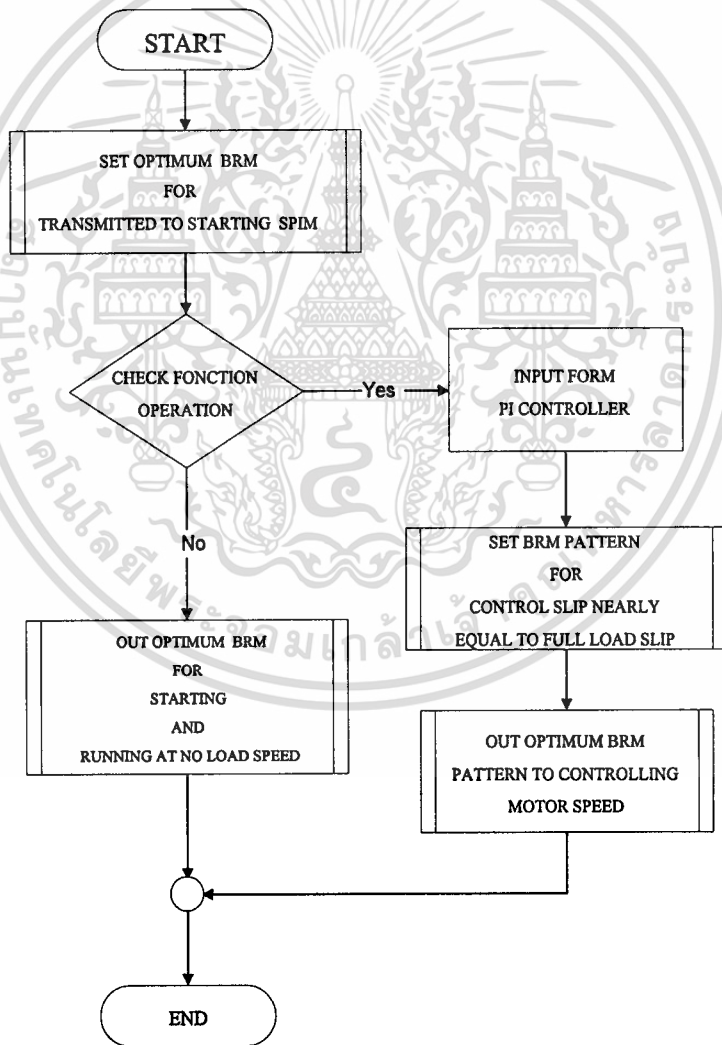
สำหรับรูปที่ 2.13 นั้นแสดงการสร้างพัลซ์ BRM ที่กำหนดให้โปรแกรมสร้างพัลซ์ BRM ทั้งหมด 8 รูปแบบหลัก ส่วนรูปแบบอื่นๆ นั้น จะนำรูปแบบหลักที่สร้างขึ้นมากกระทำ Linear combination ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เพื่อให้ได้รูปแบบ BRM ที่เหมาะสมส่งไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ต่อไป ซึ่งกระบวนการดังกล่าวถูกกำหนดจากตัวควบคุมแบบ



รูปที่ 2.13 แผนภาพการสร้างรูปแบบพัลซ์ BRM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพการประหยัดพลังงานจากเทคนิคการควบคุมแบบ BRM โดยที่ในช่วงของการเริ่มต้นหมุน และการทำงานที่สภาวะไร้โหลดนั้นมีการกำหนดพัลส์ BRM รูปแบบที่เหมาะสมกับการทำงานในสภาวะดังกล่าวนี้ส่งออกไปควบคุมมอเตอร์โดยสามารถลดการกระชากของกระแสและแรงบิดขณะเริ่มต้นหมุนได้ นอกจากนี้ขณะทำงานในสภาวะไร้โหลดยังทำให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้น โดยการคุมค่าสลิปให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสลิปขณะมอเตอร์ทำงานที่พิกัดโหลด และสำหรับกรณีที่ย่างโหลดให้แก่มอเตอร์ที่ค่าต่าง ๆ โปรแกรมจะคำนวณรูปแบบ BRM ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขของการประหยัดพลังงาน กล่าวคือ เป็นรูปแบบที่สามารถจ่ายกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตามความต้องการของโหลดค่านั้น ๆ ที่แท้จริงแล้วส่งรูปแบบ BRM ที่ได้ไปควบคุมความเร็วมอเตอร์ต่อไป



รูปที่ 2.14 แผนภาพการกำหนดรูปแบบ BRM เพื่อการประหยัดพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

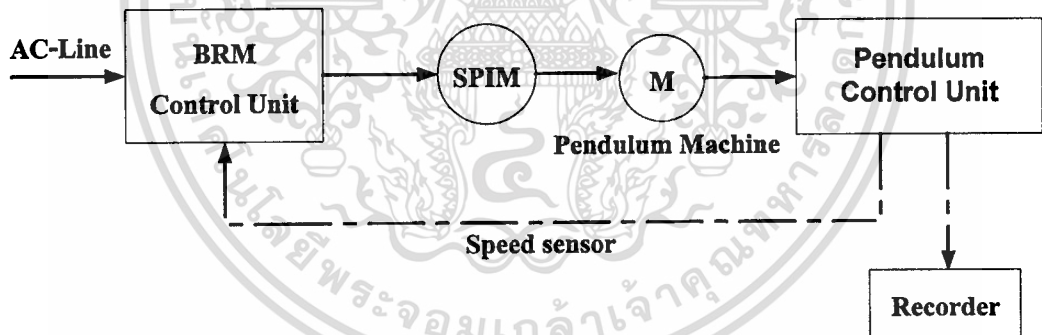
บทที่ 3

ผลการทดลอง

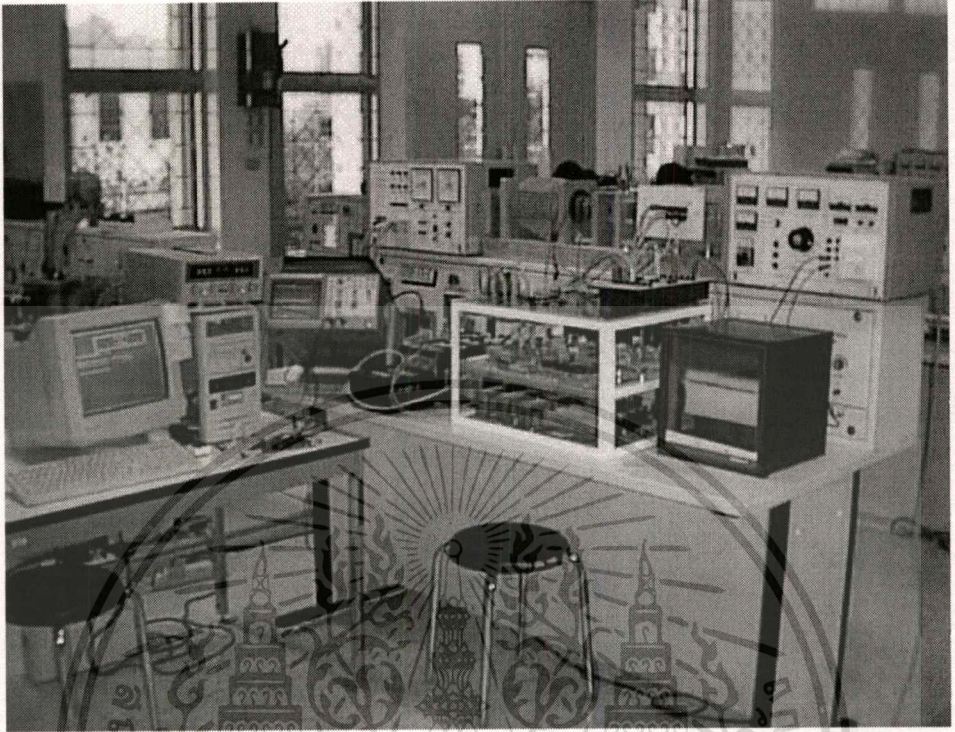
สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบตามเทคนิคการควบคุมด้วยการผสมสัญญาณแบบ BRM กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว จำนวน 2 ตัว ตามโครงสร้างของระบบควบคุมดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมอเตอร์มีพิกัดดังนี้ คือ

มอเตอร์ตัวที่ 1 แรงดัน 220 โวลต์ กระแส 2.65 แอมป์ กำลังเอาต์พุต 260 วัตต์ 50 เฮิร์ตซ์ 4 ขั้วแม่เหล็ก และ ความเร็วรอบ 1410 รอบต่อนาที

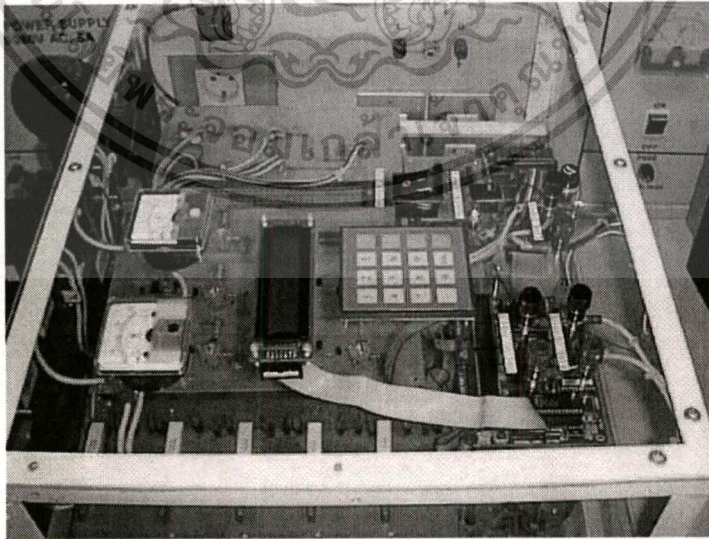
มอเตอร์ตัวที่ 2 แรงดัน 220 โวลต์ กระแส 2.85 แอมป์ กำลังเอาต์พุต 330 วัตต์ 50 เฮิร์ตซ์ 4 ขั้วแม่เหล็ก และ ความเร็วรอบ 1375 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.1 บล็อกไดแกรมการทดสอบการควบคุมมอเตอร์

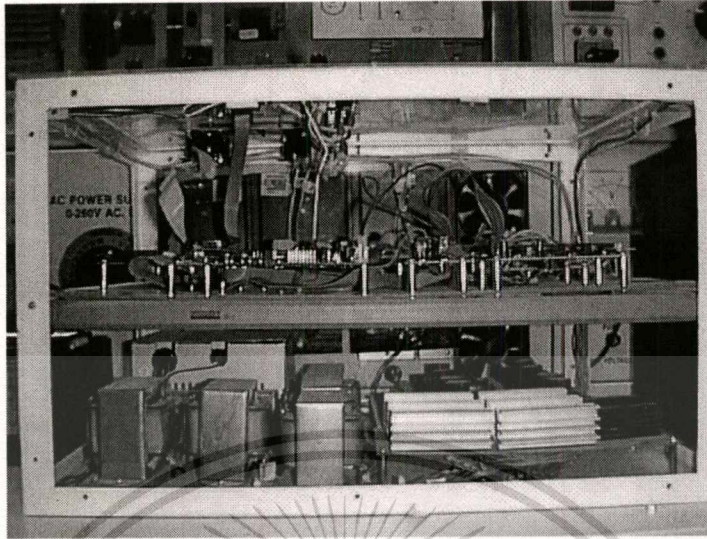


รูปที่ 3.2 การทดสอบการควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 3.3 แสดงชุดควบคุมแบบ BRM (ด้านบน)

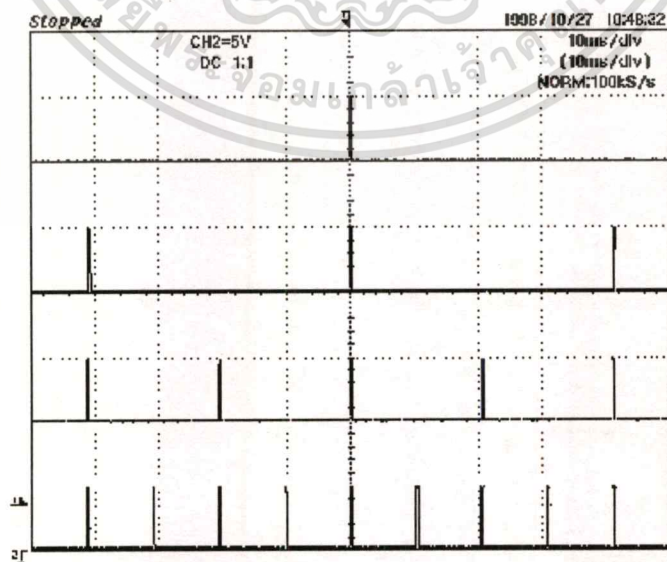
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงชุดควบคุมแบบ BRM (ด้านข้าง)

