

การควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนาม
แยกครึ่งแบบ 4 ควอดรันตที่ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ PWM

4 QUADRANT CONTROL DC SEPARATE EXCITED MOTOR DRIVE
USING PWM TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-241-6

การควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนาม
แยกกระตุ้นแบบ 4 ควอดแรนต์ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM

4 QUADRANT CONTROL DC SEPARATE EXCITED MOTOR DRIVE
USING BRM TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

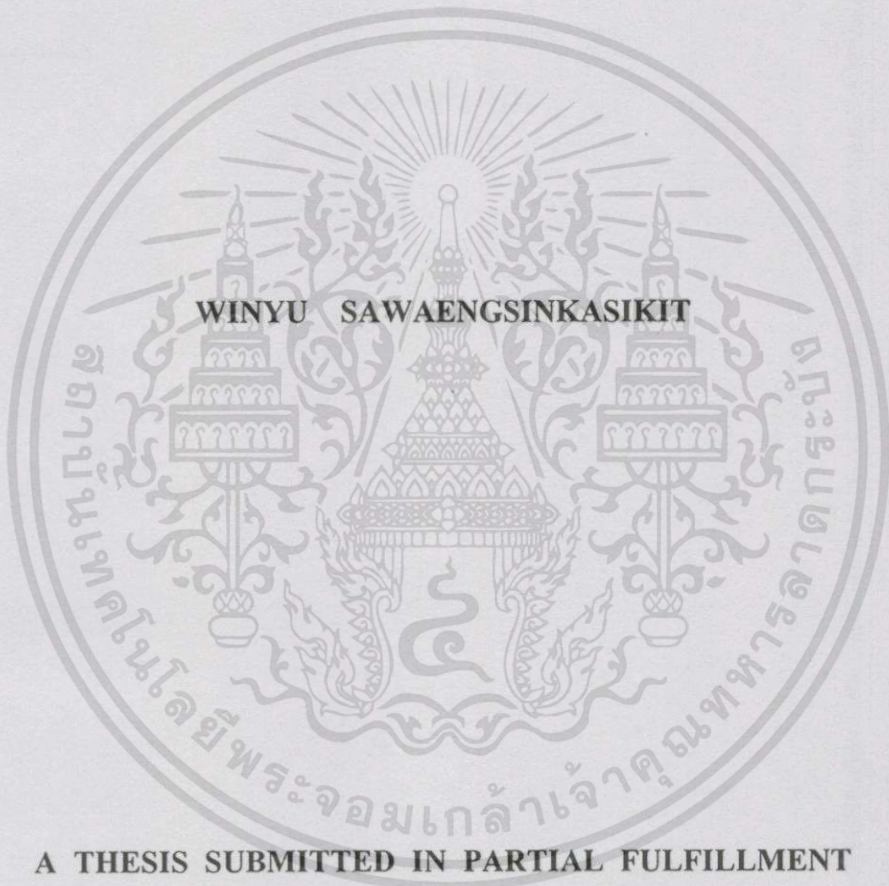
ISBN 974-648-241-6

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 39998
วัน, เดือน, ปี 20.00.2544

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้หาไปใช้ประโยชน์ตามการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4 QUADRANT CONTROL DC SEPARATE EXCITED MOTOR DRIVE
USING BRM TECHNIQUE**



**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**

2001

ISBN 974-648-241-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

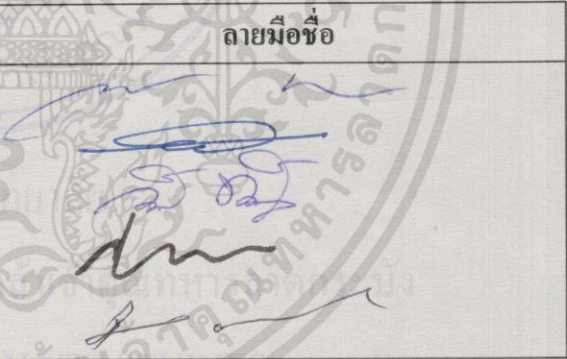
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนาม
แยกกระตุ้นแบบ 4 ควอดแรนต์ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM
4 QUADRANT CONTROL DC SEPARATE EXCITED MOTOR DRIVE
USING BRM TECHNIQUE

ชื่อนักศึกษา นายวิญญู แสงสินกสิกิจ
รหัสประจำตัว 40061077
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.มณฑล ลีลาจินดา ไกรฤกษ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.พิพัฒน์	เลาหงคราม	
ผศ.พิชิต	คำยอง	
รศ.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.ศุที	บรรจงจิตร	
รศ.มณฑล	ลีลาจินดา ไกรฤกษ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 22 พฤษภาคม 2544 เวลา 11.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-402)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัฐชู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 1544...

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนาม
แยกกระตุ้นแบบ 4 ควอดแรนต์ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM
นักศึกษา นายวิญญู แสงสินกสิกิจ
รหัสประจำตัว 40061077
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ. 2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอเสนอการควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้นแบบ 4 ควอดแรนต์ ที่ใช้ตัวควบคุมเป็นแบบ PI (Proportional Integral Controller) ในการเลือกสัญญาณ BRM ขนาด 8 บิต ส่งไปควบคุมมอเตอร์ตามเงื่อนไขของการทำงานแบบ 4 ควอดแรนต์ โดยควอดแรนต์ที่หนึ่ง และควอดแรนต์ที่สาม ควบคุมการทำงานในทิศทางฟอร์เวิร์ดและรีเวิร์ด ให้มีผลการตอบสนองต่อการกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วด้วยเวลาไม่เกิน 1.2 วินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงสูงสุด ส่วนการควบคุมการทำงานของควอดแรนต์ที่สองและควอดแรนต์ที่สี่ เป็นโหมดการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ ซึ่งจะทำให้มอเตอร์ขณะหมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ดและรีเวิร์ด หยุดหมุนทันทีทันใดได้อย่างรวดเร็วด้วยเวลาไม่เกิน 280 มิลลิวินาที และเทคนิคการควบคุมแบบ BRM ยังสามารถแสดงการจ่ายพลังงานในแต่ละรูปแบบ เพื่อส่งผ่านกำลังไปยังอาร์เมเจอร์สำหรับการควบคุมมอเตอร์ได้ โดยที่เทคนิคดังกล่าวนี้ไม่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อระบบ เนื่องจากมีค่า Ripple ต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถปรับ Circle Criterion ในดิจิตอลลูปด้วยการพิจารณาค่าเกณฑ์ เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ ประสิทธิภาพตามการทำงานของมอเตอร์แบบ 4 ควอดแรนต์ อีกด้วย

Thesis Title	4 Quadrant Control DC Separate Excited Motor Drive Using BRM Technique
Student	Mr. Winyu Sawaengsinkasikit
Student ID.	40061077
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Monthon Leelajindakrairerk Assoc. Prof. Vittaya Tipsuwanporn

ABSTRACT

The thesis proposes 4 quadrant controlling system of separate excited direct – current motor with the application of PI (proportional Integral controller) signal processing and feedback control under four quadrant condition are selected from 8 bit BRM (Binary Rate Multiplier). Motor performance in forward and reverse direction is controlled by the 1st and 3rd quadrant of the signal resulting that time requirement to steady state when load has maximum variation is less than 1.2 second, while the remaining 2nd and 4th quadrant are in the regenerative breaking mode which can suddenly stop the motor, both forward and reverse direction, within less than 280 milisecond. The BRM controlling technique also can demonstrate energy distributing in amount patterns to armature for controlling the motor as well. According to this method, interfering signal in the system would not appear due to low ripple occurrence. And also, system stability and efficiency can be generated by suitable adjustment circle criterion in digital loop according the to performance of 4 quadrant motor.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นและสำเร็จลุล่วงได้อย่างดีนี้ด้วยความกรุณาให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาจาก รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์, รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกประทับใจและซาบซึ้งใจในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสอง ที่เปรียบเคียงเช่นบุพการี และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์เวทิน ปิยรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ และให้คำแนะนำ ส่งผลทำให้ข้าพเจ้าเข้าใจในงานวิจัยที่ทำอยู่มากขึ้น

ขอขอบคุณครอบครัวที่อบอุ่น เพื่อนๆทุกคนที่คอยให้การสนับสนุน และให้กำลังใจมาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่สาว รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกท่าน

วิญญู แสงวงสินกสิกิจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 วิธีการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์	2
1.6 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์	3
1.7 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	5
2.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดต่างๆ	5
2.2.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น	5
2.2.1.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน	6
2.2.1.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม	7
2.2.1.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม	10
2.3 คุณลักษณะแรงบิด – ความเร็ว	12
2.3.1 การควบคุมแรงดันที่อาร์มเจอร์	14
2.3.2 การควบคุมสนามแม่เหล็ก	15
2.3.3 การควบคุมความต้านทานอาร์มเจอร์	17
2.4 การวิเคราะห์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น	21
2.4.1.1 พิจารณาสถานะชั่วคราวในวงจรสนาม.....	22
2.4.1.2 พิจารณาทรานเซียนต์ในวงจรอาร์เมเจอร์.....	25
2.4.2 สภาวะไดนามิกส์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น	29
บทที่ 3 การออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น	37
3.1 หลักการพื้นฐานของ BRM	37
3.2 โครงสร้างของระบบควบคุม.....	40
3.2.1 การออกแบบทางฮาร์ดแวร์	42
3.2.2 การออกแบบทางซอฟต์แวร์	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง	50
4.1 ผลการทดลองส่วนที่ 1	52
4.2 ผลการทดลองส่วนที่ 2	55
4.3 ผลการทดลองส่วนที่ 3	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	64
5.1 สรุปผลการทดลอง	64
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก. การเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB	70
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	81
ภาคผนวก ค. โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและควบคุมมอเตอร์	92
ประวัติผู้เขียน.....	136

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 การควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM	61
4.2 การควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ PWM	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แลVIของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลย์มอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น	6
2.2 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน	6
2.3 วงจรสมมูลย์มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม	7
2.4 คุณลักษณะสมบัติ แรงบิด – ความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม	8
2.5 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์แบบผสม	9
2.6 คุณลักษณะสมบัติ แรงบิด - ความเร็ว	12
2.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น	13
2.8 คุณลักษณะแรงบิด- ความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น	13
2.9 การควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	15
2.10 การควบคุมสนามแม่เหล็ก	16
2.11 การควบคุมความต้านทานอาร์เมเจอร์	18
2.12 โครงสร้างการควบคุมมอเตอร์แบบอนุกรม	19
2.13 คุณลักษณะสมบัติ แรงบิด – ความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง	20
2.14 คุณสมบัติแรงบิดและความเร็วเชิงโพลของมอเตอร์กระแสตรง	21
2.15 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น	22
2.16 สภาวะชั่วคราวในวงจรสนาม	24
2.17 สภาวะชั่วคราวในวงจรอาร์เมเจอร์	25
2.18 สภาวะชั่วคราวในวงจรสนามและอาร์เมเจอร์	27
2.19 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น	30
2.20 ผลการตอบสนองในโดเมนเวลาเนื่องจากความเร็วลดลงจากความเร็วเริ่มต้น	35
2.21 ผลตอบสนองลำดับที่สองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	36
3.1 สัญญาณ BRM ขนาด 8 บิต	37
3.2 ค่า ripple ที่เอาต์พุต เมื่อ $T/T_p = 0.01$ และ $m = 4$	39
3.3 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบลูปิด	40
3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ Root Locus	41
3.5 บล็อกไคแกรมการทำงานของระบบ	42
3.6 วงจรขับนำ	43
3.7 ชุดสร้างสัญญาณ BRM และกำหนดการทำงาน 4 ควอดแรนต์	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 ชุดรับส่งข้อมูลสัญญาณ BRM และ Tachogenerator	45
3.9 แผนภาพการทำงานของระบบทั้งหมด	46
3.10 แผนภาพการทำงานของชุดเลือกทิศทางการหมุนของมอเตอร์.....	46
3.11 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมแบบ PI	48
3.12 แผนภาพการสร้างรูปแบบพัลส์ BRM	49
4.1 บล็อกไดแกรมการทดสอบการควบคุมมอเตอร์	50
4.2 การทดสอบควบคุมมอเตอร์	50
4.3 ชุดควบคุมแบบ BRM (ด้านหน้า)	51
4.4 ชุดควบคุมแบบ BRM (ด้านหลัง)	51
4.5 รูปพัลส์ BRM และสัญญาณกระแส BRM รูปแบบที่ 1	52
4.6 รูปพัลส์ BRM และสัญญาณกระแส BRM รูปแบบที่ 2	52
4.7 รูปพัลส์ BRM และสัญญาณกระแส BRM รูปแบบที่ 4	53
4.8 รูปพัลส์ BRM และสัญญาณกระแส BRM รูปแบบที่ 8	53
4.9 รูปพัลส์ BRM และสัญญาณกระแส BRM รูปแบบที่ 16	53
4.10 รูปพัลส์ BRM และสัญญาณกระแส BRM รูปแบบที่ 32	54
4.11 รูปพัลส์ BRM และสัญญาณกระแส BRM รูปแบบที่ 64	54
4.12 รูปพัลส์ BRM และสัญญาณกระแส BRM รูปแบบที่ 128	54
4.13 รูปพัลส์ BRM และสัญญาณกระแส BRM รูปแบบที่ 255	55
4.14 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 1000 รอบต่อนาที ขณะไร้โหลด	55
4.15 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 1500 รอบต่อนาที ขณะไร้โหลด	56
4.16 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 2250 รอบต่อนาที ขณะไร้โหลด	56
4.17 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 1000 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 0.6 นิวตันต่อเมตร	57
4.18 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 1000 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 0.9 นิวตันต่อเมตร	57
4.19 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 1000 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 1.4 นิวตันต่อเมตร	58
4.20 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 1500 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 0.6 นิวตันต่อเมตร	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 1500 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 0.9 นิวตันต่อเมตร	59
4.22 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 1500 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 1.4 นิวตันต่อเมตร	59
4.23 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 2250 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 0.6 นิวตันต่อเมตร	60
4.24 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 2250 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 0.9 นิวตันต่อเมตร	60
4.25 สัญญาณกระแสและความเร็ว ที่ 2250 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 1.4 นิวตันต่อเมตร	61
4.26 การเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	61
5.1 ผลตอบสนองของมอเตอร์ช่วงเวลาสถานะเริ่มหมุน ที่ความเร็ว 2250 รอบ/นาที	65
5.2 ผลตอบสนองของมอเตอร์ช่วงเวลาสถานะหยุดหมุน ที่ความเร็ว 2250 รอบ/นาที	66
5.3 ผลตอบสนองของมอเตอร์ขณะขับโหลด 1.4 N-m. ที่ความเร็ว 2250 รอบ/นาที	67
g1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 1000 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 0.6 นิวตัน - เมตร	71
g2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 1000 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 0.9 นิวตัน - เมตร	72
g3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 1000 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 1.4 นิวตัน - เมตร	73
g4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 1500 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 0.6 นิวตัน - เมตร	74
g5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 1500 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 0.9 นิวตัน - เมตร	75
g6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 1500 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 1.4 นิวตัน - เมตร	76
g7 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 2250 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 0.6 นิวตัน - เมตร	77

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก8 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 2250 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 0.9 นิวตัน - เมตร78	78
ก9 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 2250 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 1.4 นิวตัน - เมตร79	79



บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในงานอุตสาหกรรม ซึ่งการควบคุมมอเตอร์ให้สามารถทำงานตามข้อกำหนดต่างๆที่ผู้ใช้ต้องการเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากปัจจุบันอุตสาหกรรมภายในประเทศได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ผลผลิตที่ออกมาต้องมีคุณภาพ มีกำลังผลิตสูงประหยัดแรงงานและการใช้กำลังงานเพื่อลดต้นทุนในการผลิตโดยวัตถุประสงค์หลักของการควบคุมเพื่อสามารถควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์ได้ต่อเนื่อง เปลี่ยนอัตราเร็วได้รวดเร็ว มีพิสัยของอัตราเร็วตามต้องการ และมีเสถียรภาพที่ดีมีความคงทน ในอดีตระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกสร้างขึ้นมาได้หลายวิธีและหลายรูปแบบ เช่น ระบบควบคุมความเร็วรอบโดยควบคุมปริมาณแรงสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์ ซึ่งระบบควบคุมความเร็วดังกล่าวนั้นขึ้นอยู่กับโหลดทำให้มีการตอบสนองต่อการทำงานช้า มีขนาดใหญ่ และราคาแพง ปัจจุบันนี้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้รับการพัฒนามากขึ้นทำให้เกิดการพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อนำไปใช้ควบคุมกำลังขนาดหลายๆ และเมื่อนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาสร้างเป็นระบบควบคุมมอเตอร์ก็จะทำให้การทำงานของระบบนี้สามารถตอบสนองต่อการทำงานได้เร็วกว่า มีขนาดเล็ก และราคาถูก โดยทั่วไปแล้วนั้นการควบคุมมอเตอร์ดังกล่าวจะใช้เทคนิคการควบคุมแบบเฟสและเทคนิคการควบคุมแบบ PWM สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมแบบ Binary Rate Multiplier (BRM) [1-2] มาควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น แบบ 4 ควอดแรนต์ ที่อาศัยการหยุดมอเตอร์แบบรีเจนเนอเรทีฟเบรก เพื่อให้มีผลการตอบสนองได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ทั้งในสภาวะไว้โหลดและสภาวะขับโหลดที่ค่าต่างๆ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำและมีสมรรถนะในการทำงานสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อวิจัยหาเทคโนโลยีใหม่ๆ สำหรับใช้ควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น แบบ 4 ควอดแรนต์ ให้ผลการตอบสนองได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

1.2.2 เพื่อหาแนวทางการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้นแบบ 4 ควอดแรนต์ ให้มีประสิทธิภาพสูง และมีการประหยัดพลังงาน

1.2.3 เป็นแหล่งข้อมูลและวิจัย เกี่ยวกับเทคโนโลยีทางด้านมอเตอร์แก่นักวิจัย หรือนักศึกษาที่ต้องการพัฒนาและศึกษาต่อไป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 หาวิธีการทำให้การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยก กระตุ้น แบบ 4 ควอดแรนต์ ด้วยเทคนิค BRM มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการควบคุม และ ให้ผลการตอบสนองได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

1.3.2 ควบคุมทิศทางการหมุนและการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟของมอเตอร์แบบ 4 ควอดแรนต์ คือ

ควอดแรนต์ที่ 1 มอเตอร์จะมีทิศทางการหมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ด

ควอดแรนต์ที่ 2 เป็นการเบรกของมอเตอร์ที่หมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ด

ควอดแรนต์ที่ 3 มอเตอร์จะมีทิศทางการหมุนในทิศทางรีเวิร์ส

ควอดแรนต์ที่ 4 เป็นการเบรกของมอเตอร์ที่หมุนในทิศทางรีเวิร์ส

1.3.3 สร้างเครื่องต้นแบบจากหลักการควบคุมแบบ BRM เพื่อใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น แบบ 4 ควอดแรนต์

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าทฤษฎีจากบทความ วารสารต่างๆ เอกสารและตำราทางวิชาการที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับ หลักการ BRM และ การควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการต่างๆ

1.4.2 วิเคราะห์ระบบควบคุมจากสมการทางคณิตศาสตร์และเขียน โปรแกรม เพื่อประมวลผล สำหรับใช้ในการควบคุมมอเตอร์

1.4.3 ออกแบบวงจรที่ใช้ในระบบควบคุมในแต่ละส่วน

1.4.4 ทำการสร้าง และประกอบเป็นชุดควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิด ขดลวดสนามแยกกระตุ้น แบบ 4 ควอดแรนต์ ที่สามารถทดสอบผลได้ตามทฤษฎีที่นำเสนอ

1.4.5 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1.5.1 สามารถนำหลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนามแยก กระตุ้น แบบ 4 ควอดแรนต์ ด้วยเทคนิค BRM มาประยุกต์ใช้ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับชนิดหนึ่งเฟสและสามเฟส

1.5.2 เป็นพื้นฐานในการศึกษาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนาม แยกกระตุ้น แบบ 4 ควอดแรนต์ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นส่วนหนึ่งในการเรียนการสอนในรายวิชาเกี่ยวกับมอเตอร์

1.5.3 สร้างนักวิจัยที่มีขีดความสามารถ ในด้านเทคโนโลยีมอเตอร์ที่เทียบนักวิจัยต่างประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.4 ช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้า เมื่อมีการนำเอา เทคนิคการควบคุมที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นไปใช้ แล้ว นอกจากผู้ใช้งานจะได้รับประโยชน์จากการประหยัดเงินแล้วยังเป็นการสนองนโยบายการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของรัฐบาลอีกด้วย

1.6 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอหลักการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดสนามแยก กระตุ้นแบบ 4 ควอดแรนต์ ที่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบ Binary Rate Multiplier (BRM) โดยควอดแรนต์ที่หนึ่งมอเตอร์มีทิศทางการหมุนแบบฟอร์เวิร์ด ควอดแรนต์ที่สองเป็นการเบรกมอเตอร์แบบรีเจนเนอเรทีฟในทิศทางการหมุนมอเตอร์แบบฟอร์เวิร์ด ควอดแรนต์ที่สามมอเตอร์มีทิศทางการหมุนในทิศทางรีเวิร์ด และควอดแรนต์ที่สี่ เป็นการเบรกของมอเตอร์ที่หมุนในทิศทางรีเวิร์ด โดยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM สามารถควบคุมให้มอเตอร์มีผลการตอบสนองต่อการกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว และใช้เวลาที่น้อยที่สุดทั้งในขณะไร้โหลดและขณะขับโหลดที่ค่าต่างๆ ไม่ว่าจะมอเตอร์จะทำงานในโหมดการหมุนแบบฟอร์เวิร์ดหรือรีเวิร์ดก็ตาม สำหรับการงานในโหมดการเบรกของควอดแรนต์ที่สองและควอดแรนต์ที่สี่นั้น ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM สามารถที่จะเลือกรูปแบบของ BRM เพื่อส่งไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในโหมดนี้โดยทำให้มอเตอร์หยุดหมุนทันทีทันใดได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM ยังสามารถกำหนดรูปแบบของการจ่ายพลังงานได้อย่างเหมาะสม เพื่อส่งผ่านกำลังไปยังอาร์เมเจอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ และเทคนิคดังกล่าวนี้ยังไม่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อระบบเนื่องจากมีค่า Ripple ต่ำ พร้อมกับวิธีการควบคุมแบบ BRM นี้ยังสามารถทำการปรับ Circle Criterion ในดิจิตอลลูด้วยการพิจารณาค่าเกณฑ์ เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพได้ตามต้องการ

1.7 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบวงจรสำหรับควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้นแบบ 4 ควอดแรนต์ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งเป็นบทๆ ได้ดังนี้ คือ

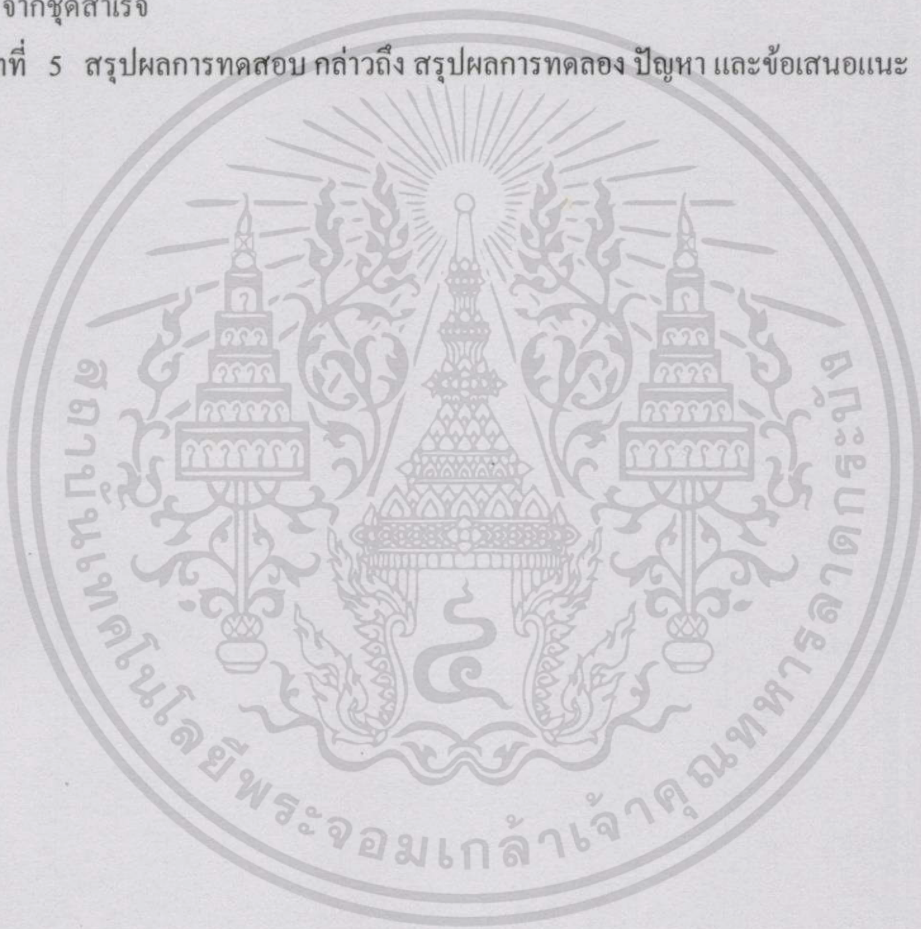
บทที่ 1 บทนำได้กล่าวถึงแนวทางทั่ว ๆ ไปที่นำมาสู่งานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขต วิธีการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย หลักการใหม่ที่ได้นำเสนอ และรายละเอียดในแต่ละบทอย่างคร่าวๆ

บทที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดต่างๆ คุณลักษณะ แรงบิดและความเร็ว การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น โดยอธิบายถึง สภาวะชั่วคราว และสภาวะทางไดนามิกส์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น

บทที่ 3 การออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น หลักการพื้นฐานของ BRM โครงสร้างของระบบควบคุมแบบลูปปิด การออกแบบทางด้าน ฮาร์ดแวร์ และการออกแบบทางด้านซอฟต์แวร์

บทที่ 4 ผลการทดลองในส่วนของสัญญาณ BRM รูปแบบหลัก การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น แบบ 4 ควอดแรนต์ ที่สภาวะไร้อโหลดและที่ป้อนโหลด ค่าต่างๆ ผลของการควบคุมลักษณะสมบัติและสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิด ขดลวดสนามแยกกระตุ้นจากการควบคุมด้วยเทคนิค BRM ที่สร้างขึ้น และการควบคุมด้วยเทคนิค PWM จากชุดสำเร็จ

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ กล่าวถึง สรุปผลการทดลอง ปัญหา และข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อน ซึ่งจุดประสงค์จะใช้มอเตอร์เป็นตัวสร้างแรงบิดและความเร็ว แม้ว่าปัจจุบันจะมีการพัฒนาเทคโนโลยีของชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้มีคุณสมบัติคล้ายมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แต่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็ยังคงมีความสำคัญและยังมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ส่วนใหญ่ถูกใช้งานในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (DC Motor Drive) เช่น การควบคุมแรงบิด และการควบคุมความเร็ว [3-4] เป็นต้น

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นการควบคุมความเร็ว (Speed Regulation :SR) กำหนดเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\%SR = \frac{n_{nl} - n_f}{n_f} \times 100\% \quad (2.1)$$

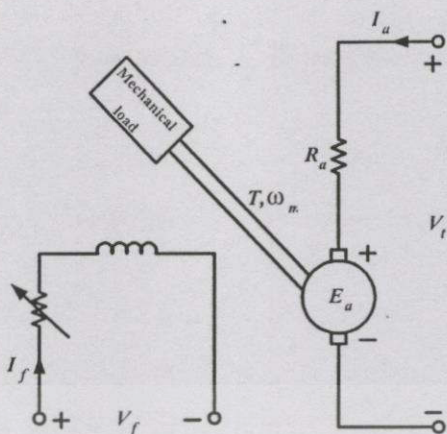
$$\%SR = \frac{\omega_{nl} - \omega_f}{\omega_f} \times 100\% \quad (2.2)$$

จากสมการ(2.1) หรือ(2.2) ถ้า%SR มีค่ามากแสดงว่า ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นขณะโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น

2.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิดหลัก ๆ ได้แก่

2.2.1.1 มอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น (Separately Excited DC Motor)

วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้นแสดงคังรูปที่ 2.1 โดยที่วงจรสนามถูกป้อนแรงดันคงที่



รูปที่ 2.1 แสดงวงจรสมมูลย์มอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น

จากวงจรสมมูลย์ รูปที่ 2.1 เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้ คือ

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} \tag{2.3}$$

$$V_t = E_a + I_a R_a \tag{2.4}$$

และ

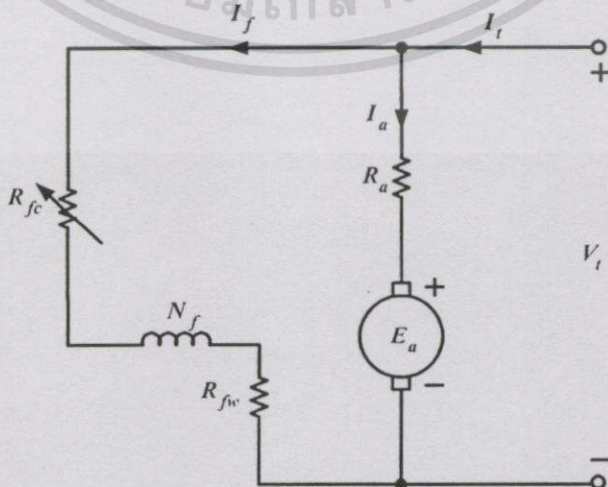
โดยที่ E_a คือ แรงดันต้านกลับ (back emf)

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์

I_L คือ กระแสโหลด

2.2.1.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (Shunt DC Motor)

การกำหนดคุณลักษณะสมมุติทางด้านเอาต์พุตของมอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน เขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้คือ



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (2.5)$$

เมื่อ $E_a = K\phi\omega_m$

ดังนั้น $V_t = K_a\phi\omega_m + I_a R_a \quad (2.6)$

และ $T_e = K_a\phi I_a$ ดังนั้น I_a เขียนได้ดังนี้คือ

$$I_a = \frac{T_e}{K_a\phi} \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.6) และ (2.7)

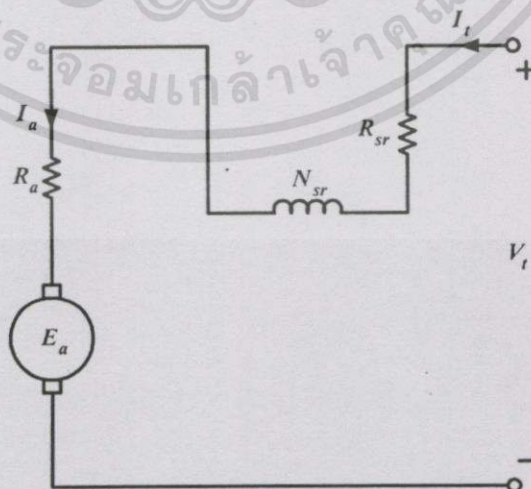
$$V_t = K_a\phi\omega_m + \frac{T_e}{K_a\phi} R_a \quad (2.8)$$

และสมการในการกำหนดค่าความเร็วแสดงได้ดังนี้คือ

$$\omega = \frac{V_t - \frac{R_a}{K_a\phi} T_e}{K_a\phi} \quad (2.9)$$

2.2.1.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (Series DC Motor)

มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมนั้นเมื่อพิจารณาวงจรสมมูล ดังรูปที่ 2.3 กำหนดได้ตามสมการ (2.10)



รูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_t = E_a + I_a (R_a + R_{sr}) \quad (2.10)$$

และสำหรับสมการแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น (T_e) หาได้ดังนี้ คือ

$$T_e = K_a \phi I_a \quad (2.11)$$

เมื่อสมมติให้เส้นแรงในเครื่องจักรกลเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น และกำหนดได้ตามสมการ (2.12)

$$\phi = C I_a \quad (2.12)$$

โดยที่ C คือ อัตราส่วนค่าคงที่

จากสมการ (2.11) และ (2.12) ดังนั้นแรงบิด T_e กำหนดใหม่

$$T_e = K_a \phi I_a = K_a C I_a^2 \quad (2.13)$$

สำหรับคุณลักษณะสมบัติที่ขั้วของมอเตอร์กระแสตรงชนิดขดลวดสนามต่ออนุกรมนั้น การคำนวณเป็นการพิจารณาและวิเคราะห์บนพื้นฐานของเส้นโค้งคุณลักษณะสมบัติการทำแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และผลของการอิ่มตัวในวงจรแม่เหล็กจะพิจารณาจากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ ดังนั้นการหาคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็ว กระทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

จากสมการ

$$I_a = \sqrt{\frac{T_e}{CK}}$$

แทนค่าสมการ I_a ข้างต้นและ $E_a = K_a \phi \omega_m$ ในสมการ (2.14)

$$V_t = K_a \phi \omega_m + \sqrt{\frac{T_e}{CK}} \times (R_a + R_s) \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.13) กำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_a = \left(\frac{\phi}{C} \right)$$

ดังนั้นสมการแรงบิดเขียนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$T_e = \frac{K}{c} \phi^2$$

และเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ ในมอเตอร์กำหนดใหม่ดังนี้ คือ

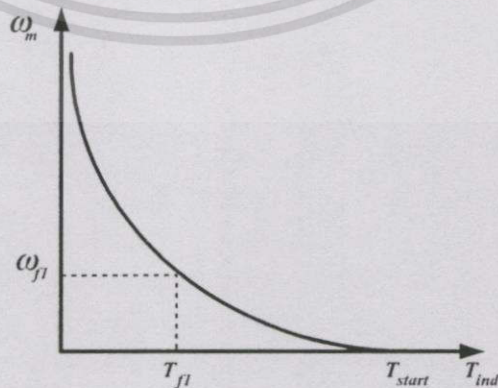
$$\phi = \sqrt{\frac{T_e C}{K}} \tag{2.15}$$

แทนค่าสมการ (2.15) ลงในสมการ (2.14) จะได้

$$V_t = K_a \sqrt{\frac{T_e C}{K}} \omega_m + \sqrt{\frac{T_e}{CK}} \times (R_a + R_s)$$

ดังนั้นสมการความเร็ว ω_m คือ

$$\omega_m = \left[\frac{V_t (R_a + R_s)}{K_a \sqrt{\frac{CT_e}{K}} - CK_a} \right] \tag{2.16}$$

