การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยการผสมสัญญาณแบบ Binary Rate ที่โปรแกรมได้

SPEED CONTROL OF A SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR USING PROGRAMMABLE BINARY RATE

อนุชิต เจริญ

ANUCHIT CHAREAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-032-4

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยการผสมสัญญาณแบบ Binary Rate ที่โปรแกรมได้

SPEED CONTROL OF A SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR USING PROGRAMMABLE BINARY RATE

อนุชิต เจริญ

ANUCHIT CHAREAN

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 38955
วัน, เดือน, ปี 20 ก.พ. 2544
.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2544

ISBN 974-648-032-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPEED CONTROL OF A SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR USING PROGRAMABLE BINARY RATE

ANUCHIT CHAREAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2001

ISBN 974-648-032-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยวิธีการผสมสัญญาณแบบ BINARY RATE ที่โปรแกรมได้
SPEED CONTROL OF A SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR USING PROGRAMMABLE BINARY RATE MODULATION

ชื่อนักศึกษา นายอนุชิต เจริญ

รหัสประจำตัว 39061014

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.พิพัฒน์	เลาหสงคราม	
รศ.ดร.วันชัย	ริ้วรุจา	
ผศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	
รศ.สุพรรณ	กุลพาณิชย์	
รศ.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	

วัน/เดือนปี ที่สอบ 15 พฤศจิกายน 2543 เวลา 12.00 – 13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 9 **เดือน** ธันวาคม **พ.ศ.** ๒๕๔๓

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยวิธีการผสมสัญญาณแบบ Binary Rate ที่โปรแกรมได้
ชื่อนักศึกษา	นายอนุชิต เจริญ
รหัสประจำตัว	39061014
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวทางการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่อาศัยหลักการควบคุมความถี่และ Binary Rate Modulation (BRM) โดยใช้ไมโครคอลโทรเลอร์ 8051 ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดสัญญาณ Binary Rate ขนาด 8 บิท เพื่อผสมกับสัญญาณไฟสลับจากแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับป้อนกลับให้ขดลวดสเตเตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ หลักการควบคุมดังกล่าวนี้ให้ผลตอบสนองดีกว่าการควบคุมเฟส หรือการควบคุมด้วยสวิทช์อิเล็คทรอนิกส์ เนื่องจากสัญญาณแรงดันผิดเพี้ยนที่เกิดจากแหล่งจ่ายและการแทรกของความถี่วิทยุมีค่าลดต่ำลงได้ตามการกำหนดในขณะควบคุมความเร็ว จากผลการทดสอบเมื่อทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขนาด 220 โวลท์ 1/3 แรงม้า 50 เฮริตร์ ผลปรากฏว่าสามารถควบคุมพลังงานที่เหมาะสมตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเอาต์พุตอย่างมีประสิทธิภาพและเวลาในการตอบสนองต่อสภาวะชั่วครู่ทำได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มอเตอร์มีสมรรถนะในการทำงานสูงในสภาวะการทำงานขณะไม่มีโหลดและขณะขับโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Speed Control of a Single Phase Induction Motor Using Programmable Binary Rate
Student	Mr. Anuchit Charean
Student ID.	39061014
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Vittaya Tipsuwanporn

ABSTRACT

This thesis proposed method to control speed of single phase induction motor using technique of Multi-Frequency and Binary Rate Modulation (BRM) control . The motor speed was controlled with the application of 8051 microcontroller to supply 8-bit, binary rate signal simultaneously with voltage signal from AC source to stator winding. Due to lower AC voltage distortion and radio frequency interference, the proposed method had better results than phase control and electronics switching control. Experimentation with 220 voltage, 1/3 HP and 50 Hz single phase induction motor shown that power was suitablely and effectively controlled according to fluctuation of output speed, and transient response was fast, resulting to high performance operating under both of on load and off load conditions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีนั้น ด้วยคำแนะนำจาก รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกประทับใจและซาบซึ้งในการสนับสนุนและความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์เวคิน ปียรัตน์ อาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และทุกท่านมีที่ช่วยเหลือแก้ไขให้คำแนะนำในบางจุดที่ผู้วิจัยติดปัญหาบางอย่าง ซึ่งมีส่วนช่วยให้ผู้วิจัยเข้าใจในปัญหานั้น

ขอขอบพระคุณทางครอบครัว เพื่อนๆทุกคนที่คอยให้การสนับสนุน และให้กำลังใจมาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ คุณพ่อ และคุณแม่ รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน

อนุชิต เจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญรูป VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 กล่าวนำ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 1

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 1

1.4 วิธีการวิจัย 2

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์ 2

1.6 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์ 2

1.7 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 กล่าวนำ 4

2.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 4

2.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 4

2.2.1.1 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ 5

2.2.1.2 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 11

2.2.1.3 การเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 21

2.2.2 ชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 22

2.2.2.1 มอเตอร์แบบแยกเฟส 23

2.2.2.2 มอเตอร์ชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ 23

2.2.2.3 มอเตอร์ชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ 24

2.2.2.4 มอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ 25

2.2.2.5 มอเตอร์แบบบังขั้ว 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 ทฤษฎีและหลักการควบคุม 26

2.3.1 ตัวควบคุม 27

2.3.1.1 ตัวควบคุมแบบ ON-OFF 27

2.3.1.2 ตัวควบคุมแบบ P 28

2.3.1.3 ตัวควบคุมแบบ I 29

2.3.1.4 ตัวควบคุมแบบ D 29

2.3.2 ตัวควบคุมแบบประกอบร่วมกัน 29

2.3.2.1 ตัวควบคุมแบบ PI 29

2.3.2.2 ตัวควบคุมแบบ PD 30

2.3.2.3 ตัวควบคุมแบบ PID 30

2.4 หลักการพื้นฐานของการควบคุมความถี่และผสมสัญญาณแบบ BRM 30

บทที่ 3 การออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 39

3.1 โครงสร้างและการออกแบบระบบควบคุม 39

3.2 การออกแบบทางฮาร์ดแวร์ 41

3.3 การออกแบบทางซอฟต์แวร์ 43

บทที่ 4 ผลการทดลอง 47

4.1 ผลการทดลองส่วนที่ 1 48

4.2 ผลการทดลองส่วนที่ 2 51

4.3 ผลการทดลองส่วนที่ 3 52

4.4 การทดสอบมอเตอร์ 54

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 60

5.1 สรุปผลการทดลอง 60

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม.....63

ภาคผนวก.....64

ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....65

ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย.....77

ประวัติผู้เขียน.....106

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 การควบคุมมอเตอร์โดยตรง 52
4.2 การควบคุมมอเตอร์ด้วยการควบคุมแบบเฟส 53
4.3 การควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมความถี่และการผสมสัญญาณแบบ BRM 53
4.4 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – No Load ที่ความถี่ 40 เฮิตรซ์ 54
4.5 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – No Load ที่ความถี่ 50 เฮิตรซ์ 54
4.6 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – No Load ที่ความถี่ 60 เฮิตรซ์ 55
4.7 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – Take Load 0.3 นิวตัน-เมตร ที่ความถี่ 40 เฮิตรซ์ 55
4.8 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – Take Load 0.96นิวตัน-เมตร ที่ความถี่ 40 เฮิตรซ์ 55
4.9 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – Take Load 1.75 นิวตัน-เมตร ที่ความถี่ 40 เฮิตรซ์ 56
4.10 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – Take Load 0.3 นิวตัน-เมตร ที่ความถี่ 50 เฮิตรซ์ 56
4.11 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – Take Load 0.9 นิวตัน-เมตร ที่ความถี่ 50 เฮิตรซ์ 56
4.12 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – Take Load 1.75 นิวตัน-เมตร ที่ความถี่ 50 เฮิตรซ์ 57
4.13 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – Take Load 0.3 นิวตัน-เมตร ที่ความถี่ 60 เฮิตรซ์ 57
4.14 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – Take Load 0.9 นิวตัน-เมตร ที่ความถี่ 60 เฮิตรซ์ 57
4.15 ผลการทดสอบแบบ Open Loop – Take Load 1.75 นิวตัน-เมตร ที่ความถี่ 60 เฮิตรซ์ 58
4.16 ผลการทดสอบแบบ Close Loop – No Load 58
4.17 ผลการทดสอบแบบ Close Loop – Take Load ที่ความถี่ 40 เฮิตรซ์ 58
4.18 ผลการทดสอบแบบ Close Loop – Take Load ที่ความถี่ 50 เฮิตรซ์ 59
4.19 ผลการทดสอบแบบ Close Loop – Take Load ที่ความถี่ 60 เฮิตรซ์ 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 5

2.2 การสั่น (หรือการกระเพื่อม) ของสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กหมุน 7

2.3 ภาพตัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 8

2.4 คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง 8

2.5 วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์ 9

2.6 คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว ค่าจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจากการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง 10

2.7 รูปคลื่นแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเฟสเดียว. 10

2.8 สนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง 11

2.9 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่พิจารณาตามพิกัด d-q 13

2.10 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 16

2.11 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว 18

2.12 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดขดลวดแยก 23

2.13 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ 24

2.14 มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ 25

2.15 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ 25

2.16 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบบังขั้ว 26

2.17 แสดงการควบคุมแบบ ON-OFF 27

2.18 โครงสร้างพื้นฐานของการผสมสัญญาณ BRM 31

2.19 รูปแบบสัญญาณความถี่ 40 เฮิตรซ์ และ BRM 4 บิต 34

2.20 รูปแบบสัญญาณความถี่ 50 เฮิตรซ์ และ BRM 4 บิต 36

2.21 รูปแบบสัญญาณความถี่ 60 เฮิตรซ์ และ BRM 4 บิต 38

3.1 โครงสร้างของระบบควบคุม 39

3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ Root Locus 40

3.3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบทั้งหมด 41

3.4 วงจรกำลัง 42

3.5 วงจรขับนำ 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.6 การเชื่อมต่อทางฮาร์ดแวร์ 43
3.7 แผนภาพการทำงานของระบบทั้งหมด 44
3.8 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมแบบ PI.....45
3.9 แผนภาพการสร้างรูปแบบพัลซ์ BRM.....46
4.1 บล๊อกไดแกรมการทดสอบการควบคุมมอเตอร์ 47
4.2 การทดสอบการควบคุมมอเตอร์ 47
4.3 แสดงชุดควบคุมมอเตอร์ 48
4.4 รูปพัลซ์ BRM รูปแบบที่ 1, 2, 4 และ 8 48
4.5 รูปพัลซ์ BRM รูปแบบที่ 16, 32, 64 และ 128 49
4.6 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขณะไร้โหลด 49
4.7 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขณะขับโหลด 0.3 นิวตัน-เมตร 50
4.8 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขณะขับโหลด 0.9 นิวตัน-เมตร 50
4.9 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขณะขับโหลด 1.75 นิวตัน-เมตร 51
4.10 ผลตอบสนองของมอเตอร์ขณะใส่โหลด 1.75 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที.....51
4.11 ผลตอบสนองของมอเตอร์ขณะใส่โหลด 1.75 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็ว 2200 รอบ/นาที 52
5.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันนี้ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ทั้งในบ้านเรือน สถานที่ทำงาน และโรงงานอุตสาหกรรมทั่วๆ ไป เนื่องจากมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือมีโครงสร้างที่แข็งแรงทนทาน การบำรุงรักษาน้อยกว่า ราคาถูก สามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่สกปรก และ อันตรายต่อการระเบิดได้ง่าย ซึ่งโดยปกติแล้วนั้นการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ส่วนใหญ่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบ PWM(Pulse Width Modulation) การควบคุมแบบเฟสหรือการควบคุมด้วยสวิทช์อิเลคทรอนิกส์ และการควบคุมแบบ BRM(Binary Rate Modulation) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมความถี่และBRM มาควบคุมแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ตามการใช้งานที่แท้จริง ซึ่งได้พัฒนาจาก[1-2] เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้มีประสิทธิ์ภาพ และสมรรถนะในการทำงานสูงขึ้นและมีการประหยัดพลังงาน ซึ่งมีประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อค้นคว้าวิจัยเทคนิคการควบคุมแบบ BRM ให้เป็นที่ยอมรับและนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

2. เพื่อหาแนวทางใหม่ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ให้มีประสิทธิภาพสูง และประหยัดพลังงาน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการวิเคราะห์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ด้วยเทคนิคการควบคุมความถี่และ BRM ในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุม

2. หาวิธีการใหม่ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยเทคนิค BRM นั้นให้มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการควบคุม และให้ผลการตอบสนองได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

3. สร้างเครื่องต้นแบบจากหลักการควบคุมความถี่และ BRM เพื่อใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีจากบทความ วารสารต่างๆ เอกสารและตำราทางวิชาการที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการต่างๆ

2. วิเคราะห์ระบบควบคุมจากสมการทางคณิตศาสตร์และเขียนโปรแกรม เพื่อประมวลผลสำหรับใช้ในการควบคุมมอเตอร์

3. ออกแบบวงจรที่ใช้ในระบบควบคุมในแต่ละส่วน

4. ทำการสร้าง และประกอบเป็นชุดควบคุมความเร็วสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่สามารถทดสอบผลได้ตามทฤษฎีที่นำเสนอ

5. สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1. สามารถนำหลักการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ด้วยเทคนิคการควบคุมความถี่และ BRM มาใช้ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

2. รู้จักแก้ปัญหาจากผลการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบดั้งเดิม ที่มีการนำมาปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาดโดยวิธีการใหม่

3. เป็นพื้นฐานในการศึกษาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ด้วยเทคนิคการควบคุมความถี่และ BRM

4. สามารถนำเทคนิคการควบคุมความถี่และ BRM มาประยุกต์ใช้งาน ด้านอิเลคทรอนิกส์กำลัง เช่น การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมอุณหภูมิ แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตช์ชิ่ง และในงานที่ประยุกต์ใช้หลักการ PWM

1.6 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมความถี่และ BRM เพื่อใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวให้มีผลการตอบสนองตามสภาวะของการเปลี่ยนแปลงความเร็วทั้งขณะมอเตอร์ทำงานขณะไร้โหลดและทำงานขับโหลดที่ค่าต่างๆ ได้อย่างแม่นยำและมีการประหยัดพลังงาน โดยมีการกำหนดการควบคุมความถี่ที่ใช้ตั้งแต่ 40-60 เฮิรตซ์ และกำหนดรูปแบบพัลซ์ BRM 256 รูปแบบ สำหรับการจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวตามการใช้งานที่แท้จริงของโหลดอย่างเหมาะสมซึ่งการสร้างรูปพัลซ์ BRM นั้นทำได้ง่ายกว่าและสะดวกกว่าเทคนิคการควบคุมแบบ PWM โดยการสร้างรูปพัลซ์ BRM แต่ละรูปแบบที่อิสระต่อกัน เช่นกรณี BRM ขนาด 8 บิตรูปแบบหลักที่สร้างขึ้นคือ $V_{BRM1}, V_{BRM2}, V_{BRM4}, V_{BRM8}, V_{BRM16}, V_{BRM32}, V_{BRM64}$ และ V_{BRM128} แล้วนำรูปแบบ BRM หลักๆ มากระทำ Linear Combination เพื่อให้ได้รูปแบบอื่นๆส่งไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมมอเตอร์ ผลจากการควบคุมทำให้การควบคุมมอเตอร์มีความถูกต้องสูงตามอัตราของการเปลี่ยนแปลงความเร็วเอาต์พุต และยังให้ผลตอบสนองต่อสภาวะดังกล่าวได้อย่างรวดเร็ว

1.7 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบวงจรสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้เทคนิคการควบคุมความถี่ร่วมกับ BRM ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเป็นบทๆ ได้ดังนี้ คือ

บทที่ 1 บทนำได้กล่าวถึงแนวทางทั่วๆไป ที่นำมาสู่งานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขต วิธีการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย หลักการใหม่ที่ได้นำเสนอ และรายละเอียดในแต่ละบทอย่างคร่าวๆ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ทฤษฎีและหลักการควบคุม และหลักการพื้นฐานของการควบคุมความถี่และการผสมสัญญาณแบบBRM

บทที่ 3 การออกแบบระบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวกล่าวถึง โครงสร้างและการออกแบบระบบควบคุมแบบปิด การออกแบบทางฮาร์ดแวร์ และ การออกแบบทางซอฟต์แวร์

บทที่ 4 ผลการทดลองกล่าวถึงรูปแบบสัญญาณหลักของ BRM การทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะโหลดต่างๆ ผลตอบสนองของมอเตอร์ขณะความเร็วและสภาวะโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ผลของการควบคุมลักษณะสมบัติและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจากการควบคุมโดยตรง การควบคุมด้วยวงจรควบคุมแรงดัน และการควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมความถี่และการผสมสัญญาณแบบ BRM

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ กล่าวถึง สรุปผลการทดลอง ปัญหา และข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

สำหรับบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย เช่นหลักการพื้นฐานและคุณลักษณะสมบัติที่สำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว กระบวนการและตัวควบคุมแบบต่างๆ หลักการพื้นฐานของเทคนิคการควบคุมความถี่และ BRM

2.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นในช่วงกำลังเป็นเศษส่วนแรงม้าและต่ำกว่าเศษส่วนแรงม้า ซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในสถานที่ต่างๆ เช่น บ้านเรือน สถานที่ทำงานและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น และสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวนั้นมีโครงสร้างที่ไม่ยุ่งยากและง่ายต่อการบำรุงรักษา[4] โดยที่สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ

1. มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (Single Phase Induction Motor)
2. มอเตอร์เฟสเดียวแบบซิงโครนัส (Single Phase Synchronous Motor)
3. มอเตอร์เฟสเดียวแบบอนุกรมหรือมอเตอร์ยูนิเวอร์เซล (Single Phase Series or Universal Motor)

ในส่วนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคแนวใหม่มาประยุกต์ใช้ในระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ดังนั้นในหัวข้อ 2.2.1 จึงกล่าวเฉพาะโครงสร้างและการวิเคราะห์เฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเท่านั้น

2.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (Single Phase Induction Motor : SPIM)

สำหรับโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแสดงได้ดังรูปที่ 2.1(ก)จากโครงสร้างดังกล่าวนั้นมีผลทำให้ไม่เกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุน ดังนั้นมอเตอร์จึงไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้ อย่างไรก็ตามถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนไปได้นั้นจำเป็นต้องมีวิธีการช่วยเพื่อให้มอเตอร์เริ่มต้นหมุน และสำหรับการพิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่เพื่ออ้างอิงในการวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ (Double revolving field theory)

หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว สามารถวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ ตามรายละเอียดที่กล่าวถึงดังต่อไปนี้

พฤติกรรมของโรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง

การพิจารณาโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งและขดลวดสเตเตอร์ถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูปที่ 2.1(ข) นั้นจะเห็นพฤติกรรมการสั่นหรือการกระเพื่อมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Pulsating magnetomotive force) และการสั่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Pulsating flux) ที่เกิดขึ้นตามแนวแกนขดลวดสเตเตอร์โดยกระแสที่ไหลในวงจรโรเตอร์ เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็ก (เช่นเดียวกับกิริยาหม้อแปลง) ส่งผลทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในโรเตอร์ตามแนวแกนของเส้นแรงแม่เหล็กที่ สเตเตอร์ (ตามกฎของเลนซ์) โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองนั้นมีทิศทางตรงข้ามกัน ดังนั้นมุมระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นหมายความว่ามอเตอร์ ไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้เนื่องจากไม่มีการเกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุน (Starting torque)

พฤติกรรมของโรเตอร์ขณะหมุน

ถ้าสมมุติให้โรเตอร์ทำการหมุน การหมุนของโรเตอร์เกิดขึ้นได้นั้นจำเป็นต้องมีวงจรช่วยเริ่มต้นหมุน ดังนั้นการเกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวนั้น จำเป็นต้องมีการกำหนดเงื่อนไขของการเริ่มต้นหมุนดังต่อไปนี้

(ก) ลักษณะโครงสร้าง (ข) เส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสั่นของสนามแม่เหล็ก (แรงเคลื่อนแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็ก)

เมื่อพิจารณาการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 องค์ประกอบหลักซึ่งจะมีขนาดเท่ากัน แต่ทิศทางตรงกันข้ามและหมุนที่ความเร็วเดียวกัน คือความเร็วซิงโครนัส สนามแม่เหล็กดังกล่าวพิสูจน์ได้โดยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์หรือใช้กราฟมาทำการวิเคราะห์

จากรูปที่ 2.2 ถ้ากำหนดให้ OP เป็นเวคเตอร์ที่เกิดจากผลของการเคลื่อนที่สองส่วน ซึ่งมีขนาดเท่ากันโดยที่ f คือ การเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามีทิศทางตามเข็มนาฬิกา และ b คือ การเคลื่อนที่ถอยหลังมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นการหมุนของเวคเตอร์ทั้งสองเกิดขึ้นที่ความเร็วเดียวกันในทิศทางตรงข้ามกัน เมื่อกำหนดให้ OR คือ เวคเตอร์ที่เป็นผลรวมของเวคเตอร์สองส่วนที่มีขนาด $+2OP$ และ $-2OP$ โดยที่เวคเตอร์ทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน และเป็นเวคเตอร์ที่แปรตามเวลาในฟังก์ชันไซน์ ดังนั้นถ้าการหมุนของเวคเตอร์ทั้งสองดังกล่าวนั้นหมุนด้วยความเร็วคงที่เดียวกัน ซึ่งการสั่นของสนามแม่เหล็ก(เขียนแทนด้วย เวคเตอร์ OR) ที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์นั้น ส่งผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทาง ดังนั้นการสั่นของเส้นแรงแม่เหล็กในสเตเตอร์ (Pulsating stator flux) ϕ_s ตามแนวแกนของขดลวดสเตเตอร์เป็นผลจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนสองทาง คือ ϕ_f และ ϕ_b ดังรูปที่ 2.2 (ข)

สำหรับสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณาขดลวดสเตเตอร์ที่วางแบบกระจายในรูปสัญญาณไซน์นั้น เป็นการวิเคราะห์จากสมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetomotive Force: mmf) ในตำแหน่งของมุม θ ดังรูปที่ 2.3 และกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$F(\theta) = Ni\cos\theta \tag{2.1}$$

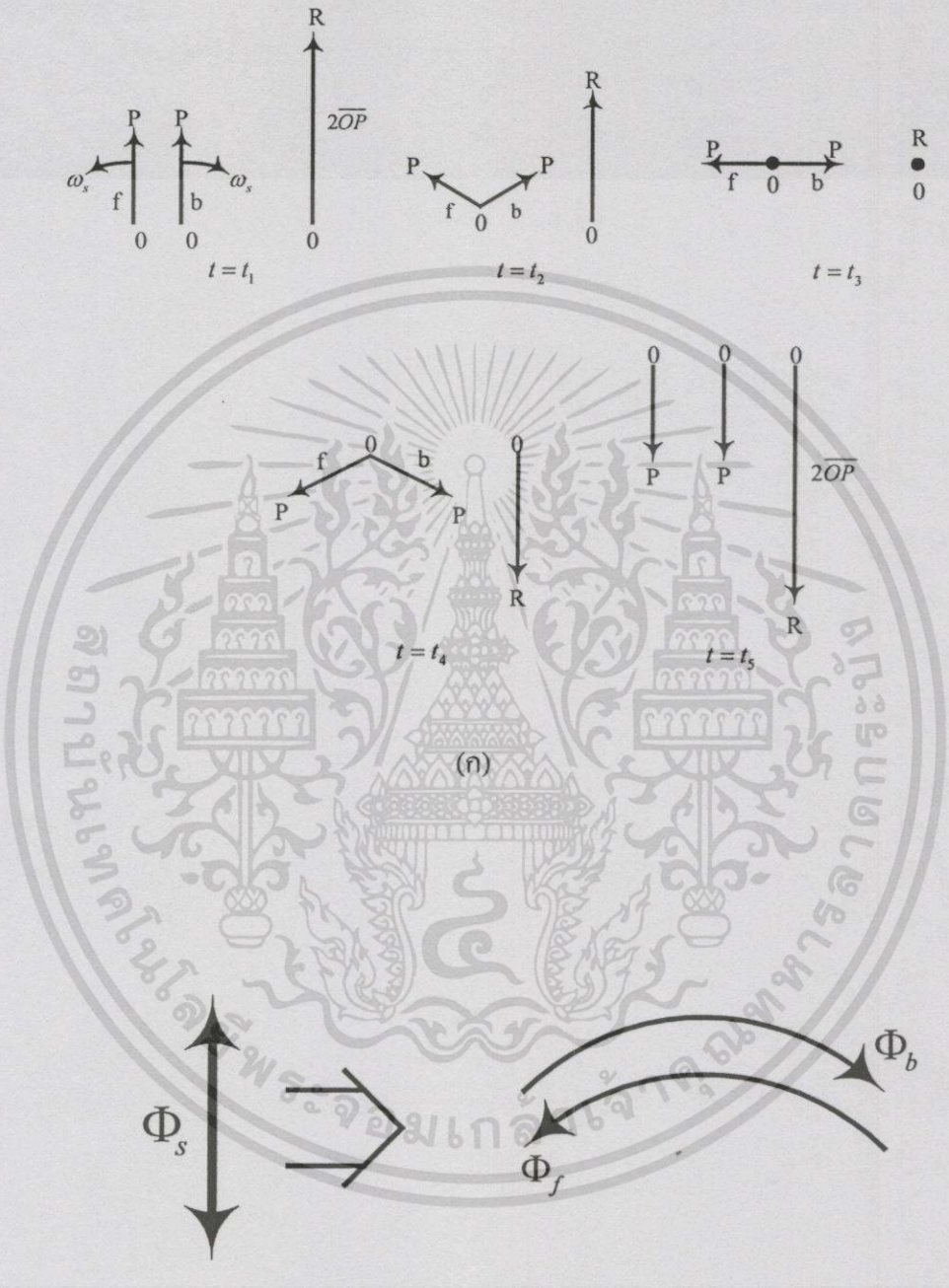
เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ และกำหนดให้ $i = I_{max}\cos\omega t$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} F(\theta,t) &= NI_{max}\cos\theta\cos\omega t \\ &= \frac{NI_{max}}{2}\cos(\omega t-\theta)+\frac{NI_{max}}{2}\cos(\omega t+\theta) \\ &= F_f + F_b \end{aligned} \tag{2.2}$$

เมื่อ F_f คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนตามทิศทางของมุม θ และ F_b แทนแรงเคลื่อนแม่เหล็กตามทิศทางตรงข้ามกับ F_f สำหรับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองนั้นมีผลที่ทำให้เกิดแรงบิดใน มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่มีทิศทางตรงกันข้าม และองค์ประกอบของแรงบิดทั้งสองส่วนแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 สำหรับในขณะมอเตอร์อยู่นิ่งนั้น แรงบิดไปข้างหน้าและแรงบิดถอยหลังมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นทำให้ผลของแรงบิดขณะเริ่มต้นหมุนมีค่าเท่ากับศูนย์แต่ในขณะที่มอเตอร์

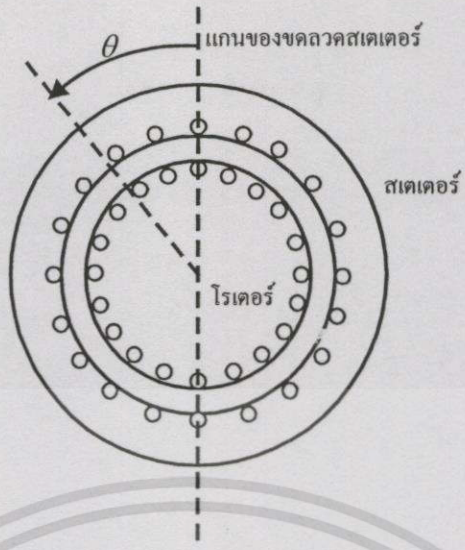
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมุนที่ค่าความเร็วต่างๆ กัน แรงบิดทั้งสองส่วนไม่เท่ากันส่งผลทำให้มอเตอร์หมุนไปได้ตามทิศทางของการหมุน



รูปที่ 2.2 การสั่น(หรือการกระเพื่อม)ของสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