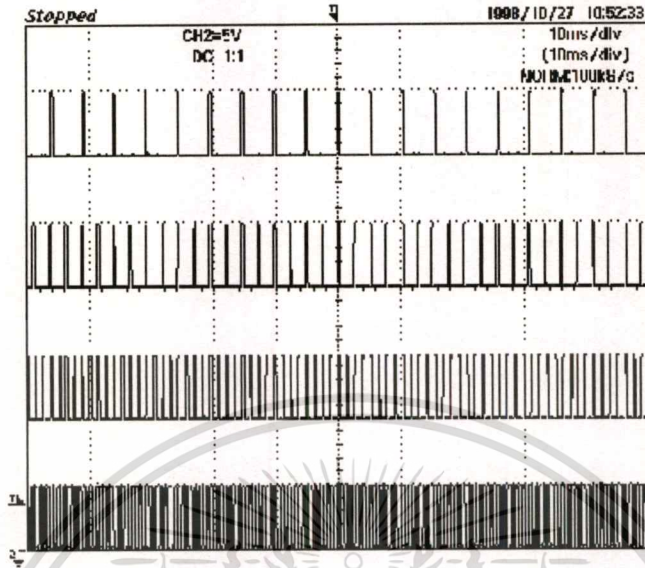
3.1 ผลการทดลองส่วนที่ 1

ผลการทดลองในส่วนที่ 1 เป็นการแสดงผลของรูปพัลส์ BRM รูปแบบหลักที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 3.5 ถึง 3.6 รวมทั้งแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันกับกระแสที่ได้จากการทดสอบการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 ตัว ตามหลักการควบคุมแบบ BRM ดังรูปที่ 3.7 ถึง 3.23



รูปที่ 3.5 รูปพัลส์ BRM รูปแบบที่ 1, 2, 4 และ 8

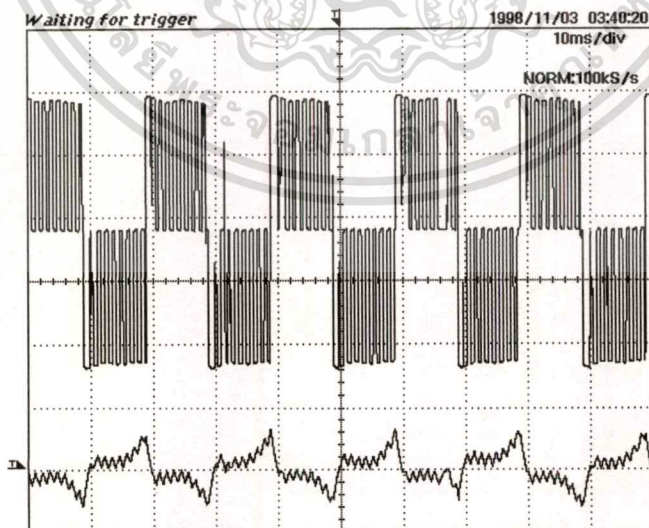
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 รูปพัลส์ BRM รูปแบบที่ 16,32, 64 และ 128

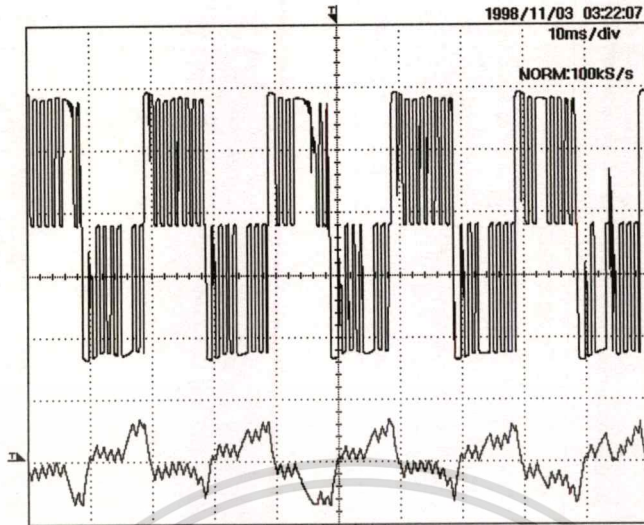
3.1.1 ผลการทดสอบการควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 1

สำหรับรูปคลื่นของสัญญาณแรงดันและกระแสที่ได้จากทดสอบการควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 1 ด้วยเทคนิค BRM ทั้งขณะไว้โหลดและขณะขับโหลดที่ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.7 ถึง 3.13

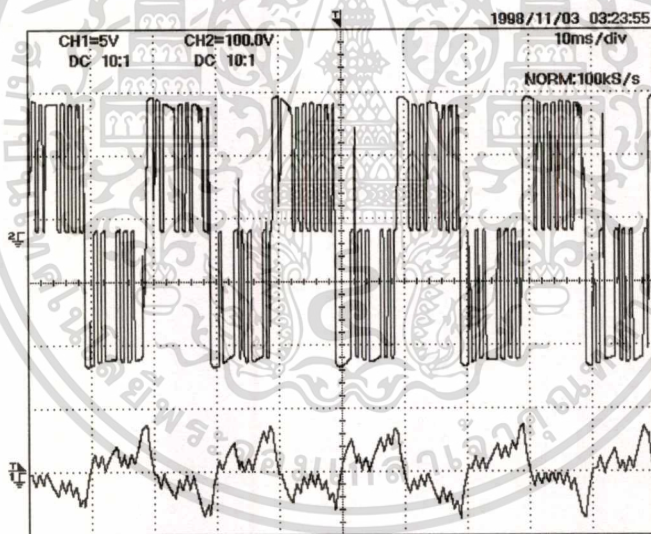


รูปที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะไว้โหลด

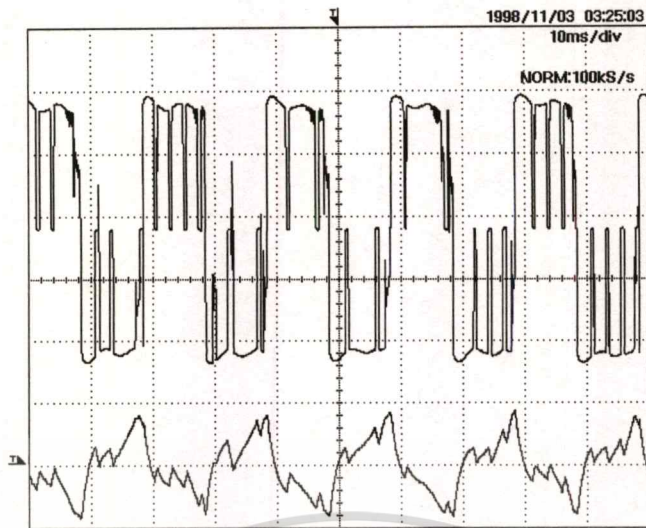
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



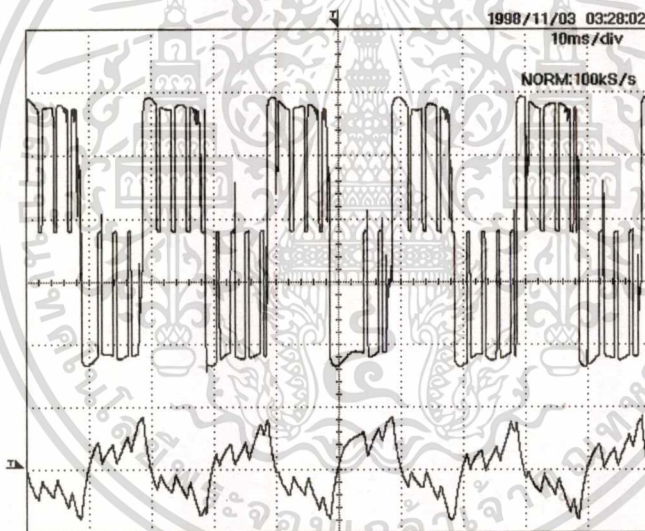
รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับโหลด 0.3 N-m.



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับโหลด 0.6 N.m.

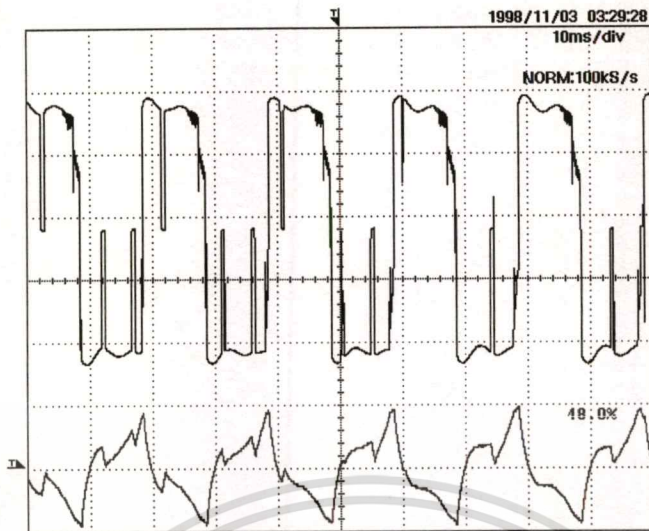


รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับ โหลด 0.9 N.m.

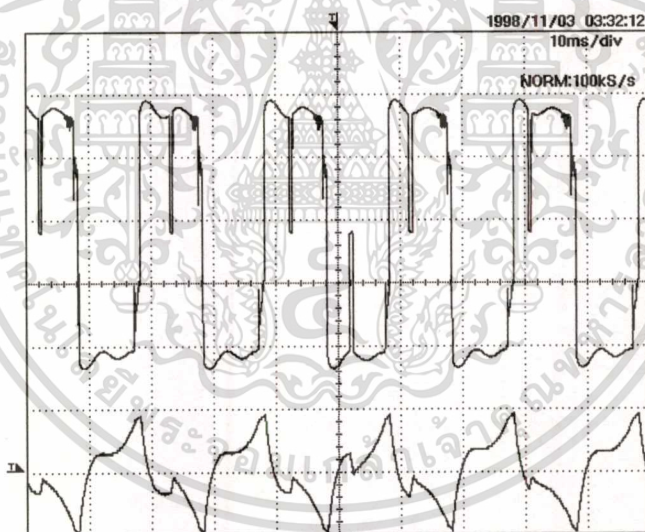


รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับ โหลด 1.2 N.m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



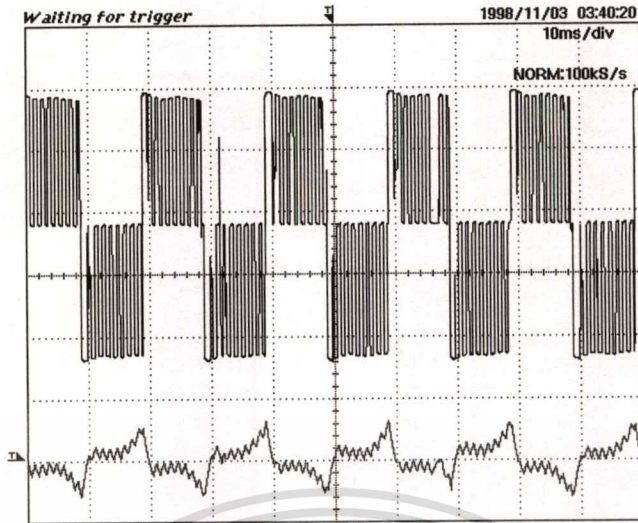
รูปที่ 3.12 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับ โหลด 1.5 N.m.



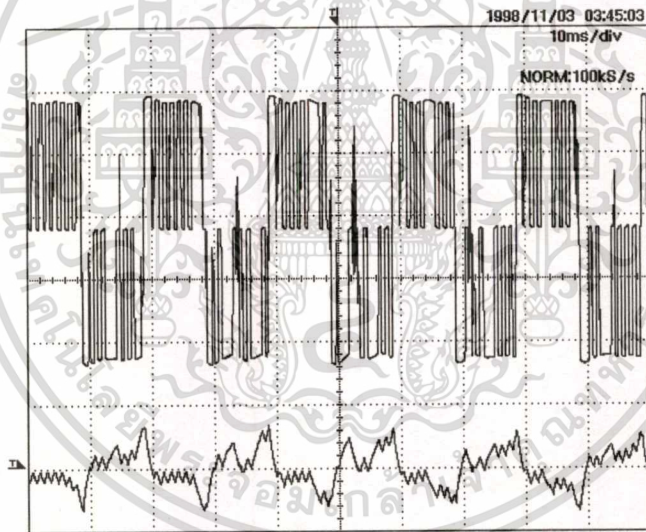
รูปที่ 3.13 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับ โหลด 1.75 N.m.