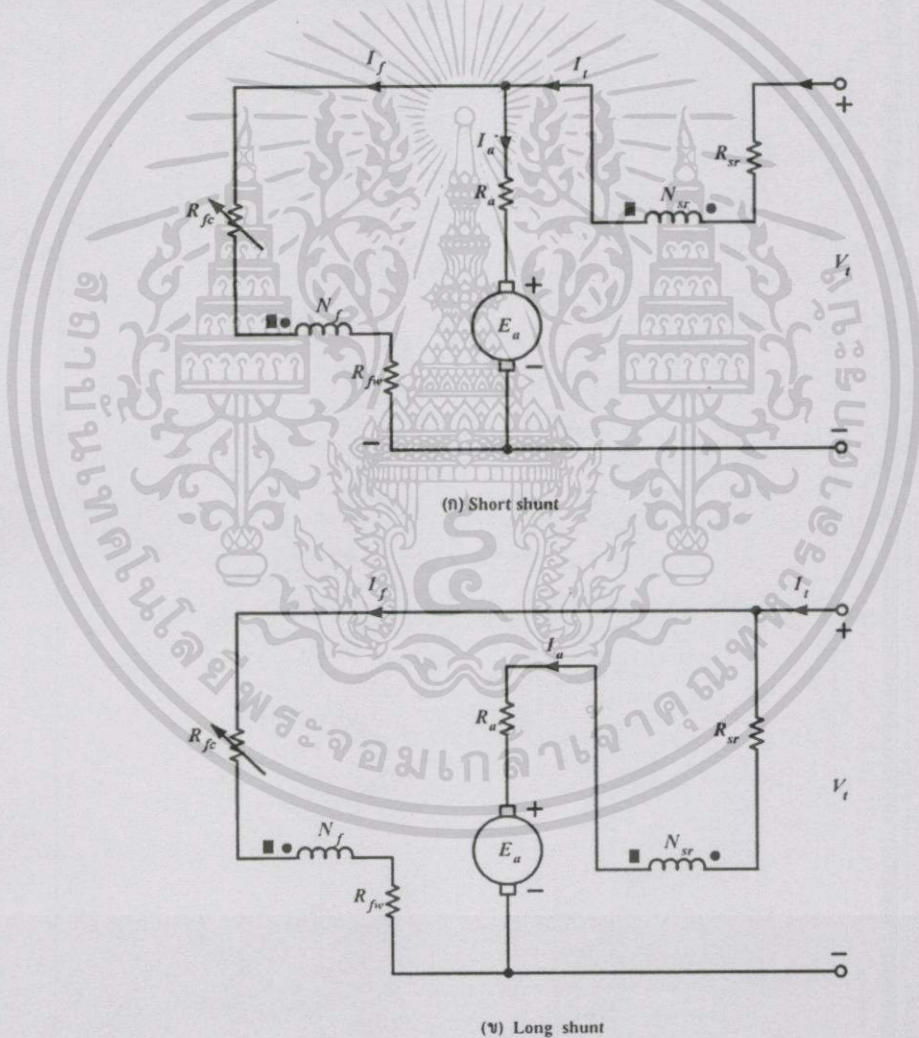


รูปที่ 2.4 แสดงคุณลักษณะสมบัติ แรงบิด - ความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม (Compounded DC Motor)

การต่อมอเตอร์แบบนี้ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กขานานและขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอนุกรมต่อร่วมกัน ดังรูปที่ 2.5 (ก) และ (ข) สำหรับการกำหนดจุด (dot) ที่ขดลวดทั้งสองเหมือนกับ การกำหนดในหม้อแปลง ถ้าพิจารณากระแสที่ไหลผ่าน dot ซึ่งทำให้ค่า mmf เป็นบวก โดยที่การไหลของกระแสผ่านขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กทั้งสองส่งผลให้ค่า mmf เสริมกัน ดังนั้นผลรวมของค่า mmf มีค่าสูงขึ้นซึ่งมอเตอร์จะทำงานเป็น Cumulatively Compounded DC motor และในทางตรงข้ามถ้ากระแสไหลผ่าน dot ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กชุดหนึ่งส่วนขดลวดชุดที่เหลือกระแสไหลอีกทางหนึ่ง (ไม่ไหลเข้า dot) โดยผลลัพธ์ของค่า mmf เนื่องจากขดลวดทั้งสองมีค่าเป็นลบ เรียกมอเตอร์ว่า Differentially Compounded DC Motor



- Cumulatively Compounded
- Differentially Compounded

เอกสารรูปที่ 2.5 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์แบบผสม ซึ่งท่านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสมการแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์กระแสตรงชนิดขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กต่อผสม กำหนดได้ตามสมการ(2.17)

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_s) \tag{2.17}$$

และความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลในมอเตอร์แสดงได้ดังนี้ คือ

$$I_a = I_t - I_f \tag{2.18}$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} \tag{2.19}$$

โดยที่ผลรวมของ mmf และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กประสิทธิผล กำหนดตามสมการ (2.20)

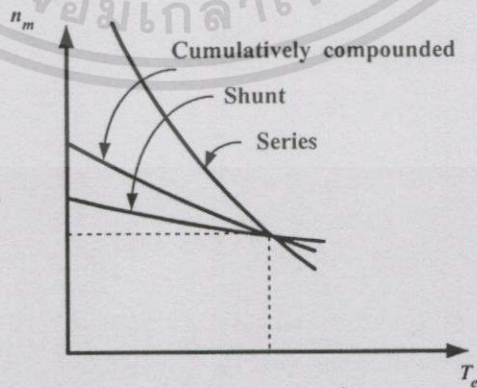
$$F_{net} = F_f \pm F_{sr} - F_{AR} \tag{2.20}$$

และ

$$I_f^* = I_f \pm \frac{N_{sr}}{N_f} I_{sr} - \frac{F_{AR}}{N_f} \tag{2.21}$$

- เมื่อ I_f^* คือ กระแสประสิทธิผล
- N_f คือ จำนวนรอบของขดลวดสนามขานต่อขั้ว
- N_{sr} คือ จำนวนรอบของขดลวดสนามอนุกรมต่อขั้ว
- F_{AR} คือ mmf เนื่องจากสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเจอร์

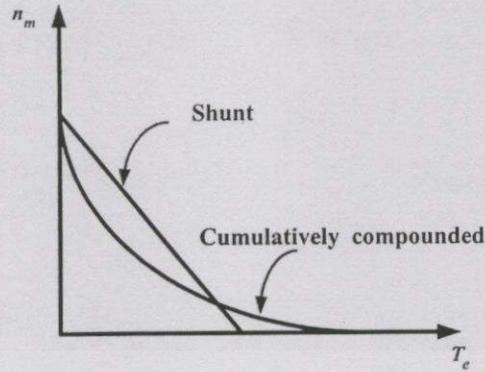
สำหรับคุณลักษณะสมบัติ แรงบิด - ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองแบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



(ก) เปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์แบบขาน
แบบอนุกรม และแบบผสม

รูปที่ 2.6 แสดงคุณลักษณะสมบัติ แรงบิด - ความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) เปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์แบบขนาน และแบบผสม

รูปที่ 2.6 (ต่อ)

2.3 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว (Torque-Speed Characteristics)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในระบบขับเคลื่อนโหลดทางกล (Drive mechanical loads) สำหรับการควบคุมมอเตอร์ [5] ดังกล่าวนี้นั้นส่วนมากจะเป็นการควบคุมความเร็วให้คงที่ในขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งตามคุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเราสามารถที่จะควบคุมความเร็วได้ในช่วงกว้างและความเร็วที่จะควบคุมจะสัมพันธ์กับแรงบิดที่เกิดขึ้น ในส่วนนี้จะพิจารณาถึงคุณลักษณะของ แรงบิด-ความเร็ว ของมอเตอร์ตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

เมื่อพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น (Separately excited dc motor) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แรงดัน กระแส ความเร็ว และแรงบิดมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$E_a = K_a \phi \omega_m = V_t - I_a R_a \quad (2.22)$$

$$T_e = K_a \phi I_a \quad (2.23)$$

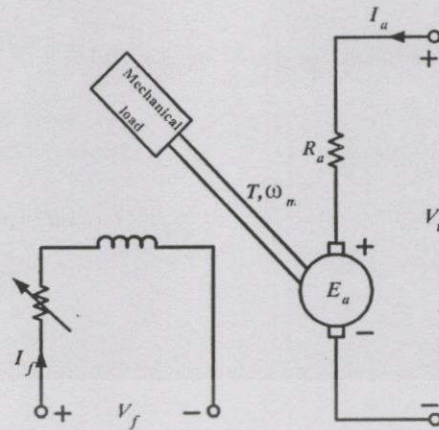
จากสมการ (2.22) ความเร็ว (ω_m) กำหนดได้ดังนี้คือ

$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \phi} \quad (2.24)$$

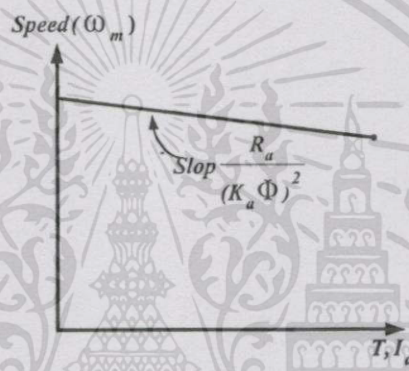
และจากสมการ (2.23) กับ (2.24) ดังนั้น

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \phi} - \frac{R_a T_e}{(K_a \phi)^2} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น



รูปที่ 2.8 แสดงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น

ถ้าแรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) V_t และเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ มีค่าคงที่จะได้คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ความเร็ว ω_m มีค่าลดลงต่ำมากเมื่อเพิ่มแรงบิดหมายความว่า speed regulation นั้นดีมาก ในความเป็นจริงแล้วนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าลดน้อยลง เนื่องจากสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเจอร์ (armature reaction) นั่นคือแรงบิด หรือกระแสอาร์เมเจอร์ จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วมอเตอร์ตกลง และมีค่าต่ำกว่าในรูปที่ 2.8 ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุ่งค่า speed regulation ในมอเตอร์กระแสตรง

จากสมการที่ (2.25) การควบคุมความเร็วของเครื่องจักรกลกระแสตรงนั้นสามารถทำได้ตามวิธีการดังต่อไปนี้คือ

1. ควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์ (V_t)
2. ควบคุมสนามแม่เหล็ก (ϕ)
3. ควบคุมความต้านทานที่อาร์เมเจอร์ (R_a)

โดยแท้จริงแล้วนั้นความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง (ω_m) จะมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นเมื่อ V_t มีค่าเพิ่มขึ้น และจะลดลงเมื่อ ϕ หรือ R_a เพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากสมการที่ (2.24) และ (2.25) สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้สำหรับการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้ หากมีข้อสงสัยประการใด กรุณาติดต่อฝ่ายเอกสารที่ 0-2916-1111 หรือ 0-2916-1112

2.3.1 การควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์ (Armature Voltage Control)

การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยวิธีการนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์ (R_a) และจะรักษากระแสขดลวดสนาม I_f ให้คงที่ (ตามปกติจะควบคุมไว้ที่พิกัด) ส่วนแรงดันที่ขั้วอาร์เมเจอร์ (V_t) จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วถ้าไม่คิดผลของสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเจอร์แล้วนั้น ความเร็ว ω_m จากสมการ (2.25) กำหนดใหม่ได้ดังนี้คือ

$$\omega_m = K_1 V_t - K_2 T_e \quad (2.26)$$

กำหนดให้

$$K_1 = \frac{1}{K_a \phi}$$

$$K_2 = \frac{R_a}{(K_a \phi)^2}$$

สำหรับในกรณีที่ load torque คงที่ ซึ่งใช้ในการขับเคลื่อนโหลดจำพวกลิฟต์หรือรถยนต์ของความเร็วจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นเทียบกับ V_t ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ถ้าแรงดันที่ขั้วถูกรักษาให้คงที่และ load torque เปลี่ยนแปลงความเร็วสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่า V_t ดังรูปที่ 2.9 (ข)

ความจริงแล้วนั้น ขณะที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขั้ว กระแสอาร์เมเจอร์จะถูกรักษาให้คงที่ (ลักษณะเช่นนี้จำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบวงจรรอบปิด) ดังนั้น จาก สมการที่ (2.22) ถ้า I_a มีค่าคงที่

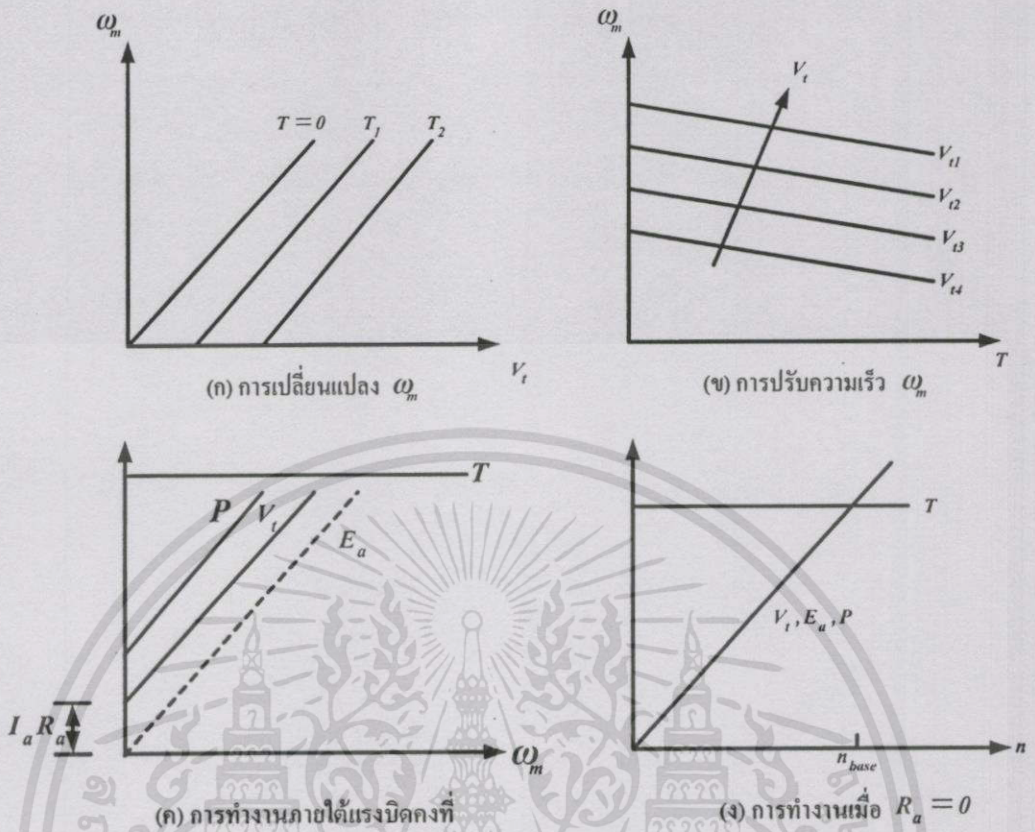
$$E_a \propto V_t$$

$$\propto \omega_m$$

นั่นคือ เมื่อ V_t มีค่าเพิ่มขึ้น ความเร็ว ω_m จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น (ดังรูปที่ 2.9 ค) และกำลังทางด้านอินพุตจากแหล่งจ่าย ($P = V_t I_a$) จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นเช่นกันเมื่อเทียบกับ ω_m (ดังรูปที่ 2.9 ค) ถ้าไม่คิด R_a ค่าของ V_t , E_a และ P จะเท่ากับศูนย์ที่ความเร็วเป็นศูนย์และการเพิ่มขึ้นของทั้ง 3 ค่านี้นั้นจะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 2.9 ง)

โครงสร้างของการควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์ความเร็ว ω_m สามารถควบคุมได้อย่างราบเรียบจากศูนย์จนถึงความเร็วฐาน (base speed) ซึ่งความเร็วฐาน n_{base} กำหนดได้จากความเร็วที่พิกัดแรงดันที่ขั้ว วิธีการควบคุมความเร็วดังกล่าวนี้อย่างไรก็ตามเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ปรับค่าได้เพื่อใช้ในวงจรอาร์เมเจอร์

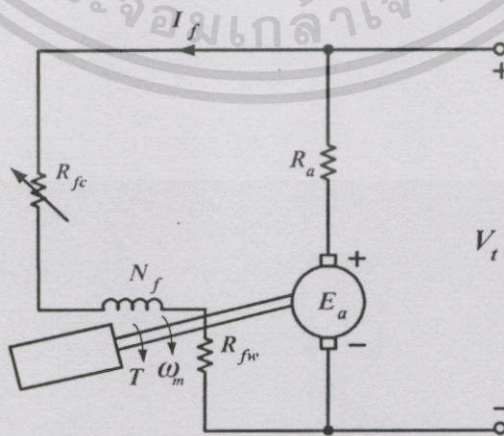
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงการควบคุมแรงดันที่อาร์มเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.3.2 การควบคุมสนามแม่เหล็ก (Field Control)

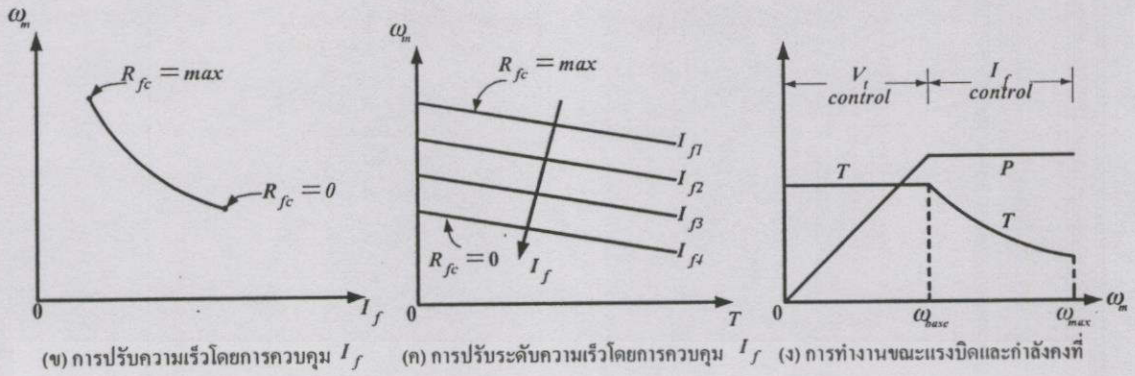
ในการควบคุมด้วยวิธีการนี้ความต้านทาน R_a และแรงดัน V_t ถูกกำหนดไว้ที่ค่าหนึ่งให้คงที่ ดังนั้นความเร็วสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส I_f ของวงจรถาม ซึ่งตามปกติแล้วนั้นจะควบคุม I_f ด้วยการควบคุม R_{fc} ดังรูปที่ 2.10 (ก)



(ก) วงจรการควบคุม

รูปที่ 2.10 แสดงการควบคุมสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 (ต่อ)

ถ้าสมมุติว่าสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น (magnetic linearity) เส้นแรงแม่เหล็กในเครื่องจักรกล ϕ จะเป็นสัดส่วนกับกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก I_f ดังนั้น

$$K_a \phi = K_f I_f \tag{2.27}$$

จากสมการที่ (2.25) และ (2.27)

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_f I_f} - \frac{R_a}{(K_f I_f)^2} T \tag{2.28}$$

สำหรับในกรณีขณะไร้อโหลด $T \approx 0$ ดังนั้นสมการที่ (2.28) ได้เป็น

$$\omega_m \approx \frac{V_t}{K_f I_f}$$

ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงจะผกผันกับกระแสสร้างสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) และจากรูปที่ 2.10 (ข) จะสังเกตได้ว่าถ้ากระแส $I_f \rightarrow 0$ ความเร็ว ω_m จะเข้าสู่อินฟินิตี้ ซึ่งถือว่าเป็นจุดที่อัตราสูง

จากสมการที่ (2.28) ความเร็ว ω_m กำหนดได้ใหม่คือ

$$\omega_m = K_3 - K_4 T \tag{2.29}$$

เมื่อ

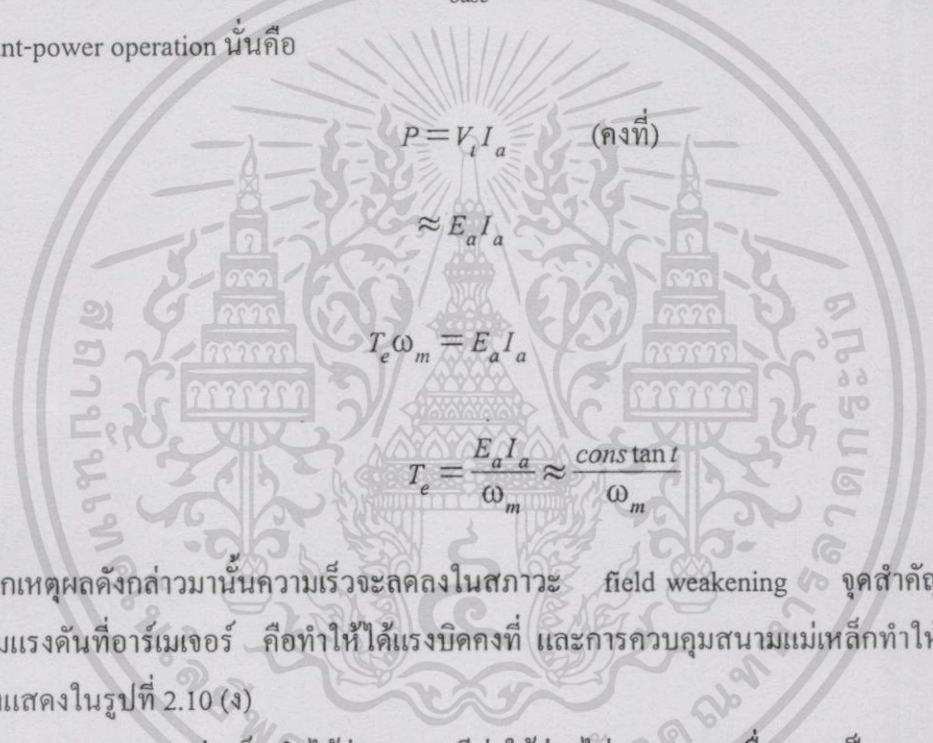
$$K_3 = \frac{V_t}{K_f I_f} \text{ แสดงค่าในเทอมของความเร็วขณะไร้อโหลด}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_4 = \frac{R_a}{(K_f I_f)^2}$$

เมื่อพิจารณากรณีที่ต้องการให้ความเร็วคงที่ขณะแรงบิดเปลี่ยนแปลงเราสามารถควบคุมความเร็วดังกล่าวนี้โดยการปรับค่า I_f ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ค) ดังนั้นในลักษณะเดียวกันการควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์ การควบคุมสนามแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการควบคุมความเร็ว ω_m

การควบคุมความเร็วจากศูนย์จนถึงความเร็วฐาน ตามปกติแล้วนั้นกระทำได้โดยการควบคุมแรงดันที่ขั้ว V_t สำหรับในการควบคุมความเร็วฐานทำได้โดยการลดค่ากระแสสร้างสนามแม่เหล็ก I_f เรียกว่า field weakening ที่ความเร็วฐาน ω_{base} คือการจำกัดกำลังให้คงที่เรียกการทำงานส่วนนี้ Constant-power operation นั่นคือ



และจากเหตุผลดังกล่าวมานั้นความเร็วจะลดลงในสภาวะ field weakening จุดสำคัญของการควบคุมแรงดันที่อาร์เมเจอร์ คือทำให้ได้แรงบิดคงที่ และการควบคุมสนามแม่เหล็กทำให้ได้กำลังคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ง)

การควบคุมสนามแม่เหล็กทำได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายไม่แพงมาก เนื่องจากการควบคุมที่ระดับกำลังต่ำของวงจรสนามอย่างไรก็ตามอินดักเตนซ์จะมีค่าสูง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก I_f เกิดขึ้นอย่างช้าซึ่งส่งผลกระทบต่อสนองสำหรับความเร็วนั้นเป็นไปอย่างช้า

2.3.3 การควบคุมความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Armature Resistance Control)

วิธีการควบคุมแบบนี้จะพยายามรักษาแรงดันที่ขั้ว V_t และกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก I_f คงที่ที่พิกัดทั้งสอง ซึ่งความเร็วจะถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์ (R_{ae}) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) ซึ่งสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (2.30)

จากสมการที่ (2.25) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

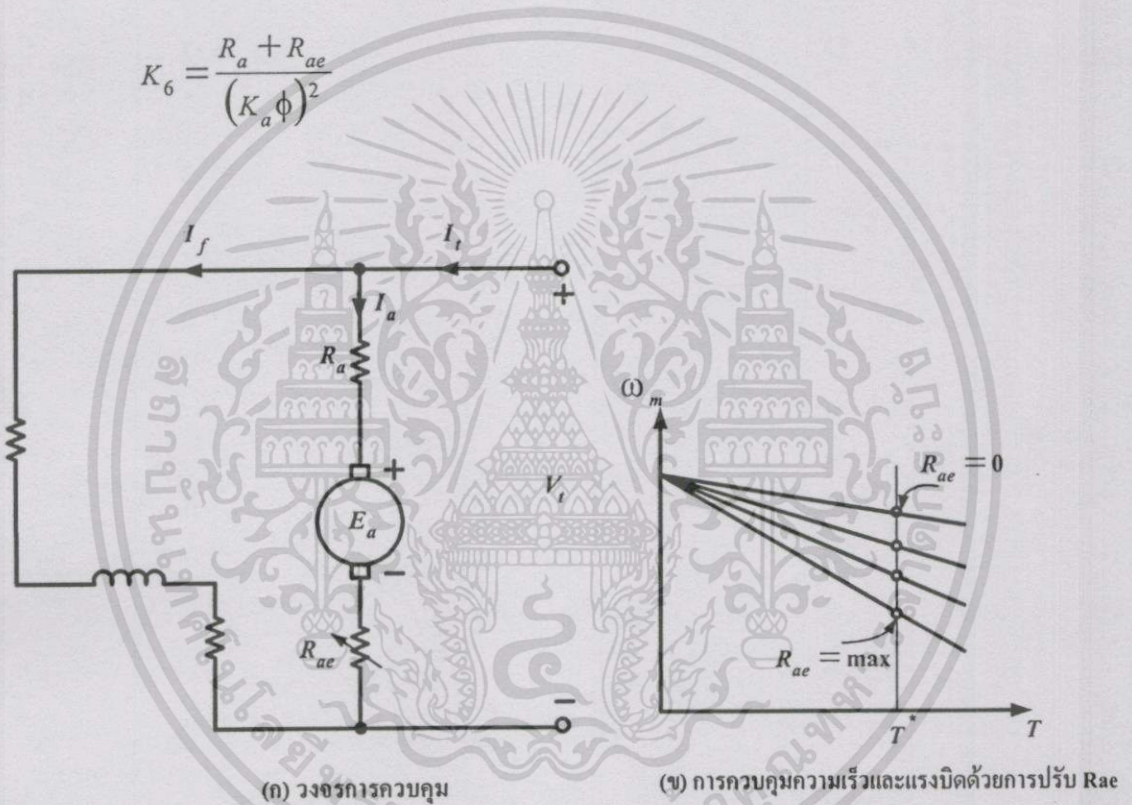
$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \phi} - \frac{R_a + R_{ae}}{(K_a \phi)^2} T_e \tag{2.30}$$

ถ้า V_t และ ϕ ไม่เปลี่ยนแปลง

$$\omega_m = K_5 - K_6 T \tag{2.31}$$

เมื่อ $K_5 = \frac{V_t}{K_a \phi}$ ในเทอมของความเร็วจนระไรโหด

$$K_6 = \frac{R_a + R_{ae}}{(K_a \phi)^2}$$



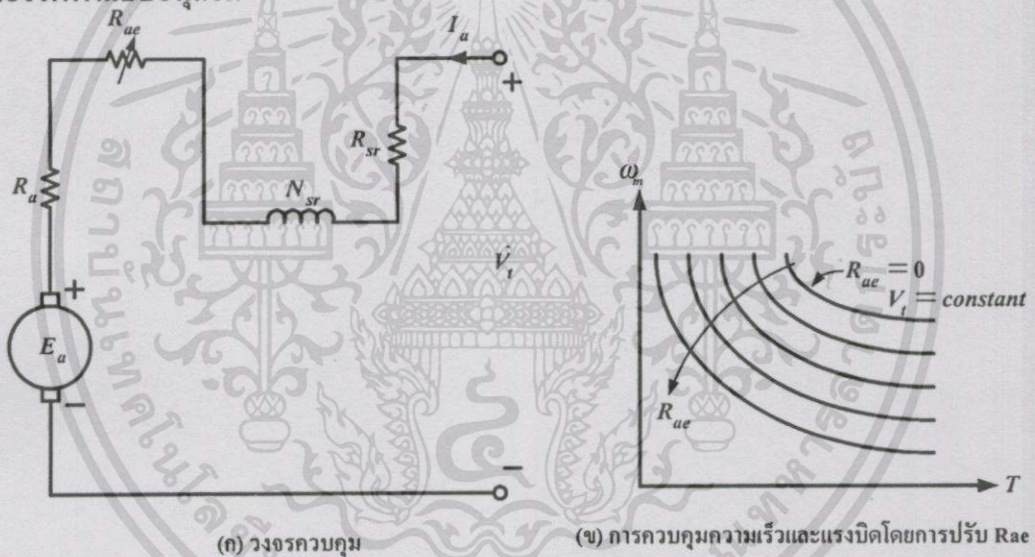
รูปที่ 2.11 แสดงการควบคุมความต้านทานอาร์เมเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะความเร็ว-แรงบิด สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในวงจรอาร์เมเจอร์ แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 (ข) ค่า R_{ae} สามารถปรับได้จากการเปลี่ยนแปลงของความเร็วโดยที่จะพยายามให้กระแส $I_a (T = K_a \phi I_a)$ คงที่ ในรูปที่ 2.11 (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า R_{ae} ที่จุดการทำงานของแรงบิด T^* เส้นโค้งความสัมพันธ์ของความเร็วกับค่าความต้านทานสำหรับการทำงานที่แรงบิดคงที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 (ค) และขณะแรงบิดคงที่นั้นความเร็วสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากศูนย์ถึงความเร็วฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ง) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า R_{ae}

สำหรับการควบคุมแบบนี้ทำได้ง่ายอย่างไรก็ตามวิธีการควบคุมค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์นั้น จะให้ประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากเกิดการสูญเสียจาก R_{ae} นอกจากนี้ด้วยวิธีการควบคุมดังกล่าวนี้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการควบคุมด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็ก ซึ่งส่วนมากใช้ในระบบขนส่งยานพาหนะ

มอเตอร์ไฟฟ้าแบบอนุกรม



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างการควบคุมมอเตอร์แบบอนุกรม

วงจรมูลค่าของมอเตอร์แบบอนุกรมดังรูปที่ 2.12 (ก) สามารถควบคุมความเร็วรอบได้โดยการปรับค่า R_{ae} ซึ่งต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์ สำหรับสมการพื้นฐานเพื่อกำหนดค่าความเร็วของมอเตอร์แสดงได้ดังต่อไปนี้

ถ้าสมมติให้การเปลี่ยนแปลงในวงจรแม่เหล็กเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้น

$$K_a \phi = K_{sr} I_a \tag{2.32}$$

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ ที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวดสนามอนุกรม N_{sr} ดังนั้น สมการแรงดันเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_a = K_{sr} I_a \omega_m \tag{2.33}$$

และสมการแรงบิด

$$T_e = K_{sr} I_a^2 \tag{2.34}$$

สำหรับแรงดัน E_a ถ้าพิจารณาจากวงจรสมมูลย์ รูปที่ 2.12 กำหนดเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

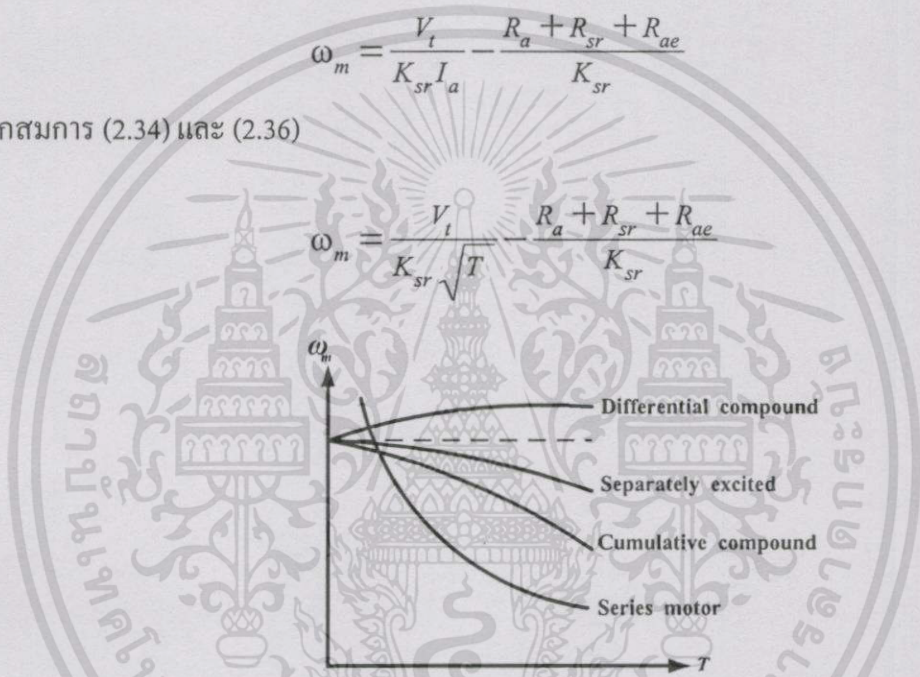
$$E_a = V_t - I_a (R_a + R_{ae} + R_{sr}) \tag{2.35}$$

จากสมการ (2.33) และ (2.35)

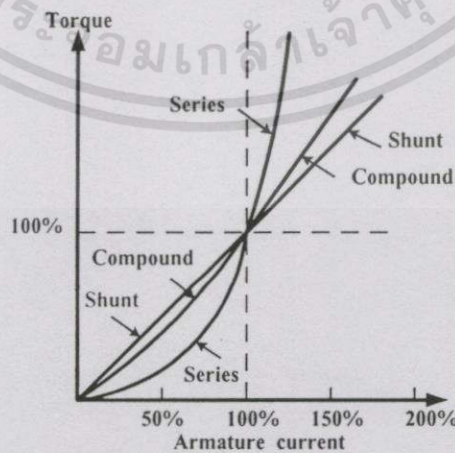
$$\omega_m = \frac{V_t}{K_{sr} I_a} - \frac{R_a + R_{sr} + R_{ae}}{K_{sr}} \tag{2.36}$$

และจากสมการ (2.34) และ (2.36)

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_{sr} \sqrt{T}} - \frac{R_a + R_{sr} + R_{ae}}{K_{sr}} \tag{2.37}$$



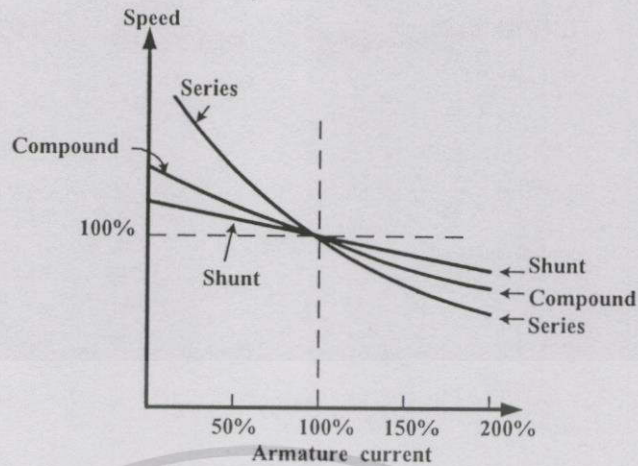
รูปที่ 2.13 แสดงคุณลักษณะสมบัติ แรงบิด - ความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง



(ก) คุณสมบัติของแรงบิดกับกระแสอาร์เมเจอร์

รูปที่ 2.14 แสดงคุณสมบัติแรงบิดและความเร็วเชิงโพลคของมอเตอร์กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) คุณสมบัติของความเร็วกับกระแสอาร์เมเจอร์

รูปที่ 2.14 (ต่อ)