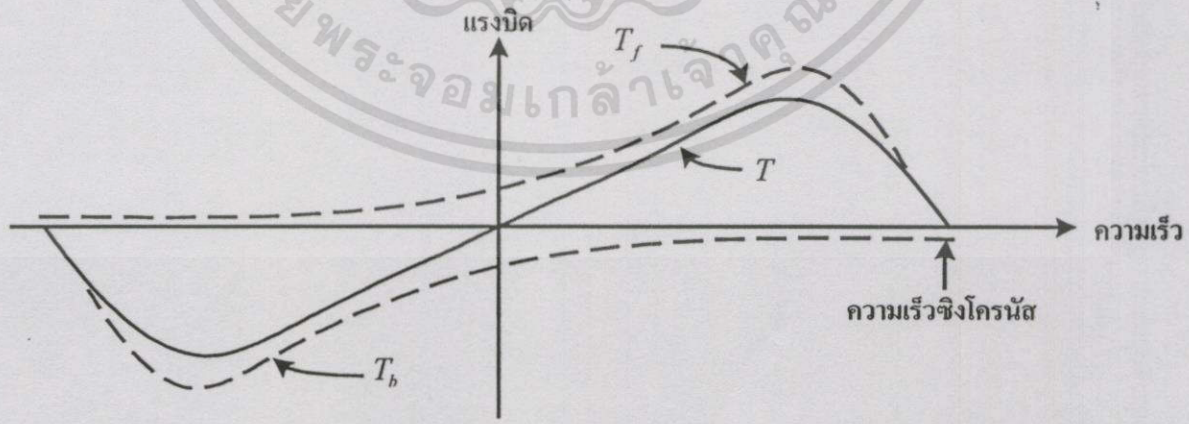


รูปที่ 2.3 ภาพตัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

สลิป (Slip)

ถ้าสมมุติว่าโรเตอร์หมุนตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าที่ความเร็ว n_r รอบต่อนาที และความเร็วซิงโครนัส คือ n รอบต่อนาที ดังนั้นค่าสลิปของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้ากำหนดตามสมการ (2.3)

$$S_f = \frac{n - n_r}{n} = s \tag{2.3}$$

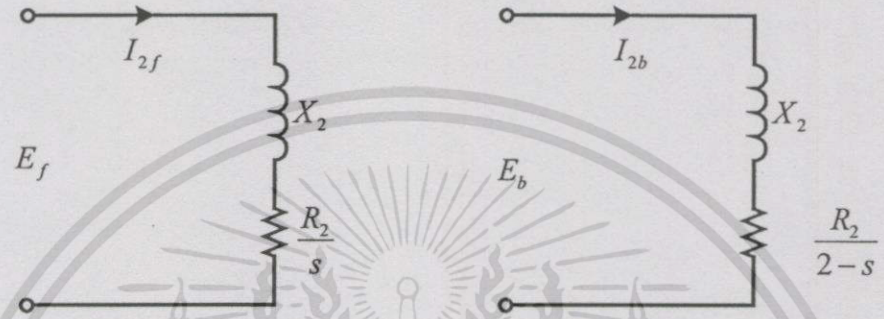


รูปที่ 2.4 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหมุนของโรเตอร์ในทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า เรียกว่า สนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง และค่าสลิปกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$S_b = \frac{n - (-n_r)}{n} = 2 - s \qquad (2.4)$$

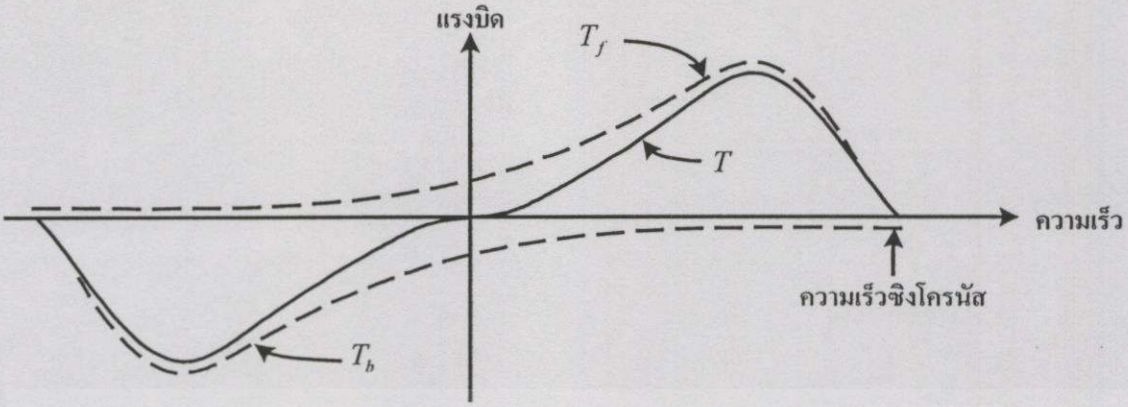


(ก) เส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า (ข) เส้นแรงแม่เหล็กหมุนถอยหลัง

รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์

สำหรับวงจรโรเตอร์เส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า และเส้นแรงแม่เหล็กหมุนถอยหลังดังรูปที่ 2.5 นั้น ขณะโรเตอร์อยู่นิ่งอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนทั้งสองมีค่าเท่ากัน ส่งผลทำให้กระแสเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนทั้งสองเท่ากัน คือ $I_{2f} = I_{2b}$ และทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองที่เกิดขึ้นมีขนาดเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ (ทิศทางตรงกันข้าม) ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_f และ ϕ_b ที่เกิดขึ้นในช่องอากาศจึงมีขนาดเท่ากันด้วย โดยที่พฤติกรรมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้น ยังมีผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กหมุนถอยหลังลดลงอีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้ความเร็วของมอเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าเพิ่มขึ้นในขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กหมุนถอยหลังลดลง อย่างไรก็ตามขณะที่โรเตอร์หมุนอิมพีแดนซ์ของวงจรโรเตอร์ (ในรูปที่ 2.5) นั้นไม่เท่ากัน ซึ่งกระแสโรเตอร์ $I_{2b} \rangle I_{2f}$ (ทำให้ค่าประกอบกำลังต่ำ) และขณะโรเตอร์เคลื่อนที่แรงบิดไปข้างหน้าเพิ่มจึงมีค่าขึ้น โดยที่ในทางตรงข้ามกันแรงบิดถอยหลังมีค่าลดลงทำให้คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว ในรูปที่ 2.4 เปลี่ยนไปเป็นดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นค่าแรงบิดชั่วขณะ

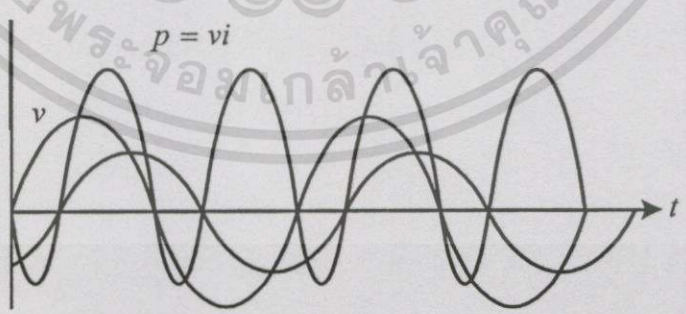
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 คุณลักษณะ แรงบิด - ความเร็ว ค่าจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว จากการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า และถอยหลัง

การสั่นของแรงบิด (Torque Pulsation)

การสั่นของแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวนั้นเกิดขึ้นที่ค่าความถี่ของกำลังชั่วขณะมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่ที่แหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 2.7 จากเหตุผลข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าการสั่นของแรงบิดเกิดขึ้นขณะที่ความถี่ของสเตเตอร์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าด้วยเช่นกัน และการสั่นของแรงบิดที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลจากการกระทำร่วมกันของ ϕ และ *mmf* ที่หมุนตัดผ่านในทิศทางตรงกันข้ามขณะความเร็วซิงโครนัสเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เช่น การกระทำร่วมกันของ ϕ_f กับ F_b และ ϕ_b กับ F_f ของโรเตอร์ นั้นส่งผลทำให้แรงบิดมีค่าคงที่ สำหรับผลจากการสั่นของแรงบิดยังทำให้เกิดเสียงดังเรียกว่า humming effect และการสั่นของแรงบิดสามารถทำให้ลดน้อยลงได้โดยใช้แผ่นยางรองหรือวัสดุที่เป็นยางรองฐานของมอเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.7 รูปคลื่นแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเฟสเดียว

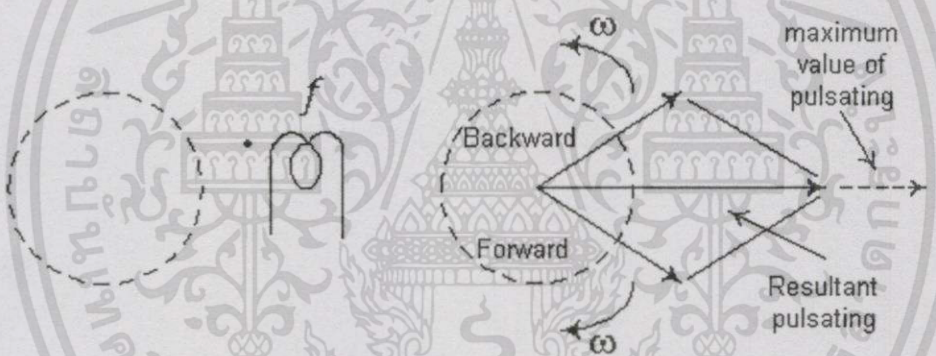
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (Equivalent Circuit of Single Phase Induction Motor)

ในส่วนนี้เป็นการพิจารณาคุณลักษณะต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยอาศัยการวิเคราะห์จากวงจรสมมูลย์ภายใต้เงื่อนไขของการทำงานในสภาวะคงตัว ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทาง

การกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียว ทำให้เกิดการกระเพื่อมของสนามแม่เหล็กดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งการพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนั้นด้วยการแบ่งสนามแม่เหล็กหมุนออกเป็นสองส่วนที่มีทิศทางตรงข้ามกัน โดยที่แต่ละส่วนมีค่า *mmf* สูงสุดที่สเตเตอร์เท่ากับ $\frac{1}{2}$ ของสนามแม่เหล็กหมุนทั้งหมดที่ความเร็วเชิงมุมคือ ω และองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กหมุนทั้งสองที่เกิดขึ้นตามแนวแกนของขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



(ก) ขดลวดเฟสเดียว (ข) สนามแม่เหล็กหมุนสองทาง

รูปที่ 2.8 สนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง

เมื่อพิจารณาขดลวดสเตเตอร์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทางเห็นได้ว่า สนามแม่เหล็กหมุนแต่ละส่วนทำให้เกิดแรงดันสมดุลขึ้นในขดลวดโรเตอร์ และผลลัพธ์ของกระแสโรเตอร์คือ ผลรวมของกระแสที่ไหลในบริเวณผิวรอบขดลวดโรเตอร์ (closed rotor winding) ที่กำหนดโดยแรงดันแต่ส่วน ถ้าแบ่งวงจรสมมูลย์ของโรเตอร์ออกเป็นสองส่วนซึ่งตั้งฉากกันและกำหนดให้กระแสที่ไหลในโรเตอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง คือ I_f และ I_b ตามลำดับ ดังนั้นกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าที่เหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสสมดุลย์ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_f (ไหลในคอยล์ d) และ jI_f (ไหลในคอยล์ q)

สำหรับกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลังที่เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสสมดุลย์ คือ

I_b (ไหลในคอยล์ d) และ $-jI_b$ (ไหลในคอยล์ q)

ดังนั้นผลลัพธ์ของกระแสที่ไหลในคอยล์ d และ q คือ

$$I_d = I_f + I_b$$

$$I_q = j(I_f - I_b) \tag{2.5}$$

ดังนั้น

$$I_f = \frac{1}{2}(I_d - jI_q)$$

$$I_b = \frac{1}{2}(I_d + jI_q) \tag{2.6}$$

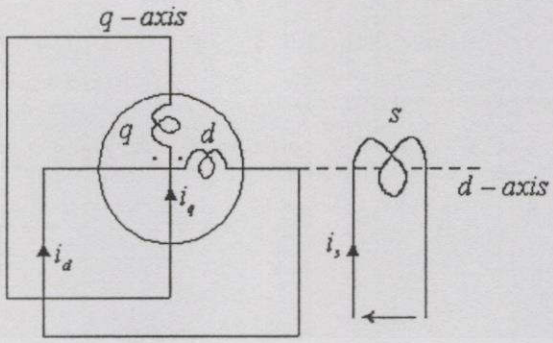
สมการในรูปเฟสเซอร์และวงจรสมมูลย์

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลย์ของ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว เขียนในรูปของพิกัด $d-q$ แสดงดังรูปที่ 2.9 นั้นสามารถนำเขียนเป็นสมการแรงดันได้ดังนี้ คือ

$$\begin{bmatrix} v_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + L_s p) & Mp & 0 \\ Mp & (R_d + L_d p) & \omega_r L_d \\ \omega_r M & \omega_r L_d & (R_d + L_d p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

ค่าพารามิเตอร์บนแกน $d-q$ เป็นค่าที่ถือว่า สม่ำเสมอในช่องอากาศ(uniform air-gap)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่พิจารณาตามพิกัด $d-q$

สำหรับการทำงานภายใต้สภาวะคงตัว สมการในรูปเฟสเซอร์หาได้โดยแทน $j\omega$ สำหรับค่าที่อนุพันธ์ดังสมการข้างต้น

$$\begin{bmatrix} v_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + j\omega L_s) & j\omega M & 0 \\ j\omega M & (R_d + j\omega L_d) & -\omega_r L_d \\ \omega_r M & \omega_r L_d & (R_d + j\omega L_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_d \\ I_q \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

แทนค่า I_d และ I_q จากสมการ (2.5) ลงในสมการ(2.8) ดังนั้นจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$V_s = (R_s + j\omega L_s) + j\omega M(I_f + I_b) \tag{2.9}$$

$$0 = j\omega M I_s + (R_d + j\omega L_d)(I_f + I_b) - j\omega_r L_d(I_f - I_b) \tag{2.10}$$

$$0 = \omega_r M I_s + \omega_r L_d(I_f + I_b) + j(R_d + j\omega L_d)(I_f - I_b) \tag{2.11}$$

จัดรูปสมการ(2.10) และ(2.11)ใหม่โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ω กับ ω_r ดังนี้ คือ

$$\omega_r = (1-s)\omega$$

$$0 = j\omega M I_s + R_d(I_f + I_b) + j\omega L_d[sI_f + (2-s)I_b] \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0 = j\omega M(1-s)I_s - R_d(I_f - I_b) - j\omega L_d[sI_f - (2-s)I_b] \quad (2.13)$$

นำสมการ (2.12)บวกกับ (2.13) และหารด้วย $(2-s)$ ดังนั้นเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$0 = j\omega MI_s + \left[\frac{R_d}{(2-s)} + j\omega L_d\right]2I_b \quad (2.14)$$

และนำสมการ (2.13) ลบกับ (2.12) และหารด้วย s ดังนั้นเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$0 = j\omega MI_s + \left[\frac{R_d}{s} + j\omega L_d\right]2I_f \quad (2.15)$$

ดังนั้นนำสมการ (2.9),(2.14) และ (2.15) มาเขียนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$V_s = [R_s + j\omega(L_s - M)]I_s + \frac{j\omega M}{2}(I_s + 2I_f) + \frac{j\omega M}{2}(I_s + 2I_b)$$

$$0 = \frac{j\omega M}{2}(I_s + 2I_f) + \left[\frac{R_d}{2s} + \frac{j\omega(L_d - M)}{2}\right]2I_f \quad (2.16)$$

$$0 = \frac{j\omega M}{2}(I_s + 2I_b) + \left[\frac{R_d}{2(2-s)} + \frac{j\omega(L_d - M)}{2}\right]2I_b$$

วงจรสมมูลย์ของเครื่องจักรกลที่แสดงดังรูปที่ 2.10 นั้น ค่าพารามิเตอร์ที่สเตเตอร์และ โรเตอร์เขียนแทนด้วยเลข 1 และ 2 โดยที่กำหนดให้อัตราส่วนจำนวนรอบของสเตเตอร์ต่อโรเตอร์ เขียนแทนด้วย N ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถกำหนดได้ดังนี้ คือ

ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ คือ R_1

รีแอคแตนซ์การทำแม่เหล็กที่ถ่ายโอนไปทางด้านสเตเตอร์ คือ $X_{m1} = \omega NM$

รีแอคแตนซ์รั่วของขดลวดสเตเตอร์ คือ $X_1 = (\omega L_s - X_{m1})$

รีแอคแตนซ์ของโรเตอร์ที่ถ่ายโอนไปทางด้านสเตเตอร์ คือ $X_2' = \omega N^2 L_d - X_{m1}$

ความต้านทานของโรเตอร์ที่ถ่ายโอนไปทางด้านสเตเตอร์ คือ $R_2' = N^2 R_d$

แรงดันที่จ่ายให้สเตเตอร์ คือ $V_1 = V_s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

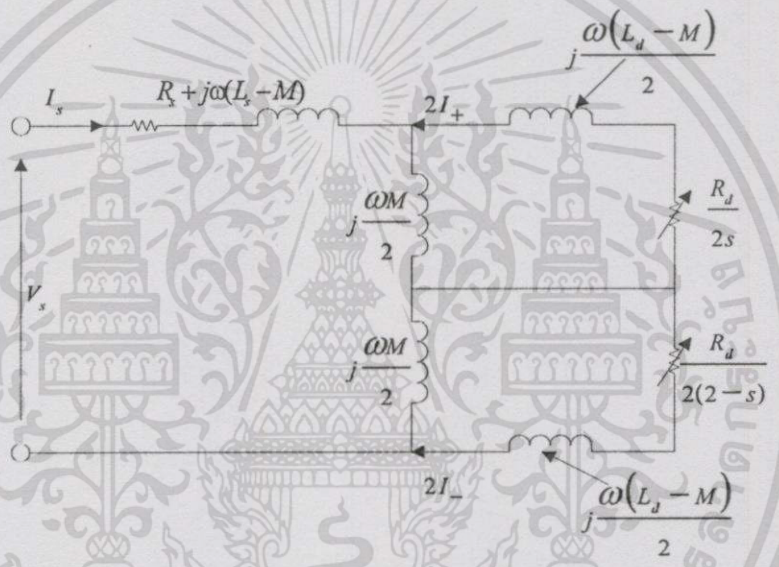
กระแสที่จ่ายให้สเตเตอร์ คือ $I_1 = I_s$

แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดสเตเตอร์ คือ E

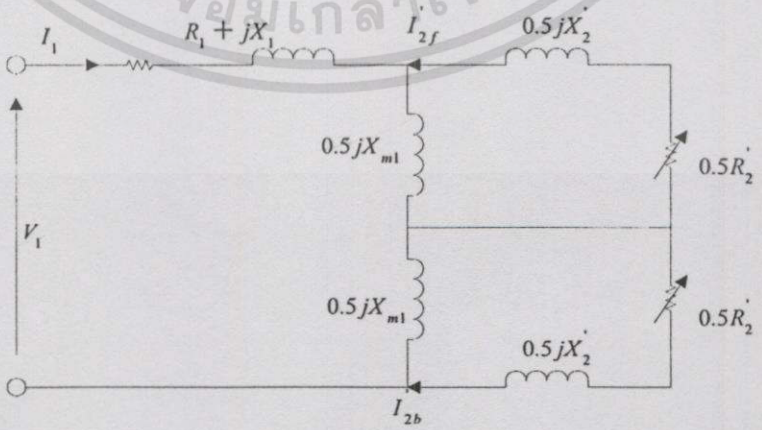
ในส่วนของวงจรสมมูลย์ที่แสดงดังรูปที่ 2.10(ข) และ (ค) เป็นวงจรสมมูลย์ที่ได้จากการถ่ายโอนค่าตามข้อกำหนดข้างต้น ส่วนรูปที่ 2.10 (ง) เป็นวงจรสมมูลย์ที่เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่าย และสำหรับกระแสโรเตอร์ที่ถ่ายโอนไปทางด้านสเตเตอร์กำหนดใหม่ได้ดังนี้ คือ

องค์ประกอบของกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า $I'_{2f} = -2I_f / N$

องค์ประกอบของกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง $I'_{2b} = -2I_b / N$

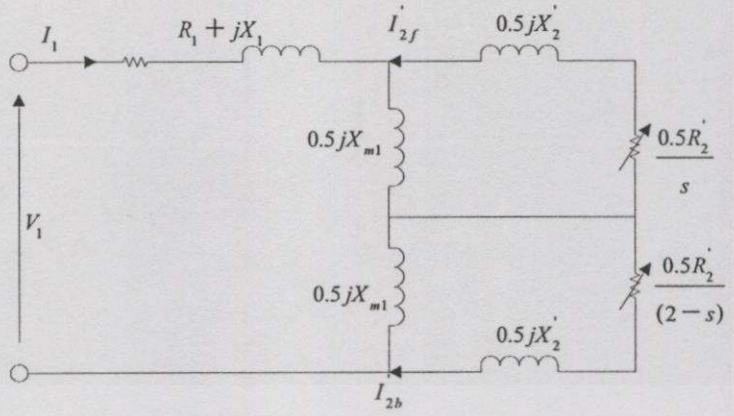


(ก) วงจรสมมูลย์

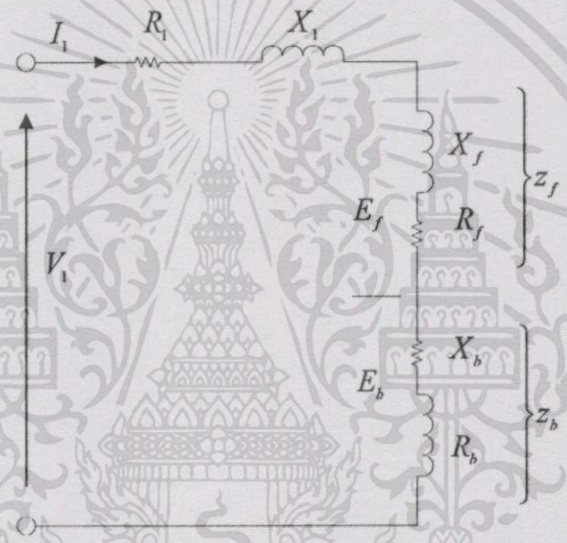


(ข) วงจรสมมูลย์ขณะมอเตอร์อยู่นิ่ง(S=1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) วงจรสมมูลย์ขณะโรเตอร์หมุน



(ง) วงจรสมมูลย์ขณะโรเตอร์หมุนที่เขียนในรูปอย่างง่าย

รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลย์ของ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

คุณลักษณะของ แรงบิด - สลิป

แรงบิดทางไฟฟ้า (electromagnetic torque) ที่มอเตอร์สร้างขึ้นนั้นสามารถเขียนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้ คือ

$$T = \mathrm{Re}\left\{(pole - pairs)\left[I_t^*\right][G]\,[I]\right\} \tag{2.17}$$

แทนค่า $[I_t^*]$, $[G]$และ $[I]$ จากสมการ (2.8) ลงในสมการ (2.17) ดังนั้นสมการแรงบิดเขียนใหม่ได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$T = \mathrm{Re}\left\{ (pole-pairs)[I_s^* I_d^* I_q^*] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_d \\ M & L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_d \\ I_q \end{bmatrix} \right\}$$

$$= \mathrm{Re}[(pole-pairs)(-L_d I_d^* I_q + M I_q^* I_s + L_d I_q^* I_d)] \tag{2.18}$$

เมื่อ $L_d(-I_d^* I_q + I_q^* I_d)$ คือ เทอมจินตภาพสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นสมการแรงบิด คือ

$$T = \mathrm{Re}[(pole-pairs) M I_q^* I_s] \tag{2.19}$$

แทนค่า I_q^* จากสมการ (2.5) ลงในสมการ (2.19) ดังนั้น

$$T = \mathrm{Re}[(pole-pairs)(-jMI_s)(I_f^* - I_b^*)] \tag{2.20}$$

นำค่า I_b^* และ I_f^* คูณสมการ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ ดังนั้นเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$0 = j\omega M I_s I_b^* + \left[\frac{R_d}{(2-s)} + j\omega L_d \right] 2 I_b I_b^* \tag{2.21}$$

$$0 = j\omega M I_s I_f^* + \left[\frac{R_d}{s} + j\omega L_d \right] 2 I_f I_f^* \tag{2.22}$$

ดังนั้นสมการของเทอมส่วนจริง คือ

$$\mathrm{Re}(-jMI_s I_f^*) = \mathrm{Re}\left[\frac{R_d}{s\omega} 2I_f^2 + jL_d 2I_f^* \right] = \frac{2R_d}{s\omega} I_f^2 \tag{2.23}$$

$$\mathrm{Re}(+jMI_s I_b^*) = -\mathrm{Re}\left[\frac{R_d}{(2-s)\omega} 2I_b^2 + jL_d 2I_b^* \right] = \frac{-2R_d}{(2-s)\omega} I_b^2 \tag{2.24}$$

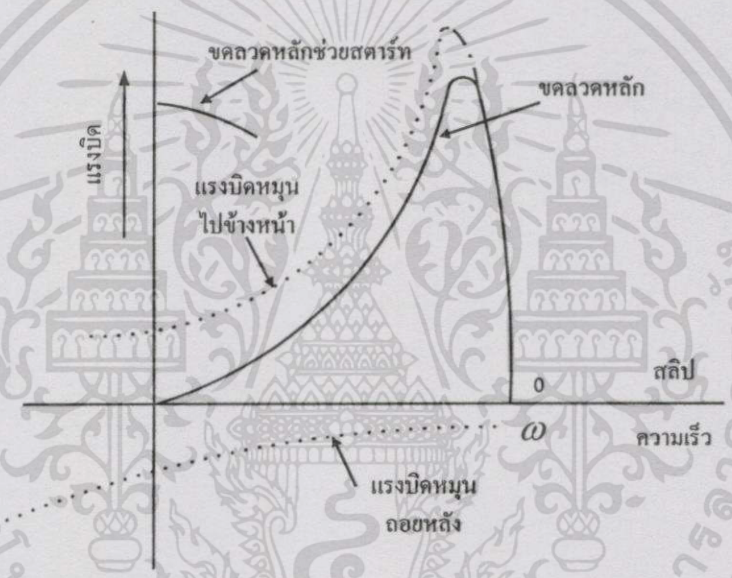
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

38955

และแทนค่าสมการ (2.23) และ (2.24) ลงในสมการ(2.20) ดังนั้นสมการแรงบิด คือ

$$T = (pole - pairs)2\left(\frac{R_d}{s\omega}I_f^2 - \frac{R_d}{(2-s)\omega}I_b^2\right) \tag{2.25}$$

จากสมการ (2.25) เห็นได้ว่าแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นนั้นเกิดจากองค์ประกอบสองส่วนด้วยกัน คือ องค์ประกอบของกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง ที่สัมพันธ์กับค่า สลิป s และ $(2-s)$ ตามลำดับ และจากสมการดังกล่าวนี้ ถ้าพิจารณาผลลัพธ์ของคุณลักษณะแรงบิด – สลิป ที่เกิดจากผลรวมเนื่องจากองค์ประกอบทั้งสองส่วนและไม่คิดผลของแรงบิดขณะมอเตอร์เริ่มต้นหมุนนั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว

จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ วงจรสมมูลย์สามารถแยกได้เป็นสองส่วนดังรูปที่ 2.10 (ง) โดยส่วนที่แยกออกมานั้นแทนด้วยผลของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง นั่นคือ

$$E_f = 4.44 f N \phi_f \tag{2.26}$$

$$E_b = 4.44 f N \phi_b \tag{2.27}$$

สำหรับขณะโรเตอร์อยู่นิ่งนั้น $\phi_f = \phi_b$ และ $E_f = E_b$ ดังนั้นผลรวมของแรงดัน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = 4.44\, f\, N\, \phi \tag{2.28}$$

เมื่อ ϕ คือ เส้นแรงในช่องอากาศ

เมื่อพิจารณาการหมุนของมอเตอร์แต่ละช่วงความเร็วในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าที่สลิปเริ่มต้นเท่ากับ s การเหนี่ยวนำเนื่องจากกระแสในโรเตอร์โดยสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้ามีความถี่เท่ากับ sf และกำหนดให้ f คือ ความถี่ที่สเตเตอร์ ดังนั้นผลของ F_f ที่สเตเตอร์และโรเตอร์ทำให้เกิด ϕ_f ในช่องอากาศ ซึ่งเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดัน E_f สำหรับอิมพีแดนซ์ ของวงจรโรเตอร์ที่ปรากฏอยู่ในส่วนวงจรสเตเตอร์มีค่า $0.5R_2^{'}/s + j0.5X_2^{'}$ ดังรูปที่ 2.10(ค)

การพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลังซึ่งทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำในโรเตอร์ที่ความถี่สลิปเท่ากับ $(2-s)f$ ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนดังกล่าวนั้นสอดคล้องกับในตอนแรก โดยที่แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนของโรเตอร์ในช่องอากาศที่ความเร็วซิงโครนัสและมีทิศทางตรงข้ามกับ F_f ผลของ F_b ที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศถอยหลังซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแรงดันขึ้นที่ E_b และสำหรับในส่วนของวงจรโรเตอร์อิมพิแดนซ์มีค่าเท่ากับ $0.5R_2^{'}/(2-s) + j0.5X_2^{'}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ค) สำหรับที่สลิปค่าต่ำ ๆ รูปคลื่นของกระแสโรเตอร์มีองค์ประกอบของความถี่สูง $[(2-s)f \cong 2f]$ ซึ่งกำหนดได้โดยสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง สำหรับองค์ประกอบของความถี่ต่ำกำหนดได้โดยสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า (sf)

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขณะมอเตอร์หมุนจากวงจรสมมูลย์กำหนดโดย $Z_f \rangle Z_b, E_f \rangle E_b$ ดังนั้น ϕ_f ในช่องอากาศมีค่ามากกว่า ϕ_b และวงจรสมมูลย์ดังกล่าวมานั้นสามารถกำหนดสมรรถนะของมอเตอร์ได้โดยการคำนวณหาค่ากระแสสเตเตอร์ กำลังอินพุต แรงบิดที่สร้างขึ้นและประสิทธิภาพ เป็นต้น โดยใช้วงจรสมมูลย์ในรูปที่ 2.10 (ค) และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงใช้วงจรสมมูลย์ดังรูปที่ 2.10 (ง) คำนวณค่าต่างๆ แทน โดยค่าพารามิเตอร์แต่ละส่วนกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{j0.5X_{m1}\left(j0.5X_2' + 0.5R_2'/s\right)}{0.5R_2'/S + j0.5\left(X_{m1} + X_2'\right)} \tag{2.29}$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{j0.5X_{m1}\left[j0.5X_2' + 0.5R_2'/(2-S)\right]}{0.5R'/(2-S) + j0.5\left(X_{m1} + X_2'\right)} \tag{2.30}$$

และกำลังในช่องอากาศที่กำหนดโดยสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง คือ

$$P_{gf} = I_1^2 R_f \tag{2.31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{gb} = I_1^2 R_b \tag{2.32}$$

สำหรับแรงบิดกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega} \tag{2.33}$$

$$T_b = \frac{P_{gb}}{\omega} \tag{2.34}$$

และผลรวมของแรงบิด คือ

$$T = T_f - T_b = \frac{I_1^2}{\omega}\left(R_f - R_b\right) \tag{2.35}$$

สำหรับกำลังทางกลที่เกิดขึ้นกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$P_{mech} = T\omega_r = T\omega\,(1-s) \tag{2.36}$$

$$= I_1^2 (R_f - R_b)(1-s) \tag{2.37}$$

$$= (P_{gf} - P_{gb})(1-s) \tag{2.38}$$

และกำลังด้านเอาต์พุต คือ

$$P_{out} = P_{mech} - P_{rot} \tag{2.39}$$

โดยที่ P_{rot} ประกอบด้วยการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลมบวกกับการสูญเสียที่แกน รวมเป็นการสูญเสียเนื่องจากการหมุน สนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศทั้งสองทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ กัน ดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากทองแดงในโรเตอร์ (I^2R) คือ ผลรวมเชิงตัวเลขของการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กแต่ละส่วน โดยที่การสูญเสียเนื่องจากทองแดงในโรเตอร์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลังกำหนดได้ดังนี้

$$P_{2f} = sP_{gf} \tag{2.40}$$

$$P_{2b} = (2-s)P_{gb} \tag{2.41}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และผลรวมของการสูญเสียเนื่องจากทองแดงในโรเตอร์ คือ

$$P_2 = sP_{gf} + (2-s)P_{gb} \tag{2.42}$$

ผลรวมของกำลังในช่องอากาศ เนื่องจากองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศทั้งสองสามารถกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$P_g = P_{gf} + P_{gb} \tag{2.43}$$

2.2.1.3 การเริ่มต้นหมุนของ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

สำหรับหลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวได้กล่าวไว้ในตอนต้นนั้นเห็นได้ว่าไม่ทำให้เกิดการเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์ ถ้ามีขดลวดที่สเตเตอร์เพียงชุดเดียวเท่านั้นเพราะว่ามอเตอร์ไม่สามารถสร้างแรงบิดเริ่มต้นหมุน(Starting Torque)ได้ ดังนั้นการทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนได้นั้นต้องทำตามเงื่อนไขที่ทำให้เกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุน แต่สำหรับเงื่อนไขของการทำงาน(หมุน)ให้แรงบิดที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากขดลวดสเตเตอร์เพียงชุดเท่านั้น

วิธีการอย่างง่ายที่สุดสำหรับการทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเริ่มต้นหมุนได้คือการใส่ขดลวดช่วยเริ่มต้นหมุนเพิ่มเข้าไปที่สเตอร์ โดยที่ขดลวดทั้งสองวางห่างกัน 90° ทางไฟฟ้าในอากาศ (Space)โดยอิมพีแดนซ์ของทั้งสองวงจรนั้นมีเฟสที่ต่างกันเนื่องจากกระแสที่ไหลในขดลวดหลักและขดลวดช่วยมีเฟสเลื่อน สำหรับวงจรสมมูลย์ของ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว นั้นเหมือนกับมอเตอร์สองเฟสแบบไม่สมดุลย์ อย่างไรก็ตามผลของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดเริ่นต้นหมุนได้ และขดลวดทั้งสองชุดสามารถออกแบบเพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นมอเตอร์สองเฟสแบบสมดุลย์และสำหรับวิธีการเริ่มต้นหมุนที่กล่าวมานั้นอธิบายได้ตามสมการข้างล่างนี้

$$i_m = \sqrt{2} I_m \cos\omega t \tag{2.44}$$

$$i_a = \sqrt{2} I_a \cos(\omega t + \theta) \tag{2.45}$$

โดยที่ I_m คือ กระแสที่ไหลในขดลวดหลัก และ I_a คือ กระแสที่ไหลในขดลวดช่วย

ถ้ากำหนดให้จำนวนรอบของขดลวดหลักและขดลวดช่วยคือ N_m และ N_a ตามลำดับ ดังนั้นขดลวดที่วางในตำแหน่งแกนตามขวาง(Quadrature) เมื่อพิจารณาผลของรูปคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนที่สเตอร์ในตำแหน่งมุม θ (โดยที่ $\theta = 0^\circ$) ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F(\theta,t)=\frac{1}{\sqrt{2}}[(N_mI_m-N_aI_a\sin\theta_a)\cos(\omega t+\theta)-(N_aI_a\cos\theta_a)\sin(\omega t+\theta)]$$
$$+\frac{1}{\sqrt{2}}[(N_mI_m+N_aI_a\sin\theta_a)\cos(\omega t-\theta)+(N_aI_a\cos\theta_a)\sin(\omega t-\theta)] \quad (2.46)$$

จากสมการ(2.46) เมื่อนำไปคำนวณขนาดและมุมเฟสของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดช่วยที่ทำให้เกิดระบบสมดุลย์สองเฟส ถ้ากำหนดให้ $N_mI_m=N_aI_a$ และ $\theta_a=90^\circ$ (นั่นคือมุมต่างเฟสระหว่าง I_m และ I_a เท่ากับ 90°) และเมื่อพิจารณาสมการ (2.46) เทอมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนถอยหลังนั้นหายไปเหลือเฉพาะเทอมของแรงเคลื่อนแม่เหหล็กหมุนไปข้างหน้า คือ

$$F_f(\theta,t)=\sqrt{2}N_mI_m\cos(\omega t-\theta) \quad (2.47)$$

โดยที่จากสมการ (2.44) เทอม $\cos(\omega t-\theta)$ และ $\sin(\omega t-\theta)$ เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า ส่วนเทอม $\cos(\omega t+\theta)$ และ เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง

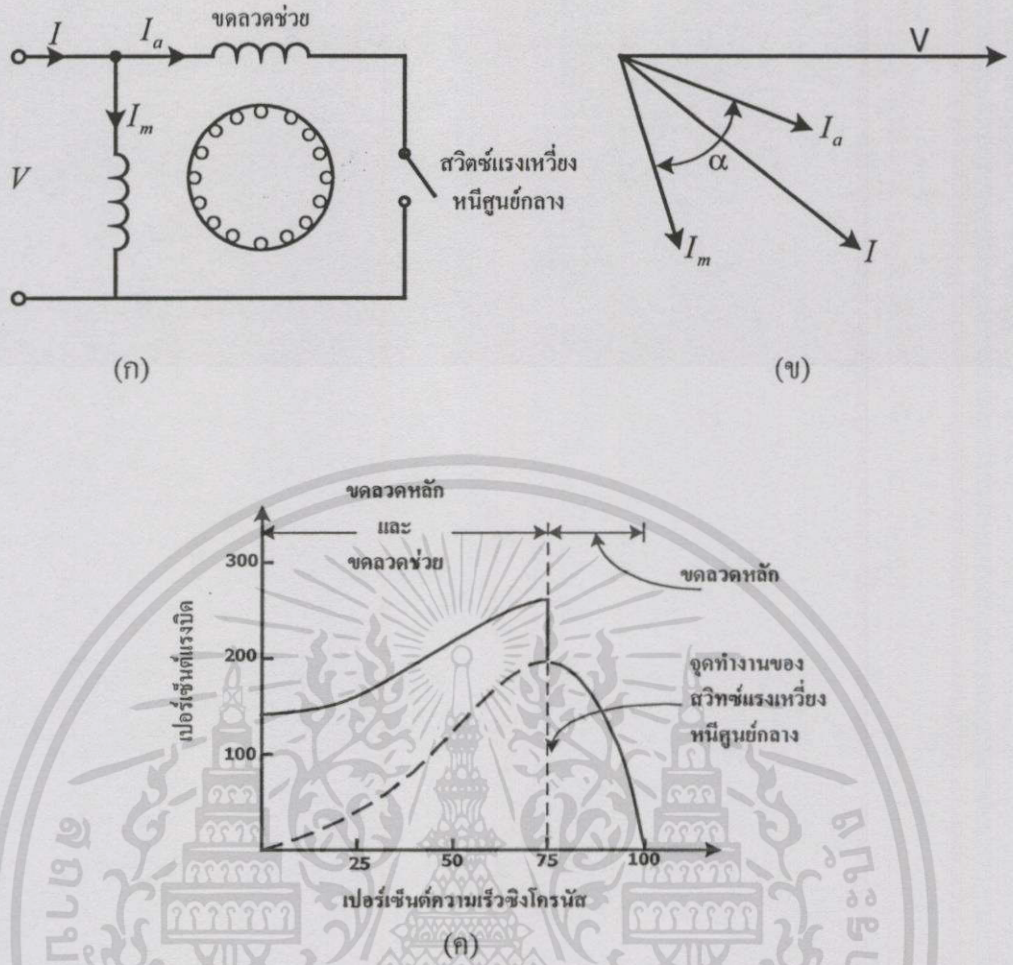
2.2.2 ชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีด้วยกันหลายชนิดซึ่งเรียกชื่อแตกต่างกันไป ในแต่ละชนิดสามารถอธิบายได้จากหลักการที่ทำให้เกิดการต่างเฟสระหว่างกระแสที่ไหลในขดลวดหลัก และขดลวดช่วย แต่ในบางครั้งเราเรียกชื่อรวมกันว่า มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆได้ดังนี้ คือ

2.2.2.1 มอเตอร์แบบแยกเฟส (Split - Phase Motors)

โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดแยกเฟส แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 (ก) ขดลวดช่วยมีอัตราส่วนค่าความต้านทานต่อรีแอคแตนซ์สูงกว่าขดลวดหลัก โดยที่กระแสซึ่งไหลผ่านขดลวดทั้งสองมีเฟสต่างกัน ดังรูปที่ 2.12(ข) การทำให้อัตราส่วนของค่าความต้านทานต่อรีแอคแตนซ์ของขดลวดช่วยมีค่าสูงนั้นเพื่อใช้ในระหว่างการเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์เท่านั้น หลังจากนั้นเมื่อมอเตอร์หมุนไปแล้วจนกระทั่งมีความเร็วที่ 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส ขดลวดช่วยถูกตัดออกด้วยสวิทช์แรงเหวี่ยง(Centrifugal Switch) สำหรับคุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว แสดงไว้ดังรูปที่2.12 (ค) มอเตอร์ชนิดนี้มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนต่ำจนถึงปานกลาง เฮริตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

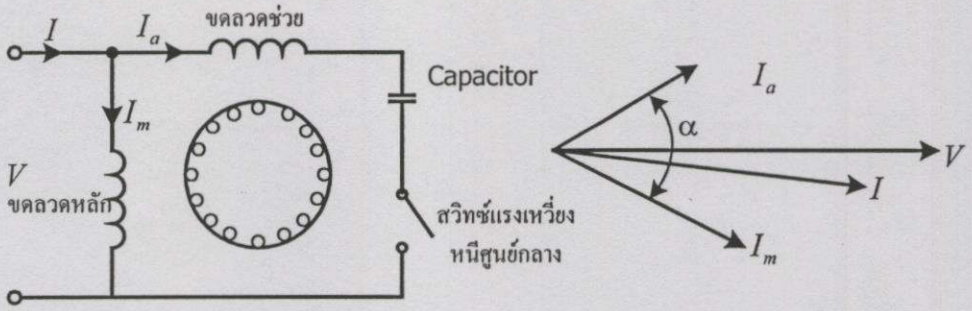


รูปที่ 2.12 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดขดลวดแยก

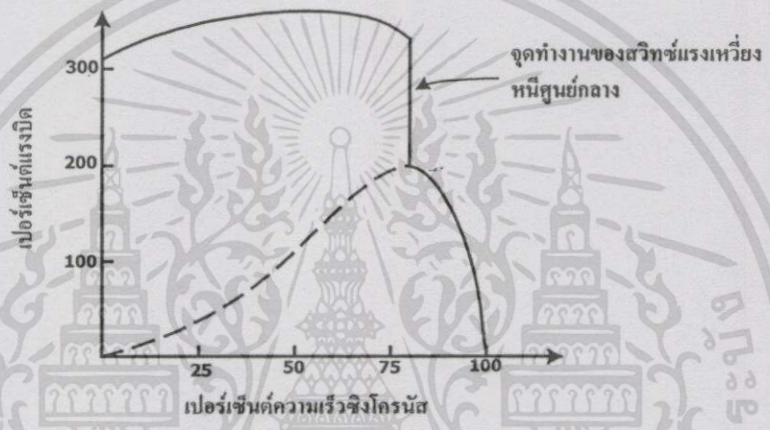
2.2.2.2 มอเตอร์ชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor - Start Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนสูงมาก เนื่องจากได้ต่อตัวเก็บประจุอนุกรมเข้ากับขดลวดช่วย ดังรูปที่ 2.13(ก) นั้นคือเป็นการเพิ่มมุมเฟสระหว่างกระแสที่ไหลในขดลวดทั้งสอง ดังรูปที่ 2.13(ข) สำหรับคุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว แสดงไว้ในรูป 2.13(ค) และเช่นเดียวกันเมื่อมอเตอร์หมุนได้ที่ความเร็ว 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส สวิทช์แรงเหวี่ยงจะตัดขดลวดช่วยออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)



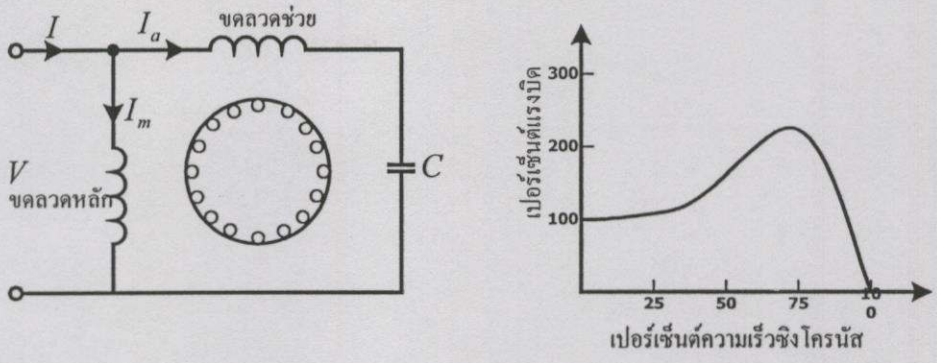
(ค)

รูปที่ 2.13 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

2.2.2.3 มอเตอร์ชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ(Capacitor - Run Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.14 (ก) โดยที่ตัวเก็บประจุถูกต่ออนุกรมกับขดลวดช่วย และไม่ถูกตัดออกหลังจากที่มอเตอร์หมุนไปแล้วซึ่งโครงสร้างและลักษณะวงจรแบบนี้สามารถลดต้นทุนให้ต่ำลงได้ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีสวิทช์แรงเหวี่ยงที่สำคัญโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ ทำให้สามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลัง การสั่น และประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้ดีขึ้นเนื่องจากมอเตอร์ทำงาน (หมุน) เป็นแบบมอเตอร์สองเฟส ซึ่งทำให้มอเตอร์หมุนได้เรียบขึ้น สำหรับคุณลักษณะของ แรงบิด – ความเร็ว แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

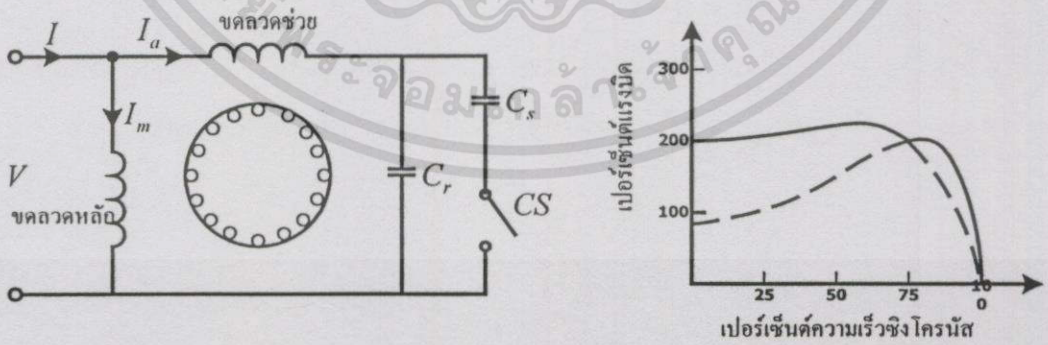


(ก) (ข)

รูปที่ 2.14 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

2.2.2.4 มอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor-Start Capacitor–Run Motors)

โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้จะมีตัวเก็บประจุสองตัวประกอบอยู่ในวงจร โดยที่ตัวแรกจะใช้เพื่อการเริ่มต้นหมุนส่วนอีกตัวหนึ่งใช้ขณะมอเตอร์หมุน ดังรูปที่ 2.15 (ก) ตามทฤษฎีนั้นจุดที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มต้นหมุน และสมรรถนะของมอเตอร์ขณะหมุนสามารถกำหนดได้โดยตัวเก็บประจุทั้งสอง ตัวเก็บระจุเริ่มต้นหมุน C_s มีขนาดใหญ่และเป็นชนิด ac electrolytic ส่วนตัวเก็บประจุขณะมอเตอร์หมุน C_r ถูกต่ออนุกรมอย่างถาวรกับขดลวดเริ่มต้นหมุนซึ่งมีขนาดเล็กเป็นชนิด paper oil สำหรับคุณลักษณะของ แรงบิด-ความเร็วแสดงในรูปที่ 2.15(ข) มอเตอร์ชนิดดังกล่าวนี้มีราคาแพง เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตามถือได้ว่าเป็นมอเตอร์ที่มีสมรรถนะที่ดีที่สุดชนิดหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว



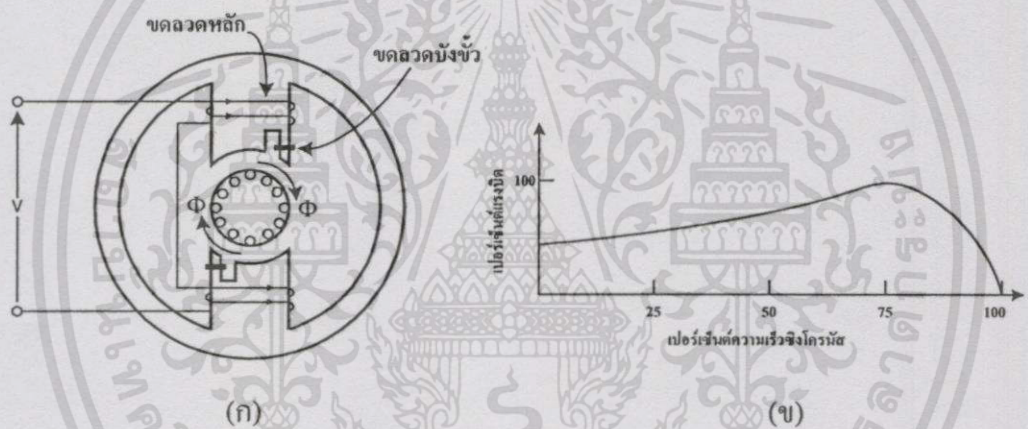
(ก) (ข)

รูปที่ 2.15 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดเริ่มต้นหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.5 มอเตอร์แบบบังขั้ว (Shaded - pole Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้โครงสร้างของขั้วแม่เหล็ก (Pole) ที่สเตเตอร์แบบบังขั้วดังรูปที่ 2.16 (ก)โดยที่ขั้วยื่นดังกล่าวนั้นจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน และมีส่วนหนึ่งที่ถูกปิดล้อมด้วยวงแหวนทองแดงเรียกว่า Shading coil สำหรับขดลวดหลักพันอยู่บนขั้วยื่นของมอเตอร์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำบน Shading coil เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนขั้วบัง (Shaded) ล้าหลังส่วนที่ไม่ได้ถูกปิดล้อม ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนขั้วบังมีค่าสูงสุด หลังจากเส้นแรงในส่วนที่ไม่ถูกปิดล้อมมีค่าถึงจุดสูงสุดก่อน สำหรับวงจรสมมูลย์เมื่อพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนที่ไม่ได้ถูกปิดล้อมจะต่างเฟสกับส่วนขั้วบัง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนที่จากส่วนที่ไม่ถูกปิดล้อมไปยังส่วนขั้วบังยังผลให้เกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุน และคุณลักษณะ แรงบิด - ความเร็ว แสดงไว้ดังรูปที่ 2.16(ข) มอเตอร์แบบบังขั้วส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นในช่วงประมาณ 1/20 แรงม้า



รูปที่ 2.16 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบบังขั้ว

2.3 ทฤษฎีและหลักการควบคุม

ปัจจุบันการควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ได้มีการนำตัวควบคุมและระบบควบคุมมาใช้ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กันอย่างกว้างขวางทั้งนี้เพื่อให้ระบบมีผลการตอบสนองที่เร็วและเที่ยงตรงตามต้องการ นอกจากนี้ระบบควบคุมในปัจจุบันยังมีการกำหนดเงื่อนไขของการควบคุมที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีตัวควบคุมที่คอยจัดการกระบวนการต่างๆ ให้เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สูงสุด

สำหรับประเภทของการควบคุมสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ คือการควบคุมแบบป้อนกลับและการควบคุมแบบไปข้างหน้าวิธีการควบคุมแบบป้อนกลับมีข้อดี คือสามารถชดเชยการรบกวนกับกระบวนการทุกชนิด โดยการรบกวนมีผลต่อตัวแปรที่ถูกควบคุมและเมื่อตัวแปรเบี่ยงเบนทำให้ตัวควบคุมเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย แต่มีข้อเสีย คือการชดเชยการรบกวนทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้หลังจากตัวแปรที่ถูกควบคุมเบี่ยงเบนไปแล้ว ในส่วนของการควบคุมแบบไปข้างหน้านั้น สามารถวัดการรบกวนและชดเชยก่อนค่าตัวแปรที่ถูกควบคุมจะเบี่ยงเบนไปจากค่าที่กำหนดไว้

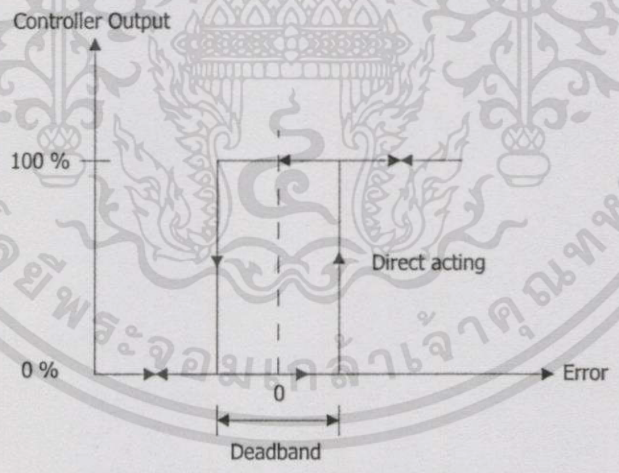
2.3.1 ตัวควบคุม (Controller)

สำหรับตัวควบคุมที่ใช้กับระบบหรือกระบวนการที่ต้องการควบคุม ต้องเลือกให้เหมาะสมกับระบบหรือกระบวนการนั้นๆ เพื่อให้มีผลการตอบสนองที่ดีและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยที่สามารถแบ่งตัวควบคุมออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ ได้ดังนี้คือ

2.3.1.1 ตัวควบคุมแบบ ON - OFF

การควบคุมที่ง่ายที่สุดที่ใช้ในระบบควบคุม คือ การควบคุมแบบ ON - OFF โดยที่การแสดงสภาวะเอาต์พุต จากการควบคุมแบบนี้ทำได้ 2 สภาวะเท่านั้น คือ 0 % หรือ 100% ดังแสดงในรูปที่ 2.17 สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุต(Manipulated Variable:MV) กับสัญญาณอินพุต (Process Variable :PV) ที่ค่าเป้าหมาย (Set Point :SP) ค่าใดค่าหนึ่งกำหนดได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} MV &= 0\ \% \text{ เมื่อ } PV < SP \\ &= 100\% \text{ เมื่อ } PV > SP \end{aligned} \qquad (2.48)$$



รูปที่ 2.17 แสดงการควบคุมแบบ ON-OFF

จากรูปที่ 2.17 ถ้าค่าผิดพลาดเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าวิกฤติ (Critical Value) มีผลทำให้ค่าเอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก 0 % เป็น 100 % และในทางตรงข้ามกันถ้าค่าผิดพลาดลดต่ำลงกว่ากว่าค่าวิกฤตินั้นมีผลทำให้ค่าเอาต์พุตเปลี่ยนจาก 100 % เป็น 0 % สำหรับการควบคุมแบบ ON - OFF ดังกล่าวนี้ก่อนที่ค่าเอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดเดทแบบด์ (Deadband) ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบ ๆ ค่าผิดพลาด ซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ (Zero error) ดังนั้นในช่วงเดทแบบด์ค่าเอาต์พุตจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด

2.3.1.2 ตัวควบคุมแบบ P (Proportional Controller)

สำหรับการควบคุมที่มีกริยาการควบคุมแบบ P นั้น ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของค่าผิดพลาด ถ้าค่าผิดพลาดมากค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมก็มากขึ้นตาม แต่ถ้าค่าผิดพลาดน้อยค่าเอาต์พุตที่ได้มีค่าน้อยด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวนี้เรียกว่า อัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน(Proportional Gain) เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$m(t) = K_p[r(t) - c(t)] + m(0) \tag{2.49}$$

$$m(t) = K_p e(t) + m(0) \tag{2.50}$$

เมื่อกำหนดให้ $m(t)$ คือ เอาต์พุตจากตัวควบคุมหรือ MV (Manipulated Variable)

$r(t)$ คือ ค่าเป้าหมายหรือ SP (Set Point)

$c(t)$ คือ ตัวแปรที่ถูกควบคุม หรือ PV(Manipulated Variable)

$e(t)$ คือ ค่าผิดพลาด

K_p คือ อัตราการขยายของตัวควบคุมแบบ P

$m(0)$ คือ ค่าไบอัสเป็นค่าทางออกของตัวควบคุมเมื่อ $e(t) = 0$

สมการ (2.49) และ (2.50) นั้น แสดงให้เห็นว่าเอาต์พุตของตัวควบคุม เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมายกับตัวแปรที่ถูกควบคุมที่เกิดจากค่า K_p ข้อได้เปรียบของตัวควบคุมแบบนี้คือ มีการปรับค่าพารามิเตอร์ K_p เพียงตัวเดียวส่วนข้อเสียเปรียบ คือ เทอมค่าผิดพลาด e(t) ไม่สามารถทำให้เป็นศูนย์ได้ที่สภาวะคงที่ (Steady state) สำหรับเอาต์พุตของตัวควบคุมสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Proportional Band (PB) โดยที่ PB หมายถึง Percent Proportional Band สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง K_p และ PB แสดงได้ดังนี้ คือ

$$PB = 100/K_p \tag{2.51}$$

2.3.1.3 ตัวควบคุมแบบ I (Integral Controller)