3.1.2 ผลการทดลองการควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 2

ในส่วนผลการทดสอบการควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 2 ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM นั้น สามารถแสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส ได้ดังรูปที่ 3.14 ถึง 3.23

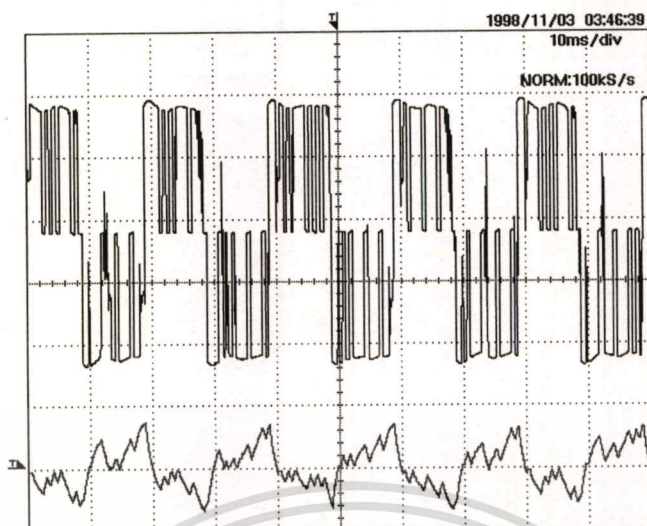


รูปที่ 3.14 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะไร้โหลด

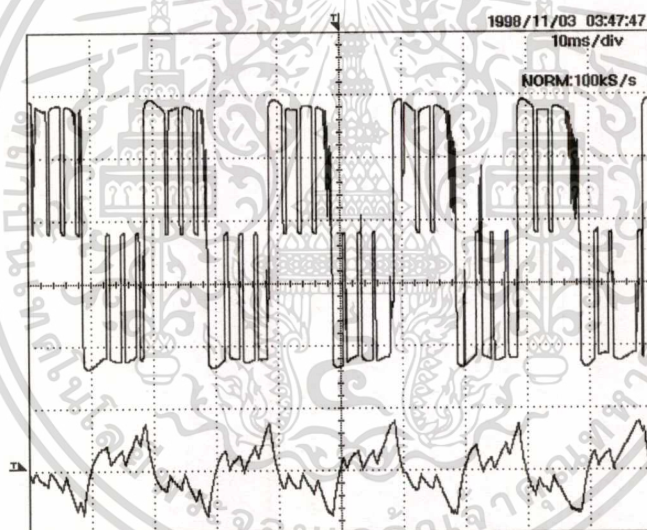


รูปที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับ โหลด 0.3 N-m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

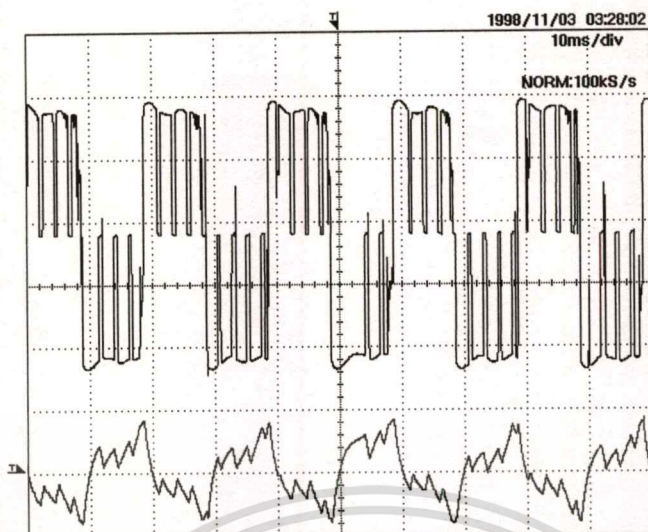


รูปที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับ โหลด 0.6 N-m

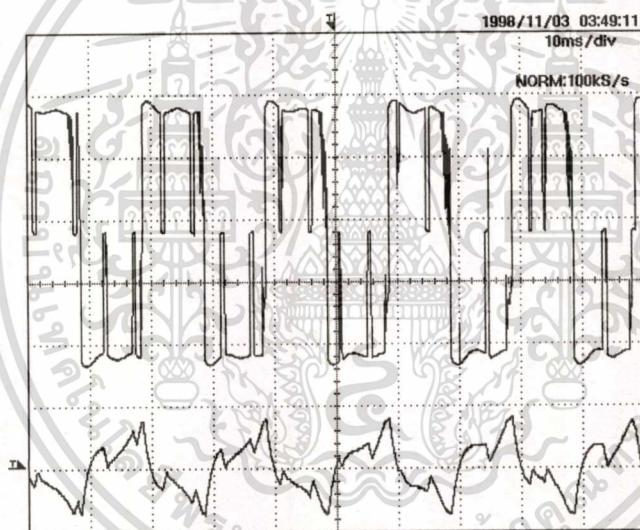


รูปที่ 3.17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับ โหลด 0.9 N-m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

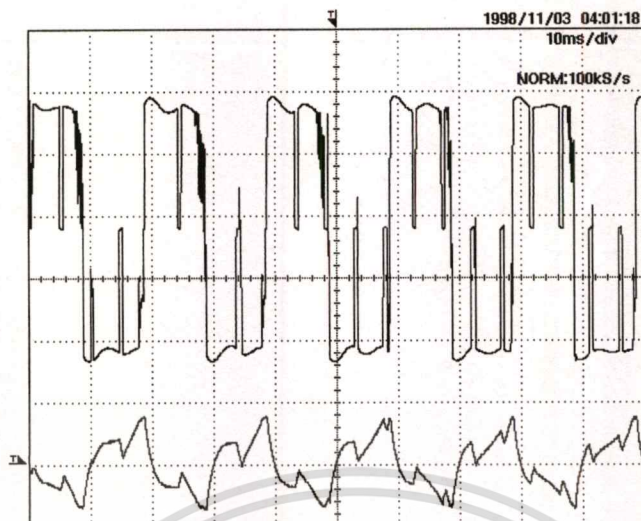


รูปที่ 3.18 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับโหลด 1.2 N-m.

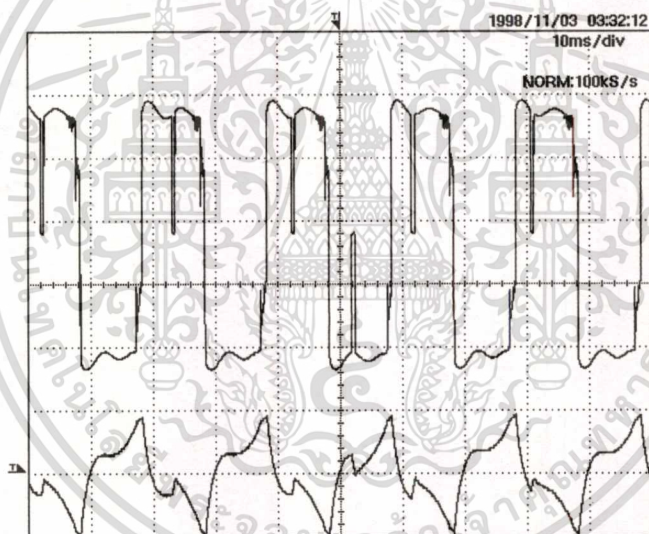


รูปที่ 3.19 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับโหลด 1.5 N-m.

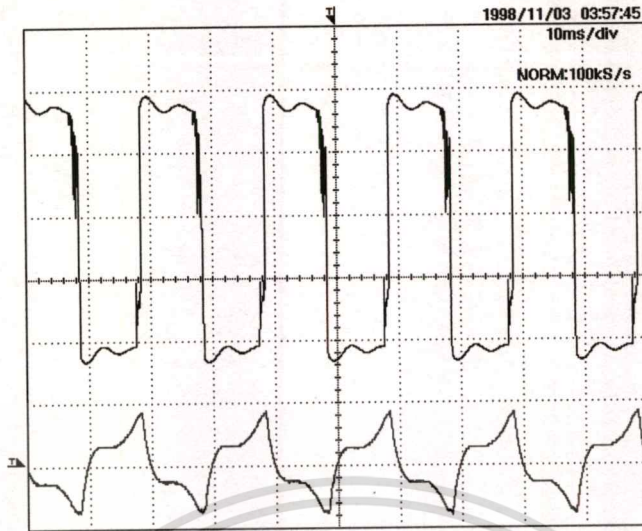
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับ โหลด 1.8 N-m.



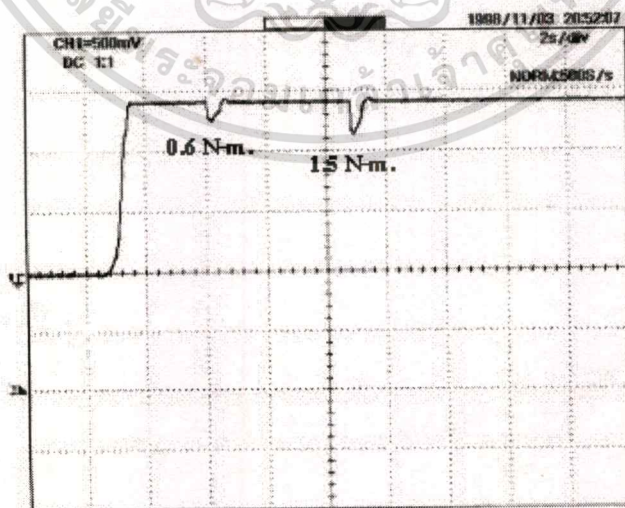
รูปที่ 3.21 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับ โหลด 2.1 N-m.



รูปที่ 3.22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะขับ โหลด 2.4 N-m.

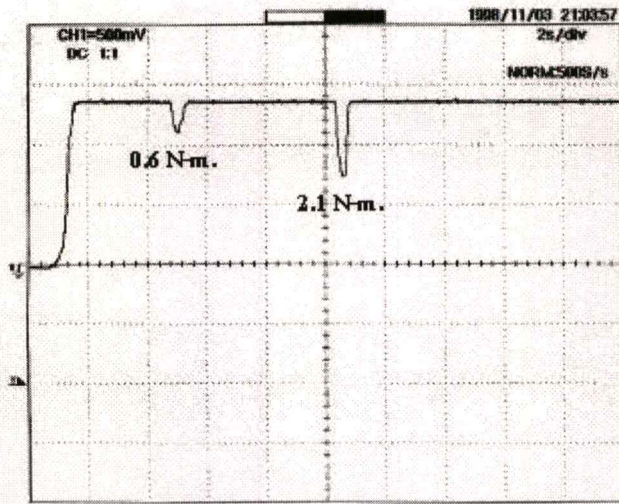
3.2 ผลการทดลองส่วนที่ 2

สำหรับส่วนนี้แสดงผลการทดสอบผลตอบสนองต่อความเร็วและผลตอบสนองต่อการเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงที่ค่าต่างๆ โดยการคุมค่าความเร็วของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวไว้ที่พิกัด โดยกำหนดค่า K_c และ T_i ตามหลักการ Ziegler Nichols [3] ดังนี้ คือ มอเตอร์ตัวที่ 1 กำหนดค่า $K_c = 1.75$, $T_i = 0.015$ วินาที และ $T_s = 0.667$ มิลลิวินาที และมอเตอร์ตัวที่ 2 กำหนดค่า $K_c = 2.15$, $T_i = 0.020$ วินาที และ $T_s = 0.667$ มิลลิวินาที



รูปที่ 3.23 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง โหลดของมอเตอร์ตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลคของมอเตอร์ตัวที่ 2

3.3 ผลการทดลองส่วนที่ 3

ผลการทดลองส่วนที่ 3 นี้ เป็นการพิจารณาถึงคุณลักษณะสมบัติและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจากผลของการควบคุมแบบ โดยตรง ผลการควบคุมด้วยวงจรควบคุมแรงดัน และผลการควบคุมด้วยเทคนิคแบบ BRM โดยที่ตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 เป็นผลจากการควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 1 ส่วนผลจากการควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 2 นั้นแสดงดังตารางที่ 3.4, 3.5 และ 3.6