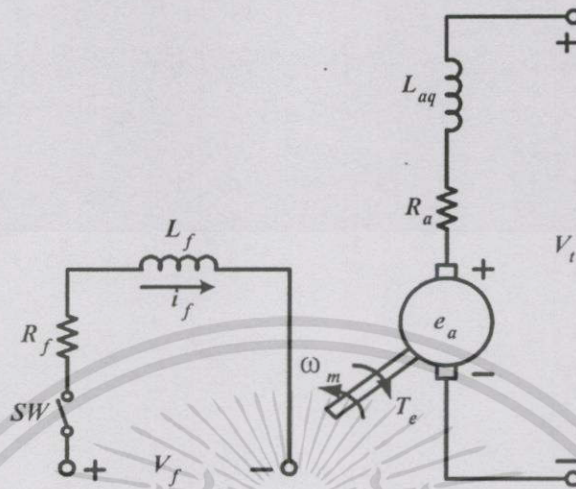
2.4 การวิเคราะห์หม้อเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น

ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงพฤติกรรมของสภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้า (Transients) และพฤติกรรมทางกล (Dynamics) ของหม้อเตอร์ไฟฟ้า [5-6] เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และลดความยุ่งยาก การพิจารณาจะกำหนดองค์ประกอบของระบบดังนี้

1. ไม่คิดผลการอิ่มตัวของแม่เหล็ก (Magnetic saturation) โดยสมมุติว่าค่าความเหนี่ยวนำไม่ขึ้นอยู่กับกระแส
2. สมมุติว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กเนื่องจากขดลวดสนามและเนื่องจากอาร์เมเจอร์เกิดขึ้นตามแนวแกน d และแนวแกน q ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงไม่เกิดค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์ และที่สำคัญจากเหตุผลดังกล่าวจะไม่ทำให้ผลของความเหนี่ยวนำแม่เหล็กลดลง (demagnetizing effect) ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กสะท้อนจากอาร์เมเจอร์ (armature reaction)

ในส่วนแรกจะเป็นการพิจารณาสภาวะชั่วคราวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อศึกษาถึงเหตุผลที่จะนำไปวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมทางกลของหม้อเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะพิจารณาและวิเคราะห์จากสมการและทอานเฟอร์ฟังก์ชัน ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางด้านเอาต์พุตต่ออินพุต ที่ได้จากการตอบสนองของระบบซึ่งเกิดอินพุตที่เปลี่ยนแปลง

2.4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น (Separately Excited DC Generator)



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น

โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น แสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์แสดงตามแนวแกน q (L_{aq}) เนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์เกิดขึ้นตามแนวแกน q สำหรับสมการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงกำหนดดังนี้คือ

$$e_a = K_a \Phi \omega_m \quad (2.38)$$

$$T_e = K_a \Phi i_a \quad (2.39)$$

ถ้าสมมุติว่าสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น $K_a \Phi = K_f i_f$ ดังนั้นสมการ (2.38) และ (2.39) เขียนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$e_a = K_f i_f \omega_m \quad (2.40)$$

$$T_e = K_f i_f i_a \quad (2.41)$$

2.4.1.1 พิจารณาสภาวะชั่วคราวในวงจรสนาม

เมื่อพิจารณาสภาวะชั่วคราวที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น ประการแรกที่ศึกษา คือผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการกระตุ้นแรงดันให้กับวงจรสนาม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรอาร์เมเจอร์เปิดวงจร และเครื่องกำเนิดหมุนที่ความเร็วคงที่ ω_m จากรูปที่ 2.15 สมการแรงดันของวงจรสนามหลังจากสวิตช์ปิด คือ

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (2.42)$$

ดังนั้น Laplace transform ของสมการ (2.42) เมื่อกำหนดเงื่อนไขของสภาวะเริ่มต้นเป็นศูนย์ คือ

$$\begin{aligned} V_f(s) &= R_f I_f(s) + L_f s I_f \\ &= I_f(s)(R_f + sL_f) \end{aligned} \quad (2.43)$$

สำหรับความสัมพันธ์ของทรานเฟอร์ฟังก์ชันระหว่างกระแสต่อแรงดันของขดลวดสนามคือ

$$\frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{1}{R_f + sL_f} = \frac{1}{R_f(1 + s\tau_f)} \quad (2.44)$$

เมื่อ $\tau_f = \frac{L_f}{R_f}$ คือ ค่าเวลาคงตัวของวงจรสนาม

สำหรับแรงดันที่สร้างขึ้นในวงจรอาร์เมเจอร์จากสมการ (2.40) คือ

$$e_a = K_f i_f \omega_m = K_g i_f \quad (2.45)$$

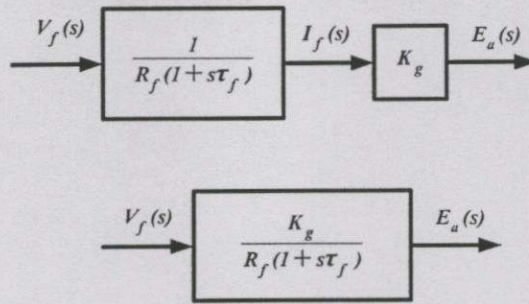
เมื่อ $K_g = K_f \omega_m$ คือความชันของส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น เส้นโค้งการทำแม่เหล็กที่ความเร็ว ω_m แสดงได้จากการพล็อตค่า e_a กับ i_f สำหรับ Laplace transform ของสมการ (2.45) คือ

$$E_a(s) = K_g I_f(s) \quad (2.46)$$

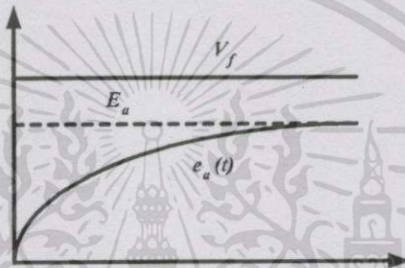
จากสมการ (2.44) และ (2.46) ทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอาร์เมเจอร์ต่อแรงดันวงจรสนามคือ

$$\frac{E_a(s)}{V_f(s)} = \frac{E_a(s) I_f(s)}{I_f(s) V_f(s)} = \frac{K_g}{R_f(1 + s\tau_f)} \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) บล็อกไดอะแกรม



(ข) ผลการตอบสนอง

รูปที่ 2.16 แสดงสถานะชั่วคราวในวงจรมอเตอร์

จากสมการ(2.44),(2.46)และ(2.47) สามารถแสดงโดยบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2.16 การตอบสนองในโดเมนเวลาที่สัมพันธ์กับทรานส์ฟอร์มเมอร์ฟังก์ชันของสมการ (2.47) (เมื่อ V_f เปลี่ยนแปลงแบบสแต็ป) คือ

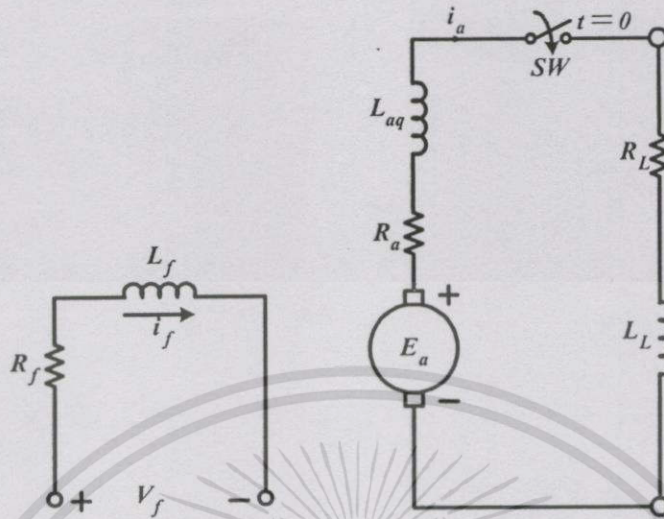
$$e_a(t) = \frac{K_g V_f}{R_f} (1 - e^{-t/\tau_f}) \tag{2.48}$$

$$= E_a (1 - e^{-t/\tau_f}) \tag{2.49}$$

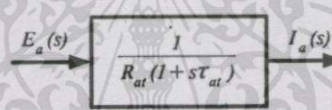
ถ้า $E_a = e_a(\infty) = \frac{K_g I_f}{R_f} = K_g I_f$ คือ แรงดันที่เกิดขึ้นในสภาวะคงตัวและ $I_f = \frac{V_f}{R_f}$ คือ กระแสที่ป้อนขดลวดเข้าสนามในสภาวะคงตัว ผลการตอบสนองดังรูปที่ 2.16 (ข) เป็นผลการตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง (first order) เทียบกับค่าเวลาคงตัว ซึ่งค่าเวลาคงตัวของวงจรมอเตอร์ τ_f มีค่ามาก และเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.1 – 2.0 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

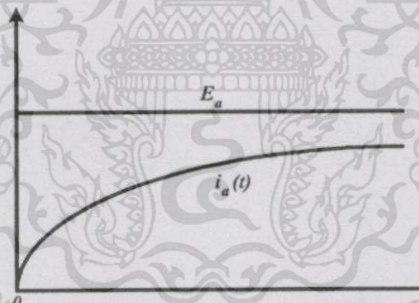
2.4.1.2 พิจารณาทรานเซียนต์ในวงจรอาร์เมเจอร์



(ก) วงจรสมมุติ



(ข) บล็อกไดอะแกรม



(ค) ผลการตอบสนอง

รูปที่ 2.17 แสดงสภาวะชั่วคราวในวงจรอาร์เมเจอร์

เมื่อพิจารณาทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในวงจรอาร์เมเจอร์ เมื่อต่อโหลดเข้ากับระบบดังรูปที่ 2.17 ซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน R_L และค่าความเหนี่ยวนำ L_L ซึ่งต่ออยู่กับขั้วอาร์เมเจอร์ เมื่อสวิตช์ถูกปิด ที่เวลา $t = 0$ ถ้าสมมุติว่าอาร์เมเจอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่และกระแสของขดลวดสนามคงที่ด้วย ดังนั้นหลังจากสวิตช์ปิดสมการแรงดัน E_a กำหนดได้ตามสมการ (2.50)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_a = R_a i_a + L_{aq} \frac{di_a}{dt} + R_L i_a + L_L \frac{di_a}{dt} \quad (2.50)$$

และเมื่อจัดสมการที่ (2.50) ใหม่จะได้ดังนี้

$$E_a = (R_a + R_L) i_a + (L_{aq} + L_L) \frac{di_a}{dt} \quad (2.51)$$

เมื่อ $R_{at} = R_a + R_L$ คือ ผลรวมของค่าความต้านทานในวงจรรออาร์เมเจอร์

$L_{at} = L_{aq} + L_L$ คือ ผลรวมของค่าความเหนี่ยวนำในวงจรรออาร์เมเจอร์

$$E_a = R_{at} i_a + L_{at} \frac{di_a}{dt} \quad (2.52)$$

Laplace transform ของสมการ (2.52) คือ

$$E_a(s) = R_{at} I_a(s) + L_{at} s I_s(s) \quad (2.53)$$

ดังนั้นทรานเฟอร์ฟังก์ชัน คือ

$$\frac{I_a(s)}{E_a(s)} = \frac{1}{R_{at}(1 + s\tau_{at})} \quad (2.54)$$

โดยที่ $\tau_{at} = \frac{L_{at}}{R_{at}}$ คือ ค่าเวลาคงตัวของวงจรรออาร์เมเจอร์

ส่วนบล็อกไดอะแกรมแสดงทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสมการ (2.54) แสดงดังรูปที่ 2.17 (ข) และผลการตอบสนองในโดเมนเวลา กำหนดตามสมการ (2.55)

$$i_a(t) = \frac{E_a}{R_{at}} (1 - e^{-t/\tau_{at}}) \quad (2.55)$$

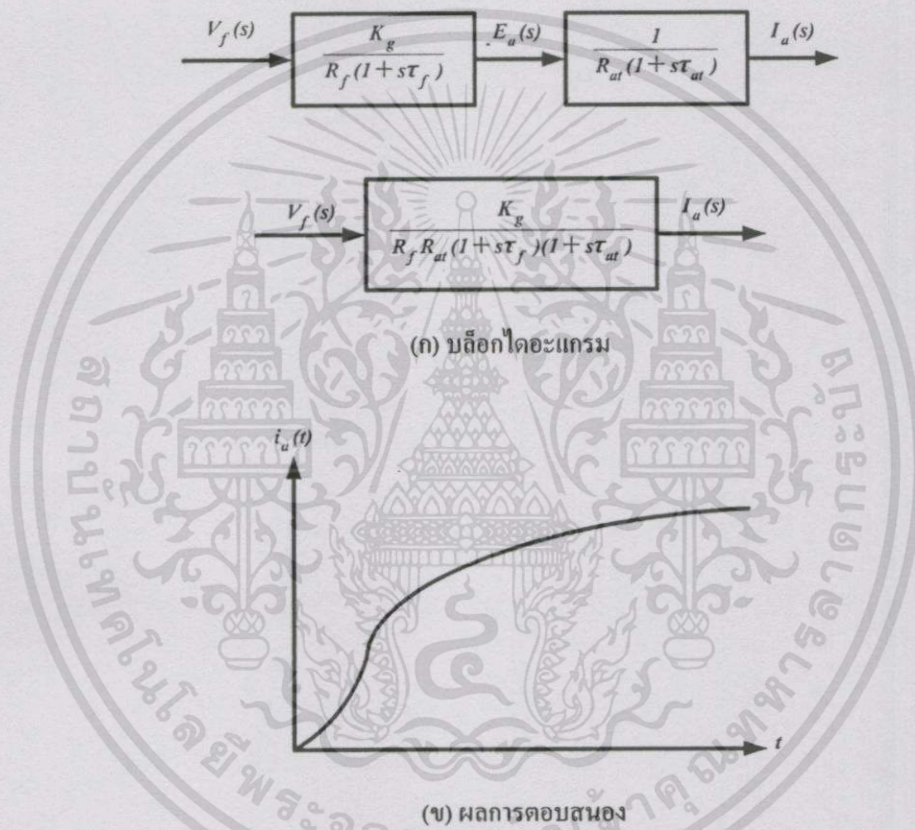
และผลการตอบสนองสมการ (2.55) แสดงดังรูปที่ 2.17(ค) ซึ่งเป็นผลตอบสนองอันดับที่หนึ่งเทียบกับค่าเวลาคงตัว τ_{at} ตามปกติแล้วนั้น τ_{at} มีค่าต่ำ ดังนั้นกระแสอาร์เมเจอร์จึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ(2.47) และ (2.54) ผลรวมของทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับกระแสอาร์เมเจอร์ต่อแรงดันขดลวดสนามคือ

$$\frac{I_a(s)}{V_f(s)} = \frac{I_a(s) E_a(s)}{E_a(s) V_f(s)} = \frac{K_g}{R_f R_{at} (1 + s\tau_f)(1 + s\tau_{at})} \quad (2.56)$$

ความสัมพันธ์ของสมการ (2.56) แสดงได้โดยบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงสถานะชั่วคราวในวงจรมอเตอร์และอาร์เมเจอร์

และสำหรับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแบบสตีป (Step change of voltage) ในวงจรมอเตอร์กำหนดตามสมการ (2.57)

$$V_f(s) = \frac{V_f}{s} \quad (2.57)$$

และจากสมการ(2.56) และ(2.57) กระแสอาร์เมเจอร์หาได้ตามสมการ (2.58)

$$I_a(s) = \frac{K_g V_f}{R_f R_{at} s(1 + s\tau_f)(1 + s\tau_{at})} \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในวงจรมอเตอร์และอาร์เมเจอร์เท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$I_a(s) = \frac{K_g V_f}{R_f R_{at} \tau_f \tau_{at} s(s + \frac{1}{\tau_f})(s + \frac{1}{\tau_{at}})} \quad (2.59)$$

กำหนดให้ $A = K_g V_f / R_f R_{at} \tau_f \tau_{at}$ ดังนั้นสมการ (2.59) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I_a(s) = \frac{A}{s(s + 1/\tau_f)(s + 1/\tau_{at})} \quad (2.60)$$

จากสมการ (2.60) แก้สมการหาค่า $i_a(f)$ ได้ดังนี้คือ

$$I_a(s) = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s + 1/\tau_f} + \frac{A_3}{s + 1/\tau_{at}} \quad (2.61)$$

เมื่อ

$$A_1 = \frac{A}{(s + 1/\tau_f)(s + 1/\tau_{at})} \Big|_{s=0} = A \tau_f \tau_{at}$$

$$A_2 = \frac{A}{s(s + 1/\tau_{at})} \Big|_{s=-1/\tau_f}$$

$$A_3 = \frac{A}{s(s + 1/\tau_f)} \Big|_{s=-1/\tau_{at}}$$

ดังนั้นผลการตอบสนองของ i_a ในโดเมนเวลา คือ

$$i_a(t) = A_1 + A_2 e^{-t/\tau_f} + A_3 e^{-t/\tau_{at}} \quad (2.62)$$

หมายเหตุ A_1 แสดงค่ากระแสอาร์เมเจอร์ในสภาวะคงตัว

$$\text{เมื่อ } A_1 = i_a(\infty) = \frac{(K_g V_f)}{(R_f R_{at})} = \frac{K_g I_f}{R_{at}} = \frac{E_a}{R_{at}} \quad \text{และรูปที่ 2.18 (ข) แสดงการตอบสนอง}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ของกระแส i_a สำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันแบบสเตปในวงจรอาร์เมเจอร์ แบบ Step of change
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 สภาวะทางไดนามิกส์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น

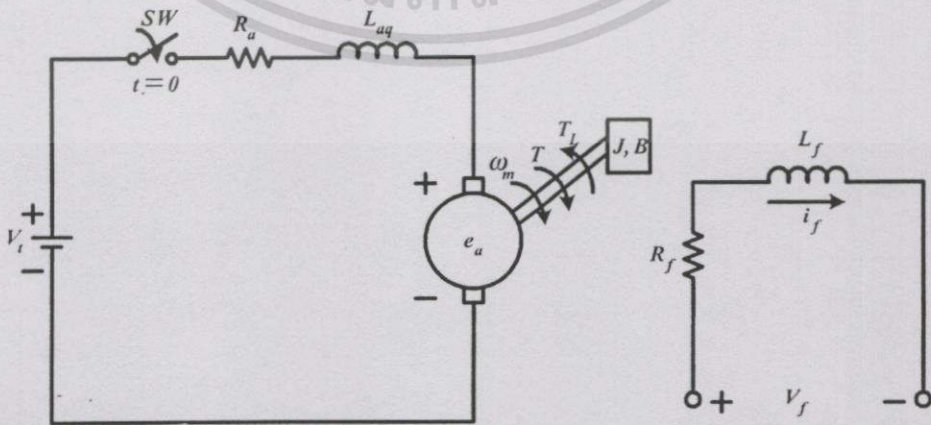
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากการควบคุมความเร็วและแรงบิดสามารถควบคุมได้ในช่วงกว้าง สำหรับวิธีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้นเป็นการควบคุมการกระตุ้นขดลวดสนามให้คงที่ โดยที่ความเร็วสามารถควบคุมด้วยการปรับแรงดันที่ขั้ว ซึ่งการศึกษาผลที่เกิดจากสภาวะทรานเซียนในวงจรอาร์เมเจอร์และทรานเซียนทางกลในระบบขับเคลื่อนทางกลโดยพิจารณามอเตอร์ ซึ่งในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์นั้น ถึงแม้ว่าจะไม่จำเป็นต้องศึกษาถึงการออกแบบและการสร้างตัวมอเตอร์โดยละเอียด แต่ก็ยังคงจำเป็นต้องศึกษาถึงคุณสมบัติบางอย่างได้แก่ สมการความเร็ว, แรงบิด และประสิทธิภาพของมอเตอร์ ซึ่งจากค่าตัวแปรเหล่านี้สามารถอธิบายถึงวิธีการปรับความเร็วรอบมอเตอร์

ระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้นแสดงดังรูปที่ 2.19 (ก) สมมติว่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเป็นแบบเชิงเส้น (Magnetic linearity) และสมการพื้นฐานของมอเตอร์กำหนดดังนี้ คือ

$$e_a = K_f i_f \omega_m = K_m \omega_m \tag{2.63}$$

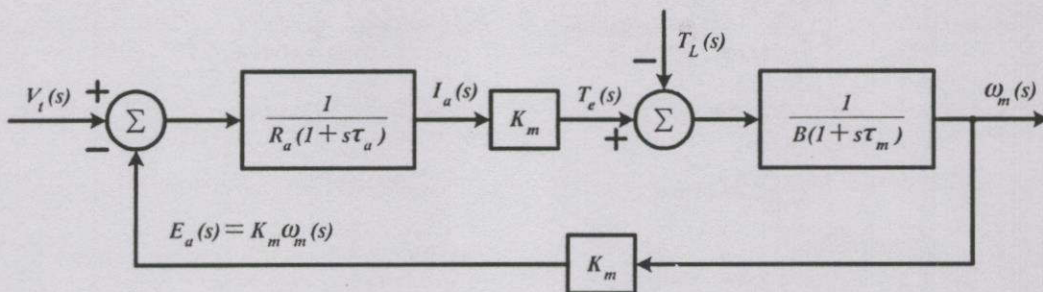
$$T = K_f i_f i_a = K_m i_a \tag{2.64}$$

เมื่อ $K_m = K_f i_f$ คือ ค่าคงที่ ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนของ $\frac{e_a}{\omega_m}$ แรงดันอาร์เมเจอร์ e_a จะสัมพันธ์กับกระแสในขดลวดสนาม i_f ที่ความเร็ว ω_m

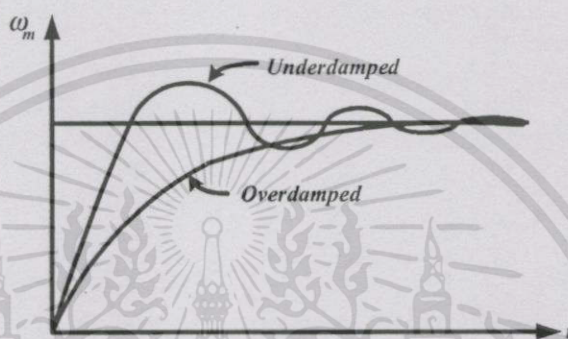


(ก) วงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รูปที่ 2.19 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) บล็อกไดอะแกรม



(ค) ผลการตอบสนอง

รูปที่ 2.19 (ต่อ)

สำหรับผลการแปลงลาปลาซของสมการ (2.63) และ (2.64) กำหนดได้ดังนี้

$$E_a = K_m \omega_m(s) \tag{2.65}$$

$$T(s) = K_m I_a(s) \tag{2.66}$$

ในรูปที่ 2.19 (ก) ถ้าสวิตช์ปิดที่เวลา $t = 0$ ดังนั้นหลังจากสวิตช์ปิดไปแล้วแรงดันที่ขั้ว V_t ตามกฎของ Kirchhoff Voltage Law กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$V_t = e_a + R_a i_a + L_{aq} \frac{di_a}{dt} \tag{2.67}$$

และจากสมการ (2.63) และ (2.67)

$$V_t = K_m \omega_m + R_a i_a + L_{aq} \frac{di_a}{dt} \tag{2.68}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นผลการแปลงลาปลาซ ของสมการ (2.68) จากเงื่อนไขขณะเริ่มต้นเป็นศูนย์จะได้ $V_t(s)$ คือ

$$V_t(s) = K_m \omega_m(s) + R_a I_a(s) + L_{aq} s I_a(s) \quad (2.69)$$

จัดสมการ (2.69) ใหม่ ได้ดังนี้คือ

$$V_t(s) = K_m \omega_m(s) + I_a(s) R_a (1 + s \tau_a) \quad (2.70)$$

เมื่อ $\tau_a = \frac{L_{aq}}{R_a}$ คือ ค่าเวลาคงตัวของอาร์เมเจอร์

สำหรับสมการทางไดนามิกส์ของระบบทางกลกำหนดได้ดังนี้คือ

$$T = K_m i_a = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (2.71)$$

เมื่อ J คือ ผลรวมความเฉื่อยเนื่องจากโพลและโรเตอร์

B คือ ค่าคงที่ของแรงเสียดทานเนื่องจากความหนืด ของโพลและมอเตอร์

T_L คือ แรงบิดทางกลของโพล

สำหรับเทอม $B\omega_m$ แทนแรงบิดสูญเสียเนื่องจากการหมุนของระบบ การแปลงลาปลาซ ของสมการ (2.71) นั้นคือ

$$T(s) = K_m I_a(s) = Js\omega_m(s) + B\omega_m(s) + T_L(s) \quad (2.72)$$

จากสมการ (2.72) และ (2.66) สมการความเร็ว (ω_m) กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$\omega_m(s) = \frac{T(s) - T_L(s)}{B(1 + sJ/B)} = \frac{K_m I_a(s) - T_L(s)}{B(1 + s\tau_m)} \quad (2.73)$$

เมื่อ $\tau_m = \frac{J}{B}$ คือ ค่าเวลาคงตัวทางกลของระบบและจากสมการ (2.65) และ (2.70) กระแสอาร์เมเจอร์ หาได้ตามสมการ (2.74)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_a(s) = \frac{V_t(s) - E_a(s)}{R_a(1 + s\tau_a)} = \frac{V_t(s) - K_m\omega_m(s)}{R_a(1 + s\tau_a)} \quad (2.74)$$

สำหรับบล็อกไดอะแกรมของสมการ (2.73) และ (2.74) แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 (ข) และถ้าพิจารณาแยกเป็นกรณีทำได้ดังนี้ คือ

1. แรงบิดของโหลดเป็นส่วนส่วนกับความเร็ว

$$\begin{aligned} T_L &\propto \omega_m \\ &= B_L\omega_m \end{aligned} \quad (2.75)$$

ถ้ากำหนดให้ J คือผลรวมของความเฉื่อยทั้งระบบซึ่งเขียนได้ดังนี้ คือ

$$J = J_{motor} + J_{load} \quad (2.76)$$

จากสมการ (2.72) สามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} K_m I_a(s) &= Js\omega_m(s) + B_m\omega_m(s) + B_L\omega_m(s) \\ &= Js\omega_m(s) + (B_m + B_L)\omega_m(s) \end{aligned} \quad (2.77)$$

เมื่อกำหนดให้ $B = (B_m + B_L)$ ดังนี้

$$K_m I_a(s) = Js\omega_m(s) + B\omega_m(s) \quad (2.78)$$

เมื่อใส่โหลดให้กับระบบจะทำให้แรงเสียดทานเนื่องจากความฝืดของระบบทางกลเพิ่มขึ้นและจากสมการ (2.70) และ (2.78) แรงดันที่ขั้วเขียนใหม่ได้ดังนี้คือ

$$V_t(s) = K_m\omega_m(s) + \frac{BR_a}{K_m}(1 + s\tau_m)(1 + s\tau_a)\omega_m(s) \quad (2.79)$$

ดังนั้นอัตราส่วนของความเร็วดต่อแรงดันที่ขั้วหาได้ตามสมการ (2.79.1) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \frac{1}{K_m + \left(\frac{BR_a}{K_m}\right)(1+s\tau_m)(1+s\tau_a)} \quad (2.79.1)$$

การตอบสนองของความเร็วกำหนดโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขั้ว V_t ซึ่งเป็นการตอบสนองของระบบอันดับสอง เนื่องจากมีค่าเวลาคงตัวสองค่าคือ τ_m และ τ_a การพิจารณาผลตอบสนองว่าเป็นแบบถ่วงน้อย หรือ ถ่วงมาก ขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงตัวเหล่านั้นรวมทั้งค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ด้วย เช่น K_m, B และ R_a เป็นต้น ซึ่งการตอบสนองทั้งสองกรณีแสดงดังรูปที่ 2.19 (ค)

2. ถ้า $L_{aq} = 0$ นั่นคือไม่คิดผลของค่าความเหนี่ยวนำและค่าเวลาคงตัว $\tau_a = 0$ ทรานเฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (2.79.1) เขียนใหม่ได้ตามสมการ (2.80)

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \frac{1}{K_m + \left(\frac{BR_a}{K_m}\right)(1+s\tau_m)} \quad (2.80)$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \left(\frac{K_m}{K_m^2 + R_a B} \right) \left(\frac{1}{1+s\tau'_m} \right) \quad (2.81)$$

เมื่อ

$$\tau'_m = \frac{R_a B}{K_m^2 + R_a B} \tau_m < \tau_m \quad (2.82)$$

3. ถ้า $B = 0$ สมการ(2.78) เขียนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$K_m I_a(s) = Js\omega_m(s) \quad (2.83)$$

และจากสมการ (2.70) และ (2.83) จะได้สมการแรงดันที่ขั้ว คือ

$$V_t(s) = K_m \omega_m(s) + \frac{Js\omega_m(s)R_a(1+s\tau_a)}{K_m}$$

ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \frac{1}{K_m + \left(\frac{JR_a}{K_m}\right)s(1+s\tau_a)} \quad (2.84)$$

4. เมื่อแหล่งจ่ายถูกปลดออก ถ้าแหล่งจ่ายถูกปลดออกอย่างรวดเร็ว นั่นคือ สวิตช์ดังรูปที่ 2.19 (ก) เปิดออกที่เวลา $t=0$ สมการทางไดนามิกส์ สำหรับระบบทางกล คือ

$$T = K_m i_a = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m = 0 \quad (2.85)$$

ดังนั้น

$$B\omega_m = -J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.86)$$

และผลการแปลงลาปลาซ ของสมการ (2.86) จะได้เป็น

$$B\omega_m(s) = -J[s\omega_m(s) - \omega_{mo}] \quad (2.87)$$

จากสมการ (2.87) เมื่อ ω_{mo} คือ ความเร็วเริ่มต้น

ดังนั้นความเร็ว ω_m เขียนได้ตามสมการ (2.88) คือ

$$\omega_m(s) = \frac{J\omega_{mo}}{B+sJ} = \frac{\omega_{mo}}{\left(s + \frac{B}{J}\right)}$$

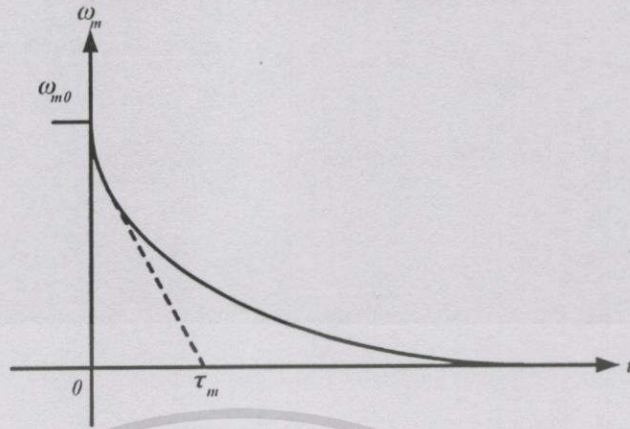
หรือ

$$\omega_m(s) = \frac{\omega_{mo}}{s + \frac{1}{\tau_m}} \quad (2.88)$$

สำหรับผลตอบสนองของความเร็วในโดเมนเวลาคือ

$$\omega_m(t) = \omega_{mo} e^{-t/\tau_m} \quad (2.89)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงผลการตอบสนองในโดเมนเวลาเนื่องจากความเร็วลดลงจากความเร็วเริ่มต้น

จากสมการที่ (2.70) และ (2.78) สามารถหาอัตราส่วนของความเร็วต่อแรงคั้นที่ชั่วได้ใหม่ตั้งสมการที่ (2.90)

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \frac{\frac{K_m}{JR_a I_a}}{s^2 + \left(\frac{J+B\tau_a}{J\tau_a}\right)s + \left(\frac{\sqrt{K_m^2 + BR_a}}{JR_a \tau_a}\right)} \tag{2.90}$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \frac{\frac{K_m}{JR_a I_a}}{s^2 + \left(\frac{J+B\tau_a}{J\tau_a}\right)s + \left(\frac{\sqrt{K_m^2 + BR_a}}{JR_a \tau_a}\right)^2} \times \frac{JR_a \tau_a}{K_m^2 + BR_a} \tag{2.91}$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_t(s)} = \frac{K_m}{JR_a \tau_a \left(\frac{K_m^2 + BR_a}{JR_a \tau_a}\right)} \times \frac{JR_a \tau_a}{s^2 + \left(\frac{J+B\tau_a}{J\tau_a}\right)s + \left(\frac{\sqrt{K_m^2 + BR_a}}{JR_a \tau_a}\right)^2} \tag{2.92}$$

กำหนดให้

$$K = \left(\frac{K_m}{K_m^2 + BR_a}\right) \tag{2.93}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_n^2 = \frac{K^2 m + BR_a}{JR_a \tau_a} \quad (2.94)$$

$$2\delta\omega_n = \frac{J + B\tau_a}{J\tau_a} \quad (2.95)$$

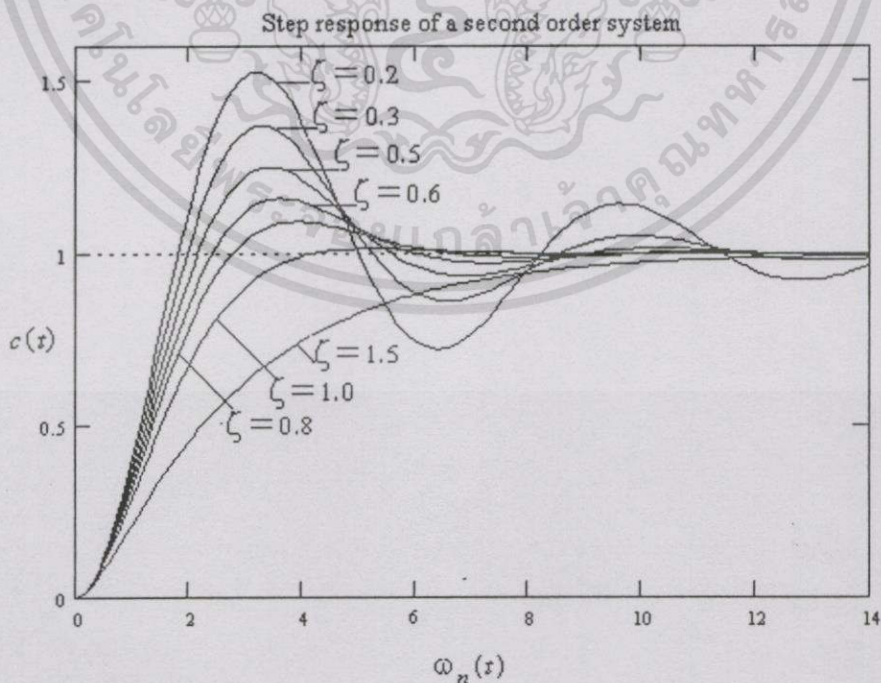
$$\delta = \frac{J + B\tau_a}{2J\tau_a \sqrt{\frac{K^2 m + BR_a}{JR_a \tau_a}}} \quad (2.96)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\omega_m(s)}{V_i(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.97)$$

สำหรับผลตอบสนองของความเร็วในโดเมนเวลาคือ

$$\omega_m(t) = \left(1 - \left[e^{-\delta\omega_n t} \cos(\omega_n \sqrt{1-\delta^2} t) + \frac{\delta}{\sqrt{1-\delta^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\delta^2} t) \right] \right) K \quad (2.98)$$