กริยาควบคุมแบบ I นั้น บางครั้งอาจเรียกว่า การควบคุมแบบรีเซ็ต (Reset Control) โดยที่กริยาการควบคุมแบบนี้ค่าผิดพลาดขณะใด ๆ นั้นสัมพันธ์กับค่าผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดขึ้น ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการควบคุมแบบ I นั้นเหมือนกับการปรับค่าไบแอสจนกระทั้งค่าผิดพลาดหมดไป และสำหรับสมการเอาต์พุตของตัวควบคุมกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$m(t) = \frac{1}{T_i}\int e(t)dt + m(0) \tag{2.52}$$

โดยที่ T_i = Integral หรือ Reset Time

2.3.1.4 ตัวควบคุมแบบ D (Derivative Controller)

สำหรับกริยาการควบคุมแบบ D เอาต์พุตของตัวควบคุมขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด $de(t)/dt$ กริยาการควบคุมแบบนี้อาจกล่าวได้ว่าสามารถปรับสัญญาณเอาต์พุต ออกไปหักล้างกับค่าผิดพลาดได้ล่วงหน้าก่อนที่ค่าผิดพลาดเกิดการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ซึ่งเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ D กำหนดได้ตามสมการ (2.53)

$$m(t) = T_d[\frac{de(t)}{dt}] \tag{2.53}$$

โดยที่ T_d = Derivative Time

2.3.2 ตัวควบคุมแบบประกอบร่วมกัน

สำหรับตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นนั้น ในทางปฏิบัติแล้วนั้น การนำตัวควบคุมไปประยุกต์ใช้งานนั้นต้องรวมตัวควบคุมเข้าด้วยกัน ได้แก่ ตัวควบคุมแบบ PI ,PD และ PID เพื่อให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการควบคุม ซึ่งสามารถอธิบายกริยาที่เกิดจากการประกอบร่วมกันของตัวควบคุมต่าง ๆ ได้ดังนี้ คือ

2.3.2.1 ตัวควบคุมแบบ PI (Proportional Integral Controller)

เนื่องจากการควบคุมแบบ P ทำให้เกิดค่า offset ที่ตรงค่าเป้าหมาย ในกรณีนี้จึงเพิ่มเทอมของการควบคุมเข้าไป เรียกเทอมนี้ว่า integral หรือ reset action ดังสมการ(2.54)

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i}\int e(t)dt + m(0) \tag{2.54}$$

โดยตัวควบคุมแบบ PI นั้นมีตัวแปรที่ใช้ปรับแต่งในการควบคุมตามต้องการ 2 ตัวแปร คือ K_p และ T_i ซึ่งจากสมการ (2.54) เห็นว่าได้เมื่อค่า T_i ลดลงเทอม $\frac{1}{T_i}$ มีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2 ตัวควบคุมแบบ PD (Proportional Derivative Controller)

ตัวควบชนิดนี้ใช้กับกระบวนการที่ใช้การควบคุมแบบ P เท่านั้น โดยที่ตัวควบคุมนี้ทำการคาดการณ์ล่วงหน้า ซึ่งอธิบายได้ดังสมการ(2.55)

$$m(t) = K_p e(t) + T_d[\frac{de(t)}{dt}] + m(0) \tag{2.55}$$

2.3.2.3 ตัวควบคุมแบบ PID (Proportional Integral Derivative Controller)

ตัวควบคุมนี้เพิ่มจากตัวควบคุมแบบ D รวมกับตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งกริยาการควบคุมแบบ D เป็นกริยาที่คำนวณจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด $de(t)/dt$ ดังนั้นการคำนวณเพื่อดูแนวโน้มของ $e(t)$ ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปในทางทิศทางใด ด้วยอัตราในการเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยอย่างไร แล้วจึงคำนวณค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม $m(t)$ ออกมาหักล้างหรือขจัด $e(t)$ ให้หมดไป ซึ่งเสมือนว่าเป็นการแก้ก่อนล่วงหน้า ดังนั้นตัวควบคุมนี้จึงใช้กับกระบวนการที่ต้องใช้ระยะเวลานานและมีการคาดการณ์ล่วงหน้า ดังสมการ(2.56)

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i}\int e(t)dt + T_d[\frac{de(t)}{dt}] + m(0) \tag{2.56}$$

ส่วนใหญ่ตัวควบคุม ที่ใช้ปัจจุบันเป็นชนิด Interacting controller กล่าวคือ ค่าอัตราขยาย K_p รวมอยู่กับเทอมของ Integral และ Derivative ดังสมการ(2.57)

$$m(t) = K_p e(t) + (K_p)(\frac{1}{T_i})\int e(t)dt + (K_p)(T_d)[\frac{de(t)}{dt}] + m(0) \tag{2.57}$$

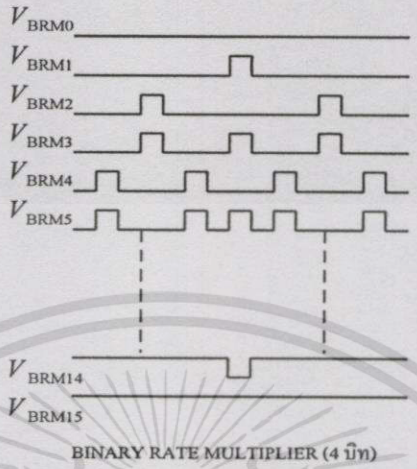
ดังนั้นถ้าปรับค่า K_p อย่างเดียวก็จะไปส่งผลต่อการกระทำของ Integral และ Derivative ด้วย ซึ่งเรียกว่า Interaction นั้นเอง การกระทำของตัวควบคุมโดยทั่วไปมี 2 การกระทำ ได้แก่ Reverse กับ Direct Action สำหรับ Reverse Action เมื่อสัญญาณอินพุทเข้าสู่ตัวควบคุมเพิ่มขึ้นทำให้สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมลดลง ส่วน Direct Action เมื่อสัญญาณอินพุทเข้าสู่ตัวควบคุมเพิ่มขึ้นทำให้สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเพิ่มขึ้นด้วย

2.4 หลักการพื้นฐานของการควบคุมความถี่และผสมสัญญาณแบบ BRM

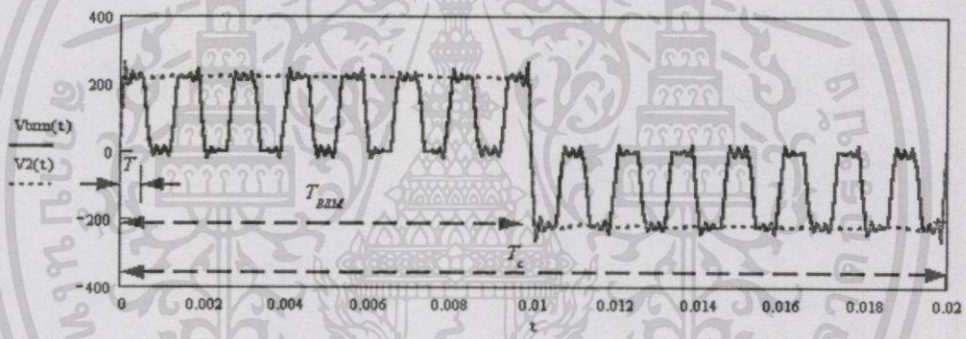
สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมความถี่และการผสมสัญญาณแบบ BRM มาใช้ในการควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ซึ่งเทคนิคการควบคุมแบบนี้นั้นสามารถกำหนดการจ่ายพลังงานที่ป้อนเข้ามอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม โดยมีการกำหนดตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณพัลซ์ BRM ด้วยวิธีการ Linear Combination จากพัลซ์ BRM รูปแบบหลักที่สร้างขึ้นโดยอิสระต่อกัน (Linear Independent waveforms) ดังแสดงในรูปที่ 2.18



(ก) สัญญาณหลัก BRM



(ข) สัญญาณ BRM รูปแบบที่ 8 ใน 1 คาบเวลา (4 บิต)

รูปที่ 2.18 สัญญาณหลัก BRM และสัญญาณ BRM ที่ 8 ใน 1 คาบเวลา

จากรูปที่ 2.18(ก) ถ้ากำหนดให้มีการส่งรูปพัลซ์ BRM เป็นจำนวน B พัลซ์ ดังนั้นรูปพัลซ์ BRM ที่ส่งออกไปสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.58)

$$B=k_{m-1}(2^{m-1})+k_{m-2}(2^{m-2})....+k_1(2^1)+k_0(2^0) \qquad (2.58)$$

และจากสมการ(2.58) เมื่อพิจารณาพลังงานในแต่ละส่วนส่งออกไปในช่วงเวลา T ถ้ากำหนดให้ 2^m คือ ผลรวมของจำนวนพัลซ์ต่อไซเกิ้ล และ R คือ ค่าพลังงานในแต่ละพัลซ์ของคาบเวลา T เมื่อ BRM time $(T_{BRM})=(2^m-1)T$ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยหาได้ตามสมการ (2.59)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P=\frac{BR}{T_{BRM}}=R[k_{m-1}\frac{f}{2}+k_{m-2}\frac{f}{2^2}...k_1\frac{f}{2^{m-1}}+k_0\frac{f}{2^m}] \quad (2.59)$$

เมื่อกำหนดให้ B คือ จำนวนพัลซ์ที่ส่ง

m คือ จำนวนบิท

f คือ ความถี่ $=\frac{1}{T_{BRM}}$

$k_{m-1},k_{m-2},....,k_1,k_0$ คือ ไบนารี่บิทของ B

จากสมการ(2.59) จะสังเกตเห็นได้ว่าการส่งพัลซ์ที่ความถี่ $\frac{f}{2},\frac{f}{2^2},....,\frac{f}{2^{m-1}}\frac{f}{2^m}$ ขึ้นอยู่กับจำนวน binary บิทของพัลซ์ B ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างรูปแบบ BRM จึงกำหนดให้มีการกระจายของรูปแบบ BRM ให้ได้พลังงานเฉลี่ยสูงสุดในทุกๆ รูปแบบตามช่วงเวลา T_c ด้วยการกำหนดความถี่หลักเป็น Linear independent waveforms ดังนี้คือ $V_{BRM1},V_{BRM2},V_{BRM4},V_{BRM8},V_{BRM16},V_{BRM32},V_{BRM64}$ และ V_{BRM128} ที่อิสระต่อกันมากระทำ Linear Combination ตัวอย่างเช่น $V_{BR10}=V_{BRM8}+V_{BRM2}$ ดังนั้นรูปสัญญาณพัลซ์ที่เกิดขึ้นเราสามารถเขียนในเทอมของสมการฟูริเยร์ได้ตามสมการ(2.60)

$$V_1=\sum_{a=0}^{m}\left(\frac{2^a}{2^{m+1}-1}k_a\right)+\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{b=0}^{2^{a-1}}\left(\sin\left(\frac{\frac{2^{m+1}}{2^{a+1}}+b\frac{2^{m+1}}{2^a}}{2^{m+1}-1}\right)-\sin\left(\frac{\frac{2^{m+1}}{2^{a+1}}-1+b\frac{2^{m+1}}{2^a}}{2^{m+1}-1}\right)\right)\frac{2}{\pi n}\cos(nt\omega)k_a \quad (2.60)$$

$$V_2(t)=\sum_{n_1=1}^{99}2.\frac{V}{n_1\pi}(1-\cos(n_1\pi))\sin(n_1.t.\pi.f_c) \quad (2.61)$$

$$V_{BRM}(t)=V_1(t)*V_2(t) \quad (2.62)$$

$$\omega=2\pi f_{BRM} \quad \text{และ} \quad f_{BRM}=\frac{1}{T_{BRM}},f_c=\frac{1}{T_c}$$

เมื่อ $V_{BRM}(t)$ คือ แรงดัน BRM modulate.

$V_1(t)$ คือ แรงดัน BRM multiplier.

$V_2(t)$ คือ แรงดันรูปสี่เหลี่ยม

V คือ ขนาดของแรงดัน

K_a คือ Binary บิท ของBRM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

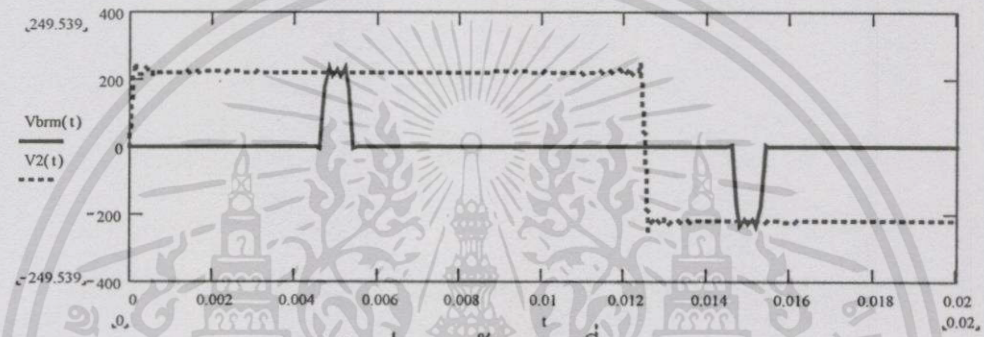
f_{BRM} คือ ความถี่หลักของ BRM

f_c คือ ความถี่ของรูปสี่เหลี่ยม หรือ Cycle Frequency

T_c คือ เวลาของรูปสี่เหลี่ยม หรือ Cycle Time

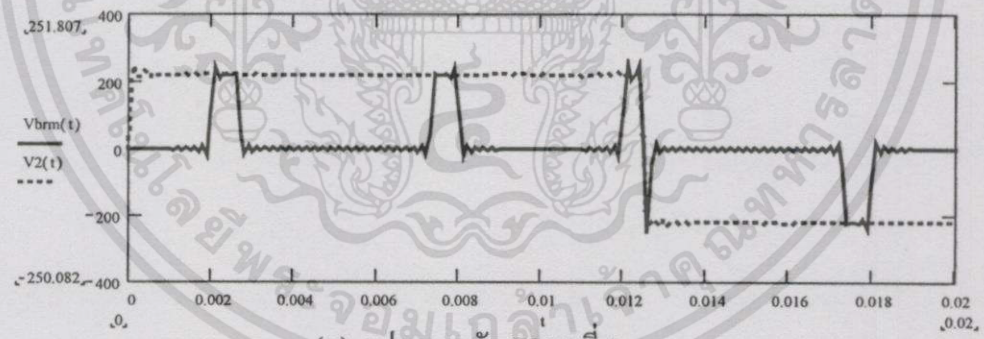
จากสมการที่ 2.62 เราสามารถเขียนสร้างสัญญาณของความถี่(40 เฮิรตซ์)และ BRM กำหนดให้ $V=220$ โวลต์ , $m=3$, $T_{BRM}=0.01$ วินาที และ $f_c=40$ เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 2.19(ก-ง) เป็นรูปแบบที่หลักที่ 1, 2, 4 และ 8 และรูปที่ 2.19(จ)แสดงสัญญาณ BRM รูปแบบที่ 10 เป็นการนำสัญญาณหลักรูปแบบที่ 2 รวมกับสัญญาณหลักรูปแบบที่ 8

$K_3=0, K_2=0, K_1=0, K_0=1$



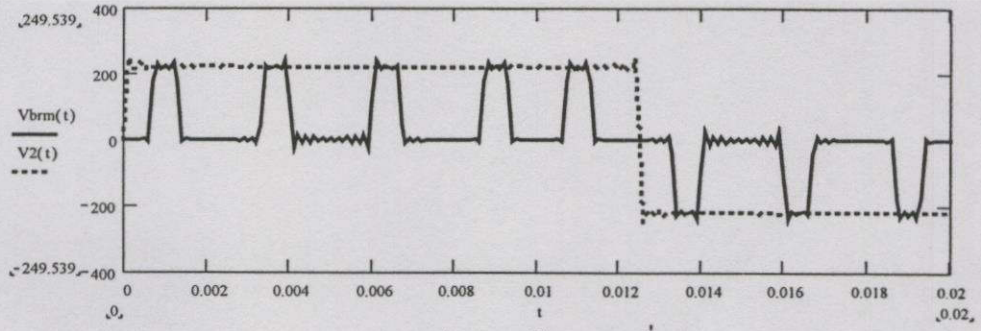
(ก) รูปแบบหลัก BRM ที่ 1.

$K_3=0, K_2=0, K_1=1, K_0=0$



(ข) รูปแบบหลัก BRM ที่ 2.

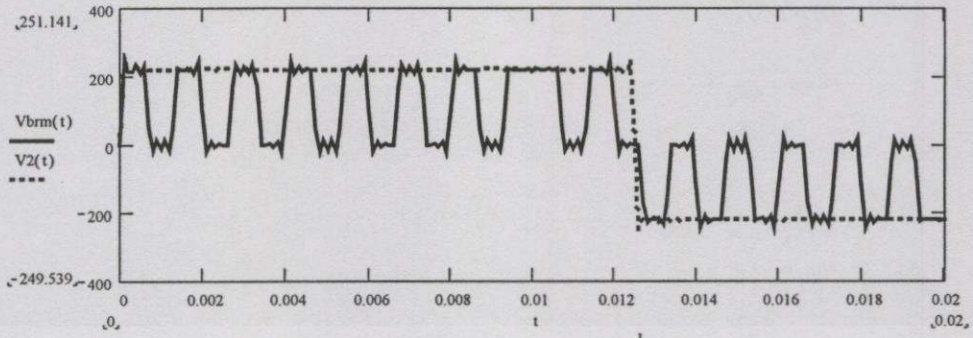
$K_3=0, K_2=1, K_1=0, K_0=0$



(ค) รูปแบบหลัก BRM ที่ 4.

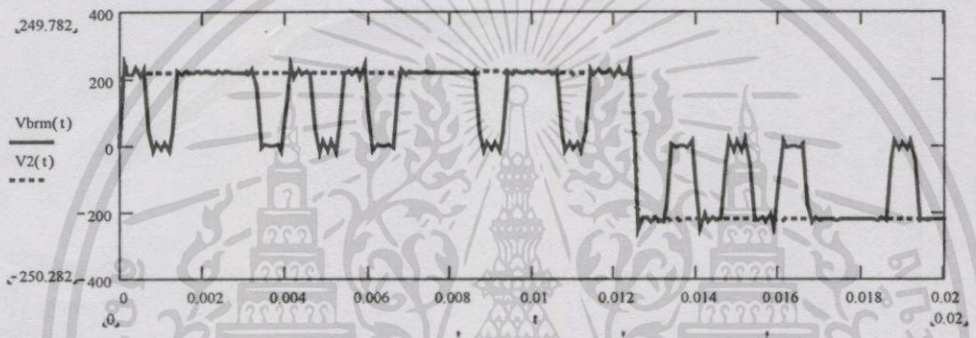
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_3 = 1, K_2 = 0, K_1 = 0, K_0 = 0$



(ง) รูปแบบหลัก BRM ที่ 8.

$K_3 = 1, K_2 = 0, K_1 = 1, K_0 = 0$



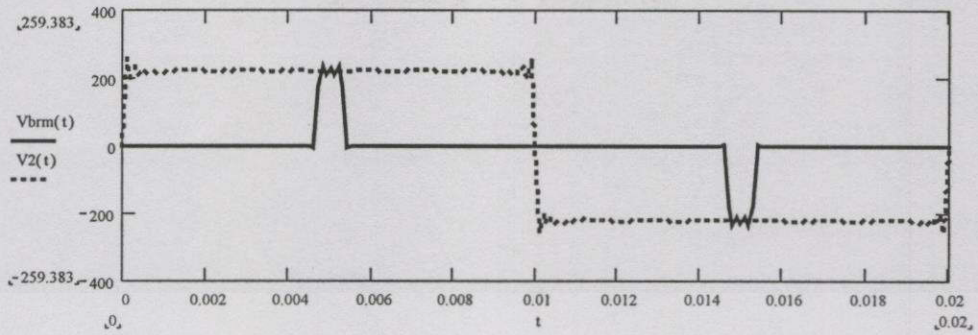
(จ) รูปแบบ BRM ที่ 10. (รูปแบบที่ 8+รูปแบบที่ 2)

รูปที่ 2.19 รูปแบบสัญญาณความถี่ 40 เฮิรตซ์และ BRM 4 บิท

สร้างสัญญาณความถี่(50เฮิรตซ์)และ BRM กำหนดให้ $V = 220$ โวลต์, $m = 3$, $T_{BRM} = 0.01$ วินาที และ $f_c = 50$ เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 2.20(ก-ง) เป็นรูปแบบที่หลักที่ 1, 2, 4 และ 8 และรูปที่ 2.20(จ) แสดงสัญญาณ BRM รูปแบบที่ 10 เป็นการนำสัญญาณหลักรูปแบบที่ 2 รวมกับสัญญาณหลักรูปแบบที่ 8

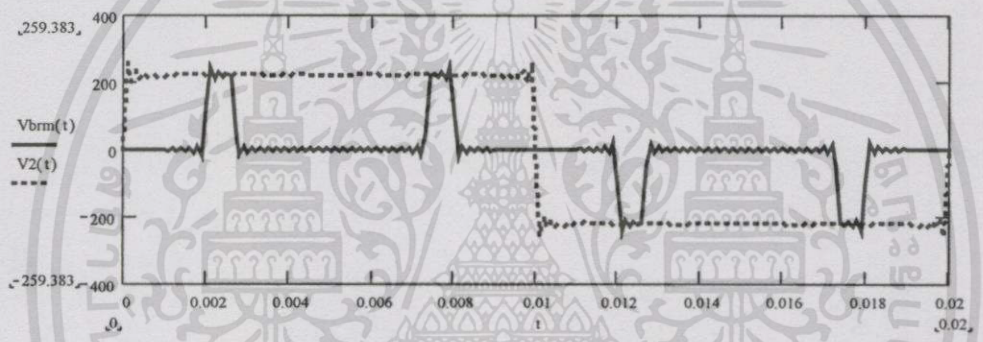
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_3 = 0, K_2 = 0, K_1 = 0, K_0 = 1$



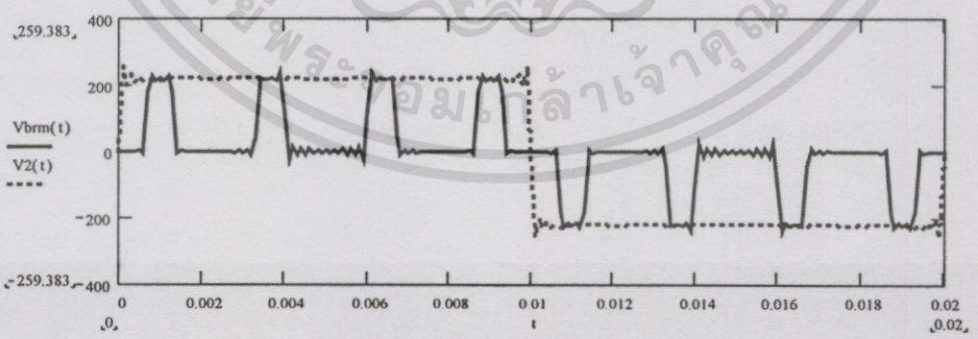
(ก)รูปแบบหลัก BRM ที่ 1.

$K_3 = 0, K_2 = 0, K_1 = 1, K_0 = 0$



(ข) รูปแบบหลัก BRM ที่ 2.

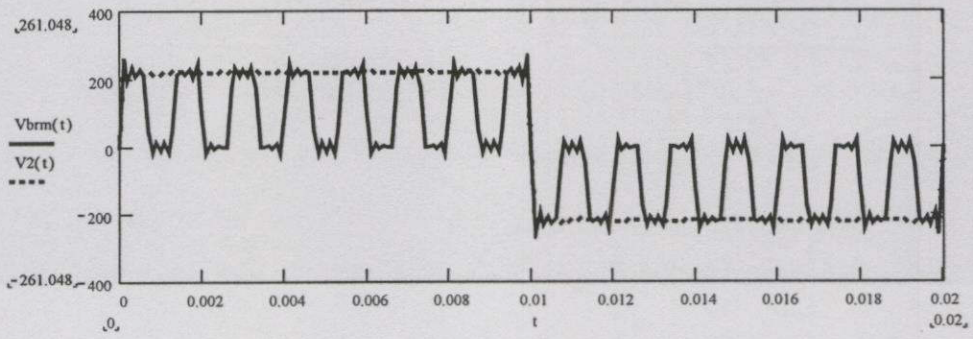
$K_3 = 0, K_2 = 1, K_1 = 0, K_0 = 0$



(ค) รูปแบบหลัก BRM ที่ 4.

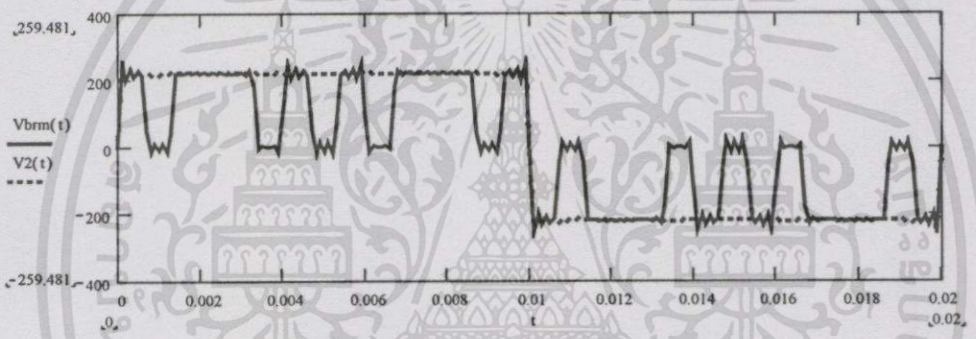
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_3 = 1, K_2 = 0, K_1 = 0, K_0 = 0$



(ง) รูปแบบหลัก BRM ที่ 8.

$K_3 = 1, K_2 = 0, K_1 = 1, K_0 = 0$



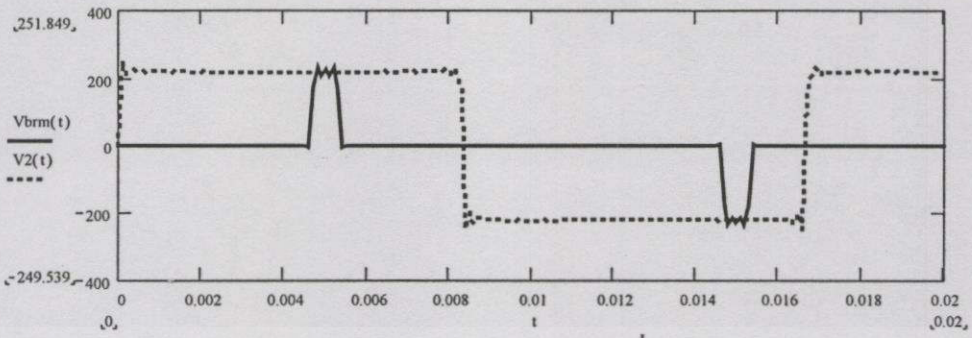
(จ) รูปแบบ BRM ที่ 10. (รูปแบบที่ 8+รูปแบบที่ 2)

รูปที่ 2.20 รูปแบบสัญญาณความถี่ 50 เฮิรตซ์และ BRM 4 บิต

สร้างสัญญาณความถี่(60เฮิรตซ์)และ BRM กำหนดให้ $V = 220$ โวลต์, $m = 3$, $T_{BRM} = 0.01$ วินาที และ $f_c = 60$ เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 2.21(ก-ง) เป็นรูปแบบที่หลักที่ 1, 2, 4 และ 8 และรูปที่ 2.21(จ) แสดงสัญญาณ BRM รูปแบบที่ 10 เป็นการนำสัญญาณหลักรูปแบบที่ 2 รวมกับสัญญาณหลักรูปแบบที่ 8

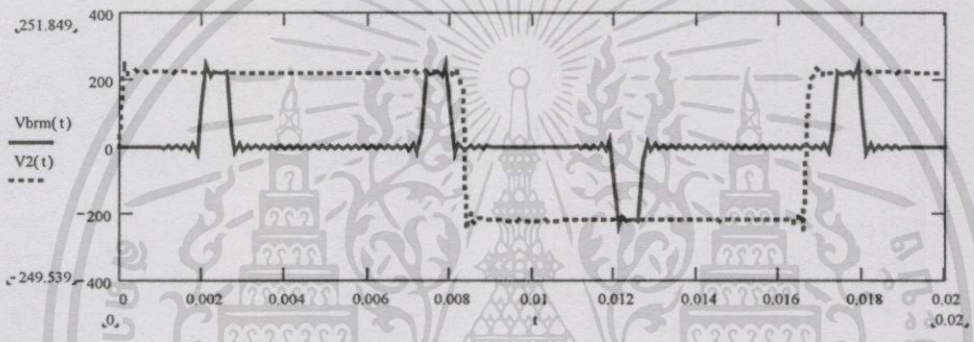
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_3 = 0, K_2 = 0, K_1 = 0, K_0 = 1$



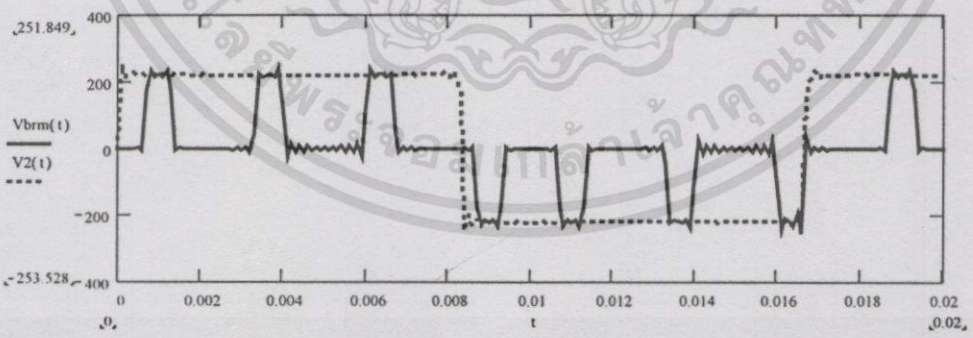
(ก) รูปแบบหลัก BRM ที่ 1.