ตารางที่ 3.1 การควบคุมมอเตอร์โดยตรง

T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.75
N(rpm)	1435	1415	1404	1392	1380	1374	1365
V_i (V)	220	220	220	220	220	220	220
I_i (A)	2.76	2.77	2.78	2.79	2.80	2.82	2.83
P_i (w)	147	160	180	203	227	244	279
Q_i (Var)	589	588	585	579	573	570	557
S(VA)	607	609	612	614	616	620	623
PF.	0.242	0.263	0.294	0.331	0.369	0.394	0.448
P_o (W)	0	44.45	88.22	131.19	173.42	215.83	250.15
η (%)	0	27.78	49.01	64.63	76.40	88.45	89.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การควบคุมมอเตอร์ด้วยวงจรควบคุมแรงดัน

T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.75
N(rpm)	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410
$V_i(V)$	150	160	166	175	179	181	190
$I_i(A)$	1.20	1.40	1.70	2.00	2.10	2.20	2.35
$P_i(w)$	65	92	128	161	200	238	273
$Q_i(Var)$	168	204	251	311	319	320	354
S(VA)	180	224	282	350	376	398	447
PF.	0.361	0.412	0.455	0.460	0.531	0.597	0.609
$P_o(W)$	0	44.30	88.59	132.89	177.19	221.48	258.40
$\eta(\%)$	0	48.15	69.21	82.54	88.60	93.06	94.65

ตารางที่ 3.3 การควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิค BRM

T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.75
N(rpm)	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410
$V_i(V)$	129	153	160	170	176	181	185
$I_i(A)$	1.10	1.29	1.60	1.83	2.04	2.14	2.30
$P_i(w)$	63	89	124	150	190	233	269
$Q_i(Var)$	127	176	224	272	305	309	329
S(VA)	142	197	256	311	359	387	425
PF.	0.444	0.452	0.483	0.483	0.529	0.602	0.633
$P_o(W)$	0	44.30	88.59	132.89	177.19	221.48	258.40
$\eta(\%)$	0	49.78	71.44	88.59	93.26	95.06	96.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 การควบคุมมอเตอร์โดยตรง

T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
N(rpm)	1429	1425	1418	1412	1405	1392	1386	1375	1366
$V_i(V)$	220	220	220	220	220	220	220	220	220
$I_i(A)$	2.30	2.32	2.33	2.34	2.35	2.39	2.41	2.43	2.45
$P_i(w)$	156	169	198	213	235	253	300	339	370
$Q_i(Var)$	481	481	473	469	461	461	437	414	392
S(VA)	506	510	513	515	517	526	530	535	539
PF.	0.308	0.331	0.386	0.414	0.455	0.481	0.566	0.634	0.686
$P_o(W)$	0	44.77	89.10	133.08	176.56	218.65	261.25	302.38	343.31
$\eta(\%)$	0	26.49	45.00	62.48	75.13	86.42	87.08	89.20	92.79

ตารางที่ 3.5 การควบคุมมอเตอร์ด้วยวงจรควบคุมแรงดัน

T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
N(rpm)	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375
$V_i(V)$	151	170	185	190	194	200	203	209	213
$I_i(A)$	1.22	1.52	1.72	1.89	2.11	2.32	2.43	2.58	2.79
$P_i(w)$	83	135	172	195	223	254	293	335	370
$Q_i(Var)$	164	220	267	301	343	388	396	422	465
S(VA)	184	258	318	359	409	464	493	539	594
PF.	0.451	0.520	0.540	0.543	0.545	0.547	0.594	0.621	0.623
$P_o(W)$	0	43.20	86.39	129.59	172.79	215.98	259.18	302.38	345.58
$\eta(\%)$	0	32.00	50.23	66.46	77.48	85.03	88.46	90.26	93.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 การควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิค BRM

T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
N(rpm)	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375
$V_i(V)$	130	156	170	182	191	194	197	200	202
$I_i(A)$	1.10	1.51	1.76	1.84	1.99	2.20	2.34	2.46	2.74
$P_i(w)$	78	130	168	190	218	247	280	320	363
$Q_i(Var)$	120	197	247	276	311	348	366	374	417
S(VA)	143	236	299	335	380	427	461	492	553
PF.	0.545	0.550	0.562	0.567	0.574	0.578	0.607	0.650	0.656
$P_o(W)$	0	43.20	86.39	129.59	172.79	215.98	259.18	302.38	345.58
$\eta(\%)$	0	33.23	51.42	68.21	79.26	87.44	92.56	94.49	95.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

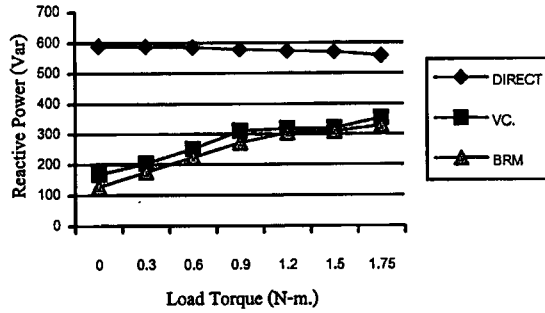
บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

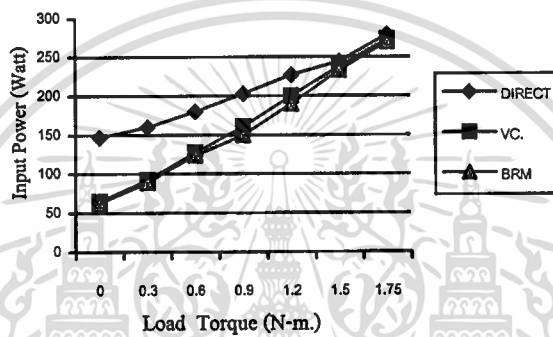
4.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM นั้นผลที่ได้พบว่าเทคนิคนี้สามารถลดค่าแรงดัน, การกระชากของกระแสและแรงบิดขณะเริ่มต้น หมุนให้ต่ำลงนอกจากนี้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM ทำให้ผลตอบสนองของการเข้าสู่สภาวะคงตัวทำได้รวดเร็วขณะโหลดมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่าต่าง ๆ และเมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของพัลส์ BRM เห็นได้ว่าเป็นรูปแบบที่มีความง่ายและสะดวกต่อการสร้างเมื่อเทียบกับเทคนิคการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งเฟสเดียวและสามเฟส [3,4,6,7] สำหรับอินพุตที่เป็นพัลส์ BRM ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดการจ่ายพลังงานให้เข้าสู่มอเตอร์พบว่าสามารถที่จะกำหนดรูปแบบการส่งละเอียดถึง 256 รูปแบบ ($f_0 - f_{255}$) โดยงานวิจัยนี้มีการกำหนดจำนวนบิต $m = 8$

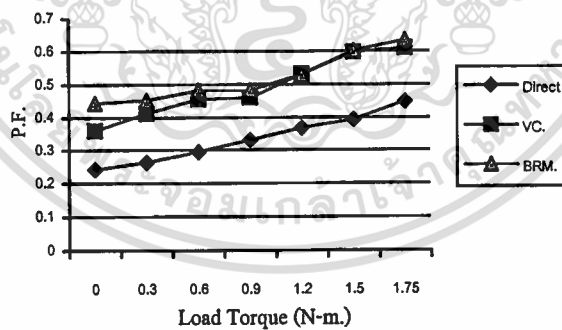
สำหรับผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นนั้น เป็นการควบคุมความเร็วให้มีความแม่นยำทั้งขณะขับ โหลดที่ค่าต่างๆและขณะไร้โหลด นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาถึงเรื่องของการประหยัดพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์อีกด้วย โดยจากผลการทดลองดังตารางที่ 3.1 ถึง 3.6 เห็นได้ว่านี้เทคนิคการควบคุมแบบBRM นั้นสามารถลดพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยการลดรีแอคทีฟลงไปได้มากเมื่อเทียบกับการควบคุมโดยตรงและการควบคุมด้วยวงจรควบคุมแรงดัน (Voltage Control : VC) ซึ่งถ้าพิจารณาตามคุณลักษณะสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พบว่ามอเตอร์ดังกล่าวถูกออกแบบให้ทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อขับ โหลดเต็มพิกัดและขณะทำงานตอนไร้โหลดค่าตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำประมาณ 0.1 ถึง 0.3 [3-4] นอกจากนี้ยังพบว่าขณะมอเตอร์ทำงานตอนไร้โหลดและขณะขับ โหลดนั้นพลังงานที่ต้องจ่ายให้กับมอเตอร์ไม่แตกต่างกันนัก แต่ในงานวิจัยนี้เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM สามารถควบคุมการจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ตามความต้องการใช้งานที่แท้จริง ส่งผลให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงและขณะไร้โหลดนั้นสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้นเป็นผลทำให้ประหยัดพลังงานที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ สำหรับคุณลักษณะสมบัติต่างๆ ที่ได้จากเทคนิคการควบคุมแบบ BRM แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยเป็นการเปรียบเทียบกับ การควบคุมโดยตรงและการควบคุมด้วยวงจรควบคุมแรงดัน



(ก) กราฟเปรียบเทียบกำลังรีแอกทีฟ

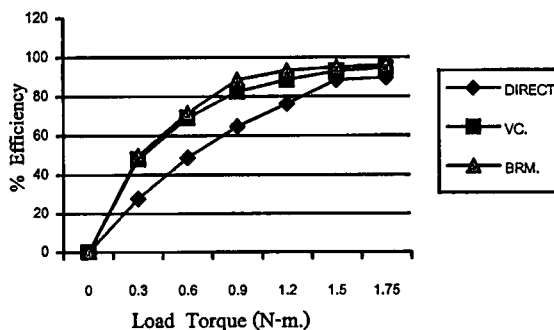


(ข) กราฟเปรียบเทียบกำลังอินพุต



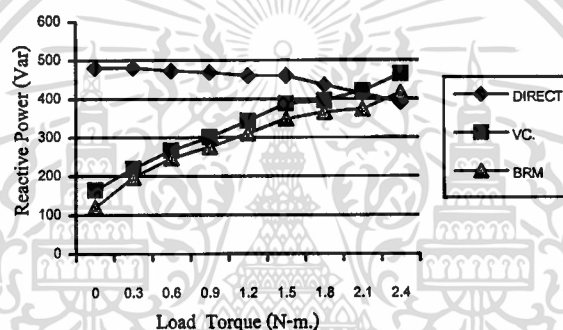
(ค) กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

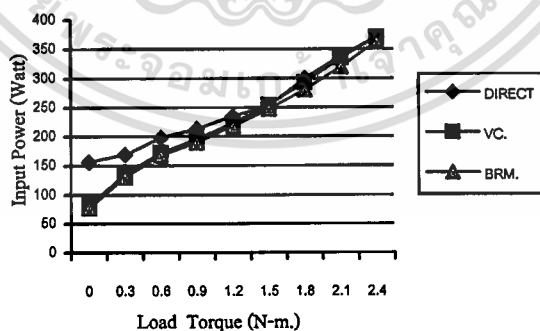


(จ) กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติต่างๆ ของ SPIM ตัวที่ 1

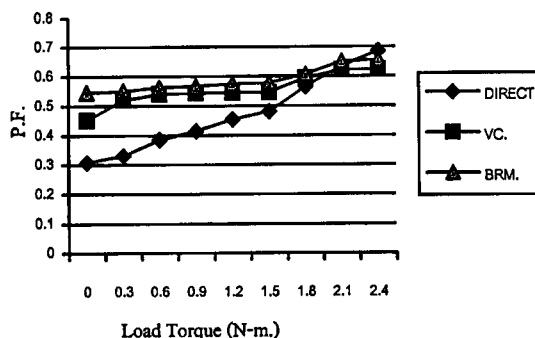


(ก) กราฟเปรียบเทียบกำลังรีแอกทีฟ

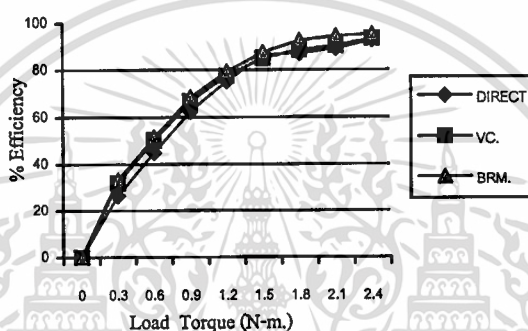


(ข) กราฟเปรียบเทียบกำลังอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบกำลัง