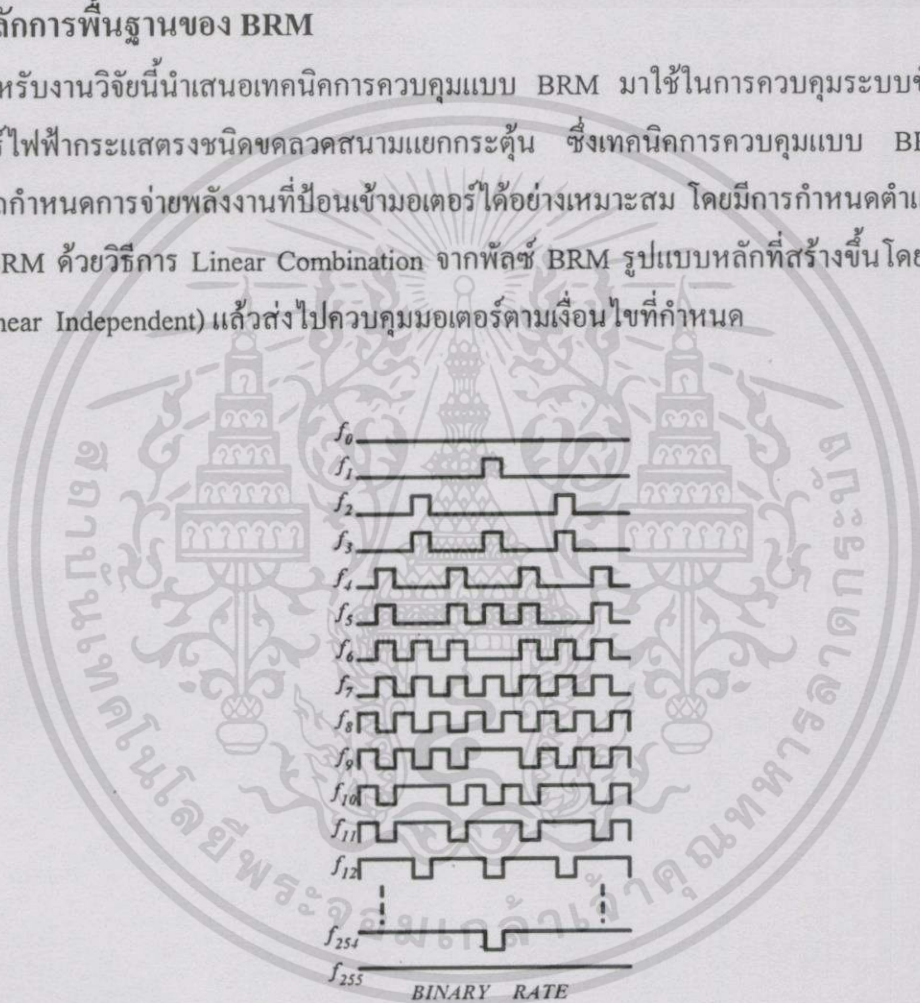
รูปที่ 2.21 แสดงผลตอบสนองลำดับที่สองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น

3.1 หลักการพื้นฐานของ BRM

สำหรับงานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมแบบ BRM มาใช้ในการควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น ซึ่งเทคนิคการควบคุมแบบ BRM นั้นสามารถกำหนดการจ่ายพลังงานที่ป้อนเข้ามอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม โดยมีการกำหนดตำแหน่งของพัลส์ BRM ด้วยวิธีการ Linear Combination จากพัลส์ BRM รูปแบบหลักที่สร้างขึ้นโดยอิสระต่อกัน (Linear Independent) แล้วส่งไปควบคุมมอเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 3.1 แสดงสัญญาณ BRM ขนาด 8 บิต

รูปที่ 3.1 แสดงสัญญาณ BRM ขนาด 8 บิต ซึ่งสามารถกำหนดให้มีการส่งรูปสัญญาณ พัลส์ BRM เป็นจำนวน B พัลส์ ดังนั้นรูปสัญญาณพัลส์ BRM ที่ส่งออกไปโดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.1)

$$B = k_m (2^m) + k_{m-1} (2^{m-1}) \dots + k_1 (2^1) + k_0 (2^0) \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการ (3.1) เมื่อพิจารณาพลังงานในแต่ละส่วนส่งออกไปในช่วงเวลา T ถ้ากำหนดให้ 2^m คือ ผลรวมของจำนวนพัลส์ต่อไซเคิล R คือ ค่าพลังงานในแต่ละพัลส์ของคาบเวลา T เมื่อ cycle time $(T_c) = (2^m \times T)$ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยหาได้ตามสมการ(3.2)

$$P = \frac{BR}{T_c} = R[k_m \frac{f}{2} + k_{m-1} \frac{f}{2^2} \dots k_1 \frac{f}{2^m} + k_0 \frac{f}{2^{m+1}}] \quad (3.2)$$

กำหนดให้

B คือ จำนวนพัลส์ที่ส่ง

m คือ จำนวนบิต

f คือ ความถี่

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

จากสมการ (3.2) จะเห็นได้ว่าการส่งพัลส์ที่ความถี่ $\frac{f}{2}, \frac{f}{2^2}, \dots, \frac{f}{2^m}, \frac{f}{2^{m+1}}$ ขึ้นอยู่กับจำนวน ไบนารีบิตของพัลส์ B ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างรูปแบบ BRM จึงกำหนดให้มีการกระจายของ รูปแบบ BRM ให้ได้พลังงานเฉลี่ยสูงสุดในทุกๆ รูปแบบตามช่วงเวลา T_c ด้วยการกำหนดความถี่หลักเป็น Linear independent waveforms คั้งนี้คือ $f_1, f_2, f_4, f_8, f_{16}, f_{32}, f_{64}$ และ f_{128} ที่อิสระต่อกันมากระทำ Linear Combination ตัวอย่างเช่น $f_9 = f_8 + f_1$ (กรณี $m=8$) ดังนั้นรูปสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นสามารถเขียนในทอแมคคณิตศาสตร์ [1] ได้ตามสมการ (3.3)

$$f_{2^a} = M \sum_{b=0}^{2^a-1} \{u(t - (\frac{2^m}{2^{a+1}} - 1 + b \frac{2^m}{2^a})T) - u(t - (\frac{2^m}{2^{a+1}} + b \frac{2^m}{2^a})T)\} \quad (3.3)$$

กำหนดให้

$u(t)$ คือ Unit Step Function

a คือ ค่าไบนารี ($a=0,1,2,\dots,m-1$)

M คือ ขนาดของสัญญาณ BRM

T คือ pulse time

ถ้าพิจารณาอินพุตที่เป็นพัลส์ของพลังงานหนึ่งหน่วยต่อไซเคิลที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ด้วยการ on time aT และ off time bT ถ้า ripple เอาต์พุตในสถานะคงตัวของความเร็วมอเตอร์กำหนดได้ตามเอกสารอ้างอิง [1] คือ

$$ripple = \frac{K_p (1 - e^{-aT/T_p})(1 - e^{-bT/T_p})}{(1 - e^{-(a+b)T/T_p})} \tag{3.4}$$

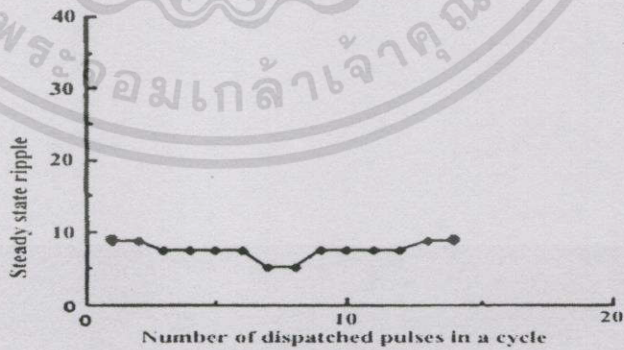
กำหนดให้

K_p คือ ค่าคงที่ของระบบ

T_p คือ time constant มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

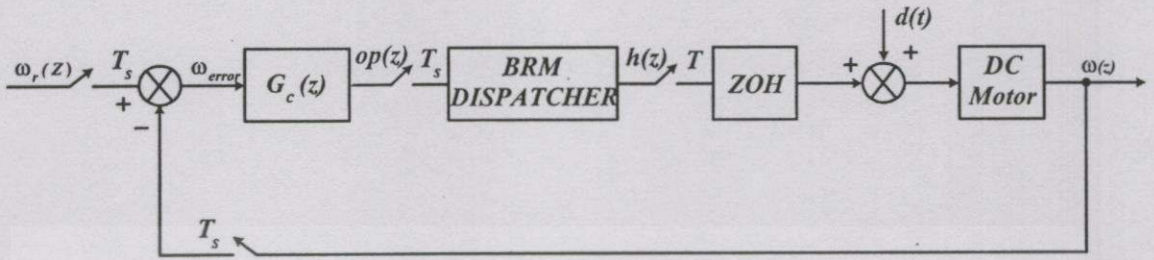
ripple คือ ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของการตอบสนอง ในสถานะคงตัวต่อ pulse train

โดยผลของค่า ripple ตามสมการ (3.4) สามารถนำมาพิจารณาได้โดยการทดลองกำหนดให้อัตราส่วนของ $T/T_p = 0.01$ และ $m = 4$ (15 pulse ต่อ ไซเคิล) ผลของ ripple ในสถานะคงตัวที่รูปแบบต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงค่า ripple ที่เอาต์พุต เมื่อ $T/T_p = 0.01$ และ $m = 4$

3.2 โครงสร้างของระบบควบคุม



รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบลูปปิด

สำหรับการออกแบบระบบควบคุมนั้น ได้กำหนดโครงสร้างของระบบควบคุมแบบลูปปิดไว้ดังรูปที่ 3.3 โดยออกแบบตัวควบคุม $G_c(z)$ เป็นแบบ proportion plus integral [7] ที่กำหนดให้ K_c คือ อัตราขยายของตัวควบคุม และ T_i คือ integral time ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมสามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$G_c(z) = K_c \left\{ 1 + \frac{T_s}{T_i} \frac{z}{z-1} \right\} \tag{3.5}$$

เมื่อกำหนดให้ T_s คือ เวลาในการสุ่ม $= (2^m - 1)T$ และจากรูปที่ 3.3 นั้น ถ้าพิจารณาให้อุปกรณ์ Zero Order Hold (ZOH) ต่อรวมอยู่กับ plant ซึ่งสามารถกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามสมการ (3.6)

$$G_{ph}(s) = G_h(s)G_p(s) = K_p \left\{ \frac{1 - e^{-sT_s}}{s(T_p s + 1)} \right\} \tag{3.6}$$

โดยที่ฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการ (3.6) เขียนในรูปของ Z-Transform ได้ดังนี้คือ

$$G_{ph}(z) = K_p \left\{ \frac{1 - e^{-T_s/T_p}}{(z - e^{-T_s/T_p})} \right\} \tag{3.7}$$

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของระบบควบคุมดังรูปที่ 3.3 และฟังก์ชันถ่ายโอนในส่วนต่างๆ ของระบบแล้วนั้นสามารถกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบลูปปิดได้ดังสมการ (3.8) โดยกำหนดให้

BRM dispatcher คือ dc gain (K_d) ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1294 mW/bit

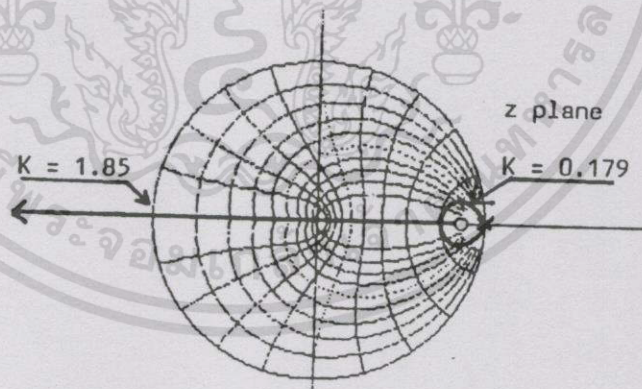
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(z) = \frac{\omega(z)}{\omega_r(z)} = \frac{K_d G_c(z) G_{ph}(z)}{1 + K_d G_c(z) G_{ph}(z)}$$

$$= \frac{K_d K_c K_p \left[\frac{(1 + T_s / T_i) z - 1}{z - 1} \right] \times \left[\frac{1 - e^{-T_s / T_p}}{z - e^{-T_s / T_p}} \right]}{1 + K_d K_c K_p \left[\frac{(1 + T_s / T_i) z - 1}{z - 1} \right] \times \left[\frac{1 - e^{-T_s / T_p}}{z - e^{-T_s / T_p}} \right]} \tag{3.8}$$

สำหรับสมการ (3.8) ถ้ากำหนดให้ $x = e^{-T_s / T_p}$ และ $K = K_c K_d K_p (1 - x)$ ดังนั้นสมการคุณลักษณะเขียนได้ตามสมการ (3.9) ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้เทคนิค Root locus ที่กำหนดให้ K จากการทดสอบด้วยวิธี Trial and error ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.179 ถึง 1.85

$$(z - 1)(z - x) + K \{ (1 + T_s / T_i) z - 1 \} = 0 \tag{3.9}$$



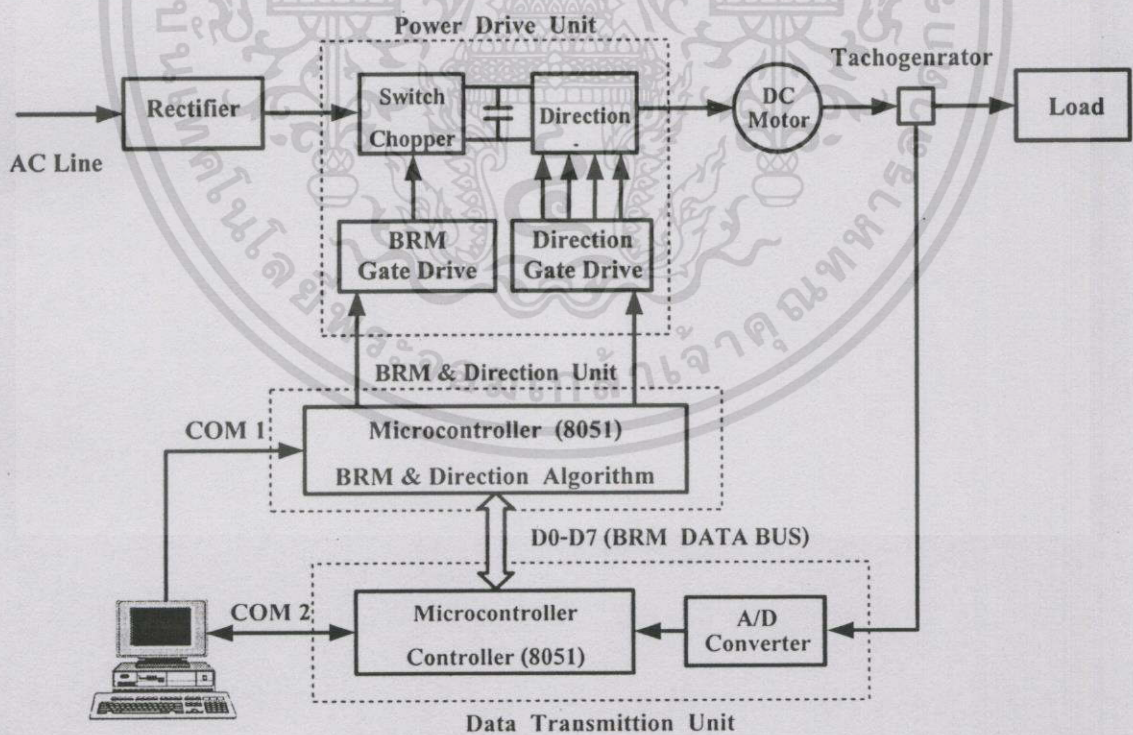
รูปที่ 3.4 แสดงการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ Root Locus

3.2.1 การออกแบบทางฮาร์ดแวร์

โครงสร้างสำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนามแยก กระตุ้น แบบ 4 ควอดแรนต์ ด้วยเทคนิค BRM ประกอบด้วย 5 ส่วนหลักๆ คือ

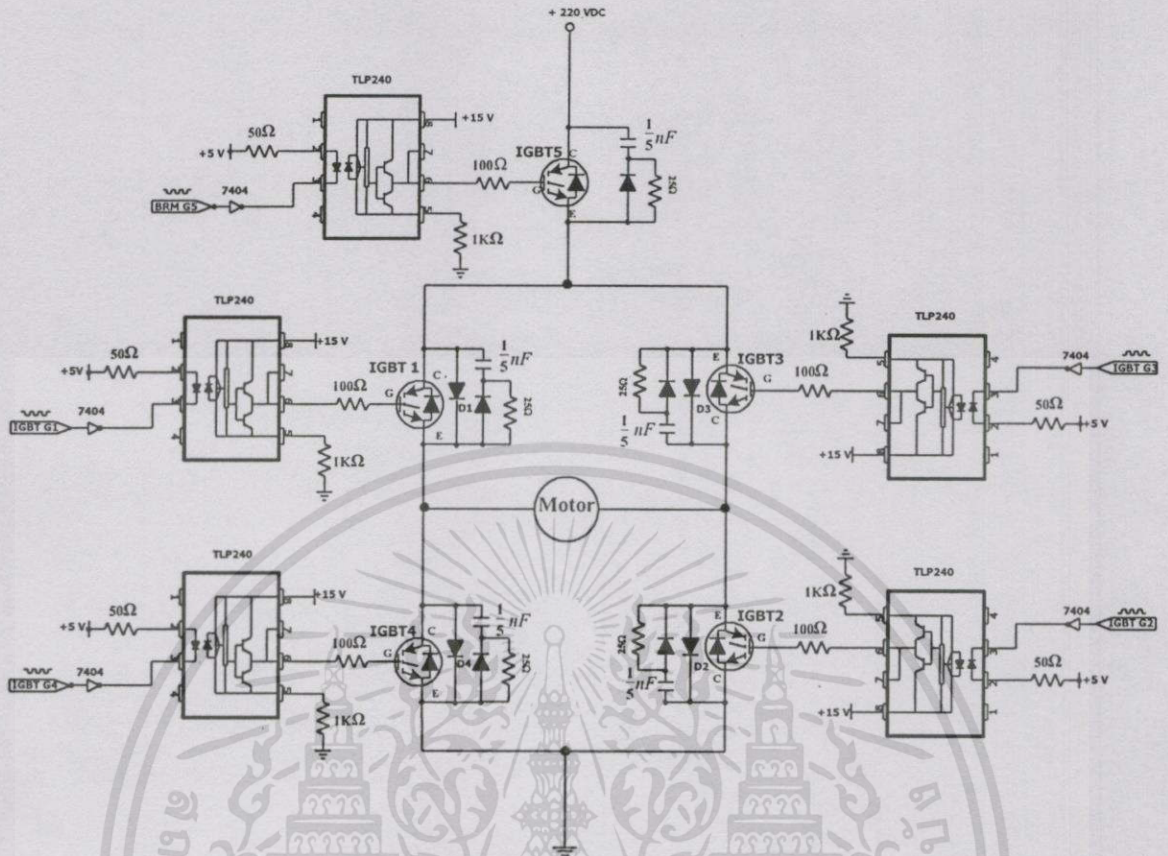
1. ไมโครคอมพิวเตอร์ (Microcomputer)
2. ชุดวงจรขับนำ (Power Drive Unit)
3. ชุดสร้างสัญญาณ BRM และกำหนดการทำงาน 4 ควอดแรนต์ (BRM & Direction Unit)
4. ชุดรับส่งข้อมูลสัญญาณ BRM และ Tachogenerator (Data Transmission Unit)
5. ชุดเทคโคเจนเนอเรเตอร์ (Tachogenerator)

จากรูปที่ 3.5 เมื่อสัญญาณป้อนกลับจาก Tachogenerator มายังส่วนวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อก เป็นดิจิทัลของชุดรับส่งข้อมูลสัญญาณ BRM และ Tachogenerator ส่งผ่านไปยังไมโครคอมพิวเตอร์ ทำการประมวลผลตามวิธีการควบคุมแบบ PI เพื่อกำหนดส่งรูปแบบ BRM ที่เหมาะสม ไปยังวงจรกำลัง ผ่านทางชุดสร้างสัญญาณ BRM และกำหนดการทำงาน 4 ควอดแรนต์ สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้ได้ทิศทางตามเงื่อนไขที่ต้องการ



รูปที่ 3.5 บล็อกไดแกรมการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรขับนำ

การทำงานของวงจรขับนำ ดังรูปที่ 3.6 สามารถอธิบายและแสดงวงจรการทำงานประกอบด้วย ไอจีบีที 5 ตัว ต่อรวมกันเป็นวงจรสลับสวิทช์แบบซอเฟเปอร์ โดยที่ไอจีบีที 5 ทำหน้าที่กำหนดการจ่ายแรงดันให้กับชุดกำหนดการทำงาน 4 ควอดเรนต์ ตามรูปแบบของ BRM ที่ได้รับจากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยผ่านทีแอลพีซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขับนำแรงดันที่ขาเกิดของไอจีบีทีมีทั้งหมด 5 ชุด ซึ่งชุดที่ 1 รับสัญญาณ BRM จากชุดสร้างสัญญาณ BRM และกำหนดการทำงาน 4 ควอดเรนต์ และอีก 4 ชุด รับสัญญาณจากชุดกำหนดการทำงาน 4 ควอดเรนต์ ให้ได้ตามเงื่อนไข การทำงานแบบ 4 ควอดเรนต์ เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ในการควบคุมมอเตอร์นั้น ควอดเรนต์ที่หนึ่งและควอดเรนต์ที่สามให้มอเตอร์หมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ดและรีเวิร์ส สำหรับการทำงานของควอดเรนต์ที่สองและควอดเรนต์ที่สี่ เป็นการเบรกมอเตอร์ขณะหมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ด และรีเวิร์ส โดยแยกการทำงานเป็นแต่ละโหมดดังนี้

โหมดควบคุมแบบฟอร์เวิร์ด

มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดยการป้อนรูปแบบ BRM เข้าที่ $IGBT_1, IGBT_2$ ให้อยู่ในสถานะ “ON” ส่วน $IGBT_3, IGBT_4$ ให้อยู่ในสถานะ “OFF” ซึ่งแรงดันที่เครื่องกำเนิดสร้างขึ้น

และกระแสอาร์เมเจอร์จะมีทิศทางเป็นบวก ส่งผลให้มอเตอร์มีทิศทางการหมุนสอดคล้องกับทิศทางของแรงบิด

โหมดควบคุมการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟในทิศทางฟอร์เวิร์ด

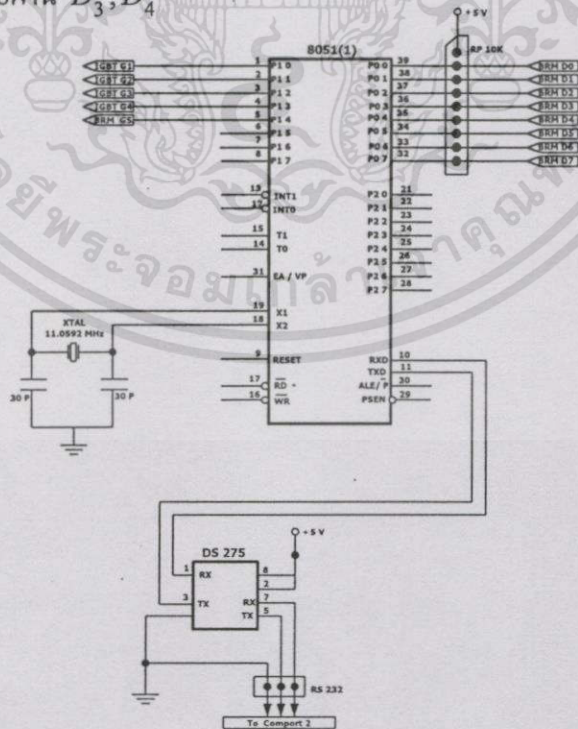
เป็นลักษณะการเบรกมอเตอร์ที่หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดยการป้อนรูปแบบ BRM เข้าที่ $IGBT_4$ ให้อยู่ในสถานะ "ON" ส่วน $IGBT_1, IGBT_2, IGBT_3$ ให้อยู่ในสถานะ "OFF" ซึ่งแรงบิดกับกระแสจะมีทิศทางเป็นลบ โดยกระแสจะไหลผ่าน $IGBT_4, D_2$ และทิศทางของพลังงานจะไหลย้อนกลับสู่แหล่งจ่ายโดยผ่าน D_1, D_2

โหมดควบคุมแบบรีเวิร์ส

มอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยการป้อนรูปแบบ BRM เข้าที่ $IGBT_3, IGBT_4$ ให้อยู่ในสถานะ "ON" ส่วน $IGBT_1, IGBT_2$ ให้อยู่ในสถานะ "OFF" ซึ่งแรงดันที่เครื่องกำเนิดสร้างขึ้นและกระแสอาร์เมเจอร์รวมทั้งแรงบิดมีทิศทางเป็นลบ

โหมดควบคุมการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟในทิศทางรีเวิร์ส

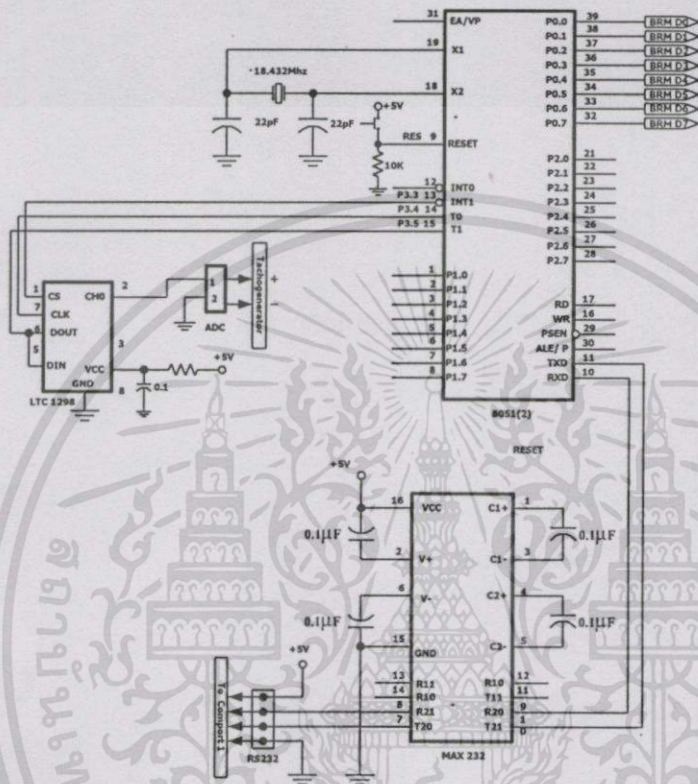
เป็นลักษณะการเบรกมอเตอร์ที่หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยการป้อนรูปแบบ BRM เข้าที่ $IGBT_2$ ให้อยู่ในสถานะ "ON" ส่วน $IGBT_1, IGBT_3, IGBT_4$ อยู่ในสถานะ "OFF" ซึ่งแรงบิดกับกระแสจะมีทิศทางเป็นบวก โดยกระแสจะไหลผ่าน $IGBT_2, D_4$ และทิศทางของพลังงานจะไหลย้อนกลับสู่แหล่งจ่ายโดยผ่าน D_3, D_4



รูปที่ 3.7 แสดงชุดสร้างสัญญาณ BRM และกำหนดการทำงาน 4 ควอดแรนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 แสดงชุดสร้างสัญญาณ BRM และกำหนดการทำงาน 4 ควอแตรนซ์ โดยไมโครคอลโทรลเลอร์ 8051(1) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ BRM ซึ่งข้อมูลจาก BRM D0-D7 ของชุดรับส่งข้อมูลสัญญาณ BRM และ Tachogenerator กำหนดสัญญาณ BRM ตามต้องการ และทำการกำหนดเลือกการทำงาน 4 ควอแตรนซ์ โดยคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต RS232 (COM 2)



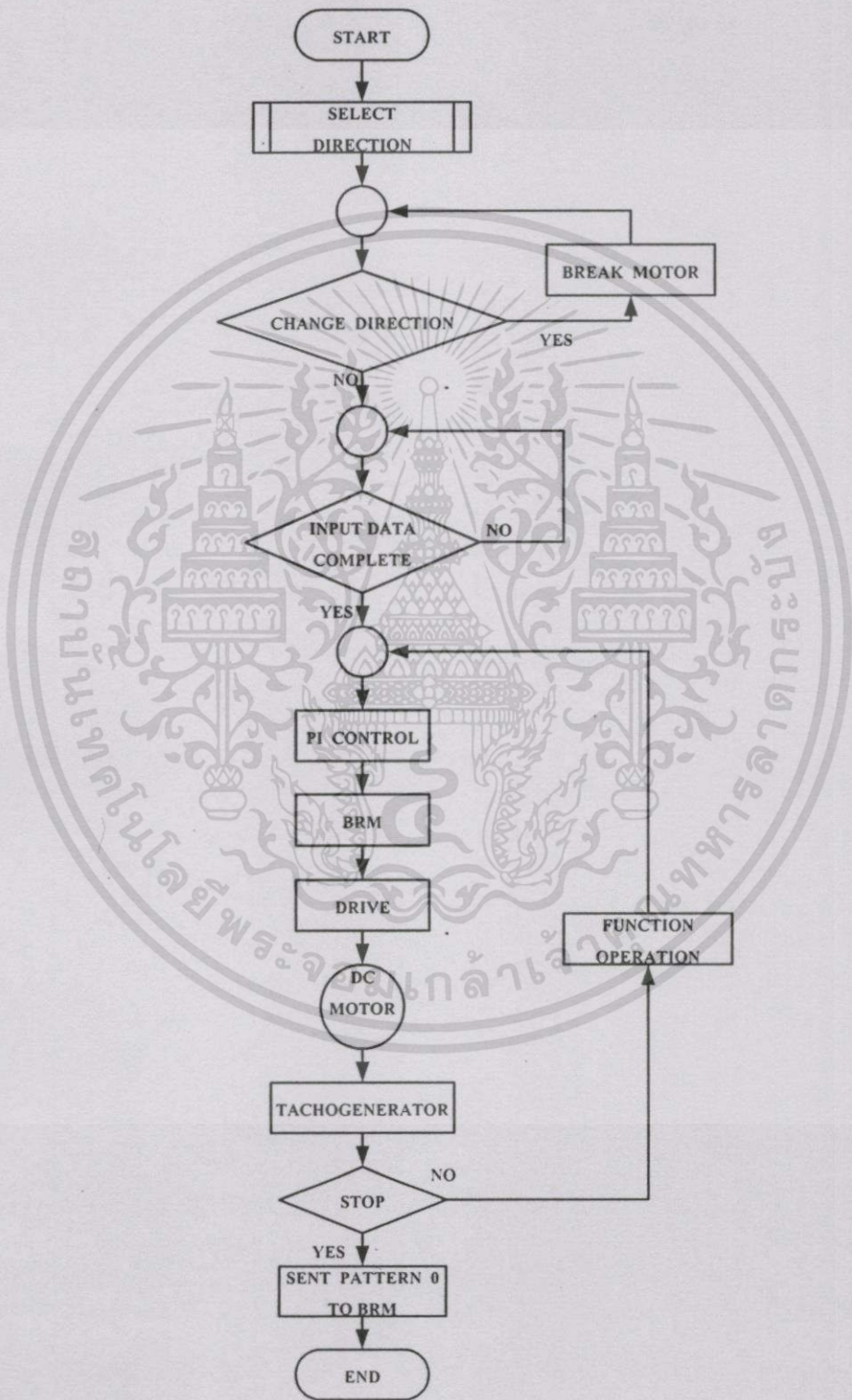
รูปที่ 3.8 ชุดรับส่งข้อมูลสัญญาณ BRM และ Tachogenerator

จากรูปที่ 3.8 ชุดรับส่งข้อมูลสัญญาณ BRM และ Tachogenerator ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลจาก Tachogenerator ผ่าน LTC 1298 สำหรับเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล มายังไมโครคอลโทรลเลอร์ 8051(2) ไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต RS232 (COM 1) และกำหนดข้อมูลสัญญาณ BRM จากการประมวลผลของคอมพิวเตอร์

3.2.2 การออกแบบทางซอฟต์แวร์

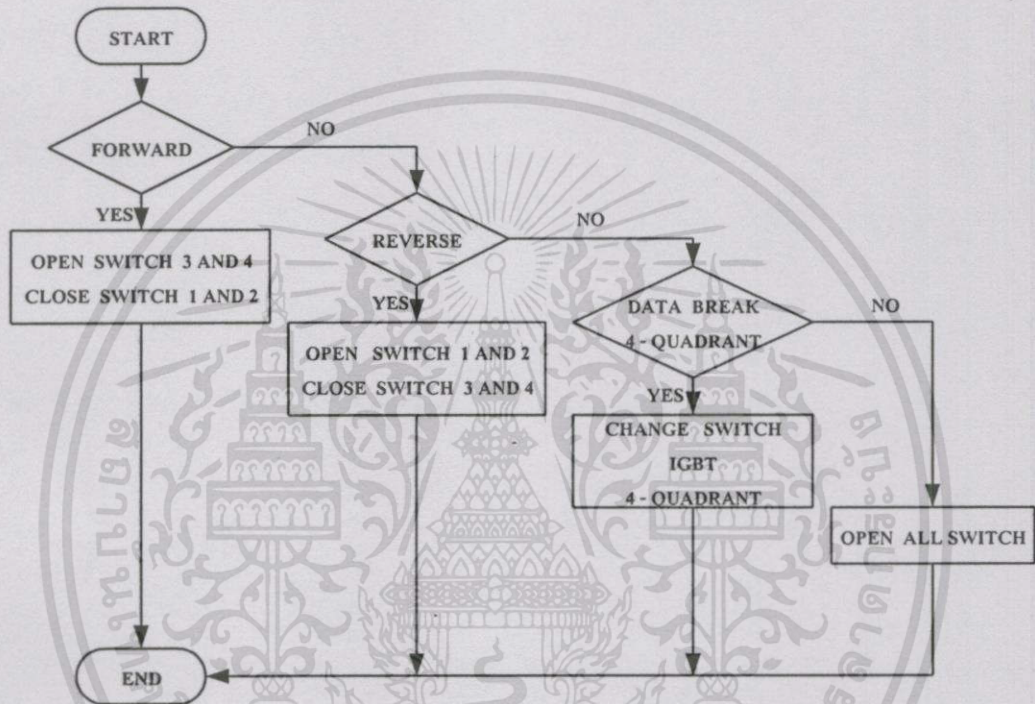
การทำงานเริ่มต้นจากโปรแกรมทำการเลือกทิศทางการหมุนของมอเตอร์ จากนั้นรับข้อมูลอินพุตเพื่อตรวจสอบฟังก์ชันการทำงานของระบบ แล้วโปรแกรมจะทำการกำหนดรูปแบบการส่งสัญญาณ BRM ตามการคำนวณจากตัวควบคุมแบบ PI แล้วส่งผลที่ได้ไปยังชุดขับนำเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังงานให้กับวงจรกำลังในการควบคุมมอเตอร์ สำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตามข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดความเร็วรอบของ Tachogenerator แล้วส่งข้อมูลกลับไปยังตัวควบคุม

โดยผ่าน A/D converter เพื่อควบคุมให้การทำงานเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดแต่ถ้าต้องการให้มอเตอร์หยุดการทำงานโปรแกรมก็จะส่งสัญญาณ BRM รูปแบบที่ " 0 " ไปยังส่วนควบคุมซึ่งส่งผลให้มอเตอร์หยุดทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