$K_3 = 0, K_2 = 0, K_1 = 1, K_0 = 0$



(ข) รูปแบบหลัก BRM ที่ 2.

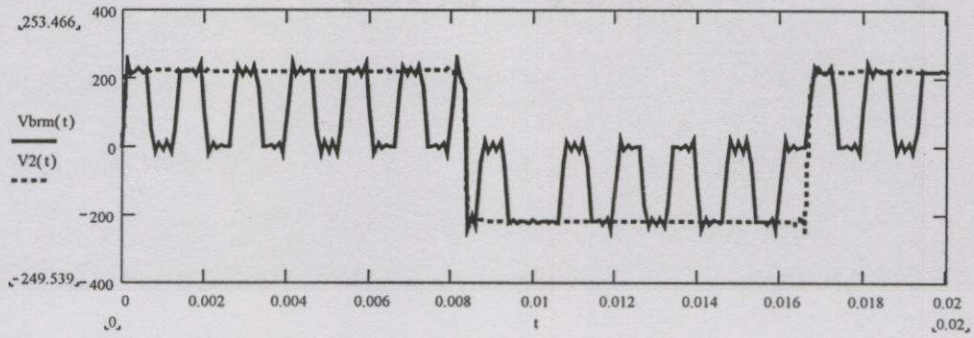
$K_3 = 0, K_2 = 1, K_1 = 0, K_0 = 0$



(ค) รูปแบบหลัก BRM ที่ 4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_3 = 1, K_2 = 0, K_1 = 0, K_0 = 0$



(ง) รูปแบบหลัก BRM ที่ 8.

$K_3 = 1, K_2 = 0, K_1 = 1, K_0 = 0$

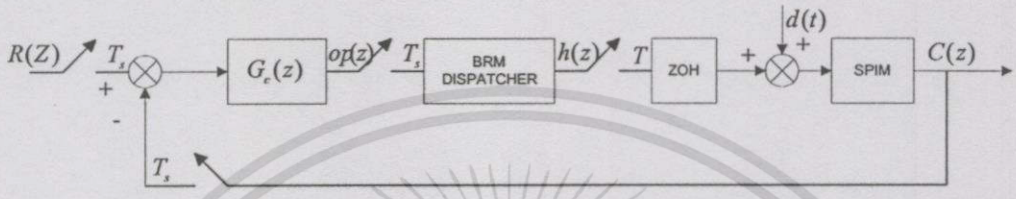
(จ) รูปแบบ BRM ที่ 10. (รูปแบบที่ 8+รูปแบบที่ 2)

รูปที่ 2.21 รูปแบบสัญญาณความถี่ 60 เฮิตรซ์และ BRM 4 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียว

3.1 โครงสร้างและการออกแบบระบบควบคุม



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบควบคุม

สำหรับการออกแบบระบบควบคุมนั้น ได้กำหนดโครงสร้างของระบบควบคุมแบบลูปปิดไว้ดังรูปที่ 3.1 โดยออกแบบตัวควบคุม $G(z)$ เป็นแบบ proportion plus integral [1] ที่กำหนดให้ K_c คือ อัตราขยายของตัวควบคุม และ T_i คือ integral time ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมสามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$G_c(z) = K_c\{1 + \frac{T_s}{T_i}\frac{z}{z-1}\} \tag{3.1}$$

เมื่อกำหนดให้ T_s คือ เวลาในการสุ่ม $= (2^m - 1)T$ และจากรูปที่ 3.1 นั้น ถ้าพิจารณาให้อุปกรณ์ Zero Order Hold (ZOH) ต่อรวมอยู่กับ plant ซึ่งสามารถกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามสมการ(3.2)

$$G_{ph}(s) = G_h(s)G_p(s) = K_p\left\{\frac{1-e^{-sT_s}}{s(T_p s+1)}\right\} \tag{3.2}$$

โดยที่ฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการ (3.2) เขียนในรูปของ Z- Transform ได้ดังนี้ คือ

$$G_{ph}(z) = K_p\left\{\frac{1-e^{-T_s/T_p}}{z-e^{-T_s/T_p}}\right\} \tag{3.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

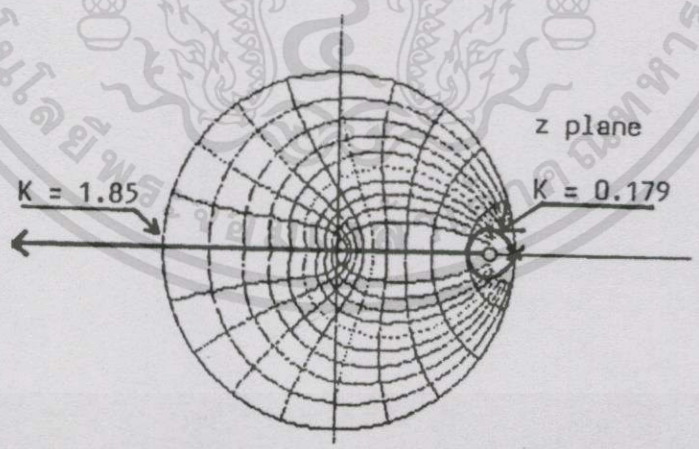
เมื่อพิจารณาโครงสร้างของระบบควบคุมดังรูปที่ 3.1 และฟังก์ชันถ่ายโอนในส่วนต่างๆ ของระบบแล้วนั้นสามารถกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบลูปปิดได้ดังสมการ(3.4) โดยกำหนดให้ BRM dispatcher คือ dc gain (K_d)

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

$$= \frac{K_d K_c K_p \left[\frac{(1+T_s/T_i)z-1}{z-1}\right] \times \left[\frac{1-e^{-T_s/T_p}}{z-e^{-T_s/T_p}}\right]}{1+K_d K_c K_p \left[\frac{(1+T_s/T_i)z-1}{z-1}\right] \times \left[\frac{1-e^{-T_s/T_p}}{z-e^{-T_s/T_p}}\right]} \tag{3.4}$$

สำหรับสมการ (3.4) ถ้ากำหนดให้ $x=e^{-T_s/T_p}$ และ $K=K_c K_d K_p(1-x)$ ดังนั้นสมการคุณลักษณะเขียนได้ตามสมการ (3.5) ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้เทคนิค Root locus ที่กำหนดให้ K จากการทดสอบด้วยวิธี Trial and error ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.179 ถึง 1.85 โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้น แสดงดังรูปที่ 3.2

$$(z-1)(z-x)+K\{(1+T_s/T_p)z-1\}=0 \tag{3.5}$$

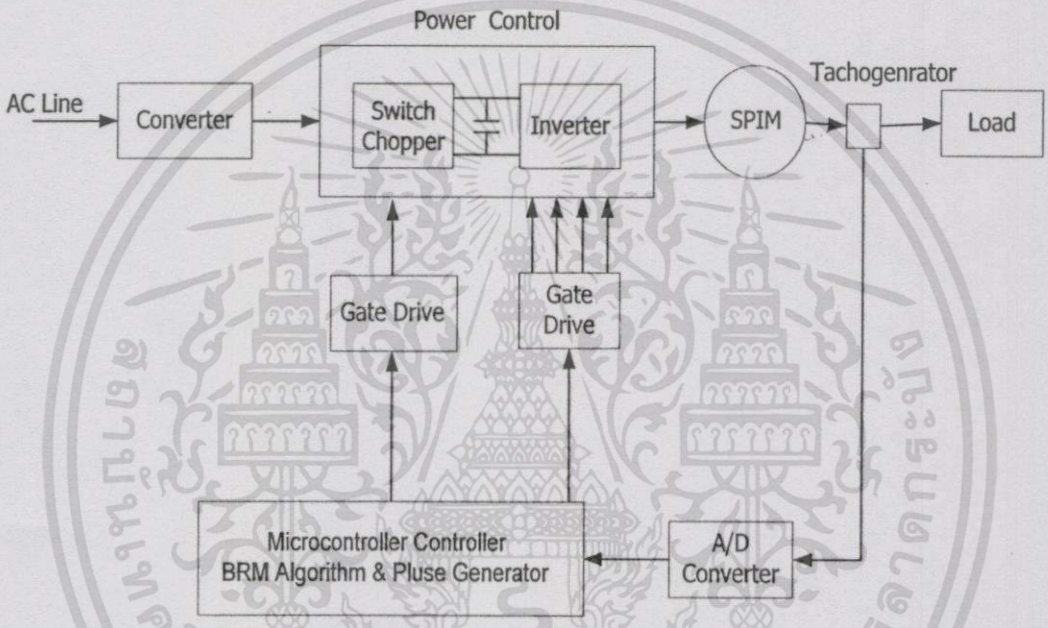


รูปที่ 3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ Root Locus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบทางฮาร์ดแวร์

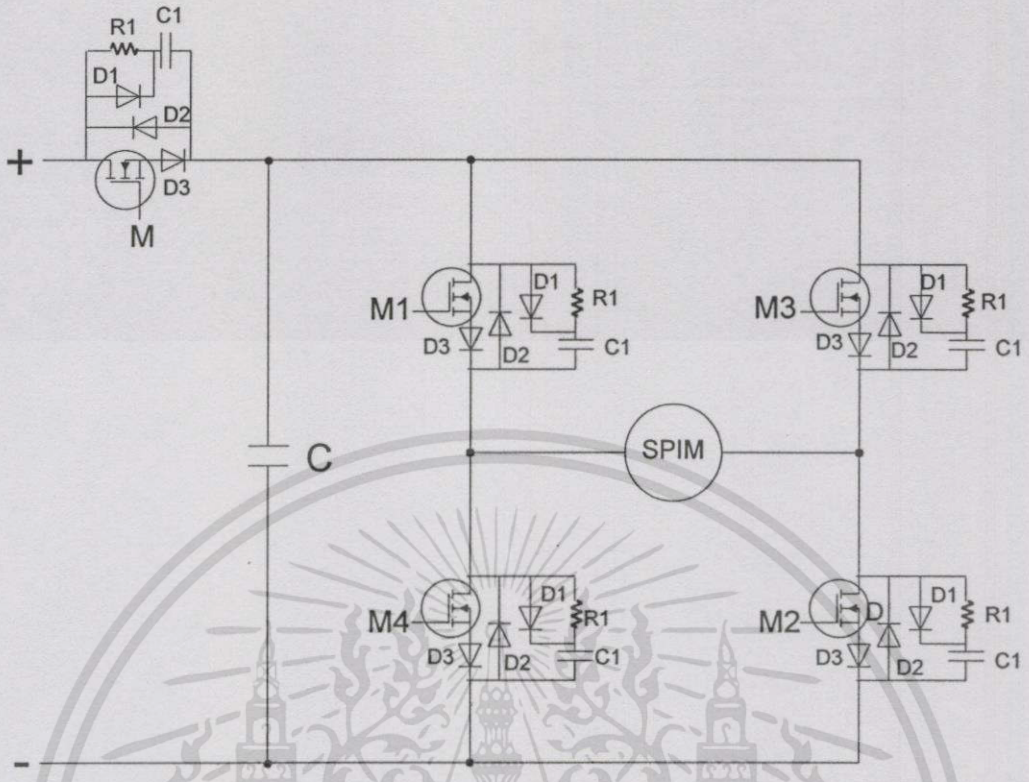
สำหรับโครงสร้างของการควบคุมทางฮาร์ดแวร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 เมื่อมีสัญญาณป้อนกลับจาก Tachogenerator มายังส่วนวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล ส่งให้ไมโครคอลโทรเลอร์ 8051 ประมวลผลตามกริยาการควบคุมแบบ PI แล้วตัดสินใจเลือกส่งรูปแบบ BRM ที่เหมาะสม เพื่อส่งไปยังวงจรขับนำผ่านเข้าสู่ชุดอินเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ตั้งแต่ 40 ถึง 60 เฮิรตซ์ สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้ได้ตามต้องการ



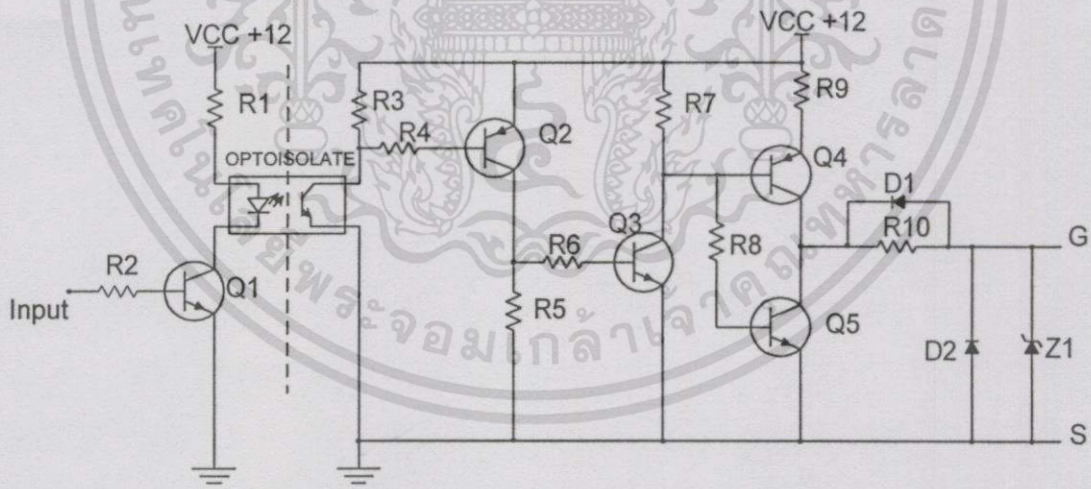
รูปที่ 3.3 บล็อกไดแกรมการทำงานของระบบทั้งหมด

จากบล็อกไดแกรมการทำงานของระบบทั้งหมดดังรูปที่ 3.3 นั้น สามารถอธิบายและแสดงวงจรการทำงานในแต่ละส่วน ได้ดังรูปที่ 3.4 ถึง 3.6 สำหรับวงจรกำลังในรูปที่ 3.4 ประกอบด้วยมอสเฟส 5 ตัว ต่อร่วมกันเป็นวงจรสับสวิทซ์แบบชอฟเปอร์และ อินเวอร์เตอร์ โดยที่มอสเฟส M ทำหน้าที่กำหนดการจ่ายแรงดันให้กับส่วนอินเวอร์เตอร์ตามรูปแบบของ BRM ที่ได้รับจากไมโครคอลโทรเลอร์โดยผ่านวงจรขับนำดังรูปที่ 3.5 ซึ่งวงจรขับนำมีทั้งหมด 5 ชุดแต่ละชุดจะเหมือนกัน ซึ่งชุดที่ 1 รับสัญญาณ BRM จากไมโครคอลโทรเลอร์ และอีก 4 ชุด รับสัญญาณจากไมโครคอลโทรเลอร์เพื่อกำหนดความถี่ ตั้งแต่ 40 ถึง 60 เฮิรตซ์ สำหรับจ่ายให้กับชุดอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยมอสเฟส 4 ตัว คือ M1,M2 , M3 และ M4 โดยที่ M1กับ M2 ทำงานในไซเกิ้ลบวก และ M3 กับ M4 ทำงานในไซเกิ้ลลบ และสำหรับรูปที่ 3.6 แสดงการเชื่อมต่อวงจรทางฮาร์ดแวร์ของวงจรแต่ละส่วนดังกล่าวข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

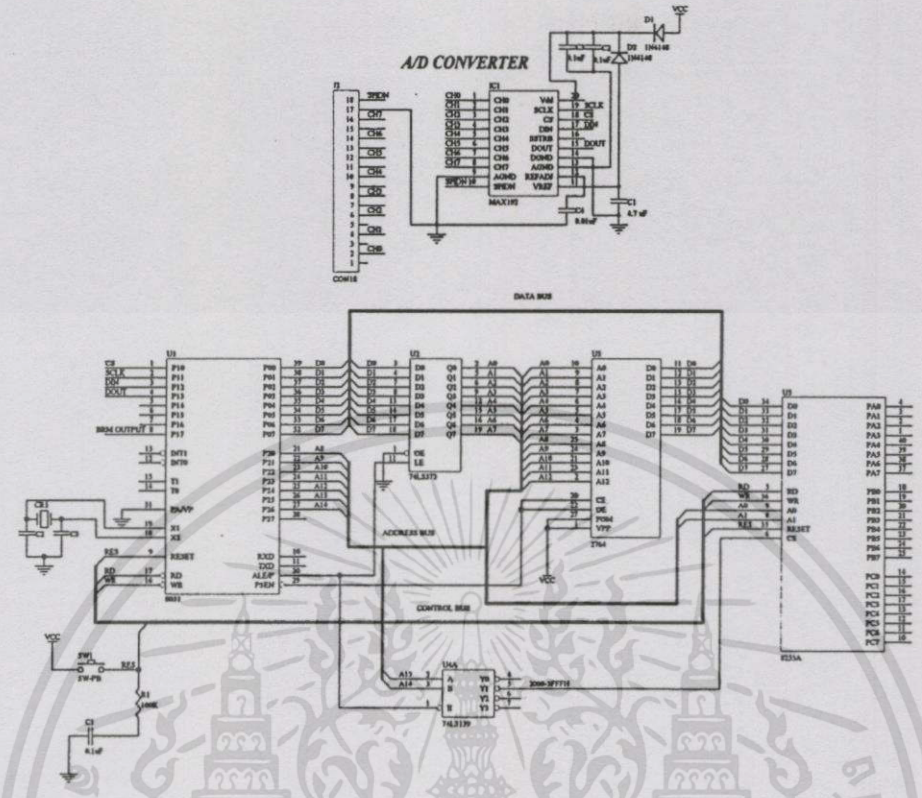


รูปที่ 3.4 วงจรกำลัง



รูปที่ 3.5 วงจรขับนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

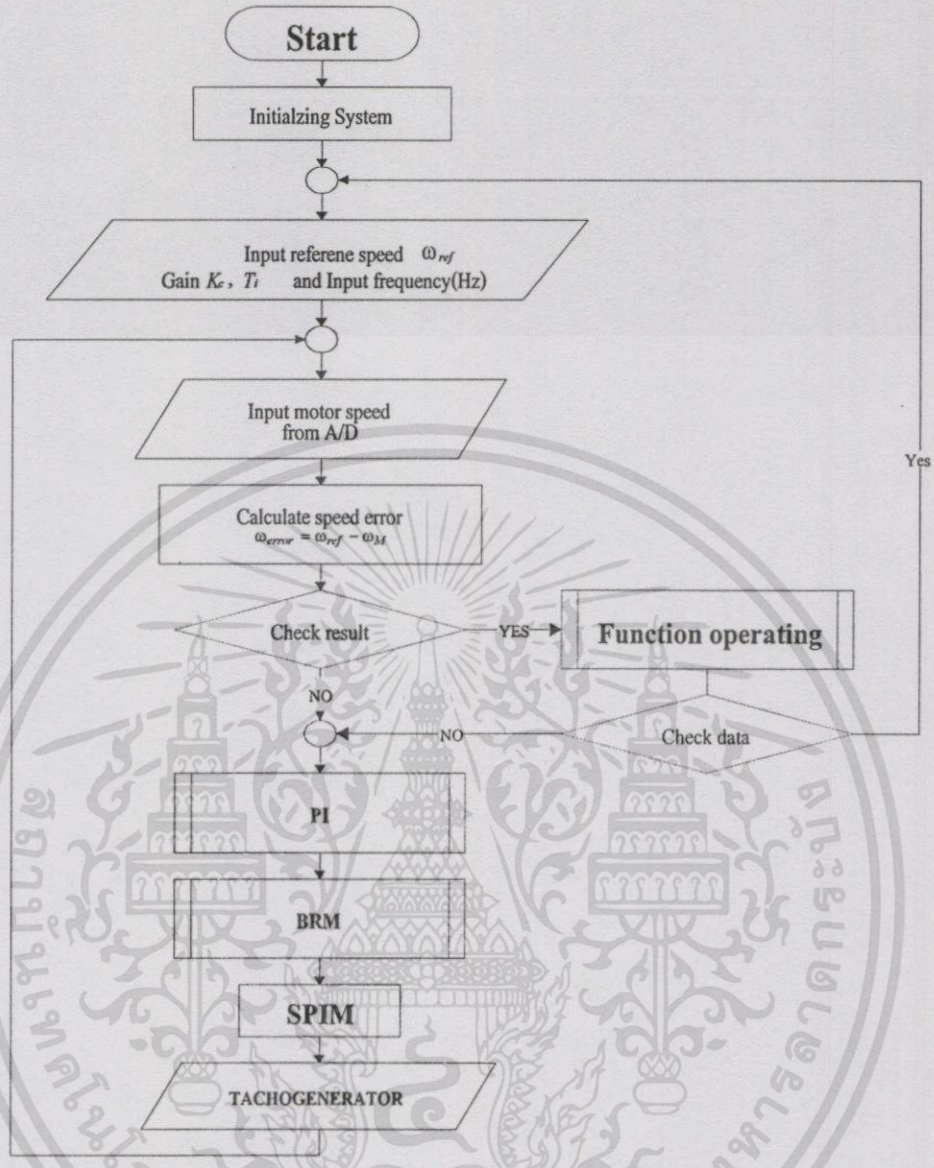


รูปที่ 3.6 การเชื่อมต่อทางฮาร์ดแวร์

3.3 การออกแบบทางซอฟต์แวร์

ถ้าพิจารณาแผนภาพการทำงานของระบบทั้งหมดแสดงไว้ดังรูปที่ 3.7 เห็นได้ว่าเมื่อตรวจพบค่าผิดพลาดของความเร็วที่เกิดขึ้นในขณะมอเตอร์ทำงาน ซึ่งกำหนดได้ตามสมการ $\omega_{error} = \omega_{ref} - \omega_M$ จากนั้นระบบจะทำการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากสมการดังกล่าว ในระหว่างการตรวจสอบผลลัพธ์ถ้ามีข้อมูลส่งเข้ามา เช่น การเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K_c, T_i และความถี่ เป็นต้น โปรแกรมจะกระโดดไปทำงานตามฟังก์ชันนั้นๆ ก่อน แต่ถ้าไม่มีข้อมูลส่งเข้ามาจะนำผลลัพธ์ที่ได้ไปคำนวณเพื่อเลือกรูปแบบ BRM ตามกริยาการควบคุมแบบ PI โดยไมโครคอลโทรเลอร์ 8051 แล้วส่งสัญญาณ BRM ที่เหมาะสมไปยังชุดวงจรขับของอินเวอร์เตอร์ สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้ได้ตามต้องการ

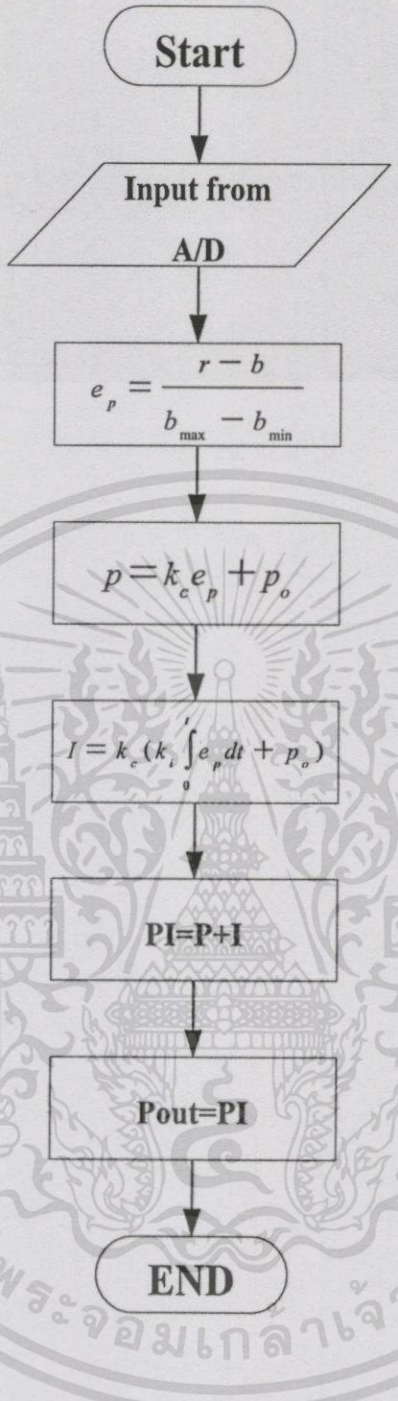
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แผนภาพการทำงานของระบบทั้งหมด

สำหรับตัวควบคุมแบบ PI ที่ใช้ในระบบควบคุมนั้นสามารถอธิบายการทำงานได้ ดังรูปที่ 3.8 โดยที่ตัวควบคุมจะทำหน้าที่กำหนดรูปแบบ BRM เพื่อส่งไปยังชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

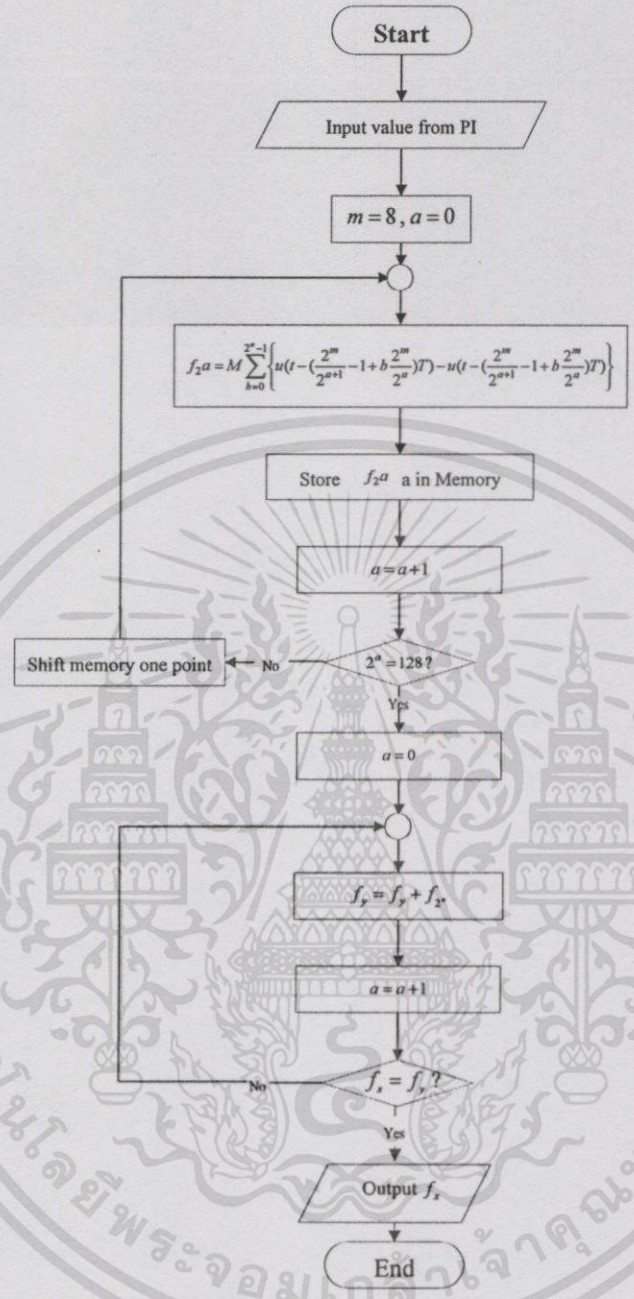
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมแบบ PI