(ง) กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของ SPIM ตัวที่ 2

เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังขณะมอเตอร์ทำงาน โดยไม่มีโหลดค่ออยู่นั้น เทคนิคการควบคุมแบบ BRM มีการปรับค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบโดยตรง ดังนั้นสำหรับงานที่มีการขับมอเตอร์ขณะที่ไม่มีโหลดค่ออยู่เป็นช่วงเวลานานจึงเหมาะที่จะนำระบบการควบคุมด้วยเทคนิค BRM ไปประยุกต์ใช้งาน เช่นระบบขับเคลื่อนสายพาน การควบคุมบันไดเลื่อน และงานกลึง เป็นต้น นอกจากนี้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM ยังสามารถลดการกระชากของกระแสกับแรงบิดเริ่มต้นหมุนได้อีกด้วย

4.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

สำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้นั้น ผลจากการควบคุมยังมีข้อเสียในเรื่องของรูปคลื่นกระแส เนื่องจากรูปคลื่นกระแสที่ได้นั้นไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์ ดังนั้นแนวทางสำหรับงานวิจัยต่อไปนั้นควรมีการปรับปรุงรูปคลื่นกระแสที่ได้จากเทคนิคการควบคุมแบบ BRM ให้มีรูปร่างใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์

มากที่สุด เพื่อเป็นการเพิ่มสมรรถนะและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้สูงขึ้น และนอกจากนี้ควรพิจารณาฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นด้วย

๕



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] K. Ogata, Discrete - Time Control System ,Englewood Cliffs, NJ: Prentice - Hall , 1987.
- [2] J.Niezenanski “ Maximum pulse-position and counting errors of binary rate multipliers” Pro. IEE , Vol. 136, Pt.E, No.4, July 1989, pp 296-305.
- [3] A.E. Fitzgerald ,C.Kingsley and S.D.Umans,Electrical Machinery, 5th ed. McGraw - Hill Singapore, 1992.
- [4] P.C.SEN., Principles of Electrical Machines and Power Electronics , 2 nd ed., John Wiley & Sons, Inc. New York 1994.
- [5] Barry N. and M^c Quade E., “ Temperature Control using integer - Cycle Binary Rate Modulation of the ac. Mains ” Proc IEEE Conf. Ind. Application Society,Houston, pp. 1793-1798, 1992
- [6] Syed A. Nasar , Electric Machines and Power Systems Volume I , Electric Machines , McGraw – Hill , Inc. 1995.
- [7] Malhan , Tore M. Undeland , William P. Robbins, Power Electronics , 2 nd ed., John Wiley & sons, Inc. New York 1995.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วิศวกรรมลาดกระบัง

Ladkrabang Engineering Journal

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

วันที่ 18 สิงหาคม 2541

อ้างอิง EJRN 134

เรื่อง **ขอรับการตีพิมพ์บทความในวิศวกรรมลาดกระบัง**

เรียน **คุณเวคิน ปิยรัตน์, นิรัญ โชชัย, วิทยา ทิพย์สุวรรณพร**

บทความเรื่อง

การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นโดยวิธีการมอดูเลชันแบบ

Binary Rate

(Speed Control of DC Separate excited Motor by Binary Rate Modulation Method)

ตามที่ท่านได้ส่งบทความดังกล่าว ได้ผ่านการพิจารณาจากกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว ขณะนี้

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบังกำลังเตรียมการเพื่อตีพิมพ์ในวิศวกรรมลาดกระบัง โดยเร็วที่สุด

จึงเรียนมาเพื่อทราบและขอขอบคุณในการส่งบทความมายังวิศวกรรมลาดกระบัง

ขอแสดงความนับถือ

(ผศ.ดร. สมศักดิ์ ชุมช่วย)

บรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง

เอกสาร เป็นฉบับตีพิมพ์สำหรับการ งานเพื่อ ที่อื่นนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ขอรายละเอียดเพิ่มเติม/แก้ไขโดยส่งคืนภายในวันที่.....เดือน.....เอกสารทุกฉบับ.....ที่มีควรนำไปใช้

การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นโดยวิธีการผสมสัญญาณแบบ Binary Rate Speed Control of DC Separate excited Motor by Binary Rate Modulation Method

เวทิน ปิยรัตน์ วิชา วิทยุสุวรรณพร

ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
นิรยุ โขชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเซ็นทรัลจอร์เจีย

บทคัดย่อ

บทความนี้ขอเสนอการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีการ Binary Rate Modulation (BRM) ที่อาศัยการกำหนดสัญญาณไฟฟ้้ากระแสตรง ด้วย Binary rate ขนาด 8 บิต โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ BRM ตามกริยาการควบคุมแบบ PI (Proportional Integral Controller) และมีการจำลองระบบทั้งหมดในรูปแบบสัญญาณไม่ต่อเนื่อง โดยใช้ Root locus วิเคราะห์เสถียรภาพก่อนที่จะออกแบบระบบควบคุม ทำให้ง่ายต่อการพิจารณาผลตอบสนองของระบบ วิธีการควบคุมแบบ BRM สามารถกำหนดการจ่ายกำลังในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้มอเตอร์ได้รับกำลังเพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วที่เหมาะสม และเนื่องจากการควบคุมแบบ BRM นั้นมี Ripple ต่ำกว่า 5% จึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อระบบน้อยมาก นอกจากนี้การควบคุมยังส่งผลให้ตอบสนองกับความเร็วที่กำหนดไว้ได้อย่างรวดเร็วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

Abstract

This paper proposes the technique of DC motor controlling by using binary rate modulation (BRM) method. The 8-bit binary rate is generated by Z-80 and transmitted in order to control the motor speed, which will be selected by PI controller to sense and select the adequate load. The system simulation is based on utilizing discrete signal and root locus to analyse the stability of the system before designing, it will lead to the easiest way to analyse the response of the whole system. The BRM can control the suitable amount supplying power to motor under control effectively. Apart from that BRM can supply the power to the system with low ripple less than 5%. Consequently, it has a less noise disturbance to the system and constant speed with variable load can be achieved.

1. บทนำ

การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น โดยทั่วไปใช้การควบคุมแบบ Pulse width Modulation (PWM) หรือ Pulse Frequency Modulation (PFM) [1] และสำหรับโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นแสดงไว้ดังรูปที่ 1 ในบทความนี้ได้นำเทคนิค BRM [4] มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ ซึ่งข้อดีของเทคนิคการควบคุมแบบ BRM นั้นคือสามารถกำหนดให้มีการกระจายของรูปคลื่นในแต่ละไซเคิลได้อย่างเหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้ผลจากการควบคุมทำให้ Ripple มีค่าต่ำมาก วิธีการควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM เป็นการควบคุมการส่งผ่านกำลังไปยังอาร์เมเจอร์เพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้ได้ตามต้องการ สำหรับทรานเฟอร์ฟังก์ชันของความเร็ว (ω) ต่อแรงดันอาร์เมเจอร์ (V_a) กำหนดได้ตามสมการ (1)

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(R_a + sL_a)(F + sJ_a) + K_b K_m} \quad (1)$$

โดยที่ K_m = ค่าคงที่มอเตอร์ (Motor Constant)

K_b = ค่าคงที่แรงดันต้านกลับ (Back emf Constant)

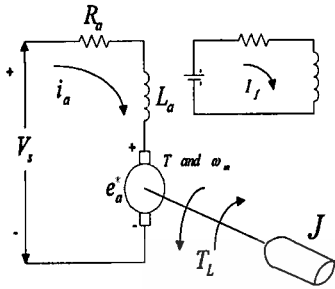
ถ้าสมมติให้แรงเฉื่อยที่โหลดต่ำหรือแรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้ [1] ดังนั้นทรานเฟอร์ฟังก์ชันสามารถเขียนได้ตามสมการ (2)

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_p}{sT_p + 1} \quad (2)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ K_p คือ plant constant ในที่นี้มีค่า = 1

T_p คือ plant time constant และมีค่า = 1.385 วินาที

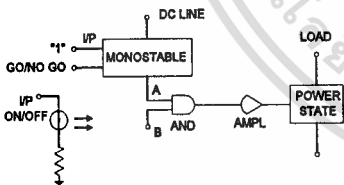


รูปที่ 1 โครงสร้างมอเตอร์กระแสตรงแบบแยกกระตุ้น

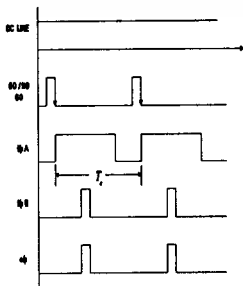
2. ทฤษฎีและหลักการทํางาน

2.1 หลักการผสมสัญญาณ BRM กับไฟฟ้ํากระแสตรง

การผสมสัญญาณ Binary Rate กับสัญญาณไฟฟ้ํากระแสตรงแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นว่าสัญญาณไฟฟ้ํากระแสตรงที่ได้จากวงจรโมโนสเตเบิล ถูกป้อนเข้าที่อินพุต A ของ AND Gate เพื่อกำหนดขอบเขตของคาบเวลา T ในแต่ละช่วงที่มีการผสมสัญญาณ Binary Rate การส่งสัญญาณไฟฟ้ํากระแสตรงเข้าไปยังอินพุต A เกิดขึ้นจากการกำหนดพัลส์ Go และ NO Go ในส่วนของสัญญาณ Binary ที่ได้จากคํวควบคุมจะถูกส่งผ่านเข้าไปยังอินพุต B ของ AND Gate เพื่อผสมกับสัญญาณที่ได้จากอินพุต A ทำให้ได้เอาต์พุตตามที่ต้องการ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 (ก) โครงสร้างพื้นฐานของการผสมสัญญาณ BRM

(ข) รูปคลื่นของการผสมสัญญาณ BRM

จากหลักการผสมสัญญาณ BRM ดังแสดงในรูปที่ 2 นั้นถ้ากำหนดให้มีการส่งรูปคลื่นเป็นจำนวน B พัลส์ ดังนั้นรูปคลื่นที่ส่งออกไปคำนวณได้จากสมการ (3)

$$B = k_{m-1}2^{m-1} + \dots + k_12^1 + k_02^0 \quad (3)$$

โดยที่ B = จำนวนพัลส์ที่ส่ง

m คือ จำนวนบิต

k_{m-1}, \dots, k_1, k_0 คือ ไบนารีบิตของ B

ถ้ากำหนดให้ 2^m คือ ผลรวมของจำนวนพัลส์ต่อไซเคิล และ R คือ ค่าพลังงานในแต่ละพัลส์ของคาบเวลา T เมื่อ $T_c = (2^m \times T)$ คือ cycle time ดังนั้นกำลังไฟฟ้ําเฉลี่ยกำหนดได้ดังสมการ (4)

$$P = \frac{BR}{T_c} = R \left[k_{m-1} \frac{f}{2} + \dots + k_1 \frac{f}{2^{m-1}} + k_0 \frac{f}{2^m} \right] \quad (4)$$

โดยที่ $f = \frac{1}{T}$ และจะสังเกตเห็นได้ว่าการส่งพัลส์ที่มีความถี่ $\frac{f}{2}, \frac{f}{2^2}, \dots, \frac{f}{2^m}$

ขึ้นอยู่กับจำนวน binary บิตของพัลส์ B

จากสมการ (4) เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างรูปแบบ BRM จึงกำหนดให้มีการกระจายของรูปแบบ BRM ให้ได้พลังงานเฉลี่ยสูงสุดในทุกๆ รูปแบบตามช่วงเวลา T_c ด้วยการกำหนดความถี่หลักเป็น Linear independent waveforms ดังนั้นคือ $f_1, f_2, f_4, f_8, f_{16}, f_{32}, f_{64}$ และ f_{128} ที่อิสระต่อกันมากระทำ Linear Combination ตัวอย่างเช่น $f_5 = f_4 + f_1$ (กรณี $m=8$) ดังนั้นรูปคลื่นที่เกิดขึ้นสามารถกำหนดได้ตามสมการ (5)

$$f_{2^a} = M \sum_{b=0}^{2^a-1} \left\{ u \left(t - \left(\frac{2^m}{2^{a+1}} - 1 + b \frac{2^m}{2^a} \right) T \right) - u \left(t - \left(\frac{2^m}{2^{a+1}} + b \frac{2^m}{2^a} \right) T \right) \right\} \quad (5)$$

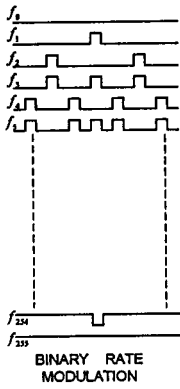
เมื่อ $u(t)$ คือ Unit Step Function

a คือ ค่าของไบนารี ($a=0,1,2,\dots,m-1$)