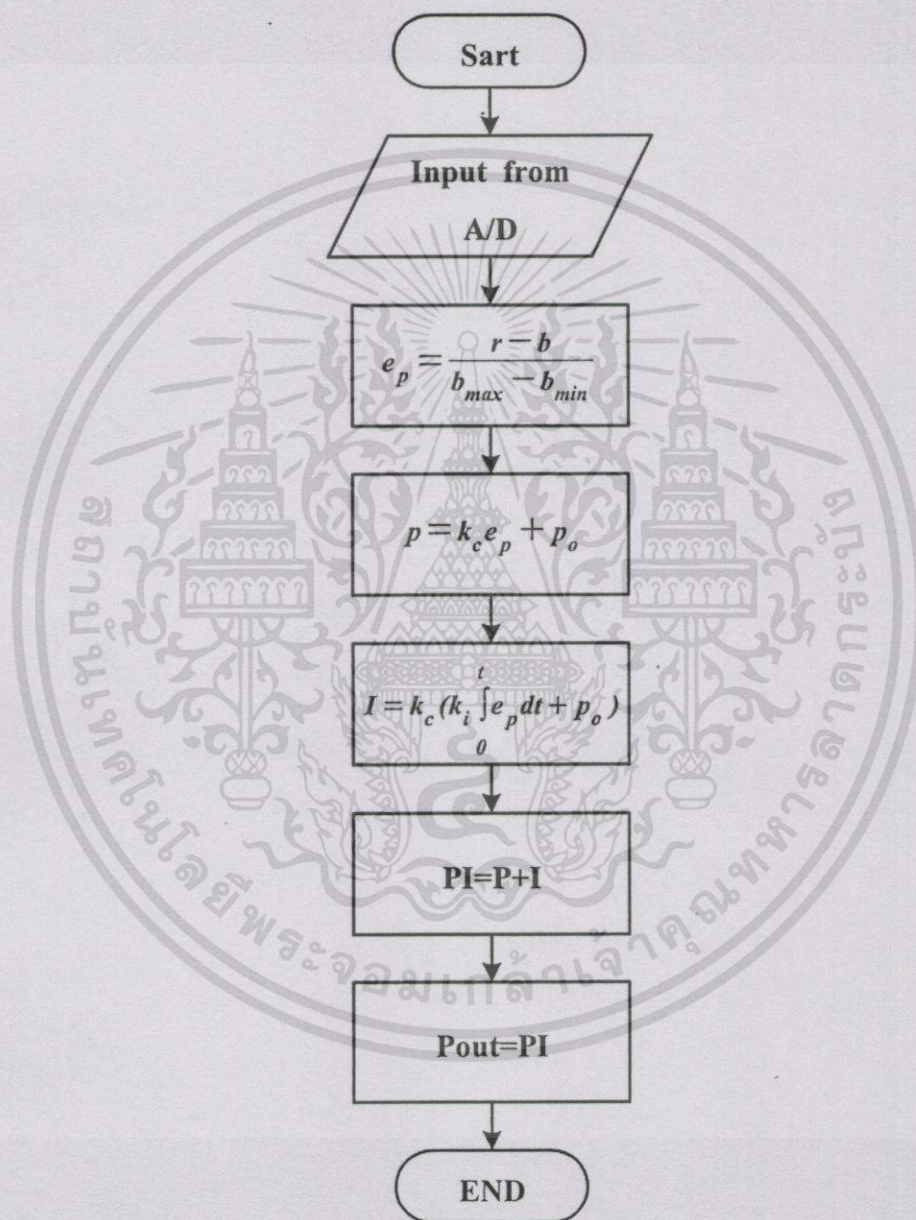
เอกสารรูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบทั้งหมดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชุดเลือกทิศทางการหมุนของมอเตอร์ สามารถอธิบายการทำงานได้ดังรูปที่ 3.10 โดยชุดเลือกทิศทางการหมุนของมอเตอร์สามารถเลือกทิศทางการหมุนแบบฟอร์เวิร์ดและรีเวิร์ด ซึ่งในทิศทางการหมุนทั้งสองสามารถควบคุมการเบรกได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพการทำงานของชุดเลือกทิศทางการหมุนของมอเตอร์

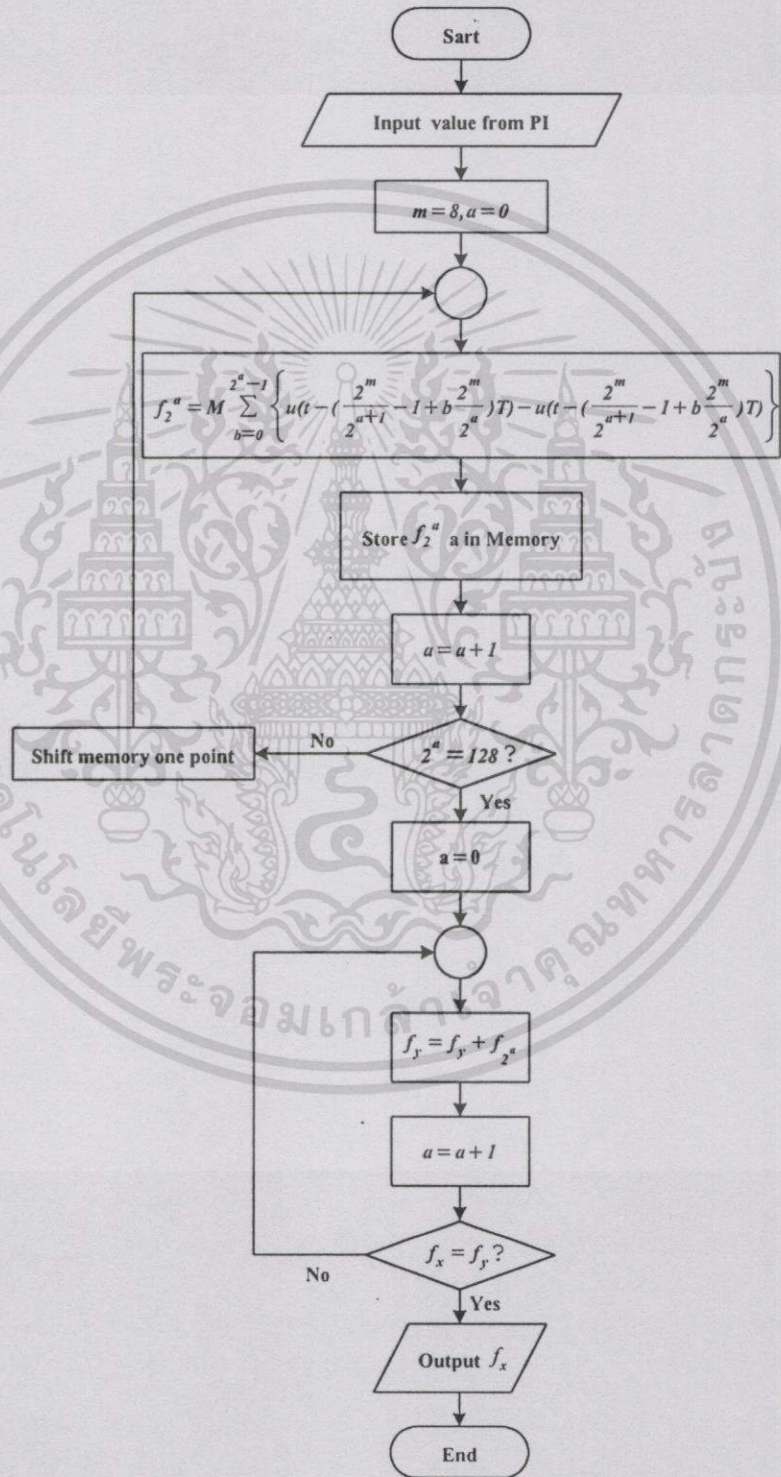
สำหรับตัวควบคุมแบบ PI ที่ใช้ในระบบควบคุมนั้นสามารถอธิบายการทำงานได้ดังรูปที่ 3.11 โดยที่ตัวควบคุมจะทำหน้าที่กำหนดรูปแบบ BRM เพื่อส่งไปยังชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 3.11 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมแบบ PI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรูปที่ 3.12 นั้นแสดงการสร้างพัลส์ BRM ที่กำหนดให้โปรแกรมสร้างพัลส์ BRM ทั้งหมด 8 รูปแบบหลัก ส่วนรูปแบบอื่นๆ นั้น จะนำรูปแบบหลักที่สร้างขึ้นมากระทำ Linear Combination ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เพื่อให้ได้รูปแบบ BRM ที่เหมาะสมส่งไปยังชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ต่อไป ซึ่งกระบวนการดังกล่าวถูกกำหนดจากตัวควบคุม



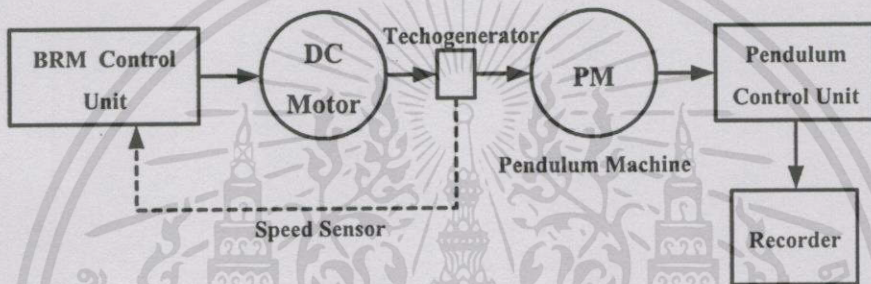
รูปที่ 3.12 แสดงแผนภาพการสร้างรูปแบบพัลส์ BRM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนาม แยกกระตุ้นแบบ 4 คิวแควนต์ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้มีพิกัดดังนี้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 220 โวลต์ 2.0 แอมป์ 330วัตต์ แรงดันกระตุ้น 220 โวลต์ กระแสกระตุ้น 0.5 แอมป์ ความเร็วรอบ 2250 รอบต่อนาที และ Techogenerator มีพิกัด1 โวลต์ ต่อ 1000 รอบ

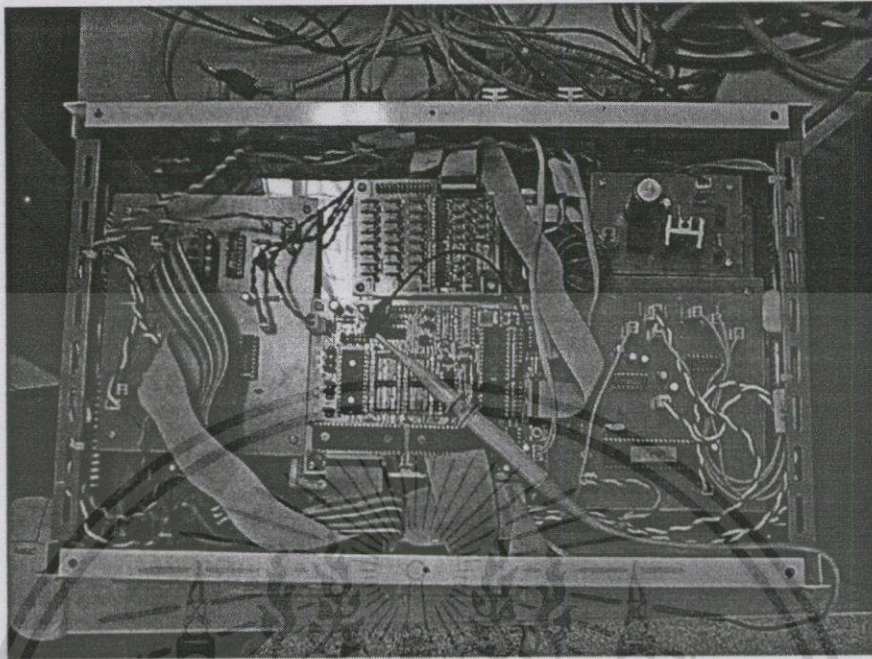


รูปที่ 4.1 บล็อกไดแกรมการทดสอบการควบคุมมอเตอร์

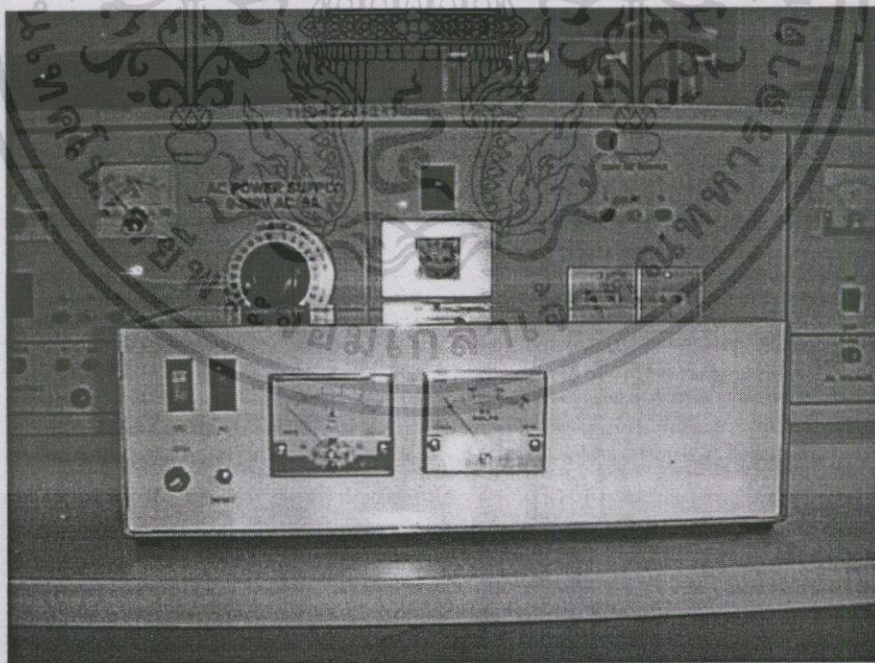


รูปที่4.2 แสดงการทดสอบควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงชุดควบคุมแบบ BRM (ด้านหลัง)

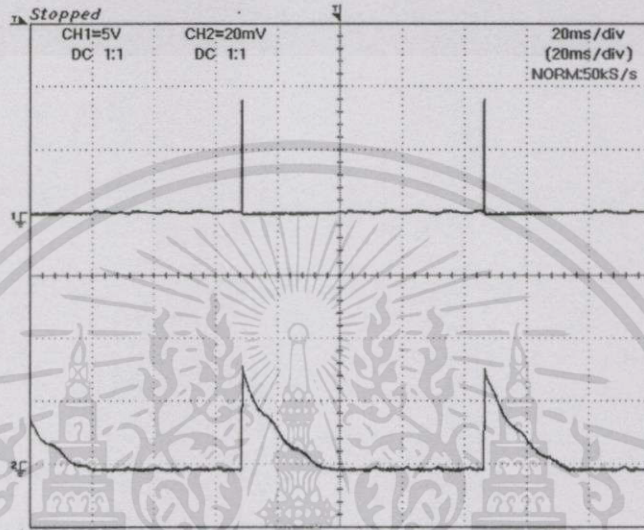


รูปที่ 4.4 แสดงชุดควบคุมแบบ BRM (ด้านหน้า)

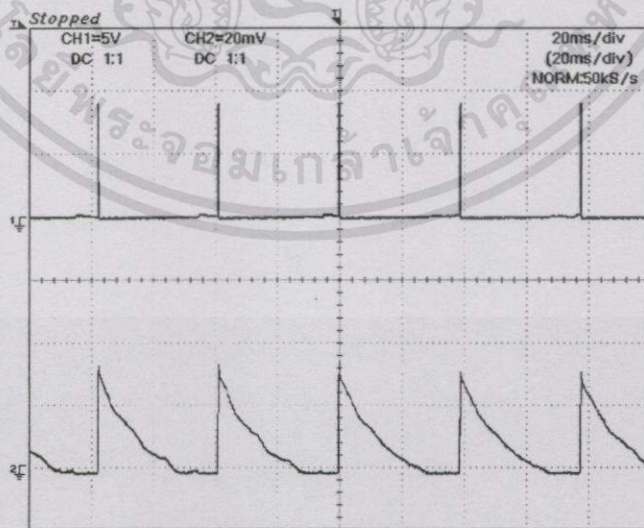
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลการทดลองส่วนที่ 1

ผลการทดลองในส่วนที่ 1 เป็นการแสดงผลของรูปพัลส์ BRM รูปแบบหลักที่สร้างขึ้นและ
กระแสของรูปพัลส์ BRM ดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.13

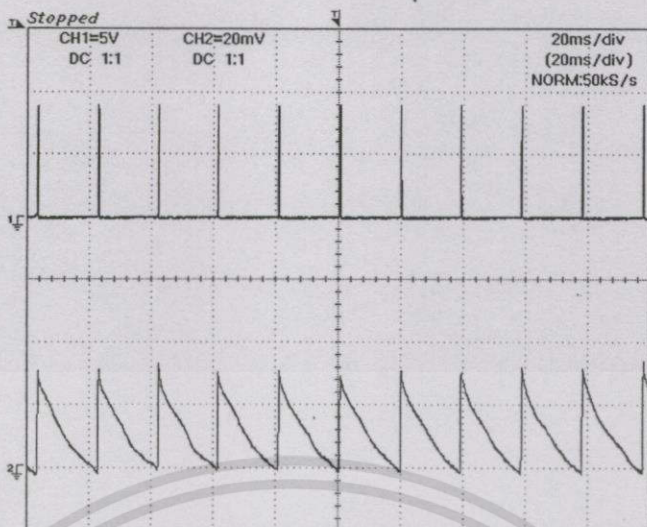


รูปที่ 4.5 แสดงรูปพัลส์ BRM (บน) และสัญญาณกระแส BRM (ล่าง) รูปแบบที่ 1

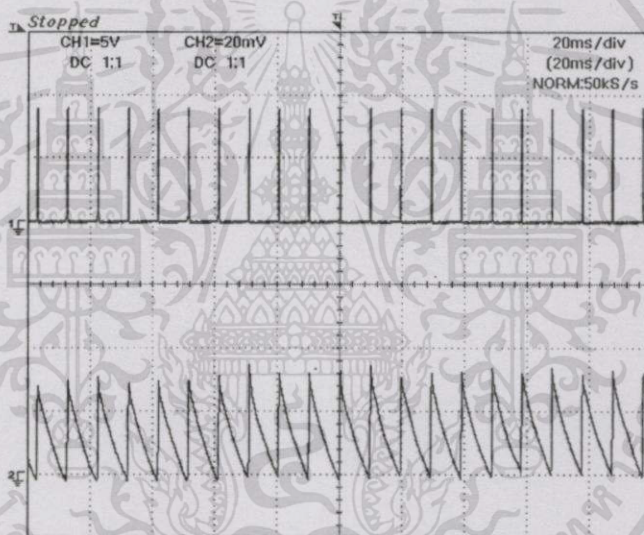


รูปที่ 4.6 แสดงรูปพัลส์ BRM (บน) และสัญญาณกระแส BRM (ล่าง) รูปแบบที่ 2

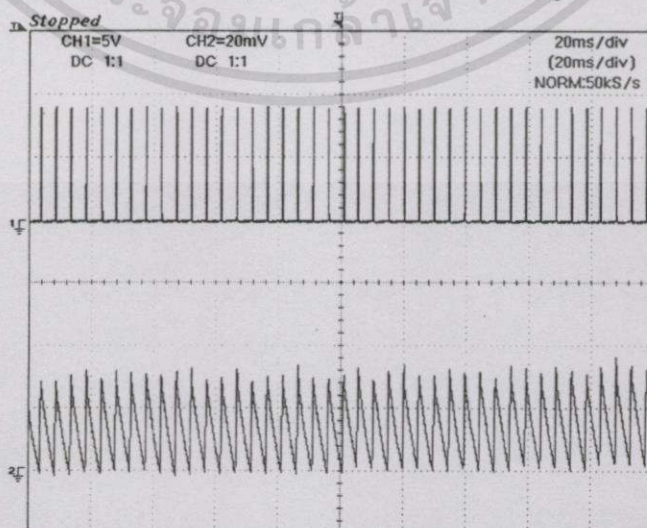
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



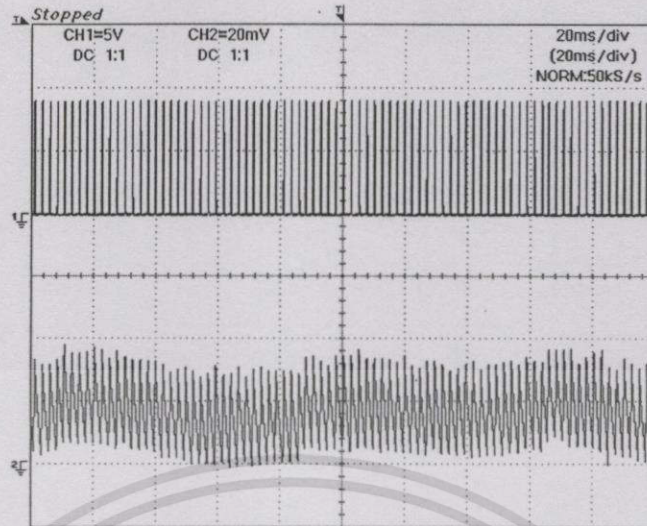
รูปที่ 4.7 แสดงรูปพัลส์ BRM (บน) และสัญญาณกระแส BRM (ล่าง) รูปแบบที่ 4



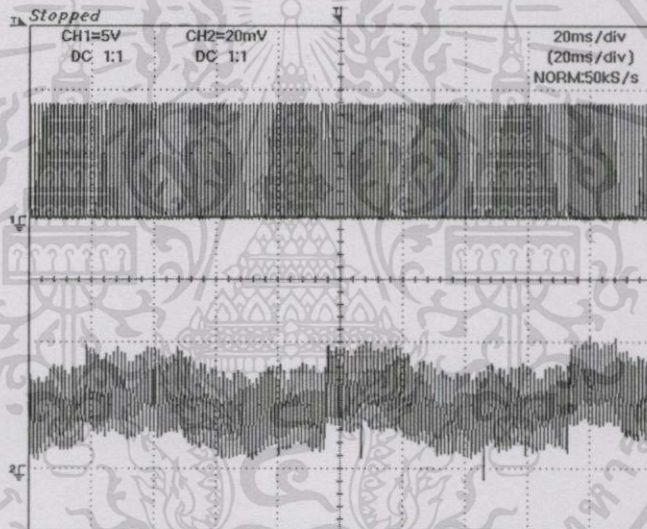
รูปที่ 4.8 แสดงรูปพัลส์ BRM (บน) และสัญญาณกระแส BRM (ล่าง) รูปแบบที่ 8



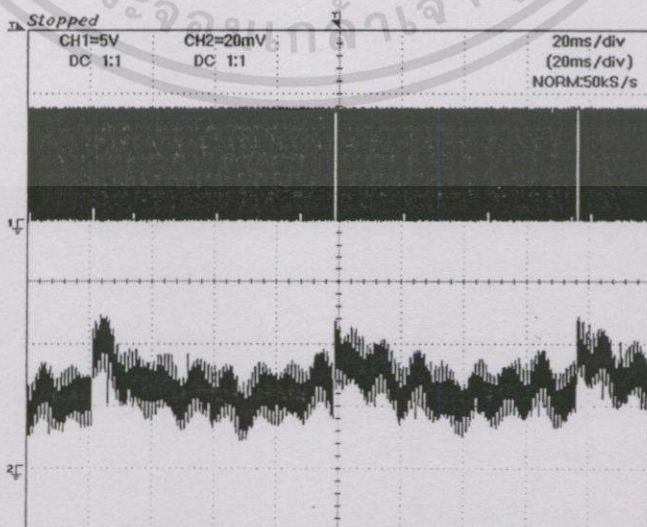
เอกสาร รูปที่ 4.9 แสดงรูปพัลส์ BRM (บน) และสัญญาณกระแส BRM (ล่าง) รูปแบบที่ 16 ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงรูปพัลส์ BRM (บน) และสัญญาณกระแส BRM (ล่าง) รูปแบบที่ 32

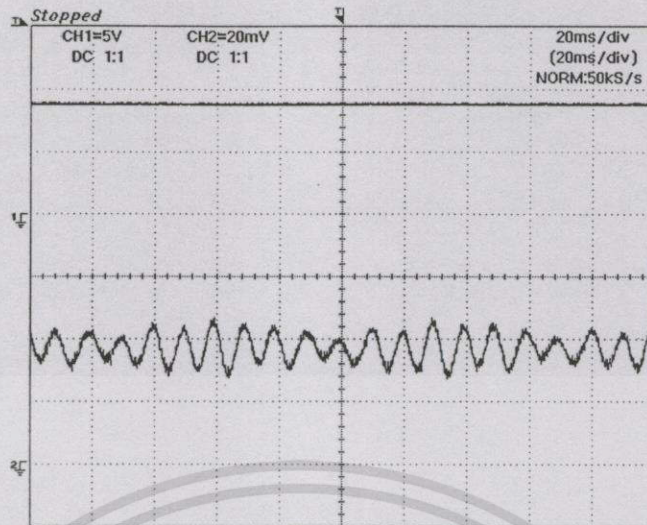


รูปที่ 4.11 แสดงรูปพัลส์ BRM (บน) และสัญญาณกระแส BRM (ล่าง) รูปแบบที่ 64



รูปที่ 4.12 แสดงรูปพัลส์ BRM (บน) และสัญญาณกระแส BRM (ล่าง) รูปแบบที่ 128

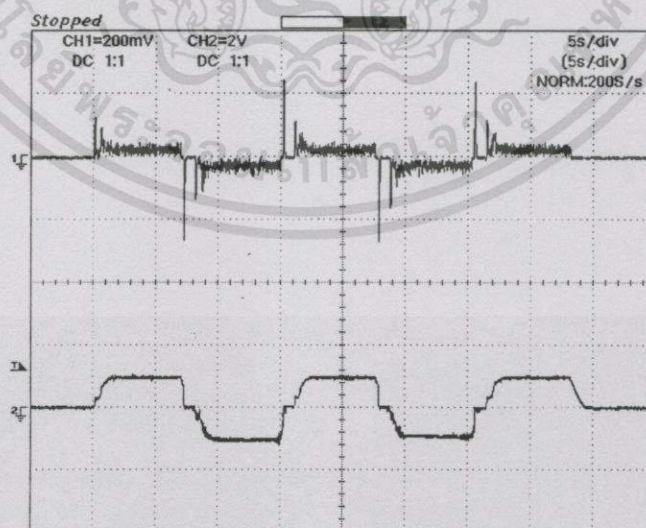
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงรูปพัลส์ BRM (บน) และสัญญาณกระแส BRM (ล่าง) รูปแบบที่ 255

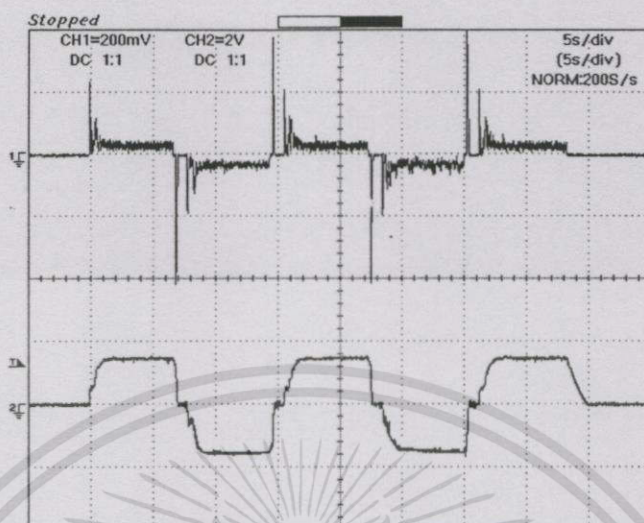
4.2 ผลการทดลองส่วนที่ 2

การทดสอบผลตอบสนองความเร็วและกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้นแบบ 4 ขั้วแตรนต์ ด้วยเทคนิค BRM ทั้งขณะไร้โหลดและขณะขับโหลดที่ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.14 ถึง 4.25 โดยกำหนดค่าความเร็วอ้างอิงไว้ที่ 2250 รอบต่อนาที เลือกค่าเกณฑ์ $K_p = 20$ $T_i = 0.067$ วินาที และกำหนดเวลาสแกน $T_s = 0.667$ มิลลิวินาที ตามหลักการ Ziegler Nichols Tuning [1]

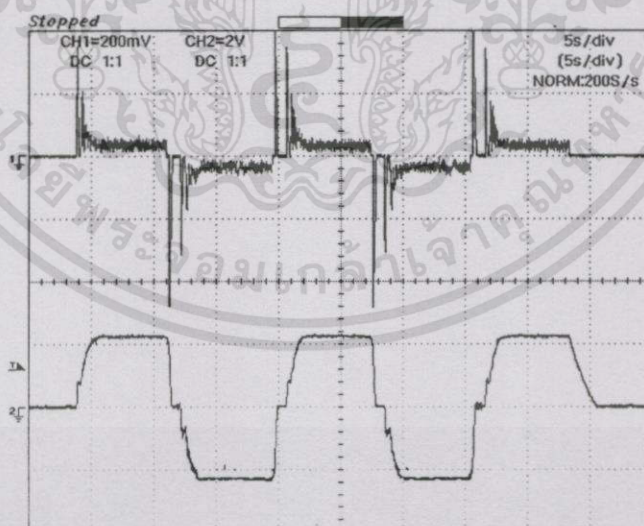


รูปที่ 4.14 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 1000 รอบต่อนาที ขณะไร้โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

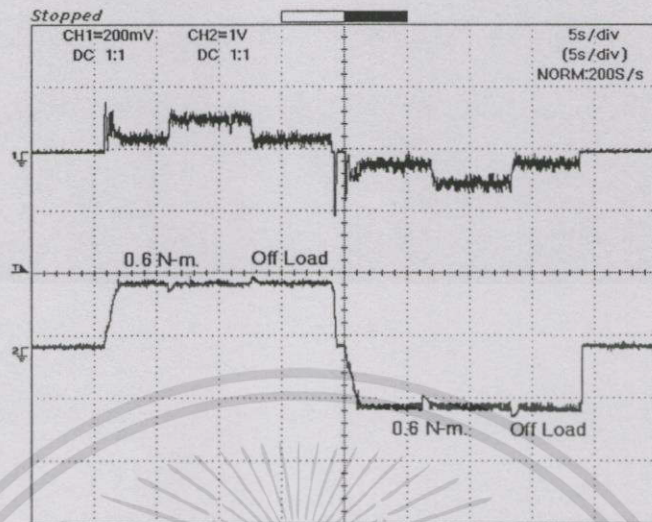


รูปที่ 4.15 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 1500 รอบต่อนาที ขณะไร้โหลด

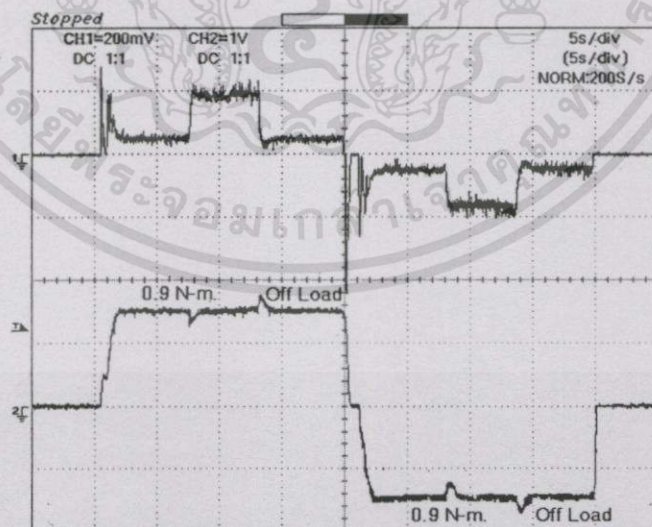


รูปที่ 4.16 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 2250 รอบต่อนาที ขณะไร้โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

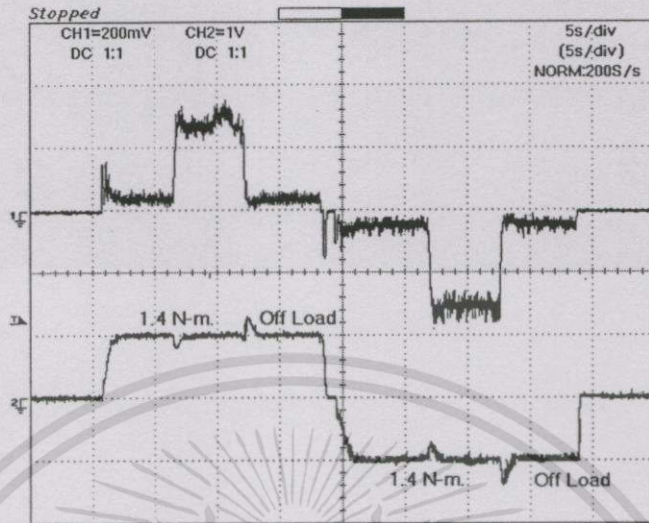


รูปที่ 4.17 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 1000 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 0.6 นิวตันต่อเมตร

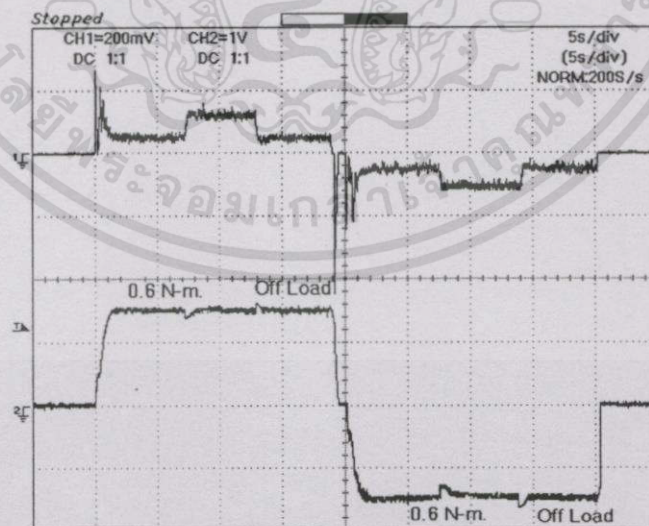


รูปที่ 4.18 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 1000 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 0.9 นิวตันต่อเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

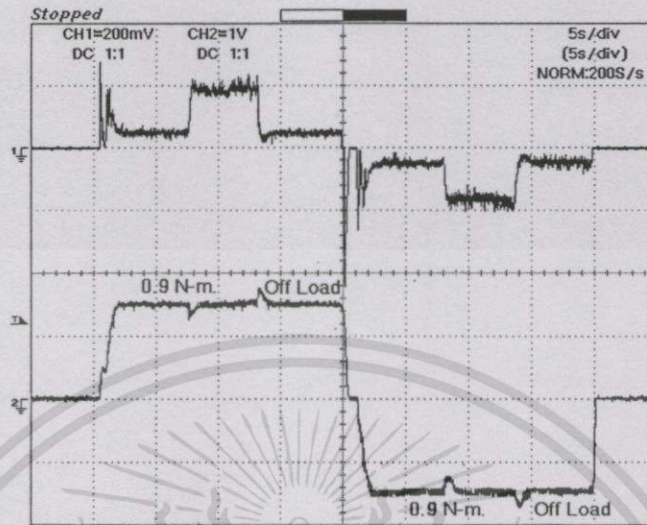


รูปที่ 4.19 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 1000 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 1.4 นิวตันต่อเมตร

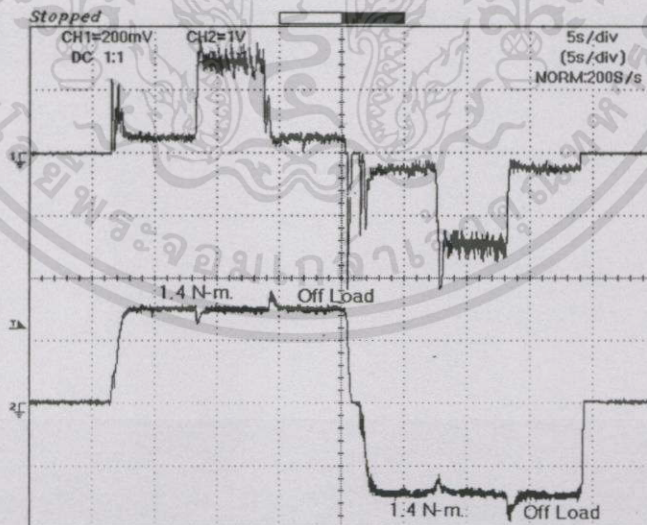


รูปที่ 4.20 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 1500 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