สำหรับรูปที่ 3.9 นั้นแสดงการสร้างพัลซ์ BRM ที่กำหนดให้โปรแกรมสร้างพัลซ์ BRM ทั้งหมด 8 รูปแบบหลัก ส่วนรูปแบบอื่นๆ นั้น จะนำรูปแบบหลักที่สร้างขึ้นมากระทำ Linear combination ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เพื่อให้ได้รูปแบบ BRM ที่เหมาะสมส่งไปยังชุดอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ต่อไป ซึ่งกระบวนการดังกล่าวถูกกำหนดจากตัวควบคุมแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



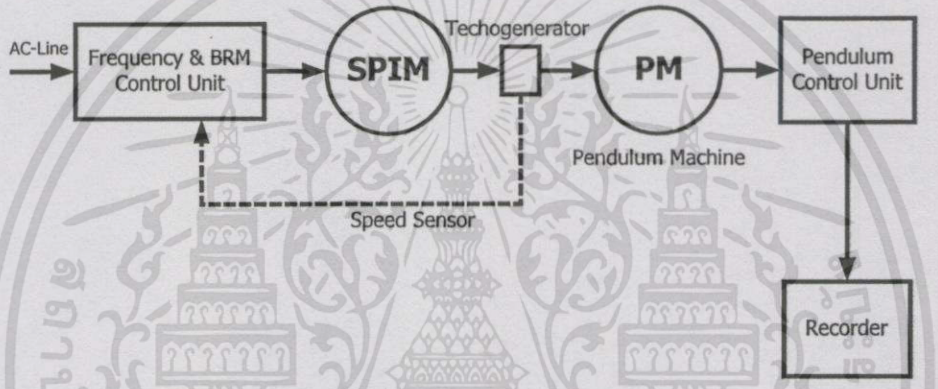
รูปที่ 3.9 แผนภาพการสร้างรูปแบบพัลซ์ BRM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

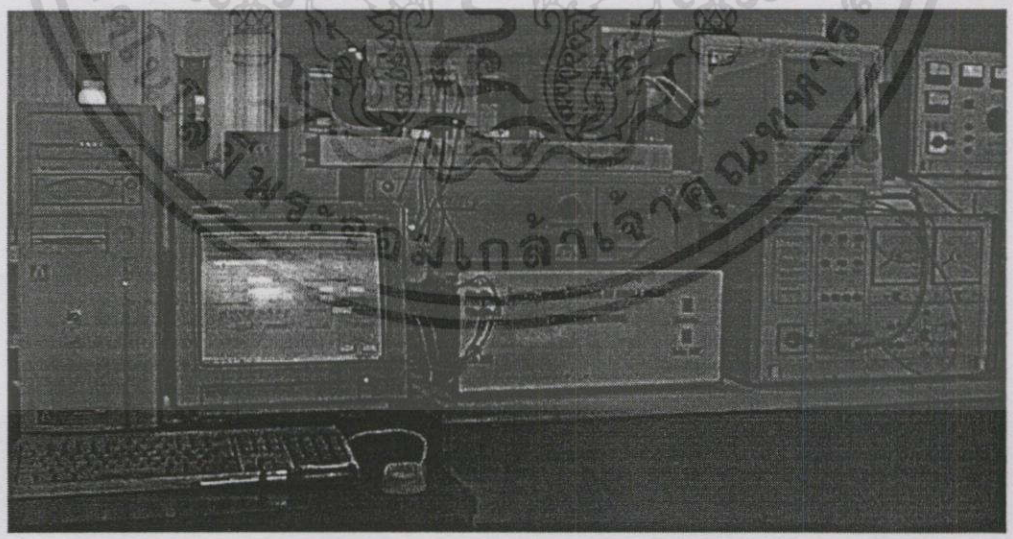
บทที่ 4

ผลการทดลอง

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบตามเทคนิคการควบคุมความถี่และการผสมสัญญาณแบบ BRM กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวตามโครงสร้างของระบบควบคุมดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมอเตอร์มีพิกัด แรงดัน 220 โวลท์ กระแส 2.65 แอมป์ กำลังเอาต์พุต 260 วัตต์ 50 เฮริตซ์ 4 ขั้วแม่เหล็ก และ ความเร็วรอบ 1410 รอบต่อนาที

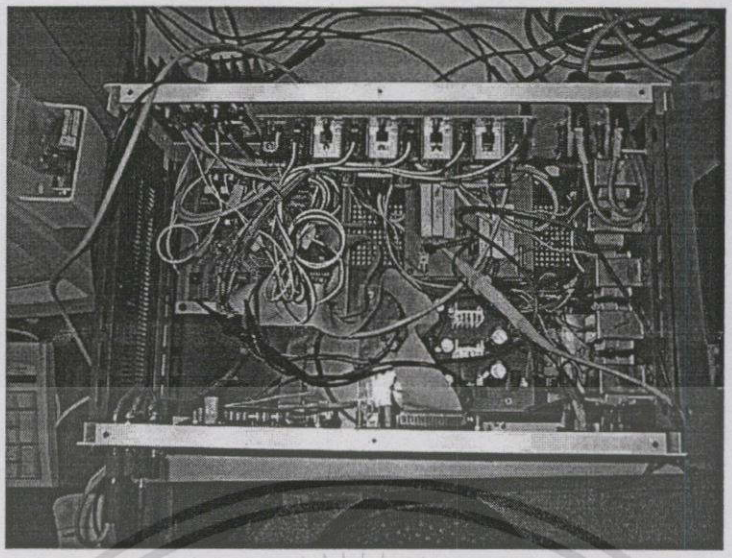


รูปที่ 4.1 บล็อกไดแกรมการทดสอบการควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 4.2 การทดสอบการควบคุมมอเตอร์

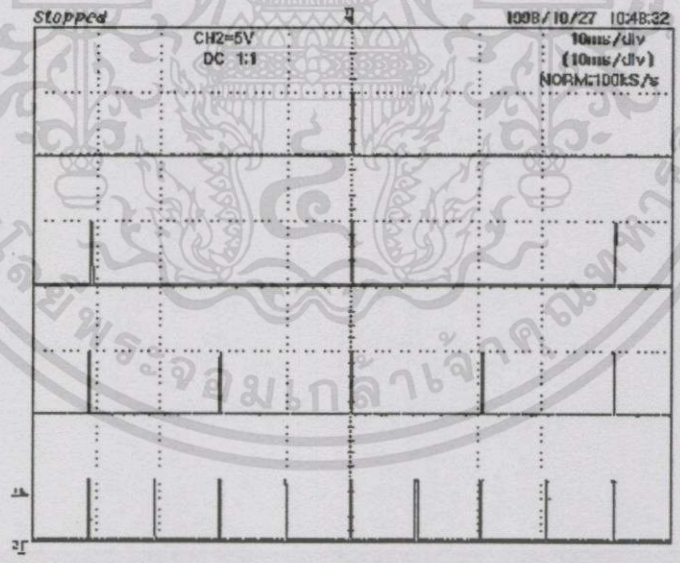
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงชุดควบคุมมอเตอร์

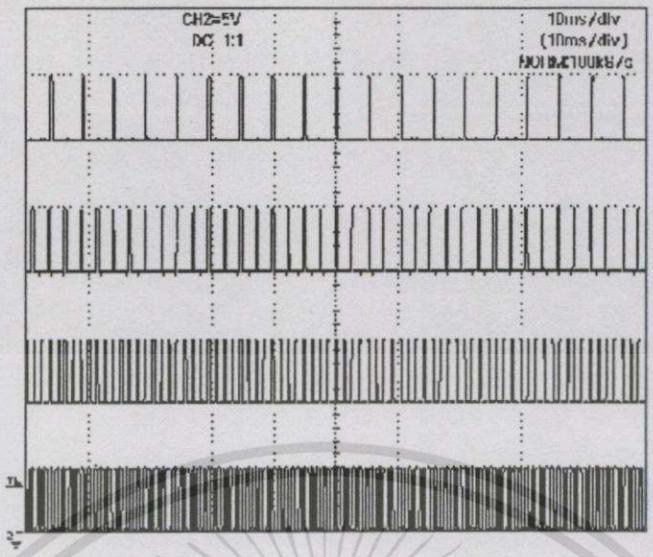
4.1 ผลการทดลองส่วนที่ 1

ผลการทดลองในส่วนที่ 1 เป็นการแสดงผลของรูปพัลซ์ BRM รูปแบบหลักที่สร้างขึ้น ดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.5 โดยสัญญาณ รูปพัลซ์ BRM จะถูกส่งไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์ต่อไป



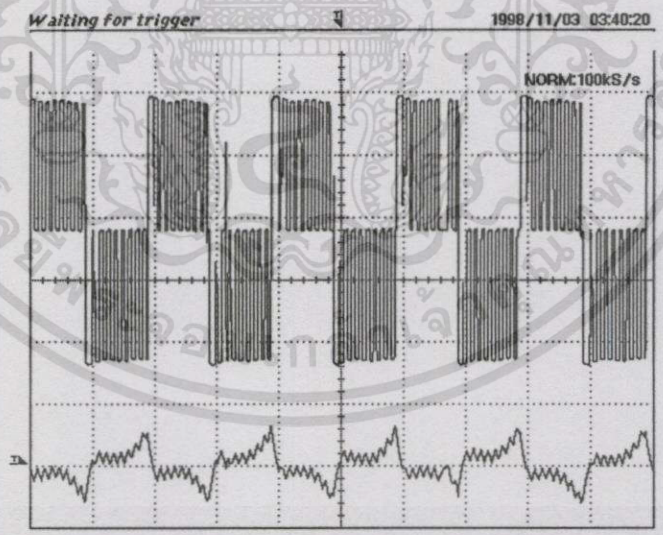
รูปที่ 4.4 รูปพัลซ์ BRM รูปแบบที่ 1 , 2 , 4 และ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



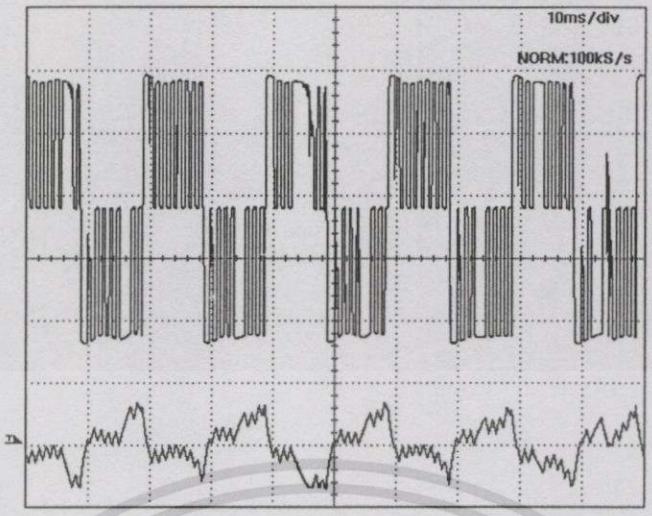
รูปที่ 4.5 รูปพัลซ์ BRM รูปแบบที่ 16,32, 64 และ 128

สำหรับรูปคลื่นของสัญญาณแรงดันและกระแสที่ได้จากทดสอบการควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิคควบคุมความถี่และการผสมสัญญาณแบบ BRMทั้งขณะไร้โหลดและขณะขับโหลดที่พิกัด 0.3 – 2.4 นิวตัน-เมตร แสดงดังรูปที่ 4.6 ถึง 4.15

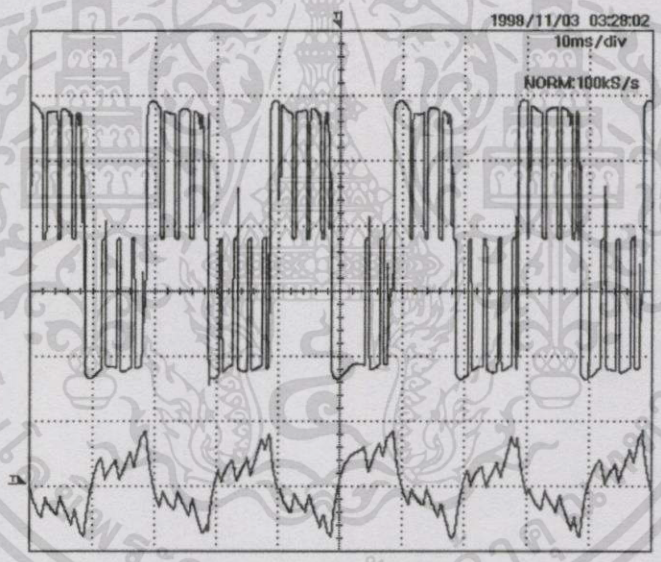


รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดัน(ด้านบน:100V/div) และกระแส(ด้านล่าง:5A/div)ขณะไร้โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

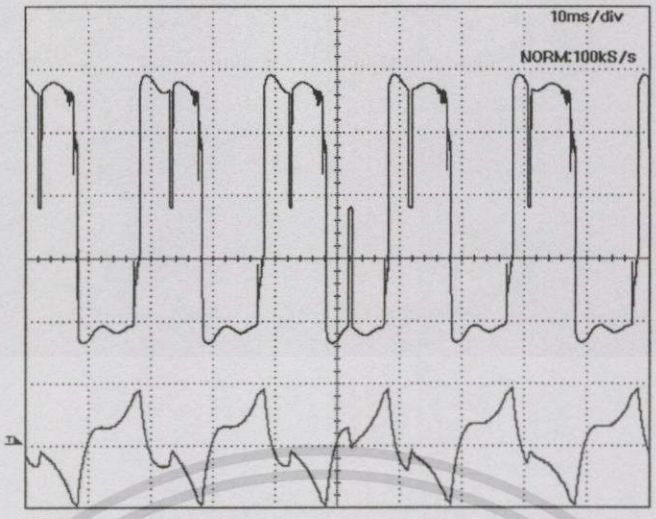


รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดัน(ด้านบน:100V/div) และกระแส(ด้านล่าง:5A/div) ขณะขับโหลด 0.3 N-m.



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดัน(ด้านบน:100V/div) และกระแส(ด้านล่าง:5A/div) ขณะขับโหลด 0.9 N.m.

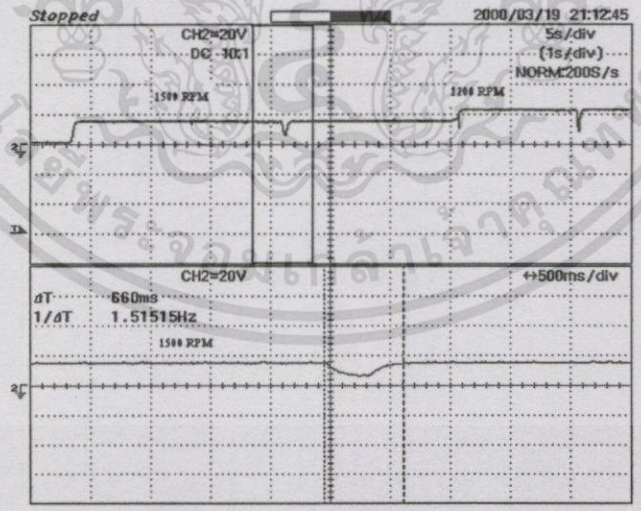
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดัน(ด้านบน:100V/div) และกระแส(ด้านล่าง:5A/div) ขณะขับโหลด 1.75 N.m.

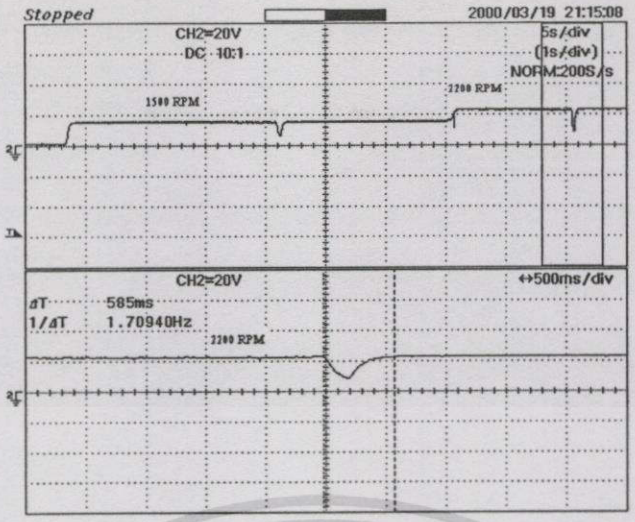
4.2 ผลการทดลองส่วนที่ 2

สำหรับส่วนนี้แสดงผลการทดสอบผลตอบสนองต่อความเร็วและผลตอบสนองต่อการเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อความเร็วและโหลดเปลี่ยนแปลงที่ค่าต่าง ๆ โดยการคุมค่าความเร็วมอเตอร์ไว้ที่ 1500 รอบต่อนาที และ 2200 รอบต่อนาที โดยกำหนดค่า $K_c = 1.75$, $T_i = 0.015$ วินาที และ $T_s = 0.667$ มิลลิวินาที ตามหลัก Ziegler Nichols[3]



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองของมอเตอร์ขณะใส่โหลด 1.75 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็ว 1500รอบ/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองของมอเตอร์ขณะใส่โหลด 1.75 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็ว 2200รอบ/นาที

4.3 ผลการทดลองส่วนที่ 3

ผลการทดลองส่วนที่ 3 เป็นการพิจารณาถึงคุณลักษณะสมบัติและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว จากผลของการควบคุมแบบโดยตรง ผลการควบคุมด้วยการควบคุมแบบเฟส และ ผลการควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมความถี่ และการผสมสัญญาณแบบ BRM จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมความถี่ และการผสมสัญญาณแบบ BRM มีประสิทธิภาพสูงกว่า การควบคุมแบบโดยตรง และ การควบคุมแบบเฟส ดังตารางที่ 4.1 , 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.1 การควบคุมมอเตอร์โดยตรง

T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.75
N(rpm)	1435	1415	1404	1392	1380	1374	1365
V_i(V)	220	220	220	220	220	220	220
I_i(A)	2.76	2.77	2.78	2.79	2.80	2.82	2.83
P_i(w)	160	179	202	227	243	293	319
Q_I(Var)	586	582	577	570	566	546	534
S(VA)	607	609	612	614	616	620	623
PF.	0.263	0.294	0.331	0.369	0.394	0.473	0.513
P_o(W)	0	44.45	88.22	131.19	173.42	215.83	250.15
η(%)	0	24.83	43.67	57.79	71.66	73.66	78.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การควบคุมมอเตอร์ด้วยการควบคุมแบบเฟส

T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.75
N(rpm)	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410
V_I(V)	150	160	166	170	179	185	190
I_i(A)	1.20	1.40	1.70	2.00	2.10	2.30	2.35
P_I(w)	74	102	130	180	224	265	299
Q_i(Var)	164	199	250	288	301	332	333
S(VA)	180	224	282	340	376	426	447
PF.	0.412	0.455	0.460	0.531	0.597	0.623	0.669
P_o(W)	0	44.30	88.59	132.89	177.19	221.48	258.40
η(%)	0	43.46	68.25	73.83	79.10	83.58	86.42

ตารางที่ 4.3 การควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมความถี่และการผสมสัญญาณแบบ BRM

T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.75
N(rpm)	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410
V_i(V)	129	143	155	170	176	180	185
I_i(A)	1.10	1.23	1.50	1.83	2.10	2.20	2.30
P_i(w)	65	85	128	173	223	258	296
Q_i(Var)	126	154	194	259	295	300	306
S(VA)	142	176	233	311	369	396	426
PF.	0.456	0.483	0.549	0.556	0.603	0.651	0.695
P_o(W)	0	44.30	88.59	132.89	177.19	22148	258.40
η(%)	0	52.15	69.41	76.82	79.46	85.84	87.30

4.4 การทดสอบมอเตอร์

การทดสอบควบคุมมอเตอร์แบบลูปเปิดที่ขณะไร้โหลดที่ความถี่ 40-60 เฮริตซ์ และเลือกส่งสัญญาณ BRM รูปแบบต่างๆ ไปควบคุมมอเตอร์ เพื่อแสดงผลของกระแส และกำลังงานที่ใช้ ดังตารางที่ 4.4-4.6 เมื่อเพิ่มความถี่จะทำให้กระแส และกำลังที่ใช้งานลดลง ขณะใส่โหลด 0.3–1.75 นิวตันต่อเมตร และเมื่อลดความถี่ลงจะส่งผลให้กระแสและกำลังที่ใช้งานลดลง ดังตารางที่ 4.7-4.15 สำหรับการทดสอบควบคุมมอเตอร์แบบลูปปิด ขณะไร้โหลด เมื่อเพิ่มความถี่จะส่งผลให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังที่ใช้งานเพิ่มขึ้น และความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ขณะใส่โหลด 0.3–1.75 นิวตันต่อเมตร เมื่อเพิ่มความถี่ ส่งผลให้กระแสและกำลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.16-4.19

4.4.1 การทดสอบแบบ Open loop – No load

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแบบ Open loop – No load ที่ความถี่ 40 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	N(rpm)
60	40	0.95	115	0.32	110	100	1250
80	40	1.10	133	0.30	150	140	1291
100	50	1.28	148	0.28	190	180	1302
120	60	1.46	160	0.25	230	220	1306
140	80	1.77	172	0.24	290	280	1310
160	90	1.90	180	0.25	340	330	1312
255	180	3.24	216	0.25	700	670	1319

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแบบ Open loop – No load ที่ความถี่ 50 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	N(rpm)
60	40	0.98	115	0.34	110	100	1365
80	40	1.00	133	0.32	140	130	1432
100	50	1.20	148	0.26	180	170	1446
120	60	1.34	160	0.29	210	200	1452
140	70	1.50	172	0.27	270	260	1455
160	80	1.67	181	0.26	300	290	1460
255	150	2.72	217	0.24	590	570	1470

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแบบ Open loop – No load ที่ความถี่ 60 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	N(rpm)
65	40	0.93	118	0.35	110	100	1478
80	50	1.01	134	0.34	140	130	1535
100	50	1.14	150	0.29	170	160	1555
120	60	1.27	162	0.27	210	200	1562
140	70	1.43	172	0.27	250	240	1565
160	70	1.59	183	0.25	290	280	1570
255	130	2.45	218	0.25	540	520	1580

4.4.2 การทดสอบแบบ Open loop – Take load

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบ Open loop – Take load = 0.3 N.m. ที่ความถี่ 40 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
90	70	1.37	133	0.388	180	170	40.93	1222
120	80	1.47	155	0.343	230	210	42.70	1275
140	90	1.67	167	0.349	280	260	43.04	1285
160	100	1.88	177	0.317	330	310	43.24	1291
210	150	1.52	198	0.301	500	480	43.54	1300

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบ Open loop – Take load = 0.9 N.m. ที่ความถี่ 40 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
110	140	2.13	146	0.455	310	280	112.04	1115
120	130	1.84	152	0.469	280	250	121.28	1207
140	130	1.79	164	0.431	290	260	125.40	1248
160	140	1.91	174	0.417	330	300	127.31	1267
210	180	2.54	196	0.363	500	460	129.32	1287

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบ Open loop – Take load = 1.75 N.m. ที่ความถี่ 40 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
90	-	-	-	-	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	-	-	-
140	210	2.26	162	0.507	370	320	196.77	1175
160	210	2.13	172	0.495	370	320	206.32	1232
255	220	2.54	195	0.433	490	450	212.68	1270

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบ Open loop – Take load = 0.3 N.m ที่ความถี่ 50 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
100	100	1.6	144	0.421	230	210	45.55	1360
120	100	1.52	158	0.412	240	220	47.39	1415
140	110	1.62	169	0.389	270	250	48.13	1437
160	110	1.71	180	0.359	310	290	48.53	1449
255	170	2.68	216.9	0.3	580	550	49.03	1464

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบ Open loop – Take load = 0.9 N.m.ที่ความถี่ 50 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
90	-	-	-	-	-	-	-	-
130	150	1.94	160	0.477	310	270	135.95	1353
140	140	1.82	165	0.479	300	260	139.16	1385
160	140	1.83	175	0.449	320	290	142.38	1417
255	200	2.62	213	0.36	560	520	146.10	1454

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบ Open loop – Take load = 1.75 N.m. ที่ความถี่ 50 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
90	-	-	-	-	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	-	-	-
150	220	2.53	168	0.527	420	360	216.87	1295
160	240	2.2	173	0.526	380	320	227.42	1358
255	250	2.64	211	0.425	560	500	241.32	1441

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบ Open loop – Take load = 0.3 N.m. ที่ความถี่ 60 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
90	-	-	-	-	-	-	-	-
120	110	1.55	155	0.453	240	210	56.03	1673
140	110	1.5	166	0.434	250	220	57.61	1720
160	110	1.48	176	0.423	260	240	58.21	1738
255	140	2.04	213	0.332	440	410	59.18	1767

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบ Open loop – Take load = 0.9 N.m. ที่ความถี่ 60 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
90	-	-	-	-	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	-	-	-
150	180	2.08	168	0.506	350	300	163.28	1625
160	180	1.84	173	0.507	320	270	168.00	1672
255	180	2.1	211	0.42	440	400	175.84	1750

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบ Open loop – Take load = 1.75 N.m. ที่ความถี่ 60 Hz

BRM	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
90	-	-	-	-	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	-	-	-
140	-	-	-	-	-	-	-	-
190	290	2.23	185	0.555	410	340	277.49	1657
255	290	2.23	210	0.498	470	410	289.38	1728

4.4.3 การทดสอบแบบ Close loop – No load

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบClose loop – No load

f (Hz)	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	N(rpm)
40	60	1.42	159	0.268	230	220	1300
50	40	1.02	132	0.308	130	130	1400
60	50	0.98	134	0.362	130	120	1700
70	60	1.11	169	0.335	190	180	2100
80	70	1.10	177	0.35	190	180	2300

4.4.4 การทดสอบแบบ Close loop – Take load

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบ Close loop - Take load ที่ความถี่ 40 Hz

T(N.m)	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
0	50	1.15	134	0.353	150	140	0	1250
0.3	80	1.44	147	0.383	210	200	41.87	1250
0.6	110	1.61	161	0.399	260	240	83.73	1250
0.9	130	1.64	164	0.439	300	270	125.60	1250
1.2	170	1.68	168	0.465	330	290	167.47	1250
1.75	210	2.22	180	0.467	400	350	209.33	1250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบ Close loop - Take load ที่ความถี่ 50 Hz

T(N.m)	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
0	70	1.28	150	0.352	190	180	0	1390
0.3	90	1.41	158	0.385	220	210	46.556	1390
0.6	120	1.72	172	0.397	300	270	93.111	1390
0.9	150	1.95	180	0.441	350	310	139.73	1390
1.2	200	2.08	184	0.462	380	340	186.22	1390
1.75	240	2.38	194	0.468	460	410	232.78	1390

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบ Close loop - Take load ที่ความถี่ 60 Hz

T(N.m)	P_i(W)	I_i (A)	V_i(V)	PF	S_i(VA)	Q_i(VAR)	P_o(W)	N(rpm)
0	90	1.4	162	0.413	230	210	0	1700
0.3	110	1.5	165	0.441	250	220	56.939	1700
0.6	140	1.75	177	0.468	310	270	113.877	1700
0.9	180	1.85	183	0.496	340	290	170.82	1700
1.2	240	2.07	189	0.506	390	340	227.75	1700
1.75	290	2.22	198	0.525	440	370	284.69	1700

หมายเหตุ (-) แสดงมอเตอร์ไม่สามารถทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

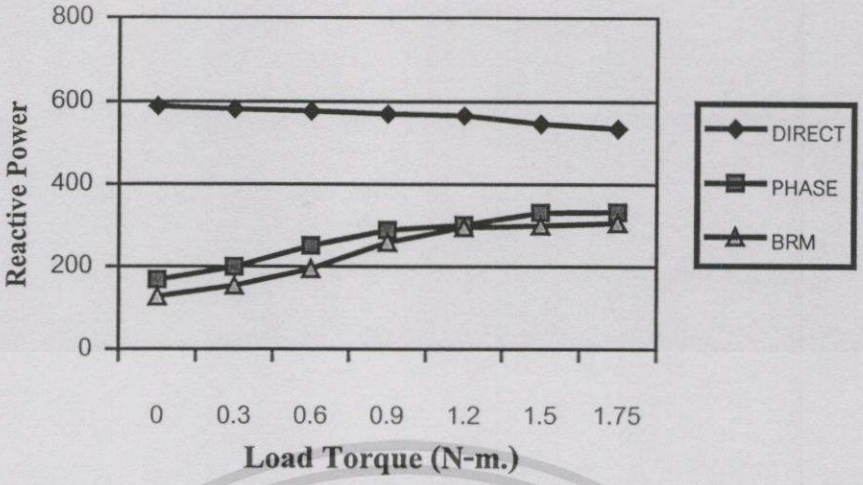
บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