M คือ ขนาดของความถี่

T คือ pulse time

สำหรับรูปแบบต่างๆ ของพัลส์ที่ได้จากการกำหนดตามรูปแบบ BRM สามารถแสดงดังรูปที่ 3 ($m=8$)

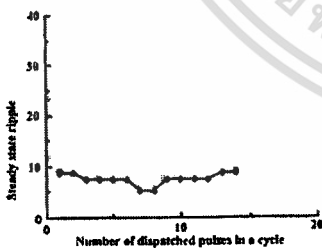


รูปที่ 3 รูปคลื่น BRM (m=8)

ถ้าพิจารณาอินพุตที่เป็นพัลส์ของพลังงานหนึ่งหน่วยต่อไซเคิลที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ด้วยการ on time aT และ off time bT ค่า ripple เอาต์พุตในสถานะคงตัวของความเร็วมอเตอร์กำหนดได้ตามเอกสารอ้างอิง [4] คือ

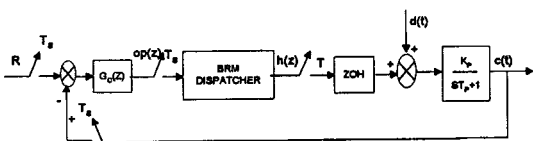
$$ripple = \frac{K_p (1 - e^{-aT/T_p}) (1 - e^{-bT/T_p})}{(1 - e^{-(a+b)T/T_p})} \quad (6)$$

โดยที่ ripple คือ ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของการตอบสนองในสถานะคงตัวต่อ pulse train โดยสมการ (6) นี้จะใช้กับงานวิจัยนี้ได้เพราะเป็นการพิจารณาสัญญาณพัลส์เหมือนกัน ซึ่งผลของ ripple ตามสมการ (6) สามารถนำมาพิจารณาได้โดยการทดลองกำหนดให้อัตราส่วนของ $T/T_p = 0.01$ และ $m = 4$ (15 pulse ต่อไซเคิล) ผลของ ripple ในสถานะคงตัวที่รูปแบบต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4 แต่ถ้ามีการเพิ่ม $m > 4$ อย่างเช่นในงานวิจัยนี้จะใช้ $m = 8$ เมื่อต้องการให้ ripple มีค่าใกล้เคียงรูปที่ 4 นั้น จะต้องให้อัตราส่วนของ $T/T_p < 0.001$



รูปที่ 4 ค่า ripple ที่เอาต์พุต เมื่อ $T/T_p = 0.01$ และ $m = 4$

2.2 โครงสร้างของระบบควบคุม



รูปที่ 5 ระบบควบคุมรูปปิดโดยการส่งสัญญาณ BRM

สำหรับโครงสร้างของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5 ตัวควบคุม $G_c(z)$ เป็นแบบ proportional plus integral โดยกำหนดให้ K_c คือ gain ของตัวควบคุม และ T_i คือ integral time [2] ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของ $G_c(z)$ เขียนได้ดังนี้คือ

$$G_c(z) = K_c \left\{ 1 + \frac{T_s}{T_i} \frac{1}{1-z^{-1}} \right\} \quad (7)$$

เมื่อกำหนดให้ T_s คือ เวลาในการสุ่ม = $(2^m - 1)T$ และจากรูปที่ 5 นั้น ถ้าพิจารณาให้อุปกรณ์ Zero Order Hold (ZOH) ต่อรวมอยู่กับ plant ซึ่งกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของได้ตามสมการ(8)

$$G_{ph}(s) = G_h(s)G_p(s) = K_p \left\{ \frac{1 - e^{-sT_s}}{s(T_p s + 1)} \right\} \quad (8)$$

โดยที่ฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการ(8) เขียนในรูปของ Z-Transform ได้ดังนี้คือ

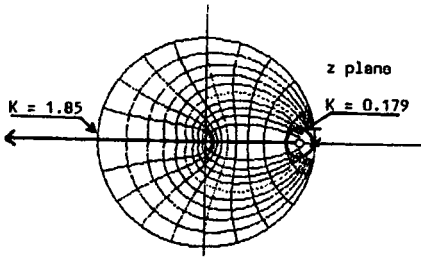
$$G_{ph}(z) = K_p \left\{ \frac{1 - e^{-T_s/T_p}}{z - e^{-T_s/T_p}} \right\} \quad (9)$$

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของระบบควบคุมดังรูปที่ 5 และฟังก์ชันถ่ายโอนในส่วนต่างๆ ของระบบแล้วนั้นสามารถกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบรูปปิดได้ดังสมการ(10) โดยกำหนดให้ BRM dispatcher คือ dc gain (K_d) ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1289 mW/bit

$$G(z) = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{K_d G_c(z) G_{ph}(z)}{1 + K_d G_c(z) G_{ph}(z)} = \frac{K_d K_c K_p \left[\frac{(1 + T_s/T_i)z - 1}{z - 1} \right] \times \left[\frac{1 - e^{-T_s/T_p}}{z - e^{-T_s/T_p}} \right]}{1 + K_d K_c K_p \left[\frac{(1 + T_s/T_i)z - 1}{z - 1} \right] \times \left[\frac{1 - e^{-T_s/T_p}}{z - e^{-T_s/T_p}} \right]} \quad (10)$$

สำหรับสมการ (10) ถ้ากำหนดให้ $x = e^{-T_s/T_p}$ และ $K = K_c K_d K_p (1-x)$ ดังนั้นสมการคุณลักษณะเขียนได้ตามสมการ(11) ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้เทคนิค Root locus ที่กำหนดให้ K อยู่ระหว่าง 0.179 ถึง 1.85 โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้น แสดงดังรูปที่ 6 และเมื่อกำหนดค่า T, T_p, K_p, K_d สำหรับการพล็อต Root locus นั้น ด้วยการเปลี่ยนแปลง T_i ที่ค่าต่างๆ ในการพิจารณาผลการตอบสนองของระบบรูปปิดดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าเมื่อกำหนดค่า gain สูงๆ สำหรับการควบคุมแบบ BRM นั้น จะส่งผลให้สัญญาณบรวนลดลงและผลการตอบสนองในสถานะทำได้อย่างรวดเร็ว

$$(z-1)(z-x) + K\{(1+T_s/T_p)z-1\} = 0 \quad (11)$$



รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ Root locus

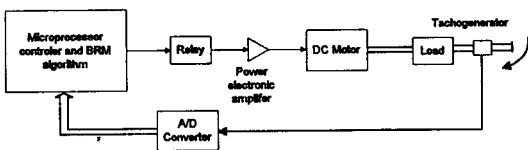
2.3 การออกแบบฮาร์ดแวร์

ในบทความนี้ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ BRM และกำหนดการควบคุมแบบ PI สำหรับรูปที่ 7 แสดงโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของระบบ ซึ่งแต่ละส่วนมีการทำงานดังนี้

- 1) หน่วยประมวลผล และหน่วยควบคุมหลัก ได้แก่ การแสดงผล การรับข้อมูลจากคีย์บอร์ดและรับข้อมูลจากภายนอกเข้ามา เพื่อสร้างสัญญาณ BRM ที่ใช้ในการกำหนดสัญญาณเอาต์พุตและควบคุมการทำงานของมอเตอร์
- 2) A/D converter ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้ไอซี ADC0808 ขนาด 8 บิต ซึ่งรับสัญญาณมาจาก Tachogenerator
- 3) Power electronic amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการผสมสัญญาณ BRM เพื่อส่งไปควบคุมมอเตอร์
- 4) Tachogenerator ทำหน้าที่ตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งผ่านไปยัง A/D converter สำหรับทรานเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุม เขียนได้ดังสมการ(12)

$$op(nT_s) = K_c [e(nT_s) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^n e(iT_s)] \quad (12)$$

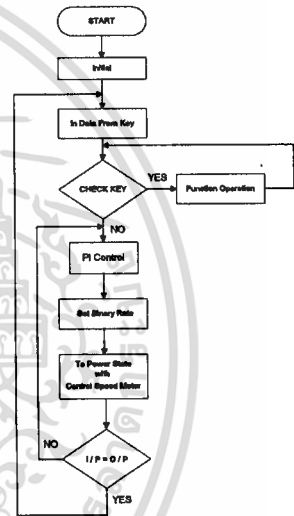
และกำหนดให้ $e(nT_s)$ คือ ค่าผิดพลาดระหว่างความเร็วจริงกับค่าเป้าหมาย



รูปที่ 7 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์

2.4 การออกแบบทางซอฟต์แวร์

การทำงานเริ่มต้นจาก โปรแกรมจะทำ Initial ระบบก่อน เนื่องจากไมโครโปรเซสเซอร์ทำงานได้เร็วกว่าอุปกรณ์ภายนอกจึงต้องมีการหน่วงเวลาเพื่อให้อุปกรณ์ภายนอกได้เตรียมพร้อม หลังจาก Initial ระบบแล้วจะทำการตรวจสอบคีย์เพื่อกำหนดฟังก์ชันการทำงานสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ ถ้ามีการกดคีย์ โปรแกรมจะกระโดดไปทำงานตามฟังก์ชันนั้น ๆ ก่อน แต่ถ้าไม่มีคำสั่งจากคีย์โปรแกรมจะทำการกำหนดการส่งสัญญาณ BRM โดยกระบวนการควบคุมแบบ PI ทำให้ได้สัญญาณควบคุมส่งไปยังชุด Power stage จากนั้นจะทำการตรวจสอบค่าความเร็วอินพุตที่กำหนดไว้กับความเร็วเอาต์พุตของมอเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ซึ่งถ้ามีค่าเท่ากันจะทำการขั้นตอนต่อไปดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภาพการทำงานในการกำหนดค่า BRM สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์

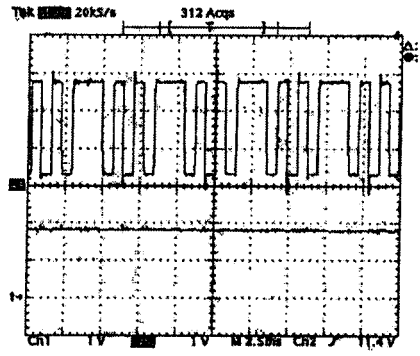
3.ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้นำเอาหลักการของ BRM ที่ได้ออกแบบตามทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ไปควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 220 โวลต์ 330 วัตต์ 3000 รอบต่อนาที ที่ Tachogenerator มีค่าเอาต์พุต 1 โวลต์ ต่อความเร็วอินพุต 1000 รอบต่อนาที เมื่อต้องการกำหนดรูปแบบของพัลส์ BRM ที่เหมาะสม แล้วส่งไปควบคุมความเร็วรอบทั้งหมด 256 รูปแบบ (255 สเต็ปความเร็ว) นั้น จะต้องมีจำนวนค่าพารามิเตอร์ K_c และ T_i ของตัวควบคุมตามหลักการ Ziegler Nichols Tuning ด้วยวิธี Ultimate [3] โดยกำหนดให้ $K_p = 1$, $T_p = 1.385$ วินาที และ $T_s = 0.15$ วินาที และกำหนด set point ไว้ที่ความเร็วตามที่ต้องการ โดยการควบคุม นั้น จะเริ่มส่งสัญญาณควบคุมจากค่าสุด f_0 ไปจนถึงสัญญาณควบคุมสูงสุด f_{255} ตามการคำนวณของตัวควบคุมในขณะทดสอบแบบรูปปิด

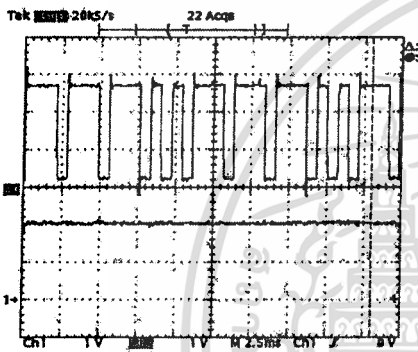
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ผลการทดสอบแบบรูปเปิด