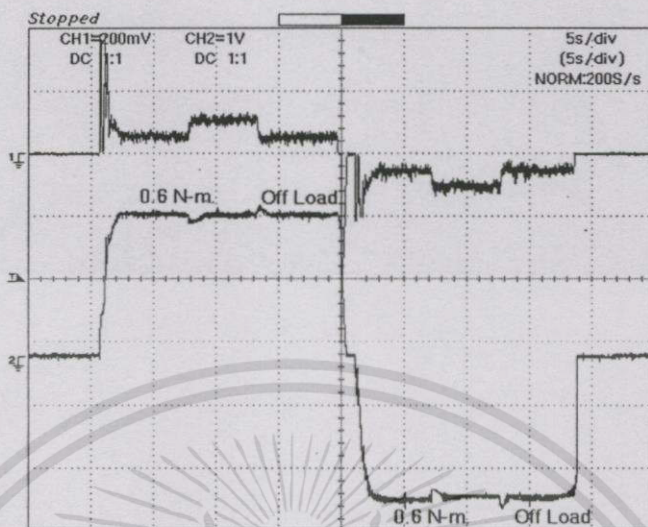


รูปที่ 4.21 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 1500 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 0.9 นิวตันต่อเมตร

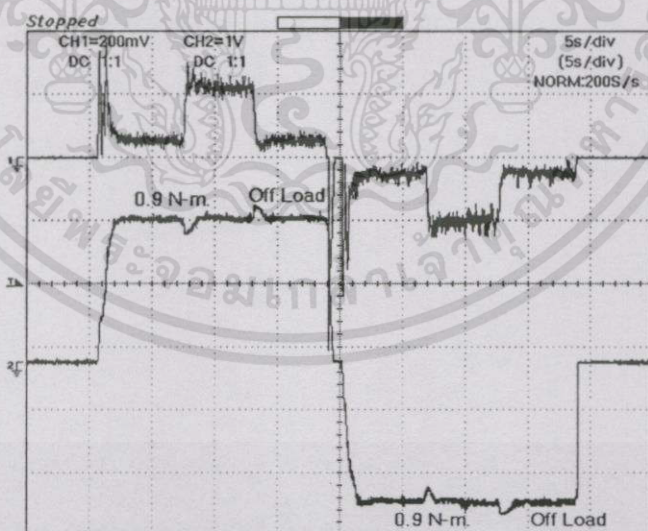


รูปที่ 4.22 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 1500 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 1.4 นิวตันต่อเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

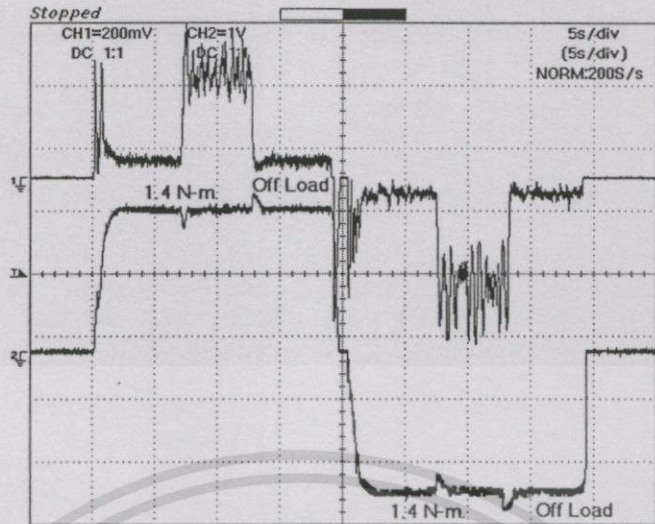


รูปที่ 4.23 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 2250 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 0.6 นิวตันต่อเมตร



รูปที่ 4.24 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 2250 รอบต่อนาที ขณะขับโหลด 0.9 นิวตันต่อเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แสดงสัญญาณกระแส (บน) และความเร็ว (ล่าง) ที่ 2250 รอบต่อนาที ขณะขับ โหลด 1.4 นิวตันต่อเมตร

4.3 ผลการทดลองส่วนที่ 3

ผลการทดลองส่วนนี้เป็นการพิจารณาคูณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น จากผลการทดลองเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM และจากผลการทดลองกับชุดเครื่องจักรกลไฟฟ้าสำเร็จรูป ที่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบ PWM จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ PWM แสดงดังตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2

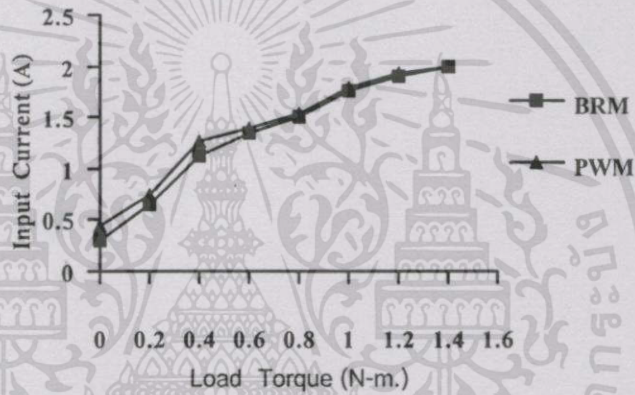
ตารางที่ 4.1 การควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุม แบบ BRM

T (N-m)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
N (rpm)	2250	2250	2250	2250	2250	2250	2250	2250
V_i (V)	140	150	160	170	190	200	211	218
I_i (A)	0.3	0.65	1.12	1.34	1.50	1.75	1.90	2.0
P_i (W)	42.0	97.5	179.2	227.8	285.0	350.0	400.9	436.0
P_o (W)	0	47.1	94.2	141.3	188.4	235.5	282.6	329.7
η (%)	0	48.31	52.57	62.03	66.10	67.28	70.49	75.62

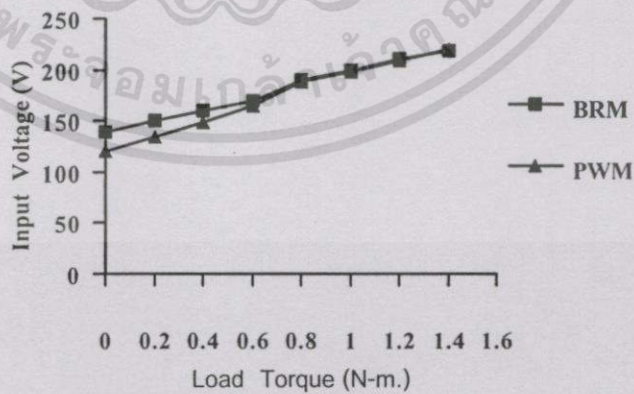
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุม แบบ PWM

T (N-m)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
N (rpm)	2250	2250	2250	2250	2250	2250	2250	2250
V_i (V)	120	135	149	165	189	197	209	220
I_i (A)	0.45	0.74	1.27	1.40	1.53	1.79	1.93	2.0
P_i (W)	54	99.9	189.23	231	289.17	352.63	403.37	440
P_o (W)	0	47.1	94.2	141.3	188.4	235.5	282.6	329.7
η (%)	0	47.15	49.78	61.17	65.15	66.78	70.06	74.93

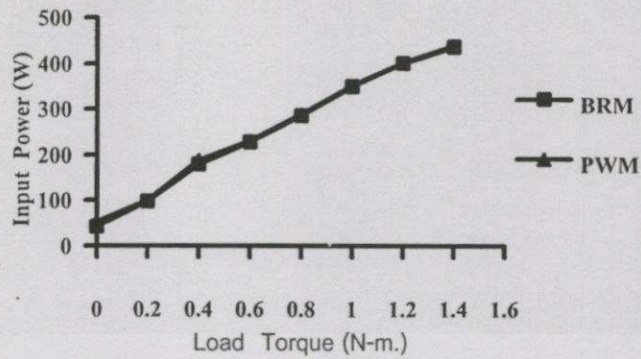


(ก) กราฟเปรียบเทียบกระแสอินพุต

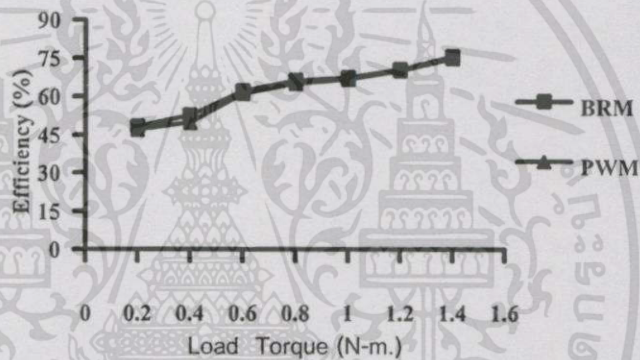


(ข) กราฟเปรียบเทียบแรงดันอินพุต

เอกสารรูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) กราฟเปรียบเทียบกำลังอินพุต



(ง) กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

รูปที่ 4.26 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติ ต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า การควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น แบบ 4 ควอดแรนต์ ด้วยเทคนิคการควบคุม แบบ BRM โดยพิจารณาจากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับเทคนิคการควบคุมแบบ PWM กล่าวได้ว่าเทคนิคการควบคุมแบบ BRM สามารถควบคุมการจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ตามความต้องการใช้งานที่แท้จริง ส่งผลให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทัดเทียมเทคนิคการควบคุม แบบ PWM นอกจากนี้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ เช่น ระบบขับเคลื่อนสายพาน การควบคุมลิฟต์ และงานกลึง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

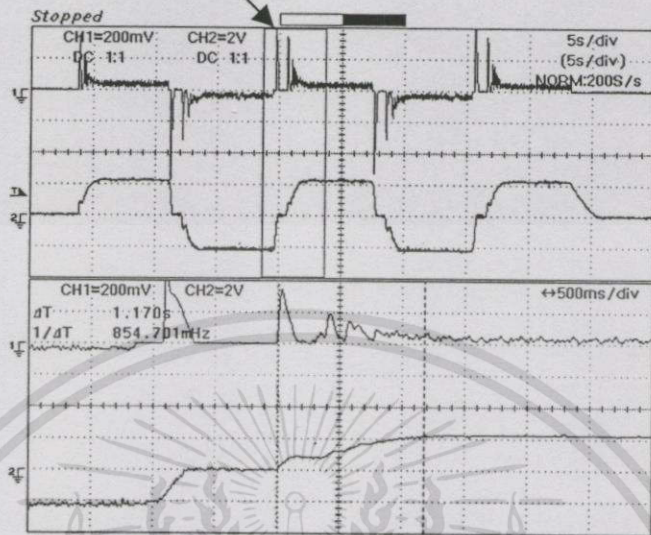
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้น แบบ 4 ควอดแรนท ที่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM นั้น สามารถกำหนดรูปแบบของการจ่ายพลังงานได้อย่างเหมาะสม เพื่อส่งผ่านกำลังไปยังอาร์เมเจอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ โดยทำการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ทำงาน แบบ 4 ควอดแรนท คือ ควอดแรนทที่หนึ่ง และควอดแรนทที่สาม มอเตอร์หมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ดและรีเวิร์ด โดยให้ผลตอบสนองของการเข้าสู่ความเร็วที่กำหนดไว้ไม่เกิน 1.2 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (ก)-(ข) ส่วนควอดแรนทที่สองและควอดแรนทที่สี่ เป็นการเบรกมอเตอร์ขณะหมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ดและรีเวิร์ด ตามหลักการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ ใช้เวลาเบรก 280 มิลลิวินาที ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ก)-(ข) และเทคนิคดังกล่าวสามารถควบคุมผลตอบสนองต่อการเข้าสู่ภาวะคงตัวเมื่อป้อนโวลต์ที่พิกัดโดยใช้เวลา 1.2 วินาที แสดงในรูปที่ 5.3

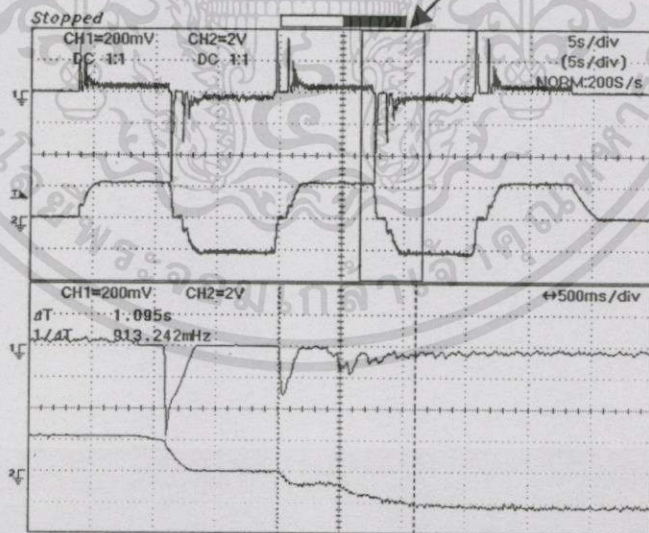
นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาถึงเรื่องของการประหยัดพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์อีกด้วย โดยจากผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 เห็นได้ว่าเทคนิคการควบคุมแบบ BRM นั้น สามารถลดพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เมื่อเทียบกับการควบคุมด้วยเทคนิค PWM [8-9] ซึ่งถ้าพิจารณาตามคุณลักษณะสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง พบว่ามอเตอร์ดังกล่าวถูกออกแบบให้ทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อขับโวลต์เต็มพิกัด นอกจากนี้ยังพบว่าขณะมอเตอร์ทำงานขณะไรโวลต์ และขณะขับโวลต์นั้นพลังงานที่ต้องจ่ายให้กับมอเตอร์ไม่แตกต่างกัน ซึ่งในส่วนของงานวิจัยนี้เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM สามารถควบคุมการจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ตามความต้องการใช้งานที่แท้จริง ส่งผลให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอบเขตการขยายภาพ



(ก) ช่วงเวลาเริ่มหมุน ในทิศทางฟอร์เวิร์ด

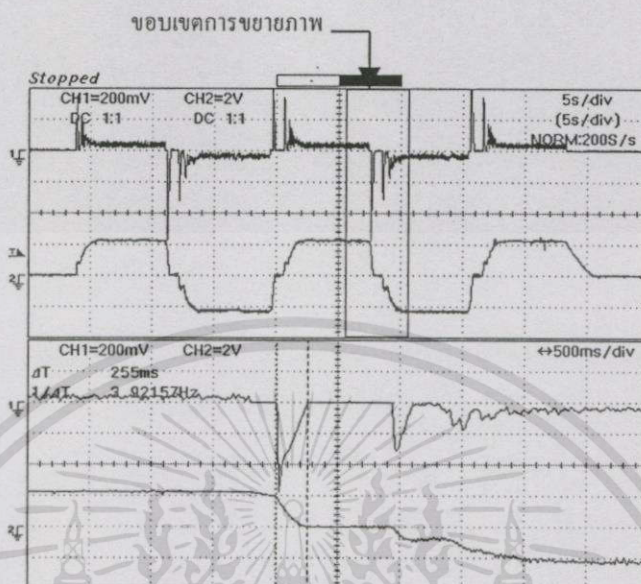
ขอบเขตการขยายภาพ



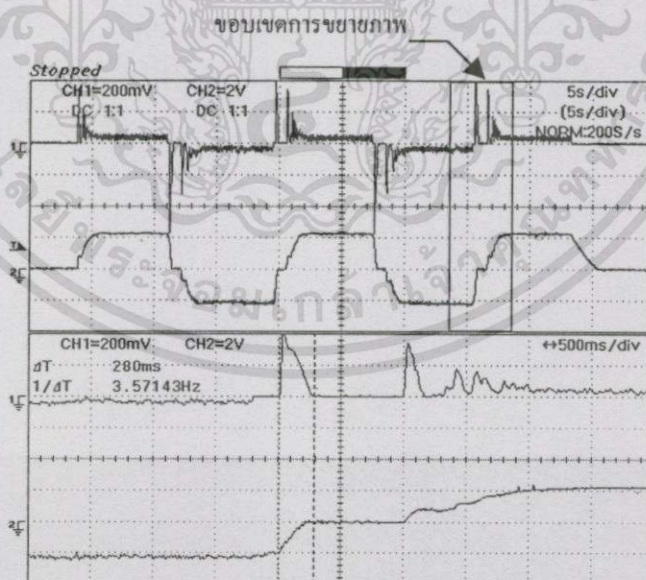
(ข) ช่วงเวลาเริ่มหมุน ในทิศทางรีเวิร์ด

รูปที่ 5.1 แสดงผลตอบสนองของมอเตอร์ช่วงเวลาสภาวะเริ่มหมุน ที่ความเร็ว 2250 รอบ/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

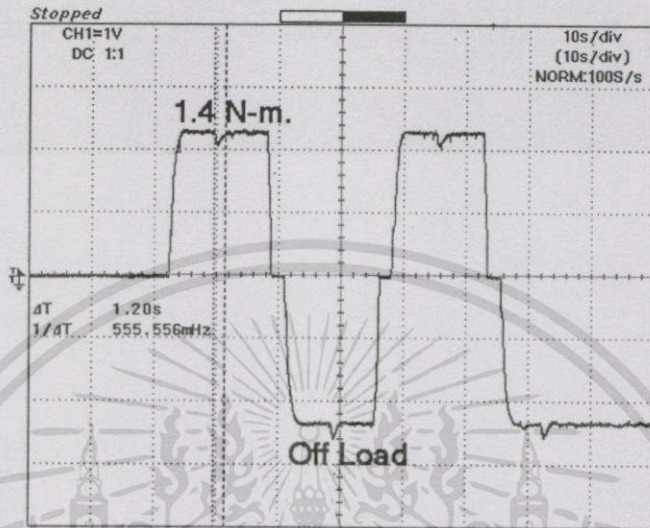


(ก) ช่วงเวลาสภาวะหยุดหมุน ในทิศทางฟอร์เวิร์ด



(ข) ช่วงเวลาสภาวะหยุดหมุน ในทิศทางรีเวิร์ด

รูปที่ 5.2 แสดงผลตอบสนองของมอเตอร์ช่วงเวลาสภาวะหยุดหมุน ที่ความเร็ว 2250 รอบ/นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงผลตอบสนองของมอเตอร์ขณะขับ โหลด 1.4 N-m. ที่ความเร็ว 2250 รอบ/นาที

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

สำหรับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดขดลวดสนามแยกกระตุ้นแบบ 4 ควอดแรนต์ ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้น ผลของการควบคุมยังมีความล่าช้าในเรื่องของช่วงเวลาการเข้าสู่สภาวะความเร็วที่กำหนด และช่วงเวลาการกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวในขณะขับโหลด สำหรับในการจ่ายพลังงานยังคงต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการจ่ายพลังงานสูงขึ้น ดังนั้นแนวทางการวิจัยต่อไปควรพิจารณาเพิ่มลูปกระแสของระบบควบคุม เพื่อทำให้ระบบมีความรวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น และ ใช้หลักการของ field weakening เข้ามำหนดการจ่ายพลังงานเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Barry N. and M^c Quade E , “Binary Rate Modulation , its Application and Stability in Control Syetem” , International Journal of Control ,Vol 60,No. 3. Setp.1993.
- [2] J. Niezenanski , Maximum pulse - position and counting errors of binary rate multipliers, Proc. 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] Chapman , Stephen J. “Electric Machines fundamentals”,Third Edition,McGraw-Hill series in electrical engineering. Power and energy,1991.
- [5] P. C. SEN , “Principles of Electrical Machines and Power Electronics” ,2 nd ed , John Wiley & Sons. New York 1994.
- [7] Yamayee, Zia A. “Electromechanical energy devices and power systems” John wiley & sons,Inc.1994.
- [8] Muhammad H. Rashid, “Power Electronics Circuit Devices and Applications” , 2 nd ed , Prentice – Hall ,1993.
- [9] Gopal K. Dubey , “Power Semiconductor Controlled Drives”, Prentice – Hall , 1993.



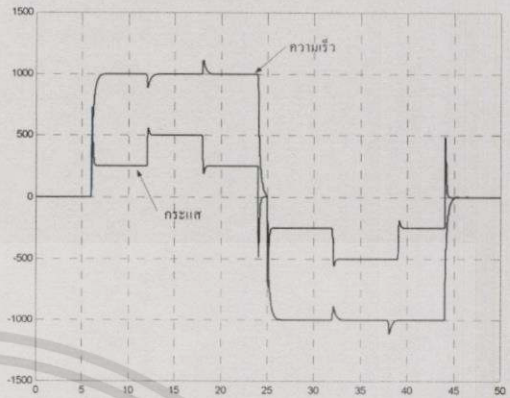
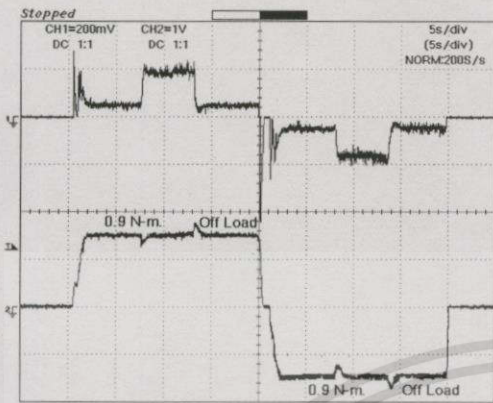
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are three tiered stupas (pagodas) arranged in a row. The entire emblem is surrounded by a decorative border containing Thai text. The text at the top of the seal reads "ภาคผนวก ก" (Appendix A). The text at the bottom of the seal reads "มหาวิทยาลัยราชภัฏบรียรัมย์" (Rajabhat Buriram University).

ภาคผนวก ก

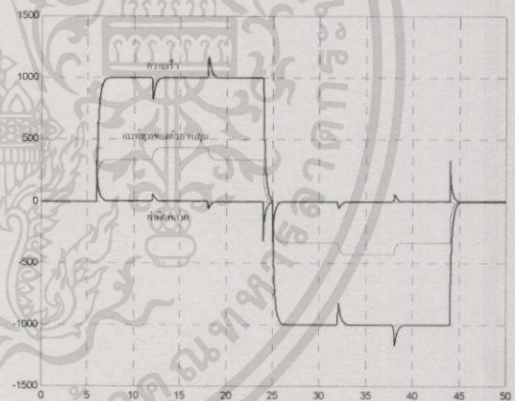
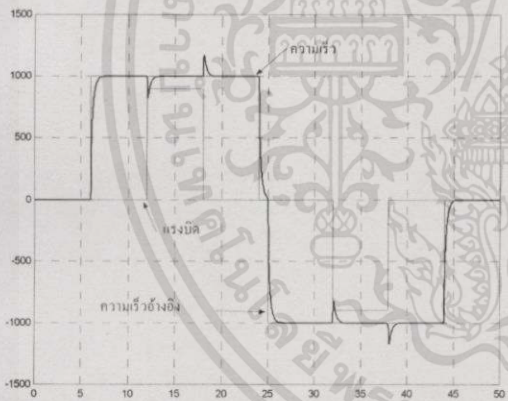
การเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การทดสอบวัดกระแส - ความเร็ว

(ข) การจำลอง กระแส - ความเร็ว

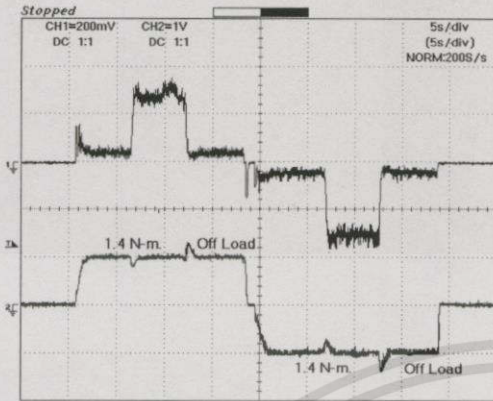


(ค) การจำลอง ความเร็ว, ความเร็วอ้างอิง และแรงบิด

(ง) การจำลอง ความเร็ว, เอาต์พุตของตัวควบคุมและ ค่าความผิดพลาด

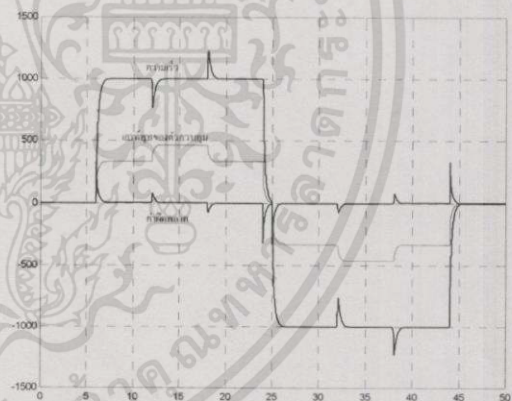
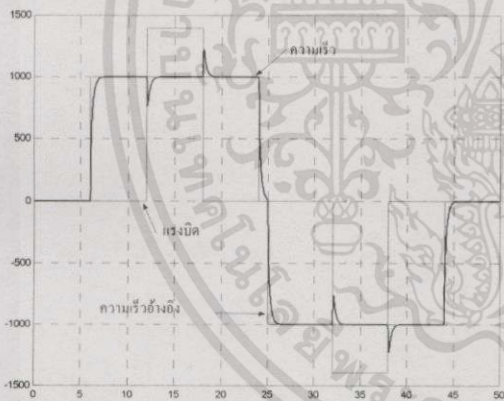
รูปที่ ก2 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 1000 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 0.9 นิวตัน - เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การทดสอบวัดกระแส - ความเร็ว

(ข) การจำลอง กระแส - ความเร็ว

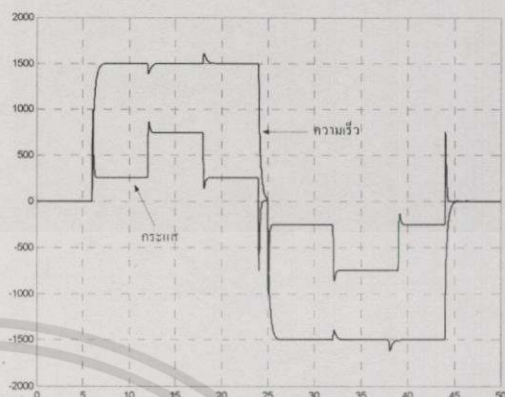
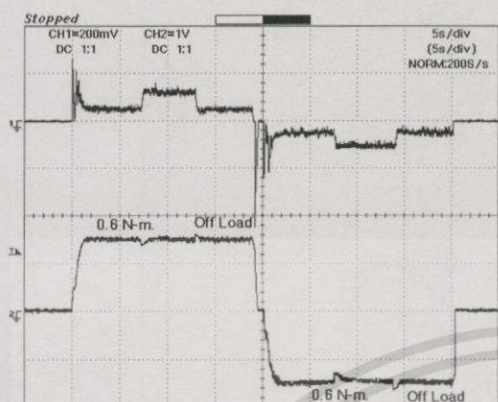


(ค) การจำลอง ความเร็ว, ความเร็วอ้างอิง และแรงบิด

(ง) การจำลอง ความเร็ว, เอาต์พุตของตัวควบคุมและ ค่าความผิดพลาด

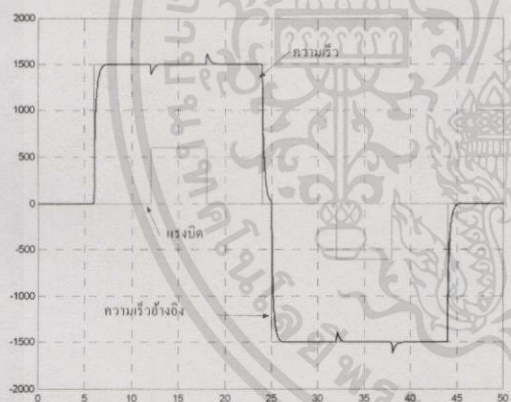
รูปที่ 33 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 1000 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 1.4 นิวตัน - เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การทดสอบวัดกระแส - ความเร็ว

(ข) การจำลอง กระแส - ความเร็ว

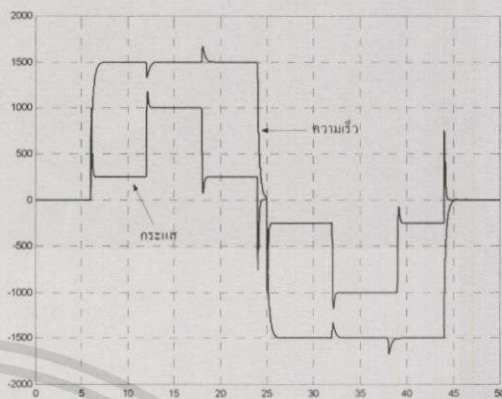
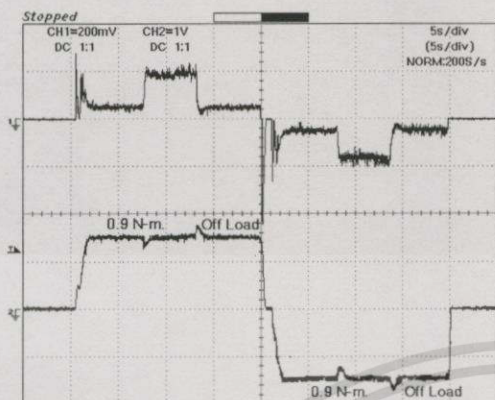


(ค) การจำลอง ความเร็ว, ความเร็วอ้างอิง และแรงบิด

(ง) การจำลอง ความเร็ว, เอาต์พุตของตัวควบคุมและ ค่าความผิดพลาด

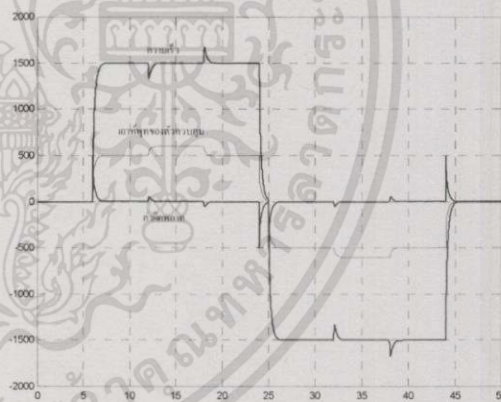
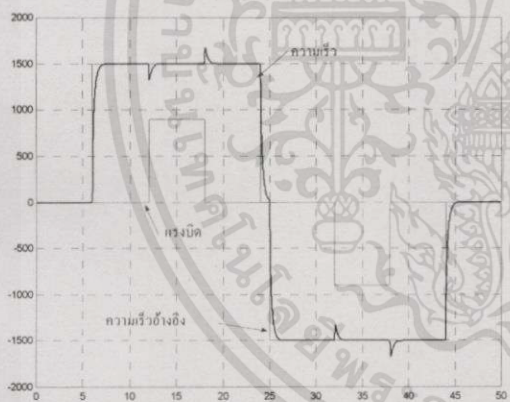
รูปที่ ก4 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 1500 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 0.6 นิวตัน - เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การทดสอบวัดกระแส - ความเร็ว

(ข) การจำลอง กระแส - ความเร็ว

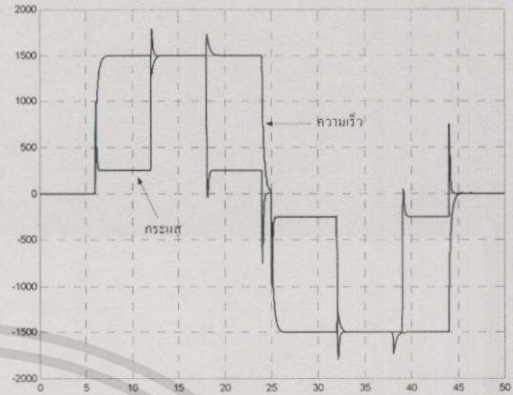
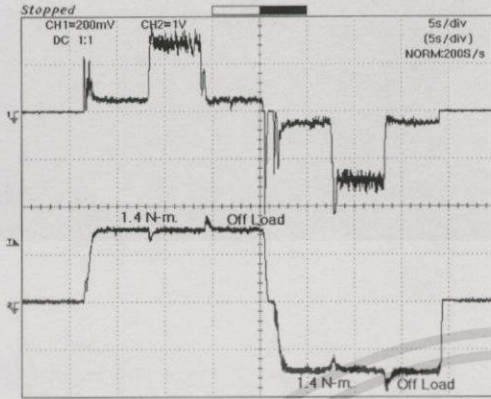


(ค) การจำลอง ความเร็ว, ความเร็วอ้างอิง และแรงบิด

(ง) การจำลอง ความเร็ว, เอาต์พุตของตัวควบคุมและ ค่าความผิดพลาด

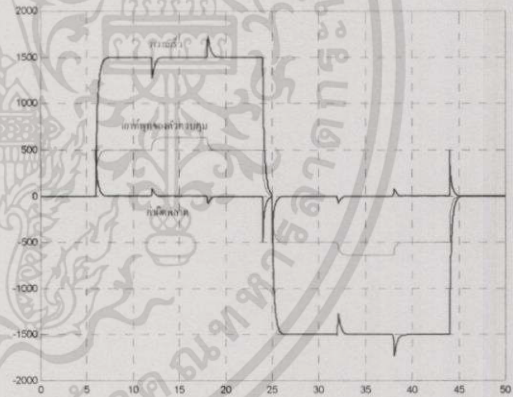
รูปที่ ก5 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 1500 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 0.9 นิวตัน - เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การทดสอบวัดกระแส - ความเร็ว

(ข) การจำลอง กระแส - ความเร็ว

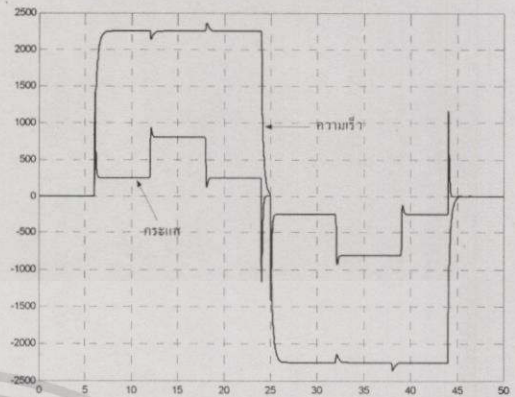
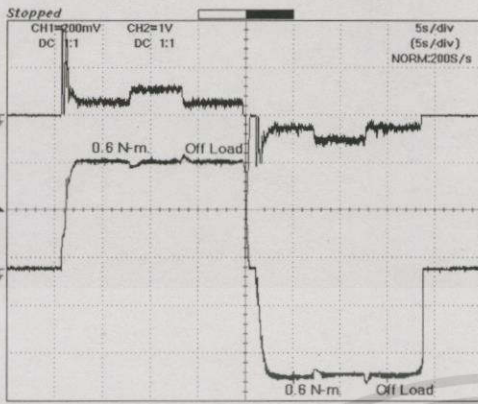


(ค) การจำลอง ความเร็ว, ความเร็วอ้างอิง และแรงบิด

(ง) การจำลอง ความเร็ว, เอาต์พุตของตัวควบคุมและ ค่าความผิดพลาด

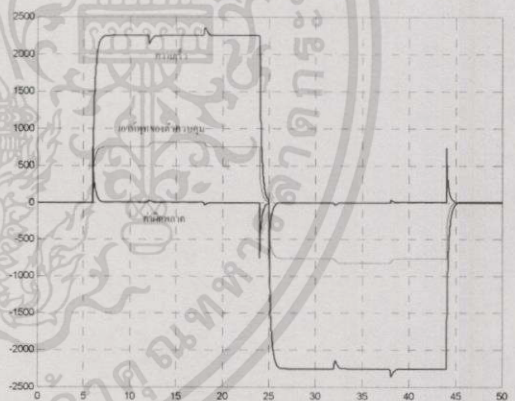
รูปที่ 66 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 1500 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 1.4 นิวตัน - เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การทดสอบวัดกระแส - ความเร็ว