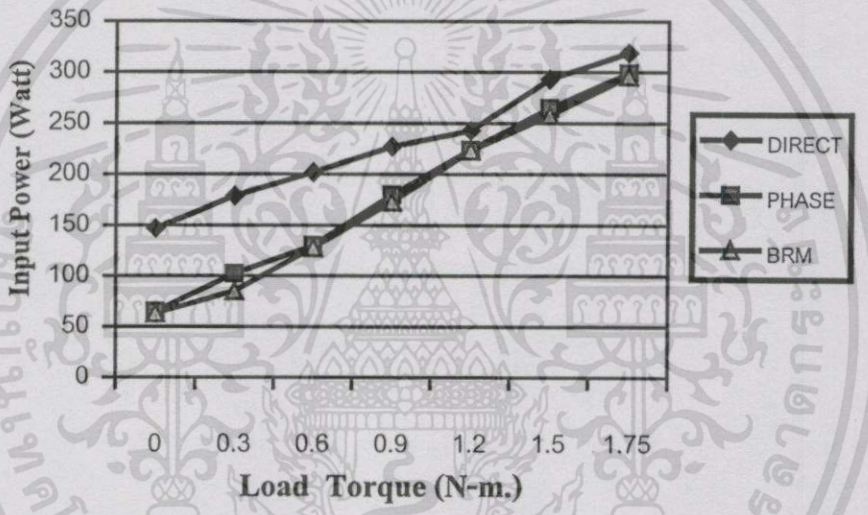
จากการทดลองการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ด้วยเทคนิคการควบคุมความถี่และการผสมสัญญาณแบบ BRM นั้นผลที่ได้พบว่าเทคนิคนี้สามารถลดค่าแรงดัน การกระชากของกระแสและแรงบิดขณะเริ่มต้นหมุนให้ต่ำลงนอกจากนี้เทคนิคการควบคุมความถี่และ BRM ทำให้ผลตอบสนองของการเข้าสู่สภาวะคงตัวทำได้รวดเร็วขณะความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงที่ภาระโหลดสูงสุด ซึ่งใช้เวลาต่ำกว่า 1 วินาที ดังรูปที่ 4.10 ถึง 4.11 และเมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของพัลซ์ BRM เห็นได้ว่าเป็นรูปแบบที่มีความง่ายและสะดวกต่อการสร้างเมื่อเทียบกับเทคนิคการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งเฟสเดียวและสามเฟสโดยใช้ เทคนิค PWM [3,4,6,7] สำหรับอินพุตที่เป็นความถี่และพัลซ์ BRM ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดการจ่ายพลังงานให้เข้าสู่มอเตอร์พบว่าสามารถที่จะกำหนดรูปแบบการส่งความถี่ตั้งแต่ 40 ถึง 60 เฮิตรซ์ และการส่งรูปแบบพัลซ์ BRM ละเอียดถึง 256 รูปแบบ $\left(V_{BRM0} - V_{BRM255}\right)$ โดยงานวิจัยนี้มีการกำหนดจำนวนบิต $m = 8$ สำหรับรูปแบบพัลซ์ BRM

สำหรับผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นนั้น เป็นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ให้มีความแม่นยำทั้งขณะขับโหลดที่ค่าต่างๆและขณะไร้โหลด นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาถึงเรื่องของการประหยัดพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์อีกด้วย โดยจากผลการทดลองดังตารางที่ 4.1ถึง 4.6เห็นได้ว่านี้เทคนิคการควบคุมแบบ BRM นั้นสามารถลดพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยการลดรีแอคตีฟ ลงไปได้มาก เมื่อเทียบกับการควบคุมโดยตรงและการควบคุมด้วยวงจรควบคุมแบบเฟส (Phase Control) ซึ่งถ้าพิจารณาตามคุณลักษณะสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำพบว่ามอเตอร์ดังกล่าวถูกออกแบบให้ทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อขับโหลดเต็มพิกัดและขณะทำงานตอนไร้โหลดค่าตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำประมาณ 0.1 ถึง 0.3 [3-4] นอกจากนี้ยังพบว่าขณะมอเตอร์ทำงานตอนไร้โหลดและขณะขับโหลดนั้นพลังงานที่ต้องจ่ายให้กับมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่ใช้งานซึ่งในขณะไร้โหลดเมื่อเพิ่มความถี่พลังงานที่ต้องจ่ายให้มอเตอร์ลดลง และขณะขับโหลดเมื่อเพิ่มความถี่ ส่งผลให้พลังงานที่ต้องจ่ายให้มอเตอร์มากขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมความถี่และ BRM สามารถควบคุมการจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ตามความต้องการใช้งานที่แท้จริง ส่งผลให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงและขณะไร้โหลดนั้นสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้นเป็นผลทำให้ประหยัดพลังงานที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ สำหรับคุณลักษณะสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากเทคนิคการควบคุมความถี่และ BRM แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยเป็นการเปรียบเทียบกับการควบคุมโดยตรง การควบคุมด้วยวงจรควบคุมแบบเฟสและการควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมความถี่และการผสมสัญญาณแบบ BRM

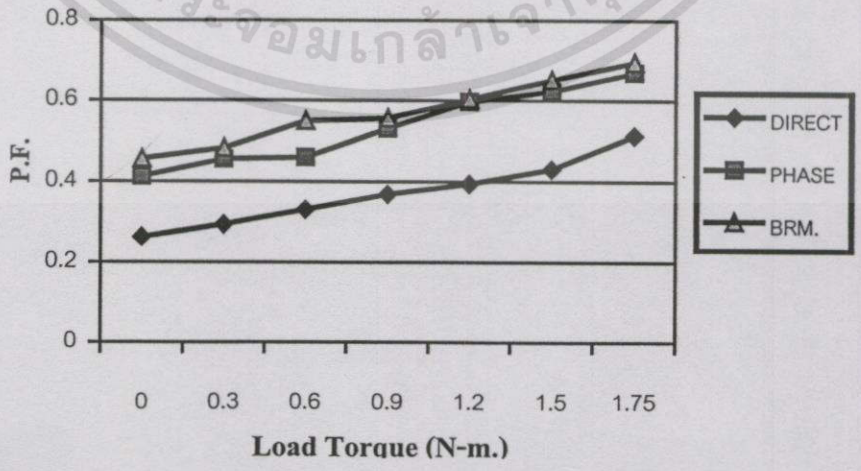
เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กราฟเปรียบเทียบกำลังรีแอกทีฟ

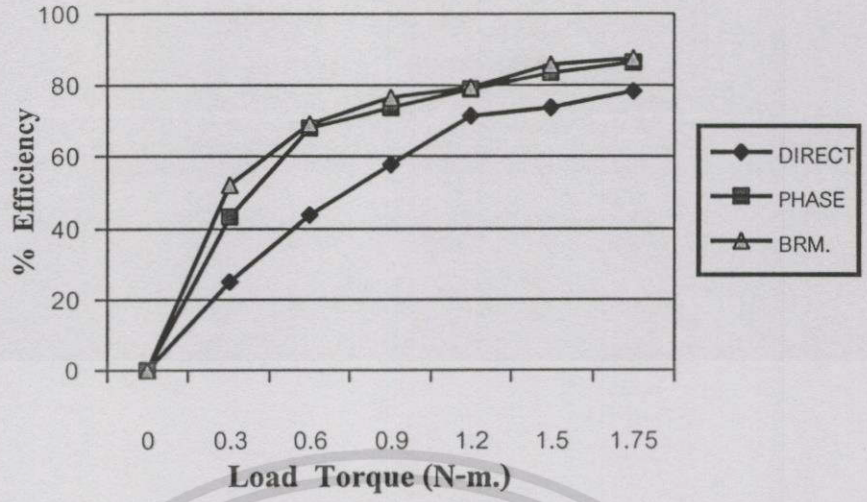


(ข) กราฟเปรียบเทียบกำลังอินพุต



(ค) กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังขณะมอเตอร์ทำงานโดยไม่มีโหลดต่ออยู่นั้น เทคนิคการควบคุมความถี่และการผสมสัญญาณแบบ BRM มีการปรับค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบโดยตรง ดังนั้นสำหรับงานที่มีการขับมอเตอร์ขณะที่ไม่มีโหลดต่ออยู่เป็นช่วงเวลานานจึงเหมาะที่จะนำระบบการควบคุมด้วยเทคนิค BRM ไปประยุกต์ใช้งาน เช่นระบบขับเคลื่อนสายพาน การควบคุมบันไดเลื่อน และงานกลึง เป็นต้น นอกจากนี้เทคนิคการควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมความถี่และการผสมสัญญาณแบบ BRM ยังสามารถลดการกระชากของกระแสกับแรงบิดเริ่มต้นหมุนได้อีกด้วย

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

สำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยเทคนิคการควบคุมแบบความถี่และ BRM ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้น ผลจากการควบคุมยังมีข้อเสียในเรื่องรูปคลื่นกระแสเนื่องจากรูปคลื่นกระแสที่ได้นั้นไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์และขณะที่มอเตอร์หมุนนั้นส่งผลทำให้อุปกรณ์ข้างเคียงทำงานผิดปกติซึ่งได้ทำการวัดค่าผลรวมฮาร์โมนิคส์(Total Harmonic:THD)พบว่ามีค่าประมาณ 15% ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก ดังนั้นแนวทางสำหรับงานวิจัยต่อไปนั้นควรมีการปรับปรุงรูปคลื่นกระแสที่ได้จากเทคนิคการควบคุมแบบ BRM ให้มีรูปร่างใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากที่สุด และ พิจารณาลดค่าผลรวมฮาร์โมนิคส์(THD)ของรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นด้วย เพื่อเป็นการเพิ่มสมรรถนะและประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] K. Ogata, Discrete - Time Control System ,Englewood Cliffs, NJ: Prentice - Hall , 1987.

[2] J.Niezenanski " Maximum pulse-position and counting errors of binary rate multipliers" Pro. IEE , Vol. 136, Pt.E, No.4, July 1989, pp 296-305.

[3] A.E. Fitqgerald ,C.Kingsley and S.D.Umans,Electrical Machinery, 5th ed. McGraw - Hill Singapore, 1992.

[4] P.C.SEN., Principles of Electrical Machines and Power Electronics , 2 nd ed., John Wiley & Sons, Inc. New York 1994.

[5] Barry N. and M^{c} Quade E., " Temperature Control using integer - Cycle Binary Rate Modulation of the ac. Maims " Proc IEEE Conf. Ind. Application Society,Houston, pp. 1793-1798, 1992

[6] Syed A. Nasar , Electric Machines and Power Systems Volume I , Electric Machines , McGraw – Hill , Inc. 1995.

[7] Malhan , Tore M. Undeland , William P. Robbins, Power Electronics , 2 nd ed., John Wiley & sons, Inc. New York 1995.

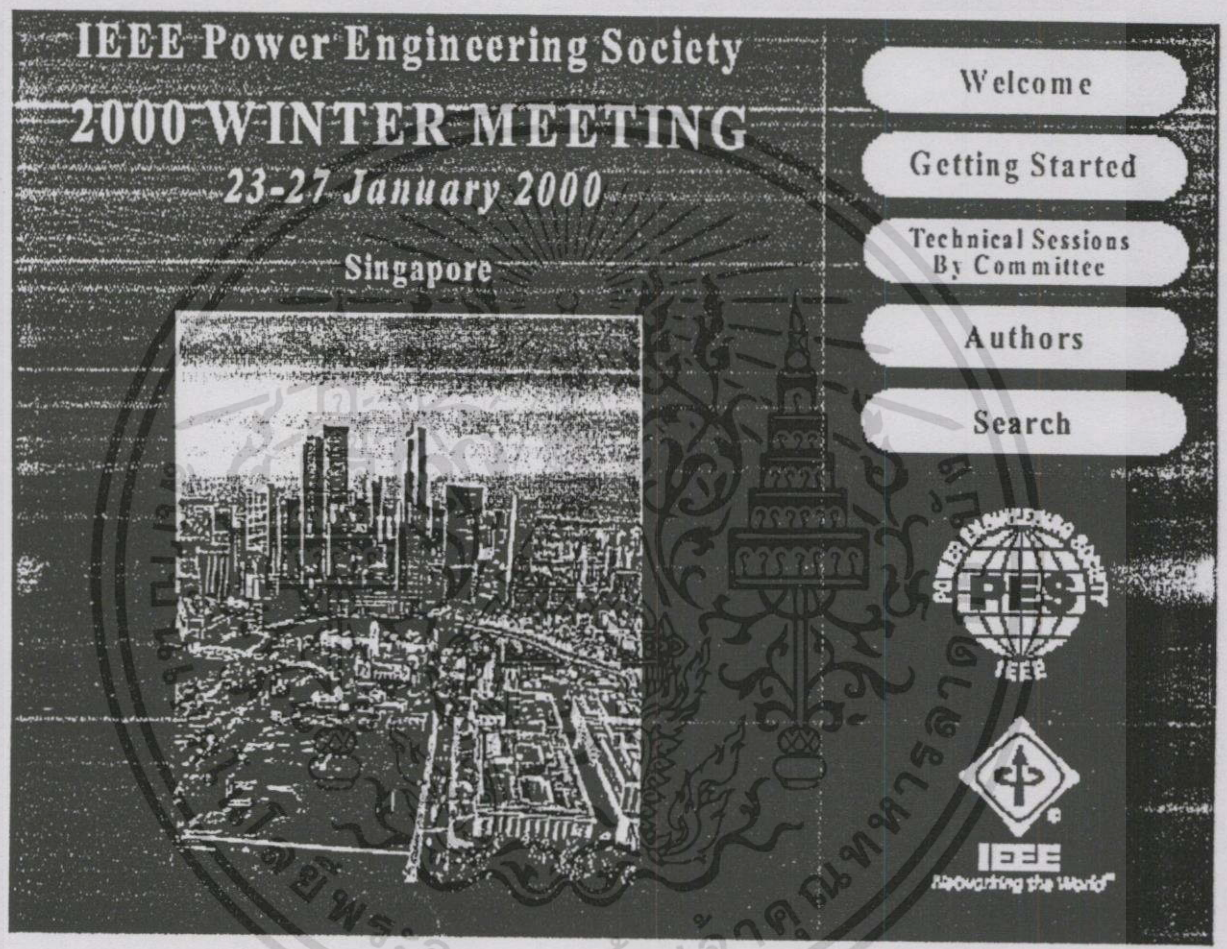
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quick Torque Controlled SPIM Using PID Controller Based On PLL Technique

V. Tipsuwanporn and A. Charean
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

W. Piyarat, T. Kittisiam, P. Thepsatorn and T. Sum-im
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Srinakarinwirot University, Nakornnayok,Thailand, Tel: 66-37-322605,
E-mail: waksin@psm.swu.ac.th

Abstract: This paper is to propose the PBRM technique by used Phase Locked Loop(PLL) and Binary Rate Multiplier(BRM) techniques combine together for control speed of single phase induction motor (SPIM). By define ac signal 50Hz from the 8 bit binary rate is generated in which Micro-controller 8031 and transmitted to control motor speed which will be selected Proportional plus Integral plus Derivative(PID) controller by considering speed error form phase locked loop method to sense and select the proper load. The system simulation is based on utilizing discrete signal and Root locus technique to analyze the stability of the system before designing. It is easy method to determine the result response of system. The PBRM can adjust Circle Criterion in digital loop by considering K ratio value between 0.179 to 1.85. Another, this PBRM technique can control response signal back to steady stage less than 1.7 second during variable load or no load.

Keywords: PLL, PID, BRM, PWM, PBRM, SPIM, quick torque, low ripple and digital control systems , stability and Ziegler Nichols technique.

I. INTRODUCTION

Generally, Single phase or 3-phase induction motor control are performed by either PWM or phase control[8]-[11]. This paper propose the technique of single phase motor control by PBRM. For this PBRM technique, we are consider the BRM technique[6],[7]. BRM signal generation is the technique of forming specific pulse signals. Number of pulse B can be calculated from (1) $k_{m-1}, k_{m-2}...k_1, k_0$ are the binary bit of B

$$B=k_m 2^m+k_{m-1}2^{m-1}.....+k_1 2^1+k_0 2^0 \qquad (1)$$

If 2^m is the number of pulse per cycle. R is the energy of each pulse in period T and $T_c=(2^m * T)$ is the cycle time thus, the average power is given by (2)

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

Since $f=\frac{1}{T}$, when pulse is transmitted at frequency of $\frac{f}{2},\frac{f}{2^2},...,\frac{f}{2^{n-1}},\frac{f}{2^n}$ depends on the binary bit of pulse B. In order to define the average maximum power during time period T_c, it is done by manipulation of waveform distribution by linear independent waveforms, that is $f_1, f_2,...,f_{128}$ each frequency are independent then combination as in equation (3)

$$f_{z^m}=M\sum_{b=0}^{2^m-1}\left\{u(t-[\frac{2^{m+1}}{2^{m+1}}-1+b\frac{2^{m+1}}{2^a}]T)\right\}-u(t-[\frac{2^{m+1}}{2^{m+1}}+b\frac{2^{m+1}}{2^a}]T) \qquad (3)$$

when $u(t)$ is unit step function
a is binary ($a=0,1,2,...,m-1$)
M is magnitude
T is pulse time

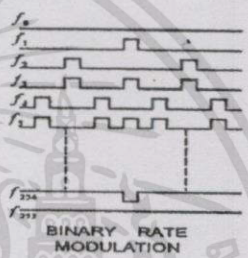


Fig 1. BRM waveform ($m=8$)

Consider Fig.1, Show the BRM waveform at each pattern from f_0 to f_{255} waveform.

II. PRINCIPLE AND THEORY

A. Structure of control system

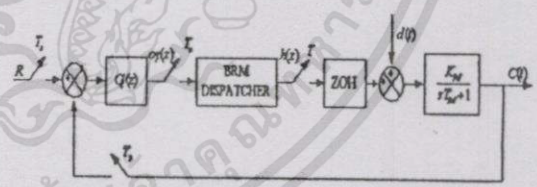


Fig.2 Structure of close loop control system.

To determine the system, It is divided into main parts. As shown in Fig.2 By define approximate ac motor transfer function[5],[7] to be the ratio of speed (ω) to the stator apply voltage (V) as

$$\frac{\omega(s)}{V(s)}=\frac{K_M}{sT_M+1} \qquad (4)$$

Define K_M is motor gain and T_M is time constant of motor. The digital control systems use phase locked loop: PLL technique are base on control[1]-[4]. Define element $G_c(z)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0-7803-5938-0/00/$10.00 (c) 2000 IEEE

to be proportional plus integral plus derivative[12], K_c is ratio of control element, T_i are integral time and T_d are derivative time. So transfer function of $G_c(z)$ are

$$G_c = K_c\left\{1+\frac{T_s}{T_i(1-z^{-1})}+\frac{T_d(1-z^{-1})}{T_s}\right\} \quad (5)$$

define T_s are sampling time equal $(2^m-1)T$ and Fig. 2, If Zero Order Hold(ZOH) element connect to motor with given transfer function G_{Mh}

$$G_{Mh}(z)=G_M(s)G_h(s)=K_M\left\{\frac{1-e^{-sT_s}}{s(T_M s+1)}\right\} \quad (6)$$

Transfer function of equation(7) on Z-transform are

$$G_{Mh}(z) = K_M\left\{\frac{1-e^{-\frac{T_s}{T_M}}}{z-e^{-\frac{T_s}{T_M}}}\right\} \quad (7)$$

from the control system in Fig.2 it can define the transfer function of close loop as in equation(9) By given BRM dispatcher to be dc gain (K_d) 1015.625 mW/bit.

$$G(z)=\frac{C(z)}{R(z)}=\frac{K_dG_c(z)G_{Mh}(z)}{1+K_dG_c(z)G_{Mh}(z)} \quad (8)$$

$$G(z)=\frac{K_cK_dK_M\left\{1+\frac{T_s}{T_i(1-z^{-1})}+\frac{T_d(1-z^{-1})}{T_s}\right\}\left\{\frac{1-e^{-\frac{T_s}{T_M}}}{z-e^{-\frac{T_s}{T_M}}}\right\}}{1+K_cK_dK_M\left\{1+\frac{T_s}{T_i(1-z^{-1})}+\frac{T_d(1-z^{-1})}{T_s}\right\}\left\{\frac{1-e^{-\frac{T_s}{T_M}}}{z-e^{-\frac{T_s}{T_M}}}\right\}} \quad (9)$$

Consider equation (9), given $a=e^{-\frac{T_s}{T_M}}$ and $K=K_cK_dK_M(1-a)$ The characteristic equation (10) is brought to analyze the stability by Root locus technique. By giving T_s, T_M, K_M, K_d Root locus is plotted by varying T_i and T_d at different values, giving the results as shown in Fig.3. For consider the response of close loop system in Fig.2, when define the high amplitude gain is right, the ripple will be low [5] and the response time in steady state to be fast.

$$z(z-a)(z-1)+K\left\{\left(\frac{T_s}{T_i}+\frac{T_d}{T_s}+1\right)z^2-\left(2\frac{T_d}{T_s}+1\right)z+\frac{T_d}{T_s}\right\}=0 \quad (10)$$

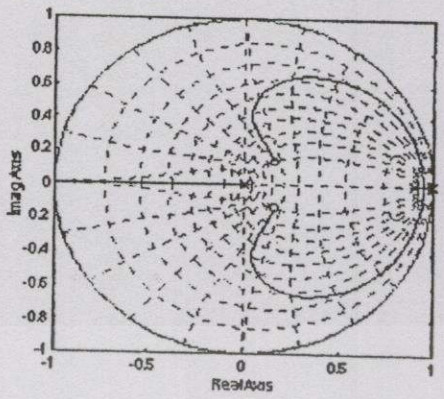


Fig. 3 Analyze of stability by Root locus.

B. Hardware design

The paper is the combination of the microcomputer and Micro-controller 8031 to generate BRM as in Fig.4 and each part function as follow.

1. Microcomputer to process and control incoming data and display on monitor.
2. Micro-controller 8031 generate BRM 8 bit and control power sensor feeding to motor.
3. Power circuit of drive circuit and amplify the output of BRM as well as supply power to motor under required condition.
4. Encoder function as the tachometer and feedback signal to control and process the data.

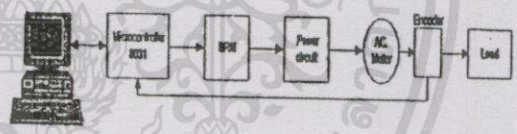


Fig. 4 Hardware structure.

From Fig. 4, we are define the K_c, T_i, T_d and setting speed value by used a microcomputer then send the setting speed value to a Micro-controller 8031. After that, It will select the proper BRM and created the BRM waveform transmit to the power circuit for controlled the SPIM. The encoder will measure and return the real motor speed value to Micro-controller 8031. then return the real speed value to a microcomputer. then it will calculated the speed value follow PID technique by consider the different error between real motor speed and setting speed value follow PLL technique [4]. The speed value result calculated will send to Micro-controller 8031 for select the proper BRM.

C. Software design

Start from program initial, checking the key which control motor speed, the key is processed, the BRM signal will control power circuit and the input and output of motor speed by PLL technique[4] as shown in Fig.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0-7803-5938-0/00/$10.00 (c) 2000 IEEE

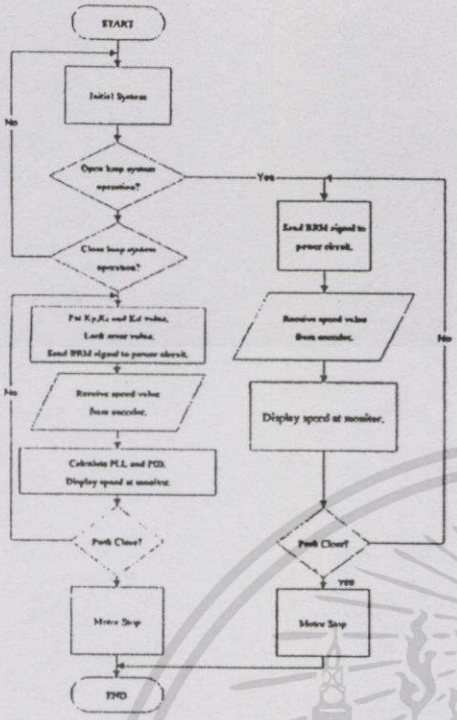
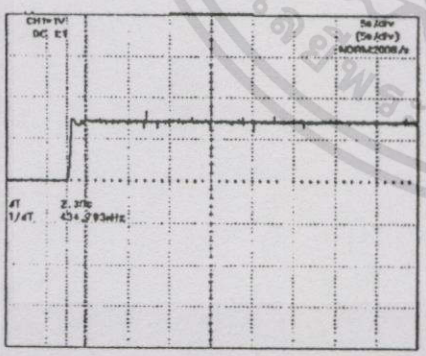


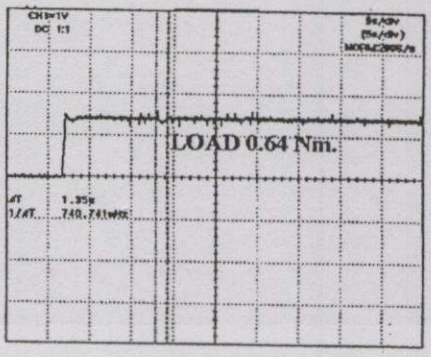
Fig. 5 Flow chart of BRM motor control.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

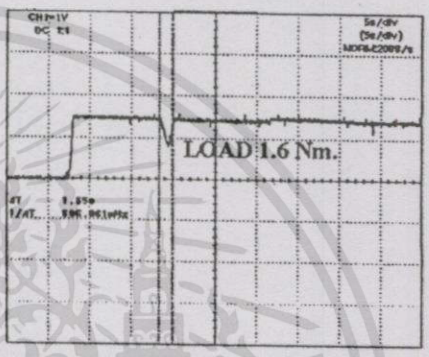
The results got from the PBRM technique of motor control by testing on induction motor of 220V/3.65A, 260 W, $P.F = 0.6$ and encoder = 1024 P/R. From an open loop, we are define $K_M = 1, T_M = 0.677$ second, $T_s = 0.667$ ms and $K_d = 91.41$ W, the values of K_c, T_i and T_d calculated By Ziegler Nichols technique based on ultimate method, with $K_c = 20$, $T_i = 0.066$ second and $T_d = 0.02$ second.



(a)



(b)



(c)

Fig.6 Relation of speed at 1410 rpm (a) No-load. (b) Load at 0.64 N.m. and (c) Load at 1.6 N.m.

On speed 1410 rpm, Fig. 6(a) show the time response at no-load. Fig. 6(b) and (c) are the time response at medium load 0.64 N.m. takes 1.35 second and maximum load 1.6 N.m. takes 1.65 second.

IV. CONCLUSION

Motor control system by BRM technique is found that the characteristic equation(10) is not complex at all and easy to study the stability. It is seen that the locus is in the circle, shows that the system is stabilized as Fig.3 Apart from that PBRM method lead the system to reach the stability is short time. Such as in Fig. 6 (a)-(c). When it is loaded at 0.64 and 1.5 N.m. The time reaching stable state in only 1.35 and 1.65 seconds are very quick torque control.

V. REFERENCE

[1] P.C. Sen, M.L and MacDonald, "Stability Analysis of Induction Motor Drives Using Phase-locked Loop Control System," IEEE Trans. Ind. Electro. Contr. Innstrum., Vol. IEC-22, no.3, August 1980, pp. 147-155.

[2] R. Moffat, R. Younker and M. Bayoumi, "Digital Phase-locked Loop for Induction Motor Speed Control," IEEE Trans. Ind., Vol. IA-15, no. 2, March/April 1979, pp. 176-182.

[3] A. Takano, " Quick Response Torque Controlled Induction Motor Drives Using Phase-locked Loop Speed Control with Disturbance Compensation," IEEE Trans. Ind. Electro., Vol.43, No.6, December 1996 ,pp. 640-644.

[4] Osama I Mohamed, Sergio Shoji and Kenzo Watanabe "A Digitally Programmable Temperature Controller Based on Phase-lock Loop" Proceedings of the 1988 Instrumentation and Measurement Technology Conference, 88CH2569-2, pp. 164-167.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0-7803-5938-0/00/$10.00 (c) 2000 IEEE

[5] T.A.Walls,Member and S.D.Sudhoff,Member "Analysis of A Single-Phase Induction Machine with Shifted Auxiliary Winding" IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 11, No. 4, December 1996, pp. 681-686.