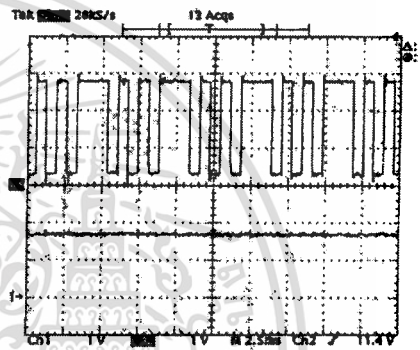
ผลการทดสอบระบบควบคุมที่แสดงให้เห็นนั้น เป็นการเลือกตั้งสัญญาณ BRM รูปแบบที่ 160 ไปควบคุมมอเตอร์ ส่งผลทำให้มอเตอร์มีความเร็วเท่ากับ 2000 รอบต่อนาที ขณะไร้โหลดแสดงได้ดังรูปที่ 9 จากนั้นจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ ในระดับต่างๆ สังเกตผลการตอบสนองดังรูปที่ 10 เพื่อต้องการดูผลตอบสนองของรูปแบบ BRM กับแรงดันเอาต์พุตที่ Tachogenerator ว่าเหมือนกับรูปที่ 9 หรือไม่ จะเห็นว่าแรงดันที่ได้จาก Tachogenerator ขณะเพิ่มโหลคนั้นแรงดันจะลดลงเหลือค่าต่ำสุดเมื่อเพิ่มโหลดสูงสุด โดยจากรูปที่ 9 ถึง 12 นั้น Ch1 แสดงสัญญาณ BRM ส่วน Ch 2 แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ได้จาก Tachogenerator



แกนตั้ง : แรงดัน (v) แกนนอน : เวลา (s)
(ข) ขั้ว โหลด 0.3 N-m



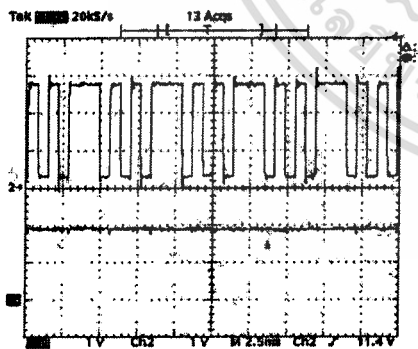
แกนตั้ง : แรงดัน (v) แกนนอน : เวลา (s)



แกนตั้ง : แรงดัน (v) แกนนอน : เวลา (s)
(ค) ขั้ว โหลด 0.6 N-m

รูปที่ 9 ผลการทดสอบแบบรูปเปิด ขณะไร้โหลด ด้านบนสัญญาณ BRM และด้านล่างผลการตอบสนองของความเร็ว

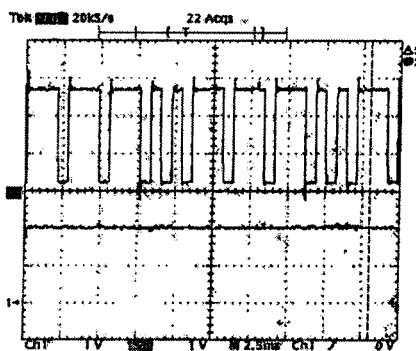
รูปที่ 10 ผลการทดสอบแบบรูปเปิด ด้านบนแสดงสัญญาณ BRM และด้านล่างแสดงผลการตอบสนองของความเร็ว



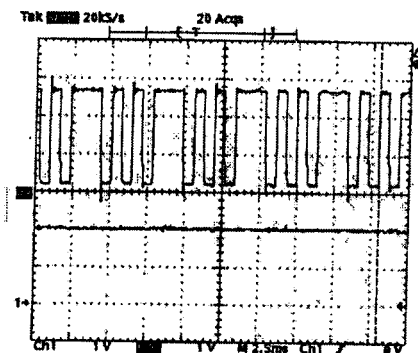
แกนตั้ง : แรงดัน (v) แกนนอน : เวลา (s)
(ง) ขั้ว โหลด 0.1 N-m

3.2 ผลการทดสอบแบบรูปปิด

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบรูปเปิดและระบบรูปปิด ได้อย่างชัดเจน จึงกำหนดค่า set point ไว้ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที ดังนั้นจึงต้องมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ K_c และ T_i ที่เหมาะสมกับการควบคุมความเร็วตามต้องการ ซึ่งจะมีค่า $K_c = 4.5$ และ $T_i = 0.02$ วินาที สำหรับการทดสอบในระบบรูปปิด จากนั้นทดสอบระบบควบคุม ทั้งในขณะไร้โหลดและขณะจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ รูปที่ 11 และรูปที่ 12 คือผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวข้างต้น



แกนนตั้ง : แรงดัน (v) แกนนอน : เวลา (s)

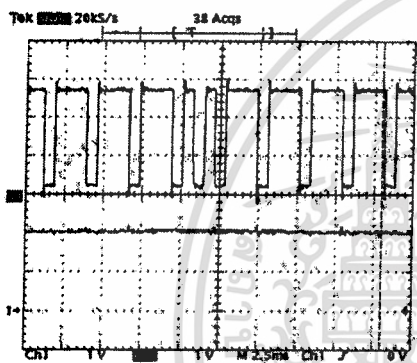


แกนนตั้ง : แรงดัน (v) แกนนอน : เวลา (s)

(ค) ขั้ว โหลด 0.6 N-m

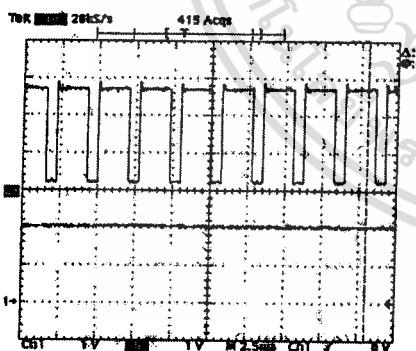
รูปที่ 11 ผลการทดสอบแบบรูปปิด ขณะไว้โหลด ด้านบนสัญญาณ BRM และด้านล่างผลการตอบสนองของความเร็ว

รูปที่ 12 ผลการทดสอบแบบรูปปิด ด้านบนสัญญาณ BRM และด้านล่างผลการตอบสนองของความเร็ว



แกนนตั้ง : แรงดัน (v) แกนนอน : เวลา (s)

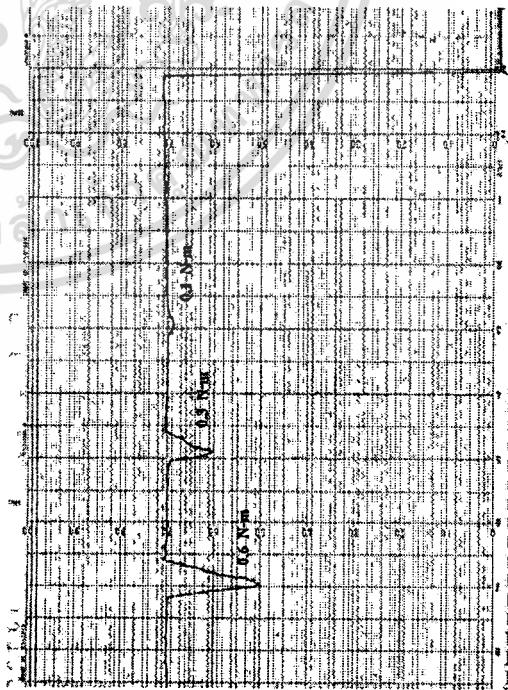
(ก) ขั้ว โหลด 0.1 N-m



แกนนตั้ง : แรงดัน (v) แกนนอน : เวลา (s)

(ข) ขั้ว โหลด 0.3 N-m

จากนั้นลองกำหนดความเร็วรอบที่ต้องการเป็น 1400 รอบต่อนาที ทำให้ต้องไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ K_c และ T_i ใหม่โดยมีค่า $K_c = 2.5$ และ $T_i = 0.4$ วินาที โดยเริ่มการควบคุมจากสภาวะ 0 ถึง 1400 รอบต่อ นาที จะได้ผลตอบสนองที่สภาวะเริ่มต้นนั้นได้อย่างรวดเร็วก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน จากนั้นลองเพิ่มโหลดที่ค่าต่างๆ ผลที่ได้นั้นก็ยิ่งให้ผลตอบสนองของเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วตามค่าความเร็วที่ต้องการ แสดงผลได้ดังรูปที่ 13 โดยกำหนด Chart Speed 60000 มม./ชม. อินพุต 0 ถึง 2 โวลต์ เอาต์พุต 0 ถึง 2000 รอบต่อนาที (0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 13 การควบคุมความเร็วที่ 1400 รอบต่อนาที

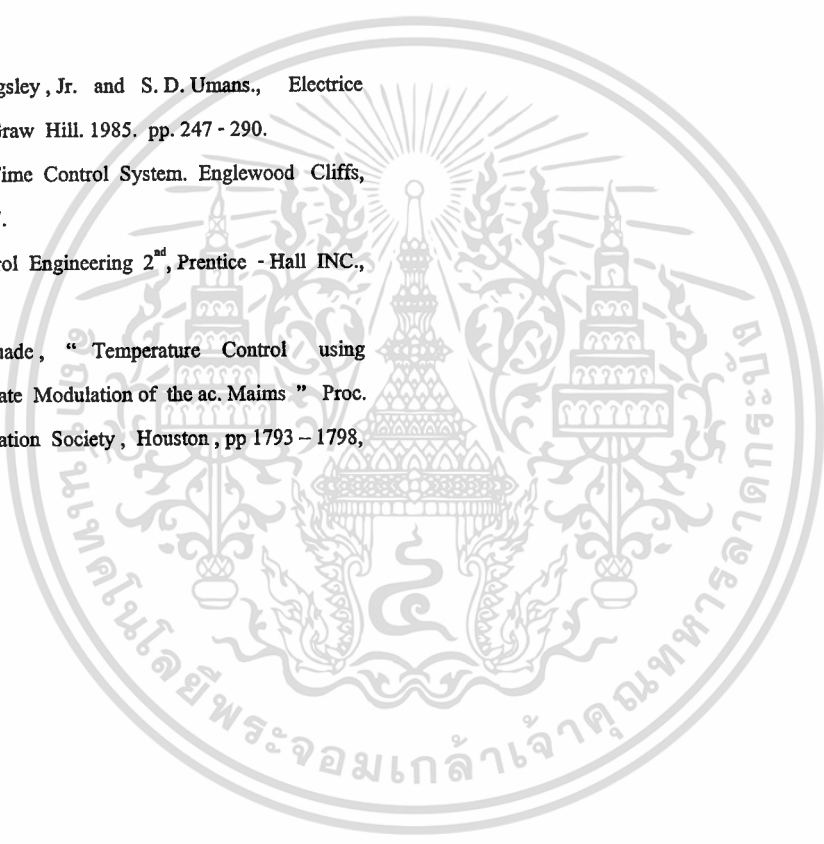
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การพิจารณาโหลดที่ค่าต่างๆ โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.สรุป

วิธีการควบคุมแบบ BRM ในการส่งผ่านกำลังไปยังอาร์เมเจอร์เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้น จะเห็นได้ว่าวิธีการควบคุมแบบ BRM ส่งผลทำให้ความเร็วของมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง และไม่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อระบบเพราะมี Ripple ต่ำกว่า 5% ($T / T_p = 0.0004$) นอกจากนี้วิธีการควบคุมแบบ BRM สามารถทำการปรับ Circle Criterion ในคิติดอลรูปด้วยการพิจารณาค่า K ที่อยู่ระหว่าง 0.179 ถึง 1.85 ได้อย่างสะดวก แล้วนำไปคำนวณหา K_c เพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้ตามต้องการอีกด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.E Fitzgerald , C. Kingsley, Jr. and S. D. Umans., Electric Machinery 4th Ed. M^c Graw Hill. 1985. pp. 247 - 290.
- [2] K. Ogata , Discrete - Time Control System. Englewood Cliffs, NJ: Prentice - Hall, 1987.
- [3] K. Ogata , Modern Control Engineering 2nd, Prentice - Hall INC., pp 598 , 1990.
- [4] N. Barry and E. McQuade, " Temperature Control using integer - cycle Binary Rate Modulation of the ac. Mains " Proc. IEEE Conf. Ind. Application Society , Houston , pp 1793 -- 1798, 1992.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมส่วนที่ 1

```
*****
;
```

```
;BRM SOFTWARE
```

```
*****
;
```

```
;WAKHIN PIYARAT
```

```
;KMITL
```

```
;FACULTY OF ENGINEERING.
```

```
*****
;
```

```
; ***** VARIABLE SET *****
```

```
DS 8
```

```
STACK: DS 24
```

```
FLAG BIT 20H
```

```
ORG 0000H
```

```
JMP START_PROGRAM
```

```
ORG 0023H
```

```
JMP SERIAL
```

```
*****
;
```

```
START_PROGRAM:
```

```
MOV SP,#STACK
```

```

MOV  SCON,#52H
      MOV  TMOD,#20H
      MOV  TH1,#0FDH
      SETB TR1

      SETB EA
      SETB ES
      CLR  FLAG.0

```

```

WAIT: JBC  FLAG.0,START ;JUMP START TO BRM METHOD
      JMP  WAIT

```

```

;*****
;

```

```

;INTERRUPT ROUTINE

```

```

;*****
;