(ข) การจำลอง กระแส - ความเร็ว

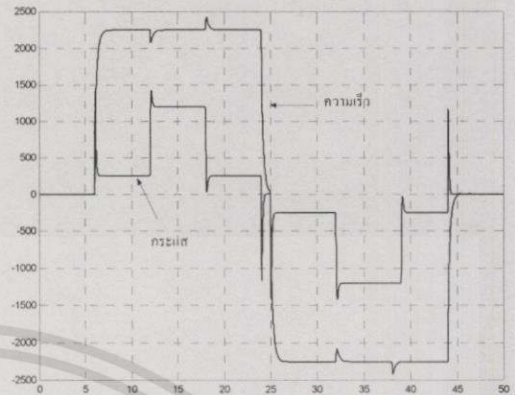
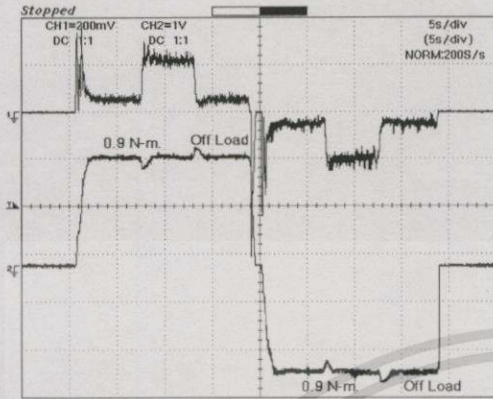


(ค) การจำลอง ความเร็ว,ความเร็วอ้างอิง และแรงบิด

(ง) การจำลอง ความเร็ว, เอาต์พุตของตัวควบคุมและ ค่าความผิดพลาด

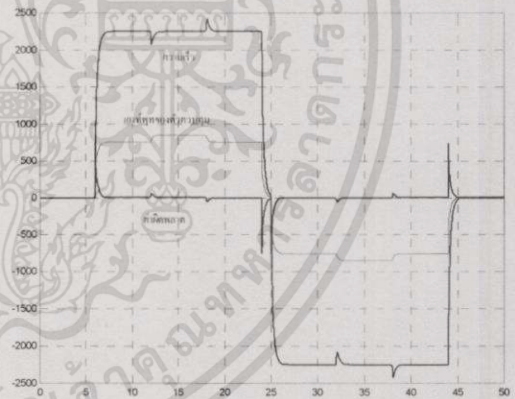
รูปที่ ก7 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 2250 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 0.6 นิวตัน - เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การทดสอบวัดกระแส - ความเร็ว

(ข) การจำลอง กระแส - ความเร็ว

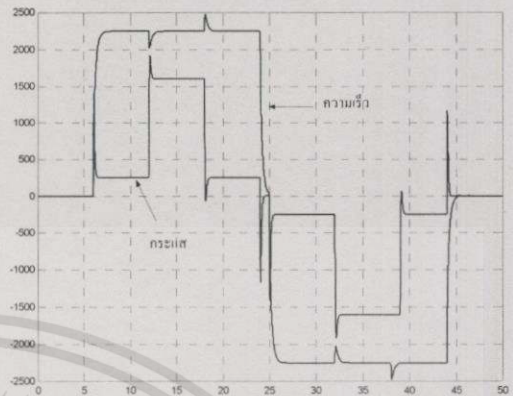
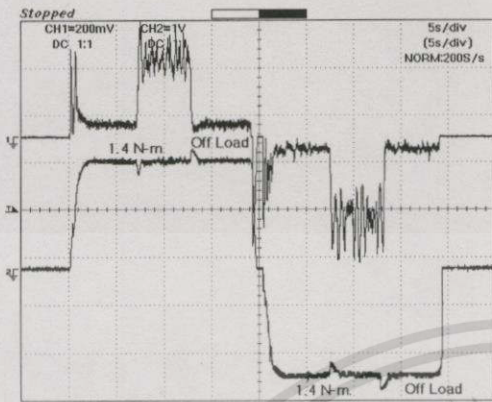


(ค) การจำลอง ความเร็ว, ความเร็วอ้างอิง และแรงบิด

(ง) การจำลอง ความเร็ว, เอาต์พุตของตัวควบคุมและ ค่าความผิดพลาด

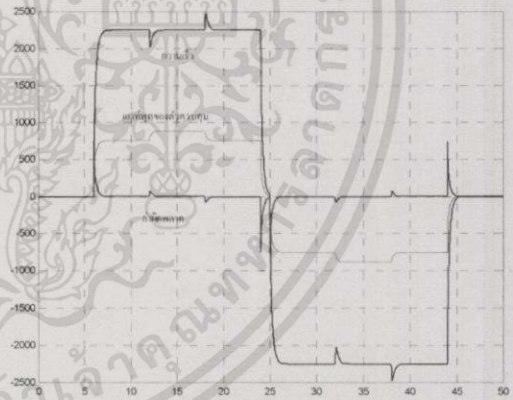
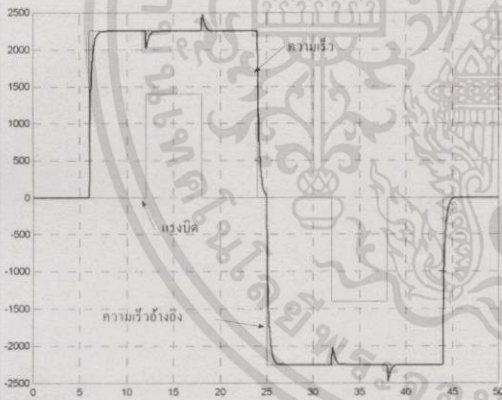
รูปที่ ก8 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 2250 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 0.9 นิวตัน - เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การทดสอบวัดกระแส - ความเร็ว

(ข) การจำลอง กระแส - ความเร็ว



(ค) การจำลอง ความเร็ว,ความเร็วอ้างอิง และแรงบิด

(ง) การจำลอง ความเร็ว, เอาต์พุตของตัวควบคุมและ ค่าความผิดพลาด

รูปที่ ก9 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงและการจำลองที่ ความเร็ว 2250 รอบ ต่อ นาที ขณะใส่โหลด 1.4 นิวตัน - เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : การอ่านค่าที่ได้จากการทดลองและการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB 5.3

การทดสอบวัดกระแส – ความเร็ว:

กระแส CH1 = 1A / DIV (Current Prob 1:5, Digital Scope 200mV/DIV)

ความเร็ว CH2 = 1000 rpm. /DIV (Tachogenerator 1V:1000 rpm. Digital Scope 1V/DIV)

การจำลอง กระแส – ความเร็ว

กระแส หน่วย มิลลิแอมป์

ความเร็ว หน่วย รอบ/นาที

การจำลองความเร็ว, ความเร็วอ้างอิง และแรงบิด

ความเร็ว หน่วย รอบ/นาที

ความเร็วอ้างอิง หน่วย รอบ/นาที

แรงบิด หน่วย มิลลินิวตัน – เมตร

การจำลองความเร็ว, เาต์พุตของตัวควบคุม และค่าความผิดพลาด

ความเร็ว หน่วย รอบ/นาที

เอาต์พุตของตัวควบคุม หน่วย (รอบ/นาที) X 3

ค่าความผิดพลาด หน่วย (รอบ/นาที) X 3



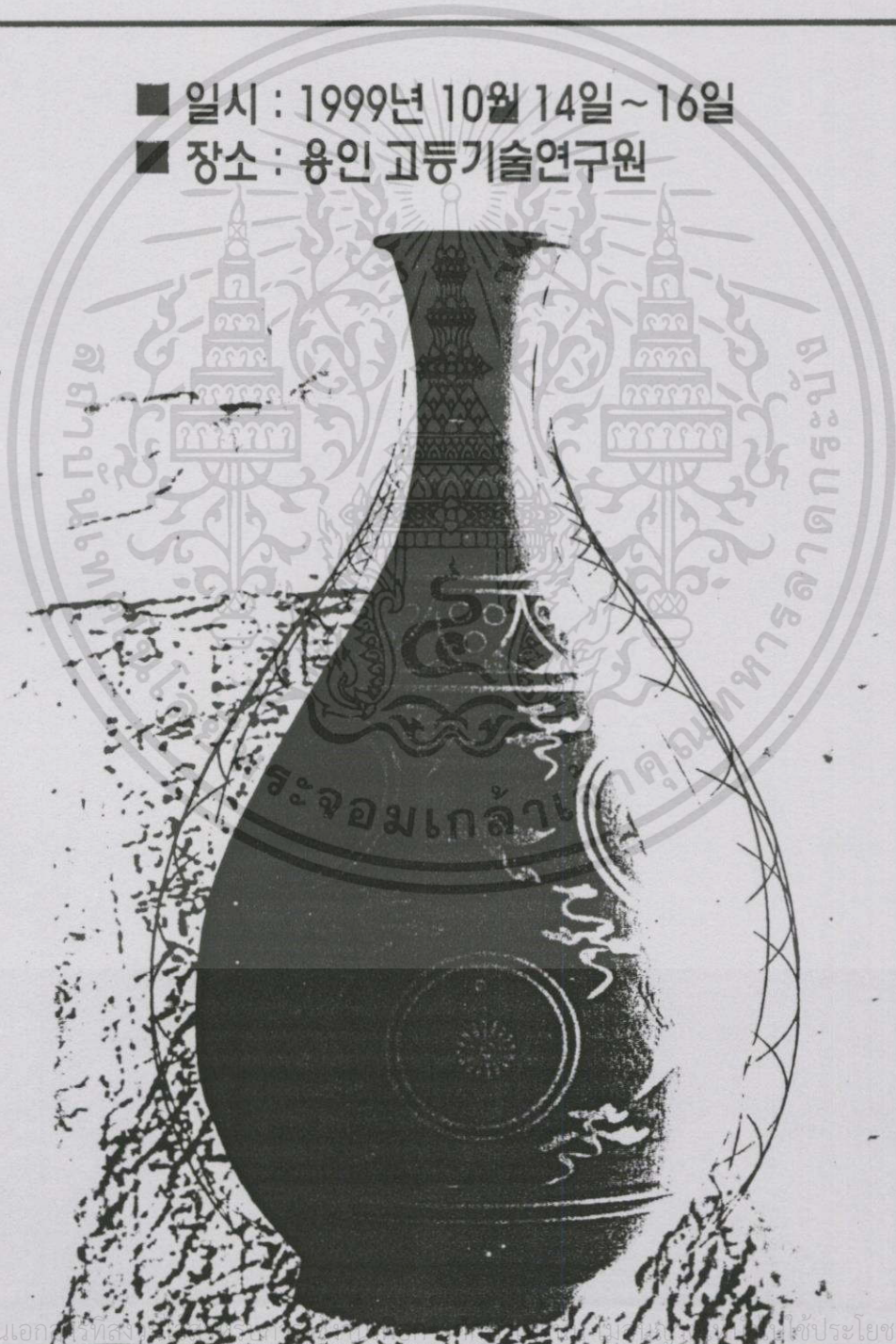
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



KACC '99 제14차 한국자동제어학술회의 논문집

Proceedings of the 14th
Korea Automatic Control Conference

- 일시 : 1999년 10월 14일 ~ 16일
- 장소 : 용인 고등기술연구원



Fast Response Technique 2 Quadrant DC Motor Speed Control

W. Piyarat**, V. Tipsuwanporn*, W.Sawangsinkasikit*
M. Leelajindarairerk* and P. Thepsatorn**

* Faculty of Engineering , King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

*Tel: (66-2) 326-7346: Ext. 102, E-mail: ktvittay@kmitl.ac.th

** Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Nakornnayok, Thailand
Tel: (66) 37-322-605 , E-mail: waksin@psm.swu.ac.th

Abstract

This paper presents a methodology of the technique for controlling DC motor drive by implementation of 2- quadrant operating mode which can ensure the torque controlling and speed with response time less than 2 seconds at all loading conditions. By implementation of BRM technique, energy is fed with definite values of BRM 256 bits, with different patterns of high accuracy, and fixing scan time at 0.667 ms, the ripple is less than 1%, thus high efficiency can be achieved, from the consequence of the accuracy of energy feeding at low current. The stability of the whole system can be determined from circle criterion by root locus method . The instant reverse direction of rotation can be done by decreasing the energy to the lowest level while motor is running with no load and variable load at the speed about 100-120 rpm and 50-60 rpm.

1. Introduction

Generally DC motor control is performed by either phase control or PWM. In this paper BRM is brought to apply for separately field excited 2 Quadrant control on the principle of supplying the proper energy suits to both torque and speed variation under preset condition. For reversing the direction of motor rotation, it is done by reducing the input energy , the speed and inertia simultaneously reduce down to certain values, suddenly motor reverse its rotation and reach stability. This conditions take place in both loaded and no load. The whole processes is performed by BRM selection from

2. Principle and Theory

The relations of different parameters of separately excited DC motors are as follows:

$$E_b = k_v \omega I_f \quad (1)$$

$$V_a = R_a I_a + E_b \quad (2)$$

$$T_d = K_t I_f I_a \quad (3)$$

$$P_d = T_d \omega \quad (4)$$

When

E_b = back inverse voltage (V)

K_t = torque constant

K_v = Voltage constant (V/A-rad/s)

I_f = Field current (A)

I_a = Armature current (A)

T_d = Armature torque (N-m)

P_d = Armature power (W)

ω = motor speed (rad/s)

R_a = Armature resistance (Ω)

2.1 Principle of motor braking [3-4]

Braking can be done by reversing of armature polarity which will act instantly. By doing so, the back emf voltage (E_b) will be in the same direction as armature polarity voltage as shown in Fig.1, but direction of current of motor will be opposite. Kinetic energy will convert into heat and loss in motor, then motor will stop suddenly before reverse to the preset direction.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แล E-244 ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

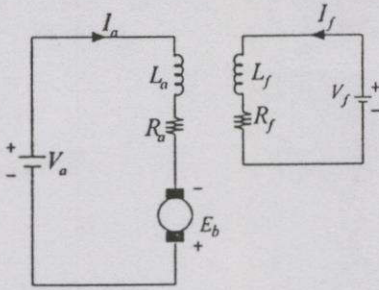


Fig.1. Equivalent of separately excited DC motor.

2.2 Theory and BRM Principle.

The BRM waveform can be considered from equation [5-6]

$$B = k_m 2^m + k_{m-1} 2^{m-1} + \dots + k_1 2^1 + k_0 2^0 \quad (5)$$

B = pulse rate

$k_m, k_{m-1}, \dots, k_1, k_0$ are binary bit of B

2^{m+1} = Total number of pulse per cycle

Average power is given by equation (6)

$$P = \frac{BR}{T_c} = R \left[k_m \frac{f}{2} + k_{m-1} \frac{f}{2^2} + \dots + k_1 \frac{f}{2^m} + k_0 \frac{f}{2^{m+1}} \right] \quad (6)$$

R = energy of each time period T

$T_c = (2^{m+1})T$ = Cycle time

Equation (6), if it is combined linearly we can get BRM

fundamental frequency as

$$f_{2^a} = M \sum_{b=0}^{2^a-1} \left\{ u\left(t - \left(\frac{2^{m+1}}{2^{a+1}} - 1 + b \frac{2^{m+1}}{2^a}\right)T\right) - u\left(t - \left(\frac{2^{m+1}}{2^{a+1}} + b \frac{2^{m+1}}{2^a}\right)T\right) \right\} \quad (7)$$

$u(t)$ is a unit step function

M is a magnitude

a is binary weight ($a=0,1,2,\dots,m$)

T is pulse time

2.3 BRM control for 2-Quadrant

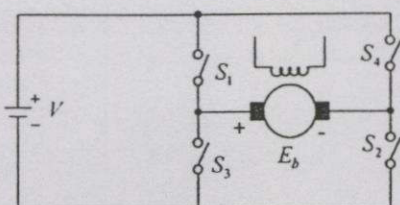


Fig.2. 2-Quadrant control circuit.

BRM motor control can be achieved by decreasing energy up to lowest level until reversing direction occurs without stopping.

The function of each quadrant are as follows:

Quadrant I, it is required motor to rotate in clockwise direction, by feeding BRM at S_1 and S_2 when they are "ON" while S_3, S_4 are at "OFF" position. The voltage and current of an armature are in positive direction, thus resulted in torque direction.

Quadrant II, is the control to reverse motor direction instantly, by feeding BRM at S_3, S_4 which is at "ON" condition and S_1, S_2 at "OFF", the motor will be at the lowest inertia, resulted in reverse direction instantly.

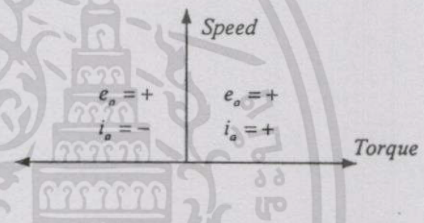


Fig.3. Motor operation in each Quadrant.

2.4 Design of control system

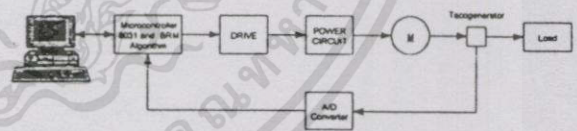


Fig.4. Block diagram of the working system.

The working system in Fig.4 can be explained as follow.

1. The processor and controller of the microcomputer operates by PI algorithm then send the results to microcontroller 8031 for specific BRM waveform generation.
2. BRM signal from microcontroller 8031 is fed to drive and power circuit to control motor, the tachogenerator send signal, feeding back through A/D converter to the processor for correction of control signal.

2.5 Software design

Program starts with selecting motor direction, the system is set with all datas input for BRM pattern generation from PI algorithm, the output sends control signal to motor drive circuit, tachogenerator feedback the error signal through A/D converter for controlling according to preset condition. If we want -motor to stop running, the program will transmit "0" to control circuit.

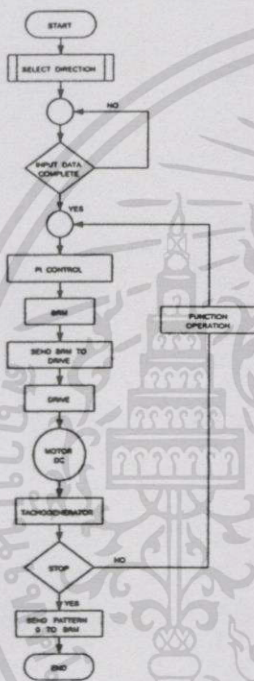


Fig.5 Flowchart of the system.

3. Experimental results

The experiment is performed on motor of 220 Volts 330 Watts 2.6 Amps. with reference speed 2250 rpm, $K_p = 20$ and $T_i = 0.067$ seconds. (by Ziegler Nichols Tuning) [7], Scan time = 0.667 milliseconds

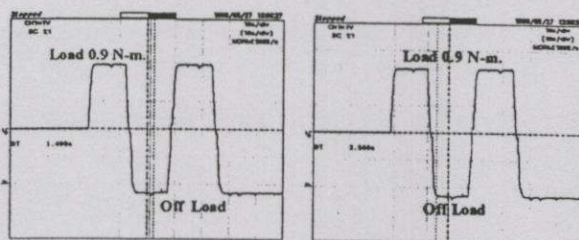
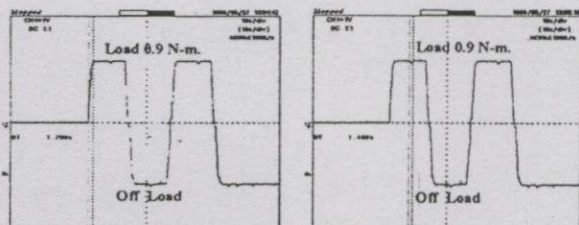


Fig.6. Response curve at load 0.9 N-m.

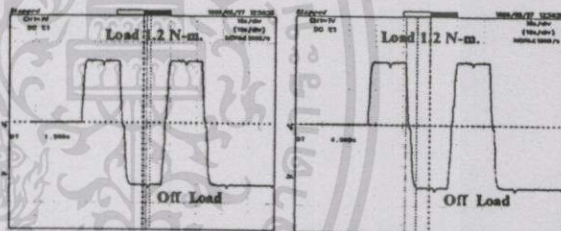
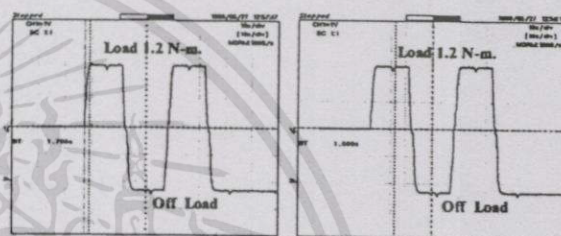


Fig.7. Response curve at load 1.2 N-m.

From Fig.6 (a) and Fig.7(a) shows the time taken from speed 0 to 250 rpm only 1.7 seconds. Fig.6 (b) (c) and Fig.7(b),(c) shows the response time of returning to normal after removing load of 0.9 N-m and 1.2 N-m not more than 1.4 second and 1.6 second respectively. Fig.6 (d) and Fig.7(d) show the response time of motor speed reversing which is only 3.5 seconds and 4 seconds respectively.

4. Conclusion

2 – Quadrant DC motor control by BRM caused fast time response of returning to normal condition while motor is loaded and unloaded, with time taken less then 2 seconds.

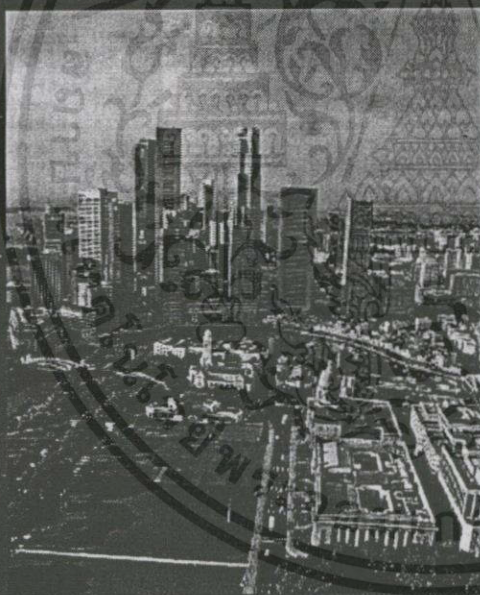
Apart from that, motor can sudden reverse rotation at 100-120 rpm. with no load and speed of 50-60 rpm. with load,

in with short time less than 4 seconds. The stability can be adjusted by circle criterion of digital loop with K lies between 0.179 to 1.85, resulted in required stability [6-7]. This technique can also be applied to 4-Quadrant DC motor control as well.

Refercenes

- [1] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Circuit, Devices and Applications", 2nd ed, Prentice - Hall, 1993.
- [2] P. C. SEN, "Principles of Electrical Machines and Power Electronics", 2nd ed, John Wiley & Sons. New York 1994.
- [3] Theodore Wildi, "Electrical Machines Drives and Power Systems", 3th ed, Prentice - Hall, 1981.
- [4] Gopal K. Dubey, "Power Semiconductor Controlled Drives", Prentice - Hall, 1993.
- [5] Barry N. and M^cQuade E, "Binary Rate Modulation, its Application and Stability in Control Syetem", International Journal of Control, Vol 60, No. 3. Setp. 1993.
- [6] V. Tipsuwanpon., F. Cheevasuvit., W. Piyarat., W. Siribanchachai and Y. Paraken. "BRM Fast response DC Motor Speed Control", Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 3, pp. 1062 - 1065, 1999.
- [7] K. Ogata, "Discrete - Time Control System", Englewood Cliffs, NJ: Prentice - Hall, 1987.

IEEE Power Engineering Society
2000 WINTER MEETING
 23-27 January 2000
 Singapore



Welcome

Getting Started

Technical Sessions
 By Committee

Authors

Search



IEEE
 Networking the World[®]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

New Design Technique of Controlling 2 Quadrant DC Motor Drive

W. Piyarat and Y. Paraken

Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Srinakarinwirot University, Nakornnayok, Thailand.
Tel: 66- 37-322605 ,
E-mail: waksin@psm.swu.ac.th

V. Tipsuwanporn , W.Sawangsinkasikit and T.Suesut

Faculty of Engineering , King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand.
Tel: (66-2) 739-2406: Ext. 102,
E-mail: ktvittay@kmitl.ac.th

Abstract: This paper proposes the controlling technique of DC motors which can determine the time response of speed , both no load and on load condition, less than 2 seconds. It is operated by 8 bit Binary Rate Multiplier (BRM) under the PI control process. The motor under test is 2 quadrants type. The BRM 8 bit are generated from 8 principle waveform by linear combination, finally 256 waves are attained. These waveforms are sent to control motor with required speed, It is known that BRM give low ripple, less than 1%. Hence, less noise disturbance to the system. These BRM can be applied to reverse motor direction with fast response or sudden stop. Energy fed to motor is also low but gives high efficiency.

Keywords: BRM , PI , low ripple, low energy , fast response, high efficiency , digital control, Ziegler-Nichols technique, DC motor and 2 quadrant.

I. INTRODUCTION

Generally, separately excited dc motor speed control is attained by PWM or PFM [2], [7] but in this technique can be done by BRM [4],[5] to accomplish power transferring to armature for speed control. The ratio of transfer function of speed ω to armature voltage is given by [1].

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

Where K_p is plant constant and T_p is plant time constant.

II. PRINCIPLE AND THEORY

A. Principle of BRM signal mixing [2]

The generated pulses are transmitted to control motor to meet the preset condition. If it is required to send BRM of B bits, the number of bit satisfy the equation (2)

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

B is the pulse rates, $k_{m-1}, k_{m-2}, \dots, k_1, k_0$ are binary bit of B , 2^m is a number of pulse per cycle, E is energy of each pulse per time period T , $T_c = (2^m \times T)$ is cycle time. The average power P supplies to the motor is shown in (3) which is depends on the binary bits. If we increase a number of bit (in this case $m = 8$), then a number of selected BRM pattern can be generated up to 255 different forms. This means that BRM technique can supply suitable power to motor under control at all conditions of working load [5].

$$P = \frac{BE}{T_c} = R \left[k_{m-1} \frac{f}{2} + k_{m-2} \frac{f}{2^2} + \dots + k_1 \frac{f}{2^{m-1}} + k_0 \frac{f}{2^m} \right] \tag{3}$$

Where $f = 1/T$ is pulse frequency $\frac{f}{2}, \frac{f}{2^2}, \dots, \frac{f}{2^{m-1}}, \frac{f}{2^m}$ and depends on binary bit of pulse B . The easiest method to create the BRM waveform is done by distribution of the BRM energy contained in each period of T_c equally. We define the fundamental frequency with linear independent waveform as $f_1, f_2, f_3, \dots, f_{64}$ and f_{128} . The waveform is created by linear combination as

$$f_{2^a} = M \sum_{b=0}^{2^a-1} \left\{ u(t - (\frac{2^m}{2^{a+1}} - 1 + b \frac{2^m}{2^a})T) - u(t - (\frac{2^m}{2^{a+1}} + b \frac{2^m}{2^a})T) \right\} \tag{4}$$

Where $u(t)$ is a unit step function. M is a magnitude, a is binary weight ($a = 0, 1, 2, \dots, m$) and T is a pulse duration. If we consider power per cycle of pulse train. It can be seen by supplying the power at ON time aT , OFF time bT and the ripple output [6] at stable condition becomes;

$$\text{ripple} = \frac{K_p (1 - e^{-aT/T_p})(1 - e^{-bT/T_p})}{(1 - e^{-(a+b)T/T_p})} \tag{5}$$

The ripple is the difference value between maximum and minimum response at the stable period per pulse train. If $m = 4$, say $m = 8$ then the ratio of $T/T_p < 0.001$.

B. Control diagram

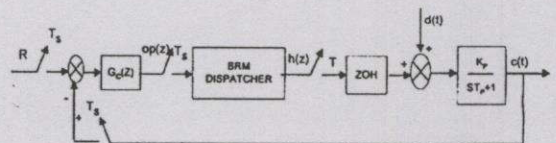


Fig. 1. Close-loop system by BRM transmitting.

In Fig. 1, $G_c(z)$ is a proportional plus integral, K_c is a gain control, T , is an integral time [3]. The transfer function is given by

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_c(z) = K_c \left\{ 1 + \frac{T_s}{T_i} \frac{1}{1-z^{-1}} \right\} \quad (6)$$

Where $T_s = (2^m - 1)T$ is a sampling time. The zero order hold (ZOH) is connected directly to the plant with the transfer function,

$$G_{ph}(z) = K_p \left\{ \frac{1 - e^{-T_s/T_p}}{z - e^{-T_s/T_p}} \right\} \quad (7)$$

and the transfer function of close loop system is given by (8). The BRM dispatcher is a dc gain (K_d) which equal to 1289 mw/bit . The close loop transfer function becomes

$$G(z) = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{K_d G_c(z) G_{ph}(z)}{1 + K_d G_c(z) G_{ph}(z)} \quad (8)$$

$$= \frac{K_d K_c K_p \left[\frac{(1 + T_s/T_i)z - 1}{z - 1} \right] \times \left[\frac{1 - e^{-T_s/T_p}}{z - e^{-T_s/T_p}} \right]}{1 + K_d K_c K_p \left[\frac{(1 + T_s/T_i)z - 1}{z - 1} \right] \times \left[\frac{1 - e^{-T_s/T_p}}{z - e^{-T_s/T_p}} \right]}$$

From (8), if we assign $x = e^{-T_s/T_p}$ and $K = K_c K_d K_p (1-x)$, then the characteristic equation (8) becomes (9). In Fig. 2, with BRM control, if the gain is high, the noise will decrease and fast response is achieved.

$$(z - 1)(z - x) + K \left\{ (1 + T_s/T_i)z - 1 \right\} = 0 \quad (9)$$

C. Hardware design

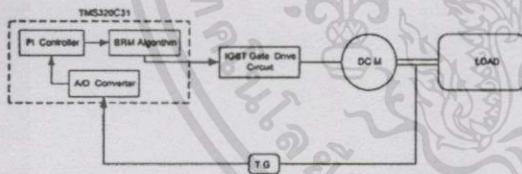


Fig. 2. Hardware circuit diagram.

Fig.2 shows the working system. Microcomputer function as processor and main control, then transmit signal to TMS320C31 wave patterns in form of BRM are transmitted to drive circuit and operate the machine according to the feedback error defected from tachogenerator in form of digital signal, operated by A/D converter.

D. Software design

From Fig.3 The program is selected for motor direction of rotation. Then checking input to set motor speed function. The program will automatically select BRM waveform patterns by PI, then send the result to drive circuit to control energy supply to motor. Signal at tachogenerator is feedback through A/D converter in order the make the whole system satisfy the condition set. If the program has to stop, it is done by sending BRM of form "0" to control part, then motor will stop. Fig. 4 shows the generation process of 8 bit by

comparing with the principle signal , totally 256 waveforms are formed.

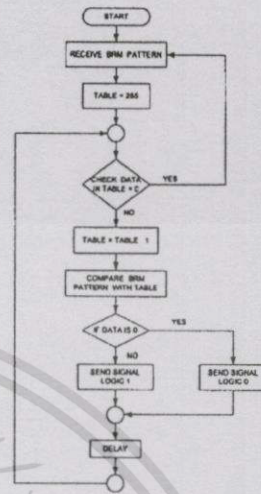


Fig. 3. BRM motor control flowchart.

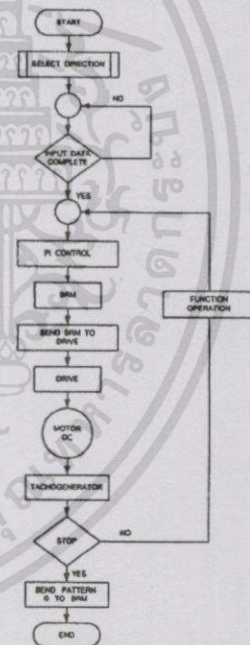


Fig.4 BRM signal flowchart.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

The experiment is performed on dc motor, 220 Volts, 330 watts at highest speed of 2250 rpm. The K_c and T_i are given by Ziegler-Nichols principle [3] ($K_c = 4.5$ and $T_i = 0.5$ second) We define $K_p = 1.0$, $T_p = 1.385$ second and $T_s = 0.667$ ms. Fig.5 (a), (b) and (c) show the response time of different state at no load condition. In Fig.5 (b), (d) and (f) shows the the response to time of returning to normal state when loaded at 1.2 N.m, starting from speed 0 to 1000, 1500 and 2250 rpm less than 2 seconds.

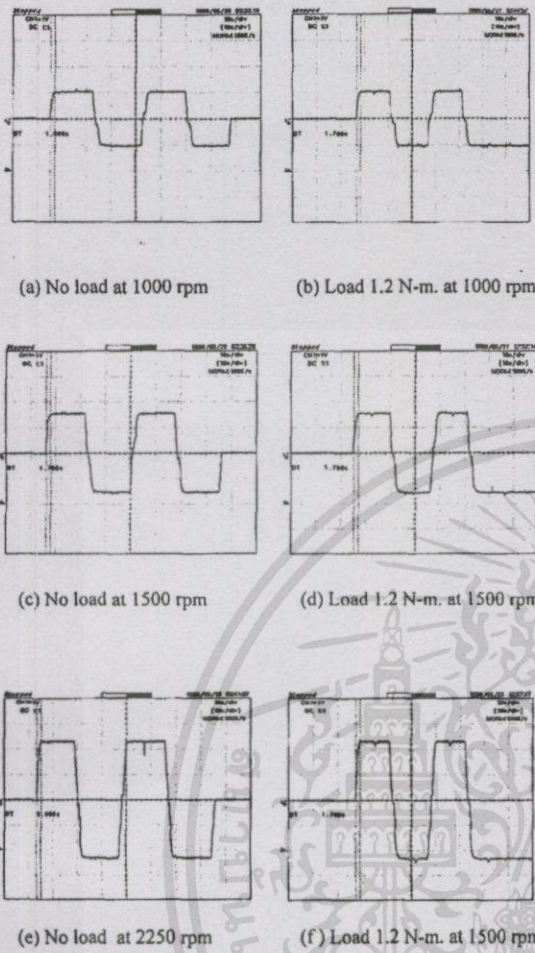
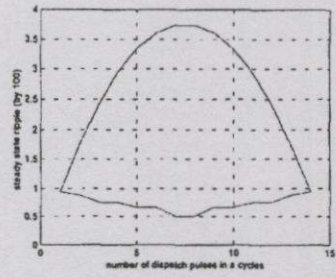


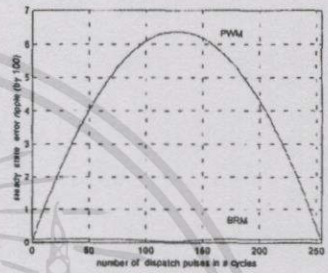
Fig. 5 Response time of no load and full load speed.

IV. CONCLUSION

The technique of BRM controlling gives rise to returning to normal state at less time or fast response less than 2 seconds, both load and on load. Apart from that, it generated low noise caused ripple lower than 1% as shown in Fig. 6 (a),(b) the ripple comparison between BRM and PWM at 4 and 8 bit. Consider the ripple when increase bit number from 4 bit to 8 bit the ripple of signal will be smaller than before. Fig. 7 (a),(b) the maximum ripple comparison between BRM and PWM at 4 and 8 bit. By setting the ratio of $T/T_p = 0.001$ the bit number are increase from 4 bit to 8 bit. It will not effect to maximum ripple, it can be applied to control both 4 quadrants DC motor and AC motor, single phase and 3-phase.