[6] J.Niezenanski "Maximum pulse-position and counting error of binary rate multipliers," Pro. IEE, Vol. 136, Pt.E, no.4, July 1989,pp296-305.

[7] V. Tipsuwanporn , F. Cheevasuvit , W. Piyarat , P.Thepsatorn and Y. Paraken. " BRM Technique for Space Vector Decomposition Reactive Power of SPIM" Proc. IEEE Internation Conference on Power Electronics and Drive Systems, Vol. 1. pp. 547 – 551 ,1999.

[8] A.E. Fitzgerald , Charless Kingsley , Jr. and Stephen D. Umans., Electrice Machinery 4th Ed", Mc Graw Hill. 1985. pp. 247-290.

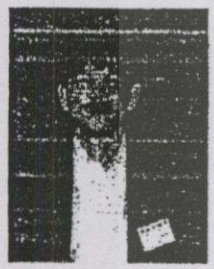
[9] A. E. Fitzgerald , C.Kingsley and S.D. Umans , Electrical Machinery, 5th ed, McGraw - Hill Singapore, 1992.

[10] P. C. Sen., Principles of Electrical Machines and Power Electronics . 2 nd ed., John Wiley & Sons. New York , 1994.

[11] Syed A. Nasar, Electric Machines and Power Systems Volume I , Electric Machines, McGraw- Hill , Inc. 1998.

[12] K. Ogata, "Discrete-Time Control System", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1981.

VI. BIOGRAPHIES



Vittaya Tipsuwanporn 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. 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.

Anuchit Charean was born in Nakornpanom, Thailand ,on Feb 4, 1972. He received the B. Ind. (Electrical) from the King Monkut's Institute of Tecnology Nort Bangkok, 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 instrumentation and process control.

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 electronic and drive.

Teeraphong Kittisiam was born in Pitsanulok, Thailand, on Mar 19, 1960. He receive the B.Ed. (Physics), M.Ed(Physics) and B.Eng.(EE) degree from Srinakharinwirot University, Thailand. He is currently an Instructor in the Department of Electrical Engineering at Srinakharinwirot University. His research interests include Microprocessor and Application.

Pinit Thepsatorn was born in phrae , Thailand ,on April 6,1957. He received the B.In.Ed (Telecommunication Engineering) from King Mongkut's Institute of Technology Lardkrabang, Thailand , in 1980. He is currently an Instructor in department of Electrical Engineering at Srinakharinwirot University . He interest to research and teaching in the field of telecommunication system , control system and electrical power control system.

Thanathip Sum-im was born in Singburi, Thailand, on Nov 12, 1974. He receive the B.Eng.(EE) degree from Srinakharinwirot University, Thailand, in 1996. He is currently an Instructor in the Department of Electrical Engineering at Srinakharinwirot University. His research interests include electrical power system , power electronic and drive.

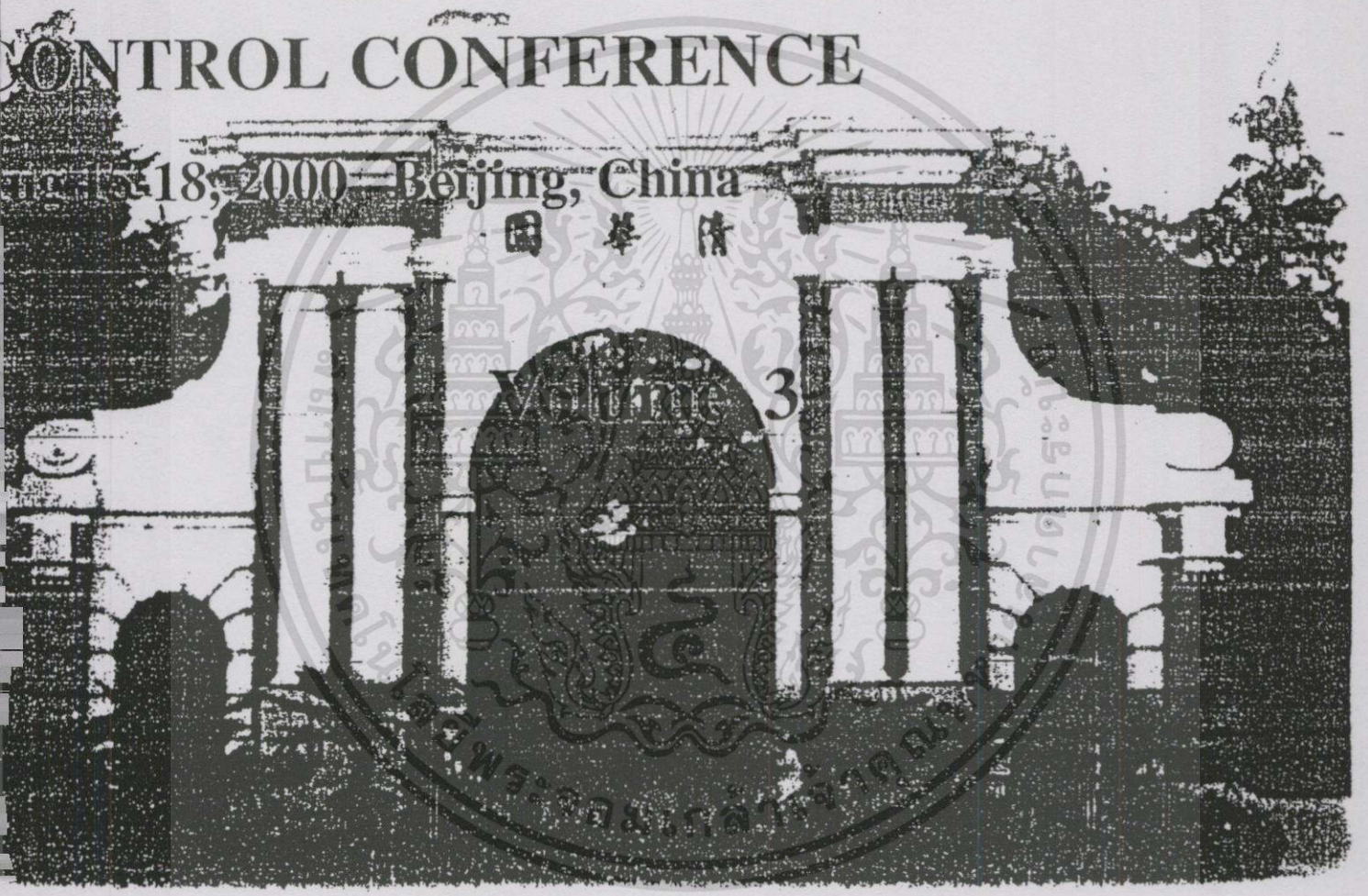
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0-7803-5938-0/00/$10.00 (c) 2000 IEEE

PROCEEDINGS
IPEMC 2000

THE THIRD INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE

Aug. 15-18, 2000 — Beijing, China



Volume 3

IEEE

IAS IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY

PELS

IEE

IEEE Catalog Number: 00EX435

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TSINGHUA UNIVERSITY

New BRM Technique for Space Vector Decomposition Reactive Power of SPIM

V. Tipsuwanporn*, A. Charean*, W. Piyarat** , T. Sum-Im** and N. Chochai***

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

Tel: (66-2) 7392406 : Ext. 102 , E-mail : ktvittay@kmitl.ac.th

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

***Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Saint John's University, Bangkok, Thailand.

***Tel: (66-2) 513 – 8571, E - mail : enkomet1@stjohn.ac.th

Abstract - *This paper presents the methodology of Single Phase Induction Motor (SPIM) speed controlling by new Binary Rate Multipliers (BRM) technique that gives rise to suitable energy supply to motor at any instant. Knowing the voltage and current, power is calculated by vector space method. The result is feedback to Proportional - Integral (PI) controller for processing by means of BRM which gives the patterns up to 256 forms. It shows fast time response of returning to normal state, both loading and no load , not exceed 1.5 seconds. The superiority of this technique is that , both apparent and reactive power decrease while running at no load and full load power factor increase up to 0.444 and 0.633 respectively. Thus, higher efficiency is achieved.*

Key words : SPIM, New BRM Technique, PI Control

1. Introduction

Because of their Simplicity, Single phase are three phase induction motor are widely used in industries compared to DC machine. It is well known that, controlling motor is not easy usually it is done by PWM. But this research topic developed from the previous reference paper [1] i.e., Binary rate multiplier (BRM) application in controlling, and mainly emphasis on responsive timing due to load variation.

2. Principle and Theory

2.1 Alternative Proposal

Generally , induction motor is designed to achieve maximum efficiency at full load [2-4], but at no load the problem arises , i.e., the power factor drops down, which in turn causes energy losses. The characteristic of torque, speed and equivalent circuit derived form "Double revolving field theory", it is seen that at no load the slip changes slightly , in calculation of the characteristics, such small amount need not be taken into account because the results do not differ [3]. This paper present is the technique of SPIM speed control by new BRM with energy saving , decreasing reactive power by vector space method with power factor increases. Both no load and running load , the lagging angle must be minimized. To determine the power and power factor , it is given in reference [1,5] i.e. apparent power S is a product norms to be written in terms of the vector representation of voltage and current.

$$S = \|V\|\|I\| \tag{1}$$

average power and reactive power are given as

$$P = V^T I \tag{2}$$

$$Q = \left(S^2 - P^2\right)^{1/2} \tag{3}$$

Where V^T denotes the transpose of V

The power factor is defined as the magnitude of average power divided by apparent power.

$$PF \triangleq \frac{|P|}{S} = \frac{|P|}{\left(P^2 + Q^2\right)^{1/2}} \tag{4}$$

When motor is running at no load , it seems to work as loaded. It operates under the following conditions, small lagging angle , higher power factor , low voltage and low current. More advantageous factor is low power dissipation I^2R .

The slip at running load is more or less the same as the slip at full load. Thus total electrical input energy is almost converted into output energy.

2.2 Principle of BRM [6-7] signal generation

BRM signal generation is the technique of forming specific pulse signals. Number of pulse B can be calculated form (5) $k_m, k_{m-1}, k_{m-2} \ldots k_1, k_0$ are the binary bit of B by define m=N-1, N are amount of bit.

$$B = k_m 2^m + k_{m-1} 2^{m-1} \ldots + k_1 2^1 + k_0 2^0 \tag{5}$$

If 2^N is the number of pulse per cycle. R is the energy of each pulse in period T(pulse time) and T_c = is the cycle time thus, the average power is given by (6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Since $f=\frac{1}{T}$, when pulse is transmitted at frequency of $\frac{f}{2},\frac{f}{2^2},\ldots\ldots,\frac{f}{2^m},\frac{f}{2^{m+1}}$ depends on the binary bit of pulse B. In order to define the average maximum power during time period T_c , it is done by manipulation of waveform distribution by Fourier analysis waveforms, that is new BRM modulate each frequency in equation (9).

$$V_1(t)=\sum_{a=0}^{m}\left(\frac{2^a}{2^{m+1}-1}.K_a\right)+\sum_{n_1=1}^{99}\sum_{b=0}^{2^a-1}\left[sin\left[\frac{\left(\frac{2^{m+1}}{2^{a+1}}+b.\frac{2^{m+1}}{2^a}\right)}{2^{m+1}-1}.n_1.\pi\right]\right.$$

$$\left.-sin\left[\frac{\left(\frac{2^{m+1}}{2^{a+1}}-1+b.\frac{2^{m+1}}{2^a}\right)}{2^{m+1}-1}.n_1.\pi\right]\right].\frac{2}{\pi.n_1}.cos(n_1.t.\omega)\Big].K_a \qquad (7)$$

$$V_2(t)=\sum_{n_1=1}^{99}2.\frac{V}{n_1\pi}(1-\cos(n_1\pi))\sin(n_1.t.\pi.f) \qquad (8)$$

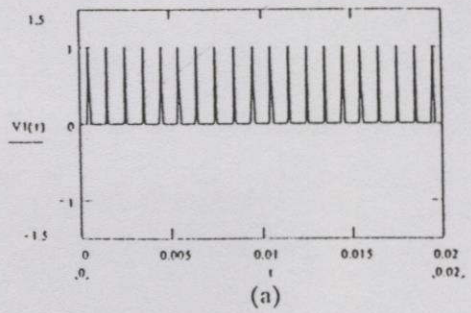
$$V_{BRM}(t)=V_1(t)*V_2(t) \qquad (9)$$

$$\omega=2*\pi*f \qquad (10)$$

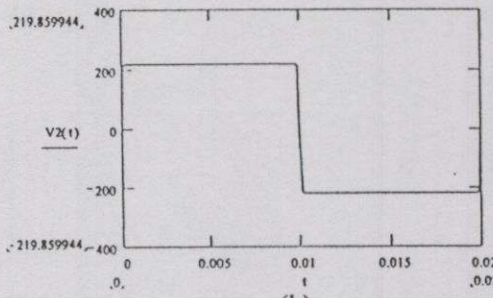
when

$V_{BRM}(t)$ is new BRM modulate voltage.
$V_1(t)$ is new BRM multiplier voltage.
$V_2(t)$ is square wave voltage.
V is magnitude of voltage.
K_a is weight of new BRM.
f is main frequency
n_1 is hamonic order of new BRM waveform

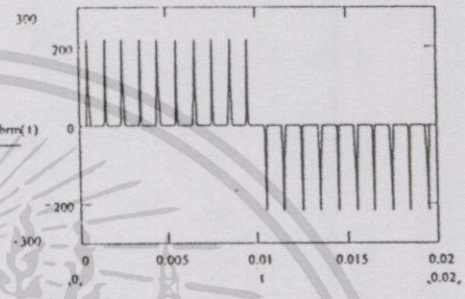
Thus for example, with V= 220, $K_3=1, K_2=0, K_1=1, K_0=0$ m = 7 and f = 50 through equation(7),(8) and (9). See the 10th new BRM waveform on fig. 1.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. at 10th new BRM waveform (a) new BRM multiplier waveform (b) unit square waveform and (c) new BRM modulate waveform.

2.3 Control System design

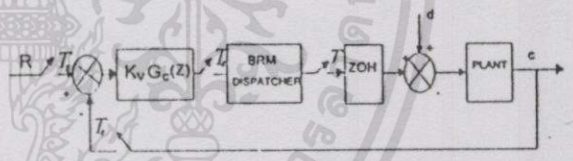


Fig.2 Block diagram of close loop system with only Tachogenerator.

Design of the control system is done by close loop as in Fig.2. $G_c(z)$ is proportional plus integral , K_c is gain control , T_i is integral time.

Hence, transfer function [8]

$$G_c(z)=K_c\{1+\frac{T_s}{T_1}\frac{z}{z-1}\} \qquad (11)$$

T_s is sampling time << $(2^N - 1)$ T, if we consider the Zero Order Hold (ZOH) connected directly with plant. Here, we assumed to be the single phase induction motor , with mechanical constant (T_p) and a fixed gain (K_p). Then the transfer function becomes.

$$G_{ph}(z)=K_p\left\{\frac{1-e^{-T_s/T_p}}{z-e^{-T_s/T_p}}\right\} \qquad (12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Each new BRM pattern has different dc gain K_d, in this experiment, K_d equals to 1019.6 mW / bit. The control and transfer function in Fig. 1 can be defined as close loop transfer function as in equation (13) where:

$$G(Z) = \frac{K_v K_d K_c K_p \left[\frac{(1+T_s/T_i)z-1}{z-1}\right] \times \left[\frac{1-e^{-T_s/T_p}}{z-e^{-T_s/T_p}}\right]}{1+K_v K_d K_c K_p \left[\frac{(1+T_s/T_i)z-1}{z-1}\right] \times \left[\frac{1-e^{-T_s/T_p}}{z-e^{-T_s/T_p}}\right]} \quad (13)$$

In equation (13), K_V denotes apparent power which equals to equation (1), we define $x = e^{-T_s/T_p}$ and $K = K_v K_c K_d K_p (1-x)$, thus the characteristics equation can be written as equation (14), K is in between 0.179 to 1.85.

$$(z-1)(z-x) + K\{(1+T_s/T_p)z-1\} = 0 \quad (14)$$

2.4 Hardware of the system

In Fig.3 signal from tachogenerator and current sensing are feedback to A/D , 8 bit analog to digital converter. TMS 320C31 Microcontroller function the duty of calculating proper K_d by vector space algorithm method in conjunction with PI controller, select the correct new BRM , transmit to gate drive circuit to the inverter for speed controlling.

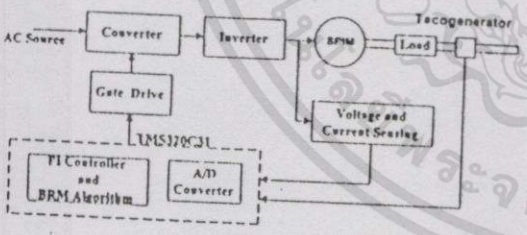


Fig. 3. System block diagram.

2.5 Software design

Fig. 4 shows flow chart of the system working for detecting error while motor is running $\omega_{error} = \omega_{ref} - \omega_M$ when detecting error, if there is some data changing such as K_c or T_i change, the program will directly operate "GO TO" such step accordingly. If no data flow in , the calculating process will function by vector space method in order to select the proper new BRM patterns and transmit to inverter according to the PI for motor control.

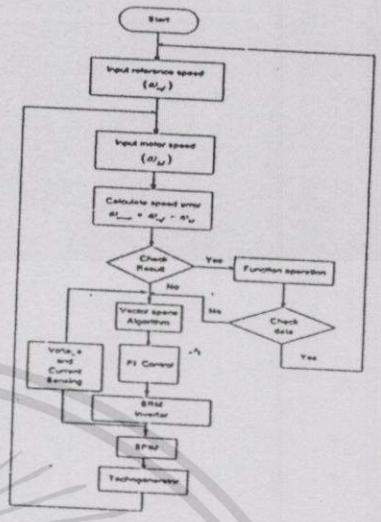


Fig.4. Flow chart of the system.

3. Experimental Results

The experiment is done on 220V,50 Hz, 2.65A 260 W 4 poles motor with PF. = 0.6 at speed of 1410 rpm. At speed 1000 rpm, the tachogenerator gives output 1 volt. The results indicate that , by direct control, phase control and new BRM technique control. By new BRM control technique we begin with $T_s = 1.334$ ms and $K_d = 91.76$ W, K_c and T_i is found by Zieqler Nichols method which equivalent to 30 (in practice while we may have to increase K_c to 1 or 2 to suite loading and 7 second respectively). The results from those three methods are compared in table 1,2 and 3 respectively. The characteristics of motor such as power consumed, power factor , efficiency of both no load and full load are shown in Fig.5

Table 1. Direct control

T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.75
N(rpm)	1435	1415	1404	1392	1375	1374	1365
V_t(V)	220	220	220	220	220	220	220
I_t(A)	2.76	2.77	2.78	2.79	2.80	2.82	2.83
P_t(W)	147	160	180	203	227	244	279
Q_t(Var)	589	588	585	579	573	570	557
S(VA)	607	609	612	614	616	620	623
PF.	0.242	0.263	0.294	0.331	0.369	0.394	0.448
P_o(W)	0	44.45	88.22	131.1	173.4	215.8	250.1
(%)η	0	27.78	49.01	64.63	76.40	88.45	89.66

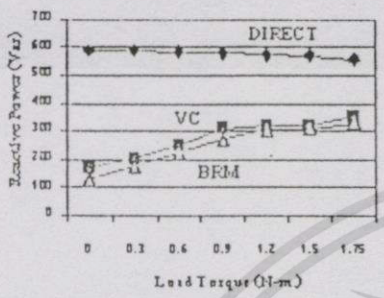
Table 2. Phase control

T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.75
N(rpm)	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410
V_t(V)	150	160	166	175	179	181	190
I_t(A)	1.20	1.40	1.70	2.00	2.10	2.20	2.35
P_t(W)	65	92	128	161	200	238	273
Q_t(Var)	168	204	251	311	319	320	354
S(VA)	180	224	282	350	376	398	447
PF.	0.36	0.412	0.455	0.460	0.531	0.597	0.609
P_o(W)	0	44.30	88.59	132.8	177.1	221.4	258.4
(%)η	0	48.18	69.21	82.54	88.60	93.06	94.65

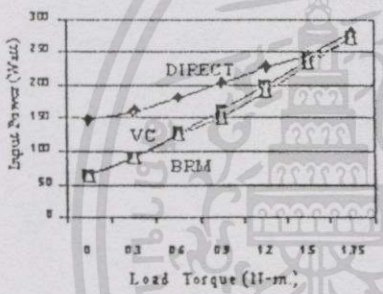
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3. new BRM technique Control

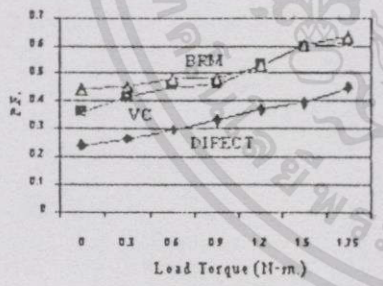
T(N-m)	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.75
N(rpm)	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410
V_t(V)	129	153	160	170	176	181	182
I_t(A)	1.10	1.29	1.60	1.83	2.04	2.14	2.30
P_t(W)	63	89	124	150	190	233	269
Q(Var)	127	176	224	272	305	309	329
S(VA)	142	197	256	311	359	387	425
PF.	0.444	0.452	0.483	0.483	0.529	0.602	0.633
P_o(W)	0	44.30	88.59	132.8	177.1	221.4	258.4
(%)η	0	49.78	71.44	88.59	93.26	95.06	96.06



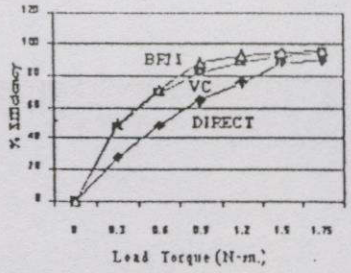
(a) Reactive power



(b) Input Power



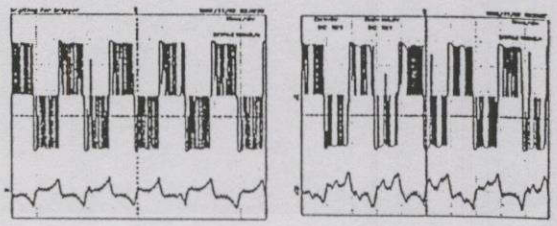
(c) Power Factor



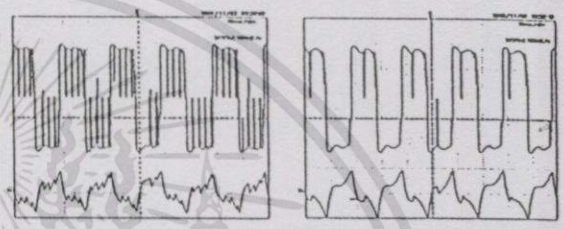
(d) Efficiency

Fig. 5. Comparison of controlling characteristics by different methods.

For Fig.6, shows the current and voltage wave form under the energy saving condition , i.e. suitable power consumption must be fulfilled for both running load and no load.

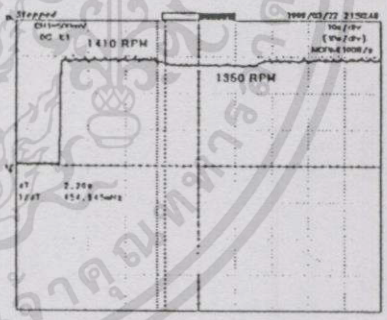


(a) No load (b) 0.6 N.m load

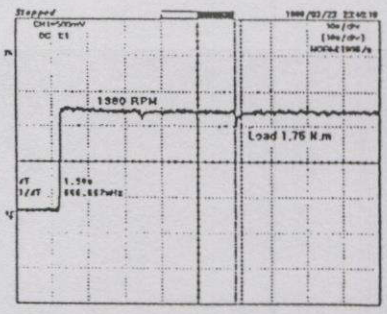


(c) 1.2 N.m load (d) 1.75 N.m load

Fig.6. Voltage(top) and Current (bottom) waveform.
(ch.1:5V/div , ch.2:100mV/A)

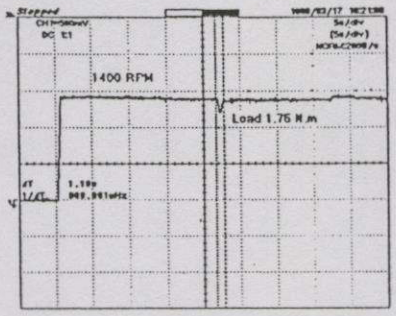


a) Speed change at no load



(b) Full load 1.75 N.m at speed 1380 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) Full load 1.75 N.m at speed 1400 rpm

Fig.7. Time response at different loads.

For Fig.7, (a) shows time response at no load, speed between 1350-1410 rpm not exceed 2.2 seconds. Fig. 7 (b) and (c) are time response at full load 1.75 N.m reference speed 1380 rpm , takes 1.5 seconds , reference speed 1400 rpm, takes 1.1 seconds .

4. Conclusion

From single phase induction motor testing as shown in Fig.7 it is scan that, new BRM controlling gives rises to fast response of returning to normal state less than 1.5 second at maximum load (reference speed 1380 rpm), apart from that power factor can also be increased and feed the proper power to motor under control. Consequently, reactive power decreases. This technique can be extended to utilizes in controlling 3-phase induction motors.

References

[1] V. Tipsuwanporn , F. Cheevasuvit , W. Piyarat , P.Thepsatorn and Y. Paraken. " BRM Technique for Space Vector Decomposition Reactive Power of SPIM" Proc. IEEE Internation Conference on Power Electronics and Drive Systems, Vol.1. pp.547 – 551 ,1999.

[2] A. E. Fitzgerald , C.Kingsley and S.D. Umans , Electrical Machinery , 5th ed, McGraw - Hill Singapore, 1992.

[3] P. C. Sen., Principles of Electrical Machines and Power Electronics . 2 nd ed., John Wiley & Sons. New York 1994.

[4] Syed A. Nasar, Electric Machines and Power Systems Volume I , Electric Machines, McGraw-Hill , Inc. 1998.

[5] Niels LaWhite and Marija D. Ilic "Vector Space Decomposition of Reactive Power for Periodic Nonsinusoidal Signals " IEEE Trans. On Circuit and System I. , Vol. 44,No.4,April 1997.

[6]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.

[7] 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.

[8] K. Ogata, Discrete – Time control System. Englewood Cliffs , NJ: Prentice - Hall , 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมส่วนที่ 1

```
;************************************************
; COMMUNICATE BETWEEN COMPUTER AND MCS-51
; ANUCHIT CHAREAN
; 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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมส่วนที่ 2

```
;*****************************************************
; BRM SIGNAL CREATION( BINARY RATE MULTIPIER )
; ANUCHIT CHAREAN
; 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
            DB 80H,40H,80H,20H,80H,40H,80H,10H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมส่วนที่ 3

```
' ************************************************************************
' SPEED COMTROL OF A SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR BY VISUAL BASIC
' ANUCHIT CHAREAN
' KMITL
' ************************************************************************
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
Public SEND As Integer
Public OVER As Integer
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Public QUAD As Integer
        Public DELAY 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()
        RELAY = 0
        ZERO = 0
End Sub

Public Sub Command1_Click()
        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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        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
            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)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        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
        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()
    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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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)
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)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
' ********************************************************************
        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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                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

```
        End If
End Sub

Private Sub Command4_Click()
        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

' ***************************************************
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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
  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
' ************************************************
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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)
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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
' ******************************************************
                    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
End Sub

Public Sub Timer1_Timer()
            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)
          MSComm2.PortOpen = False
          MSComm1.PortOpen = True
        Do Until BACK <= 300
          INDATA = MSComm1.Input
          DATA = "&H" + INDATA
          DSP = Val(DATA)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    BACK = (DSP * 2500) / 255
  Loop
    MSComm1.PortOpen = False
        CONDITION = 128
    MSComm2.PortOpen = True
    MSComm2.Output = Chr$(CONDITION)
    MSComm2.PortOpen = False

     DELAY = 3
    Do Until DELAY = 0
     DELAY = DELAY - 1
    Loop
    MSComm2.PortOpen = True
    MSComm2.Output = Chr$(QUAD)
    MSComm2.PortOpen = False

' ***********************************************
' START 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 "
  End If
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Timer2.Enabled = True
            Timer1.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
                   GoTo ERROR
                End If
                INDATA = MSComm1.Input
                DATA = "&h" + INDATA
                DSP = Val(DATA)
                Label11.Caption = DSP
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
' ****************************************
        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
         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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            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
            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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายอนุชิต เจริญ เกิดเมื่อวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2515 ที่จังหวัดนครพนม สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2538 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้