```

```

SERIAL: JNB  RI,TI_CHECK
      PUSH ACC
      MOV  A,SBUF
      MOV  R7,A
      CLR  RI
      SETB FLAG.0
      POP  ACC
      JMP  E_INT

```

```

TI_CHECK:

```

```

      MOV  SBUF,A
      CLR  TI

```

```

E_INT: RETI

```

```

;----- MAIN BRM -----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

START: MOV  A,R7
        MOV  R0,#0FFH

        MOV  R1,A
        MOV  DPTR,#TABLE

```

```

LOOP1: MOV  A,#00
        MOVC A,@A+DPTR
        ANL  A,R1
        JNZ  OUTPUT ;SEND 1
        MOV  A,#00H ;SEND 0
        MOV  P1,A

```

```

CONTINUE:
        ACALL DELAY
        INC  DPTR
        DJNZ R0,LOOP1
        JMP  START

```

```

OUTPUT:
        MOV  A,#80H
        MOV  P1,A
        JMP  CONTINUE

```

```

DELAY: MOV  R5,#1H

```

```

DLY: MOV  R6,#89H

```

```

        DJNZ R6,$

```

```

        DJNZ R5,DLY

```

```

        RET

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE: DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H

DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,08H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,04H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,08H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,02H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,08H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,04H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,08H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,01H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,08H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,04H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,08H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,02H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,08H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
 DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,04H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H

DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,08H

DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H

DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H

END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมส่วนที่ 2

```

;*****
;
;PI CONTROL SOFTWARE
;*****
;WAKHIN PIYARAT
;KMITL
;FACULTY OF ENGINEERING.
;*****

;***** DEFINE VARIABLE IN INTERNAL MEMORY *****

DV EQU 8100H ;ADDRESS FOR STORE DATA DV
DE EQU 8110H ;ADDRESS FOR STORE DATA DE RESULT
KI EQU 0002H ;GAIN CONSTANT
POUT0 EQU 0050H ;OUTPUT WITH NO ERROR (BRM 80)
SUM EQU 50H ;ADDRESS
DT EQU 02H

PORT_A EQU 0FC00H ;8255/1
PORT_B EQU 0FC01H
PORT_C EQU 0FC02H
CTRL_P EQU 0FC03H

FLAG BIT 2FH ;FLAG FOR USER
DSP_RCV EQU 28H

;***** USE FOR CONTROL MAX192 A/D CONVERTER *****

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CSBIT EQU P1.0 ;CHIP SELECT
SCLKBT EQU P1.1 ;SERIAL CLOCK
DINBIT EQU P1.2 ;DATA IN
DOUTBT EQU P1.3 ;DATA OUT

ADCBUF EQU 20H ;ADC BUFFER (2 BYTES)
TB1BUF EQU 24H ;TABEL1 BUFFER (1 BYTE)

```

```

,*****
,

```

```

DS 8
STACK: DS 24

```

```

,*****
,

```

```

ORG 0000H
JMP START
;ORG 0023H
;JMP SERIAL

```

```

,*****
,

```

```

START: CALL DELAY ;INIT SYSTEM
MOV SP,#STACK

MOV DPTR,#CTRL_P
MOV A,#80H ;8255/1 USE
MOVX @DPTR,A ;ALL PORT ARE OUTPUT

MOV SCON,#52H
MOV TMOD,#20H
MOV TH1,#0FDH
SETB TR1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SETB  EA
MOV   R0,#SUM
MOV   @R0,#00 ;INITIAL FIRST VALUE OF SUM
SETB  ES
MOV   DSP_RCV,#2 ;TOTAL RECIVE BYTE = 2 BYTE (DSP)
CLR   FLAG.0

```

```

WAIT: JBC  FLAG.0,MAIN ;CHECK FOR RECIVE DSP TWO BYTE

```

```

    JMP  WAIT

```

```

;*****
;

```

```

;INTERRUPT SERIAL

```

```

;*****
;

```

```

SERIAL: JNB  RI,#TI_CHECK
        PUSH ACC
        PUSH DPL
        PUSH DPH
        MOV  A,SBUF
        MOV  DPTR,#8000H
        MOVX @DPTR,A
        INC  DPTR
        CLR  RI
        DJNZ DSP_RCV,E_INT
        SETB FLAG.0
        MOV  DSP_RCV,#2 ;RESTORE...

        JMP  END_INT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TI_CHECK:

MOV SBUF,A

CLR TI

END_INT:

POP DPH

POP DPL

POP ACC

E_INT: RETI

,

MAIN:

MOV DSP_RCV+0,#01H

MOV DSP_RCV+1,#0F4H

MOV R2,DSP_RCV+0

MOV R3,DSP_RCV+1

PUSH 02

PUSH 03

CALL ATOD ;RECIVE DV

POP 03

POP 02

MOV DPTR,#DV+0

MOVX A,@DPTR

MOV R0,A ;STORE DV BYTE HIGH TO R0

INC DPTR

MOVX A,@DPTR

MOV R1,A ;STORE DV BYTE LOW TO R1

CALL DE_RESULT ;DE=DSP-DV OUT R4-R5

CALL .SUMERROR ;SUM=SUM+DE OUT SUM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV  A,@R0
MOV  R4,A
MOV  R3,#KI  ;INPUT GAIN KI
MOV  R5,#DT
CALL PI_OUT  ;PI=KI*DT*SUM OUT R0

```

```

MOV  DPTR,#PORT_A
MOV  A,R0    ;SEND TO BRM
MOVX @DPTR,A
;CONNECT TO BRM SUBROUTINE

CALL BRM    ;INPUT =A

MOV  R5,#DT  ;TIME IS UP?
DJNZ R5,$    ;YES GOTO MAIN
JMP  MAIN

```

```

,*****
,

```

```

;DE CALCULATE SUBROUTINE DE=DSP-DV
;INPUT = R2-R3 ;DSP BYTE HIGH-LOW
;    R0-R1 ;DV BYTE HIGH-LOW
;OUTPUT= R4-R5 ;DE BYTE HIGH-LOW

```

```

,*****
,

```

```

DE_RESULT:

```

```

    CALL CHECK    ;CHECK FOR DSP-DV
    RET

```

```

CHECK: MOV  A,R3    ;CHECK BYTE LOW

```

```

    CLR  C

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SUBB A,R1
JC CHANGE_L
L: MOV A,R2 ;CHECK BYTE HIGH
CLR C
SUBB A,R0
JC CHANGE_H
H: RET ;RETURN TO DE_RESULT

```

```
CHANGE_L:
```

```

MOV A,R1
CLR C
SUBB A,R3
MOV R5,A ;OUTPUT BYTE LOW
JMP L

```

```
CHANGE_H:
```

```

MOV A,R0
CLR C
SUBB A,R2
MOV R4,A ;OUTPUT BYTE HIGH
JMP H

```

```
,*****
```

```
;SUM SUBROUTINE SUM=SUM+DE
```

```
;INPUT=R5
```

```
;OUTPUT=R4
```

```
,*****
```

```
SUMERROR:
```

```
MOV R0,#SUM
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV  A,@R0
ADD  A,R5
MOV  @R0,A
RET

```

```

;*****
;

```

```

;PI OUTPUT SUBROUTINE

```

```

;PI=KI*DT*SUM

```

```

;INPUT=R4 ;SUM

```

```

; R3 ;KI

```

```

; R5 ;DT

```

```

;OUTPUT=R0 ;PI OUTPUT

```

```

;*****
;

```

```

PI_OUT: MOV  A,R3

```

```

MOV  B,R4

```

```

MUL  AB

```

```

MOV  R3,A

```

```

MOV  A,R5

```

```

MOV  B,R3

```

```

MUL  AB

```

```

MOV  R0,A

```

```

RET

```

```

;*****
;

```

```

;DELAY SUBROUTINE

```

```

;*****
;

```

```

DELAY: MOV  R0,#50H

```

```

DLY:  MOV  R1,#0

```

```

DJNZ R1,$

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
DJNZ R0,DLY
```

```
RET
```

```
*****
;
```

```
;A/D CONVERTER SUBROUTINE
```

```
*****
;
```

```
; I/O PORT    MAX192    MICRO
```

```
;          =====
```

```
;          PIN-18 CS\ --- PIN-1 P1.0
```

```
;          PIN-19 SCLK --- PIN-2 P1.1
```

```
;          PIN-17 DIN  --- PIN-3 P1.2
```

```
;          PIN-15 DOUT --- PIN-4 P1.3
```

```
*****
;
```

```
;OUT BYTE HIGH = ADCBUF+0
```

```
;OUT BYTE LOW  = ADCBUF+1
```

```
*****
;
```

```
ATOD: SETB  CSBIT    ;SET CS\
```

```
      CLR  SCLKBT    ;CLEAR SCLK
```

```
MAIN_CH0:
```

```
      MOV  TB1BUF,#10001111B ;SEL CH0
```

```
MAIN1: CALL TB1        ;TRANSMIT TB1
```

```
      CALL D10B        ;10 BITS
```

```
      MOV  A,ADCBUF+0   ;STORE DATA TO DV ADDRESS
```

```
      MOV  DPTR,#DV
```

```
      MOVX @DPTR,A
```

```
      MOV  A,ADCBUF+1
```

```
      MOV  DPTR,#DV+1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MOVX @DPTR,A
```

```
RET
```

```
; ***** TB1 SUB *****
```

```
; TRANSMIT TB1 (1XXXXX11B)
```

```
; IN = TB1BUF
```

```
; OUT = NONE
```

```
; REG = A,R2,R3
```

```
TB1: CLR CSBIT ;CLEAR CS
```

```
MOV R2,#8 ;8 SCLK
```

```
MOV A,TB1BUF
```

```
TB11: RLC A
```

```
MOV DINBIT,C ;OUT TO DIN
```

```
SETB SCLKBT ;SET SCLK (CLK = 0.1536 MHZ)
```

```
MOV R3,#1 ;COMPENSATE FOR DUTY CYCLE 45%-55%
```

```
DJNZ R3,$
```

```
NOP
```

```
CLR SCLKBT ;CLEAR SCLK
```

```
DJNZ R2,TB11
```

```
RET
```

```
; ***** D10B SUB *****
```

```
; DATA 10 BITS (XXXXXXXXXXB)
```

```
; IN = NONE
```

```
; OUT = ADCBUF+0 (000000XXB) HIGH BYTE
```

```
; ADCBUF+1 (XXXXXXXXXB) LOW BYTE
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
; REG = A,R4
```

```
D10B: CALL RB2X
```

```
RL A
```

```
RL A
```

```
MOV R4,A
```

```
ANL A,#00000011B
```

```
MOV ADCBUF+0,A
```

```
CALL RB3X
```

```
RL A
```

```
RL A
```

```
ORL A,#11111100B
```

```
ANL A,R4
```

```
MOV ADCBUF+1,A
```

```
RET
```

```
; ***** RB2X SUB *****
```

```
; RECEIVE BYTE RB2
```

```
; IN = NONE
```

```
; OUT = A
```

```
; REG = A,R2,R3
```

```
RB2X: NOP
```

```
NOP
```

```
NOP
```

```
NOP
```

```
NOP
```

```
MOV R2,#8 ;8 SCLK
```

```
CLR A
```

```
RB2X1: SETB SCLKBT ;SET SCLK (CLK = 0.1536 MHZ)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV R3,#1 ;COMPENSATE FOR DUTY CYCLE 45%-55%
DJNZ R3,$
NOP
CLR SCLKBT ;CLEAR SCLK
SETB DOUTBT ;SET DOUTBT=INPUT
MOV C,DOUTBT ;DATA IN
RLC A
DJNZ R2,RB2X1
RET

```

```

;***** RB3X SUB *****

```

```

; RECEIVE BYTE RB3

```

```

; IN = NONE

```

```

; OUT = A

```

```

; REG = A,R2,R3

```

```

RB3X: MOV R2,#8 ;8 SCLK

```

```

CLR A

```

```

RB3X1: SETB SCLKBT ;SET SCLK (CLK = 0.1536 MHZ)

```

```

MOV R3,#1 ;COMPENSATE FOR DUTY CYCLE 45%-55%

```

```

DJNZ R3,$

```

```

NOP

```

```

CLR SCLKBT ;CLEAR SCLK

```

```

SETB DOUTBT ;SET DOUTBT=INPUT

```

```

MOV C,DOUTBT ;DATA IN

```

```

RLC A

```

```

DJNZ R2,RB3X1

```

```

SETB CSBIT ;SET CS\

```

```

RET

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายเวทิน ปิยรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 28 เมษายน 2514 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2538 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้