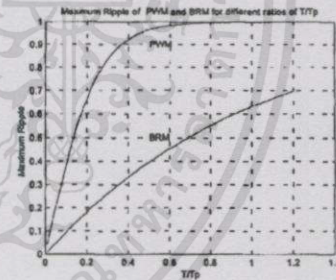


(a) Ripple from BRM and PWM (m=4)

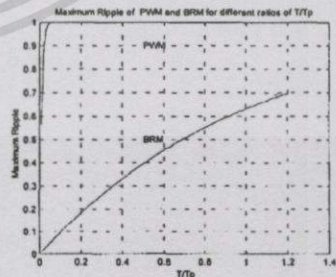


(b) Ripple from BRM and PWM (m=8)

Fig. 6 Compare between ripple from BRM and PWM.



(a) Maximum ripple of BRM and PWM (m=4)



(b) Maximum ripple of BRM and PWM (m=8)

Fig. 7 Compare between Maximum ripple of BRM and PWM.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V. REFERENCES

- [1] Eldsen C.M. and Ley A.J, "A digital transfer function analyser based on pulse rate techniques ," *IFAC symposium on pulse rate and pulse number signals in automatic control, Budapest*. pp 132-137, 1968
- [2] A.E. Fitzgerald , Charless Kingsley , Jr. and Stephen D. Umans, *Electric Machinery*, 4th Ed..M^cGraw Hill. 1985. pp. 247-290.
- [3] K. Ogata, *Discrete - Time Control System*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice - Hall , 1987.
- [4] 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.
- [5] Eamonn P. McCarthy and Jahanfer Danesh "A Novel Method of Direct Digital Integral-Cycle Power Control," *IEEE Trans. On Ind. Elec. and Contr. Instrum*, vol.IECI-25,no. 2,pp149-154, May. 1978.
- [6] V. Tipsuwanpon., F.Cheevasuvit., W.Piyarat., W. Siribanchachai and Y.Paraken. "BRM Fast response DC Motor Speed Control", *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol.3, pp. 1062 - 1065 , 1999.
- [7] Theodore Wildi, "Electrical Machines Drives and Power Systems", 3th ed, Prentice - Hall , 1981



Winyu Sawangsinkasikit was born in Surathani, Thailand, on Apr 25, 1972. He receive the B.Eng.(EE) degree from South-East Asia university, Bangkok, Thailand, in 1995. Now he is currently studying M.Eng. degree at King Mokut's Institute of Technology Ladkabang, Thailand. His research of interests included power electronics and motor drive.



Taweepol Suesut was born in Bangkok, Thailand ,on Apr 18, 1972. He received the B.Eng. and M.Eng. degree from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkabang (KMITL),Thailand, in 1995 and 1998 respectively. From 1996 to present, He is an Instructor in the Industrial Instrumentation Department at KMITL. He present research interests are factory automation and programmable logic controller.

VI. BIOGRAPHIES



Wakhin Piyarat was born in Surathani, Thailand, on Apr 28, 1971. He received the B.Eng.(EE) degree from South-East Asia university, Bangkok, Thailand, in 1994, and received the M.Eng. (EE) degree from King Mongkut's Institute of Technology Ladkabang, Thailand, in 1998. He is currently an Instructor in the Department of Electrical Engineering at Srinakharinwirot University. His research of interests are control system , power electronics and drive.



Yuen Paraken was born in Ubolrajthani, Thailand, on 15 July 1938. He receive the B.Tech from Indian Institute of Technology, India , and M.S.EE. from the University of the Philippines in 1970 and 1973 respectively. Since then he was in the Academic atmosphere at Srinakharinwirot University till now.



Vittaya Tipsuwanpon was born in Surathani, Thailand ,on Jun 3, 1961. He received the B.Ind. and M.Eng. degree from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkabang (KMITL),Thailand, in 1985 and 1989 respectively. From 1986 to present, He was Instructor in the Industrial Instrumentation Department at KMITL. He was Assistance Professor and became Associate Professor in 1995 and 1998 respectively. He is specialist in control system, electrical measurement and instrumentation. He presently research interests

are power control and its dispatch, nonlinear dynamics in power electronics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมส่วนที่ 1

```

;*****
;
; COMMUNICATE BETWEEN COMPUTER AND MCS-51
; WINYU SAWAENG SINKASIKIT
; KMITL
;*****
PORT_A EQU 0F800H
PORT_B EQU 0F801H
PORT_C EQU 0F802H
CTRL_P EQU 0F803H

PORTA EQU 0FC00H
PORTB EQU 0FC01H
PORTC EQU 0FC02H
CTRLP EQU 0FC03H
;*****
S 8
STACK: DS 20

ORG 0000H
DELAYTIME: MOV R7,#0FEH
DELAYTIME2: MOV R6,#0FEH
            DJNZ R6,$
            DJNZ R7,DELAYTIME2
DELAYTIME3: MOV R7,#0FEH
DELAYTIME4: MOV R6,#0FEH
            DJNZ R6,$
            DJNZ R7,DELAYTIME4

```

```
START:  MOV  DPTR,#CTRL_P      ;SET INPUT PORT
        MOV  A,#9BH
        MOVX @DPTR,A
        MOV  DPTR,#CTRLP      ;SET OUTPUT PORT
        MOV  A,#80H
        MOVX @DPTR,A
        MOV  SCON,#50H        ;SET SERIAL PORT
        MOV  TMOD,#20H
        MOV  TH1,#0FDH
        SETB TR1
        MOV  P1,#00H
```

```
BEGIN:  MOV  R5,#00H
        MOV  DPTR,#PORTB
        MOV  A,R5
        MOVX @DPTR,A
```

```
FIRST:  ACALL DATA           ;MAIN PROGRAM CLOSE LOOP
        JNB  RI,FIRST
SECOND: ACALL RECV
THIRD:  ACALL DATA
        LJMP SECOND
```

```
DELAY:  MOV  R7,#01H
DELAY2:  MOV  R6,#0FFH
        DJNZ R6,$
        DJNZ R7,DELAY2
```

RET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

*****
;RECEIVE DATA FROM COM
*****
RECV:    JNB  RI,$      ;RECEIVE BRM FROM COM
        MOV  A,SBUF
        MOV  P1,A
        MOV  R5,A
SHOW:    MOV  DPTR,#PORTB
        MOV  A,R5
        MOVX @DPTR,A
        CLR  RI
        RET
*****
;SEND DATA TO COM BY DELAY
*****
DATA:    MOV  DPTR,#PORT_B  ;RECEIVE DATA FROM ADC/0804
        MOVX A,@DPTR
*****
HTOA:    MOV  R4,A      ;CHANGE DATA TO ASCII CODE
        SWAP A
        LCALL HTOAS
        MOV  R1,A      ;FIRST BYTE
        MOV  A,R4
        LCALL HTOAS
        MOV  R2,A      ;SECOND BYTE
*****
SEND:    MOV  A,R1      ;SEND DATA FROM 0804 TO COM
        CLR  TI
        MOV  SBUF,A

```

```

JNB TI,$
CLR TI
MOV A,R2
MOV SBUF,A
JNB TI,$
RET

```

```

;*****

```

```

HTOAS:  ANL  A,#0FH    ; CHANGE DATA TO ASCII

```

```

MOV R0,A
MOV A,#09H
CLR C
SUBB A,R0
JC HTOAS1
MOV A,R0
ORL A,#30H
RET

```

```

HTOAS1: MOV A,R0
CLR C
SUBB A,#09H
ORL A,#40H
RET

```

```

END

```

โปรแกรมส่วนที่ 2

```

;*****
; BRM SIGNAL CREATION( BINARY RATE MULTIPIER )
; WINYU SAWAENGSINKASIKIT
; KMITL
;*****

        ORG 0000H

        LCALL DELAY

        LJMP START

;*****
START:   MOV  A,P1
         MOV  R2,A
;*****
;BINARY RATE
;*****
BRM:    MOV  A,R2
         MOV  R0,#0FFH
         MOV  R1,A
         MOV  DPTR,#TABLE
LOOP:   CLR  A
         MOVC A,@A+DPTR
         ANL  A,R1
         INC  DPTR
         JNZ  ONE
ZERO:   CLR  P3.7
         LCALL DELAY
         DJNZ R0,LOOP
         LJMP START
ONE:    SETB P3.7
         LCALL DELAY
         DJNZ R0,LOOP
         LJMP START

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DELAY: MOV R6,#02H

DELAY1: MOV R7,#60H

DJNZ R7,\$

DJNZ R6,DELAY1

RET

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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,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

END



โปรแกรมส่วนที่ 3

```

*****
;
; 4 QUADRANT CONTROL BY REGENERATIVE BREAK )
; WINYU SAWAENG SINKASIKIT
; KMITL
***** 4
Public KP As Single
Public KI As Single
Public PO As Single
Public DT As Single
Public DE As Single
Public DV As Single
Public DSP As Single
Public SUM As Single
Public PI As Single
Public START As Single
Public SPEED As Integer
Public OLDSPEED As Integer
Public DIFFSPEED As Integer
Public INC As Integer
Public DEC As Integer
Public RANGE As Integer
Public Dmax As Integer
Public Dmin As Integer
Public N As Integer
Public BACK As Integer
Public Diff As Integer
Public BRM As Integer
Public ERROR As Integer
Public NUMBER As Integer

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Public SEND As Integer
Public OVER As Integer
Public QUAD As Integer
Public DELAY As Integer
Public FORWARD As Integer
Public REVERSE As Integer
Public RELAY As Integer
Public ZERO As Integer
Public CONDITION As Integer
Public CODE As String
Public INDATA As String
Public DATA As String
Public NOTE As String
Private Sub Command5_Click()
    Form4.Enabled = False
    Form4.Hide
    Form1.Show
    Form1.Enabled = True
End Sub

```

```

Private Sub Form_Load()
    FORWARD = 3
    REVERSE = 140
    RELAY = 0
    ZERO = 0
End Sub

```

```

Public Sub Command1_Click()

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Command4.Enabled = True
Command3.Enabled = True      'START BOTTOM
Command2.Enabled = True
Command1.Enabled = False
Command5.Enabled = False
Label11.Enabled = True
Label12.Enabled = True
Label13.Enabled = True
Label14.Enabled = True
Label15.Enabled = True

SPEED = 0
DSP = 0
SUM = 0
PI = 0
OLDSPEED = 0
QUAD = 0
BRM = 0

MSComm2.PortOpen = True
MSComm2.Output = Chr$(QUAD)
MSComm2.PortOpen = False

MSComm1.PortOpen = True

End Sub

Public Sub Command2_Click()

```

```

SPEED = 0      'STOP BUTTOM

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DSP = 0
SUM = 0
PI = 0
BRM = 0
BACK = 0
QUAD = 0

```

```

MSComm1.Output = Chr$(BRM)
MSComm1.PortOpen = False
CODE = Hex$(BRM)
Debug.Print "CODE BRM = " & CODE

```

```

    DELAY = 5
    Do Until DELAY = 0
        DELAY = DELAY - 1
    Loop

```

```

MSComm2.PortOpen = True
MSComm2.Output = Chr$(QUAD)
MSComm2.PortOpen = False
Command1.Enabled = True
Command2.Enabled = False
Command3.Enabled = False
Command4.Enabled = False
Command5.Enabled = True
Timer1.Enabled = False
Timer2.Enabled = False
Timer3.Enabled = False
Label11.Enabled = False
Label12.Enabled = False

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Label13.Enabled = False
Label14.Enabled = False
Label15.Enabled = False

Label11.Caption = 0
Label12.Caption = 0
Label13.Caption = BRM
Label14.Caption = 0
Label15.Caption = 0
End Sub

Public Sub Command3_Click() 'FORWARD CONTROL BOTTOM
'%%%%%%%%%%
NOTE = "INPUT DATA"
If Text1.Text = "" Then
NOTE = NOTE & ",SPEED "
End If

If Text2.Text = "" Then
NOTE = NOTE & ",Dmax "
End If

If Text3.Text = "" Then
NOTE = NOTE & ",Dmin "
End If

If Text4.Text = "" Then
NOTE = NOTE & ",KP "
End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

If Text5.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,KI "
End If

```

```

If Text6.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,PO "
End If

```

```

If Text1.Text = "" Or Text2.Text = "" Or
Text3.Text = "" Or Text4.Text = "" Or
Text5.Text = "" Or Text6.Text = "" Then
    MsgBox NOTE, vbOKOnly, " Data Constant "
End If

```

```

If Text1.Text <> "" And Text2.Text <> "" And
Text3.Text <> "" And Text4.Text <> "" And
Text5.Text <> "" And Text6.Text <> "" Then

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

FORWARD = 3

```

```

'*****

```

```

'ROTATE FORWARD

```

```

'*****

```

```

If QUAD = FORWARD Or QUAD = 0 Then

```

```

    QUAD = FORWARD

```

```

    MSComm1.PortOpen = False

```

```

    MSComm2.PortOpen = True

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MSComm2.Output = Chr$(QUAD)
```

```
MSComm2.PortOpen = False
```

```
MSComm1.PortOpen = True
```

```
SPEED = Val(Text1.Text)
```

```
Dmax = Val(Text2.Text)
```

```
Dmin = Val(Text3.Text)
```

```
KP = Val(Text4.Text)
```

```
KI = Val(Text5.Text)
```

```
PO = Val(Text6.Text)
```

```
-----
```

```
If Dmax = Dmin Then
```

```
    MsgBox "Dmax equal Dmin", vbOKOnly, "Distance Speed Error"
```

```
End If
```

```
If Dmin > Dmax Then
```

```
    MsgBox "Warning! Dmin more than Dmax", vbOKOnly, "Distance Speed Error"
```

```
End If
```

```
If Val(Text1.Text) > 2500 Then
```

```
    MsgBox "Error Data Speed Which Yor want", vbOKOnly, "Speed Error"
```

```
End If
```

```
-----
```

```
If Text1.Text <> "" And Text2.Text <> "" And _
```

```
    Text3.Text <> "" And Text4.Text <> "" And _
```

```
    Text5.Text <> "" And Text6.Text <> "" And _
```

```
    SPEED <= 2500 And SPEED >= 0 And _
```

```
    KP <> 0 And KI <> 0 And Dmax > Dmin Then
```

```
    Timer2.Enabled = False
```

```
    NUMBER = 0
```

```
    N = 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

If OLDSPEED = 0 Then

START = ((SPEED / 2500) * 255)

START = START * 0.3

SEND = (START * 0.3) \ 1

BRM = SEND

MSCComm1.Output = Chr\$(BRM)

SEND = (START * 0.4) \ 1

BRM = SEND

MSCComm1.Output = Chr\$(BRM)

SEND = (START * 0.5) \ 1

BRM = SEND

MSCComm1.Output = Chr\$(BRM)

SEND = (START * 0.6) \ 1

BRM = SEND

MSCComm1.Output = Chr\$(BRM)

SEND = (START * 0.7) \ 1

BRM = SEND

MSCComm1.Output = Chr\$(BRM)

SEND = (START * 0.8) \ 1

BRM = SEND

MSCComm1.Output = Chr\$(BRM)

SEND = (START * 0.9) \ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
BRM = SEND
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
End If
```

```
=====
```

```
If OLDSPEED <> 0 Then
```

```
=====
```

```
If SPEED > OLDSPEED Then
```

```
=====
```

```
DIFFSPEED = SPEED - OLDSPEED
```

```
INC = DIFFSPEED \ 100
```

```
RANGE = (INC * 0.2) \ 1
```

```
BRM = BRM + (RANGE + 0.1)
```

```
If BRM > 255 Then
```

```
BRM = 255
```

```
End If
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
BRM = BRM + (RANGE + 0.2)
```

```
If BRM > 255 Then
```

```
BRM = 255
```

```
End If
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
BRM = BRM + (RANGE + 0.3)
```

```
If BRM > 255 Then
```

```
BRM = 255
```

```
End If
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

BRM = BRM + (RANGE + 0.4)
If BRM > 255 Then
    BRM = 255
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

BRM = BRM + (RANGE + 0.5)
If BRM > 255 Then
    BRM = 255
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

BRM = BRM + (RANGE + 0.6)
If BRM > 255 Then
    BRM = 255
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

BRM = BRM + (RANGE + 0.7)
If BRM > 255 Then
    BRM = 255
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

BRM = BRM + (RANGE + 0.8)
If BRM > 255 Then
    BRM = 255
End If

```

```

MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

=====
Elseif SPEED < OLDSPEED And SPEED <> 0 Then
=====

```

```

    DIFFSPEED = OLDSPEED - SPEED

```

```

    DEC = DIFFSPEED \ 100

```

```

    RANGE = DEC \ 8

```

```

    BRM = BRM - (RANGE * 0.2)

```

```

    If BRM < 0 Then

```

```

        BRM = 0

```

```

    End If

```

```

    MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

    BRM = BRM - (RANGE * 0.3)

```

```

    If BRM < 0 Then

```

```

        BRM = 0

```

```

    End If

```

```

    MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

    BRM = BRM - (RANGE * 0.4)

```

```

    If BRM < 0 Then

```

```

        BRM = 0

```

```

    End If

```

```

    MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

    BRM = BRM - (RANGE * 0.5)

```

```

    If BRM < 0 Then

```

```

        BRM = 0

```

```

    End If

```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
BRM = BRM - (RANGE * 0.6)
```

```
If BRM < 0 Then
```

```
    BRM = 0
```

```
End If
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
BRM = BRM - (RANGE * 0.7)
```

```
If BRM < 0 Then
```

```
    BRM = 0
```

```
End If
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
BRM = BRM - (RANGE * 0.8)
```

```
If BRM < 0 Then
```

```
    BRM = 0
```

```
End If
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
BRM = BRM - (RANGE * 0.9)
```

```
If BRM < 0 Then
```

```
    BRM = 0
```

```
End If
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
=====
```

```
ElseIf SPEED = 0 Then
```

```
=====
```

```
SUM = 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

PI = 0
DE = 0
BRM = 0

MSComm1.Output = Chr$(BRM)

End If
End If

OLDSPEED = SPEED
Timer2.Enabled = True
End If
End If
*****
'CHANGE REVERSE TO FORWARD
*****
If QUAD <> FORWARD And QUAD <> 0 Then

Timer2.Enabled = False 'CLOSE LOOP PAUSE
QUAD = FORWARD
Timer1.Enabled = True 'LOOP BREAK REVERSE

End If

'%%%%%%%%%%
End If
End Sub
Private Sub Command4_Click()
'%%%%%%%%%%

```

NOTE = "INPUT DATA"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
If Text1.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,SPEED "
End If
```

```
If Text2.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,Dmax "
End If
```

```
If Text3.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,Dmin "
End If
```

```
If Text4.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,KP "
End If
```

```
If Text5.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,KI "
End If
```

```
If Text6.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " 'PO "
End If
```

```
If Text1.Text = "" Or Text2.Text = "" Or _
    Text3.Text = "" Or Text4.Text = "" Or _
    Text5.Text = "" Or Text6.Text = "" Then
    MsgBox NOTE, vbOKOnly, " Data Constant "
End If
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

=====
If Text1.Text <> "" And Text2.Text <> "" And _
  Text3.Text <> "" And Text4.Text <> "" And _
  Text5.Text <> "" And Text6.Text <> "" Then

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

  REVERSE = 140

```

```

*****

```

```

'ROTATE REVERSE

```

```

*****

```

```

  If QUAD = REVERSE Or QUAD = 0 Then

```

```

    QUAD = REVERSE

```

```

    MSComm1.PortOpen = False

```

```

    MSComm2.PortOpen = True

```

```

    MSComm2.Output = Chr$(QUAD)

```

```

    MSComm2.PortOpen = False

```

```

    MSComm1.PortOpen = True

```

```

  SPEED = Val(Text1.Text)

```

```

  Dmax = Val(Text2.Text)

```

```

  Dmin = Val(Text3.Text)

```

```

  KP = Val(Text4.Text)

```

```

  KI = Val(Text5.Text)

```

```

  PO = Val(Text6.Text)

```

```

=====
  If Dmax = Dmin Then

```

```

    MsgBox "Dmax equal Dmin", vbOKOnly, "Distance Speed Error"

```

```

  End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
If Dmin > Dmax Then
```

```
    MsgBox "Warning! Dmin more than Dmax", vbOKOnly, "Distance Speed Error"
```

```
End If
```

```
If Val(Text1.Text) > 2500 Then
```

```
    MsgBox "Error Data Speed Which Yor want", vbOKOnly, "Speed Error"
```

```
End If
```

```
=====
If Text1.Text <> "" And Text2.Text <> "" And
Text3.Text <> "" And Text4.Text <> "" And
Text5.Text <> "" And Text6.Text <> "" And
SPEED <= 2500 And SPEED >= 0 And
KP <> 0 And KI <> 0 And Dmax > Dmin Then
```

```
    Timer2.Enabled = False
```

```
    NUMBER = 0
```

```
    N = 0
```

```
    If OLDSPEED = 0 Then
```

```
        START = ((SPEED / 2500) * 255)
```

```
        START = START * 0.3
```

```
        SEND = (START * 0.3) \ 1
```

```
        BRM = SEND
```

```
        MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
        SEND = (START * 0.4) \ 1
```

```
        BRM = SEND
```

```
        MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
        SEND = (START * 0.5) \ 1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
BRM = SEND
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
SEND = (START * 0.6) \ 1
BRM = SEND
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
SEND = (START * 0.7) \ 1
BRM = SEND
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
SEND = (START * 0.8) \ 1
BRM = SEND
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
SEND = (START * 0.9) \ 1
BRM = SEND
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
End If
```

```
=====
If OLDSPEED <> 0 Then
```

```
=====
If SPEED > OLDSPEED Then
```

```
=====
DIFFSPEED = SPEED - OLDSPEED
```

```
INC = DIFFSPEED \ 100
```

```
RANGE = (INC * 0.2) \ 1
```

```
BRM = BRM + (RANGE + 0.1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

If BRM > 255 Then
    BRM = 255
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```
BRM = BRM + (RANGE + 0.2)
```

```

If BRM > 255 Then
    BRM = 255
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```
BRM = BRM + (RANGE + 0.3)
```

```

If BRM > 255 Then
    BRM = 255
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```
BRM = BRM + (RANGE + 0.4)
```

```

If BRM > 255 Then
    BRM = 255
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```
BRM = BRM + (RANGE + 0.5)
```

```

If BRM > 255 Then
    BRM = 255
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```
BRM = BRM + (RANGE + 0.6)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

If BRM > 255 Then
    BRM = 255
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```
BRM = BRM + (RANGE + 0.7)
```

```

If BRM > 255 Then

```

```
    BRM = 255
```

```
End If
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
BRM = BRM + (RANGE + 0.8)
```

```

If BRM > 255 Then

```

```
    BRM = 255
```

```
End If
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
ElseIf SPEED < OLDSPEED And SPEED <> 0 Then
```

```
DIFFSPEED = OLDSPEED - SPEED
```

```
DEC = DIFFSPEED \ 100
```

```
RANGE = DEC \ 8
```

```
BRM = BRM - (RANGE * 0.2)
```

```

If BRM < 0 Then

```

```
    BRM = 0
```

```
End If
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```

BRM = BRM - (RANGE * 0.3)
If BRM < 0 Then
    BRM = 0
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

BRM = BRM - (RANGE * 0.4)
If BRM < 0 Then
    BRM = 0
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

BRM = BRM - (RANGE * 0.5)
If BRM < 0 Then
    BRM = 0
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

BRM = BRM - (RANGE * 0.6)
If BRM < 0 Then
    BRM = 0
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

BRM = BRM - (RANGE * 0.7)
If BRM < 0 Then
    BRM = 0
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

BRM = BRM - (RANGE * 0.8)
If BRM < 0 Then
    BRM = 0
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

BRM = BRM - (RANGE * 0.9)
If BRM < 0 Then
    BRM = 0
End If
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

ElseIf SPEED = 0 Then

```

```

SUM = 0
PI = 0
DE = 0
BRM = 0

```

```

MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

End If

```

```

End If

```

```

OLDSPEED = SPEED

```

```

Timer2.Enabled = True

```

```

End If

```

```

End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'CHANGE FORWARD TO REVERSE ROTATE
```

```
*****
```

```
If QUAD <> REVERSE And QUAD <> 0 Then
```

```
    Timer2.Enabled = False    'CLOSE LOOP PAUSE
```

```
    QUAD = REVERSE
```

```
    Timer3.Enabled = True    'LOOP BREAK FORWARD
```

```
End If
```

```
'%%%%%%%%%
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Public Sub Timer1_Timer()
```

```
    CONDITION = 136    'CHANGE REVERSE TO FORWARD
```

```
    MSComm1.PortOpen = False
```

```
    MSComm2.PortOpen = True
```

```
    MSComm2.Output = Chr$(CONDITION)
```

```
    MSComm2.PortOpen = False
```

```
    DELAY = 5
```

```
    Do Until DELAY = 0
```

```
        DELAY = DELAY - 1
```

```
    Loop
```

```
    CONDITION = 130
```

```
    MSComm2.PortOpen = True
```

```
    MSComm2.Output = Chr$(CONDITION)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MSComm2.PortOpen = False
```

```
MSComm1.PortOpen = True
```

```
Do Until BACK <= 300
```

```
STOPREVERSE: BRM = 0
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
NUMBER = 0
```

```
MSComm1.InBufferCount = 0
```

```
Do
```

```
NUMBER = NUMBER + 1
```

```
Loop Until MSComm1.InBufferCount >= 2 Or NUMBER >= 200
```

```
If NUMBER >= 200 Then
```

```
GoTo STOPREVERSE
```

```
End If
```

```
INDATA = MSComm1.Input
```

```
DATA = "&H" + INDATA
```

```
DSP = Val(DATA)
```

```
BACK = (DSP * 2500) / 255
```

```
Loop
```

```
MSComm1.PortOpen = False
```

```
CONDITION = 128
```

```
MSComm2.PortOpen = True
```

```
MSComm2.Output = Chr$(CONDITION)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MSComm2.PortOpen = False
```

```
    DELAY = 3
```

```
Do Until DELAY = 0
```

```
    DELAY = DELAY - 1
```

```
Loop
```

```
    QUAD = FORWARD
```

```
MSComm2.PortOpen = True
```

```
MSComm2.Output = Chr$(QUAD)
```

```
MSComm2.PortOpen = False
```

```
*****
```

```
'START FORWARD RUNNING
```

```
*****
```

```
MSComm1.PortOpen = True
```

```
SUM = 0
```

```
DE = 0
```

```
PI = 0
```

```
BRM = 0
```

```
OLDSPEED = 0
```

```
NOTE = "INPUT DATA"
```

```
If Text1.Text = "" Then
```

```
    NOTE = NOTE & " ,SPEED "
```

```
End If
```

```
If Text2.Text = "" Then
```

```
    NOTE = NOTE & " ,Dmax "
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

End If

If Text3.Text = "" Then

NOTE = NOTE & " ,Dmin "

End If

If Text4.Text = "" Then

NOTE = NOTE & " ,KP "

End If

If Text5.Text = "" Then

NOTE = NOTE & " ,KI "

End If

If Text6.Text = "" Then

NOTE = NOTE & " ,PO "

End If

If Text1.Text = "" Or Text2.Text = "" Or
Text3.Text = "" Or Text4.Text = "" Or
Text5.Text = "" Or Text6.Text = "" Then

MsgBox NOTE, vbOKOnly, " DATA CONSTANT "

End If

SPEED = Val(Text1.Text)

Dmax = Val(Text2.Text)

Dmin = Val(Text3.Text)

KP = Val(Text4.Text)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KI = Val(Text5.Text)

PO = Val(Text6.Text)

If Dmax = Dmin Then

 MsgBox "Dmax equal Dmin", vbOKOnly, "Distance Speed Error"

End If

If Dmin > Dmax Then

 MsgBox "Warning! Dmin more than Dmax", vbOKOnly, "Distance Speed Error"

End If

If Val(Text1.Text) > 2500 Then

 MsgBox "Error Data Speed Which Yor want", vbOKOnly, "Speed Error"

End If

If Text1.Text <> "" And Text2.Text <> "" And
 Text3.Text <> "" And Text4.Text <> "" And
 Text5.Text <> "" And Dmax > Dmin And
 SPEED <= 2500 And SPEED >= 0 And
 KP <> 0 And KI <> 0 And Text6.Text <> "" Then

 START = ((SPEED / 2500) * 255)

 START = START * 0.3

 SEND = (START * 0.3) \ 1

 BRM = SEND

 MSComm1.Output = Chr\$(BRM)

 SEND = (START * 0.4) \ 1

 BRM = SEND

 MSComm1.Output = Chr\$(BRM)

```

SEND = (START * 0.5) \ 1
BRM = SEND
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

SEND = (START * 0.6) \ 1
BRM = SEND
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

SEND = (START * 0.7) \ 1
BRM = SEND
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

SEND = (START * 0.8) \ 1
BRM = SEND
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

SEND = (START * 0.9) \ 1
BRM = SEND
MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

End If

Timer2.Enabled = True

Timer1.Enabled = False

End Sub

Private Sub Timer3_Timer()

CONDITION = 2 'CHANGE FORWARD TO REVERSE

MSComm1.PortOpen = False

MSComm2.PortOpen = True

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MSComm2.Output = Chr$(CONDITION)
```

```
MSComm2.PortOpen = False
```

```
    DELAY = 3
```

```
    Do Until DELAY = 0
```

```
        DELAY = DELAY - 1
```

```
    Loop
```

```
    CONDITION = 8
```

```
    MSComm2.PortOpen = True
```

```
    MSComm2.Output = Chr$(CONDITION)
```

```
    MSComm2.PortOpen = False
```

```
    MSComm1.PortOpen = True
```

```
Do Until BACK <= 300
```

```
STOPFORWARD: BRM = 0
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
    NUMBER = 0
```

```
    MSComm1.InBufferCount = 0
```

```
Do
```

```
    NUMBER = NUMBER + 1
```

```
Loop Until MSComm1.InBufferCount >= 2 Or NUMBER >= 200
```

```
If NUMBER >= 200 Then
```

```
    GoTo STOPFORWARD
```

```
End If
```

```
INDATA = MSComm1.Input
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DATA = "&H" + INDATA
DSP = Val(DATA)
BACK = (DSP * 2500) / 255

```

Loop

```

MSComm1.PortOpen = False

```

```

CONDITION = 0

```

```

MSComm2.PortOpen = True

```

```

MSComm2.Output = Chr$(CONDITION)

```

```

MSComm2.PortOpen = False

```

```

DELAY = 5

```

```

Do Until DELAY = 0

```

```

    DELAY = DELAY - 1

```

Loop

```

QUAD = REVERSE

```

```

MSComm2.PortOpen = True

```

```

MSComm2.Output = Chr$(QUAD)

```

```

MSComm2.PortOpen = False

```

```

*****

```

```

'START REVERSE RUNNING

```

```

*****

```

```

MSComm1.PortOpen = True

```

```

SUM = 0

```

```

DE = 0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

PI = 0
BRM = 0
OLDSPEED = 0

NOTE = "INPUT DATA"
If Text1.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,SPEED "
End If

If Text2.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,Dmax "
End If

If Text3.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,Dmin "
End If

If Text4.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,KP "
End If

If Text5.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,KI "
End If

If Text6.Text = "" Then
    NOTE = NOTE & " ,PO "
End If

```

```
If Text1.Text = "" Or Text2.Text = "" Or _
    Text3.Text = "" Or Text4.Text = "" Or _
    Text5.Text = "" Or Text6.Text = "" Then
```

```
    MsgBox NOTE, vbOKOnly, " DATA CONSTANT "
```

```
End If
```

```
SPEED = Val(Text1.Text)
```

```
Dmax = Val(Text2.Text)
```

```
Dmin = Val(Text3.Text)
```

```
KP = Val(Text4.Text)
```

```
KI = Val(Text5.Text)
```

```
PO = Val(Text6.Text)
```

```
-----
```

```
If Dmax = Dmin Then
```

```
    MsgBox "Dmax equal Dmin", vbOKOnly, "Distance Speed Error"
```

```
End If
```

```
If Dmin > Dmax Then
```

```
    MsgBox "Warning! Dmin more than Dmax", vbOKOnly, "Distance Speed Error"
```

```
End If
```

```
If Val(Text1.Text) > 2500 Then
```

```
    MsgBox "Error Data Speed Which Yor want", vbOKOnly, "Speed Error"
```

```
End If
```

```
=====
```

```
If Text1.Text <> "" And Text2.Text <> "" And _
```

```
    Text3.Text <> "" And Text4.Text <> "" And _
```

```
    Text5.Text <> "" And Dmax > Dmin And _
```

```
    SPEED <= 2500 And SPEED >= 0 And _
```

```
    KP <> 0 And KI <> 0 And Text6.Text <> "" Then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
START = ((SPEED / 2500) * 255)
```

```
START = START * 0.3
```

```
SEND = (START * 0.3) \ 1
```

```
BRM = SEND
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
SEND = (START * 0.4) \ 1
```

```
BRM = SEND
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
SEND = (START * 0.5) \ 1
```

```
BRM = SEND
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
SEND = (START * 0.6) \ 1
```

```
BRM = SEND
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
SEND = (START * 0.7) \ 1
```

```
BRM = SEND
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
SEND = (START * 0.8) \ 1
```

```
BRM = SEND
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

```
SEND = (START * 0.9) \ 1
```

```
BRM = SEND
```

```
MSComm1.Output = Chr$(BRM)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

End If
Timer2.Enabled = True
Timer3.Enabled = False
End Sub

```

```

Private Sub Timer2_Timer()

```

```

=====
'SEND BRM GO TO MCS-51
=====

```

```

ERROR: If N >= 10 Then

```

```

    BRM = OVER

```

```

End If

```

```

MSComm1.Output = Chr$(BRM)

```

```

NUMBER = 0

```

```

Label13.Caption = BRM

```

```

CODE = Hex$(BRM)

```

```

Debug.Print "CODE BRM =" & CODE

```

```

=====
'RECEIVE DATA
=====

```

```

MSComm1.InBufferCount = 0

```

```

Do

```

```

    NUMBER = NUMBER + 1

```

```

Loop Until MSComm1.InBufferCount >= 2 Or NUMBER >= 300

```

```

If NUMBER >= 300 Then

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GoTo ERROR

End If

INDATA = MSComm1.Input

DATA = "&h" + INDATA

DSP = Val(DATA)

Label11.Caption = DSP

BACK = (DSP * 2500) / 255

Label12.Caption = BACK

If SPEED >= 2480 Then

 If DSP = 255 Then

 N = N + 1

 End If

End If

If N > 100 Then

 N = 15

End If

'CALCULATE PI

If Dmax > Dmin And Dmax <> Dmin And _

 SPEED <= 2500 And SPEED >= 0 And _

 KP <> 0 And KI <> 0 Then

 Diff = Dmax - Dmin

 DV = (DSP * 2500) / 255

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$DE = (SPEED - DV) / Diff$$

$$PO = 0$$

$$SUM = SUM + DE$$

$$Label14.Caption = SUM$$

$$PI = (KP * DE) + (KP * KI * SUM) + PO$$

If DIFFSPEED > 1200 Then

 If PI < 0 Then

$$SUM = 0$$

$$DE = 0$$

$$PI = 0$$

 End If

End If

$$Label15.Caption = PI$$

End If

If (PI >= 0 And PI <= 255) Then

$$BRM = PI \ 1$$

End If

If (PI > 255) Then

$$BRM = 255$$

End If

If (PI < 0) Then

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

BRM = 0
End If
*****

If N = 5 Then
    OVER = BRM
End If
End Sub

Public Sub HScroll1_Change()
    Text1.Text = Format(HScroll1.Value, "#####")
End Sub

Public Sub Text1_Change()
    If Val(Text1.Text) > 2500 Then
        MsgBox "Error Data Speed Which You Want", vbOKOnly, "Speed Error"
    Else
        HScroll1.Value = Val(Text1.Text)
    End If
End Sub

```

ประวัติผู้เขียน

นายวิญญู แสงสินกสิกิจ เกิดเมื่อวันที่ 23 เมษายน 2515 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2538 